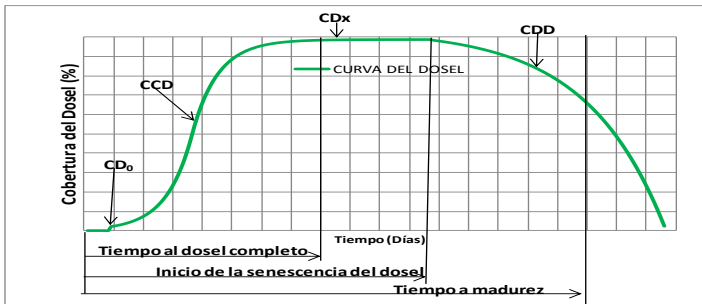


Determinación de la huella hídrica y modelación de la producción de biomasa de cultivos forrajeros a partir del agua en la Sabana de Bogotá (Colombia)



por: César Augusto Terán Chaves



2015

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE

**PROGRAMA DE DOCTORADO DE INGENIERIA HIDRÁULICA Y MEDIO
AMBIENTE**



TESIS DOCTORAL

**Determinación de la huella hídrica y modelación de la
producción de biomasa de cultivos forrajeros a partir del
agua en la sabana de Bogotá (Colombia)**

AUTOR:

CÉSAR AUGUSTO TERÁN CHAVES

DIRECTOR:

Dr. ALBERTO GARCÍA PRATS

Valencia, Julio de 2015

Determinación de la huella hídrica y modelación de la producción de biomasa de cultivos forrajeros a partir del agua en la sabana de Bogotá (Colombia)



Por:

CÉSAR AUGUSTO TERAN CHAVES

CUM LAUDE

Tribunal

Presidente: Manuel Augusto Pulido Velázquez

Secretario: José Alarcón Cabañero

Vocal: Emilio Nicolás Nicolás

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

DOCTORADO EN INGENIERIA DEL AGUA Y MEDIO AMBIENTE

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE

Julio de 2015

VALENCIA (España)

*Se han concedido muchos premios Nobel
por mostrar que el universo no es tan
simple como podíamos haberlo pensado*
Stephen Hawking
1987

A Dios supremo hacedor de tanta maravilla

*A los campesinos de los campos de mi patria
que luchan a diario con las inclemencias del clima*

*A la memoria de mis padres
A mis tres lindas niñas Aídee, Stefany y Angie*

Agradecimientos

Quiero dar un especial agradecimiento a **Dios** todopoderoso que hizo posible todo, que es el primero y el último.

El presente trabajo de investigación hace parte del proyecto: “Diseño de estrategias de irrigación y determinación de requerimientos hídricos de praderas en sistemas de producción de leche especializada del altiplano cundiboyacense”, y del programa de investigación denominado: “Desarrollo de estrategias de manejo y mejoramiento de la calidad y cantidad del recurso hídrico en sistemas de producción de leche del trópico alto de Cundinamarca y Boyacá” de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA.

El autor agradece el apoyo recibido por el “Programa de doctorado del sistema de los INIA de Iberoamérica” (España). Así como también el crédito–beca otorgado por la “Fundación para el futuro de Colombia” (COLFUTURO).

Muy especialmente a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) por su apoyo y respaldo tanto para la realización de los estudios doctorales, como para la ejecución del presente trabajo de investigación, y el uso de su infraestructura básica de investigación, laboratorios, etc.

Al Dr. Gustavo Octavio García Gómez, Coordinador de investigación y transferencia del C.I. Tibaitatá (CORPOICA), y tutor institucional, por su apoyo en todo el proceso de formación doctoral, y desarrollo del presente trabajo de investigación.

A mi director el Dr. Alberto García Prats, profesor del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, por su decidida confianza, consejos y apoyo tanto en la idea inicial como en el desarrollo del proyecto.

A mi amigo el Dr. Gilberto Alonso Murcia, por su acierto en el liderazgo administrativo y ejecución del proyecto de investigación mencionado arriba.

Al equipo de investigación del proyecto mencionado, especialmente a mi amigo el Dr. Edgar Villaneda, por sus aportes y consejos en materias de edafología y física de suelos, al Ing. Diego Aguilera, por su colaboración con la toma de información de campo, y acopio de datos, a Javier Torres por su dedicación y compromiso en el laboratorio de física de suelos, a Magali Suárez por su constancia en la captura y seguimiento de la información climática.

A los Drs. Jorge Argüelles, Ricardo Galindo, Iván Valbuena y Leonardo Sánchez, por su colaboración en los temas de estadística, fisiología, fenología de los cultivos y nutrición animal, respectivamente.

A los consultores FAO, Ings. Javier Méndez, César Cortez, Eliécer Díaz, y Fabián Villalba, por sus importantes aportes al proceso de calibración y validación del modelo AquaCrop.

A los profesores y personal del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia por la formación brindada durante el período de formación doctoral.

A la Dra. Inés Toro Suárez por confiar desde el principio en mí, por sus consejos, el ánimo que me infundió cuando no veía luz al final del túnel, sus palabras fueron la fuerza.

A mi querida esposa Aideé Pradilla, por estar siempre pendiente de mi, por soportar mis largas jornadas y ausencias día tras día, incluso sin fines de semana, por ayudarme a recargar integralmente.

A todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización del presente trabajo de investigación.

Resumen

El presente trabajo de investigación se desarrolló como una respuesta científica a las inquietudes planteadas por el gobierno nacional de Colombia y el gremio ganadero en el sentido de poder determinar los niveles o volúmenes de agua requeridos para la producción de biomasa en las pasturas o praderas y cuál es el nivel o potencial para la producción de biomasa de la región productora de leche de la sabana de Bogotá (Colombia), teniendo en cuenta sus condiciones biofísicas, y sus limitaciones agroclimáticas, de agua y las praderas existentes.

El objetivo principal estuvo orientado a la determinación de la producción de biomasa a partir del agua con base en las relaciones hídricas, los niveles de consumo de agua de las especies, y las variables del clima que inciden en la formación de biomasa y el suelo presentes y se centró específicamente en dos cultivos forrajeros los cuales fueron Avena Forrajera (*Avena sativa*, L.) y Raigrás (*Lolium perenne*).

La solución al problema se basa en el modelo AquaCrop (FAO) *Steduto et al*, (2009) el cual fue propuesto recientemente para la determinación tanto de la biomasa como de la producción agrícola a partir del agua transpirada por las especies herbáceas, en este se reúnen los avances científicos y tecnológicos que sobre el efecto del agua en la estimación de la producción de cultivos se ha logrado en los últimos años.

En el presente trabajo de investigación se han determinado las principales variables de entrada al modelo AquaCrop, para las dos especies mencionadas, por medio de investigación de campo realizada con la metodología del gradiente de *Hanks et al*, (1980), y con una nueva metodología propuesta para la determinación del estrés hídrico.

Se desarrollaron un total de 18 experimentos principales generando los niveles de producción de biomasa de avena forrajera y raigrás, determinando 32 variables o parámetros para cada uno de los cultivos que requiere el modelo para la estimación de la biomasa producida por las especies forrajeras y pastos.

El modelo AquaCrop implementa varios avances sobre el conocimiento del desarrollo de cultivos, como la separación de la evapotranspiración en

evaporación del suelo y la transpiración del cultivo, la consideración independiente de la producción del cultivo en biomasa y el índice de cosecha.

Para la determinación del desarrollo del cultivo se maneja el porcentaje de cobertura del dosel en vez del índice de área foliar (*IAF*), que tradicionalmente es considerado y que es dispendioso en su determinación. Además, el motor para la determinación de la producción del cultivo que maneja el modelo es el concepto de la productividad hídrica del cultivo (*WP*) la cual es un parámetro conservativo que redundante en mayor robustez, la productividad hídrica además se normaliza bajo dos aspectos que son el clima representado por la evapotranspiración de referencia (*ET₀*) y el contenido del *CO₂* en la atmósfera.

Estas normalizaciones permiten abstraer tanto el clima como el contenido de *CO₂* a través del tiempo, por lo cual, el motor del modelo resulta ser una herramienta fundamental para la estimación tanto de la biomasa como de la producción, incluso considerando los efectos del cambio climático global.

El modelo además maneja un número relativamente pequeño, explícito e intuitivo de parámetros y variables de entrada que requieren métodos relativamente sencillos para su determinación. Además permite la determinación de la biomasa y la producción en períodos más cortos que el ciclo del cultivo, incluso a nivel diario.

Los experimentos fueron realizados principalmente durante los años 2008 a 2013 en el Centro de Investigación Tibaitatá (*CORPOICA*) ubicado en la Sabana de Bogotá (Colombia). Para avena forrajera se desarrollaron cinco ciclos del cultivo y para raigrás se hicieron tres ciclos completos con siete, cuatro y dos cortes respectivamente.

Con base en la información establecida en campo se calibraron y validaron los cultivos de avena forrajera y raigrás para el modelo AquaCrop alcanzando ajustes de $R^2=0,92$, $RMSE=1,86t.ha^{-1}$, $NRMSE=17,67\%$, $EF=0,91$, y $d=0,97$ para avena forrajera y de $R^2=0,97$, $RMSE=0,47t.ha^{-1}$, $NRMSE=13,6\%$, $EF=0,88$, y $d=0,98$ para raigrás. Se determinaron dos cultivos sintéticos uno para cada especie, los cuales constituyen los "prototipos" que son el punto de partida para la estimación de la biomasa a partir del uso del agua en diferentes condiciones de los cultivos mencionados.

La biomasa total para avena forrajera fue determinada en $22,2t.ha^{-1}$ en promedio con valores máximos que pueden llegar a alcanzar hasta $27t.ha^{-1}$ en el entorno productivo de la sabana de Bogotá. Para raigrás la biomasa total alcanzó niveles de hasta $9t.ha^{-1}$, para el período de siembra a primer corte, y de $6t.ha^{-1}$ para los cortes posteriores al primero. La huella hídrica intrínseca para avena forrajera fue determinada en $175L.kg^{-1}$ y para raigrás en $442L.kg^{-1}$ y $431L.Kg^{-1}$.

Como resultados alternativos que fundamentan la calibración y validación del modelo se obtuvieron además, la determinación de la evapotranspiración de referencia de la región, las curvas de K_c , K_{cb} y K_e que determinan la huella hídrica de las dos especies, los desarrollos de las coberturas del dosel a través de los ciclos fenológicos de las especies estudiadas, las curvas de humedad del suelo y de biomasa en respuesta a seis niveles de riego y varias épocas de siembra y las funciones de producción de ambas especies.

El presente trabajo es novedoso por la implementación de los avances científicos y tecnológicos de AquaCrop en cultivos forrajeros, para la determinación de la biomasa a partir del agua, pues hasta la presente no habían sido calibrados y validados para el modelo, las consideraciones biofísicas especiales de los cultivos forrajeros que manejan de forma diferente elementos como la producción de cosecha y el índice de cosecha. La importancia de los cultivos estudiados, especialmente los pastos que han sido tomados como cultivos de referencia por sus características de porte y cobertura, sobre todo en lo que tiene que ver con la evapotranspiración a lo largo del ciclo del cultivo, el cual se ha tomado en general como una constante.

Se determinaron los parámetros conservativos de los cultivos de avena forrajera y raigrás, así como una muestra referenciada localmente de los parámetros y variables no conservativos de estas especies, lo que constituye a nivel mundial en un avance significativo en la calibración y validación del modelo AquaCrop para cultivos forrajeros.

Se hicieron mejoras a las metodologías empleadas con el uso de medios fotográficos y algoritmos de seguimiento y cálculo de variables fenológicas, las cuales resultaron ser menos subjetivas, más exactas y confiables, para la determinación de la cobertura vegetal, los balances hídricos, y la determinación de los coeficientes del cultivo, etc.

La trascendencia de los resultados radica en las implicaciones tecnológicas que conllevan las ulteriores simulaciones de pastos y forrajes en la producción de carne y leche en ganadería no sólo a nivel local sino mundial, con múltiples posibilidades de combinación, en sistemas de producción de carne, leche, o doble propósito y combinación de especies y razas animales. Además por las grandes extensiones de áreas que existen hoy en el mundo de cultivos forrajeros y pastos, las cuales pueden ser incorporadas en estudios locales, regionales o globales de producción de biomasa, eficiencia en el uso del agua, consumos y determinación de requerimientos hídricos, captura de carbono, y determinación de los efectos de las variaciones de las coberturas de pastos y forrajes en el cambio climático global.

Resum

El present treball de recerca es va desenvolupar com una resposta científica a les inquietuds plantejades pel govern nacional de Colòmbia i el gremi ramader en el sentit de poder determinar els nivells o volums d'aigua requerits per a la producció de biomassa en les pastures o prades i quin és el nivell o potencial per a la producció de biomassa de la regió productora de llet de la sabana de Bogotà (Colòmbia), tenint en compte les seues condicions biofísiques, i les seues limitacions agroclimàtiques, d'aigua i les prades existents.

L'objectiu principal va estar orientat a la determinació de la producció de biomassa a partir de l'aigua amb base en les relacions hídriques, els nivells de consum d'aigua de les espècies, i les variables del clima que incideixen en la formació de biomassa i el sòl presents i es va centrar específicament en dos cultius forrajeros els quals van ser Civada Forrajera (*Avena sativa*, L.) i Raigrás (*Lolium perenne*).

La solució al problema es basa en el model AquaCrop (FAO) *Steduto et al*, (2009) el qual va ser proposat recentment per a la determinació tant de la biomassa com de la producció agrícola a partir de l'aigua transpirada per les espècies herbàcies, en aquest es reuneixen els avanços científics i tecnològics que sobre l'efecte de l'aigua en l'estimació de la producció de cultius s'ha aconseguit en els últims anys.

En el present treball de recerca s'han determinat les principals variables d'entrada al model AquaCrop, per a les dues espècies esmentades, per mitjà de recerca de camp realitzada amb la metodologia del gradient d'*Hanks et al*, (1980), i amb una nova metodologia proposada per a la determinació de l'estrès hídric.

Es van desenvolupar un total de 18 experiments principals generant els nivells de producció de biomassa de civada forrajera i raigrás, determinant 32 variables o paràmetres per a cadascun dels cultius que requereix el model per a l'estimació de la biomassa produïda per les espècies forrajeras i pastures.

El model AquaCrop implementa diversos avanços sobre el coneixement del desenvolupament de cultius, com la separació de la evapotranspiració en evaporació del sòl i la transpiració del cultiu, la consideració independent de la producció del cultiu en biomassa i l'índex de collita.

Per a la determinació del desenvolupament del cultiu es maneja el percentatge de cobertura del dosel en comptes de l'índex d'àrea foliar (*IAF*), que tradicionalment és considerat i que és dispendiosos en la seua determinació. A més, el motor per a la determinació de la producció del cultiu que maneja el model és el concepte de la productivitat hídrica del cultiu (*WP*) la qual és un paràmetre conservatiu que redunda en major robustesa, la productivitat hídrica a més es normalitza sota dos aspectes que són el clima representat per la evapotranspiració de referència (ET_0) i el contingut del CO_2 en l'atmosfera.

Aquestes normalitzacions permeten abstraure tant el clima com el contingut de CO_2 a través del temps, per la qual cosa, el motor del model resulta ser una eina fonamental per a l'estimació tant de la biomassa com de la producció, fins i tot considerant els efectes del canvi climàtic global.

El model a més maneja un nombre relativament xicotet, explícite i intuïtiu de paràmetres i variables d'entrada que requereixen mètodes relativament senzills per a la seua determinació. A més permet la determinació de la biomassa i la producció en períodes més curts que el cicle del cultiu, fins i tot a nivell diari.

Els experiments van ser realitzats principalment durant els anys 2008 a 2013 en el Centre de Recerca Tibaitatá (CORPOICA) situat en la Sabana de Bogotá (Colòmbia). Per a civada forrajera es van desenvolupar cinc cicles del cultiu i per a raigrás es van fer tres cicles complets amb set, quatre i dues corts respectivament.

Amb base en la informació establida en camp es van calibrar i van validar els cultius de civada forrajera i raigrás per al model AquaCrop aconseguint ajustos de $R^2=0,92$, $RMSE=1,86t.ha^{-1}$, $NRMSE=17,67\%$, $EF=0,91$, i $d=0,97$ per a civada forrajera i de $R^2=0,97$, $RMSE=0,47t.ha^{-1}$, $NRMSE=13,6\%$, $EF=0,88$, i $d=0,98$ per a raigrás. Es van determinar dos cultius sintètics un per a cada espècie, els quals constitueixen els "prototips" que són el punt de partida per a l'estimació de la biomassa a partir de l'ús de l'aigua en diferents condicions dels cultius esmentats.

La biomassa total per a civada forrajera va ser determinada en $22,2t.ha^{-1}$ en mitjana amb valors màxims que poden arribar a aconseguir fins a $27t.ha^{-1}$ en l'entorn productiu de la sabana de Bogotá. Per a raigrás la biomassa total va aconseguir nivells de fins a $9t.ha^{-1}$, per al període de sembra a primer tall, i de $6t.ha^{-1}$ per als corts posteriors al primer. La petjada hídrica intrínseca per a civada forrajera va ser determinada en $175L.kg^{-1}$ i per a raigrás en $442L.kg^{-1}$ i $431L.kg^{-1}$.

Com a resultats alternatius que fonamenten el calibratge i validació del model es van obtenir a més, la determinació de la evapotranspiració de referència de la regió, les corbes de K_c , K_{cb} i K_e que determinen la petjada hídrica de les dues espècies, els desenvolupaments de les cobertures del dosel a través dels cicles fenològics de les espècies estudiades, les corbes d'humitat del sòl i de biomassa en resposta a sis nivells de reg i diverses èpoques de sembra i les funcions de producció d'ambdues espècies.

El present treball és nou per la implementació dels avanços científics i tecnològics de AquaCrop en cultius forrajeros, per a la determinació de la biomassa a partir de l'aigua, doncs fins a la present no havien sigut calibrats i validats per al model, les consideracions biofísiques especials dels cultius forrajeros que manegen de forma diferent elements com la producció de collita i l'índex de collita. La importància dels cultius estudiats, especialment les pastures que han sigut presos com a cultius de referència per les seues característiques de port i cobertura, sobretot en el que té a veure amb la evapotranspiració al llarg del cicle del cultiu, el qual s'ha pres en general com una constant.

Es van determinar els paràmetres conservatius dels cultius de civada forrajera i raigrás, així com una mostra referenciada localment dels paràmetres i variables no conservatius d'aquestes espècies, la qual cosa constitueix a nivell mundial en un avanç significatiu en el calibratge i validació del model AquaCrop per a cultius forrajeros.

Es van fer millores a les metodologies emprades amb l'ús de mitjans fotogràfics i algorismes de seguiment i càlcul de variables fenològiques, les quals van resultar ser menys subjectives, més exactes i confiables, per a la determinació de la cobertura vegetal, els balanços hídrics, i la determinació dels coeficients del cultiu, etc.

La transcendència dels resultats radica en les implicacions tecnològiques que comporten les ulteriors simulacions de pastures i farratges en la producció de carn i llet en ramaderia no solament a nivell local sinó mundial, amb múltiples possibilitats de combinació, en sistemes de producció de carn, llet, o doble propòsit i combinació d'espècies i races animals. A més per les grans extensions d'àrees que existeixen avui en el món de cultius forrajeros i pastures, les quals poden ser incorporades en estudis locals, regionals o globals de producció de biomassa, eficiència en l'ús de l'aigua, consums i determinació de requeriments hídrics, captura de carboni, i determinació dels efectes de les variacions de les cobertures de pastures i farratges en el canvi climàtic global.

Summary

This research was developed as a scientific response to the concerns raised by the national government of Colombia and the cattle-breeders in the sense of being able to determine the levels or volumes of water required for the production of biomass in pastures or meadows and what is the level or potential for biomass production of milk producing region of the savannah of Bogota (Colombia), considering its biophysical conditions, and their agro-climatic constraints, existing water and meadows.

The main objective was aimed at determining the biomass production from water based on water relations, levels of water consumption of the species, and climate variables that affect the formation of biomass and soil present and specifically it focused on two forage crops which were Forage Oats (*Avena sativa* L.) and ryegrass (*Lolium perenne*).

The solution to the problem is based on AquaCrop model (FAO) *Steduto et al, (2009)* which was recently proposed for the determination of both biomass and agricultural production from water transpired by herbaceous species, this is gather scientific and technological advances on the effect of water in the estimation of crop production has been achieved in recent years.

In the present research we have identified key variables AquaCrop model input for the two species mentioned, through field research conducted using the methodology gradient *Hanks et al., (1980)*, and a new methodology proposal for determining water stress.

A total of 18 major experiments were developed to generate the levels of biomass production of forage oats and ryegrass, determining 32 variables or parameters for each crop that requires the model to estimate the biomass produced by the forage and pasture.

The AquaCrop model implemented several advances on the knowledge of the development of crops such as partitioning of evapotranspiration in soil evaporation and crop transpiration, the independent consideration of the biomass crop production and harvest index.

For the determination of crop development the percentage of canopy cover is handled instead of leaf area index (*IAF*), which traditionally is considered and it is wasteful in its determination. Furthermore, the engine for determining crop production handling model is the concept of crop water productivity (*WP*) which is a conservative parameter resulting in greater strength, besides water productivity is normalized in two ways: (1) the climate are represented by the reference evapotranspiration (ET_0) and (2) the content of CO_2 in the atmosphere.

These normalization allow abstract both climate and CO_2 content over time, whereby, the engine model turns out to be an essential tool to estimate both the biomass and production, even considering the effects of global climate change.

The model also handles a relatively small, explicit and intuitive input parameters and variables that require a number relatively simple methods for determining. It also allows the determination of the biomass and production shorter than the crop cycle, including periods on a daily basis.

The experiments were conducted mainly during the years 2008-2013 in "Centro de Investigación Tibaitatá (CORPOICA)" located in the savannah of Bogota (Colombia). For forage oats were developed five cycles and ryegrass crops three complete cycles, with seven, four and two cuts were made respectively.

Based on the information provided in the field, forage oats and ryegrass crops were calibrated and validated for AquaCrop model reaching adjustments $R^2=0.92$, $RMSE=1,86t.ha^{-1}$, $NRMSE=17.67\%$, $EF=0.91$, $d=0.97$ for forage oat and $R^2=0.97$, $RMSE=0,47t.ha^{-1}$, $NRMSE=13.6\%$, $EF=0.88$, $d=0.98$ for ryegrass. Two synthetic crops were determined one for each specie, which are "prototypes" for estimating biomass by the water use in different conditions of crops.

The total biomass was determined to forage oats at $22.2 t.ha^{-1}$ on average with peaks that can reach up to $27 t.ha^{-1}$ in the production environment of the savannah of Bogota. For ryegrass total biomass reached levels of up to $9 t.ha^{-1}$ on average with peaks that can reach up to $9,9 t.ha^{-1}$ for the period from planting to first cut, and $6 t.ha^{-1}$ for others cuts. The intrinsic water footprint for fodder oats was determined in $175 L.kg^{-1}$ and 442 ryegrass $L.kg^{-1}$ and $431 L.Kg^{-1}$.

As alternative outcomes that support the calibration and validation of the model is also obtained, determining reference evapotranspiration in the region, the curves of K_c , K_{cb} and K_e determining the intrinsic water footprint of the two species, the development of canopy cover over the phenological

cycles of the species studied, the curves of soil moisture and biomass in response to six levels of irrigation and various planting and production functions of both species.

This research is novel because implemented scientific and technological advances of AquaCrop in forage crops, for the determination of the biomass by the water, because until this had not been calibrated and validated for the model, special biophysical considerations forage crops driving differently elements like crop production and harvest index. The importance of the crops studied, especially pastures that have been taken as reference crops by virtue of their size and coverage, especially in what is related to evapotranspiration throughout the crop cycle, which has been taken generally as a constant.

The conservative parameters of forage oats and ryegrass crops were determined like a sample referenced parameters and local variables nonconservative of these species, which is globally in a significant advance in calibration and validation for AquaCrop model of forage crops.

Improvements to the methodologies used were made using photographic means and tracking algorithms and calculation of phenological variables, which turned out to be less subjective, more accurate and reliable for the determination of canopy cover, water balance, and determination crop coefficients, etc.

The significance of the results is the technological implications that entail the subsequent simulations of pasture and forage in the production of meat and milk livestock not only local but global, with multiple possibilities of combination in production systems for meat, milk or dual-purpose combination of species and animal breeds. In addition to the large expanses of areas that exist today in the world of forages and pastures, which can be incorporated into local, regional or global studies biomass production, efficient water use, water consumption and determination of requirements, carbon sequestration, and determining the effects of changes in the coverage of pasture and forage in the global climate change.

Determinación de la huella hídrica y modelación de la producción de biomasa de cultivos forrajeros a partir del agua en la sabana de Bogotá (Colombia)

Contenido

Agradecimientos	V
Resumen	VII
Resum	X
Summary	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	6
1.2 Justificación	7
1.2.1 Desde el punto de vista de la utilidad	7
1.2.2 Desde el punto de vista científico.....	8
1.2.3 Desde el punto de vista tecnológico.....	8
1.2.4 Desde el punto vista de la eficiencia	9
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo Principal.....	10
1.3.2 Objetivos Específicos.....	10
1.4 Metodología general y estructura de la tesis	10
1.5 Porqué es novedoso este proyecto?	12
2. MODELACIÓN DE CULTIVOS	15
2.1 Modelos de Simulación	15
2.2 El Modelo AquaCrop	19
2.2.1 Características del modelo.....	20
2.2.2 Ventajas del modelo	24
2.2.3 Limitaciones del modelo.....	27
2.2.4 Cálculos y algoritmos más relevantes del modelo	29
2.2.4.1 Balance hídrico	30

2.2.4.2	Sub – rutina de redistribución y drenaje.....	33
2.2.4.3	Sub – rutina de escorrentía superficial	34
2.2.4.4	Sub - rutina de infiltración	35
2.2.4.5	Sub – rutina de evapotranspiración	36
2.2.4.5.1	Sub – rutina de evaporación	37
2.2.4.5.2	Evaporación real del suelo (E)	39
2.2.4.5.3	La transpiración del cultivo (Tr).....	41
2.2.4.6	Proceso de extracción de agua del suelo	46
2.2.5	Simulación de los desarrollos agronómicos del cultivo	47
2.2.5.1	Desarrollo del dosel.....	47
2.2.5.2	Expansión de la zona de raíces	51
2.3	Huella hídrica	52
2.3.1	Productividad hídrica del cultivo.....	56
2.3.2	Productividad hídrica normalizada del cultivo (WP*).....	56
2.3.3	Ajuste de la productividad hídrica normalizada WP* para CO2.....	57
2.3.4	Productividad hídrica normalizada con ajustes completos	57
2.4	Producción de biomasa.....	57
2.4.1	Ajuste de la producción de biomasa a la temperatura del aire	58
2.4.2	Producción de biomasa aérea entre cortes	59
2.5	Índice de cosecha.....	59
2.5.1	Construcción del índice de cosecha para cultivos herbáceos de hoja	60
2.5.2	Índice de cosecha para pastos y forrajes	61
2.6	Estrés hídrico.....	61
2.6.1	Estrés en la etapa reproductiva.....	64
2.6.2	Estrés en la apertura de estomas.....	66
2.6.3	Estrés en la polinización	68
2.6.4	Variables de estrés hídrico consideradas por AquaCrop.....	69
2.6.4.1	Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral superior	69
2.6.4.2	Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral inferior	69
2.6.4.3	Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para la expansión del dosel.....	70
2.6.4.4	Umbral de agotamiento de agua en el suelo para control estomático - Umbral superior	71
2.6.4.5	Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para control estomático.....	72
2.6.4.6	Umbral de agotamiento de agua en el suelo para senescencia del dosel - Umbral superior	72
2.6.4.7	Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para senescencia del dosel.....	72
2.7	Variables y parámetros de entrada al modelo AquaCrop	73
2.7.1	Datos climáticos.....	73

2.7.2	Características del cultivo	73
2.7.3	Parámetros conservativos y de usos específicos.....	74
2.7.3.1	Umbral de temperatura del aire	77
2.7.3.2	Desarrollo de la cobertura del dosel	79
2.7.3.3	Floración o inicio de formación de la cosecha.....	82
2.7.3.4	Desarrollo de la zona de raíces.....	83
2.7.3.5	Transpiración del cultivo	85
2.7.3.6	Producción de biomasa y formación de cosecha	86
2.7.3.7	Índice de cosecha	86
2.7.3.8	Estrés de temperatura del aire	91
2.8	Resultados del modelo AquaCrop.....	92
3.	METODOLOGÍA.....	94
3.1	Experimentación en campo	94
3.1.1	Caracterización del sitio experimental.....	95
3.1.2	Antecedentes del Lote	95
3.1.3	Suelos.....	96
3.1.4	Clima.....	97
3.1.5	Infraestructura	99
3.2	Materiales agrícolas usados	99
3.3	Metodología experimental usada	100
3.3.1	Diseño del sistema de riego.....	101
3.3.2	Diseño del sistema de drenaje.....	106
3.3.3	Diseño estadístico	106
3.3.4	Procedimientos de campo	108
3.3.4.1	Análisis químicos y fertilización	108
3.3.4.2	Análisis físicos.....	110
3.3.4.2.1	Densidad aparente	110
3.3.4.2.2	Retención de humedad	111
3.3.4.2.3	Infiltración del suelo	111
3.3.4.3.4	Conductividad hidráulica saturada.....	112
3.3.4.3.5	Humedad del suelo y calibración del TDR	112
3.4	Instalación de los experimentos en campo	114
3.4.1	Experimentos realizados.....	115
3.4.2	Siembra de raigrás (<i>Lolium perenne</i>)	115
3.4.3	Siembra de avena forrajera (<i>Avena sativa</i>)	116
3.5	Toma de información en campo y sistematización.....	117
3.5.1	Variables previstas	117
3.5.2	Evapotranspiración de referencia.....	121
3.5.3	Balance hídrico y cálculo de Kc, Kcb y Ke	121
3.5.4	Metodología del riego	123
3.5.5	Sistematización de la información.....	130

3.6 Metodología para la determinación de los parámetros y variables del cultivo para el modelo AquaCrop.....	131
3.6.1 Temperaturas base y corte	131
3.6.2 Cobertura de la superficie del suelo por una semilla individual al 90% de emergencia (Cs).....	132
3.6.3 Número de plantas por hectárea.....	133
3.6.4 Tiempo de siembra a emergencia.....	134
3.6.5 Coeficiente de crecimiento del dosel.....	134
3.6.6 Máxima cobertura del dosel.....	135
3.6.7 Tiempo de siembra a inicio de senescencia.....	135
3.6.8 Coeficiente de declinación del dosel.....	136
3.6.9 Tiempo de siembra a madurez.....	136
3.6.10 Tiempo de siembra a floración.....	136
3.6.11 Longitud del estado de floración.....	137
3.6.12 Determinancia del cultivo (unión/separación de floración).....	137
3.6.13 Profundidad de raíz mínima efectiva.....	138
3.6.14 Profundidad de raíz máxima efectiva.....	139
3.6.15 Factor de forma que describe la zona de expansión de la raíz.....	139
3.6.16 Tiempo desde siembra a la máxima profundidad de raíces.....	140
3.6.17 Coeficiente del cultivo cuando el dosel está completo pero previo a la senescencia.....	141
3.6.18 Factor de declinación del cultivo.....	141
3.6.19 Efecto de cobertura del dosel sobre la reducción de evaporación del suelo en el estado de estación tardía.....	142
3.6.20 Productividad hídrica normalizada para ETo y CO2.....	143
3.6.21 Productividad hídrica normalizada durante la formación de la cosecha.....	144
3.6.22 Índice de cosecha de referencia.....	145
3.6.23 Construcción del índice de cosecha.....	145
3.6.24 Sumatoria de ETo durante el período de estrés que puede ser excedido antes de la activación de la senescencia.....	146
3.6.25 Porcentaje de humedad en el punto anaeróbico en %Vol (con referencia a saturación).....	147
3.7 Estrés hídrico	148
3.7.1 Descripción del sitio experimental.....	148
3.7.2 Materiales utilizados.....	148
3.7.3 Diseño experimental.....	149
3.7.4 Variables y parámetros de AquaCrop sobre estrés hídrico.....	152
3.7.4.1 Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral superior.....	152
3.7.4.2 Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral inferior.....	152
3.7.4.3 Factor de forma para estrés hídrico para la expansión del dosel.....	153

3.7.4.4 Umbral de agotamiento de agua en el suelo para control estomatal - Umbral superior.....	153
3.7.4.5 Factor de forma para estrés hídrico para control estomático.....	154
3.7.4.6 Umbral de agotamiento de agua en el suelo para senescencia del dosel - Umbral superior	155
3.7.4.7 Factor de forma para estrés hídrico para senescencia del dosel.....	156

4. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA AVENA FORRAJERA Y RAIGRAS.158

4.1 Aspectos Preliminares	158
4.1.1 Módulo de Clima	159
4.1.2 Módulo de Cultivo.....	159
4.1.3 Módulo de Perfil del Suelo	160
4.1.4 Módulo de Irrigación	160
4.1.5 Módulos de Manejo de Campo y Nivel Freático	160
4.2 Análisis de sensibilidad de variables.....	161
4.3 Proceso de calibración	161
4.4 Proceso de validación.....	166
4.5 Modelo PEST	166
4.6 Indicadores estadísticos Usados	170
4.6.1 Coeficiente de determinación (R ²).....	170
4.6.2 Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE)	171
4.6.3 Raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado (NRMSE)	171
4.6.4 Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF).....	171
4.6.5 Índice de ajuste de Willmott (d).....	172
4.7 Simulación de otras condiciones agroecológicas para evaluar la sensibilidad del cultivo al complejo Suelo – Agua - Clima.....	172
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	174
5.1 Caracterización de los experimentos.....	174
5.2 Suelos	174
5.2.1 Análisis químicos.....	174
5.2.2 Análisis físicos e hidrodinámicos.....	176
5.3 Clima	180
5.4 Ciclos fenológicos.....	182
5.4.1 Avena forrajera (Avena sativa, L.) var. Cayuse	182
5.4.2 Raigrás (Lolium perenne) var. Bestfor plus	183

5.5 Análisis estadísticos	185
5.5.1 Análisis para avena forrajera	186
5.5.2 Análisis para raigrás	189
5.6 Resultados experimentales	196
5.6.1 Evapotranspiración de referencia.....	197
5.6.2 Huella hídrica, curvas de Kcb, Kc, y Ke.....	198
5.6.3 Humedad del suelo.....	200
5.6.4 Cobertura del dosel	205
5.6.5 Curvas de biomasa y producción.....	207
5.6.6 Funciones de producción, implicaciones económicas de la huella hídrica.....	216
5.6.6.1 Para avena forrajera	217
5.6.6.2 Para raigrás.....	218
5.7 Cálculo y generación de las variables y parámetros para AquaCrop.....	220
5.7.1 Temperaturas base y corte	225
5.7.2 Cobertura de la superficie del suelo por una semilla individual al 90% de emergencia.....	226
5.7.3 Número de plantas por hectárea.....	226
5.7.4 Tiempo de siembra a emergencia.....	227
5.7.5 Coeficiente de crecimiento del dosel.....	227
5.7.6 Máxima cobertura del dosel	230
5.7.7 Tiempo de siembra a inicio de senescencia	231
5.7.8 Coeficiente de declinación del dosel	233
5.7.9 Tiempo de siembra a madurez.....	237
5.7.10 Tiempo de siembra a floración.....	237
5.7.11 Longitud del estado de floración	238
5.7.12 Cultivo determinado unido con floración.....	238
5.7.13 Profundidad de raíz mínima efectiva	239
5.7.14 Profundidad de raíz máxima efectiva	241
5.7.15 Factor de forma que describe la expansión de la raíz.....	241
5.7.16 Tiempo de siembra a la máxima profundidad de raíces.....	242
5.7.17 Coeficiente del cultivo cuando el dosel está completo pero previo a senescencia.....	242
5.7.18 Factor de declinación del cultivo	243
5.7.19 Efecto de la cobertura del dosel sobre la reducción de la evaporación del suelo en el estado de estación tardía.....	245
5.7.20 Productividad hídrica normalizada	248
5.7.21 Productividad hídrica normalizada durante la formación de la cosecha.....	250
5.7.22 Índice de cosecha de referencia	250
5.7.23 Construcción del índice de cosecha.....	251

5.7.24 Sumatoria de ET_0 durante el periodo de estrés que puede ser excedido antes de la activación de la senescencia	252
5.7.25 Punto anaeróbico del cultivo	252
5.8 Estrés hídrico	255
5.8.1 Diferencias entre tratamientos. Análisis Estadístico	255
5.8.1.1 Avena forrajera	255
5.8.1.2 Raigrás	256
5.8.2 Evolución temporal de las variables respuesta	257
5.8.3 Interpretación del Coeficiente de estrés hídrico.....	260
5.8.4 Ajuste de los coeficientes de estrés hídrico para AquaCrop	263
6. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA AVENA FORRAJERA Y RAIGRÁS.	266
6.1 Análisis de sensibilidad de variables.....	266
6.2 Calibración del modelo para cultivos forrajeros	270
6.2.1 Caso Avena Forrajera.....	270
6.2.2 Caso Raigrás	274
6.2.3 Comparaciones	278
6.3 Validación	279
6.3.1 Caso avena forrajera	279
6.3.2 Caso Raigrás	280
6.4 Simulación de otras condiciones agroecológicas para evaluar la sensibilidad del cultivo al complejo Suelo – Agua - Clima.....	282
6.4.1 Comportamiento del modelo AquaCrop con la variación de diferentes láminas totales de riego aplicadas al cultivo	282
6.4.2 Comportamientos del modelo AquaCrop considerando varios niveles de fertilización del suelo.	284
6.4.3 Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes texturas del suelo.	286
6.4.4 Comportamiento del modelo AquaCrop considerando varios niveles freáticos del suelo.	289
6.5 Articulación de los resultados obtenidos.....	291
6.5.1 Integración para la Avena Forrajera	291
6.5.2 Integración para Raigrás.....	293
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	296
7.1 Respecto a la Sabana de Bogotá como ecosistema experimental.....	296
7.2 Respecto al Modelo AquaCrop (FAO)	297

7.3	Respecto a la metodología empleada	299
7.4	Respecto a los resultados obtenidos	300
7.5	Respecto de las respuestas de los forrajes estudiados al estrés hídrico	302
7.6	Respecto de la calibración y validación del modelo AquaCrop para avena forrajera y raigrás.....	303
7.7	Respecto al logro de los objetivos planteados	304
7.8	Proyecciones de Investigación en el área	306
8.	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	308
	<i>ANEXO A. PERFIL TAXONÓMICO DE LA SERIE DE SUELOS EN LA QUE SE DESARROLLARON LOS EXPERIMENTOS</i>	326
	<i>ANEXO B. LA SABANA DE BOGOTÁ COMO ECOSISTEMA EXPERIMENTAL</i>	332
	B.1 Justificación	332
	B.2 La cuenca de sabana de Bogotá	332
	B.2.1 Descripción General.....	333
	B.2.2 Administrativa	335
	B.2.3 Complejo Físico	335
	B.2.3.1 Morfología.....	336
	B.2.3.2 Litofases y suelo	336
	B.2.3.2 Clima	336
	B.2.4 Vegetación y usos del suelo	337
	B.2.4.1 Vegetación actual.....	337
	B.2.4.2 Vegetación potencial	338

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Avances en calibración y validación del modelo AquaCrop.....	20
Tabla 2.2 Valores indicativos de CN para varias Clases de Humedad Antecedente (CHA) II y sus correspondientes valores para CHA I (seco) y III (húmedo) para varias tasas de infiltración.....	35
Tabla 2.3 Clases, correspondientes a valores por defecto y rangos para el coeficiente “a” (efecto de estrés positivo sobre IC).....	66
Tabla 2.4 Clases, correspondientes a valores por defecto y rangos para el coeficiente “b” (efecto de estrés negativo sobre IC).	68
Tabla 2.5 Clases y valores correspondientes por defecto para los umbrales superiores agotamiento de agua en el suelo para cierre estomático.....	71
Tabla 2.6 Lista de los parámetros del cultivo requeridos por el Modelo AquaCrop y sus tipos.....	75
Tabla 2.7 Lista de los parámetros del cultivo requeridos por el Modelo AquaCrop y sus tipos (Continuación).	76
Tabla 2.8 Temperaturas críticas para las especies de avena, y raigrás reportadas por la base de datos.	78
Tabla 2.9 Clases graduadas para el efecto positivo máximo de estrés de pre-antesis sobre el IC.....	89
Tabla 2.10 Clases, correspondientes a valores por defecto y rangos de estrés por aireación.....	90
Tabla 3.1 Promedios de los principales elementos climáticos que caracterizan el clima del sitio experimental.....	97
Tabla 3.2 Requerimientos nutricionales en Kg.ha ⁻¹ de las especies estudiadas.....	109
Tabla 3.3 Experimentos desarrollados dentro del presente trabajo. C.I. Tibaitatá, (Sabana de Bogotá, Colombia).....	115
Tabla 3.4 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 de Avena forrajera.	123
Tabla 3.5 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 2 de Avena forrajera.	124

Tabla 3.6 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 3 de Avena forrajera.	125
Tabla 3.7 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 4 de Avena forrajera.	125
Tabla 3.8 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 corte 1 de raigrás.	126
Tabla 3.9 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 corte 2 de raigrás.	126
Tabla 3.10 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 corte 3 de raigrás.	127
Tabla 3.11 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 corte 4 de raigrás.	127
Tabla 3.12 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 corte 5 de raigrás.	128
Tabla 3.13 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 corte 6 de raigrás.	128
Tabla 3.14 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 corte 7 de raigrás.	129
Tabla 3.15 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 2 corte 1 de raigrás.	129
Tabla 3.16 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 2 corte 2 de raigrás.	130
Tabla 3.17 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 2 corte 3 de raigrás.	130
Tabla 3.18 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 2 corte 4 de raigrás.	130
Tabla 3.19 Tratamientos de estrés hídrico desarrollados en el experimento para avena forrajera (CI Tibaitatá, 2012/2013).	150
Tabla 3.20 Tratamientos de estrés hídrico realizados en el experimento para raigrás durante el ciclo de siembra a primer corte (C.I. Tibaitatá, 2012/2013).	150
Tabla 3.21 Tratamientos de estrés hídrico realizados en el experimento para raigrás durante el ciclo de primer a segundo corte (C.I. Tibaitatá, 2012/2013).	151
Tabla 5.1 Resultado del laboratorio de química de suelos para fertilidad de los lotes experimentales destinados a avena forrajera y raigrás.	175
Tabla 5.2 Análisis de acidez y salinidad del lote a experimentar.	176
Tabla 5.3 Características física e hidrodinámicas del suelo en el que se realizaron los experimentos. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.	177

Tabla 5.4 Resultados de la determinación del PMP por el método del girasol para los suelos de los experimentos realizados.....	178
Tabla 5.5 Resultados del análisis de infiltración realizado en el lote experimental, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, (Colombia).	179
Tabla 5.6 Interpretación de la velocidad de infiltración de los suelos determinada por varios autores con base en la infiltración básica.	180
Tabla 5.7 Estados fenológicos de los ciclos experimentales de avena forrajera realizados en este estudio.....	182
Tabla 5.8 Estados fenológicos para los cultivos de raigrás 1 y 2 desde siembra hasta el primer corte.....	183
Tabla 5.9 Estados fenológicos para los cortes posteriores al primero de raigrás durante el primer cultivo.....	184
Tabla 5.10 Estados fenológicos para los cortes posteriores al primero de raigrás durante el segundo cultivo.	184
Tabla 5.11 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo de avena forrajera.....	186
Tabla 5.12 Resultados del análisis estadístico para el segundo cultivo de avena forrajera.....	187
Tabla 5.13 Resultados del análisis estadístico para el tercer cultivo de avena forrajera.....	187
Tabla 5.14 Resultados del análisis estadístico para el cuarto cultivo de avena forrajera.....	188
Tabla 5.15 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo y primer corte de raigrás.....	190
Tabla 5.16 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo y segundo corte de raigrás.....	190
Tabla 5.17 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo y tercer corte de raigrás.....	191
Tabla 5.18 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo y cuarto corte de raigrás.....	191
Tabla 5.19 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo y quinto corte de raigrás.....	192
Tabla 5.20 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo y sexto corte de raigrás.....	193
Tabla 5.21 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo y séptimo corte de raigrás.....	193

Tabla 5.22 Resultados del análisis estadístico para el segundo cultivo y primer corte de raigrás.....	194
Tabla 5.23 Resultados del análisis estadístico para el segundo cultivo y segundo corte de raigrás.....	194
Tabla 5.24 Resultados del análisis estadístico para el segundo cultivo y tercer corte de raigrás.....	195
Tabla 5.25 Resultados del análisis estadístico para el segundo cultivo y cuarto corte de raigrás.....	196
Tabla 5.26 Fechas de siembra y aforo para los cultivos 1 y 2 de raigrás realizadas en este estudio durante los años 2009 y 2010, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.....	214
Tabla 5.27 Parámetros y variables determinados experimentalmente, como base para las entradas requeridas por el modelo AquaCrop para avena forrajera (Parte inicial).....	221
Tabla 5.28 Parámetros y variables determinados experimentalmente, como base para las entradas requeridas por el modelo AquaCrop para avena forrajera. (Continuación)	222
Tabla 5.29 Parámetros y variables determinados experimentalmente, como base para las entradas requeridas por el modelo AquaCrop para raigrás.....	223
Tabla 5.30 Parámetros y variables determinados experimentalmente, como base para las entradas requeridas por modelo AquaCrop para raigrás. (Continuación)	224
Tabla 5.31 Temperaturas base y corte para las especies avena forrajera y raigrás adoptadas en este estudio con base en la información de la base de datos de ECOCROP (FAO, 1993-2007).	225
Tabla 5.32 Rango de variación de la tasa de crecimiento del dosel para avena forrajera crecimientos máximos.	229
Tabla 5.33 Rango de variación de la tasa de crecimiento del dosel para raigrás. Crecimientos promedios máximos.	230
Tabla 5.34 Máxima cobertura del dosel (%) alcanzada para la avena forrajera.	230
Tabla 5.35 Máxima cobertura del dosel (%) para los diferentes cultivos y cortes de raigrás.....	231
Tabla 5.36 Tiempo de siembra a senescencia para avena forrajera.	232
Tabla 5.37 Tiempo de siembra a máximo desarrollo del cultivo para raigrás.	232
Tabla 5.38 Clases correspondientes a valores por defecto y rangos para declinación del dosel expresado en días para lograr la senescencia total.	237

Tabla 5.39 Coeficientes del cultivo cuando el dosel está completo pero previo a senescencia para avena forrajera. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.	243
Tabla 5.40 Coeficientes del cultivo cuando el dosel está completo pero previo a senescencia para raigrás. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.....	243
Tabla 5.41 Resumen de los análisis estadísticos de las variables observadas en el experimento de estrés hídrico para avena forrajera.	256
Tabla 5.42 Resumen de los análisis estadísticos de las variables observadas del experimento de estrés hídrico para raigrás (siembra a primer corte).....	257
Tabla 5.43 Resumen de los análisis estadísticos de las variables observadas del experimento de estrés hídrico para raigrás (primer corte a segundo corte). ...	257
Tabla 5.44 Resultados del análisis de estrés hídrico para avena forrajera.....	264
Tabla 5.45 Resultados del análisis de estrés hídrico para raigrás	264
Tabla 6.1 Análisis de sensibilidad para las variables de entrada al modelo AquaCrop - Caso avena forrajera. (Muestra sobre base de variables calibradas).	267
Tabla 6.2 Análisis de sensibilidad para las variables de entrada al modelo AquaCrop - Caso raigrás primer corte. (Muestra sobre base de variables calibradas).	268
Tabla 6.3 Análisis de sensibilidad para las variables de entrada al modelo AquaCrop - Caso raigrás cortes posteriores. (Muestra sobre base de variables calibradas).	269
Tabla 6.4 Valores ajustados para el cultivo de avena forrajera resultados del proceso de ajuste del modelo AquaCrop.	272
Tabla 6.5 Valores ajustados para el cultivo de raigrás resultados del proceso de ajuste del modelo AquaCrop.	276
Tabla 6.6 Indicadores estadísticos alcanzados en la calibración de avena forrajera y raigrás.....	279
Tabla 6.7 Indicadores estadísticos de ajuste del modelo AquaCrop alcanzados en la calibración y validación de avena forrajera.....	279
Tabla 6.8 Indicadores estadísticos de ajuste del modelo AquaCrop alcanzados en la calibración y validación de raigrás todos los cortes (Cn) y cultivos (RCn).	281
Tabla 6.9 Indicadores y características hidrofísicas de los suelos considerados para el análisis de sensibilidad en la producción de biomasa de cultivos forrajeros. ...	287
Tabla 6.10 Tiempos promedio de los estados fenológicos de los cultivos de avena forrajera y raigrás.....	293
Tabla A.1 PERFIL No. MU – 1.....	327
Tabla A.2 Descripción del perfil MU-1.....	329
Tabla A.3 Propiedades físicas de los suelos.	330

Tabla A.4 Propiedades químicas de los suelo.....	330
Tabla A.5 Análisis especiales para Andisoles.....	330
Tabla B.1 Principales Características del clima de la cuenca alta del río Bogotá.....	337

Lista de Figuras

- Figura 2.1** Esquema general del modelo AquaCrop en el que se resalta la introducción de la separación de la evaporación del suelo (E) y la transpiración del cultivo (Tr). Además de la división del rendimiento (Y) en biomasa (B) y el índice de la cosecha (IC)..... 21
- Figura 2.2** Diagrama de flujo del modelo AquaCrop, indicando los componentes principales del continuo suelo – planta – atmósfera considerados..... 23
- Figura 2.3** Esquema general de cálculo del Modelo AquaCrop. Las flechas de puntos indican los procesos que se tiene en cuenta, (desde a hasta e) y que afectan el estrés hídrico. La CD^* es la cobertura del dosel ajustado por microadvección, CD_{pot} , es la cobertura del dosel potencial, y K_s es el coeficiente de estrés (el cual es específico para cada proceso). IC es el índice de cosecha, K_{ctr} , es el coeficiente de transpiración del cultivo, WP^* es la productividad hídrica normalizada para E_{To} y la concentración de CO_2 del aire, E_{To} es la evapotranspiración de referencia..... 31
- Figura 2.4** Esquema del cálculo del balance hídrico del suelo en AquaCrop..... 32
- Figura 2.5** Comportamiento del factor de declinación de la evaporación (f_k) teniendo en cuenta la relación entre el coeficiente de reducción de la evaporación K_r para la Etapa II y el contenido de agua relativo de la capa del suelo W_{rel} 40
- Figura 2.6** Factor de senescencia f_{sen} para varios grados de marchitamientos del dosel y algunos valores del exponente “a” y la relación CD/CD_x 42
- Figura 2.7** Umbrales superior e inferior para el contenido de agua en la zona de raíces del suelo que afectan el cierre estomatal. 44
- Figura 2.8** Coeficiente de estrés hídrico para cierre estomatal (K_{ssto}) para varios grados de agotamiento de la zona de raíces (D_r). 45
- Figura 2.9** Representación esquemática del proceso de desarrollo del dosel determinado por AquaCrop. Observe las etapas descritas por las dos ecuaciones mencionadas..... 49
- Figura 2.10** Ejemplo del proceso de simulación de la CD de un cultivo a lo largo de su ciclo sin condiciones de estrés hídrico. 50

Figura 2.11 Esquema del proceso de enraizamiento a través del tiempo del cultivo en forma general. La valoración para el cálculo del balance hídrico es determinada por el área sombreada.	52
Figura 2.12 Coeficiente de estrés de temperatura del aire para reducción de la producción de biomasa (K_{sb}) para varios niveles de crecimiento en días grado.	59
Figura 2.13 Construcción del índice de cosecha a través del ciclo de crecimiento para cultivos herbáceos de hoja.	60
Figura 2.14 Coeficiente de estrés hídrico (K_s) para la expansión de la hoja (exp), conductancia estomatal (g_s) y senescencia del dosel (sen) como función del agotamiento de agua del suelo (p). (Steduto, et al, 2009).	62
Figura 2.15 Rango de alteración del índice de cosecha como resultado del estrés hídrico durante la formación de la cosecha.	65
Figura 2.16 Valores para f_{post} si el estrés hídrico después de floración ocurre para varios promedios de estrés hídrico afectando el crecimiento de la hoja ($K_{sexp,w}$) y los valores de 'a'.	66
Figura 2.17 Valores para f_{post} cuando el estrés hídrico ocurre después de floración para varios medios de estrés hídrico que afectan la transpiración del cultivo (K_{ssto}) y valores de 'b'.	68
Figura 2.18 Efecto del estrés hídrico sobre la reducción de la zona de expansión para varios factores de forma (f_{forma}) y estrés hídrico en la zona de raíces (K_{ssto}). ..	84
Figura 2.19 Rango (área sombreada) en el cual el Índice de Cosecha puede incrementarse como un resultado del estrés hídrico antes de floración.	88
Figura 2.20 Especificación del contenido de agua en el suelo bajo saturación al cual la aireación no limita prolongadamente la transpiración. Tomado del Manual de Referencia AquaCrop.	91
Figura 3.1 Precipitación mensual multianual de la estación Tibaitatá, años 1955 a 2010. (Sabana de Bogotá, Colombia).....	98
Figura 3.2 Evaporación mensual multianual de la estación Tibaitatá, años 1955 a 2010. (Sabana de Bogotá, Colombia).	98
Figura 3.3 Visión general del método del gradiente propuesto por Hanks, R et al, (1974) y estudiado estadísticamente por Johnson, E. et al, (1983). Observe que al final de la pirámide se establece el nivel de humedad para seco (testigo).	101
Figura 3.4 Diseño del sistema de riego para cuatro experimentos.	102
Figura 3.5 Cabezal de bombeo del sistema de riego por gradiente – caseta de bombeo.	103

Figura 3.6	Distribución de la tasa de aplicación de los aspersores (mm.hr-1).....	104
Figura 3.7	Toma de muestras para los análisis de química de suelos.	108
Figura 3.8	Aplicación de fertilizantes y establecimiento de las especies.	109
Figura 3.9	Toma de muestras inalteradas para los análisis de física de suelos.	111
Figura 3.10	Control de humedad del suelo empleando el TDR.	113
Figura 3.11	Distribución de las especies según el diseño experimental.....	114
Figura 3.12	Pradera establecida en raigrás.....	116
Figura 3.13	Cultivo de avena forrajera establecido.....	117
Figura 3.14	Láminas aplicadas en los experimentos de gradiente de riego para el primer cultivo de raigrás. Cortes 1 a 7.	118
Figura 3.15	Láminas aplicadas en los experimentos de gradiente de riego para el segundo cultivo de raigrás. Cortes 1 a 4.....	119
Figura 3.16	Láminas aplicadas en los experimentos de gradiente de riego para los cuatro cultivos de avena forrajera.....	120
Figura 3.17	Evaluación del área total de cobertura del dosel por la avena forrajera en el momento de la emergencia al 90%.....	133
Figura 4.1	Menú principal del modelo AquaCrop en dónde se observan los módulos de clima, cultivo, irrigación, manejos de campo, perfiles de suelo y nivel freático (entre otros).....	158
Figura 4.2	Proceso de calibración del modelo AquaCrop para los cultivos de avena forrajera y raigrás. Primera Parte.	162
Figura 4.3	Proceso de calibración del modelo AquaCrop para los cultivos de avena forrajera y raigrás. Parte final.....	163
Figura 4.4	Proceso de validación del modelo AquaCrop para los cultivos de avena forrajera y raigrás.....	164
Figura 4.5	Acople realizado para las simulaciones de calibración del modelo AquaCrop por medio del control del modelo PEST.....	167
Figura 5.1	Histograma de precipitación mensual de la estación Tibaitatá, años 2009 y 2010, Sabana de Bogotá. Ubicada en el mismo lote de emplazamiento de los experimentos.....	181
Figura 5.2	Histograma de evaporación de la estación Tibaitatá, Sabana de Bogotá. Ubicada en el mismo lote de emplazamiento de los experimentos.....	181
Figura 5.3	Evapotranspiración de referencia calculada por medio de la ecuación de Penman-Monteith para el año 2009 presentada para las condiciones de la Sabana de Bogotá, Estación Tibaitatá.	197

Figura 5.4 Evapotranspiración de referencia calculada por medio de la ecuación de Penman-Monteith para el año 2010 presentada para las condiciones de la Sabana de Bogotá, Estación Tibaitatá.	198
Figura 5.5 Curvas de evapotranspiración, Kcb, Kc, y Ke para avena forrajera (Avena sativa L.) en el ecosistema del altiplano de la Sabana de Bogotá, (Colombia)...	199
Figura 5.6 Curvas de evapotranspiración, Kcb, Kc, y Ke para Raigrás (Loliumperemne) en el ecosistema del altiplano de la Sabana de Bogotá, (Colombia).	199
Figura 5.7 Humedad del suelo a través del ciclo vegetativo de avena forrajera durante el primer cultivo. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia, 2009.	201
Figura 5.8 Humedad del suelo a través del ciclo vegetativo de avena forrajera durante el segundo cultivo. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia, 2009.	201
Figura 5.9 Humedad del suelo a través del ciclo vegetativo de avena forrajera durante el tercer cultivo. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia, 2009/2010.	202
Figura 5.10 Humedad del suelo a través del ciclo vegetativo de avena forrajera durante el cuarto cultivo. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia, 2010. ...	202
Figura 5.11 Humedad del suelo a través del ciclo vegetativo de raigrás durante el primer cultivo. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia, 2009/2010.	203
Figura 5.12 Humedad del suelo a través del ciclo vegetativo de raigrás durante el segundo cultivo. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia, 2010/2011.	203
Figura 5.13 Cobertura del dosel a través del ciclo vegetativo para avena forrajera desarrollado para los niveles máximos de humedad durante los cuatro cultivos, 2009 a 2010. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.....	205
Figura 5.14 Cobertura del dosel a través del ciclo vegetativo para raigrás durante el primero y el segundo cultivo, 2009/2010. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.....	206
Figura 5.15 Curvas de biomasa de avena forrajera como producción de materia seca para el cultivo 1, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, 2009.	208
Figura 5.16 Curvas de biomasa de avena forrajera como producción de materia seca para el cultivo 2, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, 2009.	209
Figura 5.17 Curvas de biomasa de avena forrajera como producción de materia seca para el cultivo 3, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, 2009/2010.....	210
Figura 5.18 Curvas de biomasa de avena forrajera como producción de materia seca para el cultivo 4, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, 2010.	211
Figura 5.19 Curvas de biomasa de raigrás como producción de materia seca para el cultivo 1, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, 2009.....	212
Figura 5.20 Curvas de biomasa de raigrás como producción de materia seca para el cultivo 2, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, 2010.....	213

Figura 5.21 Función de producción de lámina de agua aplicada contra biomasa en materia seca para avena forrajera.	218
Figura 5.22 Función de producción de lámina aplicada contra biomasa para raigrás.	219
Figura 5.23 Curva de crecimiento del dosel para avena forrajera.	228
Figura 5.24 Curva de crecimiento del dosel para raigrás.....	229
Figura 5.25 Curva de declinación del dosel para avena forrajera.	234
Figura 5.26 Curva de declinación del dosel para raigrás. Coeficiente de factorización exponencial = 0,05, CDx = 99,76, CDD = 3,5146.	237
Figura 5.27 Curva de declinación del dosel para raigrás. Coeficiente de factorización exponencial = 50, CDx = 99,76, y CDD = 1,434, la curva es equivalente a una línea recta con la ecuación de la figura.	236
Figura 5.28 Curva de crecimiento de raíces de avena forrajera a través del ciclo vegetativo del cultivo.	239
Figura 5.29 Curva de crecimiento de raíces de raigrás a través del ciclo vegetativo del cultivo.	240
Figura 5.30 Determinación del factor de ajuste de declinación de la avena forrajera.	244
Figura 5.31 Determinación del factor de ajuste de declinación para el raigrás.....	245
Figura 5.32 Determinación de la evaporación máxima del suelo en senescencia para avena forrajera. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.	246
Figura 5.33 Determinación de la evaporación máxima del suelo en senescencia para raigrás. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.	247
Figura 5.34 Determinación de la productividad hídrica normalizada para avena forrajera. C.I. Tibaitatá, 2009 – 2010.	249
Figura 5.35 Determinación de la productividad hídrica normalizada para raigrás. C.I. Tibaitatá, 2009 – 2010.....	249
Figura 5.36 Cálculo del punto anaerobio para avena forrajera.	253
Figura 5.37 Cálculo del punto anaerobio para raigrás.....	254
Figura 5.38 Tendencias del comportamiento de las variables respuesta (a) CD, (b) GS, (c) AP y (d) AH supervisadas para avena forrajera, durante su ciclo de crecimiento bajo cuatro procesos de estrés hídrico.	258
Figura 5.39 Tendencias del comportamiento de las variables respuesta (a) CD, (b) GS, (c) AP y (c) AH supervisadas para raigrás, durante su ciclo de crecimiento de siembra a primer corte y ciclo de primer corte bajo cuatro procesos de estrés hídrico.....	259

Figura 5.40 Variación del coeficiente de estrés hídrico en avena forrajera para CD (a),GS (b), AP (c), y AH (d) para varios niveles de agotamiento de agua en el suelo.....	261
Figura 5.41 Variación del coeficiente de estrés hídrico para raigrás en respuesta a CD (a), GS (b), AP (c), y AH (d) para varios niveles de agotamiento de agua en el suelo.....	262
Figura 5.42 Comportamiento de la interrelación de los tres indicadores de estrés hídrico de acuerdo a lo encontrado experimentalmente y a los ajustes alcanzados para AquaCrop.	264
Figura 6.1 Evaluación gráfica y cuantitativa del ajuste logrado de la calibración del modelo AquaCrop para el caso de avena forrajera.	271
Figura 6.2 Salida gráfica y cuantitativa del modelo AquaCrop obtenida en las condiciones de calibración del modelo para avena forrajera.	273
Figura 6.3 Evaluación gráfica y cuantitativa del ajuste logrado de la calibración del modelo AquaCrop para el caso de raigrás.....	275
Figura 6.4 Salida gráfica y cuantitativa del modelo AquaCrop obtenida en las condiciones de calibración del modelo para el período de siembra a primer corte y segundo corte, para raigrás.	277
Figura 6.5 Variación de la producción de biomasa de avena forrajera para diferentes láminas de riego, estimadas por el modelo AquaCrop.	283
Figura 6.6 Variación de la producción de biomasa de raigrás para diferentes láminas de riego, estimadas por el modelo AquaCrop. (a) de siembra a primer corte, (b) cortes posteriores al primero.	284
Figura 6.7 Reducción del rendimiento de la producción de biomasa de avena forrajera debido al déficit de fertilidad del suelo estimado por el modelo AquaCrop.....	285
Figura 6.8 Reducción del rendimiento de la producción de biomasa de raigrás debido al déficit de fertilidad del suelo estimado por el modelo AquaCrop. (a) de siembra a primer corte, (b) cortes posteriores.....	285
Figura 6.9 Variación de la producción de biomasa de avena forrajera estimada por el modelo AquaCrop en función de diferentes texturas del suelo.....	287
Figura 6.10 Variación de la producción de biomasa de raigrás estimada por el modelo AquaCrop en función de diferentes texturas del suelo.....	288
Figura 6.11 Variación del rendimiento de la producción de biomasa de avena forrajera debido a la influencia del nivel freático del suelo, estimado por el modelo AquaCrop.....	289

Figura 6.12 Variación del rendimiento de la producción de biomasa de raigrás debido a la influencia del nivel freático del suelo, estimado por el modelo AquaCrop.	291
Figura 6.13 Simulación del desarrollo del dosel para avena forrajera.	292
Figura 6.14 Simulación del crecimiento de raíces para avena forrajera.	293
Figura 6.15 Simulación de los tiempos de crecimiento fenológico para avena forrajera.....	293
Figura 6.16 Simulación del desarrollo del dosel para raigrás.	294
Figura 6.17 Simulación del crecimiento de raíces para raigrás.....	295
Figura 6.19 Simulación de los tiempos de crecimiento fenológico para raigrás.....	295
Figura A.1 Terraza del paisaje de planicie fluvio lacustre en clima ambiental frío y seco. Municipio de Mosquera. (Foto: Terán, C. 2008).	326
Figura A.2 Suelos Pachic Haplustands, perfil MU-1.....	328
Figura B.1 Localización geográfica de la región de la Sabana de Bogotá (Colombia).	333
Figura B.2 Sistema hidrográfico de la cuenca alta del río Bogotá correspondiente a la sabana de Bogotá.....	334
Figura B.3 Precipitación media anual en la cuenca alta del río Bogotá.....	335

Símbolos

α : Factor que permite los efectos de los sumideros excesivos para una especie o variedad. (frutos potenciales) [constante >1]

$\Sigma ET_{Oestrés}$: Suma de la evapotranspiración durante el periodo de estrés hídrico antes de que se active la senescencia del dosel. [mm]

ΔHI_e : Incremento del índice de cosecha debido al estrés hídrico. [%]

ΔHI_{ante} : Incremento máximo aceptable de HI especificado. [%]

θ_{aer} : Porcentaje de humedad en el punto anaeróbico. (con referencia a saturación) [%Vol, $m^3_{agua} \cdot m^{-3}_{suelo}$]

θ_{CC} : Contenido de agua en el suelo a capacidad de campo. [$m^3_{agua} \cdot m^{-3}_{suelo}$]

θ_{PMP} : Contenido de agua en el suelo a punto de marchitez permanente. [$m^3_{agua} \cdot m^{-3}_{suelo}$]

ρ_{estom} : Fracción del AAT al cual el estoma inicia su cierre. [% o fracción]

AA : Agua Aprovechable. [mm, o %]

AAT : Agua Aprovechable Total. [mm o %]

ARE : Agua Rápidamente Evaporable. [mm o %]

a : Parámetro ajustable del cultivo para estrés hídrico en la fase reproductiva y de formación de la cosecha en el IC. [Adim]

B : Biomasa aérea producida por el cultivo. [$g \cdot m^{-2}$ o $t \cdot ha^{-1}$]

Bi : Biomasa aérea diaria producida en el día *i*. [$g \cdot m^{-2}$ o $t \cdot ha^{-1}$]

$B_{i,T}$: Biomasa aérea diaria producida considerando el efecto del estrés de la temperatura del aire. [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ o $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$]

b : Parámetro ajustable del cultivo para estrés hídrico para el cierre de estomas durante la formación de la cosecha en el IC. [Adim]

CC : Capacidad de Campo. [mm o %]

CCD : Coeficiente de Crecimiento del Dosel. [$\%\cdot\text{día}^{-1}$ o $\%\cdot\text{día}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$]

CD : Cobertura del Dosel. [% o fracción]

CD_0 : Cobertura del Dosel inicial a 90% de emergencia. [% o fracción]

CD_x : Cobertura máxima del dosel (fracción de cobertura del suelo). [% o fracción]

CDD : Coeficiente de Declinación del Dosel [$\%\cdot\text{día}^{-1}$ o $\%\cdot\text{día}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$]

CDD_{Ajust} : Coeficiente de Declinación del Dosel Ajustado. [$\%\cdot\text{día}^{-1}$ o $\%\cdot\text{día}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$]

CDG : Crecimiento en Días Grado. [$\text{día}\cdot\text{°C}^{-1}$]

CDG_{min} : Crecimiento en días grado mínimo para producción de biomasa. [$\text{día}\cdot\text{°C}^{-1}$]

DDC : Días después del corte. [días]

DDE : Días Después de Emergencia al 90%. [días]

DDS : Días Después de Siembra. [días]

D_i : Flujo de agua entre los compartimientos del perfil del suelo D_i y D_{i+1} [mm]

CD_x : Cobertura del Dosel Máxima. [% o fracción]

CD^* : Cobertura del Dosel corregida por efectos microadvectivos. [% o fracción]

CD_0 : Cobertura inicial del dosel, cuando $t_0 = 0$. [% o fracción]

C_s : Cobertura del dosel de una semilla individual [% o fracción]

D : Cultivo determinado. [Si, No. booleano]

Ds : Densidad de siembra, número de plantas por hectárea. [plantas.ha⁻¹]

E : Evaporación. [mm.día⁻¹]

E_{Estadol} : Evaporación sin limitación de agua. [mm.día⁻¹]

E_{EstadolI} : Evaporación con limitación de agua. [mm.día⁻¹]

E_{relx} : Evaporación relativa máxima en el estado de estación tardía. [mm.día⁻¹]

E_x : Tasa máxima de evaporación diaria. [mm.día⁻¹]

E_{x,ajust} : Evaporación del suelo ajustada por cubierta vegetal remanente. [mm.día⁻¹]

E_{xj} : Excesos de frutos potenciales. [%]

ET_o : Evapotranspiración de Referencia. [mm.día⁻¹]

f_{edad} : Factor de reducción, senescencia o declinación por la edad. [%.día⁻¹]

f_{exp} : Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para expansión del dosel. [Adim]

f_{sto} : Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para cierre estomatal. [Adim]

f_{sen} : Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para senescencia del dosel. [Adim]

f_{cd} : Factor de ajuste de protección de la cubierta vegetal remanente. [Adim]

f_k : Factor de disminución de la evaporación. [Adim]

f_m : Factor de ajuste sobre el efecto de las coberturas vegetales en la evaporación del suelo. [Adim]

f_{sen} : factor de forma de estrés hídrico para senescencia del dosel. [Adim]

GC_{min}: Mínimo de grados día para crecimiento de biomasa total. [día.°C⁻¹]

GS o gs : Conductancia estomatal. [mmol.m⁻² s⁻¹]

IC : Índice de cosecha, relación entre la materia seca aérea neta y el rendimiento de la cosecha. [% o fracción]

IC_i : Índice de cosecha en el día *i* después de la germinación. [% o fracción]

IC₀ : Índice de cosecha de referencia. [% o fracción]

IC_{0,ajust} : *IC* ajustado por reducción en la polinización por estrés hídrico. [% o fracción]

IC_{ini} : Índice de cosecha inicial para HI (*IC_{ini}*= 0.01) [% o fracción]

CCIC : Coeficiente de crecimiento para *IC* [día⁻¹]

Kc : Coeficiente del Cultivo [Adim]

Kcb : Coeficiente basal del cultivo [Adim]

Kcb_x : Coeficiente basal del cultivo máximo [Adim]

Kcb_{x,ajust} : Coeficiente basal del cultivo máximo ajustado por senescencia [Adim]

Kc_{e,húmedo} : Coeficiente de evaporación de la superficie del suelo completamente húmeda y sin sombra. [Adim]

Ke : Coeficiente de evaporación del suelo. [Adim]

Kr : Coeficiente de reducción de la evaporación. [Adim]

Ks : Coeficiente de estrés hídrico del cultivo. [Adim]

Ks_{aer} : Coeficiente de estrés para falta de aireación del cultivo. [Adim]

Ks_{exp} : Coeficiente de estrés hídrico para expansión del dosel. [Adim]

Ks_{pol,c} : Coeficiente de estrés de calor para la polinización. [Adim]

Ks_{pol,f} : Coeficiente de estrés de frío para la polinización. [Adim]

K_{sen} : Coeficiente de estrés hídrico para aceleración de la senescencia del Cultivo. [Adim]

K_{sto} : Coeficiente de estrés hídrico para cierre estomatal. [Adim]

K_{ψ} : Conductividad hidráulica Saturada. [Adim]

L_f : Longitud de floración. [día o día.°C⁻¹]

MS : Materia Seca [t.ha⁻¹ o Kg.ha⁻¹]

NA : Nivel de Agotamiento. [% o fracción]

NF : Nivel freático. [m]

n : Factor de forma para el crecimiento de la raíz. [Adim]

$P_{exp,bajo}$: Umbral de agotamiento de agua en el suelo para expansión del dosel. (umbral superior) [% o fracción]

$P_{exp,super}$: Umbral de agotamiento de agua en el suelo para expansión del dosel. (umbral inferior) [% o fracción]

P_{pol} : Umbral de agotamiento de agua en el suelo para fracaso de la polinización. (umbral superior) [fracción]

P_{sen} : Umbral de agotamiento de agua en el suelo para senescencia del dosel. [fracción]

P_{sto} : Umbral de agotamiento de agua en el suelo para control estomatal. (umbral superior) [% o fracción]

Per : Profundidad Efectiva de Raíces. [m]

PMP : Punto de Marchitez Permanente. [mm, o %]

S : Volumen de agua extraída de la zona de raíces. [m³.m⁻³.día⁻¹]

S_i : Volumen de agua extraída por la raíz a una profundidad i . [m³.m⁻³.día⁻¹]

$S_{x,i}$: Volumen de agua extraído máximo a una profundidad del suelo i . [m³.m⁻³.día⁻¹]

S_{x,sup} : Máxima extracción de agua por la raíz en el perfil del suelo, cuarto superior.
[m³.m⁻³.día⁻¹]

S_{x,inf} : Máxima extracción de agua por la raíz en el perfil del suelo, cuarto inferior.
[m³.m⁻³.día⁻¹]

f_{sto} : Coeficiente de factor de forma para estrés hídrico para control estomatal.
[Adim]

t : Tiempo después de siembra (plantación). (= DDS) [días o día.°C⁻¹]

t₀ : Tiempo para alcanzar la emergencia del cultivo, tiempo de siembra a emergencia.
[días o día.°C⁻¹]

t_{CDx} : Tiempo a máxima cobertura del dosel. [días o día.°C⁻¹]

t_f : Tiempo de siembra a floración. [días o día.°C⁻¹]

t_m : Tiempo de siembra a madurez. [días o día.°C⁻¹]

t_s : Tiempo de siembra a inicio de senescencia. [días o °C/día]

t_x : Tiempo de siembra a máxima profundidad radical, cuando Z_x es alcanzado. [días o día.°C⁻¹]

T_{base} : Temperatura base del cultivo. [°C]

T_{n,frío} : Temperatura mínima del aire bajo la cual la polinización inicia a faltar. (estrés por frío) [°C]

T_{x,calor} : Temperatura máxima del aire sobre la cual la polinización inicia a faltar. (estrés por calor) [°C]

T_{super} : Temperatura superior del cultivo. [°C]

Tr : Transpiración. [mm, o %]

Tr_x : Transpiración máxima [mm, o %]

T_{x,calor} : Temperatura máxima del aire sobre la cual la polinización inicia a fallar. (estrés por calor) [°C]

WP : Productividad hídrica del cultivo. [$\text{g}_{\text{biomasa}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$]

WP* : Productividad hídrica del cultivo normalizada por contenido de CO_2 en el aire y para el clima por la evapotranspiración de referencia. (ET_0). [$\text{g}_{\text{biomasa}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$]

WP*_{ajust} : Productividad hídrica del cultivo normalizada ajustada. [$\text{Kg}_{\text{biomasa}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$]

WP*_c : Productividad hídrica del cultivo normalizada por contenido de CO_2 en el aire y para el clima por la evapotranspiración de referencia (ET_0) durante la formación de la cosecha y con respecto a **WP***. [%].

W_r : Contenido de agua en la zona de raíces del suelo expresado como lámina. [mm]

W_{rel} : Contenido relativo de agua en el suelo. [mm, o %]

W_{Umbal.Super} : Umbral superior de agua en la zona de raíces del suelo para cierre de estomas expresado como lámina. [mm, o %]

Z : Profundidad efectiva de raíces. [m]

Z₀ : Profundidad de siembra. [m]

Z_{e,sup} : Capa superior del suelo desde la cual fluye agua a la superficie de evaporación. [m]

Z_n : Profundidad efectiva mínima de raíces. [m]

Z_x : Profundidad efectiva máxima de la raíz. [m]

1. INTRODUCCIÓN

En la Región Andina colombiana las actividades ganaderas ocupan todo tipo de terrenos y predios de tamaños que varían desde 1 ó 2 ha hasta más de 500 ha y son realizadas por empresarios agropecuarios de sistemas mixtos o exclusivamente ganaderos pero también por campesinos, indígenas y colonos. Los sistemas de producción ganadera tienden a ser de lechería en las zonas de altiplanos y altitudes entre 2000 y 3000 msnm; de doble propósito (carne y leche) en los climas medios (1000 a 2000 msnm) y páramos (>3500 msnm); de cría para carne en las zonas más bajas (500 a 1000 msnm) y hay sistemas menores para engorde (ceba), búfalos, ganado de lidia, ovinos y caprinos, según Murgueitio (2002).

Durante los últimos años la participación de la ganadería en la economía nacional ha tenido una senda estable, resultado de tendencias opuestas en el dinamismo de los principales productos de origen bovino (positiva en el caso de la leche y negativa en el caso de la carne), dicho sector sigue siendo uno de los ejes de la economía nacional. Con base en estimativos deducidos por FEDEGAN, (2014) a partir del valor de la producción y de su componente valor agregado, puede decirse que participa con poco menos del 1,3% del PIB Nacional, del 19,5% del PIB agropecuario y del 53% del PIB pecuario. Es decir, la ganadería bovina, aún a pesar del gran crecimiento de otras actividades como la avicultura (27% entre 1999 y 2003) y la porcicultura (12% entre 1990 y 2003), conserva la primacía dentro de la producción pecuaria y una participación muy importante dentro de la economía rural colombiana, con todo lo que ello implica en cuanto a generación de empleo y bienestar. Genera aproximadamente unos 950.000 empleos directos en todo el territorio nacional, esto es, la cuarta parte del total agropecuario y casi el 7% del total nacional. Pulido, (2006).

De acuerdo con el Observatorio de Agrocadenas, el área total dedicada a la ganadería bovina alcanza unos 35,5 millones de hectáreas, de las cuales, el área cubierta con especies forrajeras asciende a 27,7 millones. El 72% de los pastos están ubicados en climas cálidos y medios del territorio nacional. Seis millones de hectáreas son de especies foráneas y reciben alguna atención tecnológica durante el establecimiento y manejo; el resto son de especies forrajeras nativas sin fertilización, con pastoreo continuo, de escasa calidad

nutricional y baja capacidad de carga animal. Internet: <http://www.agronet.gov.co/agronetweb1/Agrocadenas.aspx>.

Según el DNP, (2005) la tierra con vocación ganadera corresponde a 10,2 millones de hectáreas, pero se están usando 41,7 millones. El inventario ganadero según el DANE y FEDEGAN, (2011), muestra que para el año 2010 se estimó a través de la Encuesta Nacional Agropecuaria ENA la existencia de 27.753.990 cabezas de ganado, de las cuales el 74% está orientada a la producción de carne, el 21% al doble propósito y el 5% a la producción de leche. La participación porcentual de la Ganadería en el PIB Agropecuario correspondió al 20,1%, entre lo cual se diferencia la producción de carne con el 12,8% y la producción de leche con el 7,3%.

El volumen de producción de leche en Colombia pasó de 5,4 millones de litros diarios en 1979 a 16 millones de litros diarios en 2003, con crecimiento de una tasa promedio anual de 4%. Para el año 2004, la producción según FEDEGAN fue de 16,13 millones de litros diarios, con incremento del 0,54% con relación al 2003. Entretanto, según FEDEGAN (2014), la producción de leche bovina para el año 2013 se estimó en 3.640 millones de litros al año, provenientes del sistema de doble propósito, frente a 2.980 millones de litros a partir de la lechería especializada. La importancia creciente de la producción lechera se puede medir por el número de animales dedicados a dicha actividad, con 9,7 millones de cabezas destinadas a la producción de leche, tanto en el sistema de producción de leche especializada como en el doble propósito, con una productividad de 4,39 L/vaca/día.

Para el año 2010, la participación porcentual de la producción de leche muestra al departamento de Cundinamarca con el 19,46%; Antioquia con el 17,15 y Boyacá con el 10,35%, como los más productores de leche, con inventarios de vacas productoras de leche de 328.252 para Cundinamarca, 288.885 para Antioquia y 139.982 para Boyacá.

La mayor parte del valor de la cadena láctea corresponde a la producción ganadera, y en menor cuantía, a la agroindustria, relacionada con sus productos y subproductos. El valor de la producción de la industria láctea en Colombia ascendió a \$3,1 billones (2003) distribuidos en un 65% en compras de materia prima y un 35% en generación de valor agregado. El valor total de la producción para la cadena fue de \$3,5 billones.

En los sistemas ganaderos especializados en la producción de leche, las vacas son generalmente puras o de alto porcentaje de genes provenientes de razas Europeas *Bos taurus* (ie., Holstein) y son suplementadas con alimentos concentrados, por lo tanto su producción es alta y se encuentran localizados principalmente en el trópico de altura donde las regiones se caracterizan por ambientes con climas fríos y cerca de los centros urbanos. En el trópico de

altura de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Nariño, Antioquia, Caldas, Tolima y Valle del Cauca, se han localizado los sistemas de producción de leche especializada más representativos en el país. Igualmente, en algunas de estas zonas se han identificado nichos o zonas con características biofísicas particulares.

Los sistemas especializados de producción de leche ocupan alrededor del 13,7% (3,8 millones de ha) del área destinada a los bovinos y se produce con un millón de vacas (9,1% del total de hembras). Estas cifras indican la importancia económica de la lechería especializada y su mayor productividad si se compara con los sistemas de producción de doble propósito y de carne, sin embargo, los grandes limitantes de la ganadería y su inserción en la cadena son discutidos más adelante. En la región central se ubican dos cuencas lecheras: Sabana de Bogotá con el Valle de Ubaté y Chiquinquirá, con tres zonas productoras y 28 municipios, se presenta con el costo de oportunidad de la tierra más alto del país, con fincas de tamaño promedio de 16,6 ha, con predominio de la raza Holstein, y una productividad animal de 14 litros/día.

Otra zona de importancia en la región central, no mencionada por el observatorio de Agrocadenas, es la microrregión del Alto Chicamocha, en el Departamento de Boyacá, donde están ubicados los principales núcleos de ganadería de leche, se mueve la mayor parte de la economía del Departamento y se encuentran los principales centros de consumo: Tunja, Paipa, Duitama y Sogamoso y en donde se concentra el grueso de la población. La integran los municipios de: Samacá, Cucaita, Tunja, Sáchica, Chiquiza, Motavita, Cómbita, Oicatá, Sotaquirá Tuta, Toca, Pesca, Tota, Cuitiva, Duitama, Firavitoba, Iza, Nobsa, Paipa, Santa Rosa de Viterbo, Sogamoso, Tibasosa, Corrales, Busbanzá, Floresta, Cerinza, Belén y Tutazá. Ocupa un área aproximada de 360.519 ha.

Por otro lado, se observa que los efectos de la producción pecuaria ejercen un gran peso en el suministro mundial de agua, ya que utiliza el 8% del agua que consume el hombre, principalmente a través del riego de los cultivos forrajeros. Los datos recopilados indican que este sector es el principal productor de contaminantes del agua, procedentes sobre todo de los desechos de los animales, antibióticos, hormonas, las sustancias químicas utilizadas en las curtiembres, los fertilizantes y plaguicidas usados en los cultivos forrajeros, y sedimentos de los pastizales erosionados. Si bien no existen cifras mundiales, se estima que en los Estados Unidos el ganado y la producción agrícola de forrajes consumen el 37% de los plaguicidas, el 50% de los antibióticos y producen una tercera parte del nitrógeno y del fósforo que contaminan el agua. El sector genera también casi dos terceras partes del amoníaco antropogénico, que contribuye considerablemente a la lluvia

ácida y a la acidificación de los ecosistemas (<http://www.fao.org/ag/esp/revista/0612sp1.htm>).

En casi todos los países, el agua está exageradamente subvalorada y a fin de corregir esta situación, será necesario crear mercados del agua y diversas opciones para recuperar los costos. La eliminación de las distorsiones de los precios en los insumos y los productos mejorará el uso de los recursos naturales, pero a menudo podría no ser suficiente. El documento de la FAO, "Livestock's long shadow" (Steinfeld, et al., (2006)) señala que las externalidades ambientales, negativas y positivas, tienen que contemplarse explícitamente en el marco normativo.

Es necesario compensar a los propietarios de ganado que proporcionan servicios ambientales, compensación proporcionada por los beneficiarios inmediatos (como los usuarios del río aguas abajo que disfrutan de agua en mayor cantidad y de menor calidad) o por el público en general. Los servicios que podrían recompensarse son la gestión de las tierras o un uso de las mismas que contribuya a restablecer la biodiversidad, y la gestión de los pastizales que prevea la fijación del carbono. También se requieren sistemas de compensación entre los proveedores de agua y electricidad y los ganaderos que adopten estrategias de gestión de los pastizales que reduzcan la sedimentación de los depósitos de agua. (<http://www.seachangecop.org/sites/default/files/documents/2006%20FAO%20Livestocks%20long%20shadow.pdf>).

Analizando el caso Colombiano, Murgueitio (2002), plantea que es posible realizar cambios importantes en los sistemas de manejo ganadero que implican entre otras cosas su intensificación, mayor productividad y generación de bienes sociales y servicios ambientales (regulación hídrica, captura de carbono, conservación de la biodiversidad) en forma simultánea al incremento de la cobertura vegetal, liberación de áreas críticas por su deterioro o estratégicas por su valor como fuente de servicios ambientales en especial todo lo relacionado con la regulación del ciclo hidrológico a escala de predios y de microcuencas.

Otro de los aspectos relevantes a tener en cuenta es el área dedicada a la producción ganadera, con respecto a la cobertura vegetal el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y el DANE, reportan que el área sembrada en pastos para 2010 era de 31'235.778 hectáreas en el país, frente a sólo 4,9 millones de hectáreas para uso agrícola. Cabe consignar que nuestro planeta posee una superficie total de 510 millones de Km², de ellos 361 millones están cubiertos por agua. Las estadísticas de la FAO expresadas en el informe del Banco Mundial, señalan que en el mundo la cantidad de tierras cultivadas suman 13,8 millones de Km² con una cobertura de pastos y praderas de 3,35 millones de Km², mientras que sólo 1,53 millones de Km²

están dedicadas a tierras arables y cultivos permanentes, lo cual muestra la supremacía en área de los pastos y praderas sobre los cultivos agrícolas, no sólo en el plano nacional sino a nivel mundial. (<http://faostat.fao.org/site/377/DesktopDefault.aspx?PageID=377#ancor>).

Adicionalmente al problema de las áreas dedicadas a ganadería y agricultura, en Colombia se tiene la incertidumbre en la frecuencia e intensidad de la precipitación así como en su distribución espacial, la variabilidad de estos factores no garantizan obtener una productividad competitiva y sostenible en la mayoría de los cultivos. La producción puede perderse por condiciones de escasez y/o exceso de agua. Por otro lado, el gobierno nacional dentro del proceso de negociación del TLC, ha insistido en la necesidad de fomentar y apoyar los desarrollos en adecuación de tierras, específicamente lo que tiene que ver con el riego y el drenaje de campos agrícolas.

Con el ánimo de ayudar a solucionar la problemática del uso eficiente del agua en la producción ganadera de lechería especializada en la subregión del Altiplano Cundiboyacense, se plantea este proyecto, el cual se enfoca en la determinación y optimización de los requerimientos hídricos y la huella hídrica para dos especies forrajeras de importancia regional como son el Pasto Raigrás (*Lolium perenne*), y la Avena Forrajera (*Avena sativa* L). Los cuales constituyen la fuente fundamental de la alimentación bovina en el trópico alto colombiano.

La consideración de los requerimientos hídricos y la huella hídrica de las especies forrajeras, se enmarca dentro de la consideración del uso eficiente del agua no sólo por el manejo antrópico que se otorgue en su producción sino también por las necesidades intrínsecas de las especies vegetales al producir biomasa a partir del agua y cómo estas traslocan la energía y el agua en biomasa.

Por esta razón en el presente estudio se desarrolló un análisis de la potencialidad de la producción de biomasa de cultivos forrajeros a partir del agua y la determinación de los requerimientos hídricos y la huella hídrica en la región de la Sabana de Bogotá (Colombia), considerando aspectos novedosos en la cuantificación de los niveles de producción de biomasa con base en el Modelo AquaCrop (FAO) Steduto et al., (2009) y en investigaciones de campo llevadas a cabo en la región agrícola de la Sabana de Bogotá (Colombia).

El trabajo se enmarcó dentro del programa de investigación denominado: “Desarrollo de estrategias de manejo y mejoramiento de la calidad y cantidad del recurso hídrico en sistemas de producción de leche especializada del trópico alto de Cundinamarca y Boyacá (Colombia)”, el cual fue desarrollado por dos equipos de investigación de la Corporación Colombiana de

Investigación Agropecuaria (CORPOICA), el cual fue respaldado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) de Colombia y el gremio ganadero, Federación Nacional de Ganaderos de Colombia (FEDEGAN).

El propósito final fue ayudar a resolver varios interrogantes sobre volúmenes de agua, determinación del rendimiento de producción de la biomasa de pasturas a partir del agua y la huella hídrica y la estimación de los parámetros de importancia en la relación del clima, el agua el suelo y el cultivo.

En esta primera parte se determinó el nivel de avance y complejidad del estado del arte, y los alcances científicos y tecnológicos en que se encuentra el conocimiento de la producción de la biomasa vegetal a partir del agua, teniendo en cuenta el entorno agroclimático enmarcado dentro de la región de la Sabana de Bogotá (Colombia), así como los avances logrados en el Modelo AquaCrop (FAO), Raes et al., (2009) y las contribuciones de varios investigadores al respecto.

Se presentan los antecedentes, la justificación, los objetivos abordados, y en forma un poco más extensa el estado del arte de la cuestión, el cual se subdivide en dos partes: la descripción y características de la región y los desarrollos científicos alcanzados hasta la presente en la determinación de la biomasa a partir del agua y que se tuvieron en cuenta para el diseño del modelo mencionado así como las soluciones científicas, empíricas y tecnológicas manejadas.

El documento también incluye los capítulos de Metodología que describe las técnicas y protocolos de experimentación en campo y los procedimientos para la determinación de los parámetros y variables de entrada al modelo. Y el capítulo de Resultados y Discusión en donde se presentan, se comentan y discuten los resultados encontrados. Finalmente se incluye un capítulo sobre las Conclusiones y Recomendaciones y se presentan los Anexos del trabajo.

1.1 Antecedentes

En Colombia y específicamente en la región productora de lechería especializada del altiplano cundiboyacense en la cual se encuentra incluida la Sabana de Bogotá, (SB) existe una creciente preocupación del gremio ganadero sobre la incidencia que tiene el recurso hídrico dentro del sistema de producción de leche especializada.

Es por esto que durante la convocatoria para proyectos de investigación del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de la República de Colombia, de 2007, MADR, (2007) con el aval del gremio ganadero y después de las evaluaciones técnicas y científicas de rigor, fue aprobado el proyecto de

investigación titulado: *“Diseño de estrategias de irrigación y determinación de requerimientos hídricos de praderas en sistemas de producción de leche especializada del altiplano cundiboyacense”*. El objetivo principal del proyecto fue: Generar, validar y ajustar información y tecnologías, sobre el manejo del recurso hídrico que contribuyan a disminuir el problema de la estacionalidad de la producción en sistemas de lechería especializada en las subregiones priorizadas del trópico alto (Altiplano Cundiboyacense, colombiano).

Dentro del mencionado proyecto se establece la necesidad de complementar la investigación con una tesis doctoral que ayude a solucionar varios de los interrogantes que el MADR y el gremio ganadero planteaban, dichos interrogantes fueron los siguientes:

¿Cuáles son los niveles o volúmenes de agua requeridos para la producción de biomasa como pasturas o praderas (*huella hídrica*) en la región productora de leche especializada de la Sabana de Bogotá?, y.

¿Teniendo en cuenta las condiciones de la región, cuál es el nivel o potencial para la producción de biomasa y las limitaciones agroclimáticas, de agua, y las praderas en la región de la Sabana de Bogotá?.

1.2 Justificación

1.2.1 Desde el punto de vista de la utilidad

Es de gran utilidad poder determinar la producción de biomasa especialmente pastos y forrajes a partir del agua disponible en la región (huella hídrica), pues con este resultado se podrán establecer la respuesta de estas especies al agua y volúmenes de biomasa producidos para varios objetivos, científicos, tecnológicos, agropecuarios, económicos y de planeación.

El entorno agropecuario de la SB, cada día es un medio más competido por varias razones: el desarrollo urbanístico, el encarecimiento de las tierras agrícolas, las limitaciones hídricas por competencias entre el sector agrícola, industrial y urbano, la mala calidad del agua que se presenta en la SB por contaminación del río. Son los factores más importantes por los cuales el Gobierno Nacional por medio del MADR y el gremio ganadero han aunado esfuerzos para apoyar el programa de investigación *“Desarrollo de estrategias de manejo y mejoramiento de la calidad y cantidad del recurso hídrico en sistemas de producción de leche especializada del trópico alto de Cundinamarca y Boyacá (Colombia)”*, dentro del cual se estableció la presente propuesta de investigación.

Los resultados de estas investigaciones ayudarán a establecer las áreas de mayor adaptabilidad y posibilidades de desarrollo para el ejercicio del sistema de producción de lechería especializado y así poder dar un ordenamiento acorde y sostenible con las potencialidades del medio biofísico, además se podrán planear de forma más realista los niveles de producción de biomasa así como la carga por hectárea. De esta manera las metas de superación de los niveles de producción y productividad de leche podrían fijarse en forma más aproximada y exacta, colocando a la región en un nivel de ventaja competitiva con el fin de posicionarla en el nivel nacional e internacional.

1.2.2 Desde el punto de vista científico

La cuantificación y estimación de los niveles de requerimientos hídricos y la huella hídrica de praderas, los volúmenes de agua requeridos y la determinación de los parámetros fisiológicos de los cultivos son la base de las estimaciones en la determinación de la potencialidad de la producción de biomasa.

Esta producción de biomasa de praderas se enmarcan dentro del sistema de producción de leche especializada dadas las limitaciones del agua, del entorno del clima y las características biológicas de las especies forrajeras de interés en la región, que son de gran importancia, no sólo a nivel nacional sino dentro de la frontera del conocimiento a nivel mundial.

El nuevo enfoque planteado por la FAO en el modelo *AquaCrop* (2009), Steduto et al., (2007) sobre varios aspectos como la consideración en forma independiente de la evaporación directa del suelo (E) y transpiración de las plantas (Tr) lo cual ayudará a poder estimar la producción de biomasa (B) y el índice de cosecha (IC) de forma más realista, teniendo en cuenta la relación causa - efecto del agua.

Además de la consideración de la productividad hídrica normalizada WP* como el motor básico de producción de biomasa y la cosecha, son elementos científicos que se están manejando en otros cultivos y que se pueden manejar en especies forrajeras, por medio de la calibración y validación del reciente modelo mencionado y el patronamiento, ajuste, y estimación de la información de campo, para estandarizar el modelo a nivel general. Raes et al., (2009).

1.2.3 Desde el punto de vista tecnológico

El sistema de producción de lechería especializada en la Sabana de Bogotá (SB), presenta deficiencias en el manejo hídrico entre las que se pueden mencionar: altos niveles de consumo hídrico por unidad de área en la producción de praderas, altos niveles de contaminación hídrica, por desechos

de animales, antibióticos, hormonas, sustancias químicas usadas en las curtidurías, fertilizantes y plaguicidas usados en los cultivos forrajeros y sedimentos de los pastizales erosionados.

Por otro lado, la estacionalidad de la producción por la escasez hídrica en épocas de sequía, la falta de regulación hídrica en ciertas zonas, la necesidad de liberación de áreas críticas o estratégicas, por su deterioro, o por su valor como fuente de servicios ambientales en especial todo lo relacionado con la regulación del ciclo hidrológico a escala de microcuencas, o cuencas entre otros aspectos ambientales.

La mejor forma de proyectar hacia el futuro la competitividad del sistema de producción es enclavarlo en las zonas que por sus condiciones biofísicas, económicas y socioculturales provean un entorno sostenible teniendo en cuenta los elementos adecuados, especialmente el agua, el clima y el suelo, como base para la construcción de un sistema de producción dinámico y robusto.

La escasez de agua superficial que se presenta en la SB dada su limitada calidad y las competencias con los sectores urbano e industrial, lo cual hace del recurso hídrico un insumo costoso y con limitada accesibilidad, exige que se deba pensar en la planeación óptima y el mejor aprovechamiento del entorno biofísico con especial énfasis en el agua y el clima.

1.2.4 Desde el punto vista de la eficiencia

Es fundamental el papel del agua como el principal insumo en la producción de biomasa tal y como lo enfrenta el modelo AquaCrop con novedosos enfoques científicos, determinantes y orientados a la eficiencia del uso del agua por las especies. Es por eso que en el caso del sistema de producción de lechería especializado, el cual depende de la producción de biomasa forrajera, es fundamental la determinación de sus niveles reales de eficiencia del uso del agua y la huella hídrica, como eje de la translocación en biomasa, leche y carne y finalmente en eficiencia económica de la producción.

La producción del cultivo se potencializa con el uso del recurso hídrico proveniente de la precipitación (huella hídrica verde), la aplicación suplementaria del recurso hídrico en los ciclos del cultivo (huella hídrica azul), junto con el continuo mejoramiento en el manejo del agua a nivel predial, y la conservación y aprovechamiento del agua del suelo.

El uso apropiado del medio climático y edáfico los cuales deben hacer parte integral de los sistemas de producción de lechería especializada, garantizarían una mayor eficiencia y aprovechamiento del recurso hídrico potencializando la producción.

1.3 Objetivos

Los objetivos que se plantearon en este trabajo de investigación se clasifican en uno principal y cuatro específicos los cuales contribuyen a alcanzar las metas planteadas y que se describen a continuación:

1.3.1 Objetivo Principal

Determinar la potencialidad de producción de biomasa de cultivos forrajeros con base en las relaciones hídricas con sus características fisiológicas, los niveles de consumo de agua de las especies, y las condiciones de eficacia del clima y el suelo presentes.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Determinar la biomasa total y/o potencial y la huella hídrica de los cultivos forrajeros de interés como resultado de la captura de energía presente y la evapotranspiración real.
2. Determinar los parámetros y variables requeridos por el modelo AquaCrop para la estimación de la potencialidad productiva de biomasa para los cultivos forrajeros de interés, teniendo en cuenta el clima y el suelo de su entorno de producción.
3. Calibrar y validar el modelo AquaCrop para las especies forrajeras de interés con el objeto de establecer un modelo de obtención de biomasa a partir del agua de estas especies forrajeras a nivel general.
4. Establecer el grado de sensibilidad de los parámetros y/o variables de mayor importancia en el proceso de estimación de la producción de biomasa de cultivos forrajeros.

1.4 Metodología general y estructura de la tesis

La metodología que se desarrolló se puede describir en dos aspectos o partes principales a saber:

La determinación de un modelo o sistema que integre las relaciones de agua y energía, que pueda ser aplicado para la obtención de la biomasa total o potencial producida bajo las condiciones de la SB por los cultivos estudiados.

Por medio de la calibración y validación del modelo AquaCrop para especies forrajeras, el cual fue propuesto recientemente por la FAO. Steduto et al.,

(2009), Raes et al., (2009), y Hsiao et al., (2009), el cual reúne las principales investigaciones que sobre el uso del agua por las especies herbáceas han sido adelantadas desde la publicación de riego y drenaje No. 33 de la FAO. Doorenbos y Kassam, (1979).

El uso de experimentación de campo para la determinación de la huella hídrica con base en procesos de optimización del agua y la producción de biomasa por las especies estudiadas. Considerando la metodología del gradiente Hanks et al., (1976), Jhonson et al., (1986) y de experimentos de estrés hídrico de cultivos en lisímetros de peso (macetas independientes).

Este trabajo se estructuró de la siguiente manera:

Dado el nivel de complejidad que se manejó, y las limitaciones de información básica y tiempo, se dividió este estudio en dos partes: En primer lugar, la determinación de la huella hídrica y de los parámetros y variables de entrada al modelo AquaCrop” que comprende la experimentación en campo (*in situ*), así como la determinación del estado del arte de la modelación de la potencialidad de producción de la biomasa a partir del agua con base en el modelo AquaCrop, Raes et al, (2009a y b); Steduto et al, (2009). Y, en segundo lugar, la calibración y validación del modelo AquaCrop en las condiciones edafoclimáticas de la SB para las especies de interés (pasto raigrás y avena forrajera), lo cual hasta el momento no ha sido realizado por ningún grupo de investigación a nivel mundial.

Se determinaron los diferentes parámetros a nivel global y variables a nivel local bajo las condiciones de la SB, como elementos básicos para la estimación y la evaluación de la biomasa producida por los cultivos de interés, con el modelo AquaCrop a partir del cual se puede establecer la potencialidad de producción de forrajes en la región.

En este primer capítulo se proponen la introducción en la cual se presenta tanto la problemática del sistema de producción como los antecedentes de la investigación, justificación, y lineamientos generales, se crean las expectativas y los objetivos, además se presenta en forma general la metodología propuesta.

El estado del arte de la modelación en la producción de biomasa por las especies herbáceas es relacionado en el capítulo dos, con especial énfasis y profundización en el modelo AquaCrop y los principios vigentes sobre estimación de biomasa, los cuales son los más novedosos en la actualidad.

La metodología empleada para la determinación de las variables y parámetros de entrada al modelo AquaCrop se propone en el capítulo tres,

junto con los materiales y descripción más detallada de los entornos y aspectos relevantes en el proceso de experimentación.

En el capítulo cuatro se determinó la metodología de la calibración y validación del modelo AquaCrop que fue implementada para los cultivos de avena forrajera y raigrás, así como el uso del modelo Pest para su ajuste y el proceso de simulación de otras condiciones agroecológicas para evaluar la sensibilidad de estos cultivos al complejo Suelo – Agua –Clima.

Los resultados obtenidos de los diferentes aspectos productivos de los forrajes estudiados, junto con el análisis respectivo de las variables y parámetros, y su discusión en relación con su uso dentro del modelo AquaCrop son relacionados en el capítulo sexto del presente trabajo de investigación.

Los resultados de la calibración y validación del modelo AquaCrop para avena forrajera y raigrás, así como los de las simulaciones de las condiciones agroecológicas sobre la evaluación de la sensibilidad del cultivo al complejo suelo – agua – clima y por último la articulación de los resultados obtenido en sendos cultivos sintéticos para las dos especies se presentan en el capítulo siete.

Por último se hace un análisis ulterior de los resultados por medio de las conclusiones y recomendaciones, incluidas en el capítulo ocho, además de algunos aportes adicionales y la propuesta de mejoras del modelo y posibles líneas de investigación de importancia en el área.

En el Anexo A se presenta la región de localización del trabajo como un ecosistema experimental, la cual es la Sabana de Bogotá (SB), descripción geográfica general, sistema hidrográfico, administrativo, complejo físico, morfología, clima, vegetación, suelos y usos del suelo.

Con estas bases de alto rigor científico, enmarcadas dentro del novedoso modelo AquaCrop y cimentadas en metodologías bastante probadas, pero sin perder de vista el aporte particular al conocimiento técnico y científico se obtienen las metas fijadas mediante la investigación *in-situ* y el análisis racional, contribuyendo así a las expectativas no sólo locales sino en el ámbito mundial, pues hasta la presente ningún grupo de investigación a nivel global ha logrado resultados similares en las especies estudiadas.

1.5 Porqué es novedoso este proyecto?

1. Los nuevos y perspicaces enfoques de AquaCrop los cuales reúnen las últimas investigaciones en el desarrollo de la biomasa de cultivos,

evapotranspiración, contenido de humedad de los suelos, productividad hídrica normalizada, obtenidas por un conjunto de investigadores y grupos de investigación de trascendencia mundial sobre la materia.

2. El hecho de que hasta la presente no se ha validado ni calibrado ningún cultivo forrajero para AquaCrop, por ningún grupo de investigación a nivel mundial.
3. La consideración de las diferentes especializaciones biofísicas y de manejo de los cultivos forrajeros que obligan a considerar parámetros y variables en forma especial o dentro de un contexto que abstrae o considera en forma diferente elementos como la producción de la cosecha y el índice de cosecha, así como sus componentes, coeficientes y factores de estrés.
4. La importancia de enfrentar los cultivos que tradicionalmente se han tomado como cultivos de referencia como los pastos, por sus características de cobertura, porte, y sobre todo comportamiento de la transpiración a lo largo del ciclo del cultivo, el cual se ha tomado en general como una constante.
5. La contribución a nivel global con los resultados de los parámetros conservativos de cultivos como el pasto raigrás (*Lolium perenne*) y la avena forrajera (*Avena sativa, L.*), así como una muestra referenciada localmente de parámetros y variables de uso específico logrados en este trabajo.
6. Por algunas mejoras a la metodología empleada como el uso de medios fotográficos y algoritmos en el seguimiento y cálculo de variables fenológicas, de cobertura vegetal, balances hídricos, coeficientes del cultivo, etc. no subjetivos más exactos y confiables, y la confirmación de parámetros y variables con experimentos alternativos, alto nivel de control y supervisión diaria.
7. Por las implicaciones tecnológicas que conllevan los resultados de las simulaciones de pastos y forrajes en la producción de carne y leche en la ganadería no sólo a nivel local sino mundial, con las múltiples posibilidades de combinación, en sistemas de producción de carne, leche o doble propósito y combinación de especies y razas animales.
8. Por la gran trascendencia que ha tenido el modelo AquaCrop en el mundo agrícola actual a pesar de su novedad, y por su promisorio futuro, por la sencillez en las variables de entrada, su entorno altamente amigable y facilidad de manejo. Steduto et al., (2009).

9. Por las grandes extensiones de áreas que existen hoy en el mundo de cultivos forrajeros y pastos, las cuales pueden ser incorporadas en estudios locales, regionales o globales de producción de biomasa, consumos hídricos, captura de carbono, para el cambio climático global, etc.
10. Por la importancia del uso eficiente del agua por las especies, la determinación de la huella hídrica, debido a la creciente población mundial, el alto porcentaje de consumo hídrico del sector agropecuario frente a los demás sectores, y la necesidad del mejoramiento de la producción agrícola a pesar de las limitaciones del clima, el suelo, y el agua.

2. MODELACIÓN DE CULTIVOS

Existe una creciente preocupación por lograr una mayor eficiencia en el uso del agua en todos los sectores especialmente en el sector agropecuario, el cual ha buscado la optimización del recurso hídrico en la producción agrícola, especialmente en la eficiencia para la producción de biomasa. Por esta razón ha existido una continua preocupación por el modelamiento de la producción de cultivos el cual ha tenido a lo largo de la historia diferentes matices y tendencias.

2.1 Modelos de Simulación

Antes del modelo AquaCrop de la FAO, la mayoría de los desarrollos realizados integraron algoritmos con base en la ecuación [2.1] o estimaciones estadísticas de los volúmenes de producción agrícola, junto con determinaciones agroclimáticas empíricas basadas en parámetros climáticos, (p. ej. temperatura del aire, precipitación, humedad relativa, periodo de insolación solar, evapotranspiración estimada y los tipos de suelos, etc.) es el caso del modelo *Integrated Spatial Information System for Agricultural Production (ISISAP) de Polonia*. (*Instituto de la Ciencia del suelo y Cultivos agrícolas de Polonia*) (1998). (Internet: www.iung.pulawy.pl/). Otras modelaciones agroclimáticas se han realizado con base en diversas metodologías para regiones particulares, con el fin de obtener resultados inmediatos o poder realizar análisis de producción agrícola local para cuyo caso se han obtenido atlas agroclimáticos en diferentes escalas y países. Murphy, (2008); DGDM, (1990); Santibañez y Uribe, (1993); FUNDEPCO, (2014); Cortés, (1994); Alarcón et al., (2011); Cruz et al., (2000), Hoyos et al., (2010); Nafría, (2013).

Existen modelos orientados a la obtención de la biomasa y la producción de la cosecha con variados enfoques. Se pueden distinguir por lo menos tres enfoques que sobresalen: En primer lugar los modelos de crecimiento direccionados por la radiación solar, en segundo lugar los modelos direccionados por el consumo hídrico y en tercer lugar los modelos conducidos por la disponibilidad y consumo de CO₂.

Dentro de los primeros se pueden mencionar CERES (Crop Environment REsources Synthesis) Ritchie et al., (1985); Jones y Kiniry, (1986); Jones, et al., (2003), EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) Williams, (1994) y Jones et al., (1991), y STICS (Simulator multIdisciplinary for Crop Standard), Brisson et al., (2003). Los modelos basados en la radiación calculan la biomasa directamente de la radiación solar interceptada por un coeficiente de conversión, llamado Eficiencia del Uso de la Radiación (EUR), según lo indicado por Monteith, (1977). Los procesos de menor jerarquía que expresan los pasos intermedios; tales como la eficiencia energética de la hoja por cada mol de CO₂ fijado, la tasa de fotosíntesis, y la respiración; necesarios para lograr la acumulación de biomasa son sintéticamente incorporados dentro de la EUR, lo que reduce la complejidad y el número de variables de entrada al modelo.

Dentro de los modelos direccionados por el consumo hídrico y las limitaciones hidráulicas, se encuentran CropSyst Stöckle y Nelson, (2000) AquaCrop, el nuevo modelo desarrollado recientemente por la FAO Steduto et al., (2009); Raes et al., (2009a y b). y sobre el cual se basa este estudio. AquaCrop se basa exclusivamente en que el módulo de crecimiento es impulsado por el agua, en el cual la transpiración se convierte en biomasa a través del parámetro de la productividad del agua (*WP*); CropSyst se basa en el direccionamiento de la simulación del crecimiento impulsados tanto por el agua y por la radiación, Todorovic et al., (2009). Muchos autores a través de varias investigaciones han ponderado la importancia que tiene el consumo hídrico por las especies y su función en la producción de biomasa y en la obtención de la cosecha. Wit, (1958), citado por Todorovic et al., (2009); Hanks et al., (1976) y (1983); Tanner y Sinclair, (1983); Hsiao y Bradford, (1983); Steduto (1996); Steduto y Albrizio, (2005).

En cuanto a los modelos direccionados por CO₂, sobresalen WOFOST (World FOod STudies; Van Diepen et al., (1989), Boogaard et al., (1998) y otros modelos de cultivos de Wageningen Bouman et al., (1996); Van Ittersum et al., (2003). y el modelo CROPGRO (CROP GROwth) Boote et al., (1998), (2002) que fue integrado a DSSAT Hoogenboom et al., (1999); Tsuji et al., (1994). Estos modelos se basan en una descripción jerárquica del sistema, donde el nivel más alto es resultado de las respuestas de la integración de los procesos subyacentes del nivel inferior. La simulación de los procesos de crecimiento y desarrollo fenológico están regulados por la temperatura, la radiación, y el contenido de CO₂ en la atmósfera y se ven limitadas por la disponibilidad de agua. Por lo tanto la estructura es compleja y se requiere un gran número de parámetros y variables de entrada.

Hoy existe gran preocupación por los efectos que pueda causar el cambio climático en la producción agrícola, a varios niveles locales, nacionales y globales, por lo cual muchos grupos de investigación están involucrando en

sus modelos los efectos de la captura y producción del CO₂ en los procesos de producción agrícolas. En la medida en que se logre este objetivo los agentes interesados podrán estimar de mejor manera la incidencia del cambio climático y los efectos que tanto la producción agrícola como la captura de carbono puedan producir en el clima, y la forma como se pueda enfrentar el cambio climático y la adaptabilidad de los cultivos al clima.

La FAO como uno de los principales autores y promotores de estos esfuerzos publicó en el manual de riego y drenaje FAO 33 “Efectos del Agua Sobre el Rendimiento de los Cultivos”, (Doorenbos y Kassam, (1979)), el primer acercamiento al estudio de la estimación de la producción de los cultivos con base en la evapotranspiración potencial y real. En esta publicación se reconoce el importante papel que desempeña el agua en el proceso de desarrollo del cultivo, y en la complejidad del crecimiento de la planta, en la construcción de la biomasa y la obtención de la cosecha.

La complejidad de la respuesta de los cultivos al déficit hídrico llevó a la utilización empírica de funciones de producción como la opción más práctica para evaluar el rendimiento de los cultivos como respuesta al agua. Se planteó la forma para determinar el rendimiento de la respuesta al agua en especies tan disímiles como las hortalizas y cultivos de árboles a través de la ecuación de rendimiento mostrada en la ecuación [2.1].

$$\left[\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} \right] = k_y \left[\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right] \quad [2.1]$$

Donde; Y_x y Y_a son la producción máxima y real, ET_x y ET_a son la evapotranspiración máxima y real, y K_y es el factor de proporcionalidad entre la pérdida de producción relativa y la reducción de la evapotranspiración. La ecuación fue un referente desde su creación pero estuvo orientada a la evaluación de la producción de biomasa durante el ciclo completo de los cultivos.

Modelización de cultivos forrajeros previos a este estudio:

Para el modelo AquaCrop no se ha hecho hasta la presente ningún trabajo de calibración, validación o simulación de cultivos de pastos y/o forrajes. (Comunicación personal, Dirk Raes (2012)). Sin embargo, los pastos y forrajes han sido considerados principalmente en simulaciones de tipo teórico con el uso de otros modelos. Holzworth et al., (2014).

El sistema “Production Systems Simulator” (APSIM) iniciativa de Developer APSIM (1994) Keating et al., (2003), puede simular una variedad de pastos y forrajes. La gama de modelamientos de pastos y forrajes disponibles en

APSIM ha crecido durante la última década y ahora incluye varios forrajes anuales (por ejemplo: la avena y el sorgo forrajeros, *Lablab purpureus* y *Centrosema* spp.). La Alfalfa se ha modelado y validado en una amplia gama de entornos y sistemas (Chen et al., 2008, Dolling et al., 2005, Teixeira et al., 2009 y Verburg et al., 2007).

Respecto de la simulación de la avena forrajera por APSIM, se trata de un conjunto de algoritmos con base en diseño de clases que simulan el crecimiento de la planta por medio de sub-clases que representan los compartimientos o funciones de desarrollo y con base en información secundaria de experimentos aislados que sustentan los desarrollos y funciones de dichas clases. Brown et al., (2014).

También se han desarrollado varios modelos para pastos tropicales domésticos, aunque ninguno de ellos ha sido ampliamente validado, (Holzworth et al., (2014), por ejemplo: *Panicum var coloratum. Makarikariense* (Paydar et al., 2005) y el pasto Rhodes (Lawes y Robertson, 2008). Vínculos de APSIM con otros modelos animales de pastoreo también han traído la capacidad para simular pasturas nativas o mejoradas utilizando GRASP (Bell et al., 2008 y Rickert et al., 2000), raigrás perenne / trébol blanco usando AgPasture (Li et al., 2011) y un rango de mejores pasturas templadas y nativas a través del modelo de crecimiento de pastos GRAZPLAN (Moore et al., 1997).

El modelo AgPasture fue probado en Nueva Zelanda, en usos a escala de finca en una amplia gama de suelos y zonas climáticas. En algunas zonas se lograron predicciones aceptables de la producción que fue en promedio de 6,83 y 7,27 t.MS.ha⁻¹ con coeficientes de determinación hasta de 0,838 y 0.777. Sin embargo, hubo discrepancias entre los valores simulados y observados en algunos casos, con coeficientes bajos de 0,306, 0,314, 0,188 para condiciones de altas humedades y también de sequo, (Li et al., 2011). Es importante mencionar que este tipo de modelos usa parámetros de diseño muy diferentes a AquaCrop y sus concepciones metodológicas son también diferentes lo que impide una comparación directa de los resultados de ambos enfoques.

La integración de un módulo de pasto de múltiples especies en APSIM permite sistemas de pastoreo en zonas templadas moderadas (Li et al., 2011). La respuesta de la producción de las plantas al CO₂ en el modelado de pastos recién está siendo integrado, mediante la incorporación de los efectos de CO₂ en la fotosíntesis de la planta, la demanda de nitrógeno y la conductancia estomática (Li et al., 2013).

2.2 El Modelo AquaCrop

Sin embargo, desde 1979, son muchas las investigaciones que se ha realizado al respecto y los avances logrados por la comunidad científica y técnica, por esta razón, recientemente con motivo de la revisión del documento FAO de riego y drenaje No. 33, esta entidad comisiono un grupo de expertos para la revisión a fondo del citado documento. El resultado de la consulta encontró que los cultivos herbáceos y los cultivos de árboles deben ser tratados en forma diferente, por lo cual requieren tratamientos separados. Para cultivos herbáceos se recomendó desarrollar un modelo con una estructura y marco conceptual que podría ser más exacto, simple y robusto, para usarse en escenarios de planeación, manejo y simulación a diferentes escalas, el resultado fue el desarrollo del Modelo AquaCrop. Raes et al., (2009).

El modelo AquaCrop realizó un nuevo enfoque al problema de la producción de biomasa, considerando la separación de la evapotranspiración (ET) en la evaporación del suelo (E) y la transpiración del Cultivo (Tr) y además consideró el rendimiento final (Y) dividido en la biomasa (B) y el índice de cosecha (IC). La separación de la ET en E y Tr evita el efecto de la confusión del uso no productivo y consuntivo del agua E . Esto es un avance importante sobre todo durante los períodos en los cuales la cobertura del suelo es incompleta, pues el componente de transpiración es menor. La separación de Y en B e IC permite la distinción de la base funcional de las relaciones entre el medio ambiente y la biomasa (B) y el medio ambiente y la cosecha (IC). Estas relaciones son, en realidad, fundamentalmente diferentes y su uso evita la confusión de los efectos de estrés hídrico en la biomasa y la cosecha. Los cambios descritos se pueden representar en la ecuación [2.2]

$$B = WP \sum Tr \quad [2.2]$$

Donde Tr es la transpiración del cultivo (mm) y WP es el parámetro de productividad hídrica ($Kg_{biomasa}.m^{-2}$ y por mm de agua transpirada sobre el período de tiempo en el cual la biomasa es producida). Este paso de la ecuación [2.1] a la [2.2] tiene una implicación fundamental para la robustez del modelo debido a que la conducta de la WP es conservativa Steduto et al., (2009). Otra de las implicaciones del cambio es la escala de tiempo usada, pues el cálculo de la biomasa es independiente del ciclo del cultivo, pudiéndose usar incluso a nivel diario la aplicación de la ecuación [2.2].

AquaCrop utiliza además un número relativamente pequeño, explícito e intuitivo de parámetros y variables de entrada que requieren métodos relativamente sencillos para su determinación.

Los usos de AquaCrop van desde la evaluación de los recursos hídricos necesarios, para alcanzar los rendimientos de los cultivos en un determinado lugar geográfico, hasta apoyar la toma de decisiones sobre la asignación del agua y otras acciones de la política del agua.

Aunque el modelo reviste grandes expectativas a nivel puntual no se ha probado a niveles regionales ni con base en alguno de los cultivos de referencia, pastos o forrajes. Hasta la presente el modelo AquaCrop ha sido calibrado y validado sólo para una docena de cultivos herbáceos, los cultivos y equipos de investigación que han hecho esta labor están citados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Avances en calibración y validación del modelo AquaCrop.

Cultivo	Equipo de Investigación o Referencia
Maiz	Hsiao et al., (2009) Heng et al, (2009) Evelt; Hoogenboom; Howell y Rojas-Lara, citados por Steduto et al., (2009).
Algodón	Farahani et al, (2009), García-Vila et al., (2009) Abi Saab; Farahani; García; Kanber; Karma; Orgaz; Oweis; Ünlu; y Vanuytrecht citados por Steduto et al., (2009).
Quinoa	Geerts et al., (2009).
Trigo	Salemi et al., (2011) Abi Saab; Albrizio; Angus; Asseng; Bassu; Cossani; Giunta; Hoogenboom; Ortiz-Monasterio; Sadras; Slafer y Todorovic. citados por Steduto et al., (2009).
Remolacha Azucarera	Couet; Garofalo; Geets; Horemans; Rinaldi; Shrestha citados por Steduto et al., (2009).
Sorgo	Facchi; Hoogenboom; Singh; y Wani. citados por Steduto et al., (2009). Diouf; y Geerts. citados por Steduto et al., (2009).
Girasol	Todorovic et al., (2009) Abi Saab; Albrizio; Stöckle; y Zivotic, citados por Steduto et al., (2009).
Papa	Quiroz; Mares; Gutierrez; García; Jensen; y Wolfe. citados por Steduto et al., (2009).
Arroz	Bouman; Cabangon; Boling; Jabbar; Peng; Serraj; Siopongco y Vanuytreke. citados por Steduto et al., (2009).
Maní	Karunaratne et al., (2011) Patabandi. citado por Steduto et al., (2009).
Cebada	Araya et al., (2010).
Teff	Araya et al., (2010).

2.2.1 Características del modelo

El corazón del modelo AquaCrop es representado por la Figura 2.1, en ésta, aunque se presenta como punto central el proceso la radiación solar, no es considerada directamente sino dentro de la determinación de la evapotranspiración de referencia ET_0 el cual es un procedimiento que debe realizarse en forma externa al modelo, y se suministra como variable de entrada.

La ET_0 es obtenida siguiendo el procedimiento descrito por Allen et al., (1998), (Documento riego y drenaje FAO 56), en el caso de que no todas las variables requeridas para el cálculo de la ET_0 fueran disponibles, dicho

documento presenta métodos alternativos para obtenerlas. Además existe un Software independiente denominado “ ET_0 Calculator”, disponible en (FAO, Internet: www.fao.org) el cual está orientado para el cálculo de esta variable, con base en el método FAO Penman-Monteith.

Sin embargo, el verdadero motor del modelo es la productividad hídrica (WP) la cual es la base de la determinación de los procesos presentados en la Figura 2.1 para la determinación de la producción de biomasa con base en la transpiración del cultivo.

El continuo integrado de suelo, planta, atmósfera es considerado en el modelo con la determinación del balance hídrico del suelo, los procesos de crecimiento y desarrollo de la planta y en consecuencia la obtención de la biomasa y el rendimiento de la cosecha.

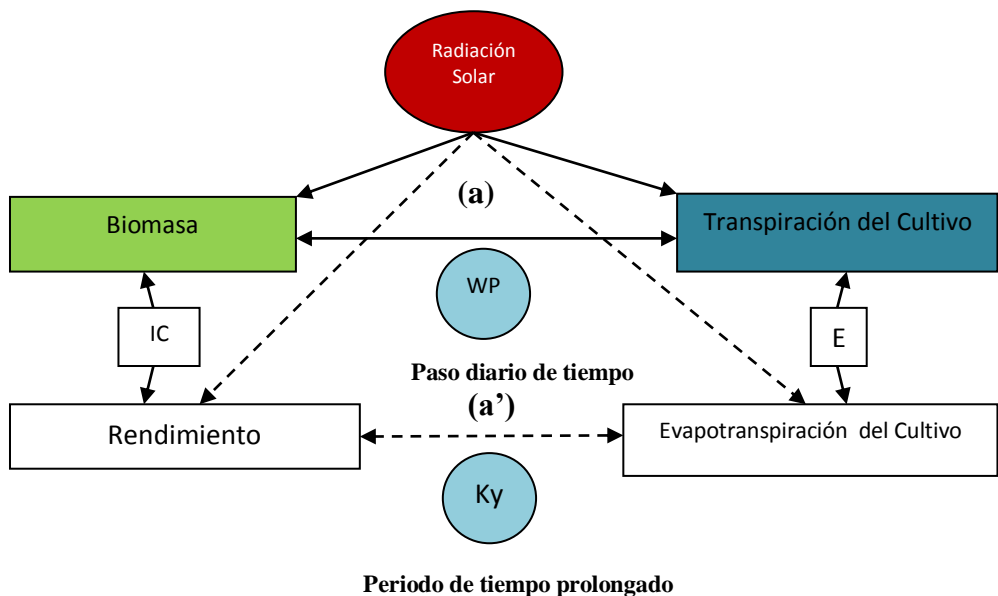


Figura 2.1 Esquema general del modelo AquaCrop en el que se resalta la introducción de la separación de la evaporación del suelo (E) y la transpiración del cultivo (Tr). Además de la división del rendimiento (Y) en biomasa (B) y el índice de la cosecha (IC)¹.

Además son considerados dentro del modelo el régimen de precipitación y el régimen termal, la demanda evaporativa de la atmósfera incluyendo la concentración de dióxido de carbono, adicionalmente el modelo considera

¹ Tomado de Raes, D. et al. (2009 a).

algunos otros aspectos de manejo como la irrigación, las coberturas del suelo, prácticas de surcos y diques, y la fertilización en forma general.

El nuevo enfoque, hacia el concepto de la productividad hídrica normalizada WP^* permite la consideración de espacios de tiempo más reducidos que los antiguos planteamientos de Doorenbos y Kassam, (1979). Representados en la Figura 2.1 por la variable de constante de productividad del cultivo (K_y) en donde los resultados eran obtenidos al final del ciclo del cultivo.

La Figura 2.2 muestra el diagrama de flujo del modelo AquaCrop con los componentes principales considerados.

El componente atmosférico considera el clima como el motor del proceso del flujo hídrico del sistema planta – suelo – atmósfera, este componente considera varios elementos que contribuyen en tres sentidos fundamentales:

(1) El balance hídrico. (2) El comportamiento fenológico de la planta con sus restricciones térmicas y (3) La construcción de biomasa con base en dos aspectos principales el potencial evaporativo de la atmósfera representado por la evapotranspiración de referencia (ET_o) y la disponibilidad de (CO_2) presente en la atmósfera, estos elementos van a ser los dos elementos tomados por el modelo para normalizar la productividad hídrica (WP).

Dentro del sistema de crecimiento de la planta se tienen en cuenta los procesos de expansión de la hoja y por lo tanto del dosel hasta su máximo desarrollo, la obtención de la cosecha y el posterior proceso de senescencia, todo lo cual se determina por la secuencia de seguimiento de la cobertura del suelo por el dosel.

Con base en estos procesos se evalúa en forma proporcional la evaporación del suelo, la transpiración del dosel, y por lo tanto la productividad hídrica normalizada (WP^*) que conlleva a la generación de la biomasa producida (B) y el índice de cosecha (IC) y por lo tanto del respectivo rendimiento.

El dosel representa la proporción de la transpiración real que consigue obtener biomasa a través de la productividad hídrica (WP). Por lo cual, la cosecha, que es determinada por el rendimiento (Y), es calculada a partir de la proporción de la biomasa con base en el índice de cosecha así:

$$Y = B * IC \quad [2.3]$$

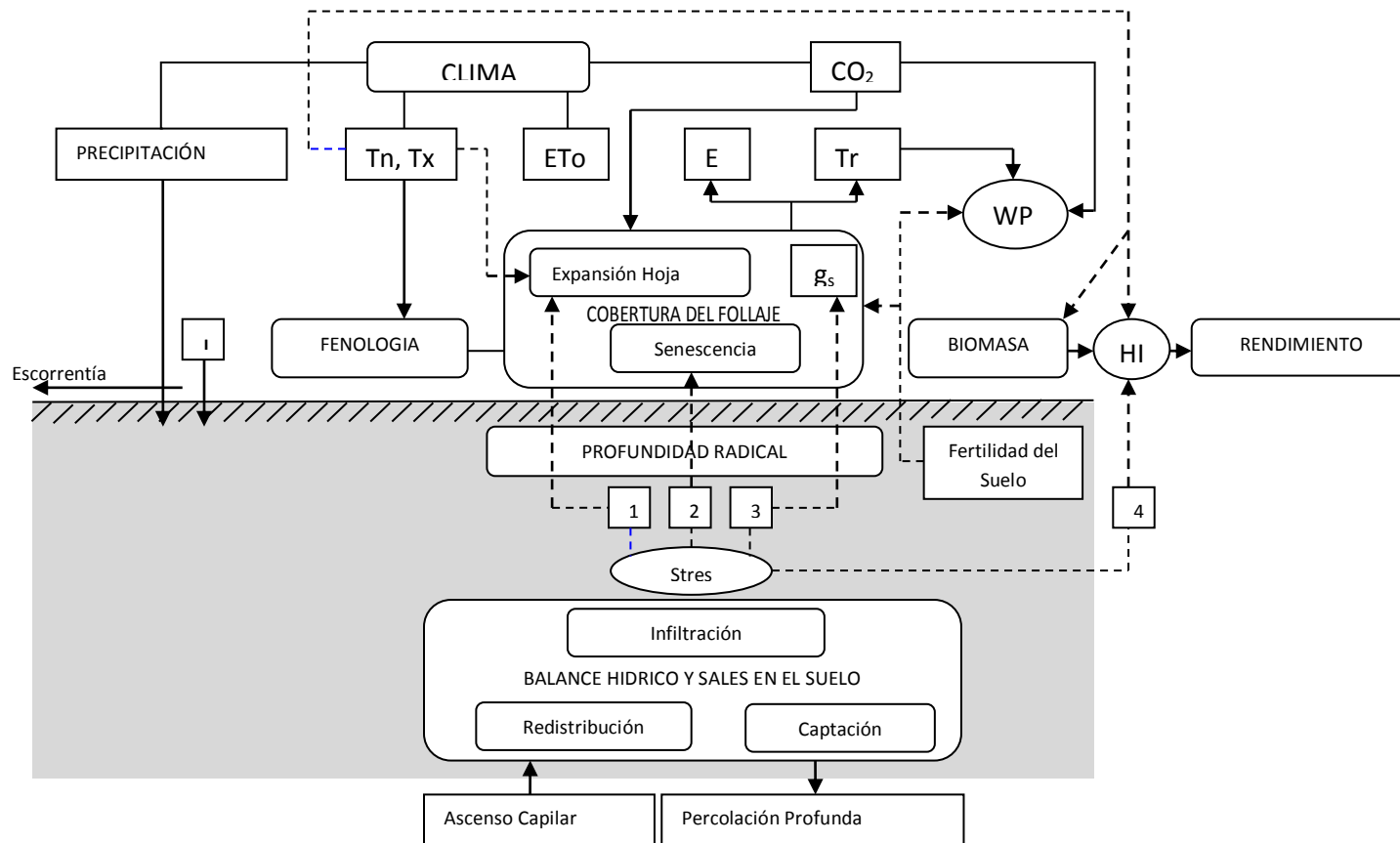


Figura 2.2 Diagrama de flujo del modelo AquaCrop, indicando los componentes principales del continuo suelo – planta – atmósfera considerados.²

² Tomado de Raes et al., (2009a).

Aunque AquaCrop usa el IC para calcular el rendimiento, el modelo no calcula la partición de la biomasa en varios órganos (por ejemplo, hojas, raíces, etc.), sino que la producción de biomasa es articulada por medio de la expansión del dosel y dependiente de la raíz. Esto simplifica los procesos y evita la complejidad del particionamiento, los cuales tienen actualmente alguna incertidumbre.

En el sistema suelo que sirve como repositorio del balance hídrico se observa anclado el sistema radical, no como un elemento estático sino como un ente vivo que crece a lo largo del ciclo del cultivo y que por lo tanto involucra capas de suelo con las respectivas características hidráulicas, en donde ocurren los procesos de escorrentía, infiltración, redistribución hídrica en las capas del suelo, drenaje, y percolación profunda. Raes et al., (2009).

El CO_2 , presente en la atmósfera va a contribuir a la expansión de la hoja y a la productividad hídrica. La concentración de CO_2 es obtenida a partir de los registros del Observatorio Mauna Loa en Hawai. El incremento del CO_2 en la atmósfera es considerado por AquaCrop con base en los reportes de los diferentes escenarios de Cambio Climático que son estimados a través de los años de acuerdo a los modelos de circulación global establecidos.

Existen tres funciones de respuesta al estrés hídrico sobre el desarrollo del dosel, la conductancia estomática, la senescencia temprana del dosel y el fracaso de la polinización.

Cada una de estas funciones son determinadas por los respectivos coeficientes de estrés hídrico (K_s), los K_s son modificados a partir del tipo de estrés que se presente y varían desde niveles sin estrés hasta totalmente estresado (valores desde uno a cero respectivamente).

2.2.2 Ventajas del modelo

El modelo AquaCrop marca un cambio sensible en la determinación de la biomasa y la producción agrícola de los cultivos herbáceos por tres aspectos fundamentales:

En primer lugar como ya se mencionó, cambia el antiguo manejo integrado de la evapotranspiración (ET) considerando por separado la Evaporación del suelo (E) y la Transpiración del cultivo (T_r), con lo cual se obtiene la verdadera incidencia que tiene el agua en la producción de biomasa y la incidencia de la evaporación en la superficie del suelo descubierto.

La consideración por separados de estos dos componentes hídricos, permite no sólo la posibilidad de la determinación del uso productivo (T_r) y no productivo (E) del agua en la producción del cultivo, sino también la

posibilidad de la evaluación de la cobertura vegetal y las áreas de la superficie del suelo libres con estimaciones a partir del uso de sensores remotos y medios fotográficos.

Otra ventaja del modelo es representada por la separación de la producción del cultivo (Y) en sus componentes de biomasa (B) y el índice de cosecha (IC), esto permite la distinción y el manejo por parte del modelo de la influencia del medio ambiente en la biomasa y la cosecha independientemente.

A menudo era difícil especialmente distinguir las diferencias entre los efectos del estrés hídrico con el desarrollo de la biomasa y la falta de agua y la producción de grano o fruto que se diferencia en el índice de cosecha, además teniendo en cuenta que para algunos cultivos el estrés hídrico que se presenta en antes de la formación de la cosecha puede incentivar una mejor producción por el aborto de flores y botones frutales concebidos en exceso por el cultivo.

Las respuestas del cultivo al déficit hídrico se simulan con cuatro modificadores o coeficientes que son funciones de la fracción de agua disponible en el suelo.

Esta fracción de agua disponible está modulada por la demanda de evaporación de la atmósfera, teniendo en cuenta las diferencias de sensibilidad al estrés hídrico de la planta de estos cuatro procesos: la expansión del Dosel, el control estomático de la transpiración, la senescencia de Dosel, y el Índice de Cosecha. Steduto et al., (2009).

Una de las principales ventajas de los modelos de direccionamiento hidráulico, comparado con respecto a los direccionados por energía solar, está en la oportunidad de normalizar el parámetro de WP para el clima (tanto de la demanda evaporativa como de la concentración de CO_2 en la atmósfera) y por lo tanto tiene una mayor aplicabilidad en el espacio y el tiempo. Steduto y Albrizio, (2005); Hsiao et al., (2007); Steduto et al., (2007).

La posibilidad de poder determinar o estimar la cantidad de biomasa producida en cualquier momento del ciclo fenológico del cultivo y poder aplicar escalas de tiempo diferentes al ciclo total o a la temporada de producción completa, o para escalas de tiempo grandes se ha podido detallar con el modelo AquaCrop el cual puede usar medidas de tiempo a nivel del día, estimando la biomasa para periodos muy cortos.

Desde el punto de vista operativo la ventaja del modelo reside en que los parámetros y variables de entrada al modelo son mucho más reducidos que los requeridos para la mayoría de los modelos de su clase orientados a la

obtención de la biomasa y la determinación de los volúmenes de producción. Además las variables requeridas en su mayoría son mucho más sencillas e intuitivas de obtener.

Para la determinación de los desarrollos de la biomasa sobre el suelo y su incidencia en la evapotranspiración real del cultivo, se ha trabajado tradicionalmente por la mayoría de los modelos existentes, con la supervisión del Índice de Área Foliar (*IAF*), el cual es en general dispendioso en su determinación.

Sin embargo, AquaCrop ya no requiere de éste índice, pues en su lugar se establece el seguimiento de la cobertura vegetal, la cual es muy sencilla en su determinación por medios fotográficos y puede incorporarse en un futuro a gran escala con el uso de los sensores remotos y los sistemas de información geográficos (*SIG*).

El modelo se centra en el agua porque es un motor clave de la producción agrícola, y porque el progresivo crecimiento de la población humana, el aumento de la industrialización y el nivel de vida en todo el mundo están exigiendo una mayor participación de nuestros recursos hídricos limitados, el agua es cada vez más un factor crítico que limita la producción de los cultivos. Además, la respuesta del cultivo al déficit hídrico sigue siendo una de las respuestas más difíciles de captar en el modelamiento de los cultivos, así como la variación del déficit hídrico en intensidad, duración y momento de ocurrencia. Hsiao, (1973); Hsiao et al., (1976), Bradford y Hsiao, (1982).

El modelo AquaCrop reemplaza la anterior metodología de considerar el déficit de presión de vapor como el poder evaporante de la atmósfera por la evapotranspiración de referencia (ET_0) determinada por el método de Penman-Monteith. Allen et al., (1998).

Esto se debe a que la ET_0 , también expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo, por lo cual es una variable climática. La ET_0 , además de considerar de hecho el déficit de presión de vapor y sus tendencias, considera componentes aerodinámicos y de radiación solar que determinan más confiablemente los niveles de consumo hídrico de las plantas.

Además hay que tener en cuenta que, el método de Penman-Monteith se recomienda como el único método de determinación de la ET_0 con base en los parámetros climáticos presentes en la atmósfera.

Este método ha sido seleccionado debido a que aproxima de una manera cercana la ET_0 de cualquier, localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e

incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos. Además se han desarrollado procedimientos para la estimación de los parámetros climáticos faltantes.

Sin embargo, es necesario aclarar que AquaCrop considera la ET_0 como una variable de entrada al modelo. Allen et al., (1998). Steduto et al., (2008). Por lo cual se recomienda que en futuras versiones el modelo pueda calcularlo a partir de la información climática suministrada.

Por último, la falta de transparencia y simplicidad de la estructura de un modelo para el usuario final se considera una limitación importante. Ya que muchos de los modelos propuestos están dirigidos también hacia ingenieros, administradores del agua, regadores, programadores del riego, agricultores y diseñadores de políticas, como economistas y dirigentes locales. Para hacer frente a todas estas preocupaciones, el modelo AquaCrop, logra un equilibrio óptimo entre exactitud, simplicidad y solidez. Steduto et al., (2009).

2.2.3 Limitaciones del modelo

Aunque el modelo tiene muchas ventajas en comparación con las limitaciones que pudiera presentar, es necesario presentar algunas de ellas con el fin de tenerlas en cuenta y trabajar en el proceso no sólo de mejorarlas sino de disminuirlas o analizar los resultados, teniendo en cuenta las consideraciones o connotaciones especiales que se deban considerar.

En primer lugar es necesario mencionar que el modelo aún no ha sido calibrado y validado para la mayoría de los cultivos, sin embargo ya existen algunos de ellos de importancia para los cuales se han hecho avances en calibración y validación. Ver Tabla 2.1.

Aunque muchos de los modelos orientados a la estimación o predicción de la producción o la biomasa producida por los cultivos no consideran la posibilidad de la espacialización y su enfoque no está destinado a la consideración de la variabilidad en el campo o el área de producción, este aspecto tampoco es tocado aún por el modelo AquaCrop, el cual, sin embargo seguramente se tendrá en cuenta en un futuro para ampliar su entorno con una versión aplicable o integrada sobre los Sistemas de Información Geográfica (S/G) (Comunicación personal con Steduto, (2011)).

Una vez se aborde el problema espacial, se debería también tener en cuenta la limitación de que AquaCrop considera los parámetros físicos e hidrodinámicos del suelo como uniformes en la totalidad del campo de producción, aspecto que sin embargo es también considerado en la mayoría de modelos de esta clase. El problema de la espacialidad se soluciona con la

aplicación de técnicas de modelación agroclimática distribuida y sistemas de información geográfica.

La mayoría de los avances de la ciencia en la materia, ocurridos desde el documento FAO 33 de riego y drenaje, Doorenbos y Kassam, (1979). Se reunieron en AquaCrop.

El modelo está orientado a casi todas las especies herbáceas especialmente por las características intrínsecas, biológicas, fisiológicas y de arquitectura, Sin embargo, no está orientado y es excluyente con respecto a las especies arbóreas. Las cuales deberán esperar o usar otros modelos que tengan alguna aproximación mayor a la estimación de la biomasa, la cosecha y la producción.

El modelo AquaCrop aún tiene algunos aspectos sobre los cuales se debe trabajar más como la consideración de la salinidad de los suelos y su relación con la disponibilidad hídrica y el estrés hídrico, los balances de sales y los procesos de solución en el agua de irrigación y de precipitación son aspectos recién introducidos y hay que validarlos. Se asume que la precipitación no contiene sales disueltas, tampoco se tiene en cuenta su influencia con la frecuencia de humedecimiento, la lixiviación, la evaporación y la transpiración. Tampoco su relación con las características físicas del suelo y las diferentes capas del perfil del suelo.

Por otro lado, aunque se considera el aspecto de la fertilización del suelo en forma muy general por medio de los coeficientes de estrés de fertilización ($f_{c_{Decline}}$ y $K_{SWP,x}$), no se tienen en cuenta los procesos de ciclaje y balance de nutrientes del suelo y la fertilidad es asumida como una variable de entrada en forma del nivel del coeficiente de fertilización, en este modelo no se considera como factor determinante la nutrición del cultivo pues está orientado a la productividad hídrica de la biomasa.

Dentro del balance hídrico se simula muy bien las condiciones de humedad del suelo con la consideración del concepto de cuadrícula – tiempo – profundidad que es el proceso para describir exactamente la retención, movimiento y actualización de agua en el perfil del suelo a través del ciclo del cultivo, AquaCrop divide tanto el perfil del suelo como el tiempo en pequeñas fracciones. Por lo cual el modelo sólo considera el flujo vertical de agua en forma unidimensional (vertical) y la captación de agua por la raíz puede ser resuelta por medio de una técnica de diferencias finitas sólo en una dimensión.

Se han considerado varias subrutinas que integran el balance hídrico entre las cuales se encuentran: La escorrentía; la cual es alimentada por la precipitación y con vectores de salida hacia los procesos de infiltración y los

excesos; la redistribución y drenaje del agua en el suelo; con aporte a la percolación profunda; la infiltración del suelo, considerando las entradas de la irrigación y las salidas de la subrutina de escorrentía; la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo.

Debido a que el modelo está en desarrollo recientemente se implementó los aportes de humedad del ascenso capilar proveniente de los niveles freáticos altos o aportes de humedad internos del suelo, esto es un novedoso elemento que debería también validarse. Además, en la parte inferior del perfil del suelo los excesos determinados por los flujos remanentes de la suma de los compartimientos (D_i) son considerados como la percolación profunda. Raes et al., (2009a).

Tanto los problemas de salinidad como el proceso de ascenso capilar fueron integrados al modelo a partir de la versión 4.0 que fue publicada durante 2012.

En el manual del usuario del modelo AquaCrop no se ha desarrollado el apartado de cobertura del dosel verde para cultivos forrajeros, ningún cultivo forrajero se ha calibrado ni validado. Los cultivos forrajeros son cultivos indeterminados (perennes) en su mayoría, los cuales son cortados varias veces por ciclo vegetativo. En cada corte la mayor parte de la biomasa generada por el cultivo es segada, Raes et al., (2009a).

El hecho de que los cultivos forrajeros no se hayan calibrado para el modelo AquaCrop se ha tomado en este trabajo, más como una oportunidad que como una limitación, por lo cual se aprovechó esta carencia para desarrollar el contenido de la presente investigación.

El modelo no tiene activo hasta la presente, la opción de “tipo de cultivo de especies forrajeras”, para la versión 4.0 se esperaba la inclusión de la primera de ellas para el caso de la Alfalfa, sin embargo esto no se realizó. Tampoco se ha establecido la posibilidad de simulación de los cortes periódicos los cuales se suelen realizar para algunas especies forrajeras. Esta es una característica importante a la hora de estimar la producción de biomasa en cultivos forrajeros, dado que el nivel del corte determina el desarrollo futuro del cultivo.

2.2.4 Cálculos y algoritmos más relevantes del modelo

A lo largo del ciclo del cultivo la cantidad de agua almacenada en la zona de la raíz es simulada teniendo en cuenta los volúmenes y vectores de entrada de agua al volumen de control previsto en la Figura 2.3 (lluvia y riego) y de salida (ET , escorrentía y percolación profunda).

2.2.4.1 Balance hídrico

El esquema de depósito de la zona de la raíz, es la base del balance hídrico, usando el concepto de lámina de agua se puede expresar el agua almacenada como se presenta en la ecuación [2.4].

$$Wr = 1000\theta Z \quad [2.4]$$

Dónde: Wr : contenido de agua en el suelo en la zona de raíces expresado como lámina [mm]. 1000: Factor de conversión del contenido de agua en el suelo expresado como lámina por unidad de profundidad de suelo. [$\text{mm}_{(\text{lámina de agua})} \cdot \text{m}(\text{profundidad de suelo})^{-1}$]. θ : Humedad volumétrica del suelo [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$]; Z : Profundidad efectiva de raíces [m].

Por otro lado se puede utilizar el concepto de agotamiento de agua en la zona de raíces como el nivel útil para la planeación del riego y para el manejo del estrés hídrico. Este se refiere a la cantidad de agua que se requiere para suplir el nivel de referencia el cual se alcanza en la humedad a capacidad de campo (CC). El nivel de agotamiento en la zona de raíces está dado por:

$$Dr = Wr_{CC} - Wr = 1000(\theta_{CC} - \theta)Z \quad [2.5]$$

Donde Dr : Lámina de agua en la zona de agotamiento de la raíz [mm]; Wr_{CC} : Contenido de agua en el suelo de la zona de raíces a capacidad de campo [mm]. ($=1000 \theta_{CC} Z$); Wr : Contenido real de agua en el suelo en la zona de raíces expresada como lámina [mm]; θ_{CC} : Contenido volumétrico de agua a capacidad de campo [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$]; θ : Contenido real volumétrico de agua en la zona de raíces [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$].

Si el contenido de agua en el suelo sobrepasa el nivel de CC se obtienen valores de agotamiento negativos en la zona de la raíz, lo que indica excesos de humedad.

La cantidad total de agua aprovechable en el suelo extraíble por la planta está dada por la diferencia de humedades entre la CC y el punto de marchitez permanente (PMP).

$$AAT = Wr_{CC} - Wr_{PMP} = 1000(\theta_{CC} - \theta_{PMP})Z \quad [2.6]$$

Dónde: AAT : Lámina de agua aprovechable total en la zona de raíces [mm]; θ_{CC} : Contenido volumétrico de agua a CC [$m^3 \cdot m^{-3}$]; θ_{PMP} : Contenido volumétrico de agua a PMP [$m^3 \cdot m^{-3}$]; Z : Profundidad efectiva de raíces [m]; Wr_{CC} : Lámina de agua en la zona de raíces del suelo a CC. [mm]; Wr_{PMP} : Lámina de agua en la zona de raíces del suelo a PMP [mm].

En el PMP el nivel de agotamiento en la zona de raíces es igual a AAT .

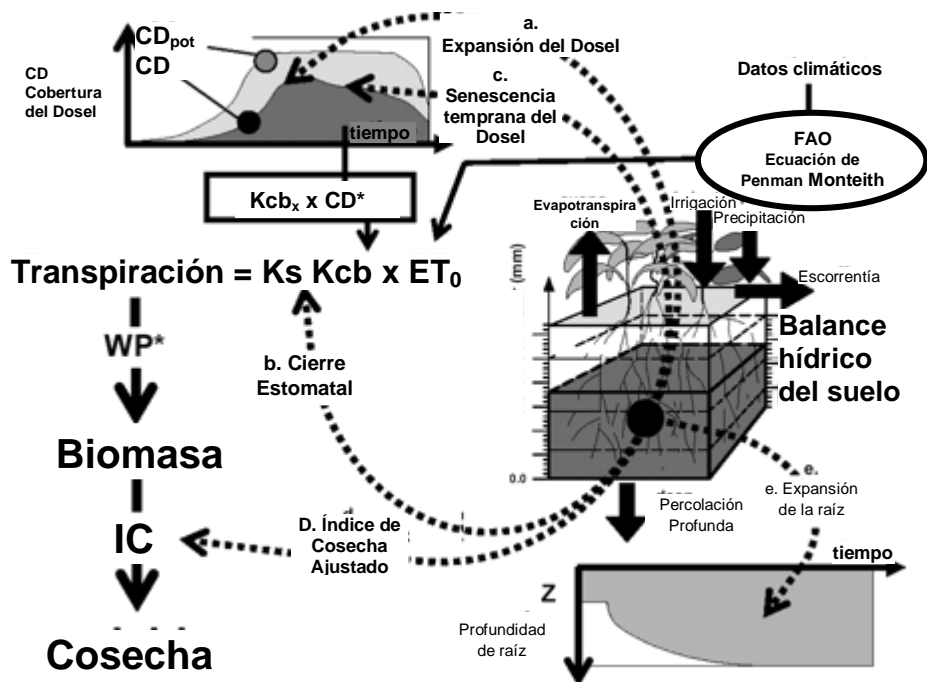


Figura 2.3 Esquema general de cálculo del Modelo AquaCrop. Las flechas de puntos indican los procesos que se tiene en cuenta, (desde a hasta e) y que afectan el estrés hídrico. La CD^* es la cobertura del dosel ajustado por microadvección, CD_{pot} , es la cobertura del dosel potencial, y K_s es el coeficiente de estrés (el cual es específico para cada proceso). IC es el índice de cosecha, K_{ctr} , es el coeficiente de transpiración del cultivo, WP^* es la productividad hídrica normalizada para ET_0 y la concentración de CO_2 del aire, ET_0 es la evapotranspiración de referencia.³

El nivel de agotamiento en la zona de raíces determina la magnitud de los coeficientes de estrés hídrico (K_s), los cuales afectan (1) la expansión de la cobertura del dosel, (2) la conductancia estomática y por lo tanto la transpiración del cultivo por unidad de CD , (3) la senescencia y la decadencia

³ traducido de Raes et al., (2009a)

del dosel, y (4) el índice de cosecha (*IC*). Además, (5) la tasa de profundización de la raíz determina una función de *Ks* para la conductancia estomática. Raes et al., (2009a).

Para describir la retención de humedad, y el movimiento del agua en el perfil del suelo a través del ciclo del cultivo, AquaCrop divide tanto la profundidad de la raíz como el tiempo en pequeñas fracciones, considerando el flujo del agua verticalmente de tal manera que la captación de agua en los compartimientos de la raíz pueden ser resueltas por la técnica de las diferencias finitas. Carnahan et al., (1969); Bear, (1972) citados por Raes et al., (2009a).

La malla generada tiene espaciamentos ΔZ y Δt los cuales son establecidos dentro de las variables independientes de espacio (*Z*) y tiempo (*t*). La ecuación de flujo y de extracción de agua por las raíces de la planta son resueltas para cada nodo en las diferentes profundidades (*Z_i*) y deltas de tiempo (*t_i*), de tal forma que las variables dependientes como el contenido de humedad $\theta_{i,j}$ son determinadas para cada uno de los nodos de la malla solución y para todos los pasos de tiempo.

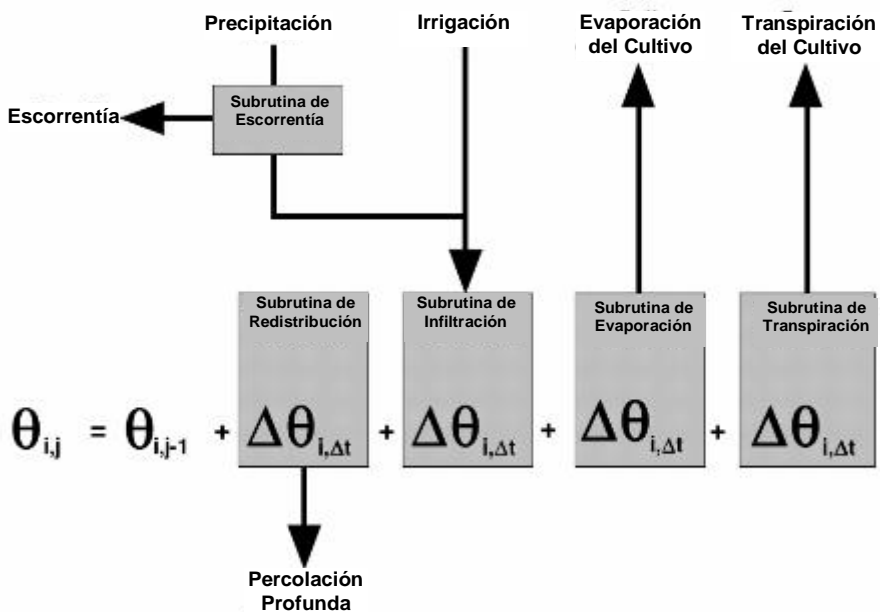


Figura 2.4 Esquema del cálculo del balance hídrico del suelo en AquaCrop.⁴

AquaCrop genera intervalos de tiempo de 1 día e incrementos de profundidad de 0.1m por defecto. Se asignan las características hidráulicas del perfil del

⁴ Traducido de Raes, D. et al., (2009a).

suelo a los compartimientos respectivos del horizonte al cual pertenecen. La programación establecida permite al usuario ajustar el número y medida de los compartimientos del suelo.

En AquaCrop la ecuación diferencial de flujo es reemplazada por un conjunto de ecuaciones de diferencias finitas (en sub-rutinas), escritas en términos de la variable dependiente Θ . La simulación se inicia con el drenaje del perfil del suelo. Subsecuentemente la infiltración en el perfil del suelo, una vez se ha abstraído la escorrentía superficial, y finalmente se calcula la cantidad de agua perdida por evaporación del suelo y la transpiración del cultivo. En cada una de las sub-rutinas el contenido de agua en el suelo es actualizado al final del paso del tiempo (j) y en cada punto de la cuadrícula (i). La determinación del contenido de agua final de cada paso de tiempo es el resultado de los varios procesos descritos en las diferentes subrutinas. La Figura 2.4 muestra en forma esquemática las subrutinas consideradas y la interacción entre estas.

2.2.4.2 Sub – rutina de redistribución y drenaje

El drenaje es considerado cuando la Θ supera al nivel de CC. Para simular la redistribución de agua dentro de una capa del suelo, se considera que el drenaje y la percolación profunda salen del perfil, la precipitación y/o irrigación entran a él. AquaCrop hace uso de la función de drenaje Raes, (1982); Raes, et al., (1988); Raes et al., (2006) citados por Raes, (2009a):

$$\frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} = \tau(\theta_{sat} - \theta_{CC}) \frac{e^{\theta_i - \theta_{CC}} - 1}{e^{\theta_{sat} - \theta_{CC}} - 1} \quad [2.7]$$

Dónde: $\frac{\Delta\theta_i}{\Delta t}$: Variación del contenido de agua en el suelo a la profundidad i , durante un paso de tiempo Δt [$m^3 \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$]; τ : Drenaje característico [Adim]; θ_i : Contenido real de agua en el suelo a la profundidad i [$m^3 \cdot m^{-3}$]; θ_{SAT} Contenido de agua a saturación [$m^3 \cdot m^{-3}$]; θ_{CC} : Contenido de agua en el suelo a capacidad de campo [$m^3 \cdot m^{-3}$]; Δt : Paso de tiempo [Día].

Nota: Si $\theta_i = \theta_{CC}$ Entonces $\frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} = 0$
 Si $\theta_i = \theta_{SAT}$ Entonces $\frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} = \tau(\theta_{SAT} - \theta_{CC})$.

La función de drenaje utilizada en AquaCrop imita muy bien la infiltración y el drenaje interno observado en el campo. García, (2003); Raes et al., (2006); Descheemaeker, (2006); Geets et al., (2009) citados por Raes, (2009a).

- Drenaje Característico τ (τ)

El drenaje característico τ [tau, Adim] expresa la disminución del contenido de agua en una capa de suelo a saturación al final del primer día de drenaje libre, y se expresa como la fracción total de la cantidad de agua drenable contenida entre la humedad a saturación y la CC, se puede expresar en porcentaje decimal o adimensionalmente. τ varia de cero para suelos impermeables hasta 1 para suelos completamente drenados al final del primer día. En AquaCrop se considera la relación entre el drenaje característico y la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) por la siguiente relación: Según, Barrios, (1999).

$$0 \leq \tau = 0,0866K_{sat}^{0,35} \leq 1 \quad [2.8]$$

Donde la K_{sat} : Conductividad hidráulica saturada [mm.día⁻¹].

Para mayores detalles sobre el proceso que AquaCrop toma para el desarrollo de la subrutina de drenaje se puede consultar el Manual de AquaCrop Raes et al., (2009a).

2.2.4.3 Sub – rutina de escorrentía superficial

Para la determinación de la escorrentía superficial AquaCrop se basa en el método de la Curva Número desarrollado por Soil Conservation Service US. USDA, (1964); y Rallison, (1980); Steenhuis et al., (1995), citados por Raes et al., (2009a) el cual se describe en la ecuación [2.9]:

$$RO = \frac{[P - (0,2)S]^2}{P + S - (0,2)S} \quad [2.9]$$

Con S determinado por:

$$S = 254 \left[\frac{100}{CN} - 1 \right] \quad [2.10]$$

Dónde: RO : Lámina de agua perdida por escorrentía superficial [mm]; P : Lámina de precipitación [mm]; $(0.2)S$: Lámina de agua que puede infiltrarse antes de que ocurra la escorrentía, o Abstracción Inicial [mm]; S : Lámina máxima potencialmente almacenada en el suelo [mm], determinada por la ecuación [2.10]; CN : Número de Curva.

En general la ecuación describe que la precipitación que cae sobre suelos no saturados se infiltra, incrementando el contenido de agua, hasta que la parte superior del suelo llega a saturarse ($P = 0.2S$), después la precipitación adicional llega a ser escorrentía superficial. La curva número es una función de su tipo de pendiente, uso del suelo, cobertura vegetal, y el humedecimiento relativo de la parte superior del suelo. Raes et al., (2009a) presenta la Tabla 2.2 en la que se consignan los valores de *Número de Curva (CN)* para varias clases de humedad antecedente (*CHA*) II y para varias tasas de infiltración según el contenido de agua en el suelo.

Tabla 2.2 Valores indicativos de CN para varias Clases de Humedad Antecedente (CHA) II y sus correspondientes valores para CHA I (seco) y III (húmedo) para varias tasas de infiltración.⁵

CHA	Contenido de agua en el suelo	Tasa de Infiltración (mm/día)			
		>250	250 - 50	50 - 10	<10
I	Punto de marchitez permanente	45	56	63	70
II	Valor por defecto	65	75	80	85
III	Capacidad de campo	84	88	91	93

Los valores presentados son derivados de acuerdo a Smedema y Rycroft, (1983) según Raes et al., (2009). A partir de los valores de la Tabla 2.2. AquaCrop interpola en forma lineal de acuerdo a la humedad presentada por la capa superficial del suelo, el cálculo del humedecimiento relativo en la capa superior del suelo se extiende hasta los primeros 0.3 m, pero dando un peso más grande del contenido de agua en la superficie que a dicha profundidad.

Como se supone que la irrigación es controlada; la sub-rutina de escorrentía se salta para el cálculo de la escorrentía de riego, por lo cual se asume que el agua remanente es cero. Sin embargo, se puede suponer que el riego tenga una aplicación neta superior. También, para del manejo de la escorrentía por medio de jarillones o surcos cerrados como en el caso de arroz riego, la sub-rutina de escorrentía se omite, pero se limita la máxima capacidad de almacenamiento a la altura de los surcos.

2.2.4.4 Sub - rutina de infiltración

Después de la substracción de la escorrentía superficial, la parte remanente de la precipitación y la irrigación infiltrará en el perfil del suelo. En AquaCrop, se simula que la cantidad de agua que infiltra en el perfil del suelo sea almacenada en compartimientos subsiguientes desde la parte superior hacia

⁵ Tomada de: Raes, D. et al. 2009(a) Manual de referencia de AquaCrop.

abajo. Existe un umbral de humedad θ_i ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) máximo en las diferentes profundidades del suelo, que dependen de la tasa y de la cantidad de infiltración que aún no es almacenada en el perfil del suelo. Si el flujo excede la tasa de infiltración máxima de la correspondiente capa del suelo, es decir $\theta_i = \theta_{\text{sat}}$, el agua adicional será almacenada en el compartimiento anterior, hasta que la parte remanente, que ha pasado a través del respectivo compartimiento por unidad de tiempo, sea igual a la máxima tasa de infiltración.

En el proceso de infiltración se toma en cuenta la humedad inicial del perfil del suelo, la cantidad de agua que infiltra durante el paso del tiempo, la tasa de infiltración y las características de drenaje de las varias capas del perfil del suelo.

2.2.4.5 Sub – rutina de evapotranspiración

AquaCrop incluye varios procedimientos de cálculo para simular la evapotranspiración del cultivo. En primer lugar se utiliza el concepto del coeficiente del cultivo dual de Allen et al., (1998), para diferenciar la transpiración del cultivo con la evaporación del suelo.

$$ET_c = (Kcb + Ke)ET_0 \quad [2.11]$$

Dónde: ET_c : evapotranspiración del cultivo [$\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$]; ET_0 : es la evapotranspiración de referencia, la cual indica el poder evaporativo de la atmósfera. [$\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$]; Kcb : es el coeficiente basal del cultivo, el cual indica la transpiración del cultivo. [Adim]; Ke : es el coeficiente e evaporación de agua del suelo [Adim].

Es importante mencionar que el valor de ambos coeficientes dependen de la cobertura del dosel, por lo cual el coeficiente basal es proporcional a la cobertura del dosel ($Kcb \sim CD$, y $Ke \sim (1-CD)$).

El estrés hídrico afecta la evapotranspiración, a medida que el agua disponible de la superficie del suelo disminuye las tasas de transpiración del cultivo y de evaporación del suelo disminuyen y la demanda evaporativa de la atmósfera puede superar la disponibilidad hídrica. Por esta razón Aquacrop soluciona este proceso por medio de dos coeficientes: El coeficiente de cierre estomatal Ks_{sto} para la transpiración del cultivo y el coeficiente de reducción de la evaporación del suelo Kr ; la ecuación [2.11] queda entonces como:

$$ET_c = (Ks_{sto} Kcb + KrKe)ET_0 \quad [2.12]$$

2.2.4.5.1 Sub – rutina de evaporación

AquaCrop considera dos estados en el proceso de evaporación: Estado I; de limitación de energía; Estado II; declinación de la tasa, cuando el transporte de agua en las capas de la superficie del suelo están bajo limitación. Philip, (1957); Ritchie, (1972).

Estado I: Estado de limitación de energía: ocurre cuando hay suficiente disponibilidad de agua en el suelo, el agua es evaporada de una delgada capa de la superficie del suelo ($Z_{e,sup}$) que está en contacto con la atmósfera. En este estado la tasa de evaporación es sólo determinada por la energía disponible y el nivel actual de la evaporación.

Estado II: Estado de tasa de declinación: ocurre cuando toda el agua es evaporada de la capa superficial, y existe un flujo de agua de la capa inferior del suelo de bajo de $Z_{e,sup}$. La evaporación del suelo no sólo es determinada por la energía disponible sino depende también de las propiedades hidráulicas del suelo. La habilidad para transferir el agua a la capa superficial del suelo se reduce en la medida que el contenido de agua del perfil del suelo se reduce. Por esta razón la tasa de evaporación decrece en función del tiempo.

Los conceptos de Agua Rápidamente Evaporable (*ARE*) se tienen en cuenta en AquaCrop por medio de la ecuación [2.13]:

$$ARE = 1000(\theta_{CC} - \theta_{aire.seco})Z_{e,sup} \quad [2.13]$$

Dónde: *ARE*: Agua Rápidamente Evaporable [mm o $m^3.m^{-3}$]; expresa la cantidad máxima de agua que puede ser extraída por evaporación del suelo de la capa húmeda en el estado I. θ_{CC} : Contenido volumétrico de agua a capacidad de campo [mm, o $m^3.m^{-3}$]; $\theta_{aire.seco}$: Contenido volumétrico de agua en el aire seco [mm, o $m^3.m^{-3}$]; $Z_{e,sup}$: Espesor de la capa de la superficie del suelo en contacto directo con la atmósfera [m].

El punto de contenido volumétrico de agua en el aire seco constituye el punto de equilibrio entre la capa superficial del suelo y la atmósfera. Este contenido se estima como el 50% de Agua Aprovechable, para la capa superficial, $Z_{e,sup}$, Ritchie, (1972) encontró que 40 mm es un valor apropiado.

La energía disponible para la evaporación máxima del suelo (E_x) determina la evaporación del suelo en el estado I y está dada por:

$$Ex = K_e ET_0 = [(1 - CD^*) K_{e_x}] ET_0 \quad [2.14]$$

Dónde: ET_0 : Evapotranspiración del cultivo de referencia [mm.día⁻¹]; $(1-CD^*)$: Fracción ajustada de la superficie del suelo no cubierta [%]; CD : Cobertura del dosel [Fracción de la cobertura del suelo, %]; K_e : Coeficiente de evaporación del suelo para humedad total de la superficie del suelo [Adim]; K_{e_x} : Coeficiente de evaporación del suelo para humedad total y superficie del suelo no sombreada. [Adim].

El valor del coeficiente de la evaporación máxima (K_{e_x}) para una superficie húmeda no sombreada es un parámetro del programa, determinado en 1.10 según Allen et al., (1998), sin embargo este puede ser ajustado por el usuario.

Para el cálculo de la superficie del suelo que genera la evaporación se presenta un efecto micro-advectivo por el comportamiento de la fracción de la superficie del suelo no cubierto por el dosel ($1-CD^*$) dado por la ecuación [2.15], la cual se basa en resultados experimentales de Adams et al., (1976) y Villalobos y Fereres, (1990) citados por Raes et al., (2009a):

$$(1 - CD^*) = 1 - 1,72CD + CD^2 - 0,30CD^3 \geq 0 \quad [2.15]$$

Cuando la cobertura del dosel declina al final del estado del ciclo vegetativo del cultivo, empieza la marchitez y si antes de éste punto; se presentan niveles de estrés hídrico, entonces el nivel de evaporación del suelo es mucho más fuerte que el descrito por ($1-CD^*$).

A pesar de que el dosel decrece al final del ciclo. El suelo permanece bien cubierto por el dosel marchito incluso cuando la cobertura del dosel llega a cero al final del ciclo del cultivo.

El ajuste se hace por medio de dos factores: Un coeficiente que expresa el efecto de abrigo de la cobertura del dosel muerto, f_{cd} , (varia de 1 a 0); y CD_{sup} que es la cobertura del dosel antes de la senescencia, cuando la cobertura del dosel ha alcanzado su máximo valor, ($CD_{sup} = CD_x$), entonces la evaporación máxima (Ex) se calcula de la siguiente manera:

$$Ex = (1 - CD^*) (1 - f_{CD} CD_{sup}) K_{e_x} ET_0 \quad [2.16]$$

A pesar de que Allen et al., (1998) mencionan que la cantidad de reducción de la evaporación de agua en el suelo cubierto por molch orgánico es de cerca del 5% de cada 10% de cobertura orgánica, el valor de f_{CD} es de 0,60 por lo que el cultivo erguido da mejor abrigo contra el efecto del viento seco que la materia orgánica muerta. Raes et al., (2009a).

f_{CD} se incrementa gradualmente desde 0, al inicio de la senescencia del ciclo vegetativo hasta su estado final cuando CD es la mitad de CD_{sup} . En el manual de referencia de AquaCrop Raes et al., (2009a) se detalla el manejo de los procesos de senescencia, cobertura de la vegetación muerta y los coeficientes considerados.

Cuando existe un humedecimiento parcial por irrigación, (p. ej. caso de goteo) la E_x es multiplicada por la fracción de la superficie humedecida (f_w). Allen et al., (1998):

$$E_{x,ajust} = E_x f_w \quad [2.17]$$

2.2.4.5.2 Evaporación real del suelo (E)

Estado I: Cuando llueve o hay riego, el agua infiltrada llena la capa superficial del suelo hasta que el nivel de ARE es alcanzado. Por lo cual el suelo se encuentra en el estado de limitación de la energía, y la tasa real de evaporación del suelo máxima es:

$$E_{EstadoI} = E_x \quad [2.18]$$

Estado II: Cuando el ARE es removida de la capa superficial del suelo, la evaporación cambia al estado de tasa de decaimiento, y la tasa de evaporación está dada por:

$$E_{EstadoII} = Kr E_x \quad [2.19]$$

El Coeficiente de Reducción de Evaporación (Kr) varía con la cantidad de agua agotada en la capa superior del suelo. El valor es de 1 cuando el suelo está suficientemente húmedo y la evaporación no está limitada (Estado I). Kr decrece cuando el agotamiento del agua se incrementa y es cero cuando la capa superior del suelo llega a ser aire seco. Para determinar la forma del declive de la conductividad hidráulica (K_ψ) con la disminución del contenido de agua en el suelo, AquaCrop usa una ecuación exponencial para relacionar Kr al contenido relativo de agua de la capa superior del suelo (W_{rel}):

$$0 \leq Kr = \frac{\exp^{f_k W_{rel}} - 1}{\exp^{f_k} - 1} \leq 1 \quad [2.20]$$

Dónde: f_k es un factor de disminución de la evaporación y W_{rel} es el contenido relativo de agua de la capa del suelo a través de la cual el agua se mueve a la capa superficial del suelo que evapora.

Al inicio del Estado II W_{rel} comienza a disminuir desde 1 hasta 0 cuando no existe gradiente hidráulico remanente. El factor de declinación f_k depende de las propiedades hidráulicas del suelo y puede ser usado para calibrar K_r cuando existen mediciones de la evaporación del suelo. La declinación de K_r con la disminución de W_{rel} es alterado por la variación del valor de f_k . Cuando f_k toma un valor de 4, se obtuvo un buen ajuste entre la raíz cuadrada del tiempo y el contenido de agua en el suelo en forma aproximada, Ritchie, (1972), citado por Raes et al., (2009a). En la Figura 2.5, se presenta cómo se relaciona el coeficiente de reducción de la evaporación K_r , con el contenido de agua relativo en el suelo W_{rel} , considerando varios factores de declinación de la evaporación f_k . Este comportamiento se presenta en $Z_{e,sup}$, es decir en la capa superior del suelo desde la cual fluye el agua a la superficie de evaporación.

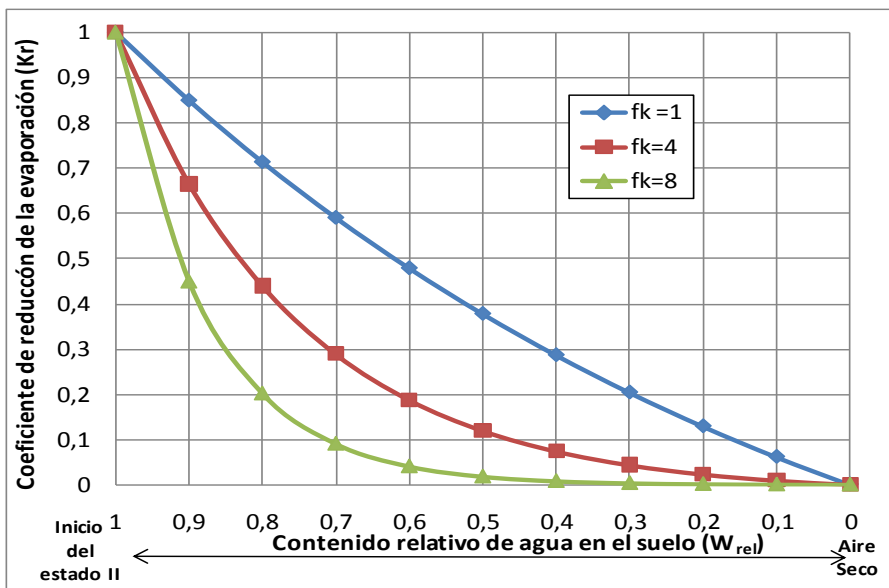


Figura 2.5 Comportamiento del factor de declinación de la evaporación (f_k) teniendo en cuenta la relación entre el coeficiente de reducción de la evaporación K_r para la Etapa II y el contenido de agua relativo de la capa del suelo W_{rel} .⁶

⁶ Tomado de Raes, D. et al., (2009b).

El contenido de agua relativa al cual K_r es 1 (en el límite superior) es el contenido de agua de la parte superior del suelo al final del estado I. El límite superior está cercano a la saturación cuando el suelo es lentamente drenado y cercano a CC cuando el suelo drena rápidamente. Sin embargo, AquaCrop asume que el límite superior no puede caer bajo el nivel de agotamiento. ($CC - ARE$).

Cuando K_r varía fuertemente con la W_{rel} , especialmente en el comienzo de la Estación II, el paso del tiempo diario de la rutina se adecua y se divide en 20 fracciones iguales para obtener una solución diferencial de la ecuación [2.19]. Al final de cada pequeño paso de tiempo, el contenido de agua del perfil del suelo es actualizado y K_r es estimado con la ecuación [2.20]. Por lo cual el paso del estado I a II puede ocurrir durante el día, logrando así ser simulado bien. Raes et al., (2009a).

AquaCrop coloca $Z_{e,sup} = 0,15$ m. Sin embargo, cuando $W_{rel} = 0,4$, $Z_{e,sup}$ se expande a una máxima profundidad la cual es un parámetro programado. Este valor por defecto es 0,3 m y su rango es de 0,15 a 0,50 m.

2.2.4.5.3 La transpiración del cultivo (Tr)

La transpiración del cultivo es máxima cuando la zona de las raíces está bien húmeda Tr_x y es proporcional a la fracción de cobertura del dosel:

$$Tr_x = KcbET_0 = [CD * Kcb_x]ET_0 \quad [2.21]$$

Dónde: ET_0 : Evapotranspiración del cultivo de referencia [$mm.día^{-1}$]; Kcb_x : Coeficiente para la transpiración del cultivo máximo (suelo bien regado y dosel completo, $CD = 1$); $[Adim]$; CD^* : Cobertura real del dosel ajustada para efectos micro-advectivos; [% , o fracción]

$$CD^* = 1,72CD + CD^2 - 0,30CD^3 \quad [2.22]$$

El coeficiente de transpiración del cultivo cuando el dosel está completo (Kcb_x) es el mismo coeficiente de transpiración basal máximo, este representa una integración de los efectos de las características de transpiración del cultivo con el dosel completo.

Este coeficiente es 5 a 10% más alto que el de referencia, e igual a 15 - 20% más grande para algunos cultivos altos tales como el maíz, sorgo, o caña de azúcar. El coeficiente Kcb_x es aproximadamente equivalente al coeficiente basal del cultivo a media estación para diferentes cultivos según Allen et al., (1998), sin embargo, esto sólo se cumple para los casos en que CD es total.

Después de que se alcanza CD_x en óptimas condiciones y antes de la senescencia, el dosel inicia el envejecimiento poco a poco y sufre una pequeña aunque progresiva reducción en la capacidad de transpiración y de fotosíntesis.

Esto se simula por aplicación del factor de ajuste (f_{edad}) que disminuye a Kcb_x por una fracción constante y pequeña (p. ej. 0.3% Raes et al., (2009a) por día), lo cual da como resultado un coeficiente de ajuste del cultivo ($Kcb_{x,ajust}$).

La CD_x es alcanzada cuando el ciclo del cultivo llega a la edad de t_{CDx} en el caso de que no se hubiera presentado el estrés hídrico. (Generalmente al inicio de mediados del ciclo del cultivo), después de una pequeña fase de retraso de 5 días. AquaCrop determina $Kcb_{x,ajust}$ como:

$$Kcb_{x,ajust} = Kcb_x - (t - 5)f_{edad}CD_x \quad [2.23]$$

Dónde: t : es el tiempo en días después de t_{CDx} (t es cero a t_{CDx}), [días] y f_{edad} : Factor de la reducción expresada como una fracción de CD_x , el cual requiere ajuste para cultivos anuales. [Adim] CD_x : Máxima cobertura del dosel [% o fracción]; Kcb_x : Coeficiente del cultivo máximo; $Kcb_{x,ajust}$: Coeficiente del cultivo máximo ajustado.

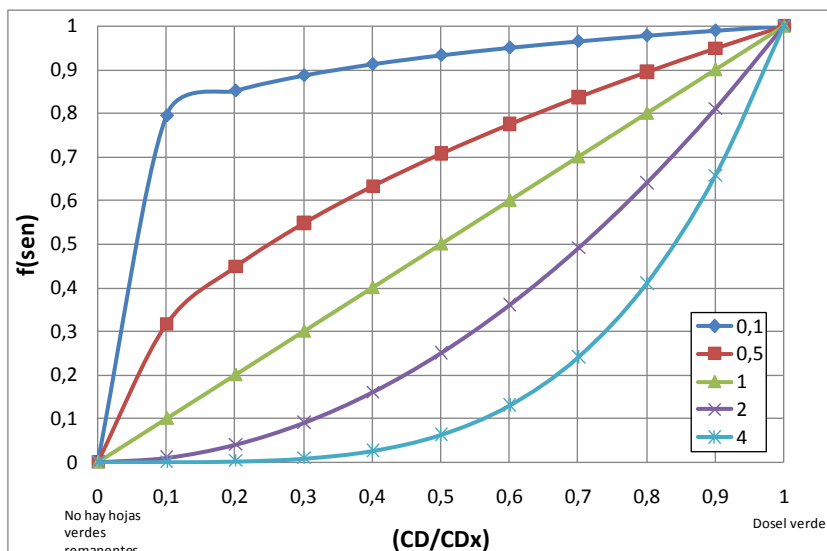


Figura 2.6 Factor de senescencia f_{sen} para varios grados de marchitamientos del dosel y algunos valores del exponente “a” y la relación CD/CD_x .⁷

⁷ Tomado de Raes, D. et al. 2009(a).

Para el caso de cultivos forrajeros y pasturas, cuando el dosel es segado en cada corte, se cancela el envejecimiento y un nuevo dosel se desarrolla. Una vez sea alcanzado CD_x después del corte, el dosel envejece nuevamente por el pisoteo, lo cual es descrito por la ecuación [2.23].

Cuando la senescencia es activada, la transpiración y la capacidad fotosintética de la porción del dosel cae más marcadamente con el tiempo. Esta se simula por la multiplicación de coeficiente $kcb_{x,ajust}$ con otro factor de ajuste, f_{sen} , el cual declina desde 1 al inicio de senescencia a 0 cuando no hay cobertura del dosel remanente:

$$Kcb_{x,sen} = Kcb_{x,ajust}(f_{sen}) \quad [2.24]$$

$$\text{Con: } f_{sen} = \left[\frac{CD}{CD_x} \right]^a \quad [2.25]$$

El exponente “a” es un parámetro del programa y puede ser usado para acentuar ($a > 1$) o para minimizar ($a < 1$). La caída en la eficiencia de transpiración/fotosíntesis de la declinación del dosel, puede variar desde un límite superior de 4 (efecto muy fuerte) y un límite inferior de 0,1 (efecto muy limitado). Su valor por defecto en AquaCrop es de 1. Raes et al., (2009b).

La Figura 2.6 muestra la representación de las curvas de variación de “a” teniendo en cuenta la correspondencia que existe entre el factor f_{sen} y la relación de CD/CD_x .

Como ya se anotó la tasa real de transpiración del cultivo depende de la cantidad de agua disponible en la zona de raíces del suelo. Cuando la cantidad de agua de la zona de la raíz se reduce (Wr), bajo el umbral superior de cierre estomatal, la transpiración del cultivo se reduce hasta su máximo valor, y se determina por:

$$W_{UmbraI.Super} = [\theta_{CC} - \rho_{estom}(\theta_{CC} - \theta_{PMP})]1000Z \quad [2.26]$$

o el nivel agotamiento de la zona de la raíz (Dr) es superior a:

$$D_{UmbraI.Super} = \rho_{estom}AAT \quad [2.27]$$

Dónde: $W_{UmbraI.Super}$: Umbral superior expresado como lámina [mm]; $D_{UmbraI.Super}$: Umbral superior expresado como el agotamiento de la zona de raíces [mm];

ρ_{estom} : Fracción del AAT al cual el estoma inicia su cierre, [Adim]; θ_{CC} : Contenido de agua en el suelo a capacidad de campo, [$m^3_{agua} \cdot m^{-3}_{suelo}$]; θ_{PMP} : Contenido de agua en el suelo a punto de marchitez permanente, [$m^3_{agua} \cdot m^{-3}_{suelo}$]; Z : Profundidad efectiva de raíces [m]; AAT: Agua Aprovechable total en la zona de raíces del suelo [mm].

En la Figura 2.7, se presenta el coeficiente de agotamiento ρ_{estom} como la fracción del AAT que puede ser agotada de la zona de raíces antes de que los estomas inicien a cerrarse. El factor ρ_{estom} divide el AAT, en dos partes: Agua que puede ser extraída sin estrés (ARE) y agua que es más difícil de extraer.

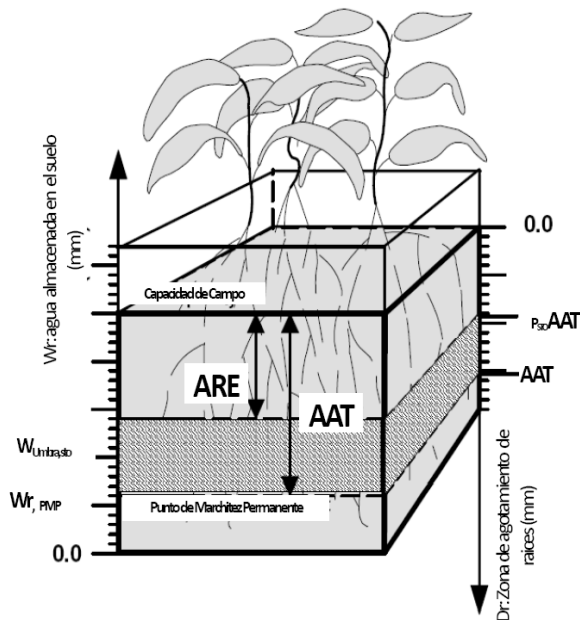


Figura 2.7 Umbrales superior e inferior para el contenido de agua en la zona de raíces del suelo que afectan el cierre estomatal.⁸

Cuando el contenido de agua en la zona de raíces del suelo alcanza su límite inferior (el cual es el PMP), los estomas son completamente cerrados, y la transpiración del cultivo es alterada:

$$W_{Umbreal.inf} = W_{R_{PMP}} = \theta_{PMP} 1000Z \quad [2.28]$$

o el nivel de agotamiento de la zona de raíces (Dr) alcanza:

⁸ Tomado de Raes et al., (2009a).

$$D_{Umbral,inf} = AAT \quad [2.29]$$

Dónde: $W_{Umbral,inf}$: Umbral inferior expresado como profundidad equivalente, [mm]; $D_{Umbral,inf}$: Umbral inferior expresado como nivel de agotamiento de la zona de raíces, [mm]; AAT : Agua Aprovechable Total en el suelo [mm].

En la Figura 2.8 se presenta la variación del coeficiente de estrés para cierre estomatal teniendo en cuenta la relación del coeficiente de estrés hídrico sobre la transpiración del cultivo relacionado con el nivel de agotamiento de la zona de raíces. La reducción de la transpiración del cultivo se calcula por:

$$Tr = K_{s_{sto}} Tr_x \quad [2.30]$$

Dónde: Tr : Transpiración reducida por efectos del cierre estomatal, [mm.día⁻¹]; $K_{s_{sto}}$: Coeficiente de estrés hídrico para cierre estomatal, [Adim]; Tr_x : Tasa de transpiración máxima, [mm.día⁻¹].

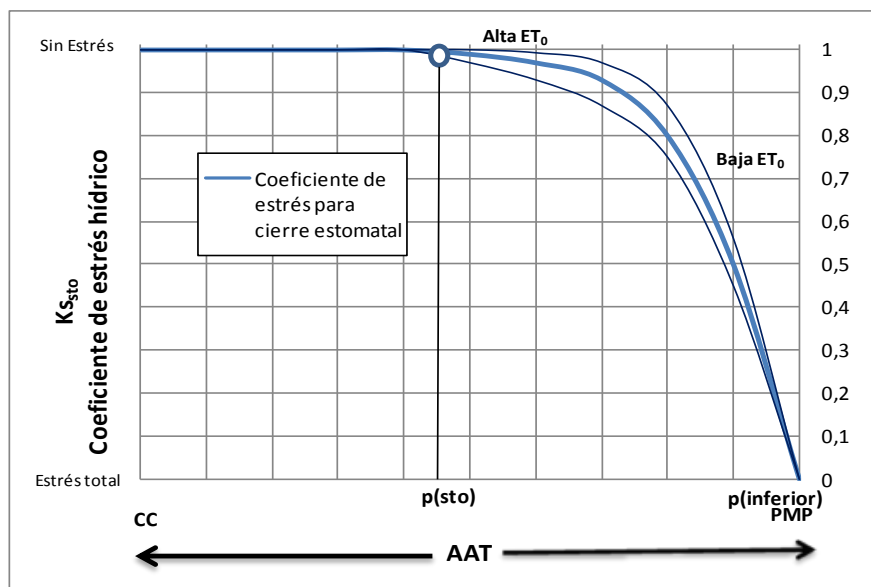


Figura 2.8 Coeficiente de estrés hídrico para cierre estomatal ($K_{s_{sto}}$) para varios grados de agotamiento de la zona de raíces (Dr).⁹

Cuando $K_{s_{sto}} = 1$, hay suficiente agua remanente en la zona radical, cuando el agua es limitada, el nivel de agotamiento en la zona radical excede su límite

⁹ Tomado de Raes et al., 2009(a).

superior ($Dr > \rho_{estom} AAT$), y $Ks_{sto} < 1$, por lo cual el cultivo queda bajo estrés hídrico.

En AquaCrop la forma de la curva de Ks_{sto} entre el umbral y el *PMP* puede ser seleccionado, el valor del coeficiente define la tendencia de la línea, si es convexa o cóncava. Raes et al., (2009a). En el *PMP* $Dr = AAT$, y $Ks_{sto} = 0$.

En forma similar AquaCrop considera los niveles de excesos de agua suponiendo un coeficiente Ks_{aer} . Para mayor detalle ver Raes et al., 2009(a) y (b).

2.2.4.6 Proceso de extracción de agua del suelo

El proceso de extracción de agua por la raíz en forma de la transpiración, expresa la cantidad de agua extraída, S , a una profundidad determinada por unidad de volumen aparente del suelo, por unidad de tiempo. [$m^3 \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$]. Feddes et al., (1978); Hoogland et al., (1981), Belmans et al., (1983). S es obtenido en AquaCrop por medio de la ecuación:

$$S_i = Ks_i S_{x,i} \quad [2.31]$$

Dónde: S_i : Extracción de agua a una profundidad de suelo i , [$m^3 \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$]; Ks_i : Factor de estrés hídrico para contenido de agua en el suelo a una profundidad i [Adim]; $S_{x,i}$: Máxima extracción de agua a una profundidad del suelo i , [$m^3 \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$].

La tasa de transpiración real Tr se obtiene por la integración de la ecuación [2.31] sobre la profundidad de la raíz completa. La integración se inicia en la parte superior del perfil del suelo y se termina cuando la suma $\sum (1000 S_i dz)$ es igual a la demanda de transpiración o se alcanza la parte inferior de la zona de raíces.

$$Tr = \int_{i=superficie,raiz}^{i=profundidd,raiz} 1000(Ks_i S_{x,i}) dz \leq Ks_{zona,raiz} Tr_x \quad [2.32]$$

El agua transpirada del cultivo Tr [$m \cdot día^{-1}$] se extrae fácilmente de la zona de las raíces si Sx es suficientemente grande. Cuando Sx es grande, y la zona de raíces está bien húmeda ($Ks = 1$) y la Tr_x es pequeña, el agua será extraída sólo de la parte superior de la zona de raíces. Cuando la parte superior se seca ($Ks < 1$), más agua es necesaria para que sea extraída de la parte más profunda de la zona de raíces. La transpiración Tr disminuye cuando en la ecuación [2.32] la extracción Sx se restringe la captación de agua, limitando el volumen de las raíces. Raes et al., (2009b).

2.2.5 Simulación de los desarrollos agronómicos del cultivo

Los procesos que hacen parte del balance hídrico están intrínsecamente relacionados con el desarrollo del ciclo del cultivo, sus etapas fenológicas y en lo que tiene que ver con la producción de biomasa, el desarrollo del dosel, el crecimiento de la profundidad de las raíces y desde luego con la obtención del rendimiento del cultivo.

2.2.5.1 Desarrollo del dosel

El desarrollo de la cobertura del dosel es una característica esencial de AquaCrop, Steduto et al., (2009). El proceso de crecimiento del dosel incluye: la expansión, el desarrollo completo, el envejecimiento, y la posterior senescencia o muerte. Establece la cantidad de biomasa producida, y también la conductancia estomática, que determina la cantidad de agua transpirada.

El crecimiento del dosel depende de la cantidad real del follaje que puede producir la fotosíntesis, siguiendo una conducta de crecimiento que tiene una tasa relativamente constante. Hsiao, (1982); citado por Steduto et al., (2009); Bradford y Hsiao, (1982). Esto condujo al uso de una ecuación de crecimiento exponencial para simular el desarrollo del dosel para la primera mitad de la curva de crecimiento bajo condiciones no estresadas:

$$CD = CD_0 e^{CCD \cdot t} \quad [2.33]$$

Dónde: CD : Cobertura del dosel en el tiempo, t , [% decimal]; CD_0 : Tamaño inicial del dosel (a 90% de emergencia, en $t = 0$), [% decimal]; CCD : Coeficiente de crecimiento del dosel [%·día⁻¹, o fracción·día⁻¹].

Es importante mencionar que la CD_0 es proporcional a la densidad de siembra y depende de la medida inicial del tamaño del dosel por plántula, por lo cual, esta característica es tenida en cuenta por el modelo para usarla de acuerdo a las variaciones en la densidad de siembra. Se deduce entonces que la CD_0 se obtiene multiplicando la densidad de plantas y el tamaño promedio del dosel de las plántulas en el momento de la aparición del 90% de la emergencia.

Steduto et al., (2009) mencionan que el valor de la cobertura de una semilla individual (C_s) ya ha sido evaluado para un conjunto de cultivos y se encontró que es una variable conservativa. Lo que se quiere es tener valores de C_s

bien probados para la mayoría de los cultivos, con el objeto de establecerlos dentro de AquaCrop, de tal forma que el usuario tenga sólo que entrar la densidad de siembra. Sin embargo, se espera que sean necesario pequeños ajustes para variedades específicas.

Para la segunda mitad de la curva de CD , debido a que las plantas empiezan a sombrarse y traslaparse una a otras cada vez más, el crecimiento del dosel ya no será proporcional al tamaño actual del dosel. Por lo cual, AquaCrop propone un decaimiento exponencial de la forma:

$$CD = CD_x - 0,25 \frac{(CD_x)^2}{CD_0} e^{-tCCD} \quad [2.34]$$

Donde CD_x : Cobertura del Dosel máxima para unas condiciones óptimas [% o fracción].

La gráfica de la Figura 2.9 representa el proceso de la expansión del dosel conforme lo simula AquaCrop.

En la fase de desarrollo del dosel el tamaño de éste puede ser fácilmente modulado por el estrés hídrico ya que el crecimiento de la hoja es muy sensible al estrés hídrico, y puede ser más lento incluso cuando una pequeña fracción del agua disponible en el suelo sea consumida, es decir, en el umbral superior del coeficiente de estrés hídrico para expansión del crecimiento ($K_{S_{exp}}$) el cual alcanza un valor bajo de ρ . AquaCrop calcula este efecto por medio de la ecuación:

$$CCD_{ajust} = K_{S_{exp}} CCD \quad [2.35]$$

Dónde: CCD_{ajust} : Coeficiente de crecimiento del dosel ajustado por estrés hídrico, [Adim]; $K_{S_{exp}}$: Coeficiente de estrés hídrico para expansión de crecimiento del dosel, varía de 1 a 0; [Adim].

El proceso que se observa es que la cubierta del dosel crece comenzando a frenar desde la tasa máxima cuando el nivel de agotamiento de agua en el suelo alcanza el umbral superior, y deja de crecer completamente cuando el nivel de agotamiento alcanza el umbral inferior. De esta forma el estrés hídrico puede impedir que CD_x sea alcanzado y los resultados son un menor tamaño final del dosel, especialmente en los cultivos determinados, pues el modelo permite el crecimiento sólo hasta la mitad del período de floración. Además de su tasa de crecimiento, el dosel puede empezar a senescer incluso durante su fase de desarrollo si el estrés hídrico pasa a ser lo suficientemente severo.

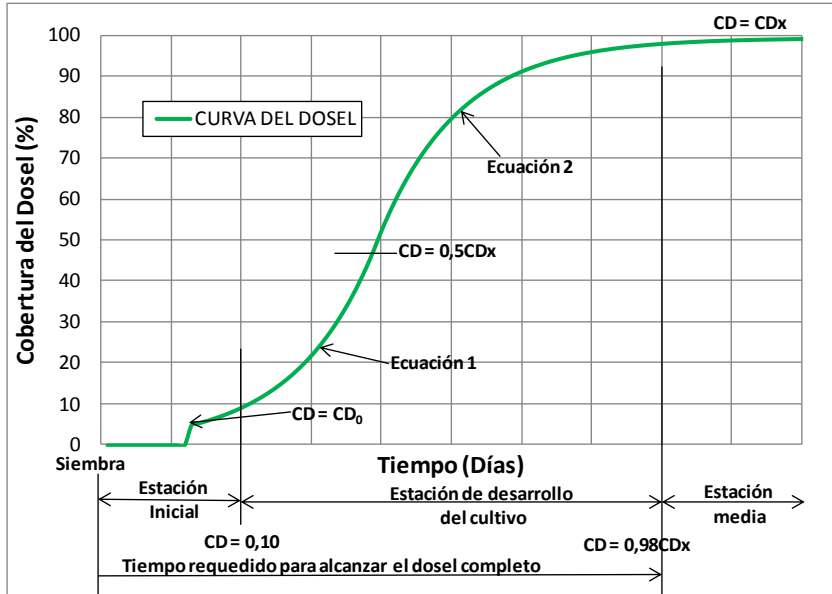


Figura 2.9 Representación esquemática del proceso de desarrollo del dosel determinado por AquaCrop. Observe las etapas descritas por las dos ecuaciones mencionadas.

Cuando se presenta la madurez del cultivo, la CD entra en una fase de declinación debido a la senescencia foliar. Esta etapa es descrita por AquaCrop por medio de la ecuación:

$$CD = CD_x \left[1 - 0,05 \left(\exp \left(\frac{CDD_t}{CD_x} - 1 \right) \right) \right] \quad [2.36]$$

Dónde: CDD : Coeficiente de declinación del dosel, [$\% \cdot \text{día}^{-1}$, fracción. día^{-1} , o $\% \cdot \text{día}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$]; t : Tiempo desde el inicio de la senescencia del dosel, [días].

En la medida en que el CDD sea menor, la declinación del dosel es mayor, es decir que el cultivo decae más rápidamente. En AquaCrop el momento de inicio de la declinación del dosel se considera más tarde que el inicio de la senescencia foliar, esto se debe a que la senescencia inicia generalmente en las hojas más viejas situadas en la parte inferior de la sombra del dosel que contribuyen poco a la transpiración o a la fotosíntesis.

Steduto et al., (2009) mencionan que: “la calibración de la senescencia requiere observación precisa en el terreno, ya que no hay manera simple de evaluar la cubierta verde durante esta fase debido a la injerencia de las hojas

amarillas o muertas, lo cual se hace generalmente a ojo". Sin embargo, un adelanto en este proyecto fue implementado con la observación de las unidades experimentales periódicamente por medio de imágenes fotográficas, en la cuales posteriormente se determinó la CD por métodos computacionales más exactos.

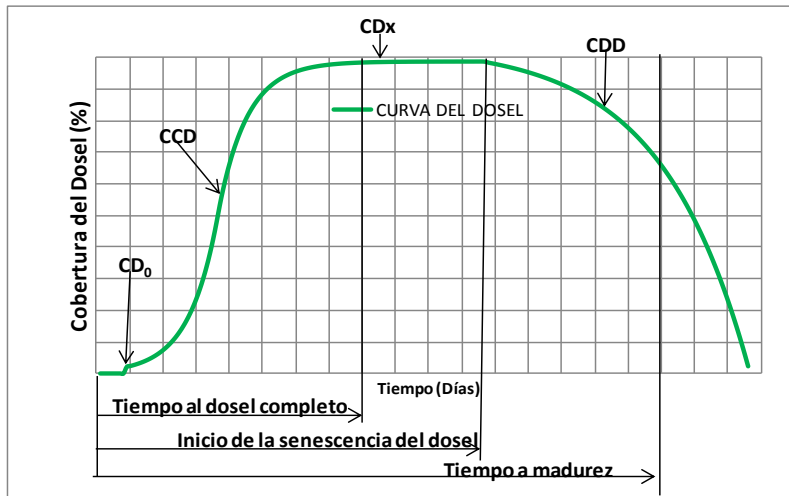


Figura 2.10 Ejemplo del proceso de simulación de la CD de un clutivo a lo largo de su ciclo sin condiciones de estrés hídrico.¹⁰

En la Figura 2.10 se muestra un ejemplo de la simulación de un cultivo determinado por AquaCrop con la implementación de los tres coeficientes y las tres ecuaciones [2.33, 2.34 y 2.36] usadas para este proceso.

De igual forma que se consideró la influencia del estrés hídrico en el desarrollo del dosel, AquaCrop considera también dicha influencia en el proceso de la senescencia, siempre que el estrés sea lo suficientemente severo.

$$CDD_{ajust} = K_{Sen}^8 CDD \quad [2.37]$$

Dónde: CDD_{ajust} : Coeficiente de declinación del dosel ajustado [%·día⁻¹, fracción·día⁻¹ o %·día⁻¹·°C⁻¹] K_{Sen} : Coeficiente de estrés hídrico para aceleración de la senescencia del cultivo [Adim].

¹⁰ Tomado de **Steduto et al., (2009)**.

2.2.5.2 Expansión de la zona de raíces

La profundidad radical ha sido la variable clave para la estimación del balance hídrico en el cultivo, por esta razón AquaCrop simula la profundidad efectiva de la raíz (PER) y el patrón de extracción de agua.

La profundidad efectiva de la raíz se define como la profundidad donde la raíz puede absorber el agua. El patrón de extracción de agua del suelo por las plantas estándar del Soil Conservation Service, (1991), el cual es implementado por defecto en AquaCrop, éste divide la profundidad efectiva en cuartos y porcentajes de 40, 30, 20 y 10%, los cuales son asignados desde el cuarto superior hacia abajo, sin embargo dichos porcentajes pueden ser cambiados por el usuario.

La manera como la profundidad efectiva de la raíz crece es descrita por AquaCrop de acuerdo a la ecuación [2.38]:

$$Z = Z_0 + (Z_x - Z_0) \sqrt[n]{\frac{\left(t - \frac{t_0}{2}\right)}{\left(t_x - \frac{t_0}{2}\right)}} \quad [2.38]$$

Dónde: Z : Profundidad efectiva de raíces en el tiempo t , [m]; Z_0 : Profundidad inicial, [m]; Z_x : Máxima profundidad efectiva de raíces, [m]; t_0 : Tiempo para alcanzar la emergencia del cultivo, [día o día.°C]; t_x : Tiempo después de plantación cuando Z_x es alcanzado, [día o día.°C]; t : Tiempo después de plantación [día o día.°C]; n : Factor de forma, [Adim].

Aunque el desarrollo de la raíz se inicia después de la mitad del tiempo requerido para la emergencia del cultivo ($t_0/2$), su valor en el cálculo del balance hídrico del suelo se produce cuando Z alcanza un valor mínimo de Z_0 en el momento de emergencia, (cuando $t = t_0$). La Figura 2.11 muestra la simulación a través del tiempo del proceso de enraizamiento del cultivo realizado por AquaCrop.

En condiciones óptimas, cuando no hay restricciones del suelo, la tasa de profundización de la raíz estará en el nivel máximo y se espera que el valor de Z_x se alcance cerca del final del ciclo de vida del cultivo. Si hay una capa de suelo que restringe el crecimiento de las raíces, éstas se profundizan normalmente hasta alcanzarla y después se detienen completamente o retardan su crecimiento.

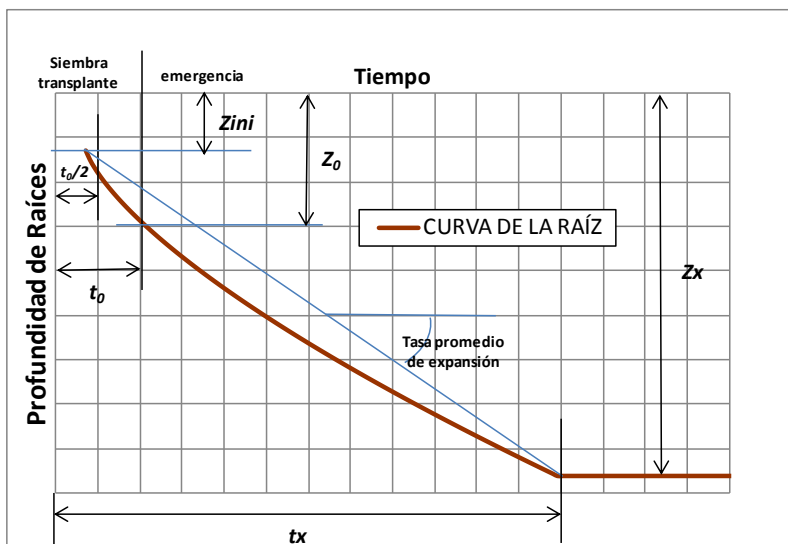


Figura 2.11 Esquema del proceso de enraizamiento a través del tiempo del cultivo en forma general. La valoración para el cálculo del balance hídrico es determinada por el área sombreada.¹¹

Debido a que el crecimiento de las raíces es más resistente al estrés hídrico que el crecimiento de la hoja Bradford y Hsiao, (1982), la expansión del dosel se reducirá tanto como el nivel de agotamiento de agua en la zona de raíces se reduzca por encima del umbral superior, mientras que la profundidad de la raíz continúa sin disminuir. En AquaCrop, la profundización de la raíz está programada para reducirse sólo después de que el nivel de agotamiento supere el umbral para cierre estomático. En ese momento, el incremento diario de la profundización de la raíz (ΔZ) en condiciones normales se ajusta (ΔZ_{ajust}) multiplicándolo por la proporción de la transpiración real a potencial de la cobertura del dosel existente. Steduto et al., (2009). Se espera que la reducción de la transpiración del dosel sea equivalente a la reducción en el crecimiento de la raíz.

2.3 Huella hídrica

El concepto de huella hídrica fue creado con el objeto de relacionar el consumo de agua a todos los niveles, desde la huella hídrica de un país hasta cualquier proceso productivo (o industria, persona o producto) (Hoekstra y Chapagain, 2006). La huella hídrica de los cultivos, se define como el nivel de consumo de agua en el proceso de construcción de la biomasa y la producción y varía en función de muchos aspectos tales como la especie o

¹¹ Tomado de Raes et al., (2009a).

variedad, las técnicas de riego, el tipo de suelo, la disponibilidad de agua y el clima. (Pfister y Bayer, 2013).

Como el motor clave del modelo AquaCrop es la productividad hídrica, este modelo puede utilizarse para la estimación de la huella hídrica intrínseca de especies herbáceas y podría ampliarse su uso a especies forrajeras, en especial a los cultivos de pasto raigrás (*Lolium perenne*) y avena forrajera (*Avena sativa* L.).

La huella hídrica, más allá del concepto puramente físico de la cantidad de agua que consume un cultivo o especie en su proceso productivo, pretende denotar la eficiencia económica del uso del agua en dicho proceso, por lo cual se define como la cantidad de agua por unidad de biomasa o cosecha producida. Es decir que estrictamente es el inverso de la productividad hídrica:

$$WF = \frac{1}{WP} \quad [2.39]$$

Dónde: *WF*: Huella hídrica [*mm.Kg⁻¹*]. *WP*: productividad hídrica [*Kg*] de biomasa por [*mm⁻¹*] de transpiración de agua. La huella hídrica, sin embargo, suele presentarse en unidades de litros de agua por unidad de biomasa o producto, [*L.Kg⁻¹*].

El término de “huella hídrica”, comprende la eficiencia del proceso de producción, en términos del agua utilizada. A partir de la función de producción, se determina la productividad marginal del recurso agua, que se define como el aumento en la producción de biomasa al adicionar una unidad más de agua manteniendo los demás factores de producción constantes. Al obtener la derivada de la función de producción respecto al agua e igualarla a cero se optimiza la producción de biomasa, condición que determina la huella hídrica de la especie.

Lo anterior indica que el valor de la productividad marginal del agua por el precio del producto determina el valor de cada unidad adicional de agua empleada en el riego. Por ejemplo; el efecto de una baja eficiencia del uso del agua en el proceso de producción, hace que el agua sea malgastada por encima de su huella hídrica intrínseca. El precio del producto, es sin embargo la fracción proporcional en carne o leche alcanzada por la dieta del animal con el consumo de un kilogramo de forraje.

Se puede estimar el valor económico del agua utilizada para el riego previo conocimiento de la demanda de agua del cultivo. Es ampliamente conocido en la literatura económica el método de valoración de la productividad

marginal del agua, que se obtiene por medio de la primera derivada de la función de producción (fijando las cantidades de los demás insumos).

La productividad marginal determina el aumento de la producción de biomasa, por una unidad adicional de agua de riego, de tal forma que a partir del punto determinado en la huella hídrica se identifica que este aumento marginal tiende a cero, lo que muestra que la eficiencia del uso del agua por el cultivo bajaría drásticamente con el incremento de una unidad de agua a partir de la huella hídrica.

En este apartado se quiere hacer relevancia sobre el hecho de que la huella hídrica al margen de que determine la eficiencia del uso del agua de un cultivo o sistema de producción, región o país puede ser concebida también como la eficiencia del uso del agua del sistema biológico que para el caso de los cultivos de avena forrajera y raigrás, es determinado en este trabajo, independientemente de sus fuentes hídricas y de la eficiencia del sistema de producción antrópico.

Desde el punto de vista de las fuentes se define la huella hídrica como (Arévalo, et al., 2012):

Huella hídrica verde: Volumen de agua lluvia que no se convierte en escorrentía, por lo que se almacena en los estratos permeables superficiales y así satisface la demanda de la vegetación. Esta agua poco profunda es la que permite la existencia de la vegetación natural y vuelve a la atmósfera por procesos de evapotranspiración.

Huella hídrica azul: Volumen de agua dulce extraído de una fuente superficial o subterránea, consumido para producción de bienes y servicios, cubriendo una demanda de agua no satisfecha a causa de un déficit en la disponibilidad de agua procedente de la lluvia.

Huella hídrica Gris: Volumen de agua necesaria para que el cuerpo receptor reciba el vertido contaminante asociado de la cadena de producción y/o suministro sin que la calidad del agua supere los límites permitidos por la legislación vigente. Se calcula como el volumen de agua adicional teórica necesaria en el cuerpo receptor, por lo que se refiere a generar un nuevo consumo, sino a reducir el volumen de contaminante.

La huella hídrica verde es particularmente relevante para los productos agrícolas y forestales (productos a base de cultivos o de madera), dónde se refiere a la evapotranspiración del agua de lluvia total (de los campos y las plantaciones), así como al agua incorporada en la cosecha.

El cálculo de la huella hídrica en la producción agrícola se ha hecho con base en metodologías aproximadas. A continuación se describe la metodología recomendada por Water Footprint Network, sobre el particular (Hoekstra et al., 2010):

$$WF_{verde} = AguaVerdeEvaporada + AguaVerdeTranspirada \quad [2.40]$$

Por lo que la huella hídrica verde no es otra cosa que la evapotranspiración del cultivo por unidad de producto, (ETc), siempre que ésta sea suplida por la precipitación. La distinción entre la huella hídrica azul y verde es importante porque los impactos hidrológicos, ambientales y sociales, así como los costos de oportunidad económica de la superficie y el uso de aguas subterráneas para la producción difieren claramente de los impactos y los costos del uso de agua de lluvia (Falkenmark y Rockström, 2004, Hoekstra y Chapagain, 2006).

La huella hídrica total del proceso de cultivos ($WF_{cultivos}$) es la suma de los componentes verde, azul y gris:

$$WF_{cultivo} = WF_{verde} + WF_{azul} + WF_{gris} \quad [2.41]$$

Dónde: $WF_{cultivo}$ es la huella hídrica en [$L.Kg^{-1}$].

El componente verde de la huella hídrica que genera el proceso de crecimiento del cultivo se calcula como el uso consuntivo por el rendimiento del cultivo y se expresa en $L.Kg^{-1}$ o $m^3.t^{-1}$.

$$WF_{verde} = ETc/Y \quad [2.42]$$

En el mismo sentido se calcularía la huella hídrica azul, la cual depende principalmente del agua de riego, proveniente de otras fuentes.

El componente gris de la huella hídrica del cultivo se calcula como la cantidad aplicada de productos químicos por unidad de área (AR) por la fracción (α) de lixiviación y escorrentía, y dividido por la concentración máxima aceptable (C_{max}), menos la concentración natural para el contaminante considerado (C_{nat}) y finalmente dividido por el rendimiento del cultivo.

$$WF_{gris} = [(\alpha * AR)/(C_{max} - C_{nat})]/Y \quad [2.43]$$

Los contaminantes generalmente consisten en fertilizantes (nitrógeno, fósforo, potasio, etc.), pesticidas e insecticidas. Se debe considerar sólo el flujo de residuos a los cuerpos de agua dulce, que generalmente es una fracción del total de la aplicación de fertilizantes o pesticidas, suministrado al cultivo. Para el cálculo se tiene en cuenta el contaminante más crítico, que es el que determina el mayor volumen de agua afectado.

Desde luego, para el cálculo de la huella hídrica verde y azul se debe tener en cuenta la acumulación de la evapotranspiración diaria del cultivo (ET_c) durante todo el periodo de crecimiento del cultivo.

Es importante resaltar que en este trabajo se quiere hacer relevancia específicamente al cálculo de la **huella hídrica intrínseca**, para los cultivos forrajeros de interés, por lo cual las huellas hídricas de colores no hacen parte de los objetivos del presente estudio.

2.3.1 Productividad hídrica del cultivo

El parámetro de WP es la piedra angular de AquaCrop, con base en la cual se deriva la biomasa aérea a partir del agua transpirada, la productividad hídrica del cultivo expresa la materia seca aérea [g o kg] producida por unidad de área [m^2 o ha] por unidad de agua transpirada [mm]. Muchos experimentos han mostrado que la relación entre la biomasa producida y el agua consumida por un cultivo dado es altamente lineal Steduto et al., (2007).

2.3.2 Productividad hídrica normalizada del cultivo (WP^*)

AquaCrop usa la productividad hídrica normalizada por el clima (ET_0) y por la concentración de CO_2 en el aire, de esta manera se puede estimar la WP^* por unidad de evapotranspiración de referencia y por unidad de CO_2 presentes.

La normalización para CO_2 consiste en considerar la WP para una concentración de CO_2 atmosférica promedio equivalente para el año 2000 (369.41 ppm). Este valor es el observado en el Observatorio Mauna Loa en Hawai (USA).

La normalización para el clima de la WP se obtiene de la división de la cantidad de agua transpirada (Tr) con la evapotranspiración de referencia (ET_0). Asseng y Hsiao, (2000) sostienen que ET_0 es mejor que el déficit de presión de vapor para la normalización, porque la ecuación de Penman – Monteith Allen et al., (1998) tiene en cuenta la diferencia de temperaturas entre el aire y la superficie evaporante. Steduto y Albrizio, (2005) confirmaron esta hipótesis.

2.3.3 Ajuste de la productividad hídrica normalizada WP^* para CO_2

AquaCrop ajustará la WP^* si el año de la simulación difiere del año de referencia (2000) así:

$$WP_{ajust}^* = f_{CO_2} * WP^* \quad [2.44]$$

Donde:

$$f_{CO_2} = \frac{\left(\frac{C_{a,i}}{C_{a,0}} \right)}{1 + 0,000138(C_{a,i} - C_{a,0})} \quad [2.45]$$

Dónde: WP_{ajust}^* : Productividad hídrica normalizada ajustada para CO_2 [$kg_{biomasa} \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$]. f_{CO_2} : Coeficiente de corrección para CO_2 . [Adim, si, $i < 2000 \Rightarrow f_{CO_2} < 1$; si, $i > 2000 \Rightarrow f_{CO_2} > 1$]; $C_{a,0}$: Concentración atmosférica de referencia de CO_2 (369.41 ppm); $C_{a,i}$: Concentración atmosférica de CO_2 para el año i [ppm].

AquaCrop posee un base de datos histórica de observaciones de CO_2 pasadas, para estimaciones futuras se supone un incremento de 2 ppm/año.

2.3.4 Productividad hídrica normalizada con ajustes completos

En AquaCrop se considera un coeficiente de producción adicional ($f_{producción}$) si los cultivos son ricos en proteínas o lípidos, que se aplica durante la formación de la cosecha. De igual forma, si la fertilidad es limitada se tiene en cuenta un coeficiente de estrés de fertilidad ($Ks_{WP,x}$).

El ajuste total de la productividad hídrica normalizada, incluyendo CO_2 , las síntesis adicionales de tipos de cultivos, y la fertilidad del suelo está dado por:

$$WP_{ajust}^* = f_{CO_2} f_{producción} Ks_{WP} WP^* \quad [2.46]$$

2.4 Producción de biomasa

AquaCrop calcula la producción de biomasa aérea diaria a partir de la productividad hídrica normalizada. WP^* , la diferencia sobre la ecuación [2.2] es que la transpiración se normaliza por la evapotranspiración de referencia ET_0 .

$$B_i = WP_{ajust}^* \left(\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right) \quad [2.47]$$

Dónde: B_i : Biomasa aérea diaria producida en el día i , [$g.m^{-2}$ o $t.ha^{-1}$]; WP^*_{ajust} : Productividad hídrica normalizada y ajustada, [$g.m^{-2}$ o $t.ha^{-1}$]; Tr_i : Transpiración diaria del cultivo en el día i , [mm]; $ET_{0,i}$: Evapotranspiración de referencia para el día i [mm].

Un valor único de WP^* se usa generalmente para todo el ciclo del cultivo. Sin embargo, en los cultivos donde el rendimiento de la cosecha tiene un elevado porcentaje de lípidos y proteínas, se requiere más energía por unidad de peso seco producido, Penning de Vries et al., (1974) y (1983); Azam-Ali, y Squire, (2002), citados por Steduto et al, (2009) después de que los granos o frutos comienzan a crecer. Por lo tanto AquaCrop separa la WP^* en las etapas de preantesis y postantesis, proporcionando un ajuste que reduce la WP^* por una fracción elegida. Steduto et al., (2009).

2.4.1 Ajuste de la producción de biomasa a la temperatura del aire

Los efectos de las bajas temperaturas y la composición química de los órganos aprovechables son considerados como factores de ajuste. Para AquaCrop la producción diaria de biomasa aérea (B_i) es simulada considerando un coeficiente de ajuste por estrés de temperatura Raes et al., (2009a) así:

$$B_{iT} = K_{s_b} * f_{CDG} * WP^*_{ajust} * \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad [2.48]$$

Dónde: B_{iT} : Biomasa aérea diaria producida considerando el efecto del estrés de la temperatura del aire, [$g.m^{-2}$ o $t.ha^{-1}$]; K_{s_b} : Coeficiente de estrés hídrico por temperatura basal, [$Adim$]; f_{CDG} : Factor de ajuste de la composición química de la biomasa vegetal y de los órganos cosechables, [fracción ≤ 1]; Tr_i : Transpiración diaria del cultivo, [$mm.día^{-1}$]; $ET_{0,i}$: Evapotranspiración de referencia diaria, [$mm.día^{-1}$]; WP^*_{ajust} : Productividad hídrica normalizada ajustada del cultivo, [$g.m^{-2}$ o $t.ha^{-1}$]; para la concentración atmosférica de CO_2 , para el tipo de producción sintetizado durante la formación de cosecha, y fertilidad del suelo determinada.

Antes de floración $f_{WP}=1$, cuando los órganos reproductivos se forman y requieren asimilados el valor disminuye. Para K_{s_b} , (Figura 2.12) si los grados de crecimiento generados en un día caen bajo un umbral superior (GD_{super}) la producción de biomasa es limitada por la temperatura del aire y K_{s_b} es menor que 1, por otro lado, se asume que la producción de biomasa se detiene completamente cuando la temperatura es muy fría para generar un mínimo

grado de crecimiento ($f_{CCD}=0$; para 0°C día). La variación entre estos dos límites es descrita por una función logarítmica, el umbral superior es un parámetro del cultivo, y su valor puede ser ajustado entre 0.1 y 20°C día . Raes et al., (2009a).

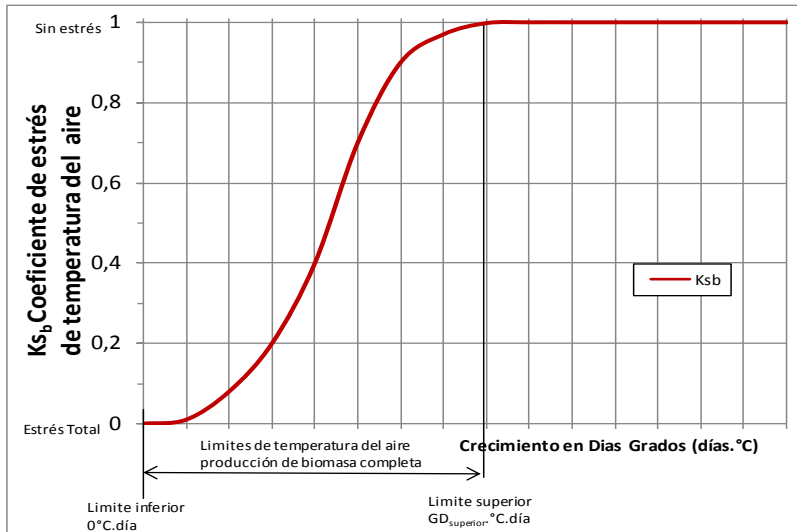


Figura 2.12 Coeficiente de estrés de temperatura del aire para reducción de la producción de biomasa (K_{sb}) para varios niveles de crecimiento en días grado.¹²

2.4.2 Producción de biomasa aérea entre cortes

Para cultivos forrajeros y pastos la producción de biomasa aérea entre cortes se simula por las ecuaciones [2.43] y [2.44]. Se asume que en cada corte un volumen similar de biomasa permanece en el campo. La biomasa segada en el primer corte se puede estimar si la biomasa inicial al inicio de la estación se conoce.

2.5 Índice de cosecha

Debido a que AquaCrop reconoce varios tipos de cultivos para la construcción del Índice de Cosecha, como: cultivos herbáceos de hoja, de raíces/tubérculos, de producción de frutas/granos y cultivos forrajeros. Sin embargo, como el tipo de cultivos forrajeros aún no está activo, en este apartado se hará énfasis en los cultivos herbáceos de hoja, por ser los más parecidos a los cultivos forrajeros por su porte, estructura y porque no producen cosecha.

¹² Idem

2.5.1 Construcción del índice de cosecha para cultivos herbáceos de hoja

El índice de cosecha aumenta rápidamente y alcanza el valor de referencia IC_0 poco tiempo después de la germinación en los cultivos herbáceos de hoja. El tiempo para alcanzar IC_0 es expresado como una fracción del ciclo de crecimiento (por defecto es 20%). El incremento de IC es descrito por la función exponencial:

$$IC_i = \frac{IC_{ini} \cdot IC_0}{IC_{ini} + (IC_0 - IC_{ini}) \exp^{-(CCIC)t}} \quad [2.49]$$

Dónde: IC_i : Índice de cosecha en el día i después de germinación; [% , o fracción]; IC_0 : Índice de cosecha de referencia especificado [% , o fracción]; IC_{ini} : Valor inicial para IC ($IC_{ini} = 0.01$); $CCIC$: Coeficiente de crecimiento para IC [$día^{-1}$]; t : tiempo después de germinación, [$día$].

Dado IC_{ini} , IC_0 y el tiempo requerido para obtener IC_0 , el correspondiente coeficiente de crecimiento ($CCIC$) para IC es obtenido por AquaCrop por la ecuación [2.45]. Ver Figura 2.13.

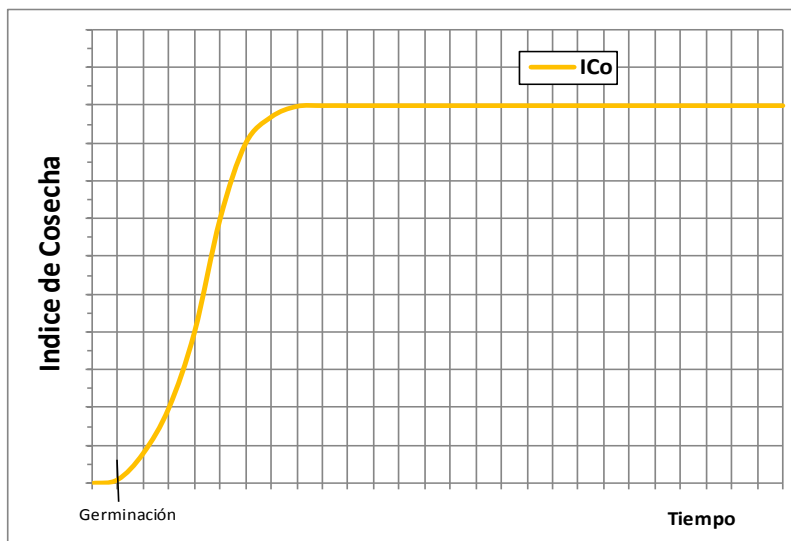


Figura 2.13 Construcción del índice de cosecha a través del ciclo de crecimiento para cultivos herbáceos de hoja.¹³

¹³ Idem

El *IC* está programado para aumentar con el tiempo después de una fase de latencia hasta la madurez fisiológica. El valor del *IC* que se alcanza a la madurez en condiciones sin estrés se toma como referencia de esta especie *IC₀*.

2.5.2 Índice de cosecha para pastos y forrajes

El modelo AquaCrop en su versión 4.0 aún no ha abierto el tipo de cultivos de pastos y forrajes. Sin embargo, debido a que la cosecha de pastos y forrajes es determinada por la misma biomasa cosechada. El índice de cosecha se debería determinar en estas especies en un porcentaje de la biomasa total. Este porcentaje depende de varios factores: la altura de corte, el grado de madurez en el momento del corte y por lo tanto de la fecha de corte, además otro factor que influye el desarrollo posterior es la cobertura del dosel remanente.

De acuerdo a los resultados experimentales de este estudio, el nivel de la altura de corte fue un elemento determinante en el índice de cosecha sobre forraje. Por ejemplo: para el pasto raigrás considerando una altura de corte de 7 a 10 cm del suelo se obtuvo un índice de cosecha del 83% para el periodo de siembra a primer corte y de 86% para otros cortes. El porcentaje remanente de cobertura del dosel para raigrás se observó en rangos que variaron desde 38,2 hasta 54,6%. Para la avena forrajera el índice de cosecha se determinó en 60,2%.

2.6 Estrés hídrico

El estrés hídrico puede tener mayor impacto sobre la productividad y la cosecha dependiendo del tiempo, severidad y duración (Raes, et. al, 2009).

El proceso evolutivo ha permitido a las plantas generar múltiples respuestas y formas de adaptación al estrés hídrico generalmente relacionadas con una mayor eficiencia en el uso del agua, (Nilsen y Orcutt, 1996).

El estrés hídrico se produce en la planta cuando la tasa de transpiración excede a la toma de agua desde el suelo, (Levitt, 1980). El mecanismo fisiológico de resistencia al estrés hídrico más inmediato es el cierre de estomas, estructuras responsables de la pérdida de agua por transpiración, (Taiz y Zeiger, 2006).

Si durante el desarrollo de un cultivo se presenta de forma continuada un déficit hídrico tolerable, la planta además genera múltiples respuestas de aclimatación, que afectan a su desarrollo. Entre dichas respuestas pueden encontrarse la disminución de la expansión foliar (Nilsen y Orcutt, 1996) y por

lo tanto de la cobertura del dosel (*CD*), el aumento del crecimiento radical, (Potters et al., 2007; Shao et al., 2008), disminución en la altura de planta (*AP*) o la disminución en la producción del cultivo.

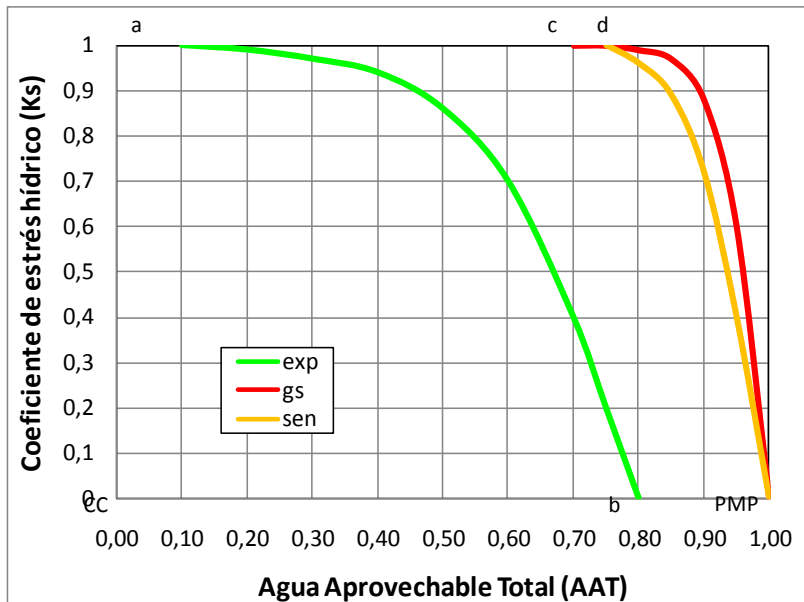


Figura 2.14 Coeficiente de estrés hídrico (K_s) para la expansión de la hoja (*exp*), conductancia estomatal (*gs*) y senescencia del dosel (*sen*) como función del agotamiento de agua del suelo (p). (Steduto, et al, 2009).

El mecanismo de disminución de la expansión foliar presenta especial interés. Aunque el área foliar es muy importante, pues de ella depende la fotosíntesis, una rápida expansión foliar puede afectar negativamente en la adaptación a una eventual situación de estrés hídrico. Se demuestra que las plantas son capaces de frenar el desarrollo foliar y continuar el desarrollo de sus raíces en búsqueda de agua en zonas más profundas del suelo. (Potters et al., 2007; Shao et al., 2008). El efecto final observado ante una situación de estrés hídrico será una disminución de la máxima cobertura del dosel, por debajo del valor potencial y su retraso en el tiempo.

El efecto del estrés hídrico sobre el cultivo ha sido abordado de diferentes formas en la literatura. Quizás el planteamiento más reciente podemos encontrarlo en el modelo AquaCrop. Para Steduto et.al (2009) el estrés hídrico del suelo afecta el desarrollo de la cobertura del dosel, la expansión de la zona de raíces, los resultados en cierre de estomas y una reducción de la tasa de transpiración del cultivo, y altera el índice de cosecha. En el modelo AquaCrop estos efectos son manifestados a través de sus coeficientes de estrés individuales K_s , un indicador de la intensidad relativa del efecto. En esencia, K_s es un modificador de su parámetro de modelo fuente, y varía en

valores desde uno (no estrés) a cero (total estrés). Sobre el umbral superior del indicador de estrés, el estrés no existe y K_s es 1. Bajo el umbral inferior, el efecto es máximo y K_s es 0 (Steduto et al, 2009).

Para el estrés hídrico, K_s es una función del contenido de agua en la zona de la raíz, expresada como una fracción de agotamiento (p) del Agua Aprovechable Total (AAT), y sus valores abarcan un rango correspondiente desde el umbral superior al inferior en la especificación del contenido de agua del suelo para un cultivo. (Steduto et al, 2009)

Como se indica por su localización en el eje horizontal, los puntos **a** y **b** son, respectivamente, los umbrales superior e inferior para la expansión de la hoja, el punto **c** es el umbral superior para la conductancia estomatal (g_s), y el punto **d** es el umbral superior para senescencia del dosel. Note que el umbral inferior para conductancia estomatal y para senescencia del dosel son fijados a punto de marchitez permanente (PMP). (Steduto et al., 2009). Además, el factor de forma puede estar desde -6 hasta 6. Ver también numeral 2.4.1.4.2.

El coeficiente de estrés hídrico (K_s) para la expansión de la hoja (exp), conductancia estomatal (g_s) y senescencia del dosel (sen) como funciones de agotamiento de agua en el suelo, son modeladas por funciones en AquaCrop. La relación de K_s contra p es usualmente no lineal debido a la aclimatación de la planta y a la adaptación al estrés hídrico, y a la no linealidad de las relaciones del potencial mátrico contra el contenido de agua volumétrico del suelo tal como lo describe Raes et al. (2009). La forma y grado de curvatura de la curva K_s en relación a la zona de agotamiento de la raíz es descrita por la siguiente ecuación:

$$K_s = 1 - \frac{e^{D_{rel} f_{exp}} - 1}{e^{f_{exp}} - 1} \quad [2.50]$$

Dónde: D_{rel} (≤ 1): Agotamiento relativo, fracción de agotamiento de agua en relación con la cantidad total que el suelo puede contener entre el umbral superior e inferior definidos por los límites p ; f_{exp} : Factor de forma; cuando $f_{exp} > 0$ (positivo) si la función K_s es convexa (curvas exteriores) y $f_{exp} < 0$ para curvas cóncavas.

El coeficiente de estrés hídrico K_s , algunas veces puede alcanzar forma logarítmica. (Raes et al. 2009).

Otro de los logros de esta investigación fue la determinación de las respuestas de los cultivos de avena forrajera (*Avena sativa*, L.) y raigrás (*Lolium perenne*) al estrés hídrico a través del ciclo del cultivo determinando los coeficientes de estrés hídrico (K_s) considerados por el modelo AquaCrop

(FAO) Steduto, et al (2009). Los experimentos fueron realizados en condiciones controladas bajo invernadero para garantizar los niveles de restricción hídrica los cuales difícilmente se consiguen a libre exposición por los efectos de la precipitación entre otros factores. En particular se determinaron las respuestas de la cobertura del dosel (*CD*), la altura de planta (*AP*), el ancho de la hoja (*AH*) y la conductancia estomatal (*GS*), así como los efectos de las restricciones hídricas en la producción de biomasa como materia seca (*MS*). Además se determinaron los umbrales superior e inferior para *AH*, *AP*, *GS*, y *CD* como funciones del nivel de agotamiento de agua en el suelo (*p*).

2.6.1 Estrés en la etapa reproductiva

El estrés hídrico en la etapa de floración o en el inicio de formación de la cosecha puede afectar el índice de cosecha de referencia IC_0 . Dependiendo de cuando el estrés hídrico ocurre y de su magnitud, el ajuste puede ser hacia arriba o hacia abajo (ver Figura 2.15).

Ajuste hacia arriba de IC_0

Cuando se inicia la floración en la etapa reproductiva, la falta de agua puede alterar el *IC* final, dependiendo del momento del estrés y su severidad. Si el crecimiento vegetativo es posible, esta escasez de agua tiende a mejorar el *IC* al restringir el crecimiento de la hoja por la competencia en el crecimiento de los órganos de cosecha (reproductivos y frutos). Por esta razón la tasa de aumento de *IC* (dIC/dt) se acelera cuando el umbral para la expansión del dosel se alcanza y $K_{s_{exp}}$ cae por debajo de 1,0 en la medida en que el agua de agota:

$$\frac{dIC}{dt} = \left[1 + \frac{(1 - K_{s_{exp,i}})}{a} \right] * \left[\frac{dIC}{dt} \right]_0 \quad [2.51]$$

Dónde: $\left[\frac{dIC}{dt} \right]_0$: es la tasa de aumento de *IC* para condiciones sin estrés hídrico; *a*: Parámetro ajustable del cultivo. Si “*a*” es ajustado hacia abajo, *IC* es acentuado, si se aumenta “*a*”, *IC* disminuye, [*Adim*]; $K_{s_{exp}}$: Coeficiente de estrés hídrico para expansión del dosel, [*Adim*]; *t*: tiempo, [días o días.°C].

La ecuación [2.50] se aplica siempre y cuando se produzca el crecimiento vegetativo, es decir, el crecimiento del dosel. También cuando la *CD* ya está completada.

Al mantener un registro de los valores diarios para $K_{S_{exp,i}}$ durante el periodo en que el crecimiento vegetativo todavía es posible, el ajuste positivo del Índice de cosecha al final del período está dado por:

$$f_{post\uparrow} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^{n(exp)} \left[\frac{1 - K_{S_{exp,i}}}{a} \right]}{n(exp)} \quad [2.52]$$

Dónde: $n(exp)$: Periodo cuando el crecimiento vegetativo es todavía posible, [días]; $f_{post\uparrow}$: Factor por el cual IC_0 ha sido multiplicado para considerar el efecto positivo del estrés hídrico después de floración.

El ajuste de IC_0 ($f_{post\uparrow}$) es graficado en la Figura 2.16 para varios valores de 'a'. Cuando 'a' es 0.5 y el promedio de la zona de agotamiento de raíces durante el período potencial de crecimiento vegetativo es alto ($Dr \geq \rho_{exp,lower}$ AAT), $f_{post\uparrow}$ puede incrementarse hasta 3. Lo que resultará en un IC_0 el cual es el triple del IC_0 de referencia. Por otro lado la Tabla 2.3 presenta los rangos de valores para 'a' considerados por defecto por AquaCrop.

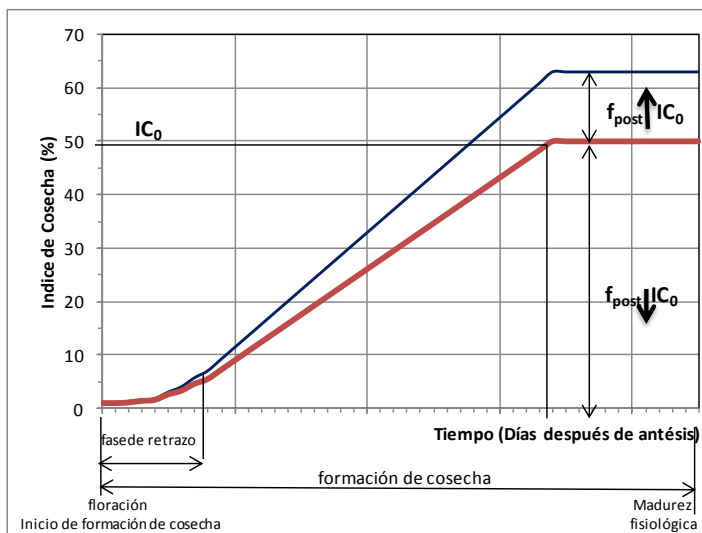


Figura 2.15 Rango de alteración del índice de cosecha como resultado del estrés hídrico durante la formación de la cosecha.¹⁴

¹⁴ Idem

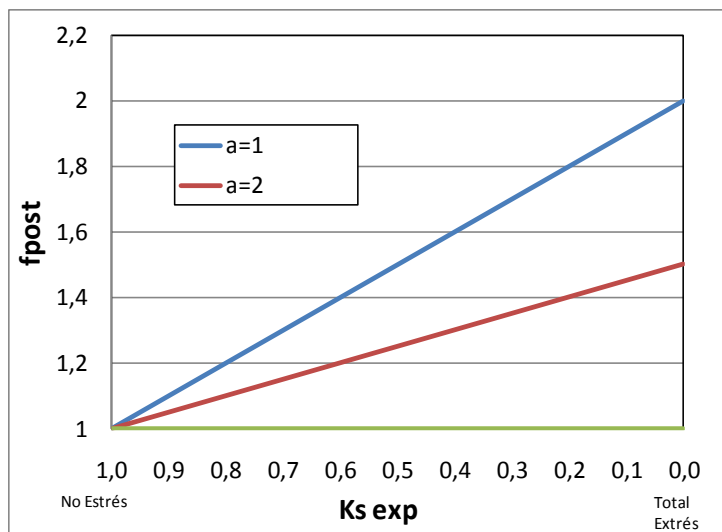


Figura 2.16 Valores para f_{post} si el estrés hídrico después de floración ocurre para varios promedios de estrés hídrico afectando el crecimiento de la hoja ($K_{s,exp,w}$) y los valores de 'a'.¹⁵

Tabla 2.3 Clases, correspondientes a valores por defecto y rangos para el coeficiente "a" (efecto de estrés positivo sobre IC).¹⁶

Clases Sensibilidad al estrés de agua	Fracción de agotamiento de agua en el suelo Para fracaso de la polinización (p_{pot})	
	Valor por defecto	Rango
Ninguno	-	-
Pequeño	4	2 ... 40
Moderado	2	1.5 ... 2.9
Fuerte	1	0.75 ... 1.40
Muy Fuerte	0.7	0.50 ... 0.70

2.6.2 Estrés en la apertura de estomas

Ajuste hacia abajo de IC_0

Si el estrés hídrico se intensifica, además del crecimiento foliar se inhibe la apertura de estomas. Por lo cual, como se disminuye la oferta ambiental, se desacelera el aumento del IC, esto es descrito por AquaCrop como:

$$\frac{dIC}{dt} = \sqrt[10]{K_{S_{sto}}} \left[1 - \frac{1 - K_{S_{sto,i}}}{b} \right] * \left[\frac{dIC}{dt} \right]_0 \quad [2.53]$$

¹⁵ Idem

¹⁶ Tomada de Steduto, P. et al, (2009).

Dónde: $(dIC/dt)_0$: Incremento del índice de cosecha de referencia después de floración; $K_{s_{sto,i}}$: Valor para el coeficiente de estrés hídrico para cierre estomatal (o para condiciones de aireación deficiente) al día i , es 1 para cuando no hay estrés y 0 para total estrés; b : es un parámetro ajustable para un cultivo específico. Cuando b es ajustado a la baja, se acentúa el impacto negativo del estrés hídrico sobre IC , y disminuye si se ajusta aumentando, puede variar entre 1 (efecto fuerte) y 20 (efecto pequeño).

Si se mantiene un registro de los valores diarios para $K_{s_{sto,i}}$ durante el periodo de formación de cosecha, el ajuste negativo del índice de cosecha al final del período está dado por:

$$f_{post\downarrow} = \frac{\sum_{i=1}^{n(\text{cosecha})} \left[\sqrt[10]{K_{s_{sto,i}}} \left[1 - \frac{(1 - K_{s_{sto,i}})}{b} \right] \right]}{n(\text{cosecha})} \quad [2.54]$$

Dónde: $n(\text{cosecha})$: Período de formación de cosecha, [días]; $f_{post\downarrow}$: Factor por el cual el IC_0 ha sido multiplicado para considerar el efecto negativo del estrés hídrico después de la floración.

En la Figura 2.17 se grafica el valor de $f_{post\downarrow}$ para varios valores de 'b'. La 10^{ma} raíz de $K_{s_{sto}}$ en la ecuación [2.54] hace que el efecto de cierre estomatal sobre el IC_0 sea pequeño cuando $K_{s_{sto}}$ es cercano a 1, (cuando la transpiración del cultivo es ligeramente limitada). Si hay un severo estrés se puede reducir fuertemente IC_0 especialmente cuando b es pequeño (cercano a 1).

La Tabla 2.4 presenta las clases correspondientes a los valores del coeficiente 'b' asumidos por defecto por el modelo AquaCrop.

La raíz décima en la ecuación [2.54] hace que un pequeño ajuste, eleve a moderado el estrés estomático y a fuerte si el estrés es demasiado severo. El efecto conjunto de las ecuaciones [2.52] y [2.54] hace que en la medida que el estrés se desarrolla, en primer lugar la tasa de aumento del IC sea acelerada y luego se reduzca en la medida en que los estomas se cierran restringiendo la fotosíntesis y la transpiración. Raes et al., (2009b).

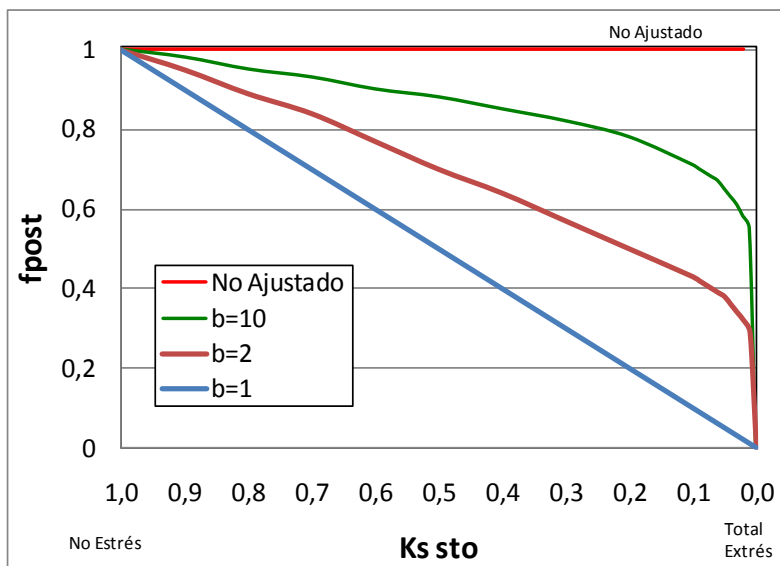


Figura 2.17 Valores para f_{post} cuando el estrés hídrico ocurre después de floración para varios medios de estrés hídrico que afectan la transpiración del cultivo (K_{ssto}) y valores de 'b'.¹⁷

Tabla 2.4 Clases, correspondientes a valores por defecto y rangos para el coeficiente "b" (efecto de estrés negativo sobre IC).¹⁸

Clases Sensibilidad al estrés de agua	Fracción de agotamiento de agua en el suelo Para fracaso de la polinización (p_{pot})	
	Valor por defecto	Rango
Ninguno	-	-
Pequeño	10	7.1 ... 20.0
Moderado	5	4.1 ... 7.0
Fuerte	3	1.6 ... 4.0
Muy Fuerte	1	1.0 ... 1.5

2.6.3 Estrés en la polinización

Cuando el estrés hídrico es lo suficientemente severo como para inhibir la polinización, AquaCrop opera a través del coeficiente $K_{s_{pol}}$ de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$IC_{0,ajust} = \left[\sum (K_{s_{pol}} * \alpha * F) \right] * IC_0 \leq IC_0 \quad [2.55]$$

¹⁷ Idem

¹⁸ Idem

Dónde: $IC_{0,ajust}$: IC_0 ajustado por reducción en la polinización por estrés hídrico, [% , o fracción]; Ks_{pol} : Coeficiente de estrés hídrico para polinización en un día determinado [Adim]; F: Fracción del número total de flores con posibilidades de éxito que se generan a través de la antesis en este día, [fracción]; α : Factor que permite los efectos de los sumideros excesivos para una especie o variedad. Es grande o pequeño de acuerdo a la cantidad excesiva de frutos perdidos que la cosecha produce (frutos potenciales), [constante>1].

La suma de la ecuación [2.55] puede ser substancialmente mayor que 1, por lo cual $IC_{0,ajust}$ se limita a ser menor o igual a IC_0 . Raes et al., (2009b).

Para el caso de pastos, las praderas y para algunos cultivos forrajeros no es fácil la determinación de algunas de estas variables, parámetros o coeficientes, pero tampoco es importante la determinación del índice de cosecha, pues el forraje cosechado que es la biomasa producida constituye la producción.

AquaCrop tiene en cuenta también otros aspectos del efecto de los diferentes tipos de estrés sobre el índice de cosecha, los cuales son detallados en el Manual de Referencia de AquaCrop, Raes et al., (2009a).

2.6.4 Variables de estrés hídrico consideradas por AquaCrop

2.6.4.1 Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral superior

Unidades: ($p_{exp,lower}$, %)

Tipo: Conservativo

Definición: Fracción de agotamiento del agua aprovechable total en el suelo (AAT) al cual no hay prolongación ni crecimiento o expansión de la hoja. El crecimiento de la hoja se detiene completamente. (Cap 3, pg. 3-17 Manual de Referencia de AquaCrop. Raes et al., (2009).

2.6.4.2 Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral inferior

Unidades: ($p_{exp,upper}$, %)

Tipo: Conservativo

Definición: Fracción de agotamiento del agua aprovechable total en el suelo (AAT) que puede ser agotada de la zona de raíces antes de que el inicio de la expansión de la hoja sea limitada. El crecimiento de la hoja inicia a ser afectado.

2.6.4.3 Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para la expansión del dosel

Unidades: (f_{forma} , $Adim$)

Tipo: Conservativo

Definición: El estrés hídrico afecta el desarrollo del dosel en la conductancia estomatal, la senescencia temprana del dosel y el fracaso de la polinización lo cual se denota por los respectivos coeficientes de estrés hídrico K_s . Entre los respectivos umbrales la forma de las curvas de K_s que determinan la magnitud del efecto del estrés hídrico sobre el proceso es determinada por el factor de forma (f_{exp}). Dicha forma puede ser lineal o convexa, y rara vez cóncava, aunque también puede tener comportamientos logarítmicos.

Si la forma es lineal, el efecto del estrés hídrico sobre el proceso es directamente proporcional al contenido relativo de agua, en cuyo caso, el factor de forma (f_{exp}) es igual a 1, y el coeficiente K_s estará dado por:

$$K_s = 1 - D_{rel} \quad [2.56]$$

En el caso de que el dosel sea afectado principalmente cuando el estrés hídrico llega a ser severo, la curva tiene un comportamiento convexo. Para las curvas cóncavas (curvas delineadas hacia adentro) el proceso es ya fuertemente afectado por estrés leve, por lo cual la forma y grado de curvatura de K_s en relación al agotamiento de la zona de raíces es descrito por la ecuación [2.50].

Para el caso de que la forma sea logarítmica, K_s para varios D_{rel} está dado por:

$$K_s = \frac{D_n D_x}{D_n + (D_x - D_n) \exp^{-r(1 - D_{rel})}} \quad [2.57]$$

Dónde: D_n y D_x son los niveles de estrés relativo en los umbrales inferior y superior respectivamente, y r es el factor de tasa. Dado que K_s es 0,5 a mitad de camino de los umbrales inferior y superior, el factor tasa puede ser obtenido por resolución de la ecuación [2.57] para $K_s = 0,5$ y $D_{rel} = 0,5$. Cuando D_{rel} es cero en el umbral inferior, se considera un valor pequeño para

Dn. Después de resolver dicha ecuación K_s es corregida para el pequeño valor considerado.

La expansión del dosel, la conductancia estomatal y la senescencia temprana del dosel son afectados por el estrés hídrico y se describen por medio de sus correspondientes coeficientes de estrés hídricos, ($K_{s_{exp}}$, $K_{s_{sto}}$, y $K_{s_{sen}}$) respondiendo a las respectivas formas de sus curvas entre sus umbrales superior e inferior, las cuales son determinadas por los respectivos factores de forma (f_{exp} ; f_{sto} ; f_{sen}).

2.6.4.4 Umbral de agotamiento de agua en el suelo para control estomático - Umbral superior

Unidades: (p_{sto} , *Adim*)

Tipo: Conservativo

Definición: Fracción de la disponibilidad de agua total en el suelo (*AAT*) al cual el estoma inicia su cierre. Los estomas se muestran mucho menos sensibles al estrés hídrico en comparación con el crecimiento expansivo de la hoja.

La Tabla 2.5 presenta valores específicos para los umbrales superiores p_{sto} de agotamiento del agua en el suelo, los cuales denotan el efecto del estrés hídrico sobre la transpiración del cultivo, que han sido consideradas por el modelo AquaCrop.

Tabla 2.5 Clases y valores correspondientes por defecto para los umbrales superiores agotamiento de agua en el suelo para cierre estomático.¹⁹

Clases Sensibles al estrés hídrico	Umbral superior de agotamiento de agua en el suelo para cierre estomático (p_{sto})	
	Valores por defecto	Rango
Extremadamente sensible al estrés hídrico	0.25	0.10 ... 0.29
Sensible al estrés hídrico	0.45	0.30 ... 0.49
Moderadamente sensible al estrés hídrico	0.55	0.50 ... 0.49
Moderadamente tolerante al estrés hídrico	0.65	0.60 ... 0.67
Tolerante al estrés hídrico	0.70	0.68 ... 0.72
Extremadamente tolerante al estrés hídrico	0.75	0.73 ... 0.90

¹⁹ Tomado de **Steduto et al., (2009)**.

2.6.4.5 Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para control estomático

Unidades: (f_{sto} , *Adim*)

Tipo: Conservativo

Definición: Determina la forma de la curva de $K_{S_{sto}}$ entre los umbrales superior e inferior, estableciendo la magnitud de los efectos del estrés hídrico en los procesos del suelo.

$K_{S_{sto}}$ es el coeficiente de estrés hídrico para cierre estomatal, El factor de forma puede ser lineal convexo o cóncavo. El factor de forma puede tener un rango de +6 (extremadamente convexo) a -6 (extremadamente cóncavo).

2.6.4.6 Umbral de agotamiento de agua en el suelo para senescencia del dosel - Umbral superior

Unidades: (p_{sen} , %)

Tipo: Conservativo

Definición: Fracción de la disponibilidad de agua total en el suelo (AAT) que puede ser agotada de la zona de raíces antes que la senescencia sea activada. Se puede obtener un ajuste a partir de la siguiente ecuación:

$$P_{sen,ajus} = p_{sen} \left(1 - \frac{\beta}{100} \right) \quad [2.58]$$

β es un parámetro programado y su valor puede variar entre 0% (no ajustado) a 25%.

2.6.4.7 Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para senescencia del dosel

Unidades: (f_{sen} , *Adim*)

Tipo: Conservativo

Definición: Denota el efecto del estrés hídrico sobre la senescencia del dosel. f_{sen} , se calcula de la misma forma como en la ecuación [2.25] y se comporta en forma similar a lo presentado en las Figuras 2.8 y 2.18. Se aplica de la misma forma para cultivos forrajeros y pasturas. Sin embargo, siempre que el dosel es segado en cada corte, un nuevo dosel se ha de desarrollar el cual cancela el envejecimiento. Es importante resaltar que f_{sen} es diferente a f_{edad} , aunque ambos son factores de forma, el primero se representa en el caso de

que haya estrés hídrico, mientras que el segundo se presenta por el envejecimiento natural del cultivo.

2.7 Variables y parámetros de entrada al modelo AquaCrop

La información de entrada al modelo se puede clasificar en:

- Datos climáticos
- Variables del suelo
- Características del cultivo (Variables y Parámetros)
- Algunas variables por defecto de AquaCrop

2.7.1 Datos climáticos

Los datos del clima requeridos por AquaCrop son: con frecuencia diarios, decadales o mensuales; Temperatura del aire mínima y máxima (T_{max} , T_{min}) evapotranspiración de referencia (ET_0), precipitación (P), concentración de CO_2 atmosférica media anual.

2.7.2 Características del cultivo

La cantidad de características y el tipo de parámetros requeridos del cultivo varían de acuerdo con los tipos de cultivo seleccionados.

Para el caso de cultivos herbáceos de hoja, la información de floración y formación de cosecha no se consideran.

Para cultivos forrajeros, se tiene en cuenta que sufren cortes más de una vez al año, posibilitando que algunas de las características puedan ser alteradas después de cada corte.

Para cultivos de Frutas/Granos, se tiene en cuenta el periodo de formación de la cosecha, e iniciando la floración, se construye el índice de cosecha.

Para cultivos de raíces o tubérculos, se tiene en cuenta también el periodo de formación de la cosecha, iniciando en el alargamiento de la raíz/tubérculo, durante el cual se construye el índice de cosecha.

Las características del cultivo son agrupadas en la siguiente forma:

- Descripción
- Desarrollo
 - Cobertura inicial del dosel

- Desarrollo del dosel
- Floración y formación de la cosecha
- Profundización de la raíz
- Temperaturas
- ET
 - Coeficientes K_{cb} y K_e
 - Patrón de extracción de agua
- Producción
 - Productividad del cultivo por el agua
 - Índice de Cosecha
- Estrés hídrico
 - Crecimiento y expansión de la hoja
 - Cierre estomatal
 - Senescencia temprana del dosel
 - Estrés de Aireación
 - Índice de cosecha
 - Antes de Floración
 - Durante la Floración
 - Durante la formación de la cosecha
 - Efectos combinados
- Estrés de fertilidad
 - Dosel
 - Productividad hídrica
 - Biomasa
 - Coeficientes de estrés K_s
 - Parámetros del cultivo
- Estrés de temperatura
 - Producción de biomasa
 - Índice de cosecha
- Calendario

2.7.3 Parámetros conservativos y de usos específicos

Existe un conjunto de parámetros del cultivo que se denominan conservativos, pues tienen la característica de que no cambian con el tiempo, prácticas de manejo, localización geográfica o climática. Además, se asume en general que tampoco cambian con la variedad. Estos parámetros son calibrados con datos de crecimiento del cultivo en condiciones favorables, y sin limitaciones, pero permanecen aplicables para condiciones de estrés por medio de su modelamiento a partir de las funciones de respuesta al estrés.

Tabla 2.6 Lista de los parámetros del cultivo requeridos por el Modelo AquaCrop y sus tipos.²⁰

1. Fenología del cultivo		
Símbolo	Descripción	Tipo ^{(1),(2),(3),(4)}
1.1 Umbrales de temperaturas del aire		
1	T_{base} Temperatura Base (°C)	Conservativo ⁽¹⁾
2	$T_{superior}$ Temperatura Superior (°C)	Conservativo ⁽¹⁾
1.2 Desarrollo de la cobertura del dosel verde		
3	C_s Cobertura de la superficie del suelo por una individual semilla al 90% de emergencia ($cm^2/planta$)	Conservativo ⁽²⁾
4	D_s Número de plantas por hectárea	Manejo ⁽³⁾
5	t_e Tiempo de siembra a emergencia (crecimiento en días grado)	Manejo ⁽³⁾
6	CCD Coeficiente de crecimiento del dosel (fracción por crecimiento en días grado)	Conservativo ⁽¹⁾
7	CD_x Máxima cobertura del dosel (%)	Manejo ⁽³⁾
8	t_s Tiempo de siembra a inicio de senescencia (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾
9	CDD Coeficiente de declinación del dosel (fracción por crecimiento en días grado)	Conservativo ⁽¹⁾
10	t_m Tiempo de siembra a madurez, p.ej. longitud del ciclo del cultivo (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾
1.3 Floración o inicio de formación de cosecha		
11	t_f Tiempo de siembra a floración (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾
12	L_f Longitud del estado de floración (crecimiento en días grado)	Conservativo ⁽¹⁾
13	D Determinancia del Cultivo (Unión o separación de floración)	Conservativo ⁽¹⁾
14	Ex_f Excesos de frutos potenciales (%)	Conservativo ⁽²⁾
1.4 Desarrollo de la zona de raíces		
15	Z_0 Profundidad de raíz mínima efectiva (m)	Manejo ⁽³⁾
16	Z_x Profundidad de raíz máxima efectiva (m)	Manejo ⁽³⁾
17	n Factor de forma que describe la expansión de la raíz	Conservativo ⁽¹⁾
18	t_x Tiempo desde siembra a la máxima profundidad de raíces (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾ Ambiental ⁽³⁾
2. Transpiración del Cultivo		
19	Kcb_x Coeficiente del cultivo basal máximo, cuando el dosel está completo pero previo a la senescencia	Conservativo ⁽¹⁾
20	f_{edad} factor de reducción, senescencia o reducción, declinación del cultivo (%/día) como un resultado de la senescencia o la edad, deficiencia de nitrógeno, etc.	Conservativo ⁽¹⁾
21	Sx_{sup} Máxima extracción del agua por la raíz en el cuarto superior de la zona radical. ($m^3 \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$)	Conservativo ⁽¹⁾
22	Sx_{inf} Máxima extracción del agua por la raíz en el cuarto inferior de la zona radical. ($m^3 \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$)	Conservativo ⁽¹⁾
23	$Erel_x$ Efecto de cobertura del dosel sobre la reducción de evaporación del suelo en el estado de estación tardía	Conservativo ⁽¹⁾

(1) Conservativo generalmente aplicable
(2) Conservativo para una especie dada pero puede o podría ser una variedad específica
(3) Dependiente del ambiente y/o manejo
(4) Cultivar o variedad específica

²⁰ Tomado de Manual de Referencia de AquaCrop, Raes, D. et al., (2009a).

Tabla 2.7 Lista de los parámetros del cultivo requeridos por el Modelo AquaCrop y sus tipos (Continuación).

3. Producción de biomasa y formación de cosecha			
3.1 Productividad del cultivo por el agua			
24	WP*	Productividad hídrica normalizada para ETo y CO ₂ (gramos/m ²)	Conservativo ⁽¹⁾
25	WP*_c	Productividad hídrica normalizada para ETo y CO ₂ durante la formación de la cosecha (como porcentaje de WP* antes de formación de la cosecha)	Conservativo ⁽¹⁾
3.2 Índice de Cosecha			
26	IC_o	Índice de Cosecha de referencia (%)	Cultivar ⁽⁴⁾
27	t_{ic}	Construcción del IC (periodo en crecimiento días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾
28	ΔIC_c	Posible incremento (%) de IC debido al estrés hídrico antes de formación de cosecha	Conservativo ⁽¹⁾
29	a	Coefficiente que describe el posible impacto de crecimiento vegetativo restringido durante la formación de la cosecha sobre IC	Conservativo ⁽¹⁾
30	b	Coefficiente que describe el impacto negativo del cierre estomatal durante la formación de cosecha sobre IC	Conservativo ⁽¹⁾
31	ΔIC_{ante}	Incremento máximo aceptable (%) del IC especificado	Conservativo ⁽¹⁾
4 Estrés			
4.1 Estrés hídrico en el suelo			
32	P_{exp,superior}	Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral superior	Conservativo ⁽¹⁾
33	P_{exp,inferior}	Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral inferior	Conservativo ⁽¹⁾
34	f_{exp}	Factor de forma para estrés hídrico para la expansión del dosel	Conservativo ⁽¹⁾
35	P_{sto}	Umbral de agotamiento de agua en el suelo para control estomatal - Umbral superior	Conservativo ⁽¹⁾
36	f_{sto}	Factor de forma para estrés hídrico para control estomatal	Conservativo ⁽¹⁾
37	P_{sen}	Umbral de agotamiento de agua en el suelo para senescencia del dosel - Umbral superior	Conservativo ⁽¹⁾
38	f_{sen}	Factor de forma para estrés hídrico para senescencia del dosel	Conservativo ⁽¹⁾
39	ΣET_{destrés}	Suma (ET _o) durante el período de estrés antes de que se active de la senescencia.	Conservativo ⁽¹⁾
40	P_{pol}	Umbral de agotamiento de agua en el suelo para falla de la polinización - Umbral superior	Conservativo ⁽¹⁾
41	K_{s aer}	Punto anaeróbico en %Vol (con referencia a saturación)	Cultivar ⁽⁴⁾ Ambiental ⁽³⁾
4.2 Estrés de fertilidad del suelo			
42		Estrés de fertilidad del suelo en calibración (%)	(calibración)
43		Coefficiente de factor de forma para el estrés de fertilidad para la expansión del dosel	Manejo ⁽³⁾
44		Coefficiente de factor de forma para el estrés de fertilidad para la máxima cobertura del dosel	Manejo ⁽³⁾
45		Coefficiente de factor de forma para el estrés de fertilidad para la productividad hídrica del cultivo.	Manejo ⁽³⁾
46		Factor de forma para la respuesta de la declinación de la cobertura del dosel para la fertilidad limitada del cultivo.	Manejo ⁽³⁾
4.3 Estrés de la temperatura del aire			
47	T_{n,frío}	Temperatura mínima del aire bajo la cual la polinización inicia a faltar (estrés de frío) (°C)	Conservativo ⁽¹⁾
48	T_{x,calor}	Temperatura máxima del aire sobre la cual la polinización inicia a faltar (estrés de calor) (°C)	Conservativo ⁽¹⁾
49	GD_{min}	Mínimo de grados día requeridos para producción de biomasa (día.°C)	Conservativo ⁽¹⁾

Los otros parámetros son de variables específicas o menos conservativos y son afectados por el clima, el manejo de campo o condiciones del perfil del suelo.

En la Tabla 2.6 se muestran los tipos de parámetros utilizados por AquaCrop. Sobre esta tabla se centra la calibración del presente trabajo, por esta razón a continuación se define cada uno de estos parámetros o variables y se presenta los aspectos teóricos inherentes. En el capítulo de metodología (Cap 3) se detalla el procedimiento empleado para su determinación y la experimentación realizada.

Nota: El numeral 4.2, de la Tabla 2.7 que reúne los parámetros referentes al estrés de fertilidad del suelo, aún no han sido evaluados para ningún cultivo por el grupo de desarrolladores y colaboradores de AquaCrop. Para el presente estudio también se excluyen por no ser del interés relativo al agua. Estos parámetros requieren de experimentación más agronómica que está fuera del alcance de los objetivos de esta tesis.

Por otro lado, existen algunos parámetros que no son considerados pues no son relevantes para las especies forrajeras ellos son: para el período de floración: Excesos de frutos potenciales (%); en cuando a índice de cosecha: Posible incremento (%) de IC debido al estrés hídrico antes de formación de cosecha, Coeficiente que describe el posible impacto de crecimiento vegetativo restringido durante la formación de cosecha sobre IC (a), Coeficiente que describe el impacto negativo del cierre estomatal durante la formación de cosecha sobre IC (b), e Incremento máximo aceptable de IC especificado (%). Referente a estrés hídrico no se tiene en cuenta el Umbral de agotamiento de agua en el suelo para falla de la polinización - Umbral superior (P_{pol}); y en cuanto a estrés de temperatura del aire: Temperatura mínima de aire bajo la cual la polinización inicia a faltar (estrés de frío ($^{\circ}C$); y Temperatura máxima del aire sobre la cual la polinización inicia a faltar (estrés de calor) ($^{\circ}C$).

2.7.3.1 Umbrales de temperatura del aire

1) Temperatura base (T_{base})

Unidades: ($^{\circ}C$)

Tipo: Conservativo

Definición: Temperatura mínima a la cual el desarrollo del cultivo ya no progresa.

Dado que la mayoría de cultivos están previamente estudiados en sus comportamientos de desarrollo sobre las temperaturas base y máxima, estos parámetros, se tomaron con base en información secundaria.

Para el caso de la Avena Forrajera, el manual de referencia del modelo Environmental Policy Integrated Climate (EPIC) presenta una temperatura base de 8°C, para la variedad de Alfalfa *Lado GR Mitchell et al.*, (1993) y Williams, (1994). Sin embargo para CIREN, (1989), la temperatura base para la avena forrajera debe ser de 4°C, mientras que la FAO, (1993-2007) y Ruiz et al., (1999) establecen que la temperatura base de la avena forrajera es de 5°C.

Tabla 2.8 Temperaturas críticas para las especies de avena, y raigrás reportadas por la base de datos.²¹

Especie	Nombre Científico	Nombres o Variedades	Temperaturas °C						Fuente Inf. Según ECOCROP
			Óptimas		Absolutas		De Muerte		
			Min	Máx	Base	Corte	En crecimiento temprano	Durante el ciclo	
Raigrás	<i>Lolium rigidum</i>	ryegrass rígido, ryegrass anual, ryegrass suizos, ryegrass wimmera, Chortam, Samma, Zaywahn, Sahleh, Zommeir, Sammah, Nusayl, Etshailam, Ruwaita, Irwaita, Irwaita, Hamaita, L. strictum	10	25	5	30	0	-3	Kernick, M. 1978 pp 375 -397 ; Kernick, M. 1961 pp 38
Raigrás	<i>Lolium perenne</i>	Ryegrass perenne, Ryegrass Inglés, Ryegrass cresta, Weidelgras ausdauerndes, rajgras, Engelskt, renrepe, rajgras, rajgras almindelig, Englanniraiheina, tunruggresi	14	25	4	35	0	-2	Roecklein, J. 1987 pp 170 ; Dube, P. 1982 pp 4 ; Duque, J. 1975 pp 20 ; Maas, E. 1990 pp 275 ; Skerman, P. 1990 pp 560 ; Bogdan, A. 1977 pp 166; Hartmann, T. 1981 pp 458
Raigrás	<i>Lolium multiflorum</i>	ryegrass anual, ryegrass italiano, raigrás, raigrás australiano, Ray-grass Italie, Maddoun, Nousel, Zamma, L. scabrum, L. italicum, Lolium italicum, A. Braun, Lolium perenne L. ssp. Multiflorum (Lam.) Husnot, Lolium perenne var., Aristatum Willd, Italienisches raigras, vielblutiges weidelgras, Italienskt rajgras, Borstreppe, Italiensk rajgras, Italianraiheina, Acevén	14	30	2	38	0	-4	Roecklein, J. 1987 pp 137; Duque, J. 1979 pp 95; Brey Meyer, A. 1990 pp 269 ; Duque, J. 1975 pp 20; Heath, M. 1985 pp 241 -246; Kernick, M. 1978 pp 375 -397; Kernick, M. 1961 pp 291; B-Lennard, E. 1986 pp 14; Bogdan, A. 1977 pp 166
Avena	<i>Avena sativa</i>	Avena común, De Avena, Avena, Hawer, Hafer, avoine, Avoine Farine, Vanilin Havre, Havre, Almindelig Havre, Peltokaura, Kaura, Akurhafar, Saat - Hafer	16	20	5	30	-1	-15	Sims, D. s.a.; Dube, P. 1982 pp 33; Maas, E. 1991 pp 274; Roecklein, J. 1987 pp 30; Baum, B. 1977; Kernick, M. 1961 pp 181 -183; Monegat, C. 1991 pp 119; Langer, R. 1991 pp 70; Hartmann, T. 1981 pp 490 - 491; Purselglove, J. 1972 pp 123; Ahlgreen, G. 1956 pp 278 - 280
Avena	<i>Avena sterilis</i>	Avena estéril, Avena animados, Avena forraje	12	32	2	36	-1	-10	Roecklein, J. 1987 pp 43; Duque, J. 1979 pp 94; Duque, J. 1975 pp 8; Baum, B. 1977 pp 334 - 350; Ibrahim, K. 1987 pp 84
Avena	<i>Avena nuda</i>	Avena desnuda	16	22	8	30	No registra	No registra	http://www.scs.leeds.ac.uk/cgi-bin/pfaf/arr.htm?Avena+nuda

Para el pasto raigrás anual, el modelo EPIC establece una temperatura base de 0° C. Mitchell et al., (1993) y Williams, (1994). Por otro lado para la FAO, (1993-2007) establecen la temperatura base para raigrás en 4°C.

La información suministrada por la División de Tierras y Desarrollo del Agua FAO, (1993–2007) incluye resultados de investigaciones de varias partes del

²¹ Fuente: ECOCROP (FAO, 1993 – 2007).

mundo sobre requerimientos ambientales, ecológicos, y usos de 2568 especies entre las cuales se han incluido la avena forrajera, y pasto raigrás.

Esta base de datos en la cual han participado expertos e investigadores de todo el mundo se denomina ECOCROP y es una de las más amplias y confiables que existe sobre cultivos.

La FAO estima que para su desarrollo se ha empleado alrededor de 1360 horas-hombre. Por estas sobradas razones se han adoptado los resultados de temperaturas base y corte sugeridas por EcoCrop como las temperaturas de referencia.

En la Tabla 2.8 se presentan las variedades reportadas por EcoCrop para avenas y raigrás en las cuales se presentan sus temperaturas críticas para su desarrollo.

Las variedades usadas en este trabajo fueron para Raigrás (*Lolium perenne*), var: Bestfor Plus, y para Avena Forrajera (*Avena sativa*), var: Cayuse.

2) Temperatura superior (corte) (T_{super})

Unidades: (°C)

Tipo: Conservativo

Definición: Temperatura sobre la cual el desarrollo del cultivo no se incrementa más allá con un incremento en la temperatura del aire.

En cuanto a la temperatura superior se tiene información desde 30° a 36°C como temperatura máxima o de corte para la avena forrajera FAO, (1993-2007) mientras que CIREN, (1989) sugieren que dicha temperatura puede alcanzar los 35°C.

Para el caso de raigrás las temperaturas máximas reportadas son de 30 a 38°C. FAO, (1993-2007).

2.7.3.2 Desarrollo de la cobertura del dosel

3) Cobertura de la superficie del suelo por una semilla individual al 90% de emergencia

Unidades: (cm².planta⁻¹)

Tipo: Conservativo

Definición: Cobertura del dosel de una planta al momento de emergencia al 90%. El conjunto de cobertura de las plantas al 90% de emergencia da como resultado la Cobertura inicial del dosel a $t=0$, (CDo). Estimado de la densidad

de siembra o plantación (Plantas.ha⁻¹) y la cobertura del dosel de la planta (cm²)

4) Número de plantas por hectárea

Unidades: (Plantas.ha⁻¹)

Tipo: Manejo

Definición: Densidad de siembra, distancia entre plantas y distancia entre hileras.

5) Tiempo de siembra a emergencia

Unidades: (días o día.°C⁻¹)

Tipo: Manejo

Definición: Tiempo transcurrido en días o en crecimiento en días grado desde la siembra a la emergencia.

Los días grado se calculan con la ecuación de CDG [2.59] calculada para cada día y sumados a lo largo del ciclo de cultivo transcurrido. Manual de Referencia de AquaCrop, Raes et al., (2009a).

$$CDG = T_{med} - T_{base} \quad [2.59]$$

Dónde: CDG: Días grado (día.°C⁻¹)

T_{med} : Temperatura promedio calculada a partir del método establecido por defecto del modelo AquaCrop. (*Método 3*).

El método por defecto del modelo AquaCrop consiste en que la comparación de T_{base} y T_{super} ocurre antes del cálculo del promedio de temperatura. Sin embargo el chequeo es sólo sobre la temperatura del aire máxima. El promedio de la temperatura está dada por:

$$T_{med} = \frac{(T_x^* + T_n)}{2} \quad [2.60]$$

Dónde T_x^* es la temperatura del aire máxima ajustada y T_n la temperatura del aire mínima. La siguiente regla es aplicada:

- T_x^* es la temperatura del aire máxima ($T_x^* = T_x$)

Si T_x es mayor que T_{super} , entonces $T_x^* = T_{super}$,

Si T_x es menor que T_{base} , entonces $T_x = T_{base}$.

- T_n no es ajustada. Sin embargo si T_n excede T_{super} , T_n será colocada igual a T_{super} .

Una vez T_{med} es calculada, es chequeado si la temperatura promedio del aire esta sobre la temperatura base. Si T_{med} es menor que T_{base} , entonces T_{med} es tomada como T_{base} (resultando en 0 °C.día para ese día).

6) Coeficiente de crecimiento del dosel

Unidades: (CCD, Adim, fracción, o %.día.°C⁻¹)

Tipo: Conservativo

Definición: Fracción o porcentaje de cobertura del suelo incrementado por día o crecimiento en días grado. Ver numeral 2.5.1.

7) Máxima cobertura del dosel

Unidades: (%)

Tipo: Manejo

Definición: Cobertura máxima del dosel al inicio de la senescencia para unas condiciones dadas de densidad de siembra bajo situaciones ambientales óptimas (buena distribución de nutrientes y excelentes condiciones de humedad, sin malezas o plagas y enfermedades).

8) Tiempo de siembra a inicio de senescencia

Unidades: (Días o día.°C⁻¹)

Tipo: Cultivar (Variedad)

Definición: Tiempo transcurrido en días o en crecimiento en días grado desde la siembra hasta la senescencia.

9) Coeficiente de declinación del dosel

Unidades: (CDD, fracción o %.día.°C⁻¹)

Tipo: Conservativo

Definición: Fracción o porcentaje de cobertura del suelo declinada por día o en días grado.

10) Tiempo de siembra a madurez.

Unidades: (Días o día.°C⁻¹)

Tipo: Cultivar

Definición: Tiempo en días o en crecimiento en días grado desde la siembra a la madurez, longitud del ciclo del cultivo.

2.7.3.3 Floración o inicio de formación de la cosecha

11) Tiempo de siembra a floración

Unidades: (t_f , Días o día.°C⁻¹)

Tipo: Cultivar

Definición: Tiempo en días o en días grado desde la siembra hasta la floración.

12) Longitud del estado de floración

Unidades: (Días o día.°C⁻¹)

Tipo: Conservativo

Definición: Tiempo en días o en días grado desde el inicio de la floración hasta el final de la floración. (Se obtiene el tiempo al inicio y al final).

13) Determinancia del cultivo, unido/separado con la floración)

Unidades: (Sí o No)

Tipo: Conservativo

Definición: Un cultivo determinado es aquel que muere al final del proceso de fructificación, al contrario de los cultivos indeterminados en los cuales la floración se solapa con el crecimiento vegetativo y se puede prolongar durante varias semanas e incluso meses, como en el caso de la mayoría de los pastos y forrajes que son cultivos indeterminados, es decir que después del proceso de fructificación y producción de la semilla continúan en un ciclo continuo de producción y regeneración.

15) Excesos de frutos potenciales

Unidades: (%)

Tipo: Conservativo

Definición: Para algunos cultivos o especies existe la tendencia a la producción de excesos de frutos, lo cuales en la etapa de cuaje tienden a caerse o a abortar, ya sea por algún tipo de estrés o por inducción provocada.

2.7.3.4 Desarrollo de la zona de raíces

16) Profundidad de raíz mínima efectiva

Unidades: (Z_n , m)

Tipo: Manejo

Definición: Profundidad del suelo en la cual la germinación de la semilla o el arbolito joven puede extraer el agua. (para árboles puede ser de 0.2 a 0.3 m apropiada, sin embargo para el caso de pastos puede ser de 0.05 m).

17) Profundidad de raíz máxima efectiva

Unidades: (Z_x , m)

Tipo: Manejo

Definición: Máxima profundidad de la raíz alcanzada por el cultivo. Para cultivos forrajeros y pasturas la profundidad se desarrolla en la primera estación, es decir hasta cerca del primer corte. De la segunda estación en adelante la profundidad de enraizamiento es constante e igual Z_x .

18) Factor de forma que describe la zona de expansión de la raíz

Unidades: (n, Adim)

Tipo: Conservativo

Definición: Determina la velocidad de crecimiento de la zona de expansión de raíces en el tiempo. El estrés hídrico afecta el crecimiento de la raíz, cuando el nivel de agotamiento en la zona de raíces excede el umbral superior para cierre estomatal ($Dr > p_{sto} AAT$)²². En este nivel de agotamiento el coeficiente de estrés hídrico para cierre estomatal ($K_{S_{sto}}$) llega a ser menor que 1. Entonces, la reducción en la expansión de la profundidad efectiva de raíces es determinada por la magnitud del $K_{S_{sto}}$ y un factor de forma negativo, f_{forma} .

El factor de forma, f_{forma} , es un parámetro programado el cual puede ser ajustado por el usuario. El estrés hídrico que afecta la reducción de la expansión de la zona de raíces es:

- Fuerte para $f_{forma} = 0$, y está dado por la relación lineal:

$$dZ_{ajust} = K_{S_{sto}} dZ \quad [2.61]$$

²² Dr: Zona de agotamiento de las raíces

- Pequeño a mediano para $-1 \leq f_{forma} \leq -8$, y está dado por la relación exponencial:

$$dZ_{ajust} = dZ \frac{e^{K_{sto} f_{forma}} - 1}{e^{f_{forma}} - 1} \quad [2.62]$$

Si f_{forma} (por defecto es igual a -6.0) es más negativo se minimiza los efectos del estrés hídrico sobre el desarrollo de la zona de raíces, pero si se considera que en el período temprano de estrés hídrico el desarrollo de la zona de raíces se retarda significativamente f_{forma} será cercano a -1.0. La Figura 2.18 presenta el comportamiento del factor de forma para la expansión de la raíz.

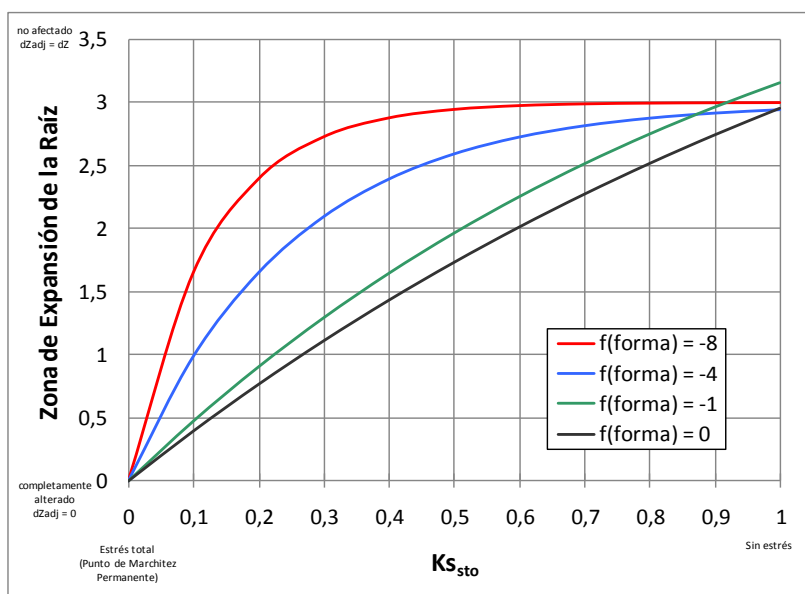


Figura 2.18 Efecto del estrés hídrico sobre la reducción de la zona de expansión para varios factores de forma (f_{forma}) y estrés hídrico en la zona de raíces (K_{ssto}).²³

19) Tiempo desde siembra a la máxima profundidad de raíces

Unidades: (días, o día.°C⁻¹)

Tipo: Cultivar (Variedad), Ambiental.

Definición: Tiempo de desarrollo de la raíz desde la siembra hasta el momento de la máxima profundidad de raíces.

²³ Tomado de Raes et al., (2009).

2.7.3.5 Transpiración del cultivo

20) Coeficiente del cultivo cuando el dosel está completo pero previo a la senescencia

Unidades: (Kcb_x , Adim)

Tipo: Conservativo

Definición: Coeficiente para la transpiración del cultivo máximo (Suelo bien regado y dosel completo, $CD=1$, o 100%). Debido a las diferencias en albedo, altura del cultivo, propiedades aerodinámicas, propiedades de la hoja y estomáticas, la transpiración en el punto de crecimiento máximo del cultivo bien humedecido difiere de la ET_o .

El coeficiente del cultivo máximo Kcb_x representa una integración de los efectos de las características que distinguen el cultivo con un dosel completo del pasto de referencia. El coeficiente Kcb_x es a menudo 5 – 10% más alto que la referencia, e igual a 15 – 20% más grande para algunos cultivos altos tales como el maíz, sorgo o caña de azúcar. El coeficiente Kcb_x es aproximadamente equivalente al coeficiente basal del cultivo a media estación para diferentes cultivos encontrados en Allen et al., (1998), pero solo para casos de la CD total.

21) Factor de declinación del cultivo

Unidades: (f_{edad} , $\% \cdot \text{día}^{-1}$, o gradiente)

Tipo: Conservativo

Definición: factor de ajuste (f_{edad}) que decrece a Kcb_x por una constante y pequeña fracción (p. ej., 0.3%) por día, resultando un coeficiente de ajuste del cultivo ($Kcb_{x,ajust}$) como resultado de la senescencia, deficiencia de nitrógeno, etc. (Ver: numeral 2.4.1.4.2 y ecuación [2.23]).

22) Efecto de cobertura del dosel sobre la reducción de evaporación del suelo en el estado de estación tardía.

Unidades: ($Erel_x$, $\%$)

Tipo: Conservativo

Definición: Reducción de la evaporación del suelo que ocurre cuando la cobertura del dosel disminuye al final del ciclo del cultivo. Aunque en este estado el dosel verde decrece, el suelo permanece bien abrigado por el dosel marchito incluso cuando la cobertura del dosel verde llega a cero ($CD = 0$) al final del ciclo de crecimiento.

2.7.3.6 Producción de biomasa y formación de cosecha

23) Productividad hídrica normalizada para ET_0 y CO_2

Unidades: (WP^* , $g.m^{-2}$, o $t.ha^{-1}$)

Tipo: Conservativo

Definición: Expresa la materia seca aérea (g, kg o t) producida por unidad de área (m^2 o ha) por unidad de agua transpirada (mm). Muchos experimentos han mostrado que las relaciones entre biomasa producida y agua consumida por una especie dada es altamente lineal Steduto et al., (2007). La productividad hídrica, y la productividad hídrica normalizadas se explican en los numerales 2.; 2.1; 2.6; 2.6.1; 2.6.2; y 2.6.3 y en las ecuaciones [2.2; 2.40 y 2.42] más detalladamente.

24) Productividad hídrica normalizada para ET_0 y CO_2 durante la formación de la cosecha (como porcentaje de WP^* antes de formación de la cosecha)

Unidades: (WP^* , $g.m^{-2}$, o $t.ha^{-1}$)

Tipo: Conservativo

Definición: Es la productividad hídrica normalizada calculada sólo en el periodo de formación de la cosecha y expresada como porcentaje de WP del período antes de formación de cosecha.

2.7.3.7 Índice de cosecha

25) Índice de cosecha de referencia

Unidades: (IC_0 , %)

Tipo: Cultivar (Variedad)

Definición: Es la proporción de la masa producida al total aéreo de biomasa que será alcanzado a madurez para condiciones no estresadas. Es la relación entre la materia seca total y la cosecha (grano o fruto). El índice de cosecha se explica en el numeral 2.1; 2.8; 2.8.1; 2.8.2; 2.8.3; y 2.8.4 y en las ecuaciones [2.3; 2.45; 2.46 y 2.48] en forma más detallada.

Los índices de cosecha de las especies de pastos se calculan como la proporción de forraje cosechado dividido por la masa de forraje aéreo total.

Para Alfalfa cuyo producto es el heno está entre 0.4 - 0.5 y 0.8 - 0.9 Para primero y segundo año. (Según Doorenbos y Kassam, (1979)), (FAO, 33).

Para pastos Ovillo el IC puede variar en promedio alrededor de 0.56 y como máximo de 0.79, Raigrás Azul de 0.37 y trébol blanco es de cerca de 0.27, para Quack Grass y diente de león es de 0.50. Carlassare y Karsten, (2002).

26) Construcción del IC

Unidades: (t_{ic} , Días o días.°C)

Tipo: Cultivar (Variedad)

Definición: Es el tiempo requerido para la construcción del IC, justo después de la floración o después del inicio de la formación de cosecha el incremento del Índice de Cosecha es despacioso. (fase de retraso) y se describe por una función logarítmica. Ver ecuación [2.45] del numeral 2.8.1

27) Posible incremento de IC debido al estrés hídrico antes de floración

Unidades: (%)

Tipo: Conservativo

Definición: En preantésis el estrés hídrico limita el crecimiento vegetativo y puede tener efectos positivos (o negativos) sobre el índice de cosecha. Esto depende del tiempo de exposición, severidad y duración del estrés.

Este parámetro tampoco aplica para las especies forrajeras, especialmente para raigrás, podría determinarse para avena forrajera pero no tiene gran trascendencia pues el nivel de desarrollo reproductivo es pequeño.

28) Parámetro que describe el posible impacto de crecimiento vegetativo restringido durante la formación de la cosecha sobre IC.

Unidades: (a, Adim)

Tipo: Conservativo

Definición: Ajuste para la competición entre la parte vegetal y el crecimiento reproductivo después del inicio de floración. El crecimiento vegetativo se restringe durante la formación de la cosecha. La magnitud de este efecto se presenta como una función de K_s la cual es colocada por un coeficiente "a" que se incrementa en cuanto "a" disminuye. Ver ecuación [2.46] del numeral 2.8.2.

Nota: Ese parámetro no se aplica para especies forrajeras, pues no hay formación de cosecha en la mayoría de estas especies. Eventualmente podría

determinarse para avena forrajera, pero no tiene relevancia en la producción de forraje.

29) Parámetro que describe el impacto negativo del cierre estomatal durante la formación de cosecha sobre IC.

Unidades: (b, Adim)

Tipo: Conservativo

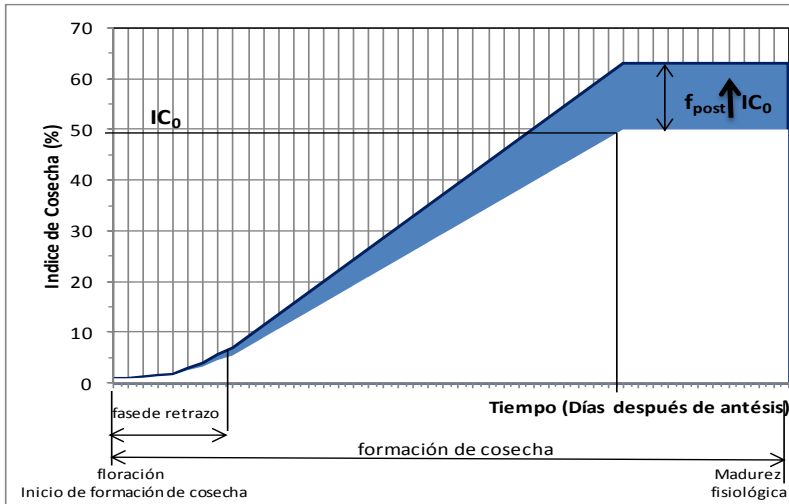


Figura 2.19 Rango (área sombreada) en el cual el Índice de Cosecha puede incrementarse como un resultado del estrés hídrico antes de floración.²⁴

Definición: Cuando el estrés es bastante severo, que causa substancial cierre estomatal y disminución de la fotosíntesis, se asume que el efecto sobre el IC es negativo y su magnitud es dada por el coeficiente "b" el cual al decrecer intensifica el efecto negativo sobre el IC. Esto resulta en un decremento de dIC/dt , y es dado por la ecuación [2.48], ver numeral 2.8.3.

Observación: No aplicable a cultivos forrajeros. Podría aplicarse a avena forrajera aunque en general no se espera a formación de granos para hacer los cortes para forraje.

30) Incremento máximo aceptable del IC especificado

Unidades: (ΔIC_{ante} , %)

Tipo: Conservativo

²⁴ Idem

Definición: El máximo incremento aceptable del IC_o como el resultado del estrés hídrico antes de floración (ΔIC_{ante}) es especificado como un porcentaje de IC_o . (Cap 2 , Pag. 44 y Cap. 3 Pag. 73, Manual de AquaCrop.) Raes et al., (2009a).

Cuando el cultivo ha gastado menos energía en su crecimiento vegetativo, el Índice de Cosecha puede ser más alto que IC_o (Figura 2.18). El máximo incremento aceptable del IC_o como el resultado del estrés hídrico antes de floración (ΔIC_{ante}) es especificado como un porcentaje del IC_o .

La Tabla 2.9 presenta las clases consideradas por el Modelo AquaCrop para el efecto positivo máximo de estrés de preantesis sobre el IC .

Tabla 2.9 Clases graduadas para el efecto positivo máximo de estrés de preantesis sobre el IC .²⁵

Clases	Porcentaje de incremento de HI
Ninguno	0 %
Pequeño	4 %
Moderado	8 %
Fuerte	12 %
Muy Fuerte	16 %

El porcentaje es específico del cultivo y da el incremento máximo posible de IC_o como un resultado del estrés hídrico antes de floración. El incremento especificado más alto ΔIC_{ante} , es el más grande rango para el ajuste.

Observación: No aplicable a cultivos forrajeros. Podría aplicarse a avena forrajera aunque en general no se espera a formación de granos para hacer los cortes para forraje.

31) Suma (ET_o) durante el período de estrés antes de que se supere la activación de la senescencia

Unidades: ($\sum ET_{o_{estres}}$, mm)

Tipo: Conservativo

Definición: Suma de la ET_o durante el período de estrés antes de que se supere la activación de la senescencia. Es cero para la mayoría de los cultivos, esto supone que el cultivo no admite nivel alguno de evapotranspiración acumulada sin que se presente el estrés hídrico, antes de la activación de la senescencia. Lo cual indicaría que el cultivo no presentaría resistencia al estrés hídrico, la mayoría de los cultivos calibrados para AquaCrop, presentan este valor como cero a excepción de la Quinoa, pues este cultivo es resistente a la sequía.

²⁵ Idem

32) Umbral de agotamiento de agua en el suelo para el fracaso de la polinización - Umbral superior

Unidades: (p_{pol} , %)

Tipo: Conservativo

Definición: Nivel de agotamiento de agua en el suelo bajo el cual la polinización inicia a fallar, es generalmente menor que el umbral para el cierre estomatal y senescencia.

Observación: No aplicable a cultivos forrajeros. Podría aplicarse a avena forrajera aunque en general no se espera a formación de granos para hacer los cortes para forraje.

33) Porcentaje de humedad en el punto anaeróbico en %Vol (con referencia a saturación)

Unidades: (θ_{aer} , %Vol)

Tipo: Cultivar, Ambiental

Definición: El umbral inferior es el contenido de agua bajo saturación al cual la pobre aireación no prolonga los límites de la transpiración. La Tabla 2.10 presenta las clases correspondiente a valores por defecto y rangos de estrés por causa de la aireación considerados por el modelo AquaCrop.

Tabla 2.10 Clases, correspondientes a valores por defecto y rangos de estrés por aireación.²⁶

Cases Sensibilidad al anegamiento	Punto de anaerobiosis (volumen % bajo saturación)	
	Valor por defecto	Rango
No estresado cuando entra el agua	0	0
Muy tolerante a la entrada de agua	-2 vol%	1 ... 3
Moderadamente tolerante a la entrada de agua	-5 vol%	4 ... 6
Sensible a la entrada de agua	-10 vol%	8 ... 12
Muy sensible a la entrada de agua	-15 vol%	13 ... 15

²⁶ Tomado del Manual de Referência de AquaCrop. Raes et al., (2009a).

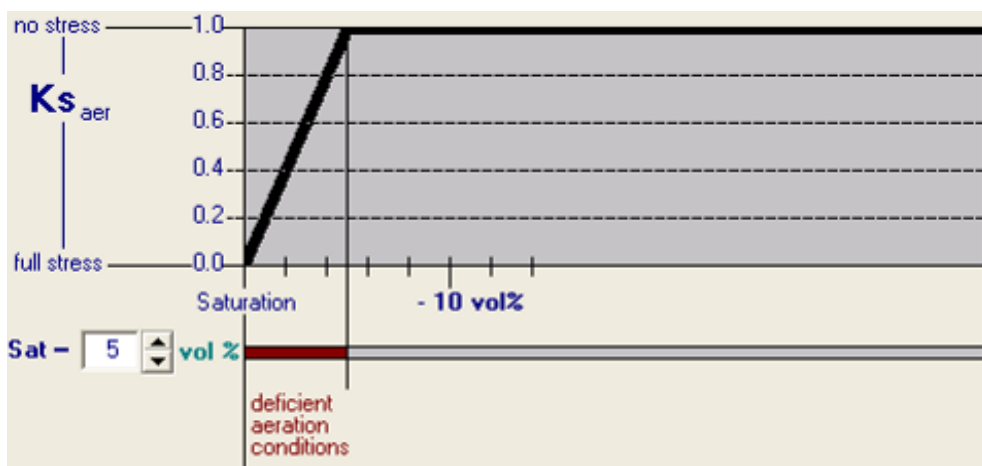


Figura 2.20 Especificación del contenido de agua en el suelo bajo saturación al cual la aireación no limita prolongadamente la transpiración. Tomado del Manual de Referencia AquaCrop.²⁷

En la Figura 2.20 se muestra el nivel de sensibilidad del cultivo a la falta de aireación para el caso de un cultivo con condiciones de déficit de aireación a - 5%Vol (es decir sólo el 5% de las raíces está libre de agua cuando el cultivo inicia el estrés por falta de aireación).

2.7.3.8 Estrés de temperatura del aire

34) Temperatura mínima del aire bajo la cual la polinización inicia a faltar (estrés de frío)

Unidades: ($T_{n,frío}$, °C)

Tipo: Conservativo

Definición: Efecto de estrés por baja temperatura del aire bajo la cual la polinización se ve afectada.

Si la temperatura del aire cae bajo un umbral ($T_{n,frío}$), la polinización puede ser afectada. Cuando se presenta esta temperatura, el coeficiente de estrés de frío $Ks_{pol,c}$ será más pequeño que 1 y llega a ser cero en el umbral inferior el cual es asumido en 5 grados bajo $T_{n,frío}$.

Nota: En realidad para pastos esta temperatura no tiene importancia pues el tipo de producción (forraje) no es limitada por la polinización.

²⁷ Idem

Observación: No aplicable a cultivos forrajeros. Podría aplicarse a avena forrajera aunque en general no se espera a formación de granos para hacer los cortes para forraje.

35) Temperatura máxima del aire sobre la cual la polinización inicia a faltar (estrés de calor)

Unidades: ($T_{x,calor}$, °C)

Tipo: Conservativo

Definición: Efecto de estrés por altas temperaturas del aire sobre la cual la polinización se ve afectada.

Si la temperatura del aire sube sobre un umbral ($T_{x,heat}$), la polinización puede ser afectada. Cuando se presenta esta temperatura, el coeficiente de estrés de calor $K_{S_{pol,h}}$ será más pequeño que 1 y llega a ser cero en el umbral superior el cual es asumido en 6 grados sobre $T_{x,heat}$.

Nota: En realidad para pastos esta temperatura no tiene importancia pues el tipo de producción (forraje) no es limitada por la polinización. Es decir la polinización no limita la producción de forraje.

Observación: No aplicable a cultivos forrajeros. Podría aplicarse a avena forrajera aunque en general no se espera a formación de granos para hacer los cortes para forraje.

36) Mínimo de grados día requeridos para la producción de biomasa

Unidades: (CDG_{min} , día.°C)

Tipo: Conservativo

Definición: Es el mínimo período en grados días requerido para que el cultivo pueda producir biomasa sin restricciones por baja temperatura. Para la mayoría de los cultivos determinados hasta ahora por AquaCrop es estimado y en algunos no ha sido considerado.

2.8 Resultados del modelo AquaCrop

Como el modelo está orientado a la simulación de la producción de biomasa con base en la energía presente y especialmente en la incidencia del agua como la productividad hídrica normalizada (WP^*), el modelo hace especial énfasis en los efectos del estrés hídrico en el desarrollo del ciclo del cultivo y en la producción.

Por esta razón el modelo despliega archivos y gráficos en los cuales se incluyen resultados de Clima – Cultivo – Suelo – Agua, estos resultados se van actualizando en la medida en que transcurre la simulación con intervalos de tiempo diario.

Los resultados de simulación que despliega el modelo de mayor importancia son:

- 1) Relación de la interacción Clima-Cultivo-Suelo y Agua.
- 2) Los parámetros seleccionados en la simulación
- 3) El perfil del contenido de agua en el suelo
- 4) El balance hídrico del suelo, con la evaluación de la evaporación del suelo, la transpiración del cultivo, la escorrentía superficial, y el drenaje.
- 5) La curva a través de ciclo del cultivo del nivel de agotamiento del agua en el suelo.
- 6) La curva de desarrollo de la cobertura vegetal del cultivo a través del ciclo del cultivo.
- 7) Requerimientos netos de irrigación y el trazado a través del tiempo de la transpiración del cultivo.
- 8) Información estacional del ciclo productivo del cultivo
- 9) La cantidad de biomasa producida, actualizada constantemente.
- 10) El rendimiento final esperado, también actualizado continuamente.
- 11) El impacto del estrés hídrico en las etapas de desarrollo del dosel de pre y post-antesis y sobre el ajuste del índice de cosecha (IC).
- 12) La eficiencia del uso del agua en la producción de biomasa de la evapotranspiración (ET).

Se producen carpetas con varios tipos de resultados como el balance hídrico del suelo, la producción, y la relación clima – cultivo – suelo – agua, todos los archivos y resultados de la simulación pueden ser exportados a hojas de cálculo para su posterior estudio o análisis.

3. METODOLOGÍA

La metodología realizada se puede describir en tres aspectos o partes principales a saber:

1. La determinación de la parametrización y variables del modelo AquaCrop que integra las relaciones de la productividad hídrica y la potencialidad del clima, el cual puede ser aplicado para la obtención de la biomasa total producida bajo las condiciones de la SB por los cultivos forrajeros de interés: Raigrás (*Lolium perenne*) y Avena forrajera (*Avena sativa*, L.).

El modelo AquaCrop fue seleccionado por sus ventajas y características, dicho modelo fue propuesto recientemente como consecuencia de la revisión de la publicación 33 de la FAO en 2009, Doorenbos y Kassam, (1979). Y fue desarrollado por Steduto et al.,(2009), Raes et al.,(2009), y Hsiao et al.,(2009).

2. El uso de experimentación de campo con base en procesos de optimización del agua para la determinación de la huella hídrica de las especies en la producción de biomasa. Considerando la metodología del gradiente Hanks et al., (1974), Jhonsons et al., (1986).
3. La calibración y validación de la producción de la biomasa de los cultivos forrajeros de interés (Raigrás (*Lolium perenne*) y Avena forrajera (*Avena sativa*, L.)) con base en el modelo AquaCrop por medio del uso de la información de campo obtenida en las condiciones de la SB, y su comprobación de los niveles de respuesta y ajuste por medio de indicadores apropiados.

3.1 Experimentación en campo

Se aplicó la metodología del gradiente hídrico formulada por Hanks et al., (1974), que consistió en el diseño de una línea lateral de tubería de riego con aspersores como fuente de agua, que generan un gradiente de riego para la creación de variables de respuesta también en forma de gradiente, determinando así la producción de biomasa a partir del agua de las especies estudiadas, raigrás (*Lolium perenne*) y avena forrajera (*Avena sativa*, L.).

Con el fin de implementar esta metodología se adecuó un lote experimental a libre exposición en el Centro de Investigación (C.I.) Tibaitatá, de una hectárea en el cual se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

1. Fácil acceso
2. Suministro de agua permanente al lote
3. Ubicación de un sistema de bombeo dentro del lote, la estación de bombeo consta de: la caseta de bombeo, y el desarenador con comunicación directa a los canales de suministro de agua.
4. Buen drenaje.
5. Ubicación contigua a la estación agrometeorológica de Tibaitatá la cual pertenece a la red de estaciones del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). El IDEAM es la institución oficial de Colombia para la determinación del clima, este aspecto es de gran importancia, pues las variables climáticas usadas en la experimentación fueron supervisadas con base en dicha estación y constituyen un insumo fundamental en la evaluación de los requerimientos hídricos de las especies agrícolas.

Con base estos aspectos se proyectó la infraestructura faltante para el buen desarrollo del presente proyecto de investigación.

3.1.1 Caracterización del sitio experimental

El C.I. Tibaitatá se encuentra ubicado en el km 14 vía al municipio de Mosquera (departamento de Cundinamarca), localizado a 4°42' de latitud Norte y 74°12' de longitud al oeste de Greenwich, en la sabana de occidente de Bogotá, sobre la carretera central de occidente, a una altitud de 2543 msnm., el lote experimental fue el de la nomenclatura ICA No. 49. Para la caracterización del sitio experimental se tuvieron en cuenta las variables de clima, suelos: tanto condiciones físicas, químicas, e hidrodinámicas.

3.1.2 Antecedentes del Lote

En el pasado, el lote experimental había sido cultivado con los siguientes cultivos: pastos (ganado), trigo, cebada, y papa, sin embargo, el lote venía de un descanso prolongado de 5 años. Por esta razón se prefirió hacer una caracterización completa del mismo con el fin de conocer su estado actual.

3.1.3 Suelos

Los suelos del lote pertenecen a la subregión del Altiplano Cundiboyacense; con una clasificación de Holdrige de “Bosque Seco Montano Bajo” y está ubicado en la zona agroecológica Fa.

La zona agroecológica denominada Fa son tierras de piso térmico frío y seco altitud de 2000 a 3000 msnm., temperatura de 12 a 18° C, con precipitaciones entre 500 y 1000 mm.año⁻¹, tierras de las altiplanicies Cundiboyacenses que alcanzan 53.625 ha, suelos Andisoles e Inseptisoles de ceniza volcánica, generalmente profundos (90 a 150 cm), bien drenados, fertilidad moderada. Áreas aptas para cultivos de papa, trigo, cebada y hortalizas, ganadería intensiva o semi-intensiva.

Desde el punto de vista de los suelos el C.I. Tibaitatá pertenece al complejo Pachic Haplustands – Humic Haplustands – Fluventic Dystrustepts. Símbolo RMQa y RMQb. Según el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca, IGAC, (2000). Estos suelos se localizan en los municipios de Sibaté, Soacha, Mosquera, Funza, Bojacá y Madrid. Esta unidad ocupa la posición de terrazas del río Bogotá, el relieve es ligeramente plano a ligeramente inclinado con pendientes que varían entre 1 y 5%. El área total que se encuentra en el departamento de Cundinamarca con este tipo de suelo asciende a 15.196 ha.

Son suelos de reacción mediana a ligeramente ácida, alta capacidad de intercambio catiónico, baja saturación de bases, contenidos bajos a altos de magnesio, potasio, fósforo y medios a altos de calcio; la fertilidad de estos suelos es moderada a alta. Las características son: Textura Franca y/o franco – arcillo - limosa y franco – arcillosa, bien drenada, plana; profunda; normal y/o ligeramente salina.

Para la caracterización del lote experimental se desarrollaron los siguientes análisis:

1. Se tomaron muestras de suelos, con el fin de determinar en el laboratorio una caracterización desde el punto de vista químico. Los resultados de este análisis fueron la base para la aplicación de la fertilización del suelo.
2. Se tomaron muestras inalteradas del suelo para la determinación de las curvas de retención de humedad. Con base en estos resultados se calculó la lámina de agua aprovechable y los niveles hidrodinámicos del suelo como son el Punto de Marchitez Permanente (PMP) y la Capacidad de Campo (CC), el Punto de Saturación (Sat%) y la Conductividad hidráulica, además de la densidad aparente (Da).

3. Se desarrolló una prueba de infiltración por el método de los anillos concéntricos con el fin de determinar la curva de infiltración y obtener la infiltración básica del suelo (Ib).

3.1.4 Clima

El desarrollo de un experimento de este tipo requiere la caracterización del clima, no sólo en el contexto técnico histórico sino en la evaluación y seguimiento con frecuencia por lo menos diaria de la mayoría de los elementos del clima. La Tabla 3.1 muestra el resumen de los registros medios multianuales reportados por la estación de Tibaitatá desde 1954.

Tabla 3.1 Promedios de los principales elementos climáticos que caracterizan el clima del sitio experimental.

Elementos Climáticos (promedios)	Valores
Precipitación	657 mm.año ⁻¹
Evaporación	1029.5 mm.año ⁻¹
Humedad Relativa Media	83%
Humedad Relativa Mínima Media	57%
Temperatura	13.1 °C
Temperatura máxima media	16.4 °C
Temperatura mínima media	9.7°C
Evaporación media diaria	2.82 mm.día ⁻¹
Dirección predominante del Viento	Sur Este
Velocidad del viento media	1.27 m.s ⁻¹
Horas de luz reales (n)	1652.6 hr.año ⁻¹ (4.53 hr.día ⁻¹)

La estación climática de Tibaitatá está contigua al lote experimental con lo cual se facilita la caracterización de los elementos climáticos de importancia para la evaluación de la evapotranspiración de referencia y real. Dos elementos son imprescindibles para el cálculo de los balances hídricos del suelo y del cultivo estos son la precipitación y la evaporación. Sin embargo los modelos de la evapotranspiración de referencia usan un conjunto de variables climáticas adicionales para su estimación.

Es importante en general conocer el comportamiento interanual de algunas variables como son la precipitación y la evaporación para tal efecto se muestra la Figura 3.1 la cual presenta la precipitación multianual (años 1955 a 2010), y la evaporación la cual se presenta en la Figura 3.2. La evaporación fue medida con tanque evaporímetro tipo A.

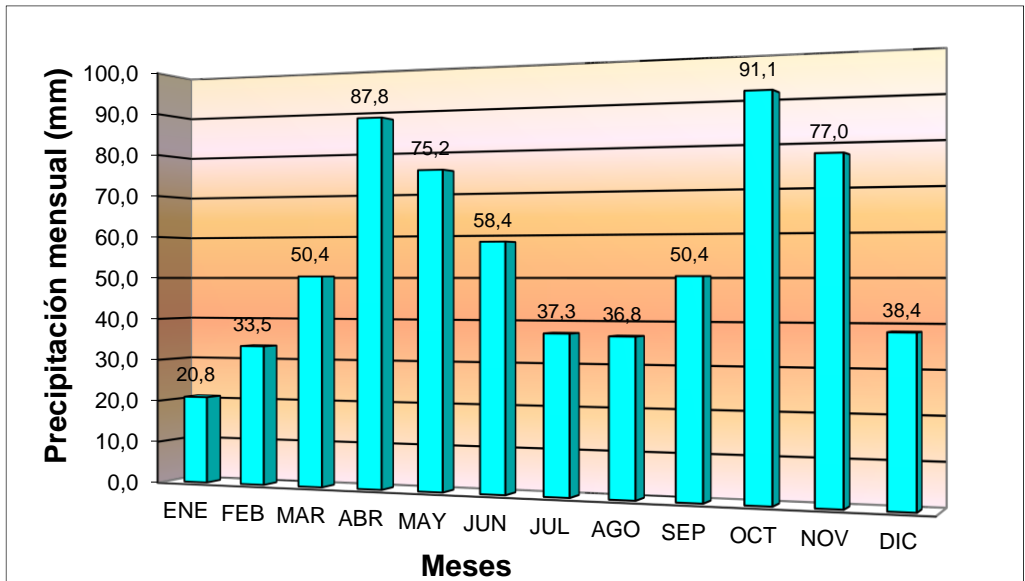


Figura 3.1 Precipitación mensual multianual de la estación Tibaitatá, años 1955 a 2010. (Sabana de Bogotá, Colombia)

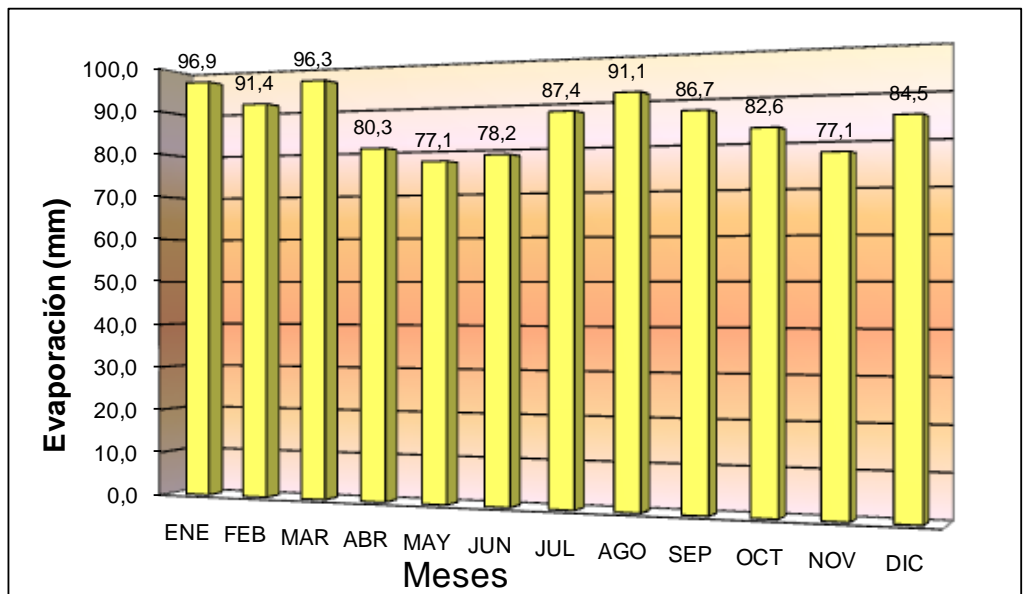


Figura 3.2 Evaporación mensual multianual de la estación Tibaitatá, años 1955 a 2010. (Sabana de Bogotá, Colombia).

La información climática reportada durante el tiempo experimental fue monitoreada en forma diaria teniendo en cuenta las siguientes variables o elementos climáticos: precipitación (mm), evaporación (mm), presión de vapor (bar), temperaturas (°C), media, máxima, mínima, humedad relativa (%), temperatura de punto de rocío (°C), velocidad del viento (m.s⁻¹) y Brillo Solar

(Horas Luz) (hr.día^{-1}). Estas variables fueron la base para el cálculo de la evapotranspiración de referencia por el método de Penman – Monteith. Allen et al., (1998).

3.1.5 Infraestructura

Además de las condiciones mencionadas en el numeral 3.1 sobre ubicación y el emplazamiento de la caseta de bombeo, desarenador, y canales de riego y drenaje, para la realización de los experimentos fue necesario construir un sistema de riego que respondiera a las exigencias de la metodología del gradiente de humedad propuesto por Hanks et al., (1974), para lo cual se diseñó un sistema de riego adecuado para las condiciones del lote experimental (Lote 49, C.I. Tibaitatá).

Por otro lado se diseñó un sistema de drenaje integral el cual contribuye a evitar la influencia de los excesos hídricos en el caso de precipitaciones intensas eliminando así el vector de ascenso capilar mencionado en el apartado 3.5.2 Balance hídrico.

3.2 Materiales agrícolas usados

Con el propósito de llevar a cabo el proyecto de investigación para la determinación de la producción de biomasa de especies forrajeras a partir del agua se adquirió semilla certificada de las variedades: Bestfor Plus de Raigrás (*Lolium perenne*);, y Cayuse de Avena forrajera (*Avena sativa*, L.).

Bestfor Plus es un forraje especializado particularmente útil en aplicaciones tales como pastoreo de ganado para producción de leche y carne, con rendimientos elevados, excelente digestibilidad y palatabilidad excepcional. Es de gran valor alimenticio, de crecimiento rápido. Tiene características de crecimiento rápido como el raigrás italiano, de duración de más de un año por lo general hasta tres años. Bestfor Plus es un tetraploide, lo que significa que tiene hojas más grandes y es más vertical y abierto en su crecimiento, por lo cual se puede pastorear o cosechar mecánicamente.

Tiene altos contenidos de azúcar con una alta fuente de energía forrajera. Es de fácil establecimiento y crecimiento y logra alcanzar una buena altura de planta, tiene alta resistencia a la roya y es de alta resistencia al invierno.

Olson et al., (2006) reportaron producciones desde $5,63 \text{ t.ha}^{-1}$ hasta $20,63 \text{ t.ha}^{-1}$ de producción de biomasa al año, de raigrás variedad Bestford en distintas localidades productoras de los Estados Unidos, durante los años 1996 a 2006.

Por su parte, la variedad Cayuse de avena (*Avena sativa*) es un cereal de forraje de grano para temporada fría, anual usado para alimentación del ganado principalmente. Presenta un potencial de producción de biomasa superior en 14% a la avena Roja. De fácil cosecha a mano y con máquina, con un crecimiento promedio de 15 a 20 cm de altura. La Avena Cayuse se utiliza principalmente para cultivos de alta cobertura, como forraje verde y para heno y alimentación de pollos, pero el resto de la planta es ideal para caballos, vacas o cabras. Es común para mezclas con leguminosas y otros cereales. Es de porte grande, de tardía maduración y tiene un tallo más grande que la variedad Montezuma.

La recomendación es plantarla en otoño/invierno en California y en climas templados. En zonas más frías se debe plantar en primavera. La avena crece en climas húmedos y fríos, sin embargo se adapta a muchas situaciones climáticas extremas. Se trata de un cultivo de invierno de una excelente cobertura y en zonas donde se congela en invierno presenta alta resistencia al fenómeno.

Squella y Ormeño, (2007) reportan producciones de biomasa desde 9,1 a 21,8 t.ha⁻¹ por año en Chile, Martínez y Jasso, (2005), por su parte obtuvieron producciones desde 3,89 a 6,87 t.ha⁻¹ en Potosino, México en 2005. Además Amigone et al., (2004), lograron producciones desde 4,72 a 23,19 t.ha⁻¹ en Córdoba, Argentina en 2004, todos estos autores obtuvieron sus rendimientos de diferentes variedades de avena forrajera incluyendo en algunos casos la variedad Cayuse. Schoner et al., (1982) reportaron producciones para secano y riego de avena forrajera variedad Cayuse desde 4,25 a 23,33 t.ha⁻¹ en el valle de California en los Estados Unidos en el período comprendido entre 1974 hasta 1981.

3.3 Metodología experimental usada

Para la determinación de las principales variables y parámetros del modelo AquaCrop FAO, Steduto et al., (2009), se trabajó con la metodología propuesta por Hanks et al., (1974), con la cual se puede generar un gradiente de riego en el campo experimental. Dicho gradiente es la forma ideal para generar varios niveles de riego y por lo tanto varios niveles de agotamiento que a su vez generan un gradiente de producciones de biomasa y cosecha y diferentes desarrollos del material experimental, de acuerdo a las restricciones hídricas establecidas, estas restricciones se pueden manejar como láminas de riego de diferentes profundidades que tienen directa incidencia en los desarrollos de los sistemas estructurales de la planta de acuerdo al nivel de irrigación.

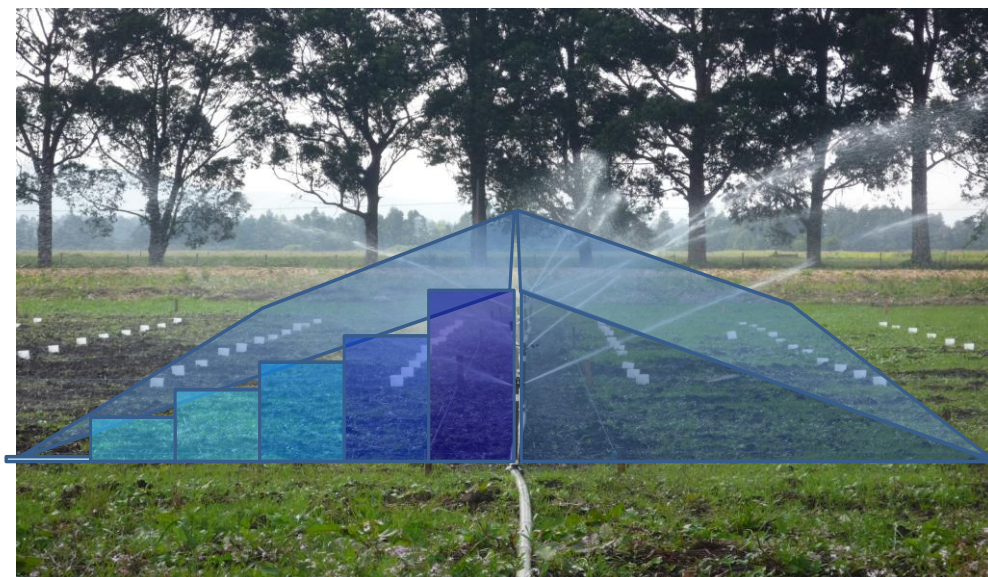


Figura 3.3 Visión general del método del gradiente propuesto por Hanks, R et al, (1974) y estudiado estadísticamente por Johnson, E. et al, (1983). Observe que al final de la pirámide se establece el nivel de humedad para secano (testigo).

El diseño de Hanks et al., (1974) (Figura 3.3), consta de un lateral de riego que se distribuye por todo el centro del campo experimental, tiene ubicados los aspersores con elevadores adecuados al cultivo a establecer y separados de tal forma que no haya caídas de presión o caudal substanciales a lo largo del lateral, para ello es necesario colocar aspersores más seguidos en comparación con las condiciones comerciales de los laterales similares. Esto garantiza que la irrigación generada a lo largo del lateral no varíe y se mantenga más o menos constante.

Los tratamientos experimentales se ubican en forma paralela al lateral de tal manera que a medida que las unidades experimentales se alejan de este, la distribución de agua es menor, por la acción natural de los aspersores. Esto hace que se cree un gradiente de riego a medida que se aleja del lateral, hasta alcanzar el diámetro del lateral, punto desde el cual no llega la irrigación por lo cual se ubican las unidades experimentales testigo, sin irrigación.

3.3.1 Diseño del sistema de riego

El diseño del sistema de riego fue realizado para cumplir con los requerimientos de la propuesta de Hanks et al., (1974) y se ubicó en el lote No. 49 del C.I. Tibaitatá. El diseño del sistema desde el punto de vista hidráulico es la definición exacta de las dimensiones de la tubería, caudales y presiones de operación del sistema, así como de la ubicación física y la conformación tanto del cabezal de bombeo, como de la distribución en el

campo de la tubería, selección de aspersores, aditamentos de riego y de la bomba. (Ver Figura 3.4)

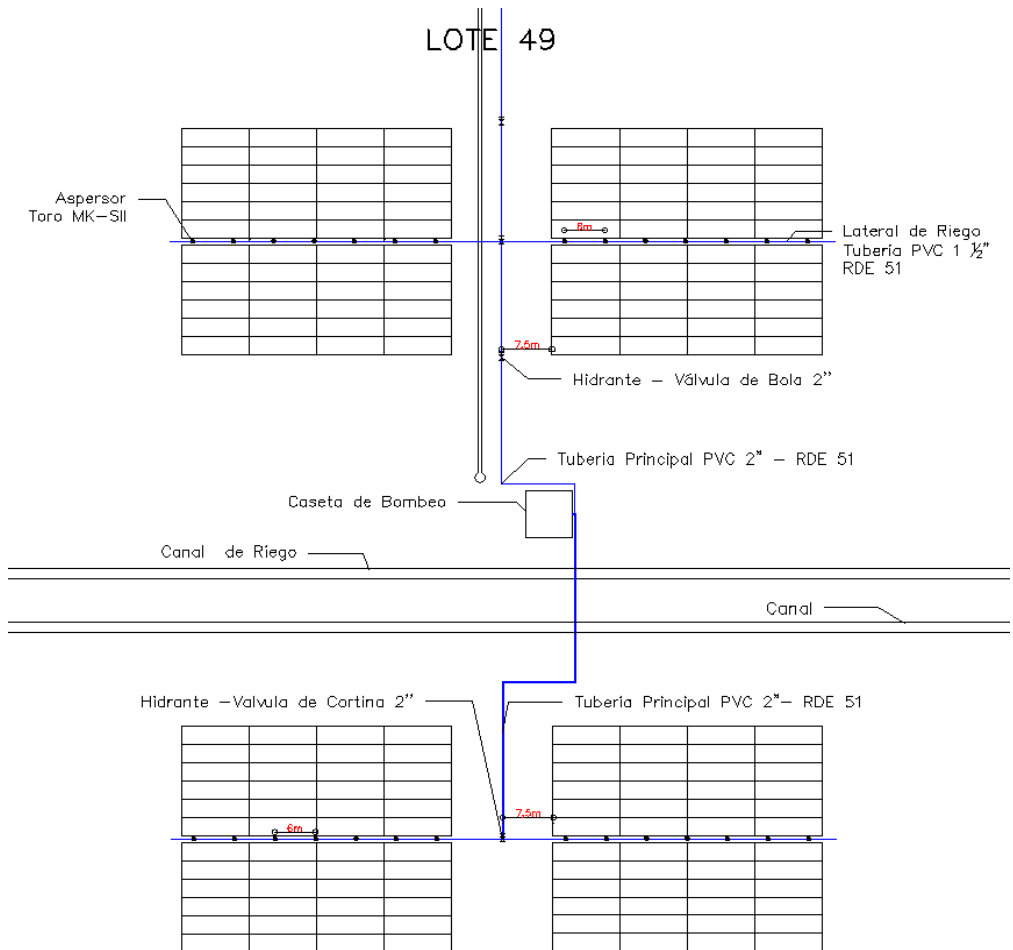


Figura 3.4 Diseño del sistema de riego para cuatro experimentos.

El sistema está dispuesto de un canal de suministro de agua que recoge y conduce el agua del distrito de riego de la Ramada que alimenta el Centro de Investigaciones de Tibaitatá y lleva el agua hasta el lote. Un desarenador se ubica contiguo al canal, el cual sedimenta los sólidos en suspensión de las aguas provenientes del río Bogotá. Existe una caseta de bombeo contigua, en la cual se ubica el cabezal del sistema.

Según el diseño de riego de la Figura 3.4, se construyeron cuatro laterales de riego, cada uno de longitud total de 49.15 m en tubería de PVC de 3,81 mm (1-1/2 pulgadas), los cuales toman el agua a través de hidrantes de la red principal. Cada lateral de riego está compuesto por 8 tramos: el primero de longitud de 7.5 m que va desde el hidrante de la línea principal de riego hasta

el inicio de la parcela experimental en donde se localiza el primer aspersor, a continuación van dispuestos seis tramos de 6 m cada uno y con un aspersor en uno de sus extremos, finalmente, se dispone de un tramo de 6 m con un tapón liso en uno de sus extremos para el correcto desempeño hidráulico del sistema.

El cabezal diseñado de la Figura 3.5 consiste en una bomba marca IHM modelo 2-10, diámetro de 177 mm, de 7,46 Kwatts (10,0 HP), la cual tiene una manguera de succión de 7,62 cm (3 pulgadas) con válvula de pie ubicada dentro del desarenador. Se instalaron en paralelo dos filtros de arena con capacidad de $3,15 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ($50,0 \text{ gal}\cdot\text{min}^{-1}$); adicionalmente, para el control de las impurezas finas se tiene un filtro de anillos de 5,08 cm (2,0 pulgadas). Se ha considerado la ubicación de un sistema venturi para una futura ampliación para fertilización vía presión, el diseño de este aditamento arrojó que debe ser de 2,54 cm (1,0 pulgada) capaz de interactuar con un caudal de entre $0,505$ y $1,78 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ($30,3$ y $106,6 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$) con un caudal de entrada lateral de $0,022$ y $0,083 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ($1,3$ y $5,0 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$). El control de presión se realiza por medio de dos manómetros montados antes y después de los filtros del cabezal.



Figura 3.5 Cabezal de bombeo del sistema de riego por gradiente – caseta de bombeo.

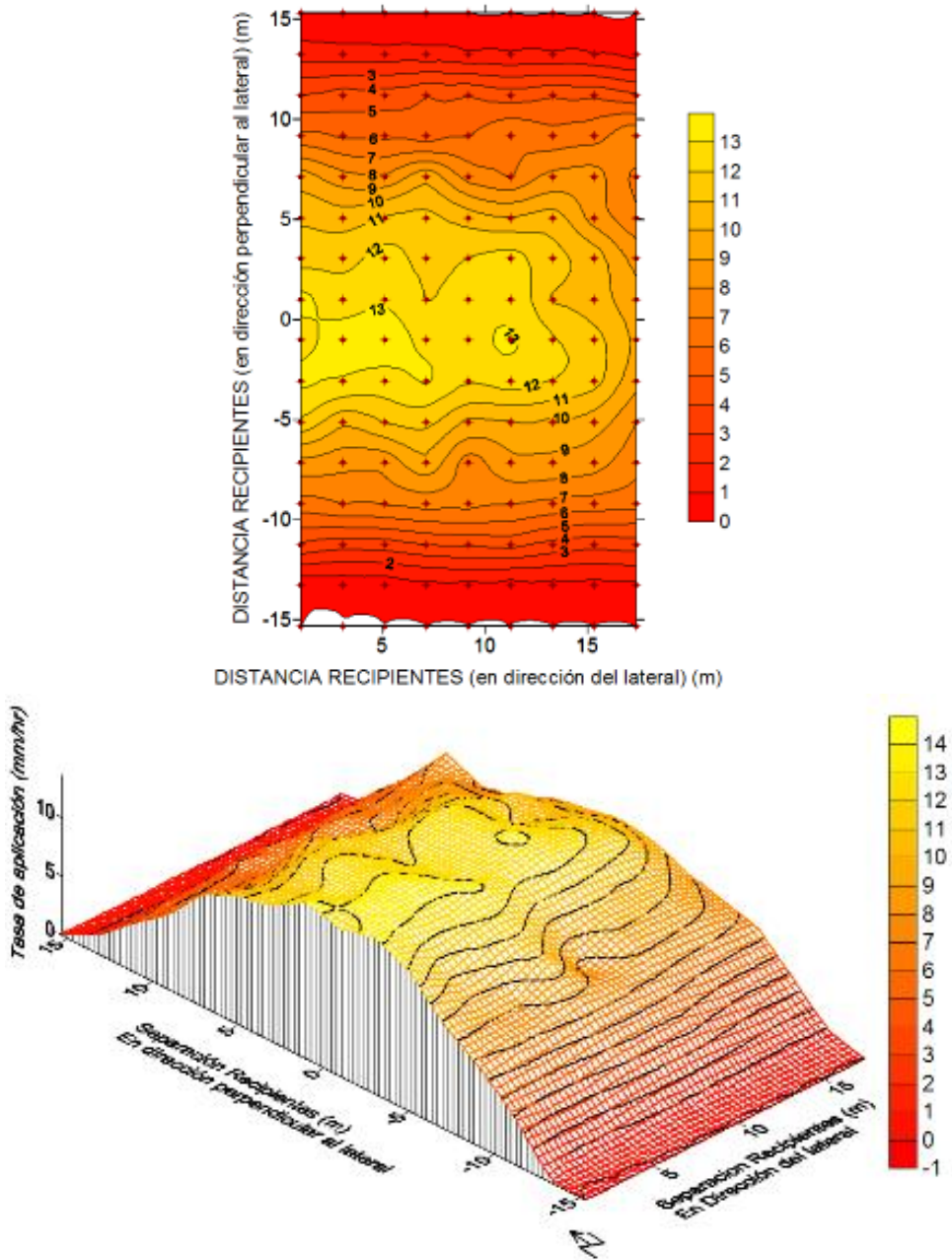


Figura 3.6 Distribución de la tasa de aplicación de los aspersores ($\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$).

En el sistema de riego, (Figura 3.4) la tubería de distribución principal enterrada y con diámetro de 5,08 cm (2,0 pulgadas), opera a una presión teórica de 54,97 mca (78,22 psi). Se ha considerado cuatro sub-áreas experimentales, cada una para un experimento independiente; sin embargo, sólo se usaron dos de estas simultáneamente, una para *Avena Forrajera* y la

otra para *Raigrás*, tanto el sistema de riego como el de drenaje posee capacidad para seis experimentos independientes. Cada sub-área experimental consta de un lateral de riego con tubería de 3,81 cm (1,5 pulgadas) y con siete aspersores, dispuestos cada 6,0 m, obteniendo así un traslape del 75.0 %. Este alto nivel de traslape es debido a la necesidad de crear una mínima variación a lo largo de la tubería.

Los aspersores utilizados son surtidores marca *Toro Irrigation*, modelo S-II, con una presión de operación de 249,76 KPa (36.25 psi), caudal de 22,4 L.s⁻¹ (1344 L.hr⁻¹), y doble salida con boquillas de 4.9 mm y 3 mm, con diámetro de operación de 28.5 m y de entrada de 1,905 cm (¾ de pulgada).

El método del gradiente puede ser influenciado por la acción de la velocidad del viento, por lo cual no se recomienda para localidades dónde ésta velocidad sea alta, en general para el uso del riego por aspersión se recomienda regar a velocidades del viento inferiores a 2 m.s⁻¹, por otro lado para velocidades superiores se recomiendan mayores porcentajes de traslape entre aspersores, Fuentes, (1996); Tarjuelo, (1995). La velocidad del viento promedio que se presentó en las etapas experimentales fue de 1,6 m.s⁻¹, y se tomó la precaución de no regar con velocidades superiores a la recomendada de 2 m.s⁻¹.

Para la evaluación del sistema de riego se empleó la metodología presentada por Merriam et al., (1973). Se determinó el caudal de los aspersores a través del respectivo aforo; entretanto, el comportamiento (eficiencias) del sistema se evaluó mediante la distribución de recipientes (pluviómetros) para la captación de agua entre aspersores. Por otra parte, para determinar la uniformidad de la aplicación de agua, se emplearon recipientes cilíndricos (de pared vertical) de diámetro 10.7 cm, los cuales fueron colocados formando una grilla entre los aspersores 3, 4, 5 y 6 (debido al traslape del riego) y distanciados entre sí 2.04 m, durante 1.25 horas de funcionamiento.

Los indicadores evaluados fueron: uniformidad de distribución (UD); coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU); eficiencia del sistema de riego (Er). La Figura 3.6 muestra el comportamiento de la tasa de aplicación de agua en uno de los laterales del sistema de riego.

Los laterales de riego evaluados, presentaron presiones de operación en los aspersores entre 34 y 35 PSI; caudales entre 20.46 y 24.25 L.min⁻¹, siendo el promedio a lo largo del lateral de 22.04 L.min⁻¹. Se encontró una tasa de aplicación de 13.49 mm.hr⁻¹, menor a la infiltración básica de 21.6 mm.hr⁻¹, encontrando que el diseño del sistema de riego es adecuado. La uniformidad de distribución de la fue de 86%, en tanto que la uniformidad de distribución de todo el lateral fue de 83.52%. De acuerdo a la clasificación presentada por Keller y Bliesner (1990), el funcionamiento del sistema en cuanto a la

uniformidad de distribución es “buena”. Se evaluó también el coeficiente de uniformidad de Christiansen, encontrándose un valor de 89.59% y la eficiencia del riego de 68.6%.

En la Figura 3.6 se presenta la tasa de aplicación real de los aspersores en el lote de evaluación, con las condiciones normales de viento ($<2 \text{ m.s}^{-1}$). Se aprecia que la mayor tasa de aplicación comprendida entre los 10 y 13 mm.hr^{-1} se presenta en los primeros 10 m de distancia del aspersor. A partir de esta distancia, la tasa de aplicación decrece rápidamente a medida que se aleja del aspersor, esto es indispensable en la experimentación, pues en la metodología empleada del gradiente de riego, propuesto por Hanks et al., (1974), para la generación de los niveles de producción de biomasa por el agua requerido por el Modelo AquaCrop, Steduto et al., (2009) aunque nivel de humedad que se tiene en cuenta para la aplicación del riego es el Nivel 1, es decir, el que se encuentra más cerca del lateral de riego y por lo tanto, tiene mayor tasa de aplicación de agua, todos los niveles y humedades son supervisados tal y como se explica en las secciones 3.3.4.3.5 y 3.4.

3.3.2 Diseño del sistema de drenaje

Debido a la necesidad de controlar los niveles de ascenso capilar que se pudieran presentar en el lote por excesos de aguas lluvias, fue necesario diseñar un sistema de drenaje, el cual consiste en drenes con tubería corrugada para drenaje, marca Pavco sin cubrimiento. Para el diseño del drenaje se utilizó el método de Hooghoudt, teniendo en cuenta una intensidad estimada de $0.0598 \text{ m.día}^{-1}$, de acuerdo a la máxima precipitación presentada en los últimos 30 años en el C.I. Tibaitatá.

El diseño final que se implementó es un sistema de tuberías de diámetro 6.35 cm (2,5 pulgadas) con una longitud de 105.0 m y una pendiente de drenaje de 0.015, paralelo al canal de suministro que drena a un pequeño canal en tierra el cual es perpendicular al de suministro. La separación definitiva entre drenes fue de 25 m.

3.3.3 Diseño estadístico

De acuerdo al análisis estadístico del experimento de Hanks et al., (1976) propuesto por Johnson et al., (1983), se definieron dos experimentos independientes, uno para Avena Forrajera y el otro para pasto Raigrás, lo que facilita dosificaciones de riego independientes. Los experimentos se montaron de acuerdo al esquema presentado en la Figura 3.4 en la cual se presenta un diseño para cuatro experimentos individuales, de los cuales se utilizaron dos de ellos simultáneamente. En cada uno de estos se distinguen unidades experimentales de 27.5 m^2 . Cada uno de los experimentos está dispuesto en dos mitades Norte y Sur, cruzadas por la línea de riego de aspersores

separados estratégicamente con el fin de que alcancen el traslape adecuado de manera que produzcan un techo hídrico a dos aguas homogéneo (Figura 3.3), generando seis (6) niveles que constituyen los tratamientos, incluido el último al cual no le alcanza a llegar agua y que corresponderá al nivel de cero (testigo absoluto, sólo con lluvia). Esto hace que en las franjas paralelas a la tubería de riego sean ubicados los tratamientos. Perpendicular al lateral de riego se diseñaron franjas de 10 m de largo, dentro de las cuales van aleatorizadas las repeticiones.

En general, el resumen del diseño estadístico es el siguiente:

Diseño Experimental: Bloques completos al azar en el cual los niveles de riego no pueden ser aleatorizados. Johnson et al., (1983).

Los tratamientos fueron: Seis (6) niveles de riego que inician con un agotamiento desde 0.2 hasta el máximo alcanzado cercano al agua aprovechable total.

Nivel de riego 1 (N1): (Nivel Máximo) nivel de agotamiento del 20% aprox

Nivel de riego 2 (N2): (Nivel Alto) nivel de agotamiento del 40% aprox

Nivel de riego 3 (N3): (Nivel Medio) nivel de agotamiento del 50% aprox

Nivel de riego 4 (N4): (Nivel Bajo) nivel de agotamiento del 60% aprox

Nivel de riego 5 (N5): (Nivel Mínimo) nivel de agotamiento del 80% aprox

Nivel de riego 6 (N6): (Nivel Testigo) Sin riego, sólo la precipitación ocurrida

Materiales: Dos (2) (Raigrás, y Avena Forrajera) (cada material para un área de 1320 m²)

Por cada tratamiento se manejaron cuatro repeticiones en cada una de las dos mitades Norte y Sur por lo cual se tienen ocho repeticiones por tratamiento. Para un total de 48 unidades experimentales por experimento.

En donde la variable independiente es la lámina aplicada que genera un nivel de humedad del suelo. Se realizó el balance hídrico diario, y se determinó la evapotranspiración real por unidad experimental obteniendo K_{cb} , K_e , y K_c por el método descrito en el numeral 3.5.2.

Las variables dependientes fueron: el forraje, la producción de biomasa como materia seca, la altura de planta y la cosecha en el caso de Avena forrajera.

Además se tomó el desarrollo de la cobertura del dosel con frecuencia de dos veces por semana, la profundidad de las raíces con calicatas de observación, la humedad del suelo cada dos días, y se supervisaron los elementos climáticos mencionados previamente.

Desde el punto de vista agronómico se supervisaron los estados fenológicos y el desarrollo de los cultivos, se tomaron las fechas de los inicios de los estados fenológicos.

3.3.4 Procedimientos de campo

Para la implementación de la metodología usada inicialmente se desarrollaron las siguientes actividades:

-Pruebas para la caracterización de los suelos, Muestreos: químico, físico, e hidrodinámico. (Campo y laboratorio)

3.3.4.1 Análisis químicos y fertilización

Con el fin de garantizar que los cultivos no tuvieran limitaciones de nutrientes del suelo para los experimentos de campo fue necesario realizar los análisis químicos del suelo, por lo cual se hizo el respectivo muestreo de suelos (Figura 3.7) que posteriormente se llevó para efectuar los análisis completos de macro y micronutrientes, el cual fue realizado en los laboratorios de Química de Suelos del C.I. Tibaitatá Corpoica, los análisis realizados fueron: Materia Orgánica (%), Fósforo (mg.kg^{-1}), Azufre (mg.kg^{-1}), Calcio (cmol+.kg^{-1}), Magnesio (cmol+.kg^{-1}), Potasio (cmol+.kg^{-1}), Hierro (mg.kg^{-1}), Cobre (mg.kg^{-1}), Manganeso (mg.kg^{-1}), Zinc (mg.kg^{-1}), Boro (mg.kg^{-1}) con base en estos resultados y teniendo en cuenta los niveles requeridos por las especies estudiadas de acuerdo a información secundaria Corpoica, (2005); Monómeros Colombo Venezolanos, (1988); y Guerrero,(1972) se estableció el nivel de fertilización requerido.



Figura 3.7 Toma de muestras para los análisis de química de suelos.

Para saber la cantidad y las fuentes de fertilizantes que se usaron, se tomó una muestra de suelo en el lote experimental de acuerdo al protocolo establecido, Corpoica (2005). Se determinaron los análisis completos de macro y micronutrientes, el cual fue realizado en los laboratorios de Química de Suelos de Corpoica, en el C.I. Tibaitatá, los resultados se presentan en el capítulo de resultados. “Análisis químicos de suelos”. Con base en esta información se obtuvieron los contenidos de nutrientes de los lotes experimentales considerando las características físicas (densidad aparente y profundidad radical) con el propósito de calcular el contenido de nutrientes en kilogramos por hectárea.

Tabla 3.2 Requerimientos nutricionales en Kg.ha⁻¹ de las especies estudiadas.

Cultivo	Requerimientos de Nutrientes (Kg.ha ⁻¹)						
	N	P	K	Ca	S	P ₂ O ₅	K ₂ O
Avena*	80	15	90	17	20	34,35	108
Raigrás**	432	83	694			109,92	48

* Guerrero, R. (1972) Fertilidad de suelos diagnóstico y control. Pag 243. (Kg.ha⁻¹cosecha⁻¹)

**Corpoica. Manual técnico. Producción y utilización de recursos forrajeros en sistemas de producción bovina de las regiones Caribe y Valles Interandinos. Bogotá. Colombia. 2005. Pag 11.

Se tuvo en cuenta las necesidades nutricionales de los cultivos a establecer de acuerdo a sus estructuras vegetales y condiciones de adaptabilidad y desarrollo en el agroclima que se trabajó, por lo cual se presenta la Tabla 3.2 que muestra los niveles de requerimientos nutricionales de los cultivos estudiados de acuerdo a fuentes secundarias consultadas como es el caso del “Manual técnico de producción y utilización de los recursos forrajeros en sistemas de producción bovina de las regiones Caribe y Valles Interandinos”, de Corpoica, (2005).



Figura 3.8 Aplicación de fertilizantes y establecimiento de las especies.

Luego se desarrolló un análisis de oferta – demanda de nutrientes en el suelo experimental llegando a la conclusión de que el área experimental tiene una

muy buena disponibilidad de nutrientes; sin embargo, se recomendó una fertilización de mantenimiento, consistente en un fertilizante compuesto como el triple quince (15-15-15) y una aplicación de sulfato de magnesio adicional. En el lote, correspondiente al cultivo de avena forrajera a una dosis equivalente a 150 kg.ha^{-1} . En el lote correspondiente a raigrás, además de la dosis equivalente se fertilizó con una dosis de 8 kg.ha^{-1} de bórax.

Para lograr una mayor homogeneidad en la aplicación del fertilizante se calculó la cantidad a aplicar por el área de cada una de las sub-parcelas o unidades experimentales de las especies forrajeras y se aplicó al voleo antes de la siembra, Figura 3.8.

Otro de los aspectos que se tuvo en cuenta para el proceso de irrigación de los ensayos es la salinidad del suelo, pues a mayor salinidad hay un incremento en la presión osmótica, por lo tanto el agua es retenida con mayor presión en la matriz del suelo. Por esta razón se incluyó un análisis de salinidad, el cual se presenta en el capítulo de resultados. También se realizó el análisis de la acidez activa y acidez intercambiable con el fin de poder dar recomendaciones en caso de que fuera necesario aplicar alguna enmienda (Cales).

3.3.4.2 Análisis físicos

Se hicieron cuatro tipos de análisis físicos de suelos: densidad aparente, curva de retención de humedad, (capacidad de campo, punto de marchitez permanente, y porcentaje de saturación del suelo) determinación de la infiltración de agua en el suelo, y conductividad hidráulica saturada.

3.3.4.2.1 Densidad aparente

En primer lugar se determinó la densidad aparente del lote ubicando seis puntos de muestreo, tres puntos para cada especie, a dos profundidades de 0 a 30 cm y de 30 a 60 cm, La importancia de esta característica física del suelo es que hace parte de la información que debe tenerse en cuenta para el cálculo de las láminas de riego y para expresar el contenido de humedad del suelo en forma volumétrica, además es una variable de entrada en el modelo AquaCrop.

Se realizó la determinación de las texturas para cada uno de los lotes, resultando que, para los lotes en que se establecieron tanto raigrás como avena forrajera la textura es franco limosa (FL).

3.3.4.2 Retención de humedad

El siguiente aspecto que hay que tener en cuenta es la capacidad de almacenamiento del agua, la cual se determinó mediante la curva de retención de humedad del suelo, obtenida en laboratorio con el método de Richards, (1931) por medio del cual se establecieron los puntos de Capacidad de Campo, Marchitez Permanente, y porcentaje de saturación, con el fin de obtener el nivel de agua aprovechable o disponible en el suelo, ver Figura 3.9.

Para cada una de las muestras se realizó un análisis de los resultados por ajustes de regresión por mínimos cuadrados con el objeto de determinar la curva de retención típica para observar el proceso de humedecimiento y pérdida de agua en las dos profundidades de suelo de 0 a 30 cm y de 30 a 60 cm. El análisis completo se presenta en el capítulo de resultados, 5.2.2 Análisis físicos e hidrodinámicos”.



Figura 3.9 Toma de muestras inalteradas para los análisis de física de suelos.

Debido a que los suelos de los experimentos tienen altos contenidos de materia orgánica y cenizas volcánicas, fue necesario hacer la determinación adicional del punto de marchitez permanente por el método del girasol, Cabazos y Rodríguez, (1992).

3.3.4.2.3 Infiltración del suelo

Una de las pruebas importantes para el diseño óptimo del sistema de riego y para la determinación del movimiento del agua en el suelo es la Infiltración del suelo, esta es imprescindible para observar la rapidez con que el suelo admite el agua en los espacios porosos y eventualmente se satura o drena, en la medida que los aspersores superen el valor de la infiltración básica, se

presentan problemas de encharcamiento por lo cual sería necesario rediseñar el aspersor.

La prueba infiltración fue realizada con base en la metodología de los anillos concéntricos y se calculó la “infiltración básica” por medio del modelo de Kostiakov expresado en 1932, la ecuación citada por Taylor y Ashcroft, (1972) responde a la siguiente forma:

$$i = c' t^{\alpha} \quad [3.1]$$

Dónde: i = Volumen de agua infiltrada en una unidad sección transversal (cm);
 t = Tiempo (minutos); c' y α = Parámetros que dependen del suelo y sus características físicas.

Para períodos de tiempo relativamente cortos y en condiciones de campo la ecuación se cumple bastante bien, Taylor y Ashcroft, (1972).

3.3.4.3.4 Conductividad hidráulica saturada

Para la prueba de conductividad hidráulica saturada se tomaron adicionalmente doce muestras inalteradas de suelo a dos profundidades de 0 a 30 cm y de 30 a 60 cm (Figura 3.9) en seis puntos del lote experimental tres para cada cultivo o especie. Estas muestras se llevaron al laboratorio y se determinó la conductividad hidráulica saturada por el método de cabeza constante, Reynolds et al., (2002).

Tanto los resultados de infiltración como de conductividad hidráulica saturada se presentan en el capítulo de resultados y discusión 5.2.2 Análisis físicos e hidrodinámicos.

3.3.4.3.5 Humedad del suelo y calibración del TDR

El TDR (Time Domain Reflectometry) es un instrumento de medición indirecta de la humedad del suelo que opera por el método de reflectometría de dominio de tiempo.

El sistema se basa en la medición de la velocidad de un pulso electromagnético transmitido en el suelo, que emplea frecuencias de 1 a 5 GHz, considerando que la constante dieléctrica del suelo seco, es mucho menor (3 a 5) que la del agua (81), siendo la del aire cercana a 1.

Para determinar los contenidos de humedad en todas y cada una de las unidades experimentales se probaron diferentes métodos, pero después de realizar un análisis respecto a cada método posible, se optó por emplear dos métodos en forma paralela.

El primero fue el uso del TDR para el cual se realiza la lectura por medio de una sonda que es insertada en el suelo como lo muestra la Figura 3.10.

Para el segundo procedimiento se usó el método termo-gravimétrico, realizando el cálculo como lo indica la ecuación [3.2], dónde a partir del peso seco del suelo y del peso de cada muestra (caja metálica) se determinó cual fue la cantidad de agua contenida en cada unidad experimental y por ende su contenido de humedad gravimétrico.

Con el objeto de obtener una mejor información acerca del funcionamiento del aparato, se realizó la calibración del TDR a campo abierto.

Con el TDR se realizaron lecturas de humedad en campo e inmediatamente después se tomaron muestras de suelo para determinar la humedad por el método termo - gravimétrico y la densidad aparente por el método del cilindro de volumen conocido. Los muestreos se realizaron en el lote de ubicación del experimento en el C.I. Tibaitatá (Corpoica), y con diferentes contenidos de humedad.



Figura 3.10 Control de humedad del suelo empleando el TDR.

$$\theta_w = \frac{P_w - P_{SS}}{P_{SS}} * 100 \quad [3.2]$$

Dónde: θ_w : Contenido de humedad gravimétrico, (%); P_w : Peso de suelo húmedo. (g); P_{ss} : Peso del suelo seco. (g).

A partir de los datos de humedad del TDR y del método termo-gravimétrico se hizo un análisis de regresión para observar la precisión del aparato y los rangos a los cuales es conveniente usar el equipo.

3.4 Instalación de los experimentos en campo

Para la instalación de los experimentos de campo fue necesario realizar inicialmente actividades previas, las cuales fueron: limpieza del lote, canales de suministro de agua y desarenador, topografía detallada con planimetría y altimetría, con el fin hacer los diseños e instalación de los sistema de riego y de drenaje, mencionados previamente.

El establecimiento de las praderas se realizó según diseño experimental propuesto, como se ilustra en la Figura 3.11, los muestreos A y B hacen referencia a las unidades experimentales que se muestrean por día intermedio, para la observación de la humedad del suelo.

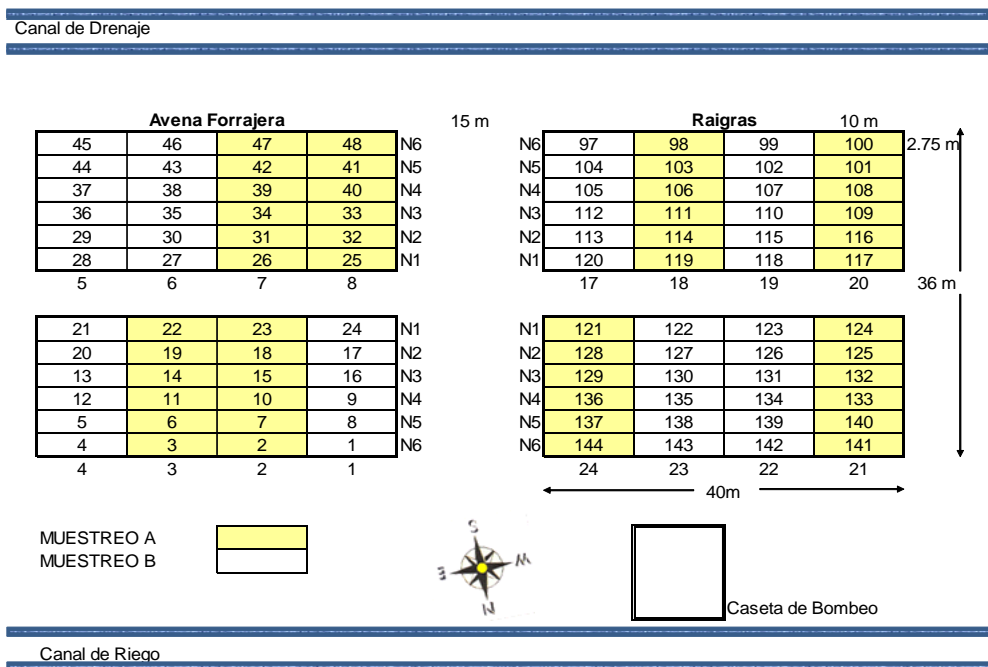


Figura 3.11 Distribución de las especies según el diseño experimental.

3.4.1 Experimentos realizados

Para el desarrollo de los experimentos de gradiente en el presente trabajo se establecieron cuatro ciclos de cultivo completos de avena forrajera y dos para raigrás, debido a que este último cultivo es de ciclo indeterminado se realizaron varios cortes durante los dos cultivos establecidos.

Para los experimentos de estrés hídrico se hicieron ensayos preliminares y luego un ciclo completo para avena forrajera y para raigrás un ensayo de siembra a primer corte y otro del primer corte al segundo.

Los experimentos se establecieron dentro de las temporadas en las campañas de los años desde 2008 hasta 2013, como se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Experimentos desarrollados dentro del presente trabajo. C.I. Tibaitatá, (Sabana de Bogotá, Colombia).

Tipo	No.	Cultivo	Ciclo	Campaña	Fecha Siembra	Fecha Final ciclo
Experimentos de Gradiente	1	Avena Forrajera	Completo	2009	21/01/2009	15/05/2009
	2	Avena Forrajera	Completo	2009	26/05/2009	18/09/2009
	3	Avena Forrajera	Completo	2009/2010	14/10/2009	26/02/2010
	4	Avena Forrajera	Completo	2010	18/03/2010	19/07/2010
	5	Raigrás	Siembra a 1er Corte	2008/2009	19/12/2008	23/03/2009
	6	Raigrás	1er a 2do Cortes	2009	24/03/2009	14/03/2009
	7	Raigrás	2do a 3er Cortes	2009	07/05/2009	07/07/2009
	8	Raigrás	3er a 4to Cortes	2009	01/07/2009	30/09/2009
	9	Raigrás	4to a 5to Cortes	2009	14/09/2009	14/11/2009
	10	Raigrás	5to a 6to Cortes	2009	05/11/2009	26/12/2009
	11	Raigrás	6to a 7mo Cortes	2009/2010	18/12/2009	07/02/2011
	12	Raigrás	Siembra a 1er Corte	2010	10/02/2010	14/05/2010
	13	Raigrás	1er a 2do Cortes	2010	15/05/2010	05/07/2010
	14	Raigrás	2do a 3er Cortes	2010	08/07/2010	07/09/2010
	15	Raigrás	3er a Senescencia	2010/2011	26/08/2010	03/01/2011
Estrés hídrico	16	Raigrás y Avena	Preliminares Estrés	2012	02/04/2012	08/08/2012
	19	Avena Forrajera	Completo	2012	15/08/2012	20/12/2012
	17	Raigrás	Siembra a 1er Corte	2012	15/08/2012	28/11/2012
	18	Raigrás	1er a 2do Cortes	2012/2013	28/11/2012	30/01/2013

3.4.2 Siembra de raigrás (*Lolium perenne*)

Se empleó semilla de Raigrás variedad *Bestfor Plus* con una densidad de siembra equivalente a de 50 kg.ha⁻¹. La cantidad total de semilla empleada en el área experimental de 1320 m² fue 6.6 kg. El sistema de siembra se realizó al voleo y a mano y la semilla se cubrió con una capa ligera de suelo. Posterior a la siembra se aplicó un riego con el objetivo de uniformizar la humedad del suelo en toda el área experimental y facilitar la germinación de

la semilla. Figura 3.12. Se realizaron dos (2) cultivos consecutivos con varios cortes cada uno.



Figura 3.12 Pradera establecida en raigrás.

3.4.3 Siembra de avena forrajera (*Avena sativa*)

Para la siembra se empleó la variedad Cayuse con una densidad de siembra equivalente a $80 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. La cantidad total de semilla utilizada en el área experimental fue 10.56 kg. El sistema de siembra se realizó en hileras separadas 0.30 m, y se colocó la semilla en forma manual cubriendo luego con una capa ligera de suelo. Posterior a la siembra se aplicó un riego para uniformizar la humedad del suelo en toda el área experimental y facilitar la germinación de la semilla. Se establecieron cuatro (4) cultivos consecutivos. Figura 3.12.



Figura 3.13 Cultivo de avena forrajera establecido.

3.5 Toma de información en campo y sistematización

3.5.1 Variables previstas

De acuerdo al diseño experimental (numeral 3.3.3) se hicieron los muestreos establecidos en cada unidad experimental. A continuación se detallan las variables experimentales considerando las fuentes de variación y las variables respuesta.

La humedad del suelo (%Grav) se determinó con muestreos por el método termo gravimétrico y TDR (Ka) cada dos días excepto los fines de semana. Debido a la cantidad de unidades experimentales se distribuyó la toma de muestras de suelo para los balances hídricos en dos sesiones, cada una a realizar en días consecutivos. (Figura 3.11: muestreos A y B).

Las variables climáticas fueron obtenidas de la estación agrometeorológica del IDEAM emplazada contigua al lote experimental. La decisión de riego se tomó con base en que el nivel de agotamiento de la humedad promedio presente en los niveles uno (1) cuando fuera igual o superior al 20%.

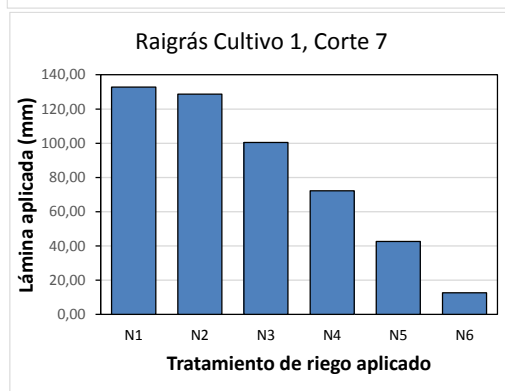
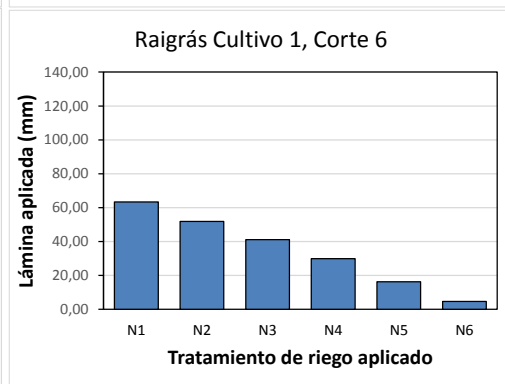
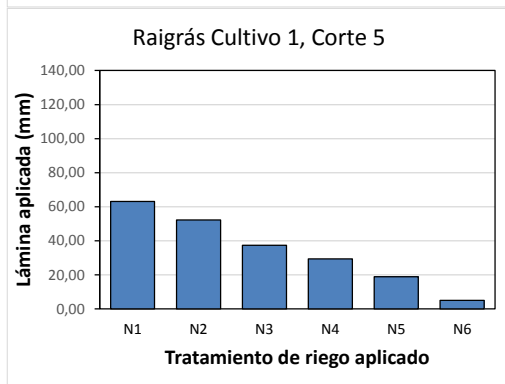
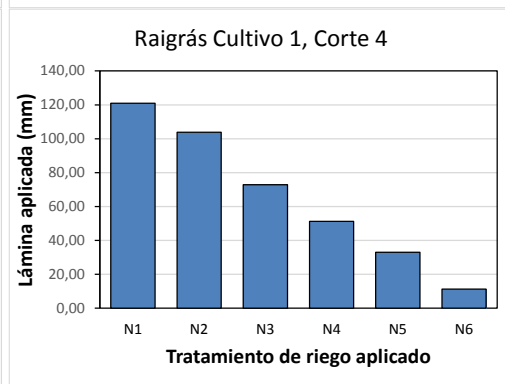
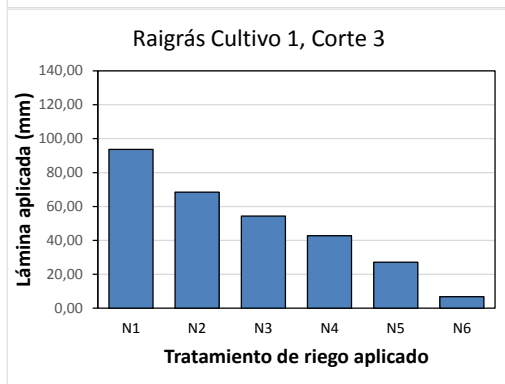
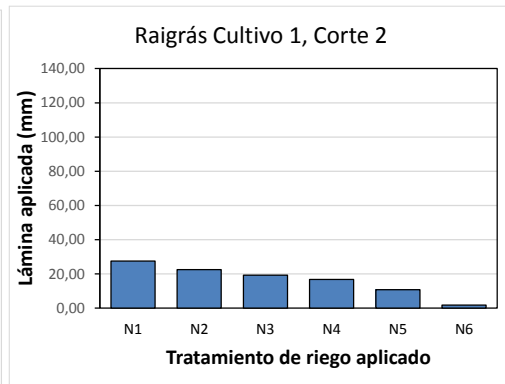
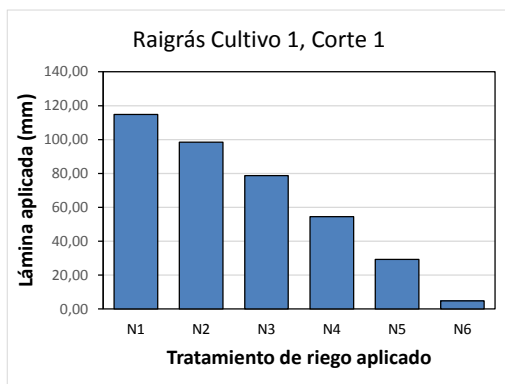


Figura 3.14 Láminas aplicadas en los experimentos de gradiente de riego para el primer cultivo de raigrás. Cortes 1 a 7.

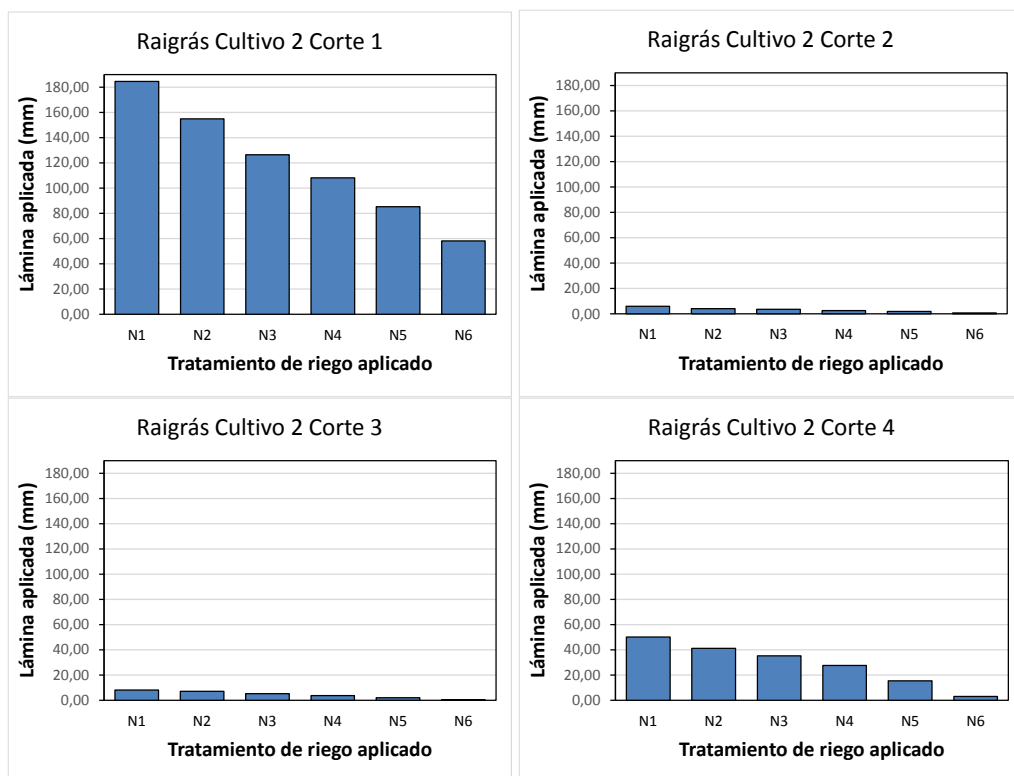


Figura 3.15 Láminas aplicadas en los experimentos de gradiente de riego para el segundo cultivo de raigrás. Cortes 1 a 4.

Después del riego se tomó la lámina aplicada (mm) y se realizó el balance hídrico en cada unidad experimental, llevando la contabilización de las variables mencionadas en el apartado 3.5.2

Las gráficas de las figuras 3.14 y 3.15 presentan las láminas totales por tratamiento aplicadas a cada uno de los ciclos completos y cortes del cultivo de raigrás, hay que recordar que la variabilidad de los rangos aplicados entre cortes se debe a que la decisión de riego depende del nivel de agotamiento.

En la medida en que el nivel de agotamiento no supere el 20% de AAT el riego no se aplicará, pues el suelo estará en un nivel cercano a la capacidad de campo. Por esta razón en los cultivos 2, cortes 2 y 3 el riego fue muy limitado, pues los niveles de lluvia mantuvieron humedecido el suelo.

La lámina de agua constituye la variable independiente que genera respuestas tanto en el suelo como en el cultivo, en el suelo se obtiene la humedad diaria, la cual genera el desarrollo del cultivo y como variables respuesta se determinan el forraje verde ($\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), biomasa como materia seca ($\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), la altura de plantas (m). Esta información se tomó varias veces a través del ciclo del cultivo con el fin de construir las curvas de biomasa.

Por medio de calicatas ubicadas en los diferentes niveles se midió la profundidad de raíces (m) y con fotografía cenital tomada en cada unidad experimental con una frecuencia de 2 veces por semana se determinó la cobertura vegetal (%).

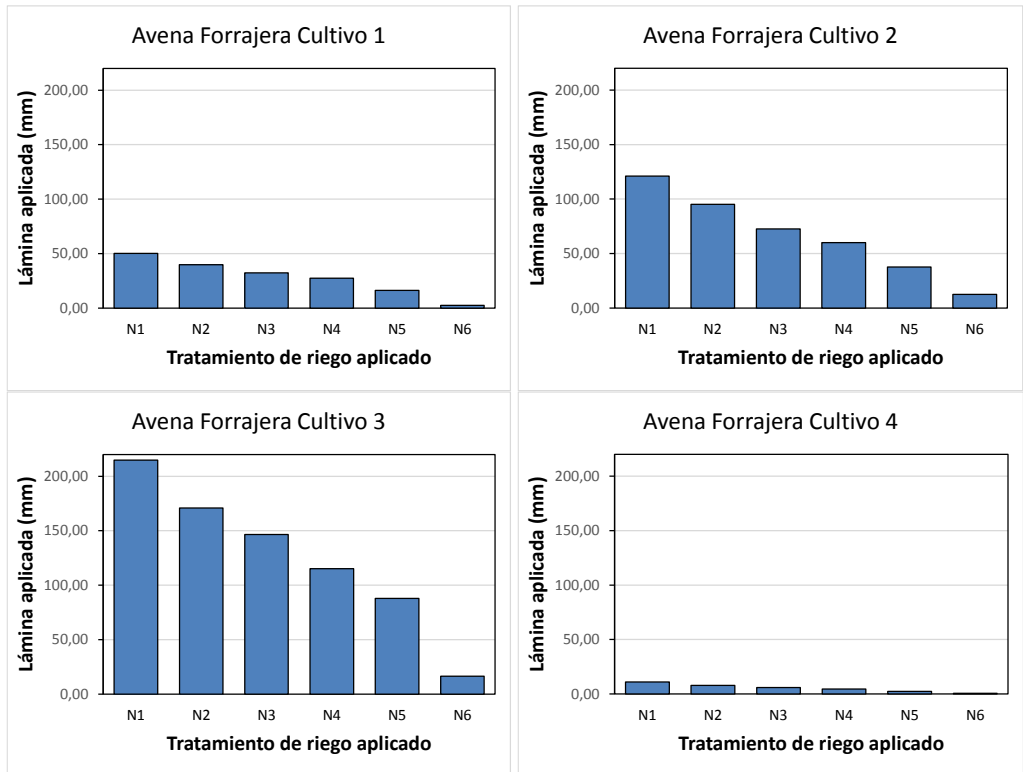


Figura 3.16 Láminas aplicadas en los experimentos de gradiente de riego para los cuatro cultivos de avena forrajera.

La Figura 3.16 presenta las láminas totales aplicadas a los ciclos completos de los cultivos de avena forrajera, las figuras de los cultivos 2 y 3 muestran que para estos cultivos los niveles de gradiente fueron importantes. Mientras que para los cultivos 1 y 4 los gradientes no fueron notorios, esto se va a ver reflejado en las bajas diferencias entre los niveles de biomasa alcanzados entre los tratamientos.

Por medio de calicatas ubicadas en los diferentes niveles se midió la profundidad de raíces (m) y con fotografía cenital tomada en cada unidad experimental con una frecuencia de 2 veces por semana se determinó la cobertura vegetal (%).

Se tomó las fechas de los estados fenológicos de los cultivos, además se llevó una bitácora diaria en donde se consignaron las labores agrícolas realizadas a los cultivos.

3.5.2 Evapotranspiración de referencia

El primer aspecto fundamental en el proceso de experimentación que se determinó con base en el comportamiento del clima fue la evapotranspiración de referencia, evaluada con base en la fórmula de Penman – Monteith, Allen et al., (1998).

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad [3.3]$$

Dónde: ET_0 : Evapotranspiración de referencia (mm.día^{-1}); R_n : Radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$); R_a : Radiación extraterrestre (mm.día^{-1}); G : Flujo de calor del suelo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$); T : Temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$); u_2 : Velocidad del viento a 2 m de altura (m.s^{-1}); e_s : Presión de vapor de saturación (kPa); e_a : Presión de vapor real (kPa); $e_s - e_a$: Déficit de presión de vapor (kPa); Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ : Constante psicrométrica ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$).

3.5.3 Balance hídrico y cálculo de Kc, Kcb y Ke

Para la determinación de la evapotranspiración real del cultivo se tuvo en cuenta la ecuación del balance hídrico [3.4], la cual es la base para la determinación en campo de los coeficientes del cultivo:

$$\Delta W = P + R - ET - Ev + Ac - Pp \pm Es \pm Fl + D \quad [3.4]$$

El cambio de humedad del suelo en cada unidad experimental está dado por ΔW , el cual es determinado por el balance hídrico, dado por la precipitación (P), el riego aplicado (R), la evaporación del suelo (Ev), la transpiración del Cultivo (Et), la percolación profunda (Pp), la escorrentía superficial (Es), los flujos laterales (Fl) y el almacenamiento superficial por desnivel del terreno ó encharcamiento (D).

Con base en la metodología planteada se tomaron las humedades cada dos días en cada unidad experimental a una profundidad de 0 a 30 cm, por el método termogravimétrico y con un equipo TDR. Se realizó el balance hídrico de cada unidad experimental para determinar la evapotranspiración asumiendo una escorrentía superficial insignificante y evaluando la

percolación profunda como el agua superior al punto de CC en la zona de raíces.

La ecuación de balance hídrico Allen et al., (1998) aplicada para el cálculo de la evapotranspiración queda como:

$$ET_i = SW_{i-1} - SW_i + P_i + R_i - Pp_i \quad [3.5]$$

Dónde: ET_i : evapotranspiración del período i , [mm]; SW_{i-1} : almacenamiento de agua en la zona radical para el período anterior, [mm]; SW_i : almacenamiento de agua en la zona radical para el período actual, [mm]; P_i : precipitación actual, [mm]; R_i : riego actual, [mm]; y Pp_i : percolación profunda, [mm].

Una vez calculada la evapotranspiración de referencia Eto_i por el método de Penman- Monteith, Allen et al., (1998) y la real a través del ciclo del cultivo se puede determinar el coeficiente de evapotranspiración del cultivo (Kc , (Adim.)) de la forma:

$$Kc_i = ETc_i / ET_{0,i} \quad [3.6]$$

El tiempo t_i que se manejó en los experimentos fue de un día.

La supervisión periódica de la cobertura vegetal ya sea en forma de índice de área foliar (IAF) o porcentaje de cobertura del suelo permite hacer la diferenciación del Kcb , el Ke con base en el Kc , para lo cual se relaciona el desarrollo del dosel con el Kcb y se sustrae del Kc para obtener el Ke . Para el presente trabajo se determinó la cobertura del dosel por medio de fotografía tomada en cada unidad experimental dos veces por semana y del porcentaje de cobertura evaluada por medio del programa *CobCal*. Ferrari et al., (2009).

Para la determinación de las principales variables y parámetros del modelo AquaCrop (FAO), Steduto et al., (2009), se trabajó con la metodología propuesta por Hanks et al., (1974). Con la cual se puede generar un gradiente de riego en el campo experimental. Dicho gradiente es la forma ideal para generar varios niveles de riego y por lo tanto varios niveles de agotamiento que a su vez generan un gradiente de producciones y desarrollos del material experimental, de acuerdo a las restricciones hídricas establecidas. Los niveles sin restricciones de humedad se usaron para la determinación de la evapotranspiración real del cultivo. Las restricciones se pueden manejar como láminas de riego de diferentes intensidades que tienen directa incidencia a los desarrollos de los sistemas estructurales de la planta de acuerdo al nivel de irrigación.

3.5.4 Metodología del riego

De acuerdo al nivel de agotamiento planeado (0.2) en el nivel uno (nivel de máxima humedad permanente) se planea el riego para garantizar que la humedad presente sea óptima. Por lo cual la decisión de riego se toma bajo este criterio.

Tabla 3.4 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 de Avena forrajera.

Avena Forrajera, Cultivo 1							
DDS	Fecha Riego	Lámina aplicada (mm)					
		Tratamientos Niveles					
Siembra	21/01/2009	N1	N2	N3	N4	N5	N6
22	12/02/2009	3.66	2.60	2.22	1.27	0.86	0.14
29	19/02/2009	6.51	5.46	4.45	3.92	2.50	0.38
35	25/02/2009	9.84	8.02	6.87	5.17	3.43	0.63
48	10/03/2009	5.96	4.73	3.56	3.21	1.89	0.64
49	11/03/2009	7.28	5.60	4.42	3.68	2.66	0.25
50	12/03/2009	2.71	2.15	1.71	1.50	1.14	0.00
91	22/04/2009	2.77	2.02	1.63	1.47	0.90	0.00
97	28/04/2009	5.37	4.80	3.48	3.73	0.88	0.00
98	29/04/2009	4.30	2.89	2.45	2.29	0.92	0.00
110	11/05/2009	1.82	1.52	1.45	1.24	0.95	0.49
114	15/05/2009	Cosecha					

Previamente al riego se instala en cada unidad experimental un recipiente con el área de su boca aforada para observar la lámina aplicada por riego en cada unidad experimental, de esta forma se tiene exactamente el registro de la lámina aplicada a través del tiempo.

El sistema de riego está diseñado en forma apropiada para las condiciones del terreno y teniendo en cuenta la retención de humedad del suelo, por lo cual se sabe cuánta agua (lámina) se aplica en un tiempo determinado. Como la humedad anterior es conocida se puede calcular el nivel de riego requerido y con base en este se determina el tiempo de riego que debe permanecer el equipo en funcionamiento.

Una vez se ha regado se recoge cada recipiente ubicado en la correspondiente unidad experimental y se mide la lámina regada con una probeta, posteriormente se anota la matriz regada en el formato correspondiente. Se tienen libros de cálculo programados tanto para acopiar la información de campo, como para hacer los cálculos requeridos, de humedad del suelo, riego, y todos los vectores de las ecuaciones [3.5 y 3.6]

Tabla 3.5 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 2 de Avena forrajera.

Avena Forrajera, Cultivo 2							
DDS	Fecha Riego	Lámina aplicada (mm)					
		Tratamientos Niveles					
Siembra	26/05/2009	N1	N2	N3	N4	N5	N6
6	01/06/2009	9.69	9.01	4.35	3.32	2.06	1.54
7	02/06/2009	9.54	9.01	3.46	2.82	1.95	0.97
23	18/06/2009	6.46	5.50	4.02	3.28	1.92	0.40
24	19/06/2009	10.55	7.77	7.30	5.23	4.34	0.11
31	26/06/2009	7.59	4.43	3.92	2.49	1.82	0.67
35	30/06/2009	7.49	5.81	5.05	3.75	2.25	1.45
36	01/07/2009	9.93	8.05	6.76	5.09	2.84	1.31
58	23/07/2009	5.34	4.06	3.38	3.36	2.34	0.92
64	29/07/2009	9.12	6.62	4.66	2.96	2.72	1.75
65	30/07/2009	5.99	4.66	4.67	3.91	2.54	0.39
69	03/08/2009	1.79	1.54	1.42	1.20	0.82	0.08
71	05/08/2009	6.31	5.00	4.30	3.17	1.88	0.64
72	06/08/2009	7.62	5.59	5.62	4.70	3.75	0.56
92	26/08/2009	2.89	2.79	1.82	2.22	0.95	0.17
93	27/08/2009	2.60	1.92	1.17	1.40	0.46	0.04
98	01/09/2009	2.00	1.89	1.18	1.50	0.95	0.19
99	02/09/2009	4.36	3.60	3.64	3.39	1.63	0.44
106	09/09/2009	4.84	3.60	2.84	2.84	1.07	0.32
111	14/09/2009	7.01	4.28	3.11	3.43	1.40	0.54
115	18/09/2009	Cosecha					

Las Tablas 3.4 a 3.7 presentan las láminas captadas en los diferentes niveles experimentales para los experimentos de gradiente de riego en los cuatro cultivos de avena forrajera realizados. En ellas se detallan los promedios de los tratamientos de cada nivel (Ni).

De forma similar las Tablas 3.8 a 3.18 presentan el resumen de las láminas de riego aplicadas en los diferentes niveles de riego durante los experimentos de gradiente para raigrás, se presentan un total de siete cortes para el primer cultivo y cuatro cortes para el segundo cultivo. Es importante anotar que para el cultivo 2 corte 3 no se aplicó el riego por gradiente debido a que los altos niveles de precipitación no dejaron bajar las humedades de riego por debajo del nivel de agotamiento requerido para el riego. (NA > 20%).

Para todos los casos cada nivel muestra el promedio de las láminas captadas de las ocho unidades experimentales.

Tabla 3.6 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 3 de Avena forrajera.

Avena Forrajera, Cultivo 3							
DDS	Fecha Riego	Lámina aplicada (mm)					
		Tratamientos Niveles					
Siembra	14/10/2009	N1	N2	N3	N4	N5	N6
15	29/10/2009	4.67	3.98	3.21	2.32	1.08	0.07
16	30/10/2009	5.07	4.31	3.29	2.18	1.07	0.14
28	11/11/2009	7.62	6.45	4.95	3.81	2.20	0.24
29	12/11/2009	8.24	6.64	4.87	3.81	2.38	0.35
30	13/11/2009	7.53	6.83	5.62	4.45	2.70	0.44
41	24/11/2009	4.75	4.11	3.59	2.77	1.89	0.39
49	02/12/2009	7.90	5.81	4.91	3.50	2.72	1.10
50	03/12/2009	7.30	5.56	4.89	3.89	2.95	0.24
51	04/12/2009	3.50	2.36	2.27	1.61	1.13	0.32
56	09/12/2009	6.19	3.81	4.07	2.79	2.29	0.50
61	14/12/2009	5.35	4.57	3.49	2.93	1.90	0.49
62	15/12/2009	13.28	5.28	4.68	3.52	2.53	0.33
63	16/12/2009	14.05	12.19	10.73	9.41	7.37	1.27
65	18/12/2009	7.67	6.39	5.06	4.25	3.68	0.90
75	28/12/2009	10.75	8.77	8.87	6.44	4.71	1.13
83	05/01/2010	5.74	4.18	3.43	2.88	1.97	0.33
85	07/01/2010	9.94	8.49	7.48	4.68	3.95	0.53
92	14/01/2010	10.82	11.11	8.56	7.10	6.58	0.93
96	18/01/2010	7.31	5.30	4.92	3.66	2.71	0.76
97	19/01/2010	4.62	2.95	2.54	2.14	1.77	0.28
100	22/01/2010	3.52	2.36	2.04	1.75	1.81	0.19
105	27/01/2010	4.13	2.77	3.00	2.39	1.67	0.56
109	31/01/2010	14.82	12.86	11.32	9.92	7.77	1.33
111	02/02/2010	12.55	10.89	9.58	8.40	6.58	1.13
114	05/02/2010	3.07	2.42	2.11	1.85	1.45	0.19
118	09/02/2010	14.75	12.29	9.73	8.18	7.08	1.74
121	12/02/2010	9.67	8.26	7.28	4.56	3.84	0.51
135	26/02/2010	Cosecha					

Tabla 3.7 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 4 de Avena forrajera.

Avena Forrajera, Cultivo 4							
DDS	Fecha Riego	Lámina aplicada (mm)					
		Tratamientos Niveles					
Siembra	18/03/2010	N1	N2	N3	N4	N5	N6
8	26/03/2010	4.34	3.42	2.79	2.24	1.15	0.14
11	29/03/2010	6.62	4.49	3.09	2.35	1.28	0.38
123	19/07/2010	Cosecha					

Tabla 3.8 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 corte 1 de raigrás.

Raigrás, Cultivo 1 Corte 1							
DDS	Fecha Riego	Lámina aplicada (mm)					
		Tratamientos Niveles					
Siembra	19/12/2008	N1	N2	N3	N4	N5	N6
18	06/01/2009	2.92	2.41	2.14	1.40	0.83	0.00
20	08/01/2009	6.24	5.06	4.09	2.68	1.03	0.11
21	09/01/2009	4.91	4.20	3.46	2.55	1.53	0.13
27	15/01/2009	6.89	5.99	4.34	2.79	1.24	0.15
35	23/01/2009	5.94	5.82	3.83	2.58	2.07	0.35
39	27/01/2009	4.66	3.94	3.04	2.47	1.17	0.18
47	04/02/2009	3.34	2.29	2.21	1.45	1.11	0.06
48	05/02/2009	6.48	4.92	3.79	1.97	1.17	0.65
53	10/02/2009	10.29	7.58	6.18	3.75	1.49	0.15
55	12/02/2009	12.40	10.05	7.90	5.85	4.03	1.53
56	13/02/2009	3.75	3.51	2.64	1.71	0.90	0.13
67	24/02/2009	9.95	8.92	7.27	5.65	2.71	0.43
68	25/02/2009	10.18	9.50	7.69	5.73	2.54	0.11
69	26/02/2009	12.39	11.17	9.52	6.65	3.89	0.43
75	04/03/2009	3.52	2.63	2.02	1.35	0.81	0.25
81	10/03/2009	6.99	6.95	5.76	4.01	1.78	0.00
82	11/03/2009	3.98	3.55	2.91	1.93	1.00	0.15
88	17/03/2009	Fecha de aforo					

Tabla 3.9 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 corte 2 de raigrás.

Raigrás, Cultivo 1 Corte 2							
DDS	Fecha Riego	Lámina aplicada (mm)					
		Tratamientos Niveles					
Corte Uniforme	24/03/2009	N1	N2	N3	N4	N5	N6
6	30/03/2009	3.85	3.57	2.87	2.15	1.24	0.17
34	27/04/2009	2.96	2.88	2.47	1.72	0.74	0.01
35	28/04/2009	8.73	6.28	5.35	5.18	4.45	0.79
36	29/04/2009	8.44	6.52	5.66	5.31	2.29	0.00
37	30/04/2009	3.53	3.23	2.97	2.42	2.07	0.83
43	06/05/2009	Fecha de aforo					

Tabla 3.10 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 corte 3 de raigrás.

Raigrás, Cultivo 1 Corte 3							
DDS	Fecha Riego	Lámina aplicada (mm)					
		Tratamientos Niveles					
Corte Uniforme	07/05/2009	N1	N2	N3	N4	N5	N6
4	11/05/2009	10.95	8.11	7.30	6.52	4.52	0.93
5	12/05/2009	4.66	3.85	3.40	3.23	1.71	0.00
6	13/05/2009	8.03	6.33	5.69	5.34	3.70	1.14
11	18/05/2009	8.94	6.27	5.25	3.61	2.20	0.99
15	22/05/2009	5.12	4.21	3.29	2.03	1.27	0.35
20	27/05/2009	5.31	3.85	3.41	3.04	1.68	0.08
22	29/05/2009	4.67	3.12	2.88	2.41	1.74	0.18
25	01/06/2009	8.09	5.71	4.84	3.53	1.82	0.29
26	02/06/2009	6.69	4.30	2.24	1.11	1.29	0.56
27	03/06/2009	9.01	6.29	4.45	2.99	1.40	0.49
28	04/06/2009	8.41	5.83	3.16	1.69	1.24	1.15
43	19/06/2009	4.32	3.42	3.00	1.98	1.72	0.17
47	23/06/2009	2.53	1.86	1.46	1.09	0.58	0.00
48	24/06/2009	6.95	5.30	3.92	4.15	2.22	0.38
49	25/06/2009	Fecha de aforo					

Tabla 3.11 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 corte 4 de raigrás.

Raigrás, Cultivo 1 Corte 4							
DDS	Fecha Riego	Lámina aplicada (mm)					
		Tratamientos Niveles					
Corte Uniforme	01/07/2009	N1	N2	N3	N4	N5	N6
6	07/07/2009	7.53	6.29	4.51	2.94	1.72	0.54
7	08/07/2009	10.88	8.35	7.04	4.94	3.00	1.17
20	21/07/2009	5.19	3.78	3.33	2.78	1.96	0.68
22	23/07/2009	4.13	3.80	2.97	2.48	1.42	0.44
27	28/07/2009	8.60	6.48	3.36	2.10	1.92	1.04
28	29/07/2009	10.56	7.45	4.50	2.68	1.42	1.24
34	04/08/2009	12.84	10.52	5.79	3.55	2.68	1.53
35	05/08/2009	5.50	4.02	2.61	1.41	1.11	0.53
36	06/08/2009	4.18	3.12	2.63	2.14	1.31	0.46
41	11/08/2009	7.52	6.22	4.54	3.33	2.84	0.78
43	13/08/2009	2.06	1.69	1.38	1.09	0.64	0.21
54	24/08/2009	1.65	1.52	1.07	0.70	0.57	0.10
58	28/08/2009	10.80	8.08	4.34	2.98	2.00	0.95
61	31/08/2009	0.00	7.18	5.52	4.10	2.24	0.47
62	01/09/2009	12.87	10.83	8.39	6.80	3.89	0.42
68	07/09/2009	2.97	2.45	1.52	1.21	0.85	0.29
69	08/09/2009	13.66	12.00	9.30	6.01	3.49	0.49
71	10/09/2009	Fecha de aforo					

Tabla 3.12 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 corte 5 de raigrás.

Raigrás, Cultivo 1 Corte 5							
DDS	Fecha Riego	Lámina aplicada (mm)					
		Tratamientos Niveles					
Corte Uniforme	14/09/2009	N1	N2	N3	N4	N5	N6
1	15/09/2009	11.62	9.83	6.98	5.37	3.21	0.92
2	16/09/2009	4.21	3.74	2.68	2.27	1.17	0.44
3	17/09/2009	8.94	6.61	5.71	4.49	3.03	0.00
8	22/09/2009	4.98	4.55	2.19	1.66	1.13	0.58
15	29/09/2009	8.76	7.85	4.40	2.30	2.15	1.15
21	05/10/2009	6.69	5.49	4.33	3.78	2.29	0.32
22	06/10/2009	7.70	6.45	4.76	3.72	2.20	0.61
23	07/10/2009	5.05	4.07	3.12	2.74	1.86	0.38
46	30/10/2009	5.16	3.69	3.21	3.05	1.81	0.68
51	04/11/2009	Fecha de aforo					

Tabla 3.13 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 corte 6 de raigrás.

Raigrás, Cultivo 1 Corte 6							
DDS	Fecha Riego	Lámina aplicada (mm)					
		Tratamientos Niveles					
Corte Uniforme	05/11/2009	N1	N2	N3	N4	N5	N6
8	13/11/2009	3.98	3.61	2.91	2.35	1.17	0.00
19	24/11/2009	9.40	7.54	6.54	4.95	2.29	0.72
20	25/11/2009	5.82	4.76	3.82	3.01	1.63	0.40
28	03/12/2009	5.69	4.47	4.38	3.89	2.71	1.75
29	04/12/2009	4.91	3.89	2.63	1.33	0.68	0.36
36	11/12/2009	12.01	9.26	7.10	5.18	2.74	0.64
39	14/12/2009	11.93	9.10	6.57	4.25	2.49	0.46
40	15/12/2009	9.63	9.23	7.14	4.91	2.61	0.33
42	17/12/2009	Fecha de Aforo					

Tabla 3.14 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 1 corte 7 de raigrás.

Raigrás, Cultivo 1 Corte 7							
DDS	Fecha Riego	Lámina aplicada (mm)					
		Tratamientos Niveles					
Corte Uniforme	18/12/2009	N1	N2	N3	N4	N5	N6
4	22/12/2009	14.08	13.90	7.76	3.79	3.16	2.02
5	23/12/2009	7.51	6.79	5.54	3.96	2.93	0.72
6	24/12/2009	8.23	8.23	5.95	4.21	2.14	0.53
18	05/01/2010	20.57	18.62	14.61	10.82	6.99	1.85
20	07/01/2010	8.26	7.49	6.06	3.56	0.99	0.10
21	08/01/2010	4.67	4.37	3.76	2.53	0.82	0.08
26	13/01/2010	10.11	9.17	7.10	5.76	2.93	1.08
27	14/01/2010	3.86	3.54	3.10	2.33	1.49	0.18
32	19/01/2010	15.25	16.36	12.97	10.35	6.42	1.64
34	21/01/2010	6.07	6.19	5.02	3.54	2.32	0.38
40	27/01/2010	5.73	6.41	4.87	3.95	2.45	0.50
41	28/01/2010	20.02	20.07	16.82	12.49	7.21	3.23
42	29/01/2010	8.51	7.53	6.93	5.01	2.72	0.32
46	02/02/2010	Fecha de Aforo					

Tabla 3.15 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 2 corte 1 de raigrás.

Raigrás, Cultivo 2 Corte 1							
DDS	Fecha Riego	Lámina aplicada (mm)					
		Tratamientos Niveles					
Siembra	10/02/2010	N1	N2	N3	N4	N5	N6
2	12/02/2010	29.93	26.62	20.63	19.93	21.05	23.02
6	16/02/2010	14.18	13.05	13.69	14.52	12.86	12.23
7	17/02/2010	15.86	14.66	17.10	17.64	18.22	13.69
21	03/03/2010	13.90	10.88	8.73	7.55	5.09	0.75
22	04/03/2010	15.17	12.19	9.20	6.34	3.64	1.15
23	05/03/2010	8.56	7.12	5.27	3.14	1.74	0.49
35	17/03/2010	31.31	24.31	18.34	13.35	8.12	2.35
37	19/03/2010	23.51	20.02	14.54	9.45	4.14	0.70
47	29/03/2010	14.23	11.51	6.99	6.34	4.75	1.75
49	31/03/2010	17.79	14.58	11.94	9.89	5.49	1.90
90	11/05/2010	Fecha de Aforo					

Tabla 3.16 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 2 corte 2 de raigrás.

Raigrás, Cultivo 2 Corte 2							
DDS	Fecha Riego	Lámina aplicada (mm)					
		Tratamientos Niveles					
Siembra	15/05/2010	N1	N2	N3	N4	N5	N6
5	20/05/2010	5.82	4.03	3.50	2.50	1.79	0.58
52	06/07/2010	Fecha de Aforo					

Tabla 3.17 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 2 corte 3 de raigrás.

Raigrás, Cultivo 2 Corte 3							
DDS	Fecha Riego	Lámina aplicada (mm)					
		Tratamientos Niveles					
Siembra	08/07/2010	N1	N2	N3	N4	N5	N6
37	14/08/2010	8.12	7.03	5.25	3.57	2.03	0.51
42	19/08/2010	Fecha de Aforo					

Tabla 3.18 Resumen de las láminas de riego aplicadas al cultivo 2 corte 4 de raigrás.

Raigrás, Cultivo 2 Corte 4							
DDS	Fecha Riego	Lámina aplicada (mm)					
		Tratamientos Niveles					
Siembra	26/08/2010	N1	N2	N3	N4	N5	N6
5	31/08/2010	8.97	7.34	5.38	3.86	2.09	0.79
18	13/09/2010	11.40	8.71	7.87	6.33	3.96	1.01
20	15/09/2010	6.74	4.85	4.61	3.79	2.20	0.08
22	17/09/2010	15.79	13.83	11.48	8.40	4.98	0.58
33	28/09/2010	4.11	3.51	3.19	2.89	1.13	0.24
35	30/09/2010	3.07	2.96	2.62	2.34	1.01	0.21
42	07/10/2010	Fecha de Aforo					

3.5.5 Sistematización de la información

Para la sistematización de información se desarrollaron en libros de cálculo Excel varios formatos y programas así como formularios de campo y procesos de acopio y manejo de datos. Los libros de cálculo desarrollados fueron: 1. Diseño experimental 2. Análisis de física y química de suelos. 3. Curvas de retención de humedad con capacidad de campo, marchitez permanente, y saturación 4. Contenidos de humedad del suelo en termogravimétrico y TDR, 5. Balances hídricos, 6. Gradientes de aspersión, 7. Determinación de ETo por Penman – Monteith, 8. Determinación ETc y de los Kc, Kcb, Ke, por

especies, 9. Evaluación de Cosechas, y variables del cultivo, 10. Cronogramas de fisiología de cultivos, 11. Calibración de humedad del TDR, 12. Evaluación del riego por aspersión, 13. Monitoreo de datos climáticos, 14. Topografía y control de unidades experimentales, 15. Infiltración y conductividad hidráulica, 16. Análisis estadísticos, 17. Programación del riego, 18. Evaluación y estimación de coberturas, 19. Evaluación de cobertura marchita, 19. Funciones de producción, 20. Crecimiento de raíces, 21. Calibración de cultivos, 22. Análisis de parámetros, 23. Simulación de cultivos, y 24. Tablas de resultados.

La mayoría de los libros están relacionados entre sí y tienen varias hojas de cálculo, con formularios de toma de información, procesos de cálculos y están programadas con algoritmos más o menos automáticos de los procedimientos metodológicos. Alguna de la información manejada es diaria y se requiere que los resultados sean inmediatos para tomar las decisiones en el momento adecuado.

3.6 Metodología para la determinación de los parámetros y variables del cultivo para el modelo AquaCrop

En la Tabla 2.4, del capítulo sobre el modelo AquaCrop, se identifican los tipos de parámetros, entre conservativos, o que tienen aplicación generalizada independientemente de la localidad o el clima en el que se desarrollen, también aquellos parámetros que pueden ser específicos para una especie pero que varían entre variedades o cultivares. Por otro lado existen variables que dependen del ambiente o de la forma de manejo local. Y por último aquellas variables o parámetros que dependen exclusivamente de la variedad.¹

A continuación se define cada una de las variables que requiere el modelo y se presenta, la metodología usada para su obtención o derivación, el nombre, las unidades que maneja, el tipo, y en alguna de ellas se coloca una nota sobre aspectos relevantes.

3.6.1 Temperaturas base y corte

¹**Nota:** El numeral 4.2, de la Tabla 2.4 que reúne los parámetros referentes al estrés de fertilidad del suelo, aún no han sido evaluados para ningún cultivo por el grupo de desarrolladores y colaboradores de AquaCrop. Para el presente estudio también se excluyen por no ser del interés relativo al agua. Estos parámetros requieren de experimentación más agronómica que está fuera del alcance de los objetivos de esta tesis.

Unidades: (T_{base} , $yT_{superior}$, °C)

Tipo: Conservativos

Temperatura base definición: Temperatura mínima a la cual el desarrollo del cultivo ya no progresa.

Temperatura corte definición: Temperatura sobre la cual el desarrollo del cultivo no se incrementa más allá con un incremento en la temperatura del aire.

Para la determinación de estas dos variables, se utilizó información secundaria proveniente de la base de datos de *ECOROP*, FAO, (1993-2007). Ver capítulo de Resultados y discusión, numeral 4.7.1.

3.6.2 Cobertura de la superficie del suelo por una semilla individual al 90% de emergencia (Cs)

Unidades: ($\text{cm}^2 \cdot \text{planta}^{-1}$)

Tipo: Conservativo

Definición: Cobertura del dosel de una planta al momento de emergencia (C_s), se evalúa cuando por lo menos el 90% de las semillas han germinado. Cuando la cobertura inicial del dosel (CD_0) se presenta, se estima el tiempo inicial para el desarrollo del dosel ($t_0 = 0$), conociendo de la densidad de siembra de la plantación ($\text{Plantas} \cdot \text{ha}^{-1}$) y la cobertura del dosel de la planta (cm^2), se evalúa la cobertura en el momento de la emergencia.

Metodología: Periódicamente se supervisó el proceso de germinación por fotografía. En el momento de la emergencia del 90%, se tomaron fotografías con el fin de estimar el área cubierta por la plantica. Se contabilizó el número de plantas en el área de cubrimiento de la foto, se determinó el área de cobertura por medio del porcentaje de la cobertura alcanzada con el programa *CobCab*, Ver 2.1 (Ver Figura 3.17), Ferrari, M. et al, (2009), al hacer la relación de área de cobertura total por el número de plantas se obtiene el área de cada una de las semillas. La cobertura de una semilla individual se determinó en cada unidad experimental.

Este procedimiento se realizó en todas las unidades experimentales, ya que al momento de germinación aún no se ha aplicado ningún tratamiento experimental de riego, por lo cual todas las plantas tienen un desarrollo similar.

El promedio de estas áreas de las 48 unidades experimentales se determina como la cobertura inicial por la semilla (CD_0).

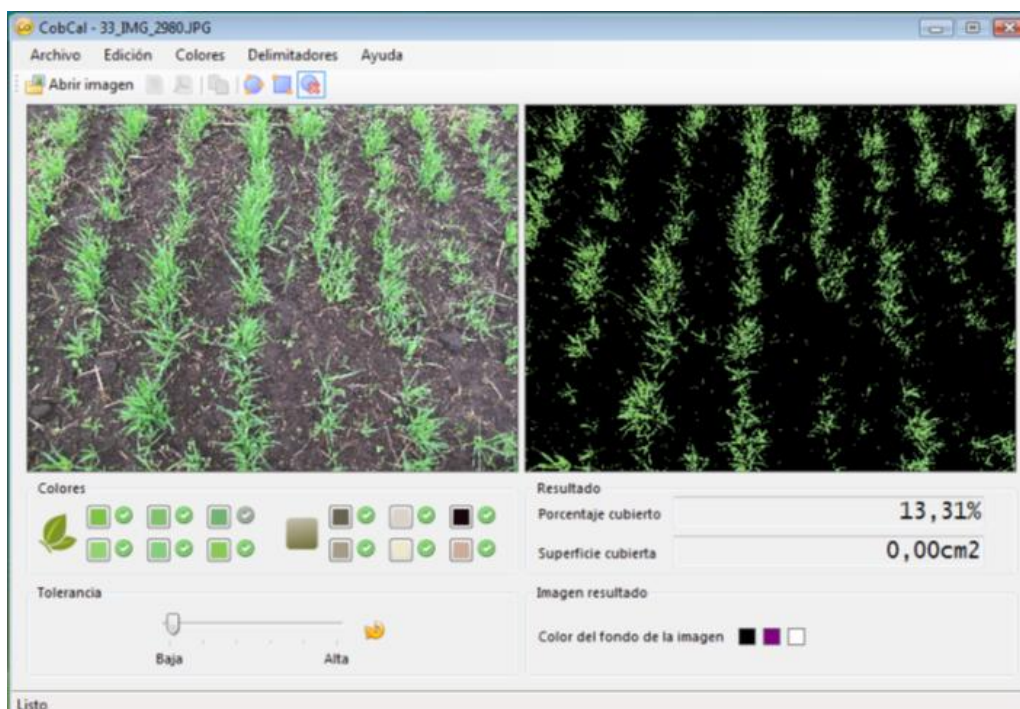


Figura 3.17 Evaluación del área total de cobertura del dosel por la avena forrajera en el momento de la emergencia al 90%.

Se estima que una emergencia al 90% se encuentra cuando sólo el 10% de las semillas plantadas no ha germinado aún, por lo cual no se observa ninguna hoja verde en el sitio.

3.6.3 Número de plantas por hectárea

Unidades: (Plantas.ha⁻¹)

Tipo: Manejo

Definición: Densidad de siembra, distancia entre plantas y distancia entre hileras.

Metodología: La densidad de siembra, se calcula según la distancia entre plantas e hileras o según el cálculo de densidad de semillas por hectárea.

Se usó la densidad de siembra utilizado en la región y recomendado por el productor de la semilla.

En el caso del raigrás fue de 50 Kg.ha⁻¹, lo cual de acuerdo a la densidad de la semilla arroja un valor de 5 gr.m⁻², es equivalente a 1160 semillas.m⁻², lo cual arroja una distribución de 3 semillas con un patrón en cuadros de 5 cm².

La densidad de plantas alcanzó un total de 11,6 millones de plantas por hectárea aproximadamente.

Para el caso se avena forrajera fue de 80 Kg.ha⁻¹, de acuerdo a la densidad de la semilla arroja un valor de 8 gr.m⁻², es equivalente a 264 semillas.m⁻², lo cual arroja una distribución de 1 semilla cada 25 cm².

La densidad de plantas alcanzó un total de 2,64 millones de plantas por hectárea aproximadamente.

3.6.4 Tiempo de siembra a emergencia

Unidades: (t_0 , Días, o día.°C⁻¹)

Tipo: Manejo

Definición: Tiempo transcurrido en días o en crecimiento en días grado desde la siembra a la emergencia.

Metodología: Medición de los días desde la siembra al momento del 90% de la emergencia. Se puede evaluar en crecimiento en días grado.

Los días grado se calculan con la ecuación de CDG [2.59] calculada para cada día y sumados a lo largo del ciclo de cultivo transcurrido.

Se tuvo en cuenta las restricciones observadas en la ecuación [2.60] que son las determinadas por el modelo AquaCrop por defecto y sus respectivas reglas de ajuste. Raes et al., (2009a).

3.6.5 Coeficiente de crecimiento del dosel

Unidades: (CCD, Adim, fracción)

Tipo: Conservativo

Definición: Fracción o porcentaje de cobertura del suelo incrementado por día o crecimiento en días grado. El CCD, es un parámetro de las ecuaciones de crecimiento del dosel que permite incrementar adecuadamente el nivel de crecimiento del dosel por medio de ecuaciones logarítmicas.

Metodología: Diferencia entre la cobertura del día actual con respecto a la cobertura de la evaluación anterior media a partir de la cobertura del dosel por fotografía con el programa CobCal Ver 2.1, Ferrari et al., (2009), dividida por el número de días transcurridos, máximo 5 días y presentada como fracción.

La curva de la cobertura del dosel se ajusta a las ecuaciones de crecimiento del dosel, [ecuaciones 2.33 y 2.34] por medio de ensayo y error variando el *CCD*, con un indicador de ajuste.

En el punto del menor error se determina el exponencial en las dos ecuaciones, el ajuste se obtiene cuando los errores introducidos entre las diferencias de la curva de mayor desarrollo del dosel obtenida sin limitaciones hídricas con las ecuaciones de crecimiento del dosel determinan el *CCD* final.

3.6.6 Máxima cobertura del dosel

Unidades: (*CD_x*, %)

Tipo: Manejo

Definición: Cobertura máxima del dosel al inicio de la senescencia para unas condiciones dadas de densidad de siembra bajo situaciones ambientales óptimas (buena distribución de nutrientes y excelentes condiciones de humedad, sin malezas o plagas y enfermedades).

Metodología: Evaluación de la cobertura del dosel en el momento de máxima cobertura antes del inicio de la senescencia, realizado por fotografía con el programa CobCal Ver 2.1, Ferrari et al., (2009), tomadas del nivel uno sin limitaciones de humedad en pleno desarrollo.

La *CD_x* se determina cuando el promedio del porcentaje del dosel de los niveles uno (más bajo nivel de agotamiento) presenta el valor máximo de cobertura del dosel, la supervisión se hace en forma continua de manera que se puede observar cuando se presenta este evento.

3.6.7 Tiempo de siembra a inicio de senescencia

Unidades: (*t_s*, Días o día.°C⁻¹)

Tipo: Cultivar (Variedad)

Definición: Tiempo transcurrido en días o en crecimiento en días grado desde la siembra hasta la senescencia.

Metodología: Conteo de los días transcurridos desde la siembra hasta la senescencia, puede ser evaluado por crecimiento en días grado. Se estima que la senescencia inicia un día después de la finalización del estado de grano harinoso duro tanto para el caso de avena forrajera como para raigrás.

Debido a que es difícil estimar cuando termina esta fase, se contabilizó un día después de que se inició el estado fenológico de grano harinoso duro.

3.6.8 Coeficiente de declinación del dosel

Unidades: (CDD , Adim, fracción, o $\% \cdot \text{día}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)

Tipo: Conservativo

Definición: Fracción o porcentaje de cobertura del suelo declinada por día o en días grado. El CDD , es un parámetro del modelo AquaCrop que define la ecuación de declinación del dosel, para predecir el proceso de marchitamiento del dosel, por causas naturales o por generación de la senescencia temprana.

Metodología: Determinación del área de cobertura del dosel que declina el día actual con respecto al día anterior. Evaluado como porcentaje de cobertura declinada. (puede ser evaluada por día o por grados de crecimiento), por supervisión fotográfica con el programa CobCal Ver 2.1, Ferrari et al., (2009).

Toda la determinación de la cobertura del dosel se realizó por nivel de aplicación de agua o tratamiento considerando cuatro unidades experimentales por dos alas del mismo tratamiento (Norte y Sur) el valor que se toma en la evaluación es la media de los valores obtenidos. Con base en esta observación se construye la curva de declinación del dosel a través del tiempo.

El CDD , se verifica con base en la comparación de la curva observada con la curva determinada por medio de la ecuación de declinación del dosel [ecuación 2.36], el ajuste logrado cuando el error generado tiende a cero es el CDD final.

3.6.9 Tiempo de siembra a madurez

Unidades: (t_m , Días o días. °C^{-1})

Tipo: Cultivar

Definición: Tiempo en días o en crecimiento en días grado desde la siembra hasta la madurez, longitud del ciclo del cultivo.

Metodología: Se observaron y contabilizaron los días desde la siembra hasta la madurez y se determinaron los días grado de acuerdo a la metodología mencionada atrás. Se puede evaluar en días calendario o su crecimiento en días grado.

3.6.10 Tiempo de siembra a floración

Unidades: (t_f , Días o días. °C^{-1})

Tipo: Cultivar

Definición: Tiempo en días o en crecimiento en días grado desde la siembra hasta la floración.

Metodología: Medición de los días desde la siembra a la floración, evaluado en días calendario o en crecimiento en días grado. Se considera la floración el día en que cada unidad experimental tenga por lo menos el 50% de la superficie en floración. Se determinó el día de inicio de la floración para ambas especies, contabilizando desde la siembra hasta este punto.

3.6.11 Longitud del estado de floración

Unidades: (L_f , Días o día.°C⁻¹)

Tipo: Conservativo

Definición: Tiempo en días o en crecimiento en días grado desde el inicio de la floración hasta el final de la floración. (Se obtiene el tiempo al inicio y al final).

Metodología: Medición de los días desde el inicio de la floración hasta el final de la floración, evaluado en días calendario o en crecimiento en días grado.

El inicio de la floración se coloca desde el primer día que aparece una flor y el final de este período es cuando desaparece la última flor. Para el caso de las espiguillas tanto de Avena forrajera como de Raigrás, hasta cuando aparece la última flor en el espiga.

3.6.12 Determinancia del cultivo (unión/separación de floración)

Unidades: (D, Sí o No)

Tipo: Conservativo

Definición: Un cultivo determinado es aquel que muere al final del proceso de fructificación, sin embargo la mayoría de los pastos y forrajes son cultivos indeterminados, es decir que después del proceso de fructificación y producción de la semilla continúan en un ciclo continuo de producción.

Metodología: Por medio del conocimiento fisiológico de las especies estudiadas. Para el particular, algunos pastos son bianuales, otros son indeterminados. La avena forrajera es un cultivo anual. Para el caso de raigrás el cultivo es indeterminado.

Respecto al índice de cosecha (IC) en los cultivos determinados aumenta durante el llenado de grano ya que no hay más crecimiento vegetativo, mientras que en los cultivos indeterminados, cada unidad de floración adicional incluye la hoja y la porción de tallo que la sustenta. Como resultado, la cantidad de material vegetativo aumenta con el rendimiento. Por esta razón el índice de cosecha permanece bajo y la distribución del crecimiento entre partes vegetativas y reproductivas no es la óptima, Paltridge et al., (1984), citado por Loomis y Connor, (2002).

Tanto la avena forrajera como el raigrás se consideran cultivos C3. La fijación del CO₂ por las plantas se realiza por el ciclo de Calvin, o C3. Como información general se menciona los ciclos de Hatch-Slack, o de los ácidos dicarboxílicos de 4 carbonos C4, y también se identifica una forma combinada que se conoce como metabolismo de ácidos de las crasuláceas (CAM), con fijación en la oscuridad. Van Soest, (1994).

El tipo de fijación de CO₂, tiene gran importancia en el uso de los recursos (Luz, CO₂, temperatura, fotosíntesis, velocidad de crecimiento, producción de biomasa (*MS*), tasa de respiración, y uso del agua) por los cultivos, por lo cual es necesario tener en cuenta sus características a la hora de la evaluación de la producción de biomasa y del uso del agua. Van Soest, (1994), y Salsbury y Ross, (1994). Para AquaCrop se determinan los rangos probables de índices de cosecha con base en el tipo de fijación de CO₂, C3 o C4. Raes et al, (2011) cap. 2, Manual de Referencia de AquaCrop.

Ver ampliación del tema en el capítulo de Resultados y Discusión numeral 4.7.12.

3.6.13 Profundidad de raíz mínima efectiva

Unidades: (Z_0 , m)

Tipo: Manejo

Definición: Profundidad de la raíz en el suelo en la cual la germinación de la semilla o el arbolito joven puede extraer el agua. (para árboles puede ser de 0.2 a 0.3 m apropiada, sin embargo para el caso de pastos puede ser de 0.05 m).

Metodología: Observación de la profundidad radical al 90% de emergencia, por medio de puntos de observación ubicados en los diferentes niveles dentro de las unidades experimentales. Para esto se ubicaron cajas transparentes con suelo indisturbado y se sembraron semillas dentro de ellas, se hizo supervisión diaria del desarrollo de las raíces y se evaluó el crecimiento de las raicillas hasta alcanzar la emergencia del 90% en las unidades experimentales.

La profundidad mínima de raíces se calcula cuando a partir del punto de germinación al 90% obtenido en t_0 , al tiempo $t_0/2$ se obtiene la profundidad mínima. El promedio de las observaciones realizadas se determinó como la profundidad mínima efectiva de raíces en cada especie.

3.6.14 Profundidad de raíz máxima efectiva

Unidades: (Z_x , m)

Tipo: Manejo

Definición: Máxima profundidad de la raíz alcanzada por el cultivo. Para cultivos forrajeros y pasturas la profundidad es desarrollada en la primera estación. De la segunda estación en adelante la profundidad de enraizamiento es constante e igual Z_x .

Metodología: Por medio de la observación del avance de la raíz directamente en campo cuando el cultivo está plenamente desarrollado. Generalmente en el momento de finalización de antesis.

Se realizó por medio de puntos de observación ubicados en el campo en las unidades experimentales con calicatas en los diferentes niveles dentro de las unidades experimentales. Para las etapas tempranas de desarrollo se ubicaron cajas transparentes con suelo no disturbado y se sembraron semillas dentro de ellas, posteriormente se hicieron observaciones directamente en el terreno por medio de calicatas.

Se hizo la supervisión con una frecuencia de una vez por semana del desarrollo de las raíces y se evaluó su crecimiento hasta alcanzar la etapa de finalización de antesis, o hasta que no se observara crecimiento adicional en tres o más observaciones consecutivas en las unidades experimentales.

El promedio obtenido de las unidades experimentales del tratamiento que primero alcanzó la profundidad máxima de las raíces se estableció como la profundidad efectiva de las raíces. Para el caso de raigrás, se realizaron las observaciones sólo hasta el primer corte.

3.6.15 Factor de forma que describe la zona de expansión de la raíz

Unidades: (n , Adim)

Tipo: Conservativo

Definición: El factor de forma que describe el crecimiento de raíces es un parámetro del modelo AquaCrop, que determina la velocidad de crecimiento de la zona de expansión de raíces en el tiempo. (Ver: 3.5.4, Manual de Referencia de AquaCrop, Raes et al., 2009(a)).

Metodología: La tasa de profundización de la raíz es una función del tipo de cultivo y el tiempo. En AquaCrop el desarrollo de la profundización de la raíz es simulado por consideración del enésimo (n°) tiempo de raíz. Una vez la mitad del tiempo requerido para la emergencia del cultivo (o la recuperación de la planta en el caso del trasplante) es llevado a ($t_0/2$), la profundidad de la raíz comienza a incrementarse de la profundidad mínima (Z_0) hasta que la máxima profundidad efectiva de raíces Z_x es alcanzada.

Con la observación del crecimiento de la raíz en el suelo durante el ciclo del cultivo por medio de puntos de observación ubicados en los diferentes niveles dentro de las unidades experimentales se construye las curvas de crecimiento de raíces a través del tiempo. A partir del promedio obtenido se determinó el comportamiento del crecimiento de raíces y la descripción diaria de su desarrollo.

Con la ecuación del crecimiento de raíces [2.38] se realiza un ajuste del crecimiento máximo observado con dicha ecuación, cuando el error obtenido es mínimo se ajusta el parámetro “n” de la ecuación mencionada.

Con base en el conocimiento de las variables, Z , Z_0 , Z_x , t_0 , t y t_x se determinó el factor de forma de la expansión de las raíces (n) a partir de la mencionada ecuación.

3.6.16 Tiempo desde siembra a la máxima profundidad de raíces

Unidades: (t_x , día o día.°C)

Tipo: Cultivar (Variedad), Ambiental.

Definición: Tiempo de desarrollo de la raíz desde la siembra hasta el momento de la máxima profundidad de raíces.

Metodología: Observación y contabilización de los días desde la siembra hasta que el cultivo alcance la máxima profundidad de las raíces.

Se hicieron las observaciones de campo durante el ciclo del cultivo hasta que la raíz alcanzó su máxima profundidad (finalización de antesis), de acuerdo a lo explicado en el numeral 3.6.14. El número de días totales contabilizados para alcanzar la máxima profundidad de las raíces en el nivel que alcanzó la

mayor profundidad se determinó como el tiempo máximo de desarrollo de raíces (t_x), para raigrás se realizó la observación sólo hasta el primer corte.

3.6.17 Coeficiente del cultivo cuando el dosel está completo pero previo a la senescencia

Unidades: (Kcb_x , Adim)

Tipo: Conservativo

Definición: Coeficiente para la transpiración del cultivo máximo (cuando el suelo ha sido bien regado y dosel está completo, $CD=1$ o cercano al 100%).

Debido a las diferencias en albedo, altura del cultivo, propiedades aerodinámicas, y propiedades de la hoja y estomáticas, la transpiración en el punto del crecimiento total y cuando el cultivo está bien humedecido difiere de la ET_o .

El máximo coeficiente del cultivo Kcb_x representa una integración de los efectos de las características que distinguen el cultivo con un dosel completo en comparación con el Kcb_x del pasto de referencia.

El coeficiente Kcb_x es a menudo 5 – 10% más alto que el del pasto de referencia, e igual a 15 – 20 % mayor en algunos cultivos altos tales como el maíz, el sorgo o la caña de azúcar. El coeficiente Kcb_x es aproximadamente equivalente al coeficiente basal del cultivo a media estación para varios cultivos según Allen et al., (1998), pero solo para los casos cuando la CD es total (cercana al 100%).

Metodología: A partir del proceso del balance hídrico del cultivo con el procedimiento descrito en campo para la curva de determinación de Kc , Kcb y Key evaluado en la etapa de mayor cobertura del dosel cuando Kcb es máxima. Se obtiene el Kcb_x , de la curva de Kcb evaluado en el pico máximo.

3.6.18 Factor de declinación del cultivo

Unidades: (f_{edad} , fracción o $\% \cdot \text{día}^{-1}$)

Tipo: Conservativo

Definición: factor de ajuste (f_{edad}) que decrece a Kcb_x por una constante y pequeña fracción (p. ej., 0.3%) por día, resultando un coeficiente de ajuste del cultivo ($Kcb_{x,adj}$) como resultado de la senescencia, deficiencia de nitrógeno, etc.

Los efectos de la vejez, inciden en el coeficiente $Kcb_{x,adj}$. Después del tiempo t_{CDx} requerido para alcanzar CDx bajo óptimas condiciones y antes de senescencia, el dosel comienza a envejecer despacio y sufre una progresiva aunque pequeña reducción en la capacidad de transpiración y fotosintética.

Esto es simulado por aplicación en el factor de ajuste (f_{edad}) que decrece a Kcb_x por una fracción constante y pequeña (p. ej., 0.3%) por día, resultando un coeficiente de ajuste del cultivo ($Kcb_{x,adj}$). La edad llega en efecto a t_{CDx} la cual es el tiempo cuando se alcanza la máxima cobertura del dosel (CDx), la cual, podría haber sido alcanzada sin estrés hídrico (p. ej. al inicio de la estación media). En general se asume un corta fase de retraso de 5 días. Después de la fase de retraso de 5 días, $Kcb_{x,adj}$ es dado por:

$$Kcb_{x,adj} = Kcb_x - (t - 5)f_{edad}CD_x \quad [3.7]$$

Donde t es el tiempo en días después de t_{CDx} (t es cero a t_{CDx}), y f_{edad} es la reducción expresada como una fracción de CD_x . El coeficiente f_{edad} es un parámetro del cultivo, subsecuentemente este requerirá algún ajuste para cultivos anuales tal como caña de azúcar, hay que tener en cuenta que algunos cultivos forrajeros también son anuales, como es el caso de la avena forrajera.

Esta ecuación se aplicaría para algunos cultivos forrajeros y pasturas anuales. Sin embargo, cuando el dosel es segado en cada corte, se desarrollará un nuevo dosel, el cual cancela el envejecimiento. Por otro lado, una vez la CDx es alcanzada después del corte, también el pisoteo del ganado puede envejecer de nuevo el pasto, entonces este proceso es descrito por la ecuación [3.7].

Metodología: Al supervisar el proceso de desempeño de las curvas de Kcb , se puede identificar el pico que se produce al inicio de la estación media, una vez se obtiene este punto, para los siguientes 5 a 7 días la magnitud del Kcb tiene un decrecimiento paulatino y sostenido que genera un gradiente de pérdida de transpiración en el cultivo, la pendiente de los valores obtenidos constituye el valor del factor de declinación del cultivo (f_{edad}). El Porcentaje que decrece por día desde la senescencia del cultivo a partir de Kcb_x , determina el factor de declinación.

3.6.19 Efecto de cobertura del dosel sobre la reducción de evaporación del suelo en el estado de estación tardía

Unidades: ($Erel$, %)

Tipo: Conservativo

Definición: Es la reducción de la evaporación del suelo que ocurre cuando la cobertura del dosel disminuye al final del ciclo del cultivo. Aunque en este estado el dosel verde decrece, el suelo permanece bien abrigado por el dosel marchito incluso cuando la cobertura del dosel verde llega a cero ($CD = 0$) al final del ciclo de crecimiento.

El valor de la evaporación máxima que el suelo experimenta puesto que existe una cobertura del dosel remanente es el valor determinado por E_{rel} , este valor depende de la cantidad de dosel marchito que permanece en la superficie del suelo, de las distancias de siembra y del porte del cultivo.

Metodología: Se construyó la curva de declinación del dosel a partir de la supervisión a través del tiempo del proceso de reducción del dosel verde por medio de la secuencia de fotografías evaluando el porcentaje del dosel verde remanente.

También se puede determinar el proceso del aumento del mantillo (*molch*) generado a medida que el cultivo fenece, este monitoreo también se puede hacer por medio de métodos fotográficos, seleccionando los colores apropiados con el programa CobCal®, al construir la curva del mantillo se puede identificar la fecha probable en la cual la cobertura del dosel verde sea cercana a cero.

Por otro lado, la curva de la evaporación del suelo (K_e) también debe ser supervisada por medio del proceso mencionado en el numeral 3.5.3 hasta el punto en donde se pueda establecer su tendencia.

Al construir las tendencias de las curvas de declinación del dosel y de evaporación del suelo, cuando la curva de la declinación del dosel cruza el eje de las abscisas para la ordenada de $CD=0$, es decir en el eje X se obtiene el punto en el cual se presenta la máxima evaporación del suelo, o $t = t_{max}$. Reemplazando este t_{max} en la ecuación de evaporación se obtiene la máxima evaporación posible en el estado de la estación tardía.

En general este valor es muy inferior a la evaporación máxima del suelo cuando está desnudo la cual se asume como 1.1, Raes et al.,(2009).

La relación del valor de la evaporación encontrada con este procedimiento para el estado de estación tardía con respecto al valor de la evaporación máxima para suelo desnudo da como resultado el porcentaje de evaporación relativa máxima en el estado de estación tardía, ($E_{rel}\%$).

3.6.20 Productividad hídrica normalizada para ET_0 y CO_2

Unidades: (WP^* , $g.m^{-2}$, o $t.ha^{-1}$)

Tipo: Conservativo

Definición: Expresa la materia seca aérea (*g* o *kg*) producida por unidad de área (*m²* o *ha*) y por unidad de agua transpirada (*mm*). Muchos experimentos han mostrado que las relaciones entre biomasa producida y agua consumida por una especie dada son altamente lineales. Steduto et al., (2007)

En el numeral 2.6.1 se explica en detalle este aspecto, para la normalización se usan las ecuaciones [2.40 y 2.41] con el fin de hacer la normalización por CO₂.

Metodología: La productividad hídrica normalizada se calculó según la ecuación [13] presentada en Steduto et al., 2007.

La biomasa o materia seca del cultivo se obtuvo periódicamente, evaluando el promedio de la producción de biomasa obtenida de un área de 0.5 x 0.5 m² es decir 0.25 m² con por lo menos tres repeticiones por unidad experimental. Esta se llevó al laboratorio y se determinó la materia seca (secado a 60°C hasta que el valor pesado sea constante a través del tiempo). Para los cortes finales se determinó además el peso de la zoca y para la avena forrajera se evaluó el peso de granos.

Los valores obtenidos de biomasa en g por m² se dividen con la lámina de agua transpirada evaluada a partir del *K_{cb}* hasta el momento de obtención de la cosecha obteniendo así la productividad hídrica. La productividad hídrica normalizada por el clima se divide por la evapotranspiración de referencia, o tan solo la productividad se divide por la *K_{cb}*. La productividad hídrica normalizada se calcula con las ecuaciones para CO₂ mencionadas. La relación entre la transpiración alcanzada estandarizada por la evapotranspiración de referencia y la biomasa producida, se determina por el mejor de los ajuste por mínimos cuadrados de una línea recta que pasa por el origen.

3.6.21 Productividad hídrica normalizada durante la formación de la cosecha

Unidades: (*WP_c^{*}*, g.m⁻²)

Tipo: Conservativo

Definición: Es la productividad hídrica normalizada calculada sólo en el periodo de formación de la cosecha y expresada como porcentaje de WP del período antes de formación de cosecha.

Metodología: Se hace el mismo procedimiento anterior pero evaluado sólo para el periodo de la formación de la cosecha. Y se expresa como porcentaje de WP del período antes de formación de cosecha.

3.6.22 Índice de cosecha de referencia

Unidades: (IC_o , %)

Tipo: Cultivar (Variedad)

Definición: Es la proporción de la masa producida al total aéreo de biomasa que será alcanzado a madurez para condiciones no estresadas. Es la relación entre la materia seca total y el rendimiento de frutos/granos cosechados.

Para Alfalfa cuyo producto es el heno está entre 0.4 - 0.5 y 0.8 - 0.9 Para primero y segundo año. Según Doorenbos y Kassam, (1979) (FAO, 33).

Metodología: Se evalúa la materia seca total por un lado y por el otro el rendimiento cosechado, obteniendo luego la relación entre los dos. Para la Alfalfa, alrededor del 50% de la materia seca total neta se forma en las raíces durante el primer año de crecimiento y alrededor del 10% para los años subsiguientes. (ver FAO 33, pag. 13).

Para algunas especies forrajeras no se diferencia este índice de cosecha pues su producción se orienta a la obtención de biomasa como forraje. En el caso particular del presente trabajo se evaluó para la avena forrajera, y se dio un primer acercamiento para el raigrás.

3.6.23 Construcción del índice de cosecha

Unidades: (t_c , Días o días.°C)

Tipo: Cultivar (Variedad)

Definición: Es el tiempo durante el cual se desarrolla la producción o cosecha. Ya se relacionó detalladamente en el numeral 2.8.1. Justo después de la floración o después del inicio de la formación de cosecha el incremento del Índice de Cosecha es despacioso (fase de retraso) y se describe por una función logarítmica.

Metodología: Incremento del índice de cosecha, es el tiempo requerido para la obtención del IC_o . El índice de cosecha para cualquier día en la fase de retraso está dado por la ecuación [2.44]. En el proceso de producción se mide el tiempo en el cual la cosecha se construye, este tiempo puede ser observado. Para el caso de los forrajes evaluados se estableció desde el momento de inicio de floración hasta la formación de grano harinoso duro. Aunque para raigrás por ser un cultivo indeterminado, continúa en la medida,

hasta tanto el cultivo no sea segado se estableció el valor hasta la formación del inicio de grano harinoso duro, como tiempo mínimo de formación de cosecha.

La relación del tiempo de formación de cosecha con respecto al tiempo de desarrollo del dosel verde en porcentaje se determina como el tiempo de construcción del índice de cosecha. Este valor se obtiene en porcentaje para AquaCrop.

3.6.24 Sumatoria de ET_0 durante el período de estrés que puede ser excedido antes de la activación de la senescencia

Unidades: ($\sum ET_{0\text{Estrés}}$, mm)

Tipo: Conservativo

Definición: Algunos cultivos presentan tolerancia a la sequía hasta un punto determinado que se mide por la suma de la ET_0 durante el período de estrés hídrico que este cultivo es capaz de soportar antes de que se active la senescencia.

Es cero para la mayoría de los cultivos, esto supone que el cultivo no soportaría estrés hídrico antes de la activación de la senescencia. Lo cual indica que la mayoría de los cultivos no soportan niveles de consumo de ET_0 o potencialidad de transpiración sin que se activen las condiciones de estrés.

Metodología: Para los niveles de estrés hídrico (todos a excepción del nivel 1) se evalúa la ET real con base en las curvas del cultivo obtenidas (Kc , Kcb , y Ke) a partir de los balances hídricos.

El valor es obtenido de la suma de ET_0 antes de la activación de la senescencia durante el periodo de estrés. La ET_0 se calcula por el método de Penman-Monteith, Allen et al., (1998).

En el caso de que con sequía continua no se presente la activación de la senescencia temprana del dosel, o síntomas de reducción del dosel por estrés hídrico, se debe hacer la contabilización de la suma de la ET_0 hasta el momento en que se active la senescencia del dosel.

Es importante mencionar que para todos los cultivos calibrados hasta la presente para AquaCrop esta variable es cero a excepción de la Quinua, que tiene características de resistencia a la sequía por lo cual alcanza un total de hasta 200 mm de ET_0 antes de que se active la senescencia del dosel.

3.6.25 Porcentaje de humedad en el punto anaeróbico en %Vol (con referencia a saturación)

Unidades: (θ_{aer} , %Vol)

Tipo: Cultivar, Ambiental

Definición: El punto anaeróbico es el umbral inferior del contenido de agua bajo saturación al cual la pobre aireación no prolonga los límites de la transpiración. La Tabla 2.8 presenta las clases correspondientes a valores por defecto y rangos de estrés por causa de la aireación considerados por el modelo AquaCrop.

En la Figura 2.20 se muestra el nivel de sensibilidad del cultivo a la falta de aireación para el caso de un cultivo con condiciones de déficit de aireación a - 5%Vol (es decir sólo el 5% de las raíces está libre de agua cuando el cultivo inicia a estar estresado por falta de aireación).

Metodología: Aprovechando los altos niveles de precipitación alcanzados en la estación experimental durante el año 2010, se identificaron algunas unidades experimentales que resultaron afectadas por los excesos hídricos y las fechas específicas en las cuales se observó su afectación debido a los eventos extremos.

Para los tres o cuatro días anteriores se extrajeron los niveles de humedad presentes en el suelo para las unidades afectadas hasta después de los altos niveles de precipitación que se presentaron, los síntomas del inicio de la afectación de dichas unidades experimentales fueron color café-rojizo en las hojas bajas de los cultivos.

Al graficar los niveles de humedad de dichas unidades experimentales se observó que efectivamente durante este período dichas unidades presentaron humedades del suelo por encima del punto de CC durante un periodo sostenido de tiempo.

Al promediar las unidades afectadas se obtiene la curva de humedad media de afectación o curva anaeróbica, el promedio a través del tiempo de dicha curva determina el punto anaeróbico a saturación. La humedad del punto anaeróbico se expresa luego como porcentaje del punto de saturación determinando así el punto anaeróbico con referencia a saturación.

El punto a saturación se determinó conjuntamente con las características físicas de los suelo por medio de la metodología de Richards, (1941) citado por Philip, (1974). Los resultados se presentan en la Tabla 5.3.

Notas:

Las variables o parámetros que tienen que ver con la producción de frutos o granos, consideradas por AquaCrop, no son de interés en la producción de especies forrajeras o pastos, por esta razón se excluyen del presente trabajo, estas variables son: Excesos de frutos potenciales, Coeficiente que describe el impacto negativo del cierre estomatal durante la formación de cosecha sobre el índice de cosecha, Posible incremento del índice de cosecha debido al estrés hídrico antes de la formación de la cosecha, Coeficiente que describe el posible impacto de crecimiento vegetativo restringido durante la formación de la cosecha sobre el índice del cultivo, Incremento máximo aceptable del índice de cosecha especificado, Umbral de agotamiento de agua en el suelo para el fracaso de la polinización, umbral superior.

Por otro lado las limitaciones en niveles de temperatura del aire en la polinización que limitan la producción de frutos o granos tampoco están consideradas dentro de los objetivos del presente trabajo. Estas son: Temperatura mínima del aire bajo la cual la polinización inicia a faltar (estrés de frío), y Temperatura máxima del aire sobre la cual la polinización inicia a faltar (estrés de calor).

3.7 Estrés hídrico

3.7.1 Descripción del sitio experimental

El trabajo experimental para la determinación del estrés hídrico se hizo bajo invernadero climatizado en el Centro de Investigación Tibaitatá de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), ubicado en Mosquera (Cundinamarca, Colombia, 4°42'N; 74°12' W) en la sabana de occidente de Bogotá, con una altitud sobre el nivel del mar de 2543 msnm.

3.7.2 Materiales utilizados

Se desarrollaron dos experimentos independientes, uno para cada cultivo. Cada experimento estuvo compuesto por un conjunto de macetas de 30 cm de diámetro y una altura de 30 cm, en cuyo interior se estableció suelo no disturbado.

Se sembraron semillas de avena forrajera, variedad Cayuse, y raigrás, variedad Bestfor Plus. La densidad de plantas fue de 80 kg.ha⁻¹, para la avena forrajera y de 50 kg.ha⁻¹ para raigrás.

Se instalaron en un invernadero de vidrio climatizado con ventilación artificial, y control de temperatura con el objeto de no superar las temperaturas base y

corte de los cultivos (para avena forrajera 5 y 30°C, y para raigrás 4 y 35°C (FAO, (1993-2007)) y humedad relativa inferior al 95%, con el fin de que las condiciones internas del invernadero no superaran los límites de estrés de temperatura de los cultivos. Rouphael, et al, (2008).

Experimentos previos a libre exposición (no publicados) mostraron que los niveles de estrés hídrico requeridos para obtener las respuestas completas requeridas para la determinación de las variables de estrés del modelo AquaCrop, como la reducción del dosel por estrés hídrico, el cierre de estomas y los coeficientes de ajuste de las curvas de estrés, no fue posible obtenerlos en campo abierto por las incidencias de factores como la precipitación, y la humedad relativa altas.

Dentro del invernadero se instaló una estación climática automática previamente calibrada marca *Metos*® con sensores de humedad relativa, temperatura, radiación solar, velocidad del viento, y temperatura de punto de rocío. Además se estableció un tanque tipo A, con el fin de medir la evaporación directa y un conjunto de unidades experimentales para la medición de la evaporación del suelo.

Se realizó un seguimiento del balance hídrico de cada unidad experimental basado en mediciones gravimétricas del contenido de agua en el suelo. La conductancia estomatal (*GS*) se midió con un porómetro de hoja Mod. SC-1 Decagon® Dev. Inc. con un rango de conductancia de 0 a 1000 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ con exactitud del 10%. La altura de planta (*AP*) y el ancho de la hoja (*AH*) se midió con cinta métrica y calibrador pie de rey digital respectivamente. Se realizó seguimiento de la cobertura del dosel por medio de fotografía tomada sobre la superficie de cada unidad experimental, con una frecuencia de tres veces por semana y evaluada por medio del software CobCal®, (Ferrari et al., 2009).

3.7.3 Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorio con un total de cinco tratamientos: un control y cuatro procesos de reducción del estrés hídrico, con cuatro repeticiones por tratamiento bloqueado a través del tiempo. Se establecieron dos unidades experimentales adicionales para determinación de la evaporación directa diaria del suelo.

Como variable independiente se tomó la lámina aplicada, la cual a su vez generó un nivel de humedad del suelo, cuya magnitud fue calculada para obtener el nivel adecuado de agotamiento de agua del suelo (*p*) del Agua Aprovechable Total (*AAT*). Como variables dependientes se determinaron las respuestas *GS* ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), *CD* (%), *AP* (m) y *AH* (mm). Además se

determinó la producción de biomasa como MS ($kg \cdot ha^{-1}$) al final del ciclo del cultivo.

Antes del inicio del ensayo se realizó un análisis químico del suelo, con base al cual se diseñó un plan de fertilización que garantizó la inexistencia de carencias nutritivas, (Corpoica, 2005; Bernal, 1998).

Todos los tratamientos recibieron la misma cantidad de agua hasta alcanzar el 90% de emergencia, a partir del cual se inició el ensayo. Todos los tratamientos de estrés hídrico se programaron para ir aumentando el nivel de estrés progresivamente. Payero et al.,(2006). Shangguan et al., (1999) Los tratamientos difieren en la fecha en la que alcanzan un determinado nivel de p . El tratamiento control mantuvo la humedad sin restricciones hídricas (Capacidad de campo, CC). La Tabla 3.19 muestra los tratamientos realizados y la evolución del nivel de agotamiento para el experimento de avena forrajera. Las Tablas 3.20 y 3.21 muestran los tratamientos de estrés hídrico realizados en el ensayo de raigrás, de siembra a primer corte (DDS) y de primer corte a segundo respectivamente (DDC).

La cantidad de agua a reponer según el nivel de agotamiento (p) para cada tratamiento se determinó con base en la diferencia entre la CC y la proporción del AAT con respecto al valor del tratamiento respectivo en la fecha adecuada menos el resultado del balance hídrico evaluado diariamente.

Tabla 3.19 Tratamientos de estrés hídrico desarrollados en el experimento para avena forrajera (CI Tibaitatá, 2012/2013).

Periodo (DDS)	0-21	22-37	38-45	46-51	52-67	68-78	78-85	83-113	114-118	119-120	120-124
Tratamiento	Nivel de agotamiento (p) (%AAT)										
T0- Control	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T1	0	10	20	30	40	50	60	70	75	80	85
T2	0	20	40	60	70	75	80	85	90	92	94
T3	0	30	60	80	85	87	89	91	93	95	97
T4	0	40	75	95	96	97	98	99	100	103	105

DDS: Días después de siembra

AAT: Agua Aprovechable Total

Tabla 3.20 Tratamientos de estrés hídrico realizados en el experimento para raigrás durante el ciclo de siembra a primer corte (C.I. Tibaitatá, 2012/2013).

Periodo (DDS)	0-21	22-37	38-43	44-50 y 58-64	51-57 y 65 -78	79 -85	86-100
Tratamiento	Nivel de agotamiento (p) (% AAT)						
T0-Control	0	0	0	0	0	0	0
T1	0	10	20	50	60	70	75
T2	0	20	40	60	70	75	85
T3	0	30	60	80	90	93	95
T4	0	40	75	95	96	97	98

DDS: Días después de siembra

AAT: Agua Aprovechable Total

Tabla 3.21 Tratamientos de estrés hídrico realizados en el experimento para raigrás durante el ciclo de primer a segundo corte (C.I. Tibaitatá, 2012/2013).

Periodo (DDS)	1-4	5-8	9-13	14-15	16-21	22-27	28-34	35-46	47-57
Tratamiento	Nivel de Agotamiento (p) (%AAT)								
T0-Control	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T1	0	10	20	50	60	70	75	80	85
T2	0	20	40	60	70	75	85	90	95
T3	0	30	60	80	90	93	95	96	97
T4	0	40	75	95	96	97	98	99	100

DDS: Días después de siembra

AAT: Agua Aprovechable Total

El hecho de que los tratamientos aumentaran el nivel de agotamiento a medida que avanzó el ciclo del cultivo garantizó que el nivel de estrés hídrico alcanzado genere toda la variación de las variables de respuesta supervisadas en comparación con el control. Por otro lado, el aumento de la severidad del estrés hídrico en los distintos tratamientos asegura que los niveles de agotamiento se presenten en épocas distintas del ciclo del cultivo.

La conductancia estomatal es controlada por procesos fisiológicos complejos y depende de las variables ambientales: la radiación fotosintéticamente activa (*PAR*), el déficit de presión de vapor (*DPV*), la temperatura del aire, la concentración de CO_2 y la disponibilidad de aire en el suelo (Baldocchi et al., 1991). Distintos autores han tratado de establecer patrones de comportamiento de *GS* en función de estas variables ambientales. Amundson et al., (1995) buscaron la relación entre el porcentaje de la *GS* máxima medida en el envés frente a la radiación fotosintéticamente activa (*PAR*) en pastos tropicales. Encontraron que bajo sombra, haz y envés se comportan igual, pero a pleno sol la medición en el envés era más consistente.

González-Fernández *et al.*, (2010) se basaron en la aproximación multiplicativa propuesta de Jarvis, (1976) y modificada por Emberson et al., (2000), siguiendo el modelo EMEP DO_3SE . En este modelo se expresa *GS* como función de la máxima conductancia específica observada, normalizada de 0 a 1, en relación a las variables ambientales fenología, radiación, temperatura, déficit de presión de vapor, y déficit de humedad del suelo.

En el presente trabajo, las mediciones de la *GS* se realizaron en el envés de la hoja con una frecuencia de tres veces por semana en las horas de la mañana durante todo el ciclo del cultivo. Por otro lado, las medidas obtenidas de *GS* se transformaron por su logaritmo. Con base a las observaciones del control se normalizaron los valores máximos tomando un rango de hasta una desviación estándar de la media. Los valores mínimos fueron establecidos experimentalmente cuando la lectura del conductímetro se detuvo por cierre de estomas, y tomando su promedio y valores inferiores como cero, los valores restantes se establecieron como su proporción entre el máximo y el mínimo.

La programación y el seguimiento del riego de los experimentos se estableció mediante libros de cálculo *Excel*® programados con algoritmos apropiados desde los cuales se determinó y controló el porcentaje de humedad del suelo para cada unidad experimental, con base en la ecuación de balance hídrico a nivel diario, (Allen et al., 1998), Las unidades experimentales se manejaron como lisímetros individuales con medición semanal de los pesos y el volumen de agua presente en el suelo, los cuales también se usaron para ajustar las estimaciones del balance hídrico y también se calculó el riego requerido por unidad experimental. Además se determinaron las variables respuesta de *CD*, *GS*, *AP*, *AH*, con una frecuencia de tres veces por semana y los estados fenológicos.

3.7.4 Variables y parámetros de AquaCrop sobre estrés hídrico

Las siguientes son las variables y parámetros de estrés principales usadas por el modelo AquaCrop.

3.7.4.1 Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral superior

Unidades: ($p_{exp,superior}$, %)

Tipo: Conservativo

Definición: Fracción de agotamiento del agua aprovechable total en el suelo (*AAT*) al cual se inicia la afectación del crecimiento o expansión de la hoja o el dosel (Cap 3, pg. 17 Manual de AquaCrop (Steduto et al., 2009) El crecimiento de la hoja inicia a ser afectado.

Metodología: con base en el experimento bajo invernadero (numeral 3.7.3) y considerando las respuestas de *CD*, *AP*, y *AH*. Se consideraron los tratamientos experimentales de las Tablas 3.19, para avena forrajera y para raigrás las Tablas 3.20 y 3.21, en donde se redujo gradualmente la cantidad de agua aplicada, hasta verificar el punto en el que se detiene completamente el crecimiento de las hojas. Luego se evaluó la fracción de agotamiento del agua aprovechable en el cual se presentó este nivel.

3.7.4.2 Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral inferior

Unidades: ($p_{exp,inferior}$, %)

Tipo: Conservativo

Definición: Fracción de agotamiento del agua aprovechable total en el suelo (AAT) que puede ser agotada de la zona de raíces antes de que se detenga completamente la expansión de la hoja o el crecimiento del dosel. El crecimiento de la hoja se ve afectado completamente.

Metodología: En el mismo experimento anterior se mide el nivel de agotamiento en el cual la hoja o el crecimiento del dosel ya no se desarrolla más o incluso tiende a disminuir. Se determinó midiendo la CD, AP y el AH observando su desarrollo con respecto al testigo sin limitaciones de humedad.

3.7.4.3 Factor de forma para estrés hídrico para la expansión del dosel

Unidades: (f_{exp} , Adim)

Tipo: Conservativo

Definición: Denota el efecto del comportamiento del estrés hídrico sobre la reducción de expansión del dosel por medio del coeficiente del estrés hídrico (K_s). Este factor de forma es un parámetro programado el cual puede ser ajustado por el usuario. El factor f_{exp} responde a los comportamientos presentados en la Figura 2.14. (ver apartado 2.9 Estrés hídrico).

Metodología: Al relacionar el coeficiente de estrés hídrico K_s con el factor de forma de la expansión del dosel por medio de las ecuaciones [2.46] y [2.51], se puede ajustar el f_{exp} . A partir de la diferencia de las ecuaciones exponenciales con las tendencias experimentales en los comportamientos de reducción del dosel por estrés hídrico, se puede obtener el mejor ajuste del factor de forma. Para cada nivel de restricción hídrica se determinó la expansión del dosel, o la variación de sus variables alométricas CD , AP y AH_y se observó su reducción por efectos del estrés hídrico. Con la información de los coeficientes de estrés hídrico y las respectivas humedades, se generó una curva parecida a las presentadas en la Figura 2.14. Al ajustar los valores obtenidos a partir de las ecuaciones mencionadas, con las observaciones experimentales se obtuvo el factor f_{exp} . El valor con error cercano a cero se determinó como el factor de forma.

3.7.4.4 Umbral de agotamiento de agua en el suelo para control estomatal - Umbral superior

Unidades: (p_{sto} , %)

Tipo: Conservativo

Definición: Fracción del agua aprovechable de total en el suelo (AAT) al cual el estoma inicia su cierre. Los estomas se muestran mucho menos sensibles al estrés hídrico en comparación del crecimiento expansivo de la hoja.

Metodología: En el mismo experimento del numeral 3.7.3, con niveles de control de humedad altos y tratamientos altamente restrictivos en dosificación hídrica según las Tablas 3.19 para avena forrajera, y 3.19 y 3.20 para raigrás se generan los niveles de humedad a los cuales se presentaron respuestas al cierre estomático.

Las unidades experimentales fueron supervisadas tres veces por semana con porómetro para la medición de la conductancia estomática y los tratamientos se compararon con las unidades control las cuales no tuvieron restricciones hídricas.

Al graficar los comportamientos de ambos tipos de unidades, tanto las sometidas a estrés hídrico como las unidades control, se puede observar los puntos de inflexión que separan las curvas de las unidades con restricción hídrica de las curvas control, de esta forma se puede determinar las humedades observadas para cierre estomático.

Con la información del nivel de AAT al punto de inicio del cierre estomático y su respectivo coeficiente de estrés hídrico K_s , el cual se determinó cercano a 1, se estimó el punto "c" de acuerdo a la Figura 2.14.

La Tabla 2.7 muestra las clases reportadas por AquaCrop para la clasificación de la respuesta del cierre estomático por causa del estrés hídrico. El valor de p_{sto} para las especies reportadas por AquaCrop hasta la presente varía desde 0,5 hasta un valor de 0,7.

3.7.4.5 Factor de forma para estrés hídrico para control estomático.

Unidades: (f_{sto} , Adim)

Tipo: Conservativo

Definición: Determina la forma de la curva de $K_{S_{sto}}$, entre los umbrales superior e inferior para control estomatal estableciendo la magnitud de los efectos del estrés hídrico en los procesos del desarrollo del dosel.

El coeficiente de estrés hídrico para cierre estomático es $K_{S_{sto}}$. El factor de forma para describir el proceso de cierre estomático puede ser lineal convexo, cóncavo o logarítmico. El factor de forma puede tener un rango desde +6 (extremadamente convexo) a -6 (extremadamente cóncavo).

En la Figura 2.14 se observa que el coeficiente estomatal "gs" va desde un valor "c" hasta punto de marchitez permanente. El valor "d" es cercano al pmp.

El coeficiente que define la forma de la curva de cierre estomatal que se presenta en la Figura 2.8 muestra el comportamiento del coeficiente de estrés hídrico ($K_{S_{sto}}$) en función del nivel de agua aprovechable total, para el umbral de conductancia estomatal (gs).

Metodología: Con base en los experimentos de estrés hídrico descritos en el numeral 3.7.3, a partir del punto identificado como el umbral de agotamiento de agua en el suelo para control estomático, se inicia el proceso de construcción de la curva de la Figura 2.8 con restricciones cada vez más severas en la disponibilidad hídrica en el suelo de acuerdo a los tratamientos de las Tablas 3.19 a 3.21. La variable de respuesta observada fue la conductancia estomatal.

Se observó el comportamiento de la conductancia estomática de cada uno de los tratamientos a través del ciclo del cultivo de acuerdo a lo explicado en el numeral 3.7.3 y luego se construyó la relación entre el nivel de agotamiento y el AAT como proporción de ésta.

Esto se realizó por medio del coeficiente de estrés hídrico (K_s) para todos los tratamientos, los resultados experimentales se contrastaron con la curva de conductancia estomática teórica ajustando su factor de forma con base en la ecuación [2.46].

El factor de forma para estrés hídrico para control estomatal de las especies que han sido determinadas por AcuaCrop hasta la presente varían de 2,5 a 6.

3.7.4.6 Umbral de agotamiento de agua en el suelo para senescencia del dosel - Umbral superior

Unidades: (p_{sen} , %)

Tipo: Conservativo

Definición: Fracción del agua aprovechable total en el suelo (AAT) que puede ser agotada de la zona de raíces antes que la senescencia sea activada. Se puede obtener un ajuste a partir de la ecuación [2.54].

Metodología: Se debe identificar en qué nivel de agotamiento de agua se inicia el estrés hídrico que dispara la senescencia, para ello se genera un experimento con un aumento paulatino del nivel de agotamiento de agua, es decir del estrés hídrico, hasta obtener el inicio de la senescencia temprana del dosel.

Cuando el dosel inicia a fenecer antes de la senescencia por edad. Se determina la humedad existente. Al relacionar esta humedad con el AAT, se obtiene el umbral de agotamiento de agua en el suelo para senescencia del dosel.

En la Figura 2.14 se ubica esquemáticamente el valor de agotamiento de agua en el suelo para senescencia del dosel como d , el cual se ubica después del inicio de la reducción del dosel y del punto de cierre de estomas.

Esta variable fue determinada por medio de estimación en la etapa de calibración y validación del modelo tanto para la avena forrajera como para raigrás. Para el caso de los cultivos calibrados y para AquaCrop este umbral varía desde un valor de 0,2 para el caso del teff² hasta 0,98.

3.7.4.7 Factor de forma para estrés hídrico para senescencia del dosel

Unidades: (f_{sen} , Adim)

Tipo: Conservativo

Definición: Determina el comportamiento de la senescencia del dosel bajo estrés hídrico. f_{sen} , se calcula de la misma forma como en la ecuación [2.25] y se comporta de acuerdo a lo presentado en las figuras 2.8 y 2.14. Se aplica de la misma manera para cultivos forrajeros y pasturas. Sin embargo, siempre que el dosel es segado en cada corte, un nuevo dosel se desarrolla, el cual cancela el envejecimiento. El proceso de marchitamiento nuevamente se puede describir por la ecuación [2.23].

Cuando la senescencia es activada, la transpiración y capacidad fotosintética de la porción verde del dosel cae más marcadamente con el tiempo. Esta es simulada por multiplicación de $Kcb_{x,adj}$ con el factor de ajuste, f_{sen} , el cual declina de 1 al inicio de senescencia ($CD = CDx$) a 0 cuando no hay cobertura del dosel verde remanente ($CD = 0$). Con base en las ecuaciones [2.24] y [2.25] se determina el proceso de senescencia completo. Ver numeral 2.4.1.4.2.

La Figura 2.6 muestra el factor de senescencia (f_{sen}) para varios grados de marchitez o relación de la cobertura del dosel con respecto a la cobertura máxima (CD/CDx) y varios valores del exponente 'a'

² *Eragrostis tef*, llamado comúnmente **teff** o **tef**, es una especie de planta herbácea anual de la familia de las poáceas de semilla comestible que se asemeja a los cereales y que se cultiva principalmente en Etiopía y Eritrea pero también en la India y Australia.

Metodología: Se puede identificar el nivel de agotamiento de agua que activa la senescencia del dosel al continuar con la disminución del nivel de agotamiento a fin de ir generando la curva que describe la senescencia del dosel de la Figura 2.14, al reducir el agua remanente del suelo generando una fracción cada vez más pequeña del agua aprovechable, hasta alcanzar el punto de marchitez permanente.

Luego se puede construir la curva de la Figura 2.14 al relacionar el agua aprovechable total o el agotamiento relativo, fracción de agotamiento de agua en relación con la cantidad total que el suelo puede contener entre el umbral superior e inferior que define los límites del agua aprovechable. Esta curva se puede ajustar a la ecuación [2.50] por medio de la variación del coeficiente f_{sen} con el mejor ajuste del factor de forma usando el error cuadrático medio de los coeficientes de estrés hídrico de los parámetros fuente observados por medio de la ecuación [3.8]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ks_{f_{exp}} - Ks_{obs})^2}{n(n-1)}} \quad [3.8]$$

Dónde: $RMSE$: Error cuadrático medio; $Ks_{f_{exp}}$: valor de Ks para la ecuación estimada del parámetro fuente respectivo del factor de forma f_{exp} ; valor de Ks observado; n : número de valores experimentales observados.

El mejor ajuste del coeficiente logrado para la curva experimental en el cual el error entre los valores experimentales y la curva teórica es mínimo, es el que determina el factor de forma para estrés hídrico para senescencia del dosel. Esta variable fue determinada por medio de estimación en la etapa de calibración y validación del modelo tanto para la avena forrajera como para raigrás.

4. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA AVENA FORRAJERA Y RAIGRAS

4.1 Aspectos Preliminares

El modelo AquaCrop posee varios sub-módulos que manejan varios aspectos sobre las variables de entorno como el clima, el cultivo, la irrigación, manejos de campo, los perfiles del suelo y el nivel freático, (Figura. 4.1).

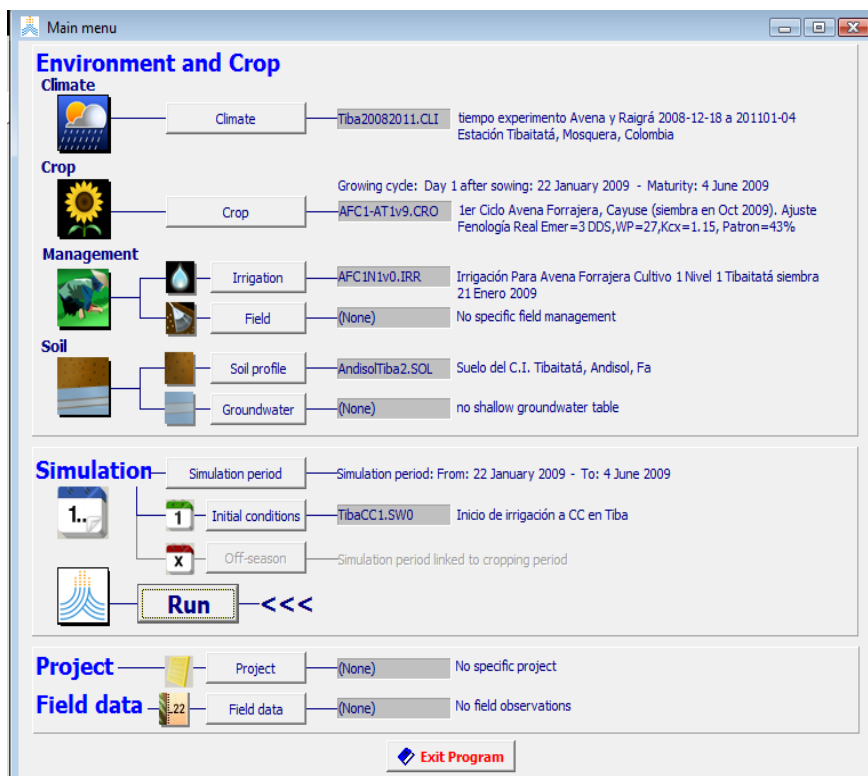


Figura 4.1 Menú principal del modelo AquaCrop en dónde se observan los módulos de clima, cultivo, irrigación, manejos de campo, perfiles de suelo y nivel freático (entre otros).

Los experimentos de campo explicados atrás determinaron casi la totalidad de estos grupos de variables entre las que se destacan las variables externas, las variables de estado, y los parámetros conservadores y no conservadores (estos últimos de ajuste local). A continuación se describe la conformación de cada uno de estos módulos y la determinación de sus variables de entrada.

4.1.1 Módulo de Clima

El módulo de clima se compone de cuatro archivos a saber: Precipitación, Evapotranspiración de referencia (ET_0), temperaturas, y CO_2 . El archivo de precipitación fue conformado con base en la información de precipitación obtenida durante la etapa experimental en el mismo lote en dónde se establecieron los experimentos en el cual está emplazada la estación agrometeorológica de Tibaitatá del IDEAM.

Se usaron registros diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima, humedad relativa y se calculó la evapotranspiración de referencia con el programa *ET₀ Calculator® ver 3.1* de la FAO (FAO, 2009), este programa calcula la ET_0 por el método de FAO Penman-Monteith (Allen et al, 2006), y las variables climáticas de entrada fueron las obtenidas directamente de la estación climática.

Dentro del módulo de clima se considera la concentración de CO_2 en la atmósfera, los registros utilizados fueron establecidos por el modelo con base en los registros reales de CO_2 obtenidos en el laboratorio Mauna Loa (Hawai) en un archivo interno que se puede seleccionar de AquaCrop.

4.1.2 Módulo de Cultivo

Este archivo fue conformado a partir de los resultados obtenidos para cada uno de los cultivos estudiados y que se presentaron en las Tablas 4.29 y 4.30, cuyos resultados se explicaron a profundidad en el capítulo de resultados, los cuales fueron la base para la calibración y validación del modelo AquaCrop para los cultivos de avena forrajera y raigrás.

El módulo para especies forrajeras aún no ha sido abierto en la última versión del Modelo AquaCrop (Ver 4.0), por lo tanto fue necesario usar el selector de “cultivos de producción de frutos y granos”.

Para avena forrajera se trabajó sobre la base de un archivo para cultivos de grano y para las variables que no fueron evaluadas se usaron los valores por defecto del modelo o se reemplazaron por variables ciertas inherentes a la avena, procedentes de la base de datos de ECOCROP (FAO, 1993-2007). Cabe destacar que la mayoría de variables fueron establecidas experimentalmente.

Para el caso de raigrás debido a que dicho cultivo se establece también como una gramínea se usó el mismo selector del tipo de cultivo, sin embargo, a diferencia de la avena, este cultivo tiene la característica de ser perenne, por lo cual fue necesario manejar cada corte por separado truncando el desarrollo simulado por AquaCrop hasta el momento del corte respectivo. De manera que por ejemplo: para el cultivo 1 de raigrás fue necesario hacer una simulación independiente para cada corte, iniciando desde la siembra hasta el corte séptimo, (siete simulaciones para ese cultivo, cada vez) de igual forma se desarrolló para el segundo cultivo para el cual se llegó hasta el cuarto corte.

4.1.3 Módulo de Perfil del Suelo

Los valores de los perfiles de suelo reales obtenidos del laboratorio o de las pruebas de campo mostrados en las Tablas 5.5 y 5.6 y el perfil del Anexo A, fueron la base de los valores establecidos para el modelo de acuerdo al suelo real usado y el respectivo cultivo. El suelo experimental se describió con detalle en el apartado “5.2 Suelos” y en el Anexo A.

Debido a que en la etapa experimental se trabajó sin limitación de nutrientes en el suelo de acuerdo a lo consignado en el apartado 5.2.1 las simulaciones se hicieron considerando una fertilización completa, es decir sin limitaciones de fertilidad, tanto para avena forrajera como para raigrás.

4.1.4 Módulo de Irrigación

Se conformó con base en los registros de campo establecidos durante la etapa experimental para cada uno de los ensayos realizados en los ciclos de los cultivos respectivos, considerando los niveles N1 es decir los de mayor irrigación con la respectiva correspondencia de sus producciones de acuerdo a las Tablas 5.13 a 5.27. Para cada ciclo de cultivo se estableció un archivo independiente según la irrigación real realizada durante la etapa experimental.

4.1.5 Módulos de Manejo de Campo y Nivel Freático

Los manejos de campo, y los niveles freáticos se usaron principalmente en la posterior etapa de análisis de sensibilidad del modelo, o para el caso de los cultivos de avena forrajera que fueron afectados por influencia del nivel freático durante el periodo de “La Niña” del año 2010 dada su profundidad radical y los excesos hídricos que se presentaron. La condición inicial de las simulaciones siempre fue a capacidad de campo como también se hizo en la etapa experimental, puesto que la metodología del gradiente así lo exige.

4.2 Análisis de sensibilidad de variables

Antes de iniciar la calibración del modelo AquaCrop se realizó un análisis de sensibilidad con las variables de entrada del cultivo, tanto para el caso de avena forrajera como para Raigrás, para este último cultivo se diferenció entre el ciclo de siembra a primer corte y los cortes posteriores.

Para cada caso se determinaron los rangos de los valores en los que cada parámetro podía establecerse, determinando su nivel mínimo y máximo probable, para establecer estos valores fue necesario tener en cuenta varios aspectos: los niveles experimentales encontrados en campo para cada una de las variables manejadas, los valores físicos probables entre los cuales podría una variable desempeñarse, considerando los valores extremos físicamente posibles, y se tuvieron en cuenta además los rangos de variación de algunas variables que por defecto maneja el modelo AquaCrop.

Con base en las variables más probables de acuerdo a los resultados de campo se establecieron las variables base por cultivo, según las Tablas 5.29 y 5.30 y se seleccionaron dos periodos básicos de desarrollo de los cultivos, el primero igual al de un cultivo realizado experimentalmente y el segundo un periodo de bajas precipitaciones, con el objeto de ver la expresión máxima de las variables de estrés hídrico. Una vez establecidos los límites mínimo y máximo de cada una de las variables se inició el proceso del análisis de sensibilidad de acuerdo a lo establecido en la Figura 4.2, para el desarrollo de este proceso se consideró tres grupos de variables, los cuales se muestran en el diagrama.

4.3 Proceso de calibración

El proceso de calibración del modelo se realizó con base en el esquema del flujograma presentado en las Figura 4.2 y 4.3, este proceso comprendió dos grandes etapas:

La primera hace referencia al análisis individual y por grupos de los parámetros y variables del cultivo, en primer lugar se abordó la conformación de los archivos de entrada al modelo de cada uno de los bloques o módulos que maneja éste. En estos archivos se establecieron las variables de clima, cultivo, suelos, irrigación, manejo, niveles freáticos, condiciones iniciales y observaciones de campo referentes principalmente a los resultados de la biomasa como materia seca.

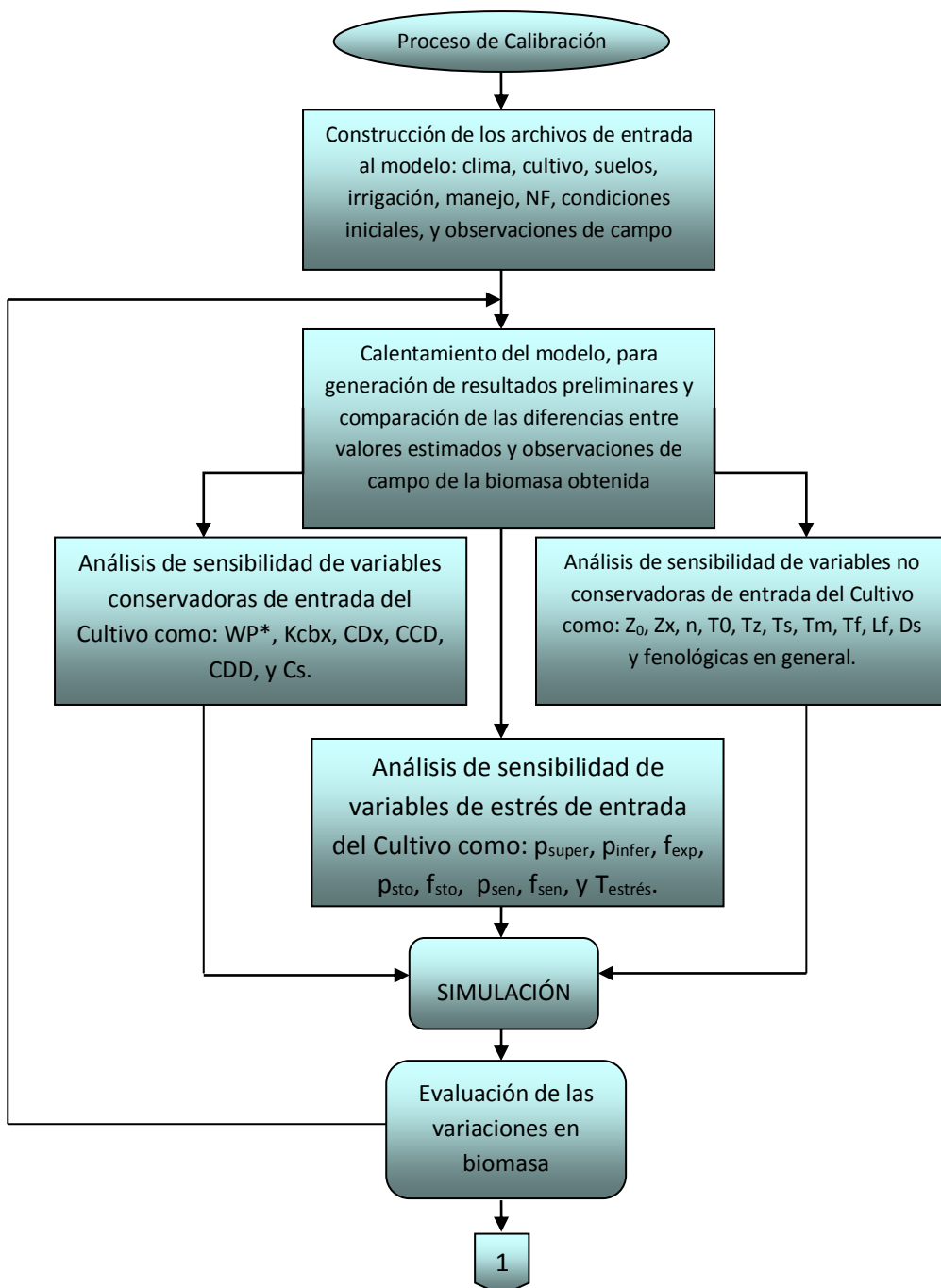


Figura 4.2 Proceso de calibración del modelo AquaCrop para los cultivos de avena forrajera y raigrás. Primera Parte.

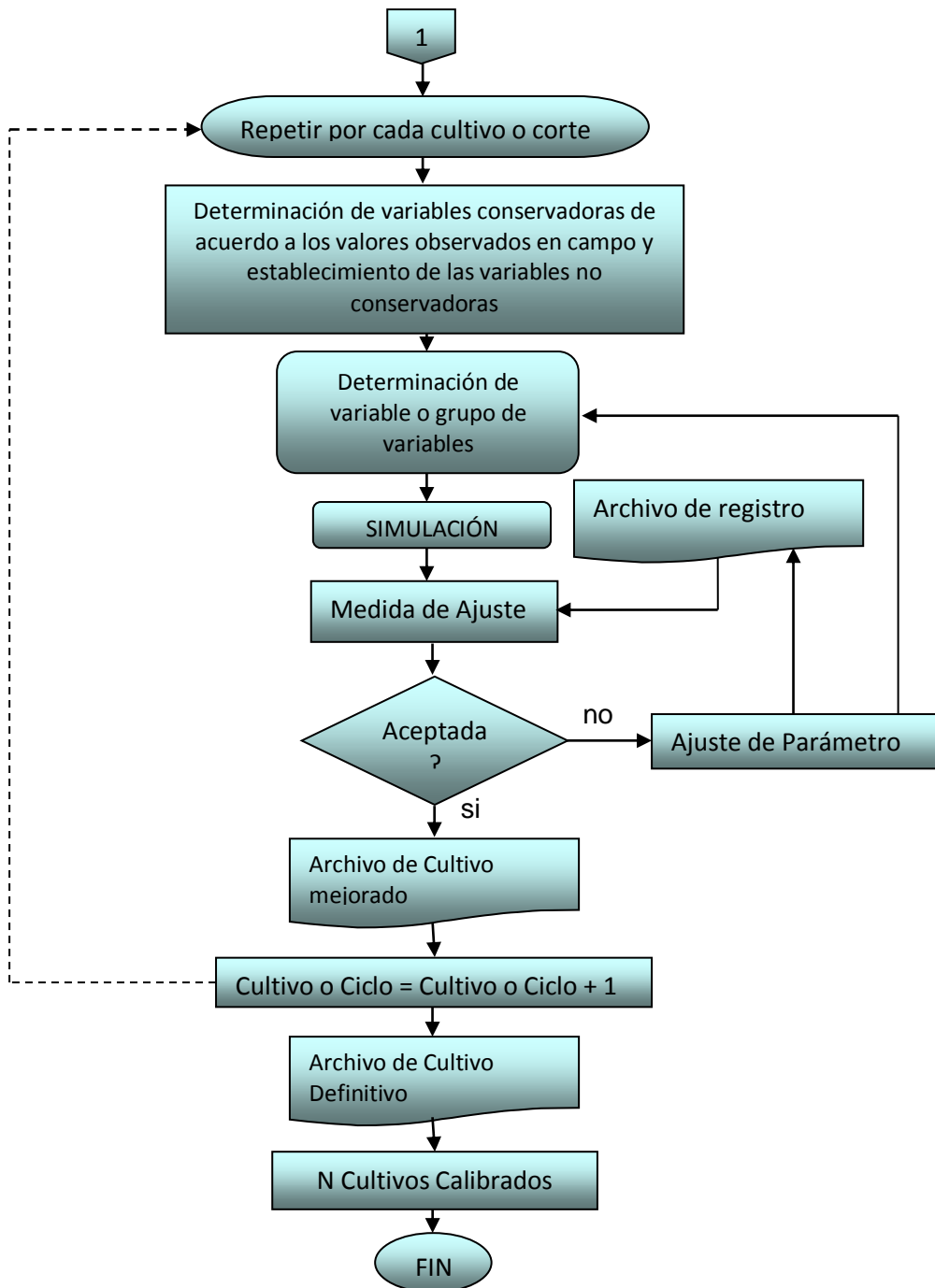


Figura 4.3 Proceso de calibración del modelo AquaCrop para los cultivos de avena forrajera y raigrás. Parte final.

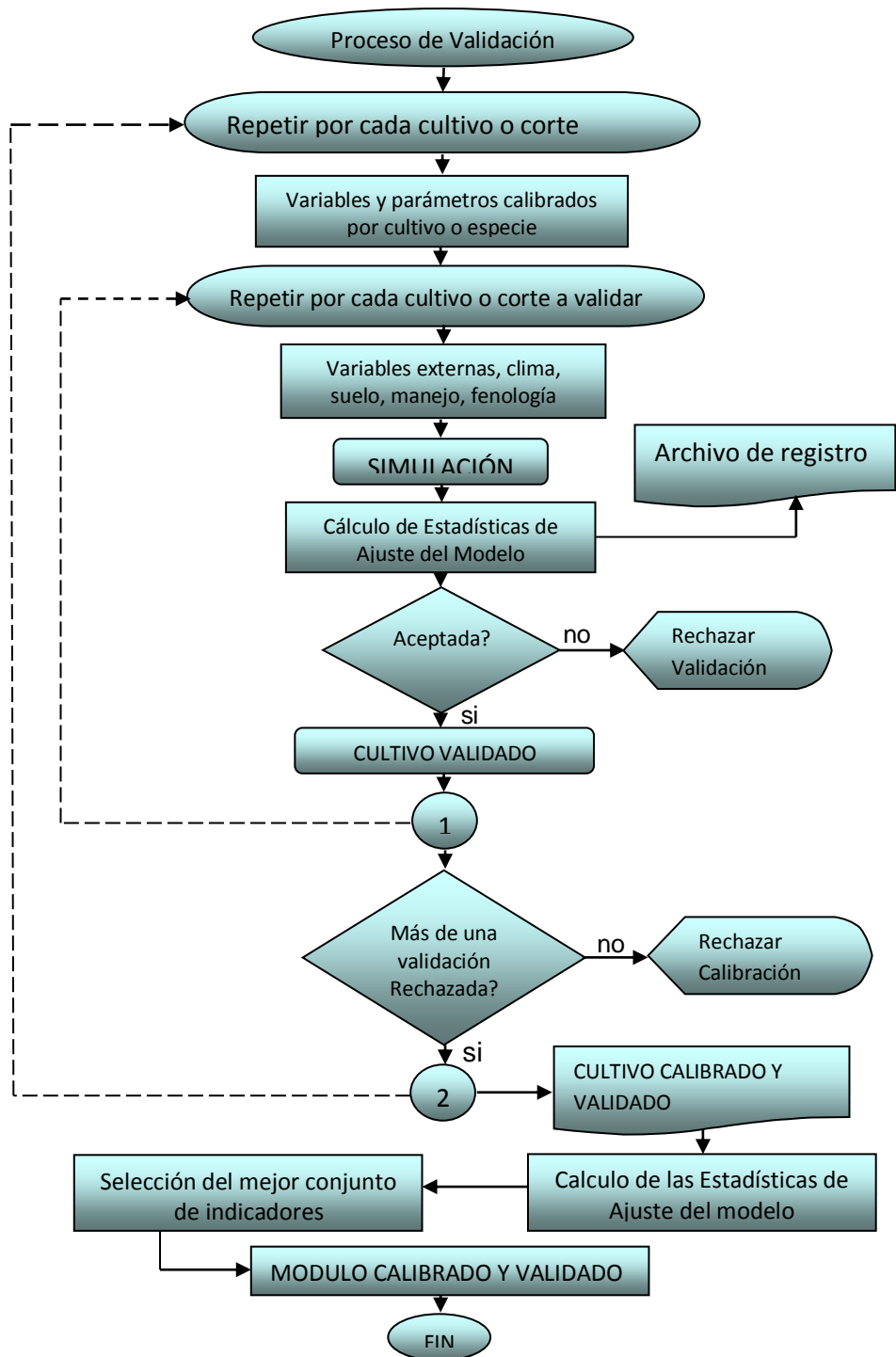


Figura 4.4 Proceso de validación del modelo AquaCrop para los cultivos de avena forrajera y raigrás.

Las variables de respuesta del modelo como cobertura del dosel, fueron establecidas bajo el procedimiento de ajuste de los valores observados y la determinación de los coeficientes de Crecimiento del dosel (CCD), Coeficiente de declinación del dosel (CDD), Cobertura del dosel máxima (CDx) y Cobertura del dosel a emergencia del 90% (Cs) se determinaron por observaciones de campo y con la metodología determinada en el apartado *3.6 Metodología para la determinación de los parámetros y variables del cultivo para el modelo AquaCrop*. La variable de respuesta del rendimiento no fue tomada en cuenta aquí debido a que los cultivos forrajeros no obtienen cosecha de producto como tal.

En esta etapa de calentamiento del modelo se establecieron los rangos de variación físicos y/o prácticos que cada una de las variables del cultivo, de entrada al modelo podría tolerar (rangos de tolerancia) y se verificó el grado de acercamiento de la estimación de la biomasa por el modelo con las variables “crudas” y la variación que la variable de respuesta (biomasa, MS) alcanzaba bajo ciertas variaciones de uno o más parámetros o variables de entrada. (ver análisis de sensibilidad de variables).

Se manejaron tres grandes grupos de variables como se muestra en la Figura 4.2, el primer grupo hace referencia a las variables conservadoras de mayor importancia o peso en la determinación de la biomasa, el segundo grupo hace referencia a variables secundarias conservadoras o variables no conservadoras y las variables fenológicas del cultivo, y en el tercer grupo se estudiaron las variables de estrés en general, incluyendo el estrés por temperatura.

En la segunda parte del proceso presentado en la Figura 4.3 se realizó la calibración de los cultivos de avena forrajera y raigrás propiamente dicho considerando las variables conservadoras observadas en campo como variables de entrada del modelo, y se ajustaron las variables no conservadoras teniendo en cuenta que estuvieran dentro de los rangos o límites observados en campo haciendo los respectivos ajustes que se requerían, las variables obtenidas se iban mejorando (es decir acercando a las observadas, en función de las respuestas del modelo a la producción de biomasa) a medida que se involucraban otras variables o se refinaba el acercamiento de las simulaciones, esto se hizo con cada uno de los cultivos o cortes.

Finalmente se establecieron las variables calibradas conservando la mayoría de los resultados encontrados en campo, o los rangos dentro de los cuales dichas variables se desarrollaron. Para el caso del Coeficiente de crecimiento del dosel (CCD), fue necesario establecer deltas de crecimiento por periodos cortos para generar una curva de crecimiento del dosel con los máximos

desarrollos observados en campo, de esta manera se garantizó que en cualquier oportunidad la biomasa potencial obtenida no fuera superada por ninguno de los cultivos experimentales, a partir de allí se ajustó finalmente la curva de crecimiento del dosel y se establecieron dichos coeficientes tanto para avena forrajera como para raigrás.

4.4 Proceso de validación

Para la validación se usaron todos los cultivos restantes a excepción del calibrado, determinando una combinatoria de cada uno de los cultivos calibrados con el resto de cultivos o cortes experimentales. Como criterio de aceptación de la validación se determinó que los indicadores estadísticos entraran dentro del rango de valoración de “aceptables”. Además, si más de un cultivo o corte fuera rechazado, también el proceso de calibración era rechazado y se iniciaba el proceso completo desde la calibración. Es decir, que todos y cada uno de los cultivos o cortes fueron validados a partir de cada cultivo calibrado, para seleccionar finalmente el conjunto que menor error presentara en promedio, teniendo en cuenta los estimadores de ajuste estadísticos manejados.

En esta etapa de validación de los cultivos (Figura 4.4) se llevó a cabo la combinatoria de seleccionar cada cultivo calibrado y validarlo con cada uno de los otros cultivos experimentales. Para este procedimiento se tuvieron en cuenta las variables de clima, suelo, riego, manejo y fenología correspondientes para cada cultivo con el objeto de lograr la validación.

Una vez calibrados y validados los cultivos de raigrás y avena forrajera se calcularon los estadísticos de ajuste del modelo para todos los casos y se seleccionó el grupo de cultivos (calibrado vs validados) que mostró los mejores resultados.

Los indicadores estadísticos que se manejaron fueron: Coeficiente de determinación (R^2), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), la raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado (NRMSE), el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF), y el índice de ajuste de Willmott (d).

4.5 Modelo PEST

Para todos los procesos de calibración y validación se contó con la ayuda del modelo PEST (*Model Independent Parameter Estimation*) Ver. 5. (Doherty, 2005) (Pest, es un arcónimo de *ESTimation of Parameter*). Este cuenta con un software que es especializado para la estimación de parámetros no lineales y es aplicable a cualquier tipo de problema, modelo o sistema que requiera de interpretación, calibración, o análisis predictivo.

PEST ajustará los parámetros del modelo y/o excitaciones hasta que el ajuste entre los resultados del modelo y las observaciones de campo o de laboratorio sean optimizadas considerando la menor ponderación de las diferencias entre ellas.

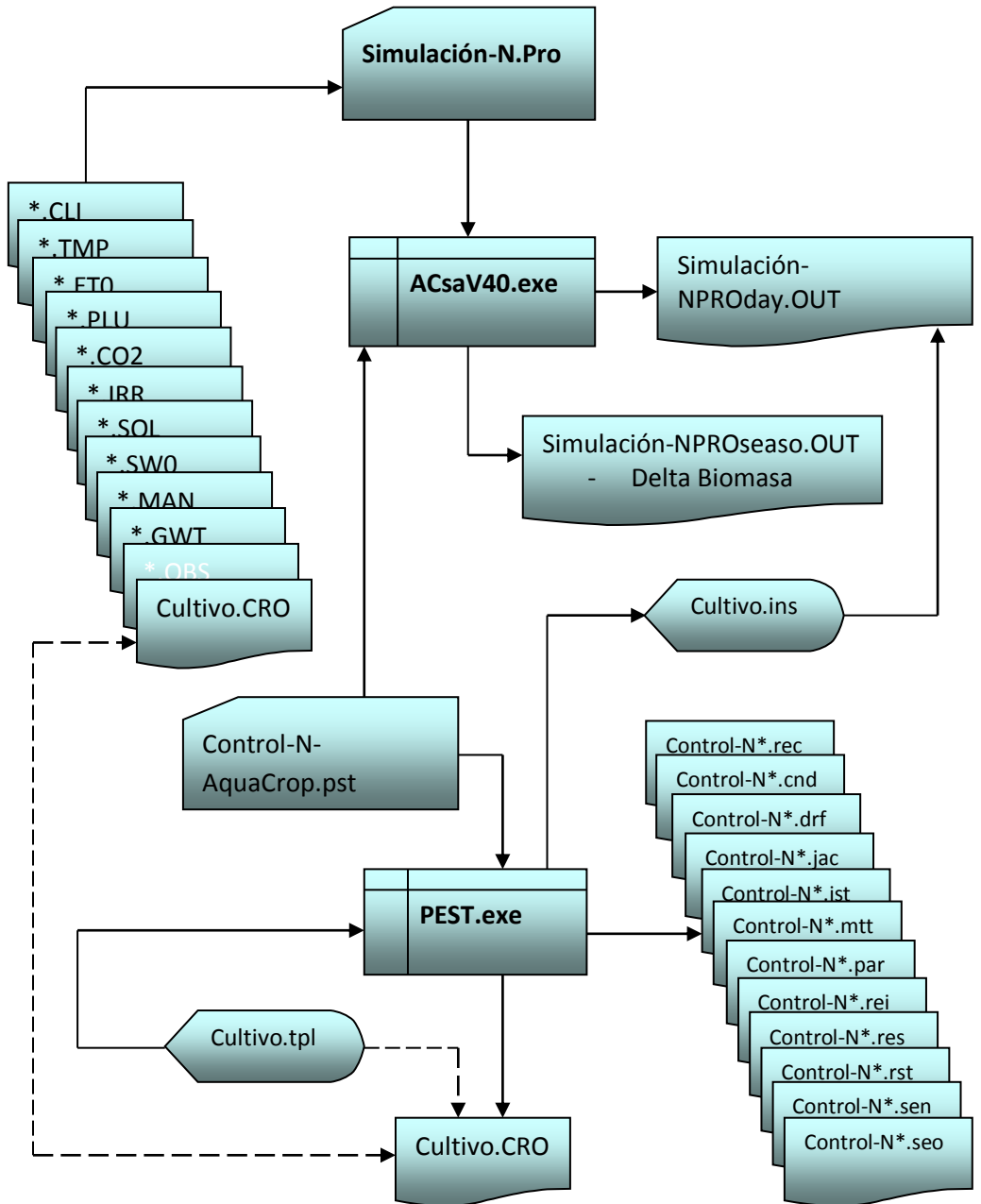


Figura 4.5 Acople realizado para las simulaciones de calibración del modelo AquaCrop por medio del control del modelo PEST.

El modelo PEST puede adaptarse a cualquier modelo o software que pueda requerir cualquiera de los procesos mencionados. Para ello PEST diferencia entre cuatro tipos de datos: Los datos fijos, los parámetros, las excitaciones y los datos de control. (ver: User Manual PEST, Doherty, 2005).

Los datos fijos definen el sistema, por ejemplo en el modelo AquaCrop las características del suelo, su profundidad sus capas, etc. Los parámetros son las propiedades del sistema, por ejemplo la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, la conductividad hidráulica. Un modelo puede tener muchos parámetros, cada uno perteneciente a un atributo particular del sistema (por ejemplo el suelo) que afecta a su respuesta por causa de una entrada o excitación.

Las excitaciones son las cantidades que dan “unidad” al sistema, por ejemplo en el modelo AquaCrop los datos climáticos, el riego, los consumos hídricos, etc. Los datos de control proporcionan ajustes para el método de solución numérica por el cual las ecuaciones del sistema se resuelven. Por ejemplo el balance hídrico en el modelo AquaCrop, la frecuencia de los datos temporales, el día, el mes, el ciclo completo, en la malla del balance hídrico por elementos finitos, las profundidades de los nodos de la malla (por ejemplo: cada 5, 10, 15 cm). Ver: Doherty, (2005).

Para el caso particular del presente trabajo el modelo PEST fue usado con base en el diagrama presentado en la Figura 4.5. En la cual se muestra el acople logrado entre los dos modelos. El diagrama usa las convenciones establecidas de BPP (buenas prácticas de programación), las flechas indican la dirección del flujo de la información. Los módulos ejecutables *.exe se conectan entre sí por medio de archivos compartidos o de control.

En general el modelo PEST se debe acoplar a modelos o software que puedan ejecutarse automáticamente es decir, con programación de ejecutables “plug-in” sin asistencia del usuario en tiempo de ejecución, por lo cual para estos procesos se utilizó la versión plug-in de AquaCrop, o ACsaV40.exe ver 4.0 emitida en noviembre de 2013 por FAO.

Los modelos se acoplan de la siguiente manera: El modelo ACsaV40 lee la serie de archivos tradicionales de AquaCrop, *.CLI, *.TMP, *.ET0, *.PLU, *.CO2, *.IRR, *.SOL, *.SW0, *.SW0, *.MAN, *.GWT, *.OBS, y del Cultivo.CRO. El archivo “maestro” “Simulación-N.PRO” le dice a AquaCrop en dónde están ubicados todos estos archivos y sus nombres, establece las fechas de inicio y finalización de las simulaciones y de los ciclos del cultivo, además fija algunas características y condiciones iniciales de la simulación.

El modelo AquaCrop lee todos los archivos de entrada ejecuta la simulación y expide además de otros archivos el archivo Simulación-NPROday.OUT en el cual se consigna la biomasa acumulada incluyendo otros resultados parciales y totales y algunas variables de importancia.

Por otro lado, el archivo Simulación - NPROseason.OUT, reporta el delta de biomasa diario, junto con otras variables con resultados parciales y totales obtenidos en la simulación.

Por otro lado, el modelo PEST maneja un archivo “control” que ejecuta el modelo subordinado, en este caso AquaCrop, y determina sus condiciones de ubicación, las variables de parámetros, o grupos de parámetros.

El archivo control también define las variables observadas, sus rangos de variación, su tipo, y sus ponderaciones o grado de importancia de cada una de ellas, y una serie de archivos que determinan varios aspectos a tener en cuenta en la simulación, así como sus ubicaciones o caminos.

El archivo de control es leído por el modelo PEST y le dice a éste los detalles del proceso de simulación a llevar a cabo, por medio de dos archivos auxiliares:

- (1) Cultivo.tpl el cual determina los parámetros de entrada del cultivo y en especial los nombres y las posiciones de las variables establecidas en la simulación, y
- (2) Cultivo.ins que hace lo propio con los archivos de salida del modelo AquaCrop, haciendo énfasis en las variables de interés es decir la “biomasa”, con el objeto de compararlas con las observaciones de campo consignadas en el archivo de control de PEST.

El archivo Cultivo.tpl es similar al archivo Cultivo.CRO, de AquaCrop pero con las observaciones de las variables de interés identificadas. El modelo PEST accede al archivo de entrada de AquaCrop estableciendo los valores de las variables de interés de modo que éste genere los resultados correspondientes iterativamente hasta llegar a ajustar los valores simulados lo más cercanos posible de los valores observados correspondientes.

Al final de las múltiples simulaciones que corren conjuntamente PEST – AquaCrop, PEST expide una serie de archivos de reportes del proceso a saber: Control-N*.rec, *.cnd, *.drf, *.jac, *.jst, *.mtt, *.par, *.rei, *.res, *.rst, *.sen, y *.seo, en dónde se destacan el archivo *.mtt en el que se consignan las desviaciones estándar, las matrices de covarianza, de correlación, de autovectores normalizados de la matriz de covarianza, y los autovectores de todas las variables que se examinaron. En especial el archivo *.rec que

resume todo el proceso y los resultados obtenidos de todas las simulaciones realizadas y los resultados finales a que se llegó con cada una de las variables examinadas. Incluyendo sus resultados más aproximados, los valores medidos, los calculados, el residuo, el peso, la suma de los residuos de los cuadrados ponderados, el coeficiente de correlación y otras estadísticas que relacionan los valores observados con los estimados del proceso de optimización. Para mayor información sobre el proceso de optimización de variables para un modelo en particular, ver el Manual del Usuario de PEST. (Doherty, 2005).

4.6 Indicadores estadísticos Usados

Una vez terminado el proceso de calibración y validación para los dos cultivos estudiados es necesario establecer el grado de acercamiento y precisión con el cual AquaCrop podría hacer estimaciones a partir de estos módulos ajustados. Para lo cual se usaron los indicadores estadísticos disponibles que son a la vez recomendados en el manual de AquaCrop (Raes, et al. 2009), cada uno de ellos tiene fortalezas y debilidades, por lo cual se recomienda su uso conjunto con el fin evaluar suficientemente el desempeño del modelo (Willmott, 1984; Legates y McCabe, 1999) citados por Raes, et al. (2009).

4.6.1 Coeficiente de determinación (R^2)

Es definido como el valor al cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson. Significa la proporción de la varianza en los datos medidos explicados por el modelo, o pueden también ser interpretados como la relación al cuadrado entre la covarianza y la desviación estándar multiplicada de las observaciones y las predicciones. Con valores cercanos a 1 indican un buen ajuste, los valores superiores a 0.6 son considerados aceptables en simulaciones de manejo de aguas. Moriasi et al, (2007) citado por Raes et al, (2009).

$$r^2 = \left[\frac{\sum (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2 \sum (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad [4.1]$$

Dónde: O_i es la variable observada, P_i es la variable estimada o simulada, \bar{O} y \bar{P} son sus respectivos promedios, y n el número de observaciones. (Para todos los casos la notación es la misma).

La mayor desventaja de r^2 es que sólo la dispersión es calificada, lo que significa que un modelo que sistemáticamente sobreestime (o subestime) las observaciones puede tener aún un buen valor de r^2 (Krause et al., 2005).

4.6.2 Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE)

Mide la magnitud promedio de las diferencias entre las estimaciones y las observaciones. Sus rangos van de 0 a infinito positivo, si es cercano a 0 indica buen ajuste, pero si es mayor indicará un pobre ajuste del modelo. La ventaja de este indicador es que la sumatoria del promedio de las diferencias está dado en unidades de **P** y de **O**, lo que hace sin embargo, que no sean apreciables las sobre y subestimaciones.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}} \quad [4.2]$$

Una desventaja que tiene este indicador es que los errores residuales son calculados como valores cuadrados, lo cual hace que resultados de valores mayores, tengan un mayor peso comparado con valores bajos (Legate y McCabe, 1999). Además es bastante sensible a los valores extremos o atípicos. Moriasi et al., citado por Raes, et al, (2009A).

4.6.3 Raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado (NRMSE)

Debido a que RMSE es expresada en unidades de la variable de estudio, no permite que el modelo sea probado bajo un amplio rango de condiciones climáticas (Jacovides y Kontoyiannis, 1995) citados por Raes et al (2009). Por lo cual RMSE puede ser normalizada por la media de la variable observada, y se expresa como porcentaje, dando una indicación de la diferencia relativa entre los valores estimados y las observaciones.

$$NRMSE = \frac{1}{O} \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}} 100 \quad [4.3]$$

Para valores inferiores a 10% una estimación se considera excelente, es buena si está entre 10 y 20%, es aceptable si está entre 20 y 30% y es pobre si es mayor que el 30%. Jacovides y Kontoyiannis, (1995).

4.6.4 Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF)

Determina la magnitud relativa de la varianza residual comparada a la varianza de las observaciones (Nash y Sutcliffe, 1970), citado por Raes et al., (2009A). Indica que tan bueno es el ajuste de la graficación de los datos observados contra los simulados en la línea 1:1. Tiene un rango desde menos

infinito a uno. Un 1 significa un ajuste perfecto, un 0 significa que las predicciones del modelo son tan exactas como el promedio de los datos observados y un negativo cuando la media de las observaciones es mejor que las predicciones del modelo.

$$EF = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad [4.4]$$

Sin embargo, al igual que el r^2 , no es muy sensible a sobre o subestimaciones sistemáticas del modelo. (Krause et al., 2005).

4.6.5 Índice de ajuste de Willmott (d)

Mide el grado de acercamiento de los datos observados a los datos estimados. Representa la relación entre el error cuadrático medio y el “error potencial”, el cual es definido como la suma de los cuadrados de los valores absolutos de las distancias de los valores predichos a los observados medios y las distancias de los valores observados a los observados medios (Willmott, 1984), lo cual supera la no sensibilidad de r^2 y de EF a la sistemática sobre o subestimación del modelo. Sus rangos están entre 0 y 1, con 0 indicando un nulo ajuste y 1 un perfecto ajuste entre los dados estimados y los observados.

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad [4.5]$$

La desventaja de “ d ” es que relativamente los valores altos (sobre 0,65) pueden ser obtenidos fácilmente, aun cuando el modelo se desempeñe pobremente.

4.7 Simulación de otras condiciones agroecológicas para evaluar la sensibilidad del cultivo al complejo Suelo – Agua - Clima

Una vez calibrado y validado el modelo tanto para avena forrajera como para raigrás con base en los procesos explicados atrás, se establecieron todas las variables y parámetros del cultivo con los ajustes respectivos logrados para el modelo AquaCrop.

A partir de las variables calibradas y validadas de los cultivos se realizaron análisis del comportamiento de las respuestas del modelo y de los cultivos estudiados a diferentes condiciones agroecológicas con el objeto de evaluar

la sensibilidad a algunos de los principales elementos como el suelo, el agua, y el clima, los cuales representan las principales variaciones del entorno de producción que podrían presentarse en estos cultivos.

Este análisis estuvo encaminado a observar el nivel porcentual de variaciones alcanzado de la biomasa estimada por el modelo AquaCrop de cada cultivo, dadas las condiciones específicas del cambio del entorno, las cuales representan las variaciones medioambientales que se podrían presentar eventualmente, y cómo el modelo puede responder a dichas variaciones de acuerdo a la determinación de los rangos de producción.

Las comparaciones de variación se realizaron con base en los valores de biomasa obtenidos para la simulación lograda por el conjunto de variables y parámetros establecidos en el ajuste, y con base en las condiciones externas experimentales.

Se hicieron análisis de los elementos de agua, suelo, y clima considerando variaciones en los siguientes aspectos:

1. Diferentes láminas totales de riego aplicadas al cultivo, desde 287 a 1255 mm por ciclo para avena forrajera, y desde 118 hasta 354 mm para raigrás, estas láminas se compararon contra la producción de secano.
2. Varios niveles de fertilización considerados durante el ciclo de los cultivos, desde el 90% de la fertilización, hasta un nivel del 40%, comparados contra la fertilización óptima (100%).
3. Diferentes tipos de texturas del suelo, (suelo arenoso, franco arenoso, franco, franco limoso, franco arcilloso, y franco limo arcilloso), contrastadas con el suelo experimental.
4. Varios niveles freáticos, con profundidades desde el momento de la incidencia del NF en el aporte capilar a las raíces del cultivo hasta la saturación total a una profundidad nula, en comparación con ausencia del nivel freático.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Caracterización de los experimentos

A partir de los experimentos que se presentaron en la Tabla 3.3 se establecieron los resultados presentados y discutidos en este capítulo.

Los experimentos de gradiente estuvieron orientados a la determinación de la mayor parte de las variables de los cultivos de avena forrajera y raigrás requeridas por el modelo AquaCrop para estimar la producción de biomasa a partir del agua.

Los experimentos de estrés hídrico fueron orientados para el establecimiento de las variables que requiere el modelo para determinar los procesos de estrés hídrico en los cultivos de avena forrajera y raigrás.

5.2 Suelos

5.2.1 Análisis químicos

De acuerdo a lo relacionado en el capítulo de metodología se realizaron análisis preliminares para ver el estado tanto de fertilidad del suelo como las características físicas e hidrodinámicas del suelo.

En primer lugar se determinaron los análisis de química de suelos en el laboratorio del C.I. Tibaitatá de Corpoica, el objetivo de estos análisis estuvo orientado a asegurar que no hubiera limitación en la fertilidad que pudiera generar alguna interferencia con los experimentos. Los resultados de la caracterización del área experimental de cada uno de los lotes que se dedicaron para la avena forrajera (Lote A) y para raigrás (Lote B) se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Resultado del laboratorio de química de suelos para fertilidad de los lotes experimentales destinados a avena forrajera y raigrás.

Muestra	Elementos Mayores			Cationes de Cambio			Elementos menores				
	M.O	P	S	Ca	Mg	K	Fe	Cu	Mn	Zn	B
	%	mg Kg ⁻¹		cmol+kg ⁻¹			mg kg ⁻¹				
Lote A (Avena F.)	12	96,2	32,7	7,27	2,88	0,92	580	3,5	10,9	52	0,49
Lote B (Raigrás)	10,9	20,6	23,5	8,21	2,26	0,86	623	3,4	10,9	45	0,2

Con base en la información de la Tabla 5.1 se obtuvieron los contenidos de nutrientes de los dos lotes experimentales, además, considerando las características físicas (densidad aparente y una profundidad de la capa de nutrientes de los primeros 20 cm) se calcularon los contenidos de nutrientes en kilogramos por hectárea.

Los cultivos que se estudiaron tienen necesidades nutricionales diferentes de acuerdo a sus estructuras vegetales y condiciones fisiológicas de adaptabilidad y desarrollo en el agroclima que se desarrollaron los experimentos, por lo cual se presenta la Tabla 5.1 que muestra los niveles de requerimientos nutricionales de estos cultivos de acuerdo a fuentes secundarias consultadas como es el caso de Guerrero, (1972) y de Corpoica, (2005).

Con base en la información reportada en los resultados de los análisis químicos de suelos se hicieron las interpretaciones de los niveles de los elementos. Este análisis arrojó que para el lote destinado para la avena forrajera todos los elementos químicos se establecieron en niveles altos a excepción del nitrógeno que resultó ser medio. Para el caso del lote para raigrás, los nutrientes químicos resultaron también altos con excepción de nitrógeno, fósforo, magnesio y boro los cuales se clasificaron como medios.

A partir de los resultados anteriores se realizó un análisis de oferta y demanda para cada uno de los nutrientes confrontado con el nivel de requerimiento de las especies estudiadas, lo cual arrojó que los niveles disponibles en el suelo siempre fueron superiores a los requerimientos.

Para la mayoría de los nutrientes los niveles fueron altos. Esto indica que el área experimental tiene una muy buena disponibilidad de nutrientes; sin embargo, se recomendó una fertilización de mantenimiento, consistente en un fertilizante compuesto como el triple quince (15-15-15) y una aplicación de sulfato de magnesio adicional. Este tipo de fertilización de mantenimiento se acostumbra a hacer en campañas de producción de cultivos con el fin de no dejar agotar los niveles de fertilización de los suelos durante el proceso productivo y para futuras campañas.

Otro de los aspectos que se tuvo en cuenta en el proceso de irrigación de cultivos fue la salinidad del suelo, la cual puede ser una limitante, pues a mayor salinidad hay un incremento en la presión osmótica, por lo tanto el agua es retenida con mayor presión en la matriz del suelo.

Por esta razón se incluyó un análisis de salinidad, el cual se presenta en la Tabla 5.2. También se realizó el análisis de la acidez activa y acidez intercambiable con el fin de poder dar recomendaciones en caso de que fuera necesario aplicar alguna enmienda (cales). Los resultados fueron satisfactorios.

Tabla 5.2 Análisis de acidez y salinidad del lote a experimentar.

Lote (Cultivo)	pH	Al+H	Al	Na	Sat Al	C.E.
		cmol(+)Kg ⁻¹			(%)	ds m ⁻¹
Avena	5,5	0,28	0,11	0,7	1	0,91
Raigrás	5,7	0,25	0	1,32	0	1,39

5.2.2 Análisis físicos e hidrodinámicos

Para la determinación de los análisis físicos e hidrodinámicos del suelo en el que se desarrollaron los experimentos se tomaron muestras inalteradas a dos profundidades de 0 – 30 cm y de 30 - 60 cm, en cada una de estas profundidades se tomaron 3 muestras, esto se hizo para el emplazamiento de cada cultivo. Las variables determinadas fueron: Densidad aparente, curva de retención de humedad con cinco puntos de determinación, punto de saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente, agua disponible total, y conductividad hidráulica saturada, los resultados se presentan en la Tabla 5.3

La capacidad de campo (CC) se tomó para una tensión de succión de 0,01 MPa, debido a que estudios realizados por Garcés, (1976) mostraron que los resultados de pruebas en campo se aproximaron más a esta tensión de succión que a los valores de 0,033 MPa.

Durante el transcurso de los experimentos se observó que los niveles de humedad promedios de los tratamientos bajos (niveles N6 sin riego) fueron inferiores a los valores de PMP reportados por el laboratorio de física de suelos, sin que esto determinara síntomas de estrés hídrico o el inicio del marchitamiento de los cultivos, esto llevó a pensar que las tensiones de succión de 1,5 MPa, no estaban mostrando un verdadero nivel de PMP para los cultivos estudiados.

Tabla 5.3 Características física e hidrodinámicas del suelo en el que se realizaron los experimentos. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.

Lote	Nº muestra	Profundidad (m)	Densidad aparente (g.cm ⁻³)	Tensión de succión (MPa)						Ajuste de la curva		C.C. %Vol	P.M.P. %Vol	Agua disponible total		Conductividad Hidráulica Saturada mm.día ⁻¹		
				0,00	0,00	0,01	0,03	0,1	0,3	1,5	Ecuación de Auste			r ²	% Vol		Lamina mm.m ⁻¹	
				Sat%Grav	Sat%Vol	HUMEDAD VOLUMETRICA %												
A (Avena Forrajera)	1	0-30	0,79	73,78	58,28	45,56	42,98	41,74	40,35	39,73	$y = 42,8094x^{-0,0268}$	0,9252	45,56	39,73	5,83	58,30	226	
	13	0-30	1,00	69,57	69,48	54,16	53,03	51,34	50,01	48,73	$y = 51,606x^{-0,024}$	0,9790	54,16	48,73	5,43	54,31	470	
	2	30-60	0,97	62,56	60,68	50,23	47,92	46,87	45,46	44,92	$y = 47,1045x^{-0,0220}$	0,9281	50,23	44,92	5,31	53,10		
	14	30-60	0,74	98,21	72,73	58,95	57,69	54,34	53,00	52,08	$y = 55,378x^{-0,029}$	0,9509	58,95	52,08	6,87	68,72	271	
	3	0-30	0,88	59,53	52,39	43,83	41,63	40,81	39,73	39,34	$y = 41,0888x^{-0,0211}$	0,9050	43,83	39,34	4,49	44,90		
	15	0-30	0,86	74,32	64,03	46,58	45,72	44,06	42,72	41,83	$y = 44,245x^{-0,024}$	0,9841	46,58	41,83	4,75	47,47	111	
	4	30-60	1,03	49,24	50,72	42,28	40,43	39,66	38,61	38,21	$y = 39,87x^{-0,0209}$	0,9188	42,28	38,21	4,07	40,70		
	16	30-60	0,96	63,31	60,57	45,91	44,92	43,14	41,93	40,97	$y = 43,445x^{-0,025}$	0,9839	45,91	40,97	4,94	49,36	369	
	5	0-30	0,79	65,60	51,82	42,85	40,42	39,60	38,51	38,05	$y = 39,9049x^{-0,0227}$	0,8941	42,85	38,05	4,80	48,00		
	17	0-30	0,82	80,21	66,00	51,99	50,83	49,27	48,00	46,96	$y = 49,485x^{-0,022}$	0,9887	51,99	46,96	5,04	50,38	172	
	6	30-60	0,86	59,34	51,03	41,57	38,92	38,15	36,97	36,53	$y = 38,4442x^{-0,0246}$	0,8842	41,57	36,53	5,04	50,40		
	18	30-60	0,83	84,28	70,03	57,10	56,00	53,77	52,40	51,21	$y = 54,331x^{-0,026}$	0,9887	57,10	51,21	5,90	58,97		
	Promedio Prof. 0 - 30			0,86	70,50	60,33	47,50	45,77	44,47	43,22	42,44	$y = 42,436x^{-0,023}$	0,9655	47,50	42,44	5,06	50,56	288
	Promedio Prof. 30 - 60			0,90	69,49	60,96	49,34	47,65	45,99	44,73	43,99	$y = 43,929x^{-0,023}$	0,9592	49,34	43,99	5,35	53,54	251
	B (Raigrás)	7	0-30	0,83	68,24	56,64	48,05	45,70	44,92	43,83	43,36	$y = 45,1954x^{-0,0196}$	0,8977	48,05	43,36	4,69	46,90	216
		19	0-30	0,89	74,33	66,16	45,91	44,68	43,29	42,03	41,10	$y = 43,534x^{-0,025}$	0,9753	45,91	41,10	4,80	48,05	159
		8	30-60	0,91	70,81	64,44	54,77	52,26	51,28	50,13	49,61	$y = 51,657x^{-0,0192}$	0,9079	54,77	49,61	5,16	51,60	
		20	30-60	1,05	58,07	61,24	45,30	44,52	42,81	41,41	40,65	$y = 43,046x^{-0,025}$	0,9720	45,30	40,65	4,64	46,45	88
9		0-30	0,89	64,21	57,14	46,75	44,32	43,17	41,98	41,42	$y = 43,5489x^{-0,0236}$	0,9163	46,75	41,42	5,33	53,30		
21		0-30	0,86	77,00	66,29	54,43	53,65	50,67	49,01	47,82	$y = 51,107x^{-0,028}$	0,9712	54,43	47,82	6,61	66,10	303	
10		30-60	1,00	50,72	50,72	43,80	41,44	40,37	39,43	38,89	$y = 40,4776x^{-0,0196}$	0,6694	43,80	38,89	4,91	49,10		
22		30-60	0,97	68,28	66,15	51,37	50,73	49,27	48,02	47,04	$y = 49,373x^{-0,02}$	0,9841	51,37	47,04	4,32	43,24	376	
11		0-30	0,83	66,64	55,31	45,03	42,60	41,28	40,32	39,73	$y = 41,8111x^{-0,0243}$	0,9077	45,03	39,73	5,30	53,00		
23		0-30	0,81	94,62	76,31	63,98	62,78	61,18	59,83	58,71	$y = 61,431x^{-0,019}$	0,9807	63,98	58,71	5,27	52,71	491	
12		30-60	0,81	77,57	62,83	52,01	50,14	48,16	47,29	46,69	$y = 48,8832x^{-0,0218}$	0,9217	52,01	46,69	5,32	53,20		
24		30-60	0,77	101,10	77,60	66,38	64,89	61,75	60,21	59,24	$y = 62,641x^{-0,026}$	0,9607	66,38	59,24	7,13	71,34		
Promedio Prof. 0 - 30			0,85	74,17	62,98	50,69	48,96	47,42	46,17	45,36	$y = 45,334x^{-0,022}$	0,9642	50,69	45,36	5,33	53,34	226	
Promedio Prof. 30 - 60			0,92	71,09	63,83	52,27	50,66	48,94	47,75	47,02	$y = 46,955x^{-0,022}$	0,9573	52,27	47,02	5,25	52,49	318	
Promedio total prof. 0 - 30			0,85	72,34	61,65	49,09	47,36	45,94	44,69	43,90	$y = 43,855x^{-0,023}$	0,9650	49,09	43,90	5,20	51,95	257	
Promedio total prof. 30 - 60			0,91	70,29	62,39	50,81	49,15	47,46	46,24	45,50	$y = 45,442x^{-0,023}$	0,9583	50,81	45,50	5,30	53,02	284	

Por esta razón se procedió a hacer experimentos alternativos para la determinación del PMP por el método de campo, con el uso de las plantas indicadoras de girasol, Cabazos y Rodríguez, (1992). Los resultados obtenidos mostraron que efectivamente los niveles de PMP del suelo tanto para avena forrajera como para raigrás se ubicaban en puntos inferiores a los determinados por el método de Richards, (1931). La Tabla 5.4 muestra los resultados de los *PMP* para el suelo de los experimentos de los dos cultivos.

Tabla 5.4 Resultados de la determinación del PMP por el método del girasol para los suelos de los experimentos realizados.

Suelo de Lote	No. U.E.	Profundidad cm	Humedad a PMP		D. Aparente g.cm ⁻³
			%Grav	%Vol	
A	1		23,77	20,44	
Avena Forrajera	2	0 - 30	22,59	19,43	0,86
	3		22,25	19,14	
Promedios		0 - 30	22,87	19,67	0,86
B	4		25,01	21,26	
Raigrás	5	0 - 30	24,15	20,53	0,85
	6		23,84	20,26	
Promedios		0 - 30	24,33	20,68	0,85

Adicionalmente se realizó la determinación de las texturas para cada uno de los lotes, resultando que, para el lote A (avena forrajera) la textura fue limosa (L), mientras que para el lote B (raigrás) la textura fue franco limosa (FL).

La densidad aparente se determinó en pruebas de laboratorio por el método del cilindro conocido. La curva de retención de humedad del suelo se obtuvo por el método de las cámaras de succión, Richards, (1931) citado por Philip, (1974), Klute, (1986). Y la conductividad hidráulica saturada se realizó por el método del permeámetro de cabeza constante, IGAC, (2006), Reynolds et al., (2002), Richards, (1931).

Las densidades aparentes obtenidas están dentro de los niveles típicos para Andisoles cuya variación encontrada estuvo entre 0,79 y 1,03 g.cm⁻³.

Para las curvas de retención se lograron los mejores ajustes para relaciones de potencias como se presenta en la Tabla 5.3.

La conductividad hidráulica saturada varía entre los niveles de lenta a moderada de acuerdo a la clasificación de Soil Survey Staff, (1981) citado por Rawls et al., (1982). Estos valores son típicos de suelos limosos y están dentro de los niveles considerados por AquaCrop para estas texturas. Raes et al., (2011).

Por otro lado, se determinó la infiltración del suelo por el método de los anillos concéntricos, obteniendo los resultados de infiltración básica por medio del

ajuste de Kostiakov, (1932), citado por Forsythe, (1980). En la Tabla 5.5 se presentan los resultados obtenidos, de acuerdo a las clasificaciones presentadas en la Tabla 5.6 referida por Malagón, (1976), la infiltración de los lotes experimentales se clasifican en general como de moderada a rápida. Aunque el modelo AquaCrop no tiene como variables de entrada la infiltración básica, ésta es útil para la determinación de la curva número (CN) que es el método que usa el modelo para el cálculo de la escorrentía, además se realizaron estas pruebas como información de entrada para los diseños de riego y drenaje.

Tabla 5.5 Resultados del análisis de infiltración realizado en el lote experimental, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, (Colombia).

Lote	Infiltración básica (cm.h ⁻¹)	
	Prueba	Promedio
A	4,3	
Avena	6,9	4,7
Forrajera	3,0	
B	16,4	
Raigrás	2,6	6,9
	1,7	

La conductividad hidráulica trata de un flujo en suelo saturado; en cambio la infiltración, comúnmente ocurre en suelo no saturado. Sólo cuando la infiltración ocurre en suelo saturado, se puede comparar la velocidad de infiltración y la conductividad hidráulica como el límite mínimo de la velocidad de infiltración del suelo correspondiente al estado saturado. Forsythe, (1980).

La superficie de los lotes de experimentación es plana, ($S_0= 0,0065$) lo cual garantiza que no sea necesario considerar la subrutina de escorrentía para la determinación del balance hídrico, sin embargo debido a que aún no se ha hecho estimaciones preliminares del comportamiento del modelo con respecto a los resultados de campo se podría eventualmente utilizar un valor de curva número (CN) estimado con base en las características del terreno.

El parámetro de CN, se determina con base en tres únicas características del suelo a saber: la pendiente, los usos del suelo y los grupos hidrológicos. Para el caso de una infiltración como las obtenidas, el valor por defecto de la CN que despliega AquaCrop es de 65, considerando una tasa de infiltración superior a 250 mm.día⁻¹ un valor de humedad antecedente AMC (II), intermedio entre capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).

Tabla 5.6 Interpretación de la velocidad de infiltración de los suelos determinada por varios autores con base en la infiltración básica.

Clasificación de la velocidad de infiltración (cm.hr ⁻¹)				
Clase	Denominación	Mazurak	Kohnke	Bonnet
		1970	1968	1950
1	Muy rápida	>25,4	>25,4	>25,0
2	Rápida	2,54 -25,4	12,7 - 25,4	60,4 - 25,0
3	Moderada	0,254 -2,54	2,0 - 12,7	2,0 - 6,4
4	Lenta	0,0254 - 0,254	0,1 - 2,0	0,13 - 2,0
5	Muy lenta	0,00254 - 0,0254	< 0,1	< 0,13

Fuente: Malagón, D. 1976. Física de Suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, (IGAC), Bogotá, Col. 622 p.

5.3 Clima

En la estación agroclimática de Tibaitatá, del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) se tomaron las variables climáticas a nivel diario requeridas mencionadas en el capítulo de metodología. Dicha estación se encuentra emplazada en el mismo predio del lote experimental.

Los años de experimentación fueron caracterizados en su totalidad y se contó con los registros diarios de: precipitación, evaporación del tanque “A”, temperaturas promedias, máxima, mínima, y punto de rocío, tensión de vapor, humedad relativa, insolación, y velocidad del viento que se presentaron durante los ciclos de los cultivos experimentales.

Como los años de experimentación para los experimentos de gradiente fueron principalmente 2009 y 2010 se presenta un resumen gráfico del comportamiento climático de dichos años.

En las Figura 5.1 y 5.2 se presentan los histogramas de precipitación y evaporación reportados por la estación Tibaitatá. Observe que el orden de dibujo de las series de evaporación aparecen invertidas con el objeto de mejorar su claridad.

Al comparar los histogramas presentados en las Figuras 5.1 y 5.2 con los respectivos multianuales de las Figuras 3.1 y 3.2, se observa que 2009 fue un año más o menos típico con una precipitación total anual de 620 mm contra un promedio multianual de 663 mm.

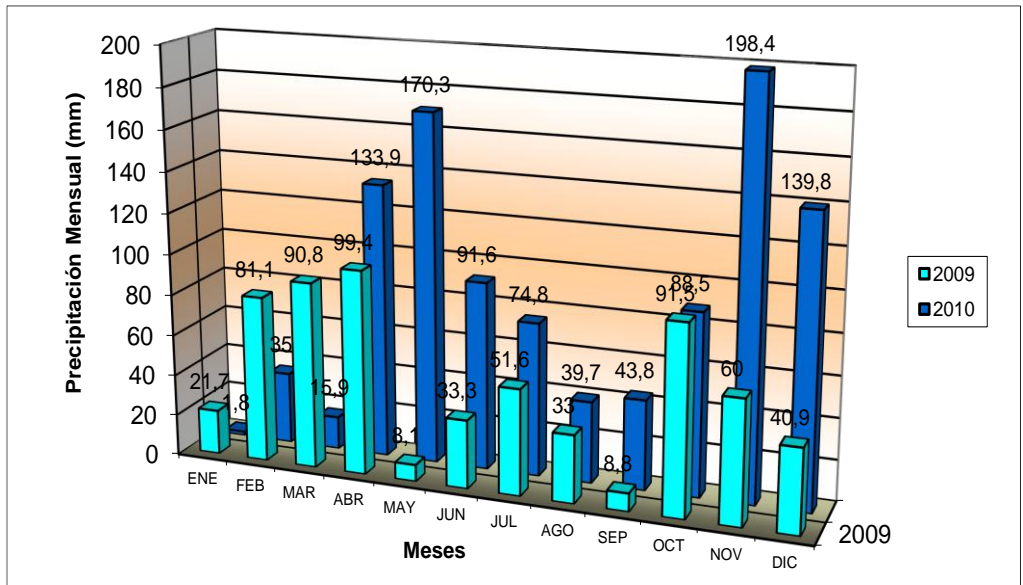


Figura 5.1 Histograma de precipitación mensual de la estación Tibaitatá, años 2009 y 2010, Sabana de Bogotá. Ubicada en el mismo lote de emplazamiento de los experimentos.

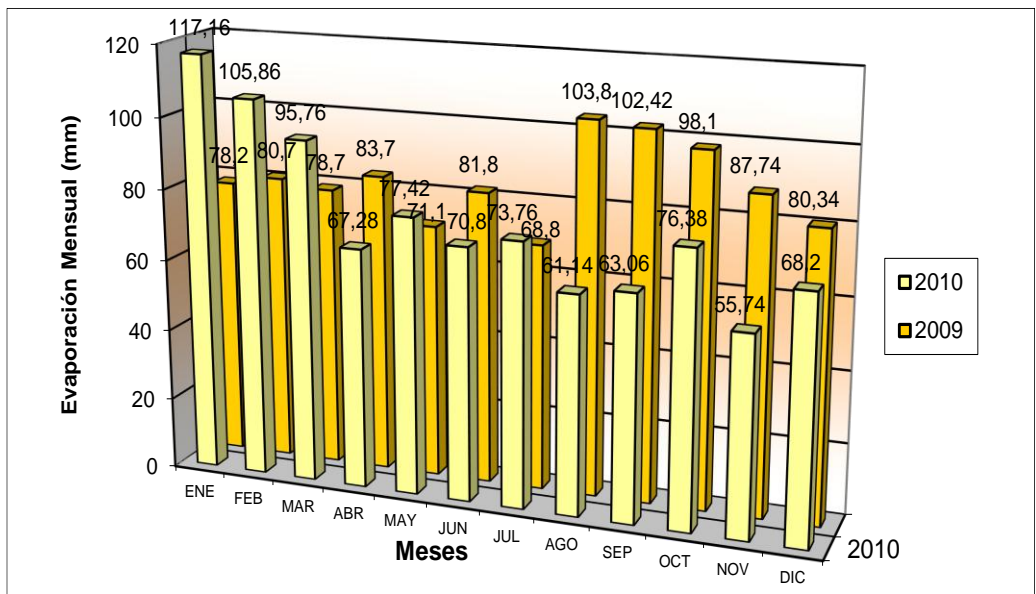


Figura 5.2 Histograma de evaporación de la estación Tibaitatá, Sabana de Bogotá. Ubicada en el mismo lote de emplazamiento de los experimentos.

La evaporación alcanzó niveles de 1015 mm contra un promedio multianual de 1028 mm. Los meses más secos fueron mayo, junio, agosto y septiembre, estando por debajo de lo normal. Los meses de febrero, marzo y julio, estuvieron inusualmente por encima de lo normal y el resto del año fue típicamente similar.

Para el año 2010 la precipitación total sumó 1033 mm estando muy por encima de lo normal, esto se debió a la influencia del fenómeno de La Niña (ENOS) que se presentó con gran influencia en todo el país y que tuvo niveles catastróficos. A excepción de los meses de marzo y septiembre el resto del año estuvo muy por encima del promedio multianual. La evaporación en este año ascendió a 933 mm inferior al promedio.

Toda la información climática a nivel diario mencionada en el capítulo de metodología se registró en las bases de datos del proyecto.

5.4 Ciclos fenológicos

5.4.1 Avena forrajera (*Avena sativa*, L.) var. Cayuse

Tabla 5.7 Estados fenológicos de los ciclos experimentales de avena forrajera realizados en este estudio.

Estados Fenológicos	1er Cultivo		2do Cultivo		3er Cultivo		4to Cultivo	
	Fecha	DDS	Fecha	DDS	Fecha	DDS	Fecha	DDS
Siembra	21/01/2009	0	26/05/2009	0	14/10/2009	0	18/03/2010	0
Emergencia al 90%	05/02/2009	15	10/06/2009	15	21/10/2009	7	31/03/2010	13
Estado de Bota	19/04/2009	89	24/08/2009	90	27/01/2010	105	22/06/2010	96
Inicio de espigación	28/04/2009	97	01/09/2009	98	06/02/2010	115	01/07/2010	105
Inicio de floración	20/05/2009	119 *	24/09/2009	121 *	17/02/2010	126 *	08/07/2010	112
Formación de Grano Acuoso lechoso	27/05/2009	126 *	30/09/2009	127 *	22/02/2010	131 *	13/07/2010	117
Máxima Expansión de la Raíz	30/05/2009	129 *	03/10/2009	130 *	25/02/2010	134 *	16/07/2010	120
Grano harinoso Duro	03/06/2009	133 *	07/10/2009	134 *	28/02/2010	137 *	19/07/2010	123
Máxima Cobertura Dosel	15/05/2009	114	18/09/2009	115	25/02/2010	134	19/07/2010	123
Inicio de senescencia	04/06/2009	134 *	08/10/2009	135 *	01/03/2010	138 *	20/07/2010	124
Senescencia al 30%	17/07/2009	177 *	20/11/2009	178 *	13/04/2010	181 *	01/09/2010	167

DDS: Días después de siembra. * Fechas estimadas, las demás fechas fueron observadas.

Para el caso de la avena forrajera se realizaron cuatro cultivos con experimentos independientes para cada uno de los ciclos fenológicos, la Tabla 5.7 presenta las fechas y los días después de siembra (DDS) observados para cada etapa fenológica. Por motivos de optimización del tiempo no todos los cultivos se llevaron hasta senescencia, por lo cual con base al comportamiento del último ciclo fueron estimadas las etapas de senescencia para los anteriores cultivos, para el caso del crecimiento de la profundidad radical, debido a que esta observación es bastante dispendiosa por la necesidad de calicatas sólo se observó durante el último ciclo, estimándose con base en este para los demás.

Para el cultivo cuatro fueron observados todos los estados fenológicos y con base en ellos se establecieron algunos de los estados que no fueron supervisados en el resto de cultivos considerando su equivalencia en días grados. Para el caso del modelo AquaCrop son importantes algunos de los estados fenológicos supervisados en especial la fecha de siembra, la emergencia al 90%, la cobertura máxima del dosel, y la máxima profundidad de la raíz, la mayoría de estas variables fueron supervisadas.

5.4.2 Raigrás (*Lolium perenne*) var. Bestfor plus

Para el raigrás, debido a que es un cultivo indeterminado de ciclo mayor de un año se realizaron dos cultivos con sus respectivos cortes, durante el primer año se alcanzaron a hacer hasta siete cortes, para el segundo año, debido a que el tiempo climático se presentó demasiado húmedo, y a la necesidad de generar la senescencia con su respectiva supervisión, sólo se realizaron los cuatro primeros cortes. Durante este ciclo se supervisaron todos los estados fenológicos determinando sus días grados requeridos, con los cuales se establecieron los tiempos de los estados fenológicos no supervisados durante el primer cultivo.

Tabla 5.8 Estados fenológicos para los cultivos de raigrás 1 y 2 desde siembra hasta el primer corte.

Estados Fenológicos	Cultivo 1 Corte 1			Cultivo 2 Corte 1		
	Fecha	DDS	DDC	Fecha	DDS	DDC
Siembra	19/12/2008	0	0	10/02/2010	0	0
Emergencia al 90%	28/12/2008	9	9	19/02/2010	9	9
Máxima Expansión de la Raíz	24/02/2009	67	67 *	11/04/2010	60	60
Estado de Bota	19/02/2009	62	62	13/04/2010	62	62
Inicio de espigación	26/02/2009	69	69	20/04/2010	69	69
Inicio de Floración	16/03/2009	87	87 *	30/04/2010	79	79
Formación Grano Acuoso lechoso	24/03/2009	95	95 *	05/05/2010	84	84
Máxima Cobertura del Dosel	19/03/2009	90	90	10/05/2010	89	89
Grano harinoso Duro	27/03/2009	98	98 *	10/05/2010	89	89

DDS: Días después de siembra. DDC: Días después del corte. * Fechas estimadas, las demás fechas fueron observadas.

Las Tablas 5.8 a 5.10 presentan los estados fenológicos de los cultivos de raigrás, en donde se destacan las fechas y los días después de siembra o de corte según el caso. Debido a que no hay interés en la determinación del índice de cosecha para este cultivo no se supervisaron algunas fechas fenológicas que tienen que ver con la formación de grano.

Tabla 5.9 Estados fenológicos para los cortes posteriores al primero de raigrás durante el primer cultivo.

Estados Fenológicos	2do Corte			3er Corte			4to Corte			5to Corte			6to Corte			7mo Corte		
	Fecha	DDS	DDC	Fecha	DDS	DDC	Fecha	DDS	DDC	Fecha	DDS	DDC	Fecha	DDS	DDC	Fecha	DDS	DDC
Corte	24/03/2009	95	0	07/05/2009	139	0	01/07/2009	194	0	14/09/2009	269	0	05/11/2009	321	0	18/12/2009	364	0
Inicio de recuperación	28/03/2009	99	4	15/05/2009	147	8	09/07/2009	202	8	19/09/2009	274	5	12/11/2009	328	7	26/12/2009	372	8
Estado de Bota	20/04/2009	122	27	09/06/2009	172	33	21/08/2009	245	51	17/10/2009	302	33	02/12/2009	348	27	14/01/2010	391	27
Inicio de espigación	25/04/2009	127	32	15/06/2009	178	39	30/08/2009	254	60	23/10/2009	308	39	07/12/2009	353	32	19/01/2010	396	32
Inicio de Floración	04/05/2009	136	41 *	19/06/2009	182	43 *	14/08/2009	238	44 *	27/10/2009	312	43 *	20/12/2009	366	45 *	03/02/2010	411	47 *
Máxima Cobertura Dosel	05/05/2009	137	42	25/06/2009	188	49	19/08/2009	243	49	02/11/2009	318	49	16/12/2009	362	41	02/02/2010	410	46
Formación Grano Acuoso lechoso	10/05/2009	142	47 *	26/06/2009	189	50 *	21/08/2009	245	51 *	03/11/2009	319	50 *	27/12/2009	373	52 *	10/02/2010	418	54 *
Grano harinoso Duro	14/05/2009	146	51 *	30/06/2009	200	54 *	24/08/2009	248	54 *	06/11/2009	322	53 *	01/01/2010	378	57 *	14/02/2010	422	58 *
Inicio de senescencia																15/02/2010	423	59 *
Senescencia al 56%																03/05/2010	499	132 *

DDS: Días después de siembra. DDC: Días después de corte. * Fechas estimadas, las demás fechas fueron observadas.

Tabla 5.10 Estados fenológicos para los cortes posteriores al primero de raigrás durante el segundo cultivo.

Estados Fenológicos	2do Corte			3er Corte			4to Corte		
	Fecha	DDS	DDC	Fecha	DDS	DDC	Fecha	DDS	DDC
Corte	15/05/2010	94	0	08/07/2010	148	0	26/08/2010	197	0
Inicio de recuperación	16/05/2010	95	1	16/07/2010	156	8	04/09/2010	206	9
Estado de Bota	11/06/2010	121	27	10/08/2010	181	33	21/09/2010	223	26
Inicio de espigación	16/06/2010	126	32	16/08/2010	187	39	25/09/2010	227	30
Inicio de Floración	25/06/2010	135	41	22/08/2010	193	45	09/10/2010	241	44 *
Máxima Cobertura Dosel	25/06/2010	135	41	17/08/2010	188	40	04/10/2010	236	39
Formación Grano Acuoso lechoso	01/07/2010	141	47	30/08/2010	201	53 *	16/10/2010	248	51 *
Grano harinoso Duro	05/07/2010	145	51	02/09/2010	204	56 *	20/10/2010	252	55 *
Inicio de senescencia							21/10/2010	253	56 *
Senescencia al 56%							03/01/2011	327	130

DDS: Días después de siembra. DDC: Días después de corte. * Fechas estimadas, las demás fechas fueron observadas.

La supervisión de la profundidad radical y su proceso de expansión se realizó durante el segundo cultivo. Para el segundo cultivo se generó la senescencia del dosel a partir del estado de grano harinoso duro. Durante el primer cultivo se hizo una estimación de todo el proceso de senescencia a partir de los 94 DDC

5.5 Análisis estadísticos

Como se explicó en el capítulo de metodologías, se utilizó el método del gradiente de aspersión Hanks et al., (1974), para el desarrollo de los experimentos. Este método consiste en una línea lateral de riego desde la cual se aplica una intensidad de lámina de agua que decreciente a medida que se aleja de éste.

Un experimento de este tipo no tiene un sistema simple de prueba estadística para los efectos de los niveles de irrigación sobre la producción de materia seca, pues los niveles de lámina de agua aplicada no son aleatorizados. Hanks et al., (1974) indicó que mientras los efectos del riego sean grandes, los análisis estadísticos no son realmente críticos.

Posteriormente Johnson et al., (1983) presentó la forma cómo; por medio de métodos multivariados; se podría hacer un análisis estadístico apropiado para el experimento del método del gradiente. Este método se basa en la aplicación del modelo general multivariado, el cual se usa también para el análisis de perfiles.

En un sentido multivariado, se puede mirar este experimento como un diseño de bloques completos al azar con las cuatro repeticiones, un número de bloques (n) distribuidos en el tiempo y 12 variables de respuesta de riego correspondientes a los niveles de irrigación, seis sobre cada mitad.

El modelo general multivariado para este experimento corresponde a un modelo lineal mixto el cual es una generalización del modelo lineal estándar que consiste en que a los datos se les permite presentar una correlación y variabilidad no constante, la ecuación matricial correspondiente es: [5.1]

$$X = A * B + E \quad [5.1]$$

Dónde: X representa la cantidad total de datos de la variable de respuesta experimental, que tiene n filas, donde cada fila corresponde a una unidad experimental, y p columnas, con cada columna representando una de las variables respuesta. Para el caso particular de la respuesta en materia seca, la matriz de datos X es la producción, B es la matriz de parámetros, A corresponde a la matriz de diseño y E es la matriz de los errores experimentales.

El procedimiento Proc Mixed de SAS (*Statistical Analysis System*) fue utilizado para realizar los análisis estadísticos de inferencia para los experimentos de gradiente y reconocer la valoración de la significancia o no ($\alpha=0,05$) de los resultados de materia seca, biomasa húmeda, y altura de plantas como respuesta a la lámina aplicada. SAS, Inc. (1996). SAS, Inc. (2011).

Dada la importancia de los resultados en cuanto a materia seca (MS) producida, aquí sólo se comenta esta variable con el objeto de ahorrar espacio. El resto de variables tienen comportamientos similares a los alcanzados por la materia seca.

Para el resto de análisis se utilizaron procedimientos programados en *Excel* como parte integral de los procesos de determinación del modelaje utilizado. Se determinaron las estadísticas descriptivas, los modelos de ajuste y la graficación requerida que se comentan a partir del numeral 5.6. Los listados obtenidos de los análisis realizados se presentan en el Anexo B *Estadísticas SAS*.

5.5.1 Análisis para avena forrajera

Las Tablas 5.11 a 5.14 presentan un resumen de los resultados de los análisis estadísticos para cada uno de los cultivos de avena forrajera realizados.

Tabla 5.11 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo de avena forrajera.

PRIMER CULTIVO (1) DE AVENA FORRAJERA								
DDS	48	62	76	92	105	113	123 *	Significancia de los Perfiles
Nivel Riego	Aforos de M.S. (Kg.ha ⁻¹)							
	Significancia de los aforos **							
1	1740,7	3506,4	5124,3	7996,4	12364,1	14264,0	15733,9	
	17,5	10,5	16,6	16,1	12,9	17,4		
2	1878,1	3518,0	5358,9	7951,4	11871,9	14127,7	16093,3	
	26,4	22,7	27,5	28,4	33,6	35,5		
3	1730,1	3312,9	5093,6	7608,0	10993,9	13284,9	15359,0	
	25,6	20,8	24,0	23,9	30,8	32,0		**
4	1766,9	3253,1	4978,5	7570,1	10949,6	13276,4	15352,7	
	21,2	18,3	20,7	19,9	28,5	27,7		
5	1670,7	3050,0	4819,5	7221,7	10045,0	11732,0	13254,8	
	17,9	13,6	17,1	16,3	21,7	26,8		
6	1694,4	2921,2	4652,0	6775,6	10480,5	12305,8	13710,8	
	24,5	28,9	29,5	30,9	32,7	36,8		
Significancia de los niveles	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	Media Coef. Var.

* Aforos estimados de acuerdo a las tendencias

El análisis estadístico multivariado arrojó diferencias significativas ($\alpha < 0,05$) entre los niveles de irrigación para la respuesta de *MS* con base en la lámina aplicada considerando un análisis integral de toda la curva de producción de biomasa es decir de los perfiles para cada uno de los cultivos.

Tabla 5.12 Resultados del análisis estadístico para el segundo cultivo de avena forrajera.

SEGUNDO CULTIVO (2) DE AVENA FORRAJERA								
DDS	48	62	76	92	105	114	123 *	Significancia de los Perfiles
Nivel Riego	Aforos de M.S. (Kg.ha ⁻¹)							
	Significancia de los aforos **							
1	1849,5	3506,6	5441,9	8143,1	12410,8	16103,2	17154,8	**
	15,2	11,1	14,4	14,5	16,7	19,2		
2	1917,7	3182,4	5028,5	7723,4	11026,6	14259,8	15447,7	
	10,5	14,1	14,5	14,3	24,0	20,4		
3	1569,1	3154,4	4687,7	6902,8	9758,8	12798,6	13748,0	
	17,6	8,3	9,6	11,5	21,8	17,0		
4	1616,7	3040,8	4484,5	6856,0	8978,3	11472,2	12344,0	
	22,3	14,9	16,7	18,4	22,3	25,9		
5	1457,5	2600,8	4023,3	6173,5	7686,7	8648,4	9013,4	
	22,8	21,4	24,3	21,4	16,4	18,4		
6	1227,8	2178,3	3212,4	4948,0	6809,7	7751,8	8097,6	
	38,7	41,0	37,7	35,1	44,5	45,4		
Significancia de los niveles	**	**	**	**	**	**	**	Media Coef. Var.

Tabla 5.13 Resultados del análisis estadístico para el tercer cultivo de avena forrajera.

TERCER CULTIVO (3) DE AVENA FORRAJERA								
DDS	48	62	76	92	105	123	134	Significancia de los Perfiles
Nivel Riego	Aforos de M.S. (Kg.ha ⁻¹)							
	Significancia de los aforos **							
1	2274,1	5495,2	7163,4	10409,0	17266,9	25372,0	26970,9	**
	12,2	19,3	13,5	12,0	9,2	17,9	19,5	
2	2213,9	5349,6	6973,6	10133,2	16809,4	24699,7	26256,2	
	13,3	19,2	16,7	14,5	14,4	11,1	15,2	
3	2066,0	4992,3	6507,8	9456,3	15686,5	23049,8	24502,4	
	8,8	17,0	21,8	11,5	9,6	8,3	17,6	
4	2067,9	4878,3	6468,9	9426,4	15529,9	22721,3	23995,3	
	12,1	17,8	13,6	13,0	14,6	15,6	17,3	
5	1868,8	4515,9	5886,8	8553,9	14189,5	20850,1	22164,1	
	13,9	14,8	17,9	17,8	10,4	13,4	22,0	
6	1722,2	4161,5	5424,8	7882,6	13076,0	19213,9	20424,7	
	10,1	15,4	19,0	16,8	14,0	19,2	5,0	
Significancia de los niveles	**	**	**	**	**	**	**	Media Coef. Var.

Tabla 5.14 Resultados del análisis estadístico para el cuarto cultivo de avena forrajera.

CUARTO CULTIVO (4) DE AVENA FORRAJERA							
DDS	48	62	76	92	105	123	Significancia de los Perfiles
Nivel Riego	Aforos de M.S. (Kg.ha ⁻¹)						
	Significancia de los aforos **						
1	2058,3	3283,0	4993,9	8105,8	10445,7	13603,4	
	19,5	17,9	9,2	12,0	13,5	19,3	
2	1914,7	2718,2	4910,6	7461,6	10417,7	13077,5	
	5,0	19,2	14,0	16,8	19,0	15,4	
3	1805,8	3406,0	4606,0	6942,3	9885,7	12506,5	**
	22,0	13,4	10,4	17,8	17,9	14,8	
4	1476,2	3169,8	4368,0	6470,4	9472,1	12271,1	
	16,4	28,6	17,9	18,3	22,8	19,4	
5	1224,0	2717,8	3870,9	5764,1	8844,8	12202,1	
	22,4	25,3	16,1	18,9	21,1	13,4	
6	1113,0	3036,4	4047,7	5625,7	8574,7	11393,7	
	16,1	22,1	14,4	15,2	24,2	20,9	
Significancia de los niveles	**	NS	**	**	NS	NS	Media Coef. Var.

También se determinó si los aforos realizados eran significativamente diferentes entre ellos, alcanzando significancia (**) en todos los casos, esto permite saber si los desarrollos alcanzados entre muestreos fueron en aumento.

En general para todos los experimentos de avena forrajera se observa que el gradiente de riego arrojó también un gradiente en la producción de biomasa que va disminuyendo a medida que se aleja del lateral, la cantidad de biomasa es mayor en los niveles 1 y va disminuyendo hasta llegar a ser mínimo en los niveles 6. Sin embargo, en algunos casos los niveles 2 fueron ligeramente superiores al 1.

Esto sucedió para el primer cultivo de avena forrajera debido seguramente a varias razones: al ser el primer experimento de gradiente el suelo en el nivel 1 pudo haber estado un poco más seco o mejor drenado que en el 2, también pudo haber influido una leve diferenciación en la fertilización localizada con favorabilidad en el nivel 2, es importante resaltar que los aforos que arrojan mayores diferencia entre estos dos tratamientos fueron los del día 123, y esto se debió a que estos fueron estimados por medio de regresiones según las tendencias, es probable sin embargo que como los aforos reales de los días 92 y 113 fueron mayores en el nivel 1, ocurriera lo mismo para el aforo 123.

Al considerar un análisis de inferencias de la producción de MS con base en los niveles de irrigación para cada uno de los aforos realizados en los cuatro cultivos en forma separada no se obtuvieron diferencias significativas entre

los tratamientos para el primer cultivo, ni para los aforos a los 62, 105 y 123 *DDS* para el cuarto cultivo. Sin embargo se encontraron diferencias significativas en los aforos de *MS* para el resto de los casos analizados individualmente.

La no significancia entre los tratamientos de los aforos del primer cultivo se debió probablemente a la poca diferenciación de las humedades del suelo alcanzadas durante este experimento, las cuales se observan en la Figura 5.7, sin embargo, la diferencia significativa alcanzada de los perfiles es explicable a partir del hecho de que a pesar de la cercanía de las humedades, éstas mantienen un "paralelismo" entre sí y en general, un orden descendente de acuerdo a los tratamientos aplicados en la mayor parte del ciclo del cultivo.

La no significancia obtenida en la respuesta de la *MS* con base en los niveles de irrigación de los aforos a los 62, 105, y 123 *DDS* para el cuarto cultivo se debió también al comportamiento de la humedad del suelo para este experimento ocasionada por los altos niveles de precipitación que se presentaron durante la temporada de 2010. Ver Figura 5.10.

Se observa que los picos de producción de los cuatro cultivos fueron diferentes, para el cultivo uno (1) se alcanzó una producción máxima en el nivel uno de 16 t.ha^{-1} , mientras que para el cultivo dos (2) fue de $17,1 \text{ t.ha}^{-1}$, y para el cultivo cuatro fue de sólo $13,6 \text{ t.ha}^{-1}$, el cultivo tres (3) presentó la mayor producción alcanzando un pico de $25,3 \text{ t.ha}^{-1}$ para el mismo tiempo de aforo (*DDS*), sin embargo en el aforo posterior se logró llegar hasta $26,9 \text{ t.ha}^{-1}$, lo cual se debió probablemente a que el ciclo se alargó por problemas agronómicos.

El análisis estadístico arrojó que las producciones máximas alcanzadas para todos los cultivos no son estadísticamente iguales, existiendo diferencias significativas entre los cultivos, a pesar de que entre los cultivos uno, dos y cuatro las diferencias son bajas. Esto indica que no podrían hacerse inferencias a partir de los promedios de las producciones de todos los cultivos.

5.5.2 Análisis para raigrás

Las Tablas 5.15 a 5.25 presentan un resumen de los resultados de los análisis estadísticos para cada uno de los cultivos y cortes realizados para el caso de raigrás.

Al considerar un análisis de inferencias de la producción de *MS* con base en los niveles de irrigación para cada uno de los dos cultivos realizados en forma separada se obtuvieron también diferencias significativas entre tratamientos para el 1er y 2do cultivos individualmente.

Tabla 5.15 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo y primer corte de raigrás.

PRIMER CULTIVO, PRIMER CORTE DE RAIGRÁS				
DDS	63	78	88	Significancia de los Perfiles
Nivel Riego	Aforos de M.S. (Kg.ha ⁻¹)			
Significancia de los aforos **				
1	2308,1	4178,4	6176,9	**
	37,3	21,0	10,9	
2	2380,8	3535,0	5439,3	
	54,8	26,8	23,7	
3	1720,2	3466,6	5192,5	
	24,4	16,8	16,1	
4	1529,8	2662,4	3903,8	
	33,4	19,4	20,9	
5	1495,6	2376,8	3614,5	
	30,2	19,2	22,2	
6	1246,7	2256,7	3473,8	
	36,8	17,2	16,4	
Significancia de los niveles	**	**	**	Media Coef. Var.

Tabla 5.16 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo y segundo corte de raigrás.

PRIMER CULTIVO, SEGUNDO CORTE DE RAIGRÁS					
DDS	13	25	38	43	Significancia de los Perfiles
Nivel Riego	Aforos de M.S. (Kg.ha ⁻¹)				
Significancia de los aforos **					
1	1478,0	2056,8	4397,0	5123,6	**
	15,6	28,1	10,9	10,3	
2	1592,4	2230,3	4330,1	4939,7	
	21,8	37,5	17,5	17,1	
3	1294,2	2009,0	3505,8	4130,4	
	18,2	45,1	25,2	23,8	
4	1081,9	1118,7	2635,8	2994,0	
	17,2	11,7	23,1	12,9	
5	892,4	922,8	2174,2	2469,7	
	17,8	18,6	15,1	21,4	
6	683,1	706,3	1664,2	1890,3	
	20,6	18,0	23,5	27,7	
Significancia de los niveles	**	**	**	**	Media Coef. Var.

Tabla 5.17 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo y tercer corte de raigrás.

PRIMER CULTIVO, TERCER CORTE DE RAIGRÁS					
DDS	13	25	38	49	Significancia de los Perfiles
Nivel Riego	Aforos de M.S. (Kg.ha ⁻¹)				
Significancia de los aforos **					
1	1333,6	1842,9	3767,8	5088,3	
	13,3	27,7	23,5	18,0	
2	1231,0	1506,2	3171,0	4380,2	
	14,5	14,0	9,0	13,8	
3	1074,1	1484,4	2962,5	4174,9	
	14,5	14,3	12,9	19,2	**
4	985,4	1376,2	2877,5	3860,2	
	18,8	14,3	23,7	11,0	
5	1143,4	1255,7	2839,8	3655,3	
	9,8	14,2	8,2	14,0	
6	1019,7	1054,4	2484,2	3071,0	
	27,8	28,6	35,3	26,3	
Significancia de los niveles	**	**	**	**	Media Coef. Var.

Tabla 5.18 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo y cuarto corte de raigrás.

PRIMER CULTIVO, CUARTO CORTE DE RAIGRÁS					
DDS	13	25	38	71	Significancia de los Perfiles
Nivel Riego	Aforos de M.S. (Kg.ha ⁻¹)				
Significancia de los aforos **					
1	1173,0	1839,2	4382,0	6090,4	
	19,7	23,8	32,6	14,0	
2	1192,8	2102,8	5305,2	5663,9	
	11,8	14,9	17,3	18,6	
3	1213,1	2115,6	5231,8	5190,7	
	12,0	12,8	14,1	12,6	**
4	992,4	1878,8	4612,5	4144,6	
	17,6	18,6	15,1	21,4	
5	699,6	1324,5	3251,7	2921,8	
	12,5	13,8	9,0	14,0	
6	578,8	1095,7	2689,9	2417,0	
	23,4	16,4	17,2	36,8	
Significancia de los niveles	**	**	**	**	Media Coef. Var.

Por otro lado se determinó si los aforos fueron significativamente diferentes entre ellos, alcanzando significancia (**) en todos los casos, esto permite observar si hubo un delta de crecimiento entre aforos o no.

Para el caso de raigrás el análisis estadístico multivariado también arrojó diferencias significativas ($\alpha < 0,05$) con excepción de los cortes segundo, tercero y cuarto del segundo cultivo, y el séptimo del primer cultivo, esto se debió muy probablemente a que no se pudo aplicar los tratamientos de gradiente convenientemente en estos ciclos debido fundamentalmente a que el suelo permaneció con altos niveles de humedad, por efectos de los altos niveles de precipitación que se presentaron por la presencia del fenómeno de La Niña en 2010. Por otro lado la diferencia de las láminas aplicadas para el corte 7 del primer cultivo en los primeros cortes fue muy pequeña entre niveles. (Ver Figuras 3.14, y 3.15).

Lo anterior, también arrojó la no significancia entre los niveles de irrigación para la respuesta de *MS* con base en la lámina aplicada considerando un análisis integral de toda la curva de producción de biomasa, para cada uno de los cortes, es decir un análisis del comportamiento de los perfiles de los cortes.

El proceso de crecimiento del ciclo del cultivo para el cuarto corte del primer cultivo para raigrás, muestra que inicialmente los niveles 2 y 3 tuvieron un mejor desarrollo que para el primer nivel. Sin embargo, en el momento de los aforos finales a los 38 y 71 DDS, el gradiente arrojó el orden de la producción de biomasa esperado en todos los niveles.

Tabla 5.19 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo y quinto corte de raigrás.

PRIMER CULTIVO, QUINTO CORTE DE RAIGRÁS					
DDS	13	25	38	51	Significancia de los Perfiles
Nivel Riego	Aforos de M.S. (Kg.ha ⁻¹)				
	Significancia de los aforos **				
1	1531,6	2498,5	4759,9	6192,3	**
	11,6	24,3	25,1	15,8	
2	1311,0	1724,9	3792,6	4921,9	
	20,7	27,6	30,3	17,6	
3	1194,7	1390,2	2806,5	3994,7	
	18,8	44,9	14,2	34,3	
4	992,6	1026,4	2418,3	3089,4	
	22,0	14,0	32,6	23,8	
5	901,5	932,2	2196,4	2806,0	
	13,5	13,8	9,0	14,0	
6	549,8	568,5	1339,5	1711,2	
	19,7	16,1	16,8	24,4	
Significancia de los niveles	**	**	**	**	Media Coef. Var.

Tabla 5.20 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo y sexto corte de raigrás.

PRIMER CULTIVO, SEXTO CORTE DE RAIGRÁS					
DDS	13	25	31	42	Significancia de los Perfiles
Nivel Riego	Aforos de M.S. (Kg.ha-1)				
	Significancia de los aforos **				
1	1317,9	1931,5	4148,9	4476,0	**
	18,7	29,3	31,2	27,0	
2	1270,1	1718,2	3685,1	4258,6	
	21,6	26,3	35,3	28,6	
3	1155,0	1691,0	3307,6	4236,4	
	12,5	17,2	32,3	19,5	
4	1173,7	1837,1	3180,6	3951,1	
	18,5	33,5	18,6	17,7	
5	888,5	1415,8	2506,6	3027,0	
	18,3	16,4	16,4	21,3	
6	731,3	1184,9	2097,8	2447,3	
	15,8	18,6	17,3	14,9	
Significancia de los niveles	**	**	**	**	Media Coef. Var.

Tabla 5.21 Resultados del análisis estadístico para el primer cultivo y séptimo corte de raigrás.

PRIMER CULTIVO, SEPTIMO CORTE DE RAIGRÁS					
DDS	13	25	38	46	Significancia de los Perfiles
Nivel Riego	Aforos de M.S. (Kg.ha-1)				
	Significancia de los aforos **				
1	1278,6	1890,8	3520,1	4277,5	NS
	13,1	49,3	19,9	18,9	
2	1258,9	1480,2	3100,1	3886,7	
	15,2	35,7	16,9	20,6	
3	1161,7	1480,6	2642,0	3474,6	
	17,4	47,3	10,6	23,4	
4	1152,7	1270,1	2865,9	3471,0	
	15,0	20,1	14,7	17,5	
5	1120,5	1237,3	2787,9	3379,8	
	14,9	21,4	15,1	18,6	
6	1004,6	1038,8	2447,4	2881,1	
	28,6	34,3	14,2	44,9	
Significancia de los niveles	NS	NS	**	**	Media Coef. Var.

Tabla 5.22 Resultados del análisis estadístico para el segundo cultivo y primer corte de raigrás.

SEGUNDO CULTIVO, PRIMER CORTE DE RAIGRÁS				
DDS	63	78	90	Significancia de los Perfiles
Nivel Riego	Aforos de M.S. (Kg.ha-1)			
	Significancia de los aforos **			
1	4569,4	7220,5	9933,1	**
	21,4	31,3	10,9	
2	3637,1	7156,2	9747,7	
	17,2	23,7	11,7	
3	4268,8	6498,9	9527,8	
	25,7	18,3	22,3	
4	4845,3	7058,2	9213,0	
	18,0	15,2	13,1	
5	2285,5	3923,5	7584,6	
	33,2	25,7	9,5	
6	2939,7	4457,2	7112,8	
	41,8	28,1	27,3	
Significancia de los niveles	**	**	**	Media Coef. Var.

Tabla 5.23 Resultados del análisis estadístico para el segundo cultivo y segundo corte de raigrás.

SEGUNDO CULTIVO, SEGUNDO CORTE DE RAIGRÁS					
DDS	13	25	38	52	Significancia de los Perfiles
Nivel Riego	Aforos de M.S. (Kg.ha-1)				
	Significancia de los aforos **				
1	1516,4	3170,5	5448,8	7113,9	NS
	18,4	20,9	22,3	19,6	
2	1367,1	3133,8	5777,9	6928,7	
	17,6	19,5	14,6	14,2	
3	1326,2	2306,4	5515,7	6895,1	
	44,7	29,5	27,6	25,0	
4	1406,5	1656,6	4566,9	6654,0	
	19,2	30,7	27,2	22,0	
5	1373,2	2274,3	4919,3	6573,6	
	21,6	12,9	23,1	11,7	
6	1218,2	1722,9	4410,8	6234,6	
	16,4	26,0	35,0	31,3	
Significancia de los niveles	NS	**	NS	NS	Media Coef. Var.

Tabla 5.24 Resultados del análisis estadístico para el segundo cultivo y tercer corte de raigrás.

SEGUNDO CULTIVO, TERCER CORTE DE RAIGRÁS				
DDS	15	29	43	Significancia de los Perfiles
Nivel Riego	Aforos de M.S. (Kg.ha-1)			
	Significancia de los aforos **			
1	1411,6	2738,5	3772,6	NS
	14,9	13,5	22,5	
2	1461,8	2103,2	3724,3	
	15,8	20,6	18,6	
3	1145,4	2488,5	3653,1	
	38,3	35,2	23,0	
4	1268,0	2730,1	3464,3	
	17,2	11,1	18,1	
5	1149,7	2241,6	3354,3	
	21,7	12,3	29,9	
6	1267,2	2476,1	3277,2	
	22,5	18,8	18,1	
Significancia de los niveles	NS	**	NS	Media Coef. Var.

Este comportamiento se pudo deber a un retraso del proceso de desarrollo fenológico localizado en el primer nivel, o a que los nutrientes, no estuvieron igualmente disponibles en los estadios iniciales para ese nivel, mejorando su disponibilidad con el tiempo.

Para el cultivo 2 corte 3 no se pudo aplicar el gradiente, (Ver Figura 3.15) razón por la cual para los aforos tempranos los niveles 2, 4 fueron los que produjeron mayores cantidades de biomasa para los aforos de los días 15 y 29 respectivamente, sin embargo, para el último aforo el nivel 1 se recuperó, esto se debió seguramente a la influencia de los tratamientos de gradiente previos, (mejor porte de raíces, y estructuras de las planta bases alcanzados en el nivel 1).

También se determinó si para aforos hubo diferencias significativas entre los tratamientos, alcanzando significancia (**) en la mayoría de los casos para el primer cultivo. Sin embargo, para el segundo cultivo no se alcanzó la significancia requerida para algunos de los cortes (cultivo, corte, aforos: 1,7:13, 25; 2, 2: 13, 38, 52 DDS; 2, 3: 15, 43 DDS; y 2, 4: 42 DDS). Esto se debió a que la mayoría de estos ciclos fueron influenciados por las altas precipitaciones ocurridas durante la campaña 2010 que a la postre no permitieron diferencias apreciables entre los niveles de humedad generados, ver Figura 5.12.

Tabla 5.25 Resultados del análisis estadístico para el segundo cultivo y cuarto corte de raigrás.

SEGUNDO CULTIVO, CUARTO CORTE DE RAIGRÁS			
DDS	27	42	Significancia de los Perfiles
Nivel Riego	Aforos de M.S. (Kg.ha-1)		
	Significancia de los aforos **		
1	2093,3 16,3	4131,5 6,6	NS
2	1517,9 18,9	4028,6 8,7	
3	1592,2 16,8	3982,9 12,4	
4	1662,6 18,5	3868,2 18,3	
5	1690,0 19,2	3856,5 16,0	
6	1437,5 23,4	3787,7 5,9	
Significancia de los niveles	**	NS	Media Coef. Var.

Para el caso de raigrás también se probó la hipótesis de que las diferencias no sólo entre cultivos sino entre cosechas, (cortes máximos), no fueran significativamente diferentes entre ellos ($\alpha > 0,05$), encontrado que para los dos primeros cortes, las diferencias son significativas, sin embargo, para los dos cortes finales se comprueba la hipótesis requerida. Esto indica que eventualmente las producciones de estos cortes son estadísticamente iguales, lo que permite hacer inferencias para el modelo AquaCrop sin mayores previsiones a partir de los promedios de estos dos cortes.

5.6 Resultados experimentales

Los resultados experimentales se obtuvieron sobre las variables observadas o de respuesta.

Elas son:

1. Curvas de Kc
2. Humedad del suelo
3. Cobertura del dosel
4. Curvas de biomasa y producción y
5. Funciones de producción

5.6.1 Evapotranspiración de referencia

Con base en el método FAO, Penman – Monteith, como se explicó en el numeral 3.5.2 se determinó el la evapotranspiración de referencia para el período de los experimentos, específicamente durante los años 2009 y 2010.

Las Figuras 5.3 y 5.4 presentan la evapotranspiración de referencia calculada con el programa ET₀ Calculator® (Raes, 2009), ésta variable climática representa el comportamiento de la potencialidad del clima para los años 2009 y 2010, que fueron los años de experimentación para los dos cultivos. La línea roja presenta la media móvil decadal con el objeto de observar mejor la tendencia. En general se puede verificar que la ET₀ se presentó alrededor de 2,46 mm.día⁻¹ durante 2009 con una oscilación entre 1,55 y 3,7 mm.día⁻¹, con una tendencia a aumentar hacia el final del año. Mientras que para el año 2010 la media estuvo en 2,42 mm.día⁻¹ con una oscilación de entre 1,5 y 3,8 mm.día⁻¹, con una tendencia a disminuir a lo largo del año.

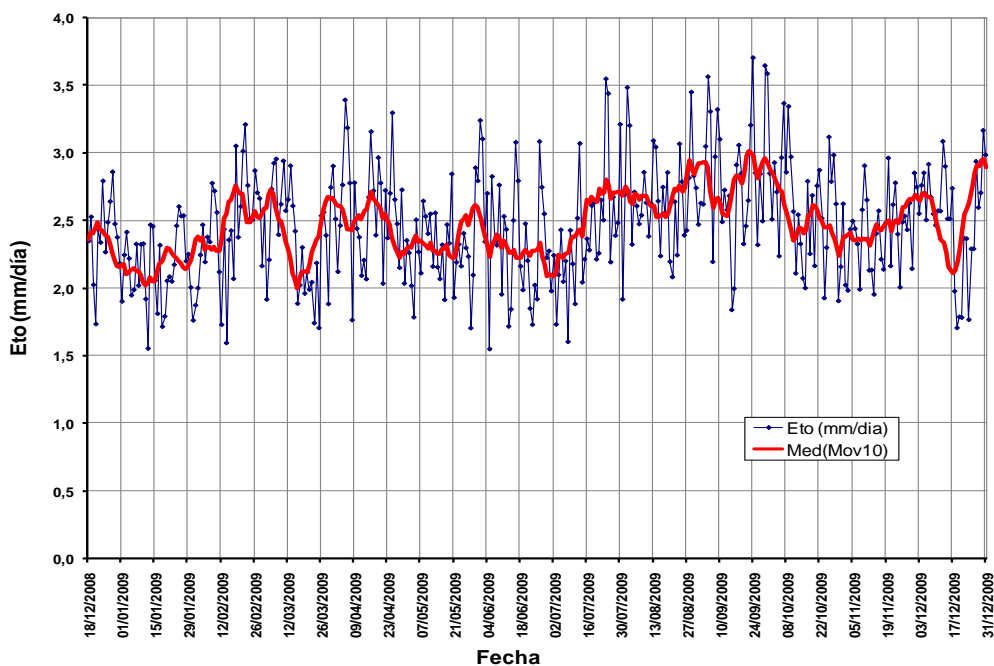


Figura 5.3 Evapotranspiración de referencia calculada por medio de la ecuación de Penman-Monteith para el año 2009 presentada para las condiciones de la Sabana de Bogotá, Estación Tibaitatá.

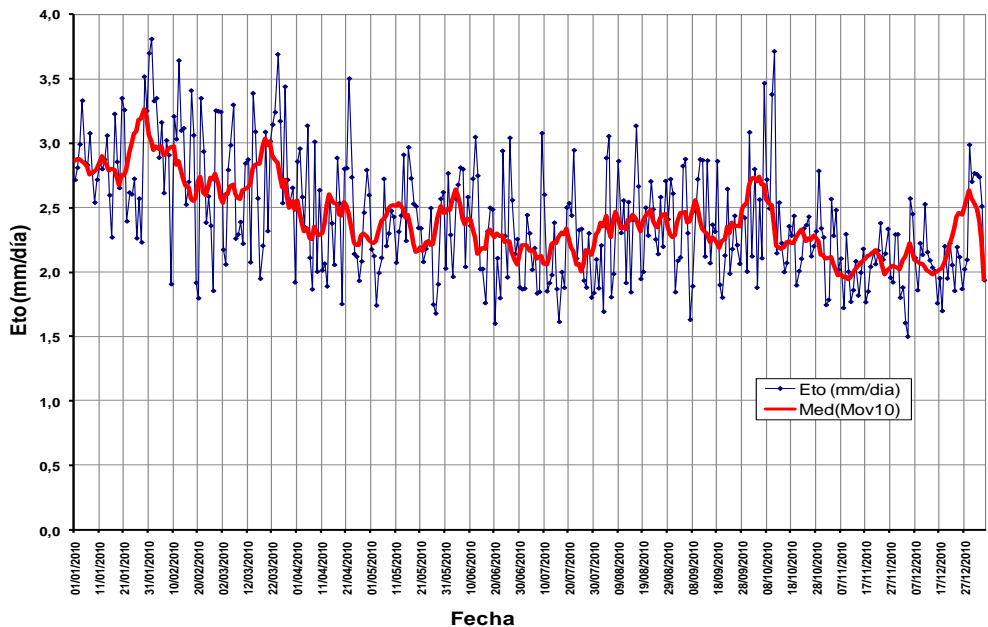


Figura 5.4 Evapotranspiración de referencia calculada por medio de la ecuación de Penman-Monteith para el año 2010 presentada para las condiciones de la Sabana de Bogotá, Estación Tibaitatá.

5.6.2 Huella hídrica, curvas de K_{cb} , K_c , y K_e

Para cada uno de los ciclos de cultivo se determinaron los K_c , K_{cb} , y K_e de avena forrajera y raigrás. Estas curvas representan el nivel de consumo hídrico o huella hídrica que cada cultivo requiere en el desarrollo de su ciclo productivo. El cálculo se basó en las unidades experimentales sin limitaciones hídricas (tratamientos sobre niveles de agotamiento inferiores a 0,2).

De esta forma se obtiene la máxima potencialidad del clima, sobre los niveles más altos de biomasa. Las curvas se determinaron como el promedio de los tratamientos sin restricciones hídricas del cultivo con la más alta producción alcanzada para el caso de avena forrajera, cada uno de ellos con ocho unidades experimentales sin restricciones hídricas a lo largo del ciclo completo. Se observa la curva de K_{cb} (rojo) alcanzando su nivel más alto a los 62 *DDS* con un valor que supera el nivel de uno punto uno (1,17), manteniéndose en dicha magnitud hasta inicios de senescencia. Ver Figura 5.5. El K_c mantiene una oscilación alrededor del K_{cb} comenzando al inicio del ciclo sobre este y declinando hacia el final, como es lógico la curva de K_e es opuesta a la K_{cb} , Allen et al., (1998).

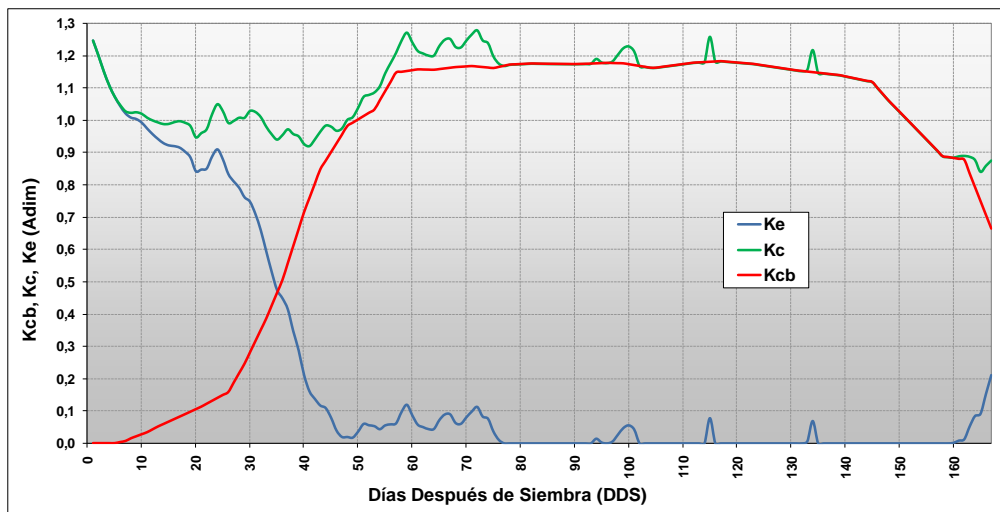


Figura 5.5 Curvas de evapotranspiración, K_{cb} , K_c , y K_e para avena forrajera (*Avena sativa L.*) en el ecosistema del altiplano de la Sabana de Bogotá, (Colombia).

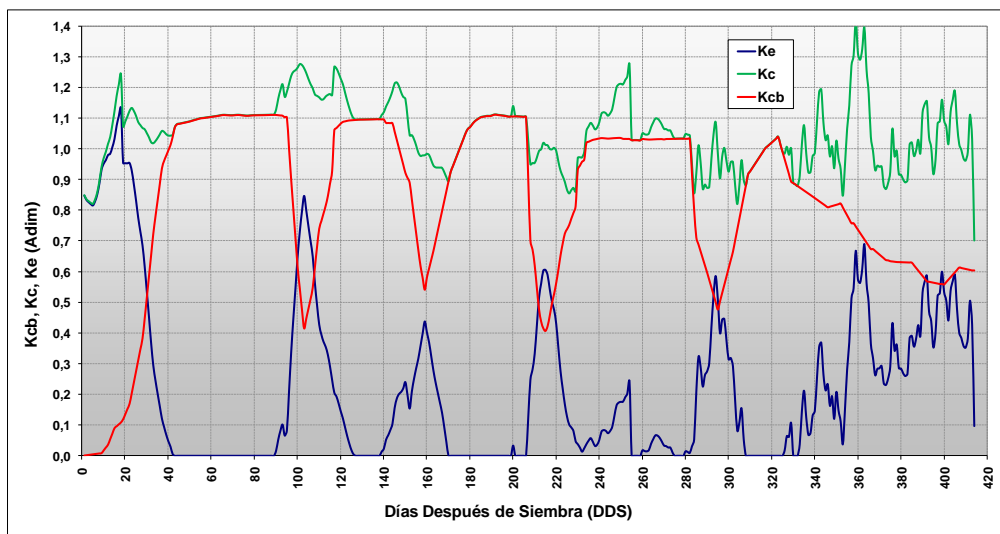


Figura 5.6 Curvas de evapotranspiración, K_{cb} , K_c , y K_e para Raigrás (*Lolium perenne*) en el ecosistema del altiplano de la Sabana de Bogotá, (Colombia).

Para el caso de raigrás se obtuvieron los tres primeros ciclos (cortes) por el promedio de los dos cultivos realizados, también con base en los tratamientos sin limitaciones de humedad con un nivel de agotamiento inferior a 0,2, y para cada tratamiento se observaron los resultados de las ocho unidades experimentales. Para los ciclos posteriores al tercero fueron promediados y su resultado se presenta como el ciclo cuarto (4to corte). Luego se determinó el comportamiento del proceso de senescencia, generando ésta con base en

anegamiento por exceso de humedad se puede observar su comportamiento en el ciclo final. Ver Figura 5.6.

La curva de K_{cb} , responde a los cortes en forma inmediata presentando la respectiva caída. Inicialmente asciende a su valor máximo hasta el día 55 DDS, permaneciendo en este nivel hasta el momento del corte. Para raigrás el nivel más alto del K_{cb} promedia en el valor de 1,1, con una tendencia a la disminución a través de los diferentes cortes en la medida que el cultivo envejece.

Es importante resaltar que el K_c y el K_{cb} son únicos para la especie o la variedad, al respecto Allen, et al., (2006) aclaran: “El factor K_c representa el resumen de las diferencias físicas y fisiológicas entre los cultivos y la definición del cultivo de referencia”.

Por otro lado, en la misma publicación se reitera: “El coeficiente basal del cultivo, K_{cb} , es definido como el cociente entre ET_c y ET_0 cuando la superficie del suelo se encuentra seca, pero donde el contenido promedio de agua en la zona radicular del suelo es adecuado para mantener totalmente la transpiración de la planta. (Lo cual se logró en los niveles 1 del gradiente). El K_{cb} representa la línea base potencial del valor de K_c en ausencia de los efectos adicionales introducidos por el humedecimiento del suelo a través del riego o la precipitación”. Allen, et al., (2006).

Debido a que la huella hídrica se define como el volumen de agua (*Litros*) requerido por la especie para producir una unidad de biomasa (*Kilogramo*), la determinación de la curva basal del cultivo (K_{cb}) como la relación entre ET_c y ET_0 determina el agua transpirada como base fundamental de la producción de biomasa.

El valor de la huella hídrica para ambos cultivos fue determinado a partir de las funciones de producción obtenidas y se discute en el numeral 5.6.6. Funciones de producción, implicaciones económicas de la huella hídrica.

Los K_{cb} , obtenidos aquí definen en potencial hídrico de las especies estudiadas para la generación de biomasa y que pueden ser relacionados con el clima por medio de la ET_0 , para a partir de estos elementos se pueda determinar el nivel de consumo hídrico de la especie y por lo tanto de su huella hídrica intrínseca.

5.6.3 Humedad del suelo

La humedad del suelo se supervisó por medio del balance hídrico y por el registro con frecuencia de dos días de cada unidad experimental por medio

del método termo gravimétrico y por TDR, tanto para la avena forrajera como para el raigrás, durante todo el período del ciclo de los cultivos.

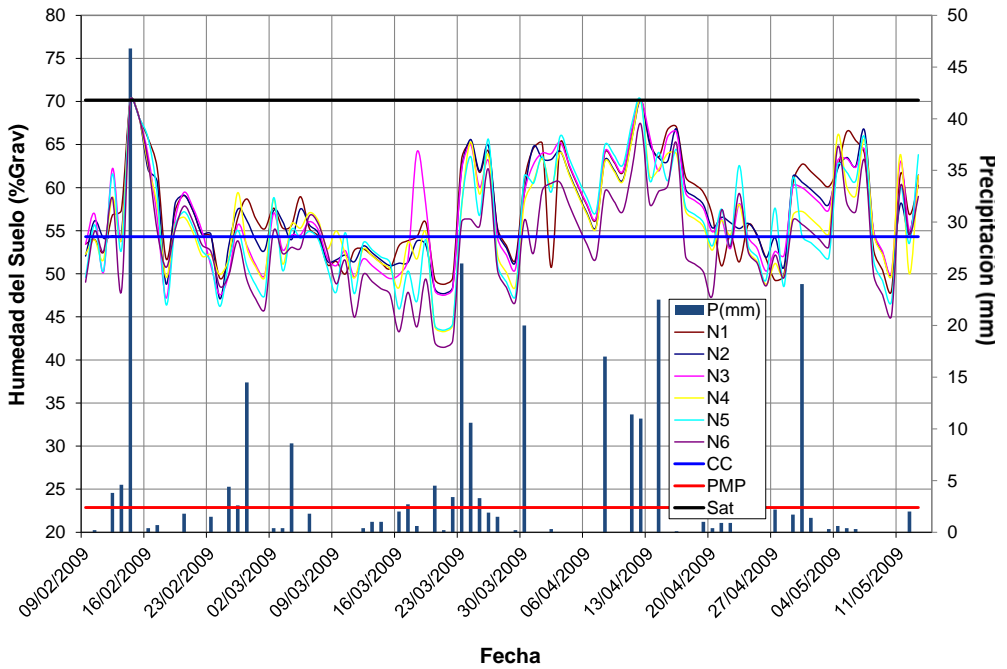


Figura 5.7 Humedad del suelo a través del ciclo vegetativo de avena forrajera durante el primer cultivo. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia, 2009.

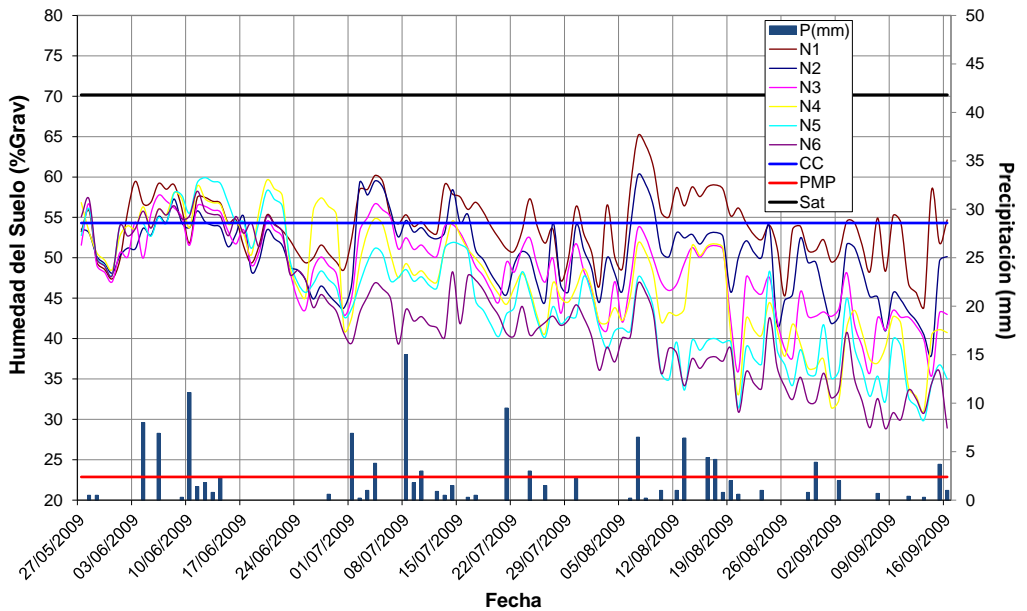


Figura 5.8 Humedad del suelo a través del ciclo vegetativo de avena forrajera durante el segundo cultivo. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia, 2009.

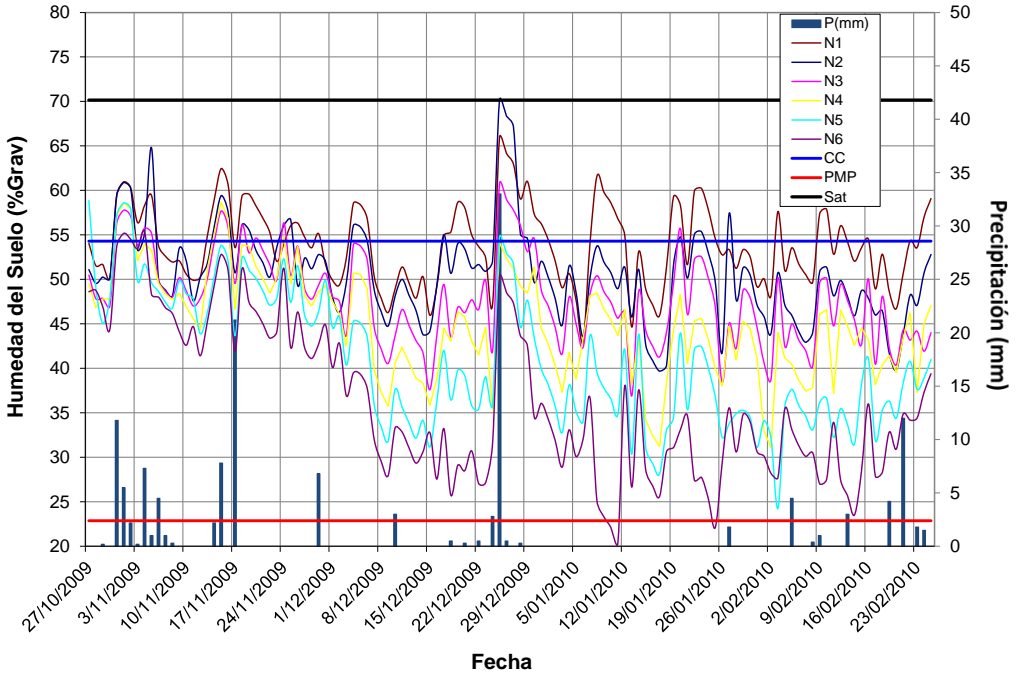


Figura 5.9 Humedad del suelo a través del ciclo vegetativo de avena forrajera durante el tercer cultivo. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia, 2009/2010.

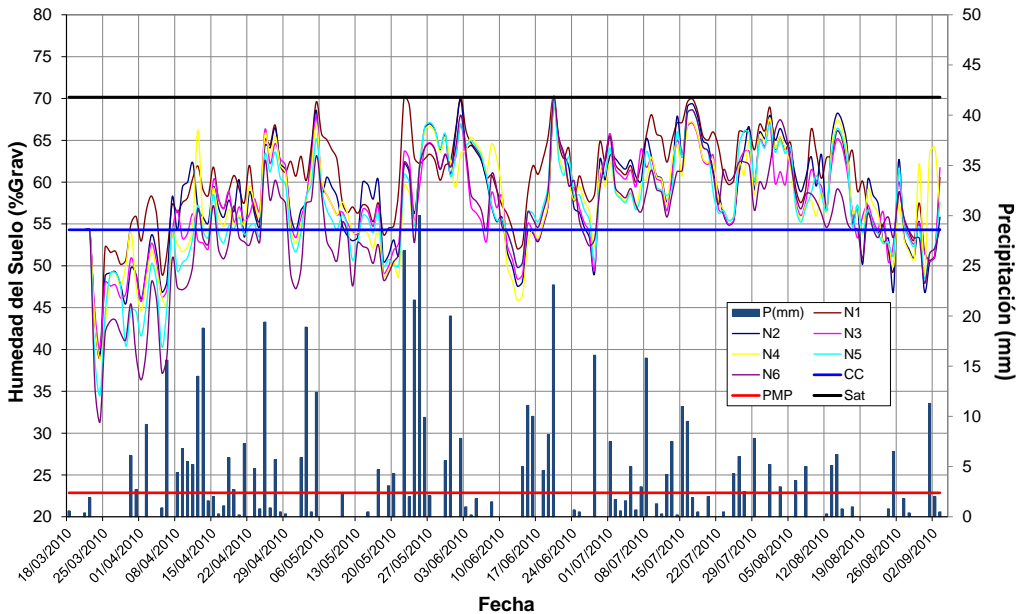


Figura 5.10 Humedad del suelo a través del ciclo vegetativo de avena forrajera durante el cuarto cultivo. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia, 2010.

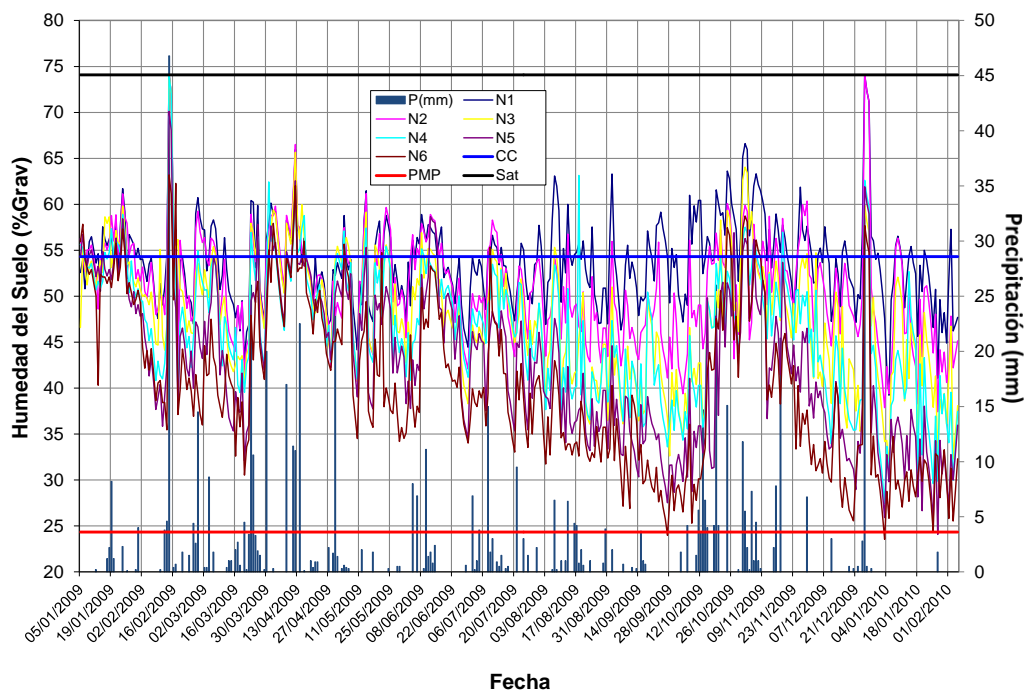


Figura 5.11 Humedad del suelo a través del ciclo vegetativo de raigrás durante el primer cultivo. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia, 2009/2010.

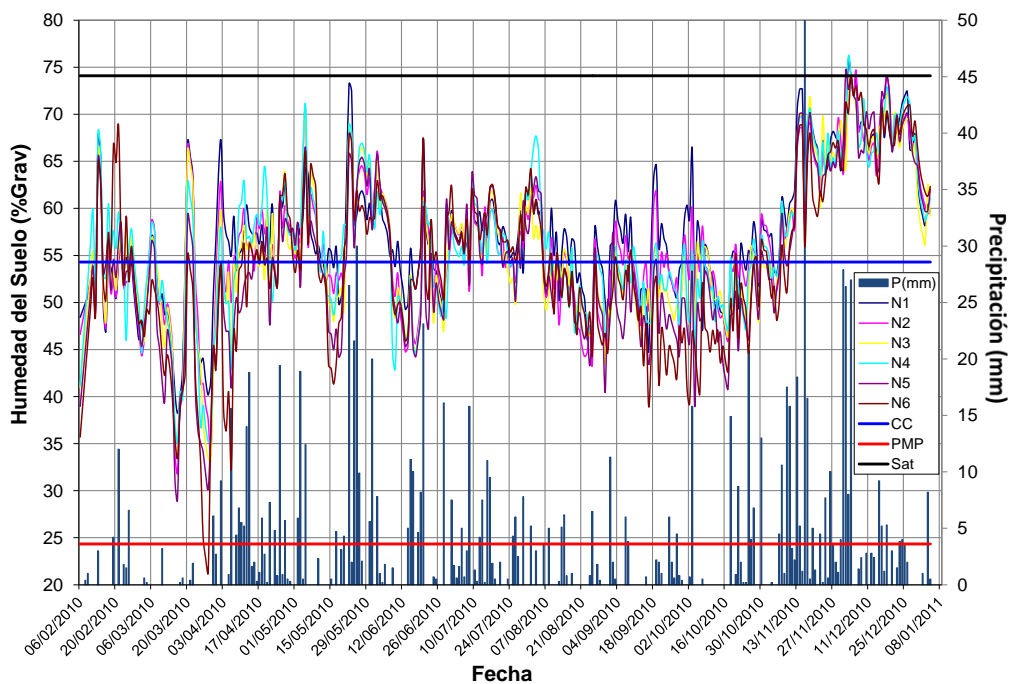


Figura 5.12 Humedad del suelo a través del ciclo vegetativo de raigrás durante el segundo cultivo. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia, 2010/2011.

Las Figuras 5.7 a 5.10 muestran el comportamiento de la humedad del suelo de cada uno de los cultivos de avena forrajera realizados. Para el primer cultivo, el cual se desarrolló durante los primeros meses de 2009 se observa que en general se presentó una oscilación de las humedades alrededor del rango de agua aprovechable total entre las líneas de CC y PMP, sin embargo los tratamientos no presentaron diferencias apreciables entre sí. Para los casos de los cultivos dos y tres que en general comprendieron las épocas secas de los años 2009 y principios de 2010, se observan mejor las diferencias entre tratamientos, resultado del gradiente generado, las cuales se van acentuando a medida que avanza el ciclo del cultivo.

Sin embargo, para el cuarto cultivo la humedad del suelo fue muy homogénea para todos los tratamientos debido a los excesos hídricos provenientes de las altas precipitaciones que se presentaron, además, gracias a los excelentes drenajes previamente instalados se mantuvo el gradiente del suelo, pero en general éste tendió a permanecer por encima del área de agotamiento de la zona de raíces y los tratamientos mantuvieron pequeñas diferencias entre sí.

Para el caso de raigrás, en el primer cultivo se logró apreciables diferencias de humedad del suelo entre tratamientos a lo largo del ciclo desde siembra hasta el último corte, en el período 2009/2010 lo cual se observa en la Figura 5.11.

Sin embargo, para el segundo cultivo el cual se desarrolló en el periodo de mayores precipitaciones (2010/2011), las diferencias entre los tratamientos fueron pequeñas, por lo cual sus curvas se observan muy juntas. Al final del ciclo (año) se mantuvo las humedades del suelo altas, con el objeto de generar la senescencia “forzada” del cultivo. Las humedades logradas en la zona de raíces alcanzaron niveles bastante elevados de humedad, (cerca al punto de saturación), lo cual contribuyó a la generación de la senescencia del pasto raigrás y a permitir la supervisión de este proceso, el cual no es usual en un cultivo indeterminado como el raigrás. Ver Figura 5.12.

Las figuras 5.7 a 5.12 en las que se muestran las humedades de los niveles de los tratamientos de los experimentos de gradiente, fueron realizadas con base en los promedios diarios de las ocho repeticiones de cada uno los seis tratamientos de humedad.

Las oscilaciones que se observan muestran el proceso natural del suelo de humedecimiento y desecación por acción de los elementos climáticos que presentan variaciones a nivel diario.

Debido a que el nivel de agotamiento para riego del primer tratamiento (nivel más alto, N1) fue bastante bajo (0,2) lo cual garantiza que en estos tratamientos el cultivo no sufra por falta de humedad.

Como el gradiente se genera a partir del nivel de humedad del tratamiento N1, desde luego, los demás tratamientos generan un nivel de agotamiento mayor, resultando un conjunto de humedades que varían hasta niveles bajos, muy cercanas al PMP.

5.6.4 Cobertura del dosel

De acuerdo a lo establecido en el capítulo de metodología la cobertura del dosel fue supervisada por fotografía y evaluada a través del programa *CobCal*, (Ferrari et al., (2009)), esto se realizó tanto para avena forrajera como para raigrás.

Fueron supervisados completamente los últimos cultivos (cuarto para avena forrajera y segundo para raigrás), en cada una de sus unidades experimentales y con una frecuencia de dos veces por semana. Por esta razón se tiene un banco de fotografías a lo largo de dichos ciclos para todos los tratamientos.

Para los demás cultivos se estimaron las curvas de cobertura del dosel para los niveles de humedad máximos en forma aproximada, con base en el comportamiento de las supervisadas y por observaciones de campo realizadas en las fechas de los aforos de los ciclos vegetativos y sus estados fenológicos.

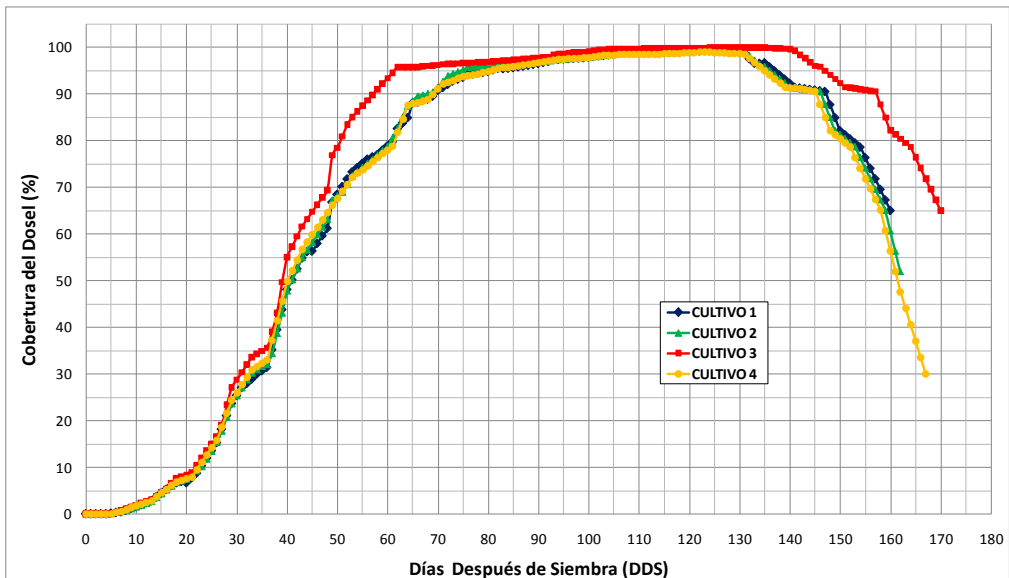


Figura 5.13 Cobertura del dosel a través del ciclo vegetativo para avena forrajera desarrollado para los niveles máximos de humedad durante los cuatro cultivos, 2009 a 2010. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.

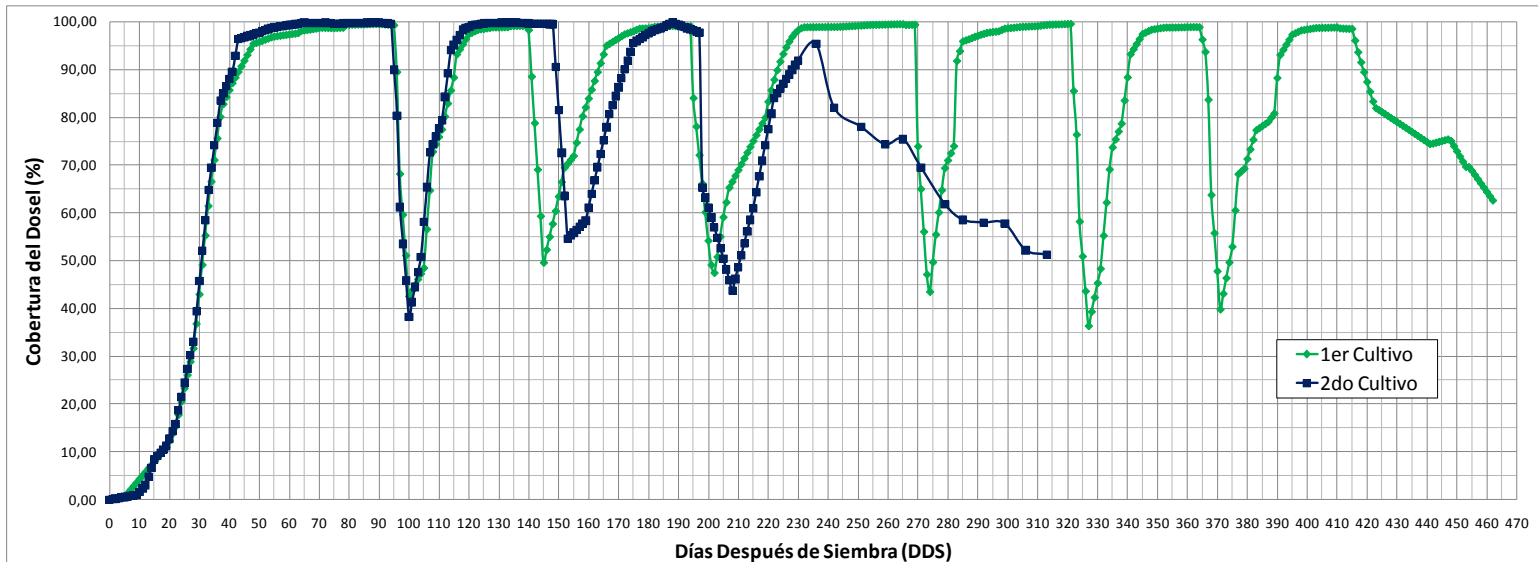


Figura 5.14 Cobertura del dosel a través del ciclo vegetativo para raigrás durante el primero y el segundo cultivo, 2009/2010. C.I.Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.

En la Figura 5.13 se muestran las curvas de cobertura del dosel para los niveles sin limitaciones de humedad del suelo (nivel 1) para todos los cultivos de Avena forrajera realizados, los cultivos 1 y 2 presentan comportamientos similares, mientras que el cultivo 3 presentó un periodo vegetativo mayor debido a la presencia de un brote de roya de la hoja (*Puccinia Coronata f. sp. avenae*) que se presentó al final del periodo y la cual fue controlada rápidamente. El cultivo cuatro fue supervisado hasta senescencia en forma detallada, mientras que para los demás cultivos dicha etapa fue estimada.

De forma similar se realizó la determinación de la cobertura del dosel para raigrás, durante el segundo cultivo, ver Figura 5.14 los tres primeros cortes y el período de senescencia generado. El primer corte se realizó a los 94 días, mientras que el segundo fue a los 148 DDS (54 DDC) y el tercero a los 197 DDS (49 DDC), en adelante se dejó alcanzar el nivel máximo de cobertura, logrado a los 236 DDS (39 DDC) y luego se generó la senescencia del dosel.

Para el segundo y tercer cortes del segundo cultivo se observó que la cobertura del dosel no creció con la misma pendiente que para el ciclo desde siembra al primer corte, esto se debió a la influencia de la alta humedad del suelo que se presentó durante estas dos últimas etapas. Sin embargo, a pesar de estos inconvenientes la curva es válida como patrón obtenido para las dos primeras etapas y puede considerarse para la validación del modelo AquaCrop.

Para el primer cultivo se obtuvo una curva más completa estimada a partir de los niveles sin restricción de humedad (nivel 1), la cual alcanzó hasta el sexto corte y el período de senescencia. En este caso las pendientes de crecimiento se presentan muy similares entre cortes lo cual muestra que la cobertura se desarrolla sin restricciones de humedad, es decir con la máxima potencialidad de producción de hojas y del dosel. Es importante observar que los niveles máximos alcanzados a medida que se desarrollan los cortes tienden a disminuir seguramente por la pérdida paulatina de vigorosidad del cultivo a través del tiempo.

Las fechas entre cortes variaron debido principalmente a causas de manejo, sin que esto tenga implicaciones trascendentes. Estos resultados permiten que también puedan ser usados ya sea para la calibración o validación del modelo AquaCrop.

5.6.5 Curvas de biomasa y producción

Tanto para avena forrajera como para raigrás se desarrollaron las curvas de biomasa con base en muestreos periódicos, cada 15 a 20 días, para cada unidad experimental, las Figuras 5.15 a 5.18 presentan las curvas de biomasa por niveles promedios de humedad de los diferentes tratamientos para avena

forrajera. En las Figuras 3.14 a 3.16 presentan las láminas de riego por gradiente que se aplicaron en cada uno de los experimentos, y las Tablas 3.4 a 3.18 presentan en forma detallada las láminas de riego aplicadas por tratamiento y por fechas.

Para el cultivo 1 de avena forrajera establecido durante el primer semestre de 2009 se presentaron humedades del suelo similares entre tratamientos a lo largo del ciclo. (ver Figura 5.7).

Para este periodo los niveles de precipitación fueron inusualmente en general altos, por encima de los niveles promedios para los meses de Enero, Febrero, Marzo y Abril, (ver Figura 5.1). Por esta razón las curvas de biomasa de la Figura 5.15 se observan muy juntas y en el punto más alto se separaron en dos grupos, el primero de los cuales alcanzó una biomasa de alrededor de 15.500 Kg.ha⁻¹ para los niveles 1 a 4 y en el segundo de 13.300 Kg.ha⁻¹ para los niveles 5 y 6.

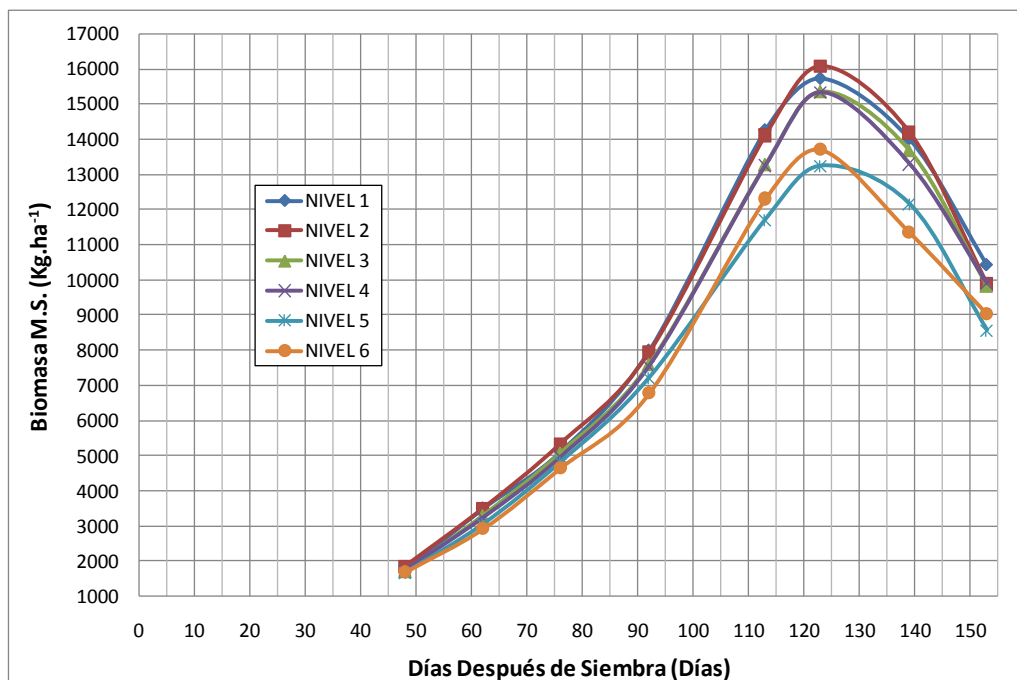


Figura 5.15 Curvas de biomasa de avena forrajera como producción de materia seca para el cultivo 1, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, 2009.

La forma de las curvas muestra un desarrollo paulatino de la producción de biomasa hasta el día 123 fecha en la cual se presenta el comienzo del descenso de la curva de cobertura al inicio de la senescencia (ver Figura 5.13). A partir de este punto la biomasa decrece por efectos del proceso de senescencia normal del cultivo, es importante resaltar que para ninguno de

los cultivos se tuvo en cuenta la cosecha de grano, la disminución de materia seca que se presenta al final de las curvas se debe al proceso natural de envejecimiento del cultivo, el cual pierde materia seca por caída de hojas y pérdida de estructura de la planta.

Para el cultivo 2, se presentan las curvas de biomasa obtenidas para los tratamientos de humedad en la Figura 5.16, en la cual se observa una distribución muy clara de las tendencias y diferencias entre tratamientos y sus efectos en la producción de materia seca. Estas amplias diferencias se lograron gracias a la generación del gradiente de humedad, los cuales fueron acentuados por los bajos niveles de precipitación que se presentaron durante casi todo el ciclo del cultivo (meses de Mayo, Junio, Julio, Agosto, y Septiembre de 2009), ver Figuras 5.1 y 5.8. El cultivo 2 presenta claras diferencias en las curvas para los niveles de los tratamientos, como respuesta a la humedad, esto permite tenerlo en cuenta para los posteriores ajustes del modelo AquaCrop, en la estimación de la biomasa a partir de la humedad del suelo presente.

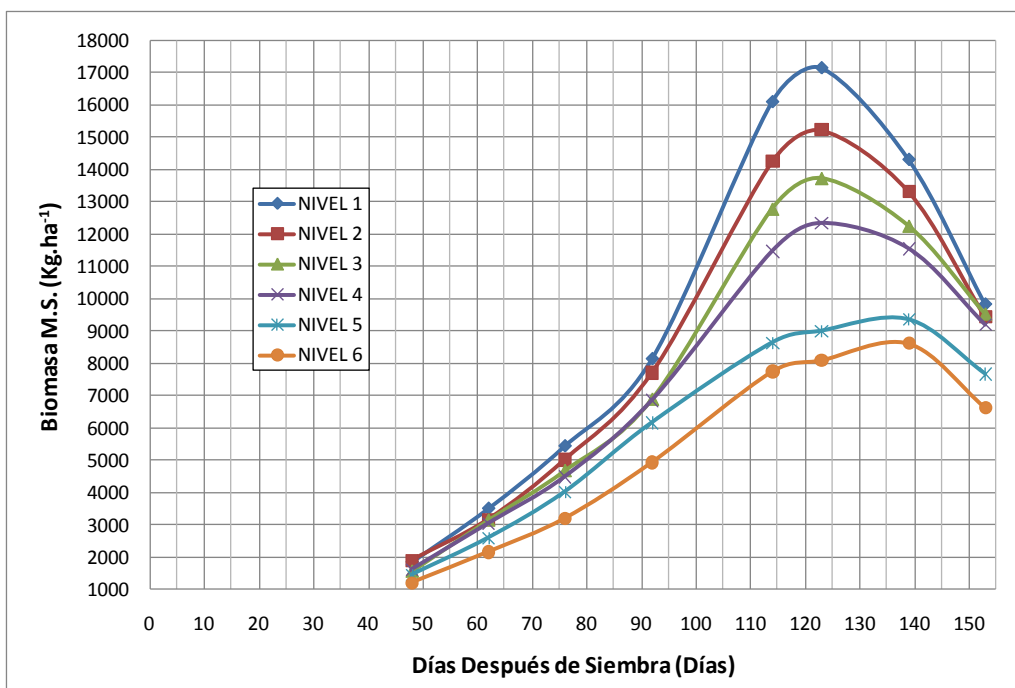


Figura 5.16 Curvas de biomasa de avena forrajera como producción de materia seca para el cultivo 2, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, 2009.

Respecto al cultivo 3 se puede observar en la Figura 5.17 que fue el cultivo para el cual la máxima potencialidad de producción de materia seca como respuesta al agua fue alcanzada para el nivel 1, con cerca de 28.000 Kg. ha⁻¹ y en general para los tratamientos de menores niveles los cuales fueron de

22.000 Kg.ha⁻¹ en sus picos más altos. Resultados intermedios obtuvieron Argote y Halonoca, (2007) con producciones de 23.770, 23.700, y 23.490 Kg.ha⁻¹ para variedades de avena forrajera Tayko, Cayuse y Vilcanota respectivamente en el altiplano de puno (Perú).

Este comportamiento excelente en la producción de biomasa se debió a las buenas condiciones climáticas que se presentaron en los meses que se desarrolló el cultivo (Octubre, Noviembre, Diciembre, y Enero) con precipitaciones cercanas a las promedias históricas.

Estas precipitaciones fueron un poco más bajas de lo normal, y con una distribución temporal uniforme, lo que dejó ver la influencia del gradiente dosificado, revelando las diferencias generadas de humedad entre tratamientos que se presentan en la Figura 5.9.

Esto permitió obtener las curvas de biomasa observadas en las cuales se contrastan cuatro rangos de respuesta; en primer lugar, el pico máximo en el que se aprecian los niveles 1 y 2 sobresalientes con 26.500 Kg.ha⁻¹ en promedio, una cota intermedia de 24.000 Kg.ha⁻¹ alcanzada por los niveles 3 y 4 y los dos niveles inferiores 5 y 6 con unas alturas más bajas de cerca de 22.000 y 20.000 Kg.ha⁻¹ respectivamente.

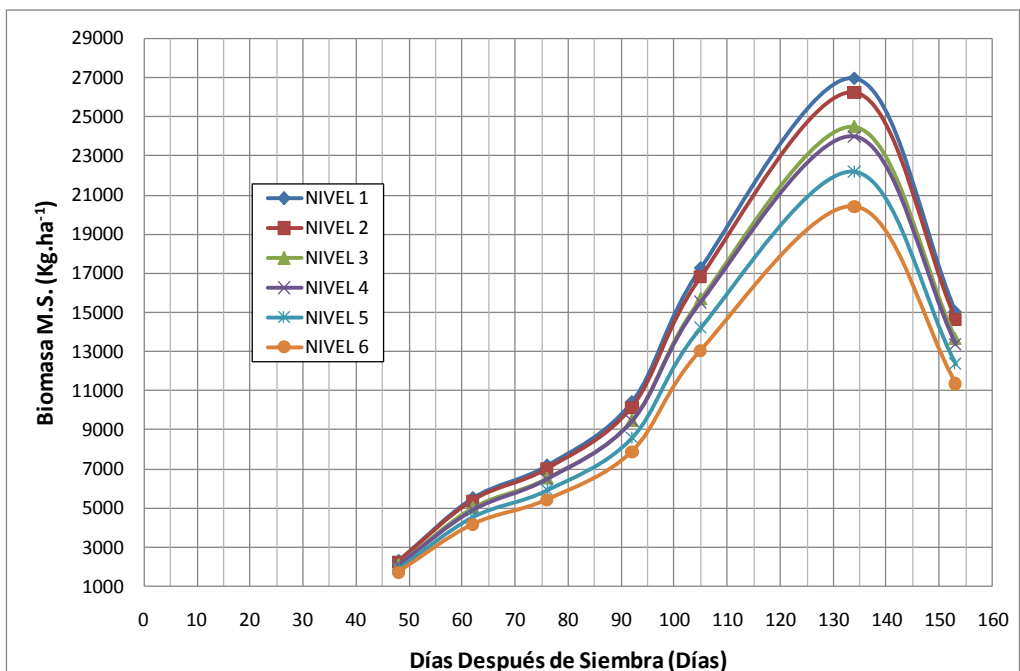


Figura 5.17 Curvas de biomasa de avena forrajera como producción de materia seca para el cultivo 3, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, 2009/2010

Para el cultivo 4 se presentan sus curvas de biomasa en la Figura 5.18. Debido a que el periodo del ciclo del cultivo fue desarrollado en su totalidad en el año 2010 que fue especialmente húmedo con excesos de precipitación apreciables que superaron los niveles más altos de la historia, (Meses, Abril a Julio, ver Figura 5.1). Como consecuencia de esto la humedad del suelo fue bastante alta para todos los niveles, lo que enmascaró los gradientes de humedad generados y a la postre no permitió apreciar las diferencias entre tratamientos. (ver: Figura 5.10).

A pesar de todo, se sigue observando una prevalencia del nivel 1 sobre los demás logrando producciones de biomasa cercanas a $13.500 \text{ Kg. ha}^{-1}$ y con un nivel 6 con las producciones más bajas en promedio cercanas a $11.500 \text{ Kg. ha}^{-1}$.

En general se observa que las formas de las curvas de biomasa presentaron un comportamiento de crecimiento similar en todos los cultivos, y en especial este cuarto ciclo sirvió para la generación de las curvas de senescencia.

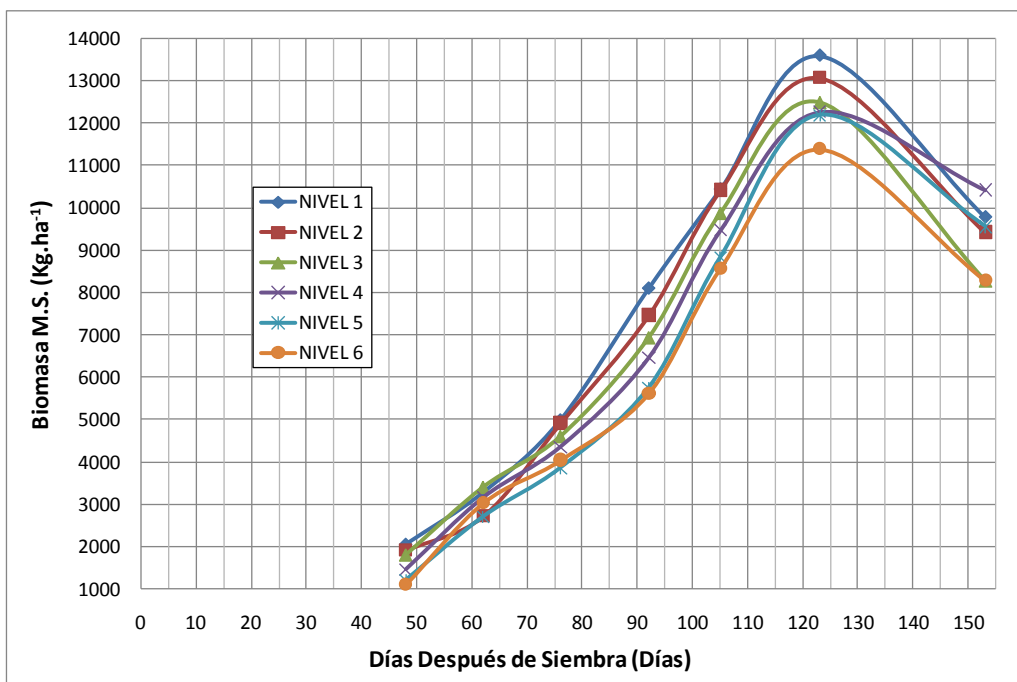


Figura 5.18 Curvas de biomasa de avena forrajera como producción de materia seca para el cultivo 4, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, 2010.

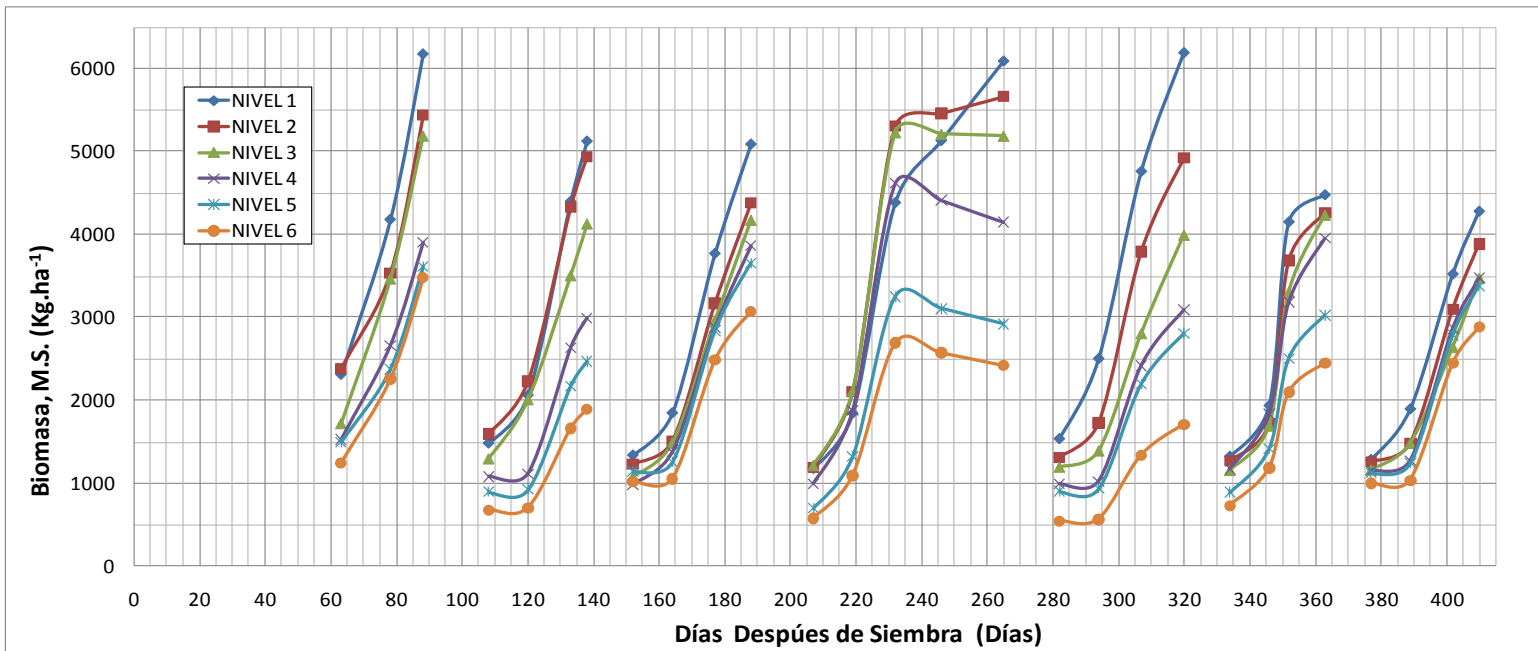


Figura 5.19 Curvas de biomasa de raigrás como producción de materia seca para el cultivo 1, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, 2009.

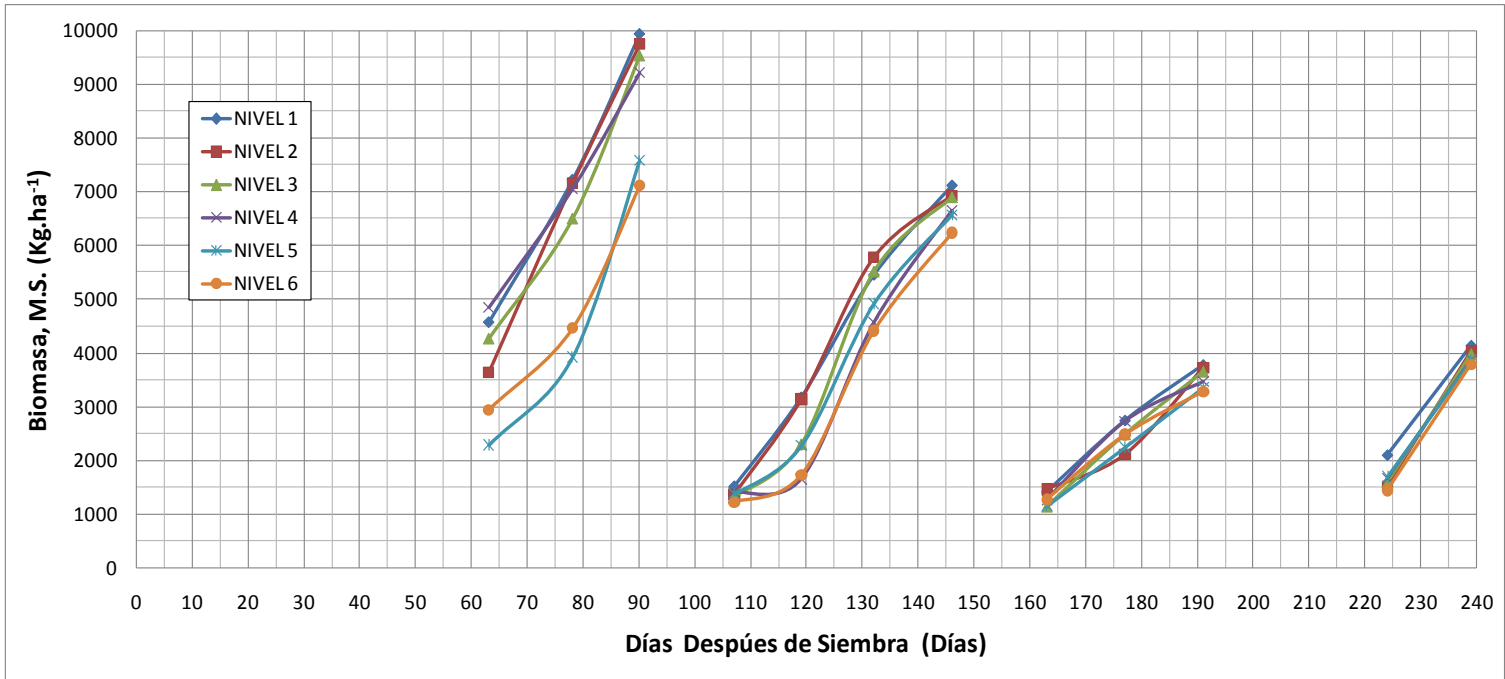


Figura 5.20 Curvas de biomasa de raigrás como producción de materia seca para el cultivo 2, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, 2010.

Las respuestas de biomasa de los cultivos de raigrás se presentan en las Figuras 5.19 y 5.20. Debido a que el raigrás es un cultivo indeterminado se realizan cortes periódicos, a partir de los cuales existe una renovación del cultivo y por lo tanto un nuevo ciclo de crecimiento de éste. La Tabla 5.26 presenta las fechas de corte y aforo realizadas durante los dos cultivos de raigrás estudiados.

El uso de cortes tempranos y tardíos se trabajó con el objeto de ver mejor el comportamiento de la producción de biomasa al alargar o acortar el ciclo productivo. Un efecto de declinación de la producción de biomasa se presenta en una fecha cercana a punto de obtención de la máxima cobertura del dosel (aprox. 54 DDC), efecto que se puede observar más claramente en el cuarto ciclo de la Figura 5.19.

Para el primer cultivo de raigrás (ver Figura 5.19) se le admitieron hasta siete cortes en diferentes épocas del año. Durante el lapso de tiempo desde la siembra al primer corte cuyo último aforo fue a los 88 DDS, el cultivo obtuvo su más significativo desarrollo de biomasa pues inicia desde cero hasta alcanzar los niveles máximos que en este caso se acercaron a 6.200 Kg.ha⁻¹ para el nivel 1 y de cerca de 3.500 Kg.ha⁻¹ para el nivel 6. Después del primer corte se suelen hacer cosechas o incursión del ganado más frecuentemente, entre los 45 y 50 DDC, y así sucesivamente hasta cuando el cultivo presenta sensible deterioro de su producción de biomasa ya sea por senectud, por pisoteo del ganado o ambos.

Tabla 5.26 Fechas de siembra y aforo para los cultivos 1 y 2 de raigrás realizadas en este estudio durante los años 2009 y 2010, C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.

RAIGRAS FECHAS DE CORTE						
Evento	PRIMER CULTIVO			SEGUNDO CULTIVO		
	Fecha	DDC	Ciclo Real	Fecha	DDC	Ciclo Real
Siembra	19/12/2008			10/02/2010		
1er Corte Aforo	17/03/2009	88		11/05/2010	90	
1er Corte Uniforme	24/03/2009	95	98	15/05/2010	94	89
2do Corte Aforo	06/05/2009	43		06/07/2010	52	
2do Corte Uniforme	07/05/2009	44	51	08/07/2010	54	51
3er Corte Aforo	25/06/2009	49		20/08/2010	43	
3er Corte Uniforme	01/07/2009	55	54	26/08/2010	49	56
4to Corte Aforo	10/09/2009	71		07/10/2010	42	
4to Corte Uniforme	14/09/2009	75	54			55
5to Corte Aforo	04/11/2009	51				
5to Corte Uniforme	05/11/2009	52	53			
6to Corte Aforo	17/12/2009	42				
6to Corte Uniforme	18/12/2009	43	57			
7mo Corte	02/02/2010	46				

DDC: Días después del corte.

Se observa que la producción de biomasa es proporcional al tiempo de corte, pues a medida que el tiempo de desarrollo después del corte aumenta su biomasa lo hace también. Esto sucede hasta un punto determinado a partir del cual la tendencia es a estabilizarse la producción de biomasa, lo cual se observa mejor en el ciclo después del tercer corte del primer cultivo para el cual se hizo un aforo tardío a los 71 *DDC*, con el corte uniforme a los 75 *DDC*.

En general, durante el ciclo desde la siembra al primer corte, también se alcanzaron las mayores producciones, cerca de 6.200 Kg.ha⁻¹ para el primer cultivo y cerca de 10.000 Kg.ha⁻¹ para el segundo cultivo, efecto que se aprecia mejor comparando los picos de producción del segundo cultivo Figura 5.20.

Durante el primer cultivo se logró una mejor producción máxima para el nivel 1 en la quinta etapa después del cuarto corte, esto pudo ser consecuencia de que en este período de tiempo el comportamiento del clima fue óptimo con precipitaciones bien distribuidas en el tiempo y promedios un poco por debajo de los históricos que permitieron generar bien los gradientes hídricos experimentales consecuencia de lo cual se pudieron obtener los niveles de humedad que se diferencian bien en la parte central de la Figura 5.11. Si bien es cierto, se alcanzó un nivel cercano a este en el ciclo después del cuarto corte, este evento se relaciona más con que la fecha del último aforo fue realizada en forma tardía, a los 71 *DDC* como ya se mencionó. Ver Tabla 5.26.

En las curvas de cobertura del dosel para raigrás, (Figura 5.14) se aprecia que a medida que se realizan los cortes a través del tiempo va disminuyendo la cobertura máxima alcanzada, de igual forma se presenta con la producción de biomasa, hecho que es apenas apreciable durante el primer cultivo y que resalta durante el segundo cultivo. (ver Figuras 5.19 y 5.20).

Como durante el año 2009 las condiciones de humedad del suelo estuvieron más favorables, (temporada más seca) es decir que hubo mayor diferenciación entre los tratamientos producidos por el gradiente, como se observa en la Figura 5.11, las diferencias en producción de biomasa también fueron más apreciables entre los niveles, aspecto que se observa mejor en las etapas de los ciclos 4 y 5 después de los cortes 3 y 4. Estos dos ciclos se presentan como candidatos para la validación y calibración del modelo AquaCrop con mejor diferenciación de las respuestas de la biomasa por el agua. Para los demás ciclos de corte los niveles mantienen el orden de producción, pero se disminuyen sus diferencias.

En las curvas de biomasa para el cuarto ciclo del primer corte se observa que el nivel uno viene con respuesta de producción inferiores a los niveles 2, 3, y 4 en los aforos previos al último, en el aforo penúltimo iguala al nivel 3 y en el

último supera a los demás, esto se debió probablemente a efectos externos aún no identificados, por lo cual para análisis posteriores habría que tener en cuenta este hecho.

Durante el año 2010 ya se ha mencionado los efectos que tuvieron los inusuales excesos de precipitación ocurridos, los cuales también para raigrás tuvieron influencia tanto en la humedad del suelo como en la producción de biomasa. (ver: Figuras 5.12 y 5.20) Para el caso de la biomasa, aunque las producciones logradas fueron las más altas alcanzando niveles máximos cercanos a los 10.000 Kg.ha⁻¹. Se diferencian sólo dos grupos de curvas en el primer ciclo desde la siembra hasta el primer corte, el primero de los cuales está compuesto por los niveles 1, 2, 3, y 4; y el segundo; por los niveles 5 y 6, cuyas curvas se presentan más abajo separadas de los primeros. Para los demás ciclos (2, 3, y 4) aunque permanecen los niveles de humedades altos por encima no hay diferenciación apreciable entre ellos. Este cultivo, si bien expresa la potencialidad de la producción de biomasa del raigrás debido al agua, pues definitivamente no tuvo limitaciones de ella, no aportó diferenciación entre los tratamientos. La potencialidad de producción de biomasa puede usarse, sin embargo, para la calibración del modelo AquaCrop bajo los criterios de las mayores producciones en respuesta a los niveles más altos de humedad del suelo.

Para este tipo de cultivos forrajeros y de acuerdo a los objetivos del presente trabajo no se ha tenido en cuenta la producción de grano para raigrás. Aunque para la avena forrajera se aforaron sus espigas con el objeto de calcular o dar un indicativo del índice de cosecha, (ver numeral 5.7.22).

Es importante resaltar que los experimentos realizados poseen un alto grado de libertad estadística, pues tienen ocho unidades experimentales por tratamiento y seis tratamientos o niveles, por lo cual sus resultados se pueden utilizar tanto para calibración como para la validación del modelo AquaCrop. Incluso; si fuera necesario; se podría considerar un sólo experimento para los dos casos, calibrando con los niveles máximos y validando con los niveles más bajos. Todorovic et al., (2009). Los posteriores análisis considerando los parámetros y variables de entrada al modelo arrojarán el conjunto de curvas más opcionadas y apropiadas para estos procedimientos. Sin embargo el objetivo de los procesos de validación y calibración del modelo será la replicación de la mayoría de los casos observados.

5.6.6 Funciones de producción, implicaciones económicas de la huella hídrica

A partir de los resultados obtenidos de producción de biomasa en materia seca con base en las láminas aplicadas para cada una de las especies estudiadas y teniendo en cuenta los diferentes experimentos realizados se

determinaron las curvas de las funciones de producción para avena forrajera, y raigrás. A partir de estas curvas se deriva la huella hídrica de las especies y son la base para determinaciones y optimización económica en el proceso de producción de los cultivos estudiados. En las Figuras 5.21 y 5.22 se presentan las curvas de producción de biomasa (*MS*) a partir de la lámina aplicada para estas especies, los valores observados se presentan con rombos azules y las curvas con líneas rojas, las curvas alcanzaron niveles de ajuste con coeficientes de determinación desde $r^2= 0,7249$ para raigrás, y de $0,851$ para avena forrajera.

Para avena forrajera el ajuste de la función de producción respondió al modelo de polinomio al cuadrado, lo cual es de esperarse para la mayoría de cultivos de cereales de porte herbáceo, ya que la producción aumenta con la lámina hasta un punto máximo y luego comienza a disminuir si la lámina de agua continua aumentando por excesos hídricos y por efecto de la anoxia por falta de aireación en la zona de raíces.

Para el caso del pasto raigrás la función de producción ajustó a una línea recta, es decir que al aumentar la lámina de agua aplicada la producción también aumenta de acuerdo al comportamiento de producción de materia seca en los dos experimentos y en los once cortes realizados. El pasto raigrás presenta una tendencia lineal de producción en función del agua.

5.6.6.1 Para avena forrajera

La Figura 5.21 presenta la curva de lámina aplicada contra producción de biomasa en materia seca y la función de producción de avena forrajera. Para este caso se ajusta una curva parabólica bien definida, que se presenta en la figura con un coeficiente de determinación de $r^2=0,851$. La biomasa producida aumenta con esta función hasta un máximo cercano a $22,2 \text{ t.ha}^{-1}$ de materia seca lograda con de 388 mm de lámina de agua aplicada, luego inicia su descenso si se continúa con el aumento de lámina de agua. Aunque experimentalmente en ciertas unidades experimentales se alcanzaron producciones alrededor de 30 t.ha^{-1} , las producciones máximas promedias se acercaron a 27 t.ha^{-1} . La función de producción muestra un ajuste bueno con el nivel de producción máximo por debajo.

A partir de la función de producción se determinó la huella hídrica considerando el punto óptimo el cual determinó que para producir un kilogramo de biomasa de forraje de avena se requieren 175 litros de agua.

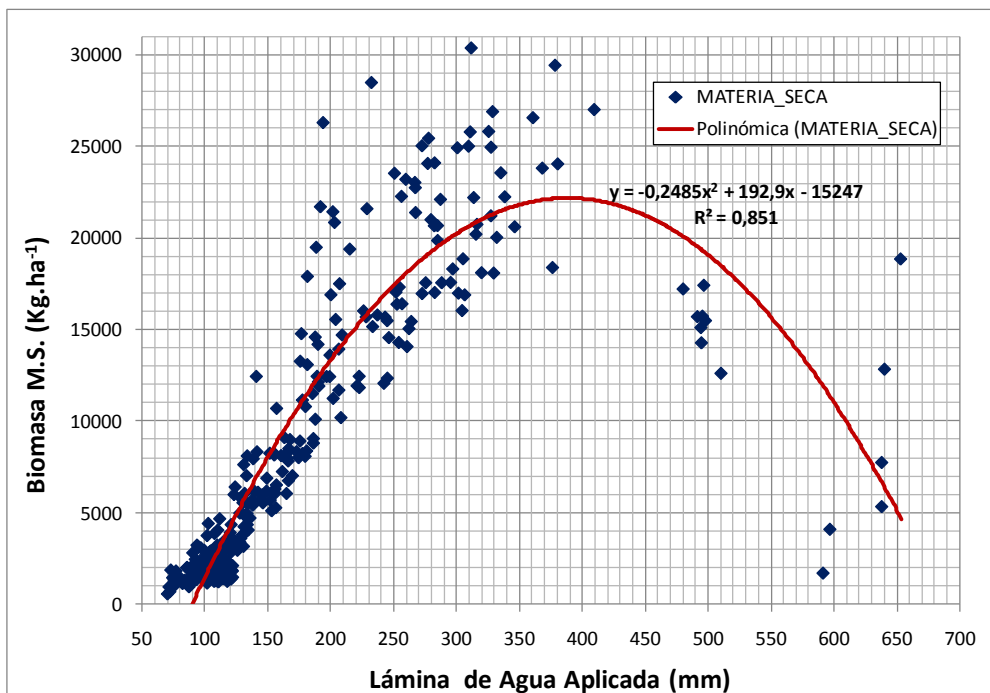


Figura 5.21 Función de producción de lámina de agua aplicada contra biomasa en materia seca para avena forrajera.

5.6.6.2 Para raigrás

Para el caso de este pasto debido a su condición de cultivo indeterminado, se observó un comportamiento distinto de la función de producción, la cual correspondió a una línea recta. Después de hacer un análisis de gradiente para varios pastos entre los que manejan raigrás (*Lolium perenne* L.) Smeal, D. et al, (2005) también encontraron que existe una relación lineal positiva entre la lámina aplicada y la producción.

En general para el primer corte, época en la cual el cultivo genera todas las estructuras de la planta, (raíz, tallos, hojas y estructuras reproductivas) alcanzó niveles de producción mayores que para los cortes posteriores. En la Figura 5.22 se presenta la función de producción para raigrás con un ajuste del coeficiente de determinación de $r^2=0,7249$.

Las producciones para el primer corte se ubican al final de la recta de ajuste con un máximo de $9,000 \text{ t.ha}^{-1}$ para una lámina de 398 mm de agua, aunque experimentalmente se lograron producciones promedias máximas que alcanzaron cerca de 10 t.ha^{-1} con una lámina inferior a 350 mm .

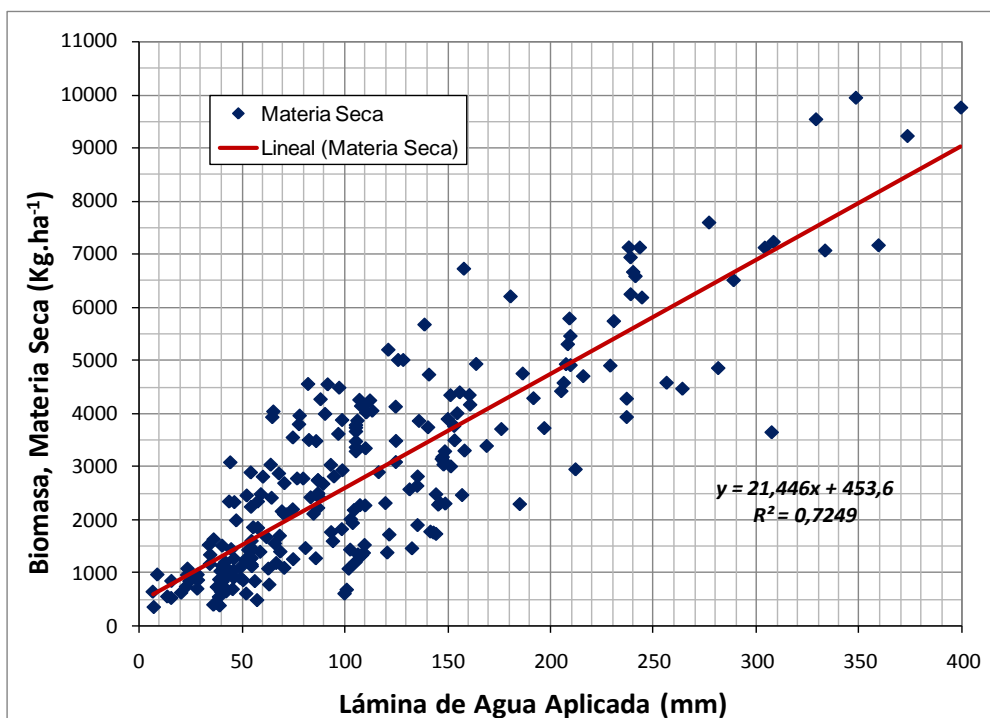


Figura 5.22 Función de producción de lámina aplicada contra biomasa para raigrás.

Para los cortes posteriores al primero, la función de producción llega a determinar niveles de materia seca producidos de 6,000 t.ha⁻¹ con una lámina aplicada de 258 mm necesitando niveles de agua muy inferiores a la requerida para el primer ciclo desde la siembra al primer corte.

También a partir de la función de producción se determinó la huella hídrica para el caso de raigrás, la cual se estableció en 442 litros por kilogramo de biomasa de raigrás producida para la etapa de siembra al primer corte y de 431 litros por kilogramo de biomasa de raigrás para los cortes posteriores, esta diferencia se explica por el hecho de que en el período de siembra a primer corte el cultivo debe dedicar un volumen de transpiración para el desarrollo de raíces y estructura de la planta.

La información de las huellas hídricas muestra que es más eficiente el uso del agua por la avena forrajera que por el raigrás, pues su huella hídrica es 2,46 veces más baja que la de raigrás. Sin embargo existen muchas otras implicaciones a la hora de elegir un cultivo u otro para su producción intensiva, como su periodo de desarrollo o ciclo de producción, el grado de fertilización, el manejo de campo, la adaptación al ecosistema, los usos, etc.

5.7 Cálculo y generación de las variables y parámetros para AquaCrop

Para la generación y cálculo de algunas variables y parámetros de entrada al modelo se utilizó la información disponible en todos los experimentos realizados, tanto para el caso de avena forrajera como para raigrás; Hsiao et al., (2009); debido a que la mayoría de ellos son conservativos y los que no lo son se trabajaron en el mismo entorno biofísico y climático de la Sabana de Bogotá. Para otras variables se utilizó información del cultivo cuatro para avena forrajera y del cultivo dos para raigrás por ser estos los cultivos con información más exhaustiva.

Los resultados de esta etapa de experimentación de campo son el punto central del presente trabajo de investigación. En las Tablas 5.27 a 5.30 se presentan en forma resumida los resultados obtenidos para avena forrajera y para raigrás respectivamente. Posteriormente se dedica un apartado a la explicación y análisis del proceso de obtención de cada uno de los parámetros y variables logradas, así como al comentario de sus resultados.

Para todas las variables o parámetros a que se refiere este estudio se asumen los términos usados por los grupos de investigación de AquaCrop sobre la forma de obtención de dichas variables que son la base para la calibración del modelo de la siguiente forma:

- a. Por Defecto: Variables que presenta el modelo como probables. En general son exploratorias o provienen de otros estudios.
- b. Calibrados: Son las variables obtenidas por medio de ajuste de sus valores cambiando la variable por defecto. (Análisis de sensibilidad, ensayo y error).
- c. Estimados: Son las variables elegidas a partir de información disponible (estudios previos, experiencia, información gris, bibliografía, información secundaria en general).
- d. Medidas: Son las variables medidas con observaciones de campo, mediciones directas y datos experimentales. (Generalmente son sustentadas por análisis estadísticos).
- e. Medidas, calculadas: Son variables que además de ser medidas requieren de cálculos adicionales para su determinación. (Aplicación de ecuaciones, realización de cálculos sobre las mediciones, ajustes de tendencias, etc.).

Tabla 5.27 Parámetros y variables determinados experimentalmente, como base para las entradas requeridas por el modelo AquaCrop para avena forrajera.

No 1. Fenología del cultivo				
Símbolo	Descripción	Tipo ^{(1),(2),(3),(4)}	Valores Indicativos / rangos	Forma de Obtención
1.1 Umbrales de temperaturas del aire				
1 T_{base}	Temperatura Base (°C)	Conservativo ⁽¹⁾	5°C	Fuente: FAO, Ecocrop 2007
2 T_{corte}	Temperatura Superior (°C)	Conservativo ⁽¹⁾	30°C	Fuente: FAO, Ecocrop 2007
1.2 Desarrollo de la cobertura del dosel verde				
3 C_s	Cobertura de la superficie del suelo por una individual semilla al 90% de emergencia ($cm^2.planta^{-1}$)	Conservativo ⁽²⁾	1,86 $cm^2.semilla^{-1}$	Medido
4 D_s	Número de plantas por hectárea	Manejo ⁽³⁾	2.640.000 $planta.ha^{-1}$	Estimado
5 t_0	Tiempo de siembra a emergencia (crecimiento en días grado)	Manejo ⁽³⁾	13 días (106, (70 a 123 $día.^{\circ}C^{-1}$))	Medido
6 CCD	Coefficiente de crecimiento del dosel (fracción por crecimiento en días grado)	Conservativo ⁽¹⁾	8,736 $\%día^{-1}$; 9,374 a 0,00523 $\%día^{-1}$	Medido, calculado
7 CDx	Máxima cobertura del dosel (%)	Manejo ⁽³⁾	99.32%	Medido
8 t_s	Tiempo de siembra a inicio de senescencia (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾	132 días (1158, (1154 a 1164 $día.^{\circ}C^{-1}$))	Medido
9 CDD	Coefficiente de declinación del dosel (fracción por crecimiento en días grado)	Conservativo ⁽¹⁾	5,678 $\%día^{-1}$, Desde: 0,0608 $\%día^{-1}$ (0,0066 $\%día^{-1}.^{\circ}C^{-1}$) a 5,678 $\%día^{-1}$ (0,5899 $\%/día.^{\circ}C^{-1}$)	Medido, calculado
10 t_m	Tiempo de siembra a madurez, p.ej. longitud del ciclo del cultivo (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾	133 días (1166, (1162 a 1173 $día.^{\circ}C^{-1}$))	Medido
1.3 Floración				
11 t_f	Tiempo de siembra a floración (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾	120 días (1052, (1047 a 1057 $día.^{\circ}C^{-1}$))	Medido
12 Lf	Longitud del estado de floración (crecimiento en días grado)	Conservativo ⁽¹⁾	6 días (56, (53 a 58 $día.^{\circ}C^{-1}$))	Medido
13 D	Cultivo determinado	Conservativo ⁽¹⁾	SI	Estimado
1.4 Desarrollo de la zona de raíces				
15 Z_0	Profundidad de raíz mínima efectiva (m)	Manejo ⁽³⁾	0,11 m	Medido, calculado
16 Z_x	Profundidad de raíz máxima efectiva (m)	Manejo ⁽³⁾	0,86 m	Medido
17 n	Factor de forma describiendo la zona de expansión de la raíz	Conservativo ⁽¹⁾	1.47	Medido, calculado
18 t_x	Tiempo desde siembra a la máxima profundidad de raíces (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾ Ambiental ⁽³⁾	128 días (1126, (1123 a 1128 $día.^{\circ}C^{-1}$))	Medido

Tabla 5.28 Parámetros y variables determinados experimentalmente, como base para las entradas requeridas por el modelo AquaCrop para avena forrajera. (Continuación).

2. Transpiración del Cultivo					
19	Kcb _x	Coefficiente del cultivo cuando el dosel es completo pero previo a la senescencia	Conservativo ⁽¹⁾	1.14	Medido, calculado
20	f _{edad}	Factor de declinación del cultivo (%/día) como un resultado de la senescencia, deficiencia de nitrógeno, etc.	Conservativo ⁽¹⁾	0,13 %·día ⁻¹	Medido, calculado
23	Erel _x	Efecto de cobertura del dosel sobre la reducción de evaporación del suelo en el estado de estación tardía	Conservativo ⁽¹⁾	67%	Medido, calculado
3. Producción de biomasa y formación de cosecha					
3.1 Productividad del cultivo por el agua					
24	WP*	Productividad hídrica normalizada para ET _o y CO ₂ (gramos/m ²)	Conservativo ⁽¹⁾	19,83 g·m ⁻²	Medido, calculado
25	WP* _c	Productividad hídrica normalizada para ET _o y CO ₂ durante la formación de la cosecha (como porcentaje de WP* antes de formación de la cosecha)	Conservativo ⁽¹⁾	100%	Estimado
3.2 Índice de Cosecha					
26	IC _o	Índice de Cosecha de referencia (%)	Cultivar ⁽⁴⁾	Sobre biomasa cosechada: 60,22% y 18,28% sobre grano	Medido
27	t _{ic}	Construcción del IC (periodo en crecimiento días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾	Permanece hasta 12% del dosel verde (13 días)	Medido
4 Estrés					
4.1 Estrés hídrico en el suelo					
39	∑ET _{oestrés}	Suma (ET _o) durante el período de estrés para ser excedido antes de que la senescencia sea activada	Conservativo ⁽¹⁾	0.00	Estimado, la senescencia se dispara de inmediato se presenta el estrés hídrico
41	K _{Saer}	Punto anaeróbico en %Vol (con referencia a saturación)	Cultivar ⁽⁴⁾ Ambiental ⁽³⁾	-11,8 %Vol	Medido, calculado

(1) Conservativo generalmente aplicable

(2) Conservativo para una especie dada pero puede o podría ser una variedad específica

(3) Dependiente del ambiente y/o manejo

(4) Cultivar o variedad específica

Tabla 5.29 Parámetros y variables determinados experimentalmente, como base para las entradas requeridas por el modelo AquaCrop para raigrás.

No 1. Fenología del cultivo				
Símbolo	Descripción	Tipo ^{(1),(2),(3),(4)}	Valores Indicativos / rangos	Forma de Obtención
1.1 Umbrales de temperaturas del aire				
1 T _{base}	Temperatura Base (°C)	Conservativo ⁽¹⁾	4°C	Fuente: FAO, Ecocrop 2007
2 T _{corte}	Temperatura Superior (°C)	Conservativo ⁽¹⁾	35°C	Fuente: FAO, Ecocrop 2007
1.2 Desarrollo de la cobertura del dosel verde				
3 Cs	Cobertura de la superficie del suelo por una individual semilla al 90% de emergencia (cm ² .planta ⁻¹)	Conservativo ⁽²⁾	0,65 cm ² .semilla ⁻¹	Medido
4 Ds	Número de plantas por hectárea	Manejo ⁽³⁾	11.600.000 planta.ha ⁻¹	Estimado
5 t ₀	Tiempo de siembra a emergencia (crecimiento en días grado)	Manejo ⁽³⁾	Primer Corte: 9 días (88, (84 a 91 día.°C-1)) Cortes Posteriores: Recuperación después del corte 6 días (65, (25 a 87 día.°C-1))	Medido
6 CCD	Coefficiente de crecimiento del dosel (fracción por crecimiento en días grado)	Conservativo ⁽¹⁾	10,858 %·día⁻¹ - 0,2029 a 10, %·día ⁻¹ (0,02 a 0,5379 %·día ⁻¹ .°C ⁻¹)	Medido, calculado
7 CDx	Máxima cobertura del dosel (%)	Manejo ⁽³⁾	99,76% primer corte, (98,81% cortes posteriores)	Medido
8 t _s	Tiempo de siembra a inicio de senescencia (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾	Primer corte: 94 días (908, (904 a 912 día.°C-1)) Cortes Posteriores: 54 días (524, (520 a 531 día.°C-1))	Medido
9 CDD	Coefficiente de declinación del dosel (fracción por crecimiento en días grado)	Conservativo ⁽¹⁾	1,434 %·día⁻¹ . Desde: 0,0243 %·día ⁻¹ (0,0022 %·día ⁻¹ .°C ⁻¹) a 2,2279 %·día ⁻¹ (0,275 %·día ⁻¹ .°C ⁻¹)	Medido, calculado
10 t _m	Tiempo de siembra a madurez, p.ej. longitud del ciclo del cultivo (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾	Primer corte: 100 días (972, (970 a 974 días.°C-1)) Cortes posteriores: 55 días (533, (530 a 540 días.°C-1))	Medido
1.3 Floración				
11 t _f	Tiempo de siembra a floración (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾	Primer corte: 83 días (799, (795 a 803 días.°C-1)) Cortes posteriores: 44 días (422, (418 a 426 días.°C-1))	Medido
12 Lf	Longitud del estado de floración (crecimiento en días grado)	Conservativo ⁽¹⁾	Primer corte: 7 días (71, (62 a 79 día.°C-1)) Cortes Posteriores: 7 días (72, (64 a 82 día.°C-1))	Medido
13 D	Cultivo determinado	Conservativo ⁽¹⁾	NO	
1.4 Desarrollo de la zona de raíces				
15 Z ₀	Profundidad de raíz mínima efectiva (m)	Manejo ⁽³⁾	0,06 m	Medido, calculado
16 Z _x	Profundidad de raíz máxima efectiva (m)	Manejo ⁽³⁾	0,40 m	
17 n	Factor de forma describiendo la zona de expansión de la raíz	Conservativo ⁽¹⁾	1.01	Medido, calculado
18 t _z	Tiempo desde siembra a la máxima profundidad de raíces (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾	64 días (603, (599 a 606 días.°C-1))	Medido

Tabla 5.30 Parámetros y variables determinados experimentalmente, como base para las entradas requeridas por modelo AquaCrop para raigrás. (Continuación)

2. Transpiración del Cultivo					
19	Kcb _x	Coefficiente del cultivo cuando el dosel es completo pero previo a la senescencia	Conservativo ⁽¹⁾	1,01 (0,96 a 1.1 cortes posteriores al primero)	Medido, calculado
20	f _{edad}	Factor de declinación del cultivo (%/día) como un resultado de la senescencia, deficiencia de nitrógeno, etc.	Conservativo ⁽¹⁾	0,24 %·día ⁻¹	Medido, calculado
23	Erel _x	Efecto de cobertura del dosel sobre la reducción de evaporación del suelo en el estado de estación tardía	Conservativo ⁽¹⁾	50%	Medido, calculado
3. Producción de biomasa y formación de cosecha					
3.1 Productividad del cultivo por el agua					
24	WP*	Productividad hídrica normalizada para ETo y CO ₂ (gramos/m ²)	Conservativo ⁽¹⁾	14,97 g·m ⁻²	Medido, calculado
25	WP* _c	Productividad hídrica normalizada para ETo y CO ₂ durante la formación de la cosecha (como porcentaje de WP* antes de formación de la cosecha)	Conservativo ⁽¹⁾	100%	Estimado
3.2 Índice de Cosecha					
26	IC	Índice de Cosecha de referencia (%)	Cultivar ⁽⁴⁾	Sobre biomasa cosechada: 82,72% (para el primer corte) y 85,50% para cortes posteriores al primero. Sobre grano: 16,2%	Medido
27	t _{IC}	Construcción del IC (periodo en crecimiento días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾	Permanece desde el 19 % del dosel verde (16 días)	Medido
4 Estrés					
4.1 Estrés de agua en el suelo					
39	∑ET _{Oestrés}	Suma (ETo) durante el período de estrés para ser excedido antes de que la senescencia sea activada	Conservativo ⁽¹⁾	0.00	Estimado, la senescencia se dispara inmediatamente se presenta el estrés hídrico.
41	Ks _{aer}	Punto anaeróbico en %Vol (con referencia a saturación)	Cultivar ⁽⁴⁾ Ambiental ⁽³⁾	-17,9 %Vol	Medido, calculado

(1) Conservativo generalmente aplicable

(2) Conservativo para una especie dada pero puede o podría ser una variedad específica

(3) Dependiente del ambiente y/o manejo

(4) Cultivar o variedad específica

Nota: Para el cálculo y generación de las variables y parámetros de AquaCrop, se menciona a pie del título el(los) cultivo(s), corte(s) o experimento(s) que se usaron para su determinación, pues no siempre fue posible o conveniente usar todos los cultivos y/o cortes para la determinación de todos los parámetros o variables. La nomenclatura usada se describe como: A: = Avena Forrajera. R: = Raigrás; C# = Cultivo y número del cultivo; y C#C# = Cultivo número, Corte número. Por ejemplo: A:C4, R:C1C4 significa que se usó en su determinación para Avena forrajera el cultivo cuatro, para Raigrás el Cultivo uno y corte cuarto, R:C1, significa que se usó todos los cortes del cultivo uno. A:T, significa que en este caso se usó la información disponible de los cuatro experimentos realizados de avena forrajera.

5.7.1 Temperaturas base y corte

Las temperaturas base y corte se obtuvieron de información secundaria de la base de datos de la FAO de ECOCROP (1993 - 2007), ver Tabla 2.5. En el capítulo 2 (numeral 2.9.3.1) se comentan algunos de los valores reportados por diferentes investigaciones y se determinan los más opcionados. La Tabla 5.31 presenta los valores definitivos que se adoptan en este estudio sobre los cuales se determinaron los cálculos de días grado y por lo tanto todos los parámetros dependientes de ellos.

Tabla 5.31 Temperaturas base y corte para las especies avena forrajera y raigrás adoptadas en este estudio con base en la información de la base de datos de ECOCROP (FAO, 1993-2007).

Especie	Nombre Científico	Nombres o Variedades	Temperaturas °C		Fuente Inf. Según ECOCROP
			Absolutas		
			Base	Corte	
Raigrás	<i>Lolium perenne</i>	Ryegrass perenne, Ryegrass Inglés, Ryegrass cresta, Weidelgras ausdauerndes, rajgras, Engelskt, renrepe, rajgras, rajgraes almindelig, Englanninraiheina, tunruggresi	4	35	Roecklein, J. 1987 pp 170 ; Dube, P. 1982 pp 4 ; Duque, J. 1975 pp 20 ; Maas, E. 1990 pp 275 ; Skerman, P. 1990 pp 560 ; Bogdan, A. 1977 pp 166; Hartmann, T. 1981 pp 458
Avena	<i>Avena sativa</i>	Avena común, De Avena, Avena, Hawer, Hafer, avoine, Avoine Farine, Vanilin Havre, Havre, Almindelig Havre, Peltokaura, Kaura, Akurhafar, Saat - Hafer	5	30	Sims, D. s.a.; Dube, P. 1982 pp 33; Maas, E. 1991 pp 274; Roecklein, J. 1987 pp 30; Baum, B. 1977; Kernick, M. 1961 pp 181 - 183; Monegat, C. 1991 pp 119; Langer, R. 1991 pp 70; Hartmann, T. 1981 pp 490 - 491; Purselove, J. 1972 pp 123; Ahlgreen, G. 1956 pp 278 - 280

Se seleccionó respectivamente *Loliúm perenne*, para raigrás y la *Avena sativa*, para avena forrajera, pues fueron las especies que más correspondieron con las características fenológicas y fisiológicas de las variedades manejadas (para raigrás, var: *Bestfor Plus*, y para avena forrajera, var: *Cayuse*).

En la fase de ajuste de calibración y validación se determinaron las temperaturas de estrés por frío que afecta la producción de biomasa para ambos cultivos, obteniendo valores de 5,5 °C para avena forrajera y 11,1 °C para raigrás.

5.7.2 Cobertura de la superficie del suelo por una semilla individual al 90% de emergencia (A: C4, R:C2)¹

La cobertura de una semilla individual se determinó por medio de la metodología expuesta en el numeral 3.6.2.

Los resultados fueron obtenidos a partir de las 48 unidades experimentales de cada ensayo. Aunque se tienen los resultados por tratamiento no hubo diferencias significativas entre ellos debido a que el tratamiento del riego fue uniforme hasta el momento de la emergencia.

Para el caso de avena forrajera la cobertura de una semilla (C_s) fue de 1,86 $\text{cm}^2.\text{semilla}^{-1}$ y para el caso de raigrás de 0,7 $\text{cm}^2.\text{semilla}^{-1}$. Los rangos de variación de las coberturas iniciales estuvieron entre 0,98 a 3,23 $\text{cm}^2.\text{semilla}^{-1}$ para avena forrajera y entre 0,5 y 0,93 $\text{cm}^2.\text{semilla}^{-1}$ para raigrás. Durante la etapa de ajuste, calibración y validación se tomaron estos valores como puntos de partida pero durante el proceso fue necesario hacer variaciones de ellos, quedando la cobertura inicial para avena forrajera en un valor de equivalente a la media menos una desviación estándar de las observaciones, por lo cual se determinó el valor en 1,00 $\text{cm}^2.\text{semilla}^{-1}$ y para raigrás fue ajustado este valor en la media más una desviación estándar, alcanzando el valor de 0,76 $\text{cm}^2.\text{semilla}^{-1}$, en ambos casos los valores seleccionados quedaron dentro de los rangos observados en campo.

5.7.3 Número de plantas por hectárea (A:T R:T)²

Esta es una variable no conservadora que depende del tipo de manejo de la localidad, para el caso de la sabana de Bogotá, para la avena forrajera (*var. Cayuse*) se sembró a razón de 80 $\text{Kg}.\text{ha}^{-1}$ alcanzando una densidad de plantas de 2.640.000 $\text{plantas}.\text{ha}^{-1}$ la siembra se hizo en surcos con distancias de 30 cm.

La avena forrajera se suele sembrar también al voleo, con densidades que varían entre 60 a 100 $\text{kg}.\text{ha}^{-1}$ FAO (2010). Algunas fuentes indican que su densidad varía entre 100 y 110 $\text{kg}.\text{ha}^{-1}$ Ramos y Espinoza, (1999). Si se usa combinada con otros forrajes se usan las densidades más bajas.

¹ (A:C4; R:C2) = para avena se utilizó el cultivo 4 y para raigrás se usó el cultivo 2.

²(A:T R:T) = para las dos especies se utilizó la información disponible de todos los cultivos.

Para el caso del raigrás se sembró a razón de 50 kg.ha⁻¹ alcanzando una densidad de plantas cercana a 11,6 millones de plantas.ha⁻¹, se realizó manualmente al voleo. Tanto para la avena forrajera como para el raigrás se calculó y aplicó la cantidad exacta por unidad experimental.

El raigrás también se suele sembrar al voleo, con densidades que varían entre 15 a 75 kg.ha⁻¹ Ordoñez y Bojórquez, (2004).

5.7.4 Tiempo de siembra a emergencia (A:T R:T)

Para todos los casos se calcularon los días grado por medio de la metodología descrita en el manual de referencia de AquaCrop. Raes et al., (2009a). Ver numeral 2.10.3.2. (5) Tiempo de siembra a emergencia.

Para el caso de avena forrajera se determinó en 13 días con 106 °C.día en promedio y una oscilación entre 70 a 123 °C.día, teniendo en cuenta los cuatro cultivos realizados.

Para el raigrás el tiempo a emergencia en promedio fue de 9 días con 88 °C.día en promedio y una oscilación de 84 a 91 °C.día, considerando los dos cultivos realizados.

La emergencia se determinó cuando el porcentaje de germinación fue igual o superior al 90%, pero las primeras plantitas aparecen mucho antes, para avena forrajera inició a los 5 DDS, mientras que para raigrás se inicia al día siguiente de la siembra.

5.7.5 Coeficiente de crecimiento del dosel (CCD) (A:C3 R:C2)

Las fracciones de crecimiento del dosel se determinaron con base en el seguimiento de la cobertura para el cultivo tres en el caso de avena forrajera y para el segundo en el caso de raigrás. Debido a que dichos cultivos no tuvieron restricciones hídricas lo que facilitó el mejor desempeño del desarrollo del dosel, este fue calculado a partir de observaciones de campo y supervisiones por medio de fotografía evaluadas con el programa CobCal. Ferrari et al., (2009).

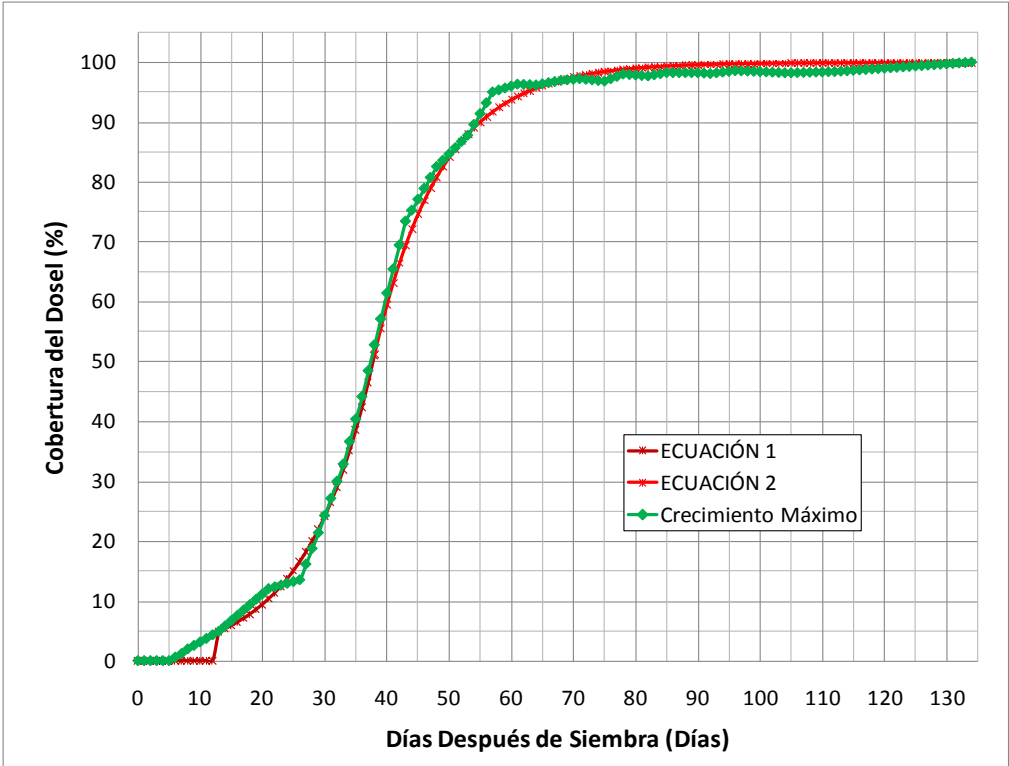


Figura 5.23 Curva de crecimiento del dosel para avena forrajera.

La Figura 5.23 muestra la curva de crecimiento del dosel de avena forrajera. La construcción de la curva de cobertura del dosel para ambos cultivos se determinó con base en la observación del desarrollo de las coberturas para todas y cada una de las unidades experimentales del nivel 1 (sin restricción hídrica) de los tratamientos de riego.

La observación de dichas coberturas se realizó dos veces por semana y la curva se determinó considerando los deltas de crecimiento máximo que se alcanzaba considerando todas las unidades experimentales. De esta forma se garantizó que la curva obtenida fuera la de mayor desarrollo del dosel.

En la Figura 5.23 se presentan las líneas de crecimiento del dosel del máximo (Línea verde, puntos). Sobre este diagrama se realizó el mejor ajuste logrado por las ecuaciones implementadas por AquaCrop para el desarrollo del dosel (Ec. 2.33 y 2.34)

Las ecuaciones de AquaCrop fueron ajustadas a la curva de crecimiento del dosel de máximo de avena forrajera por medio del CCD el cual resultó alcanzar el valor de ajuste de $10,858\% \cdot \text{día}^{-1}$. (Línea Roja, símbolo equis).

La Tabla 5.32 presenta los rangos de variación experimental de las tasas de crecimiento del dosel para los crecimientos máximos. Las unidades se presentan tanto en $\%.\text{día}^{-1}$ como en $\%.\text{°C}^{-1}.\text{día}^{-1}$. En la tabla se presentan los rangos más amplios obtenidos en campo de 9,3728 a 0,00975 $\%.\text{día}^{-1}$ (0,12585 a 0,00104 $\%.\text{°C}^{-1}.\text{día}^{-1}$).

Tabla 5.32 Rango de variación de la tasa de crecimiento del dosel para avena forrajera crecimientos máximos.

Valores	Fracción Crecimiento diario	Fracción Crecimiento por grado
	$\%.\text{día}^{-1}$	$\%.\text{día}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
Promedio	1,16126	0,12585
Máximo	9,37280	1,15714
Mínimo	0,00975	0,00104

Para el caso de raigrás en la Figura 5.24 se presenta la curva de crecimiento del dosel máximo para los niveles sin restricción de humedad, nivel 1 (Línea verde, puntos). Sobre la curva sin restricciones de humedad se graficaron las ecuaciones de AquaCrop para el desarrollo del dosel. En este caso resultó que el coeficiente de crecimiento del dosel (CCD) que mejor logró el ajuste fue de 10,858 $\%.\text{día}^{-1}$ para las dos ecuaciones de la curva del dosel.

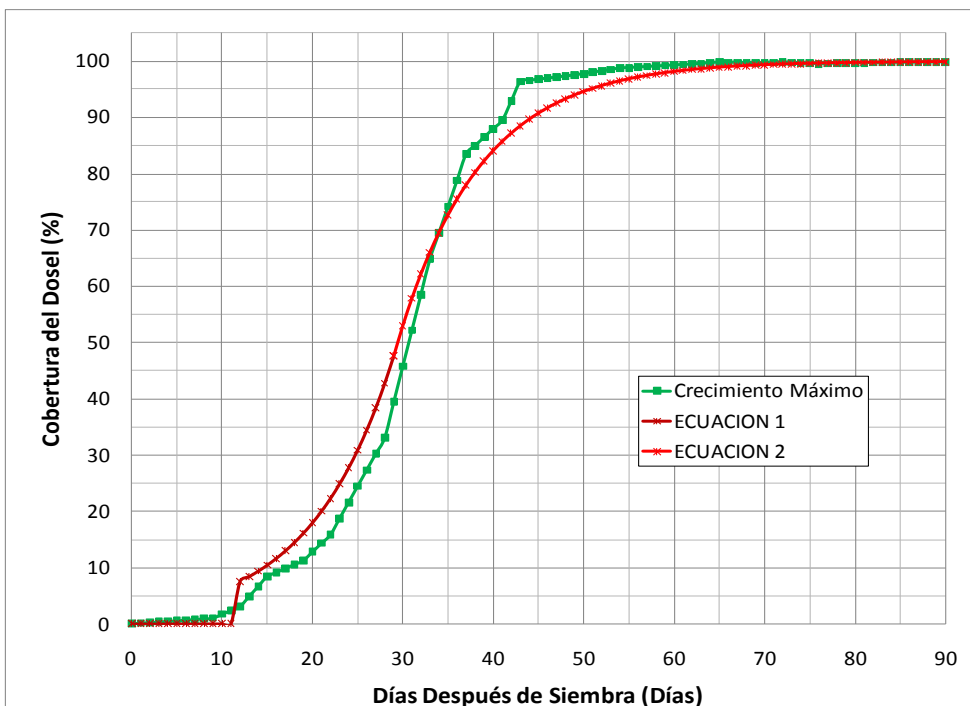


Figura 5.24 Curva de crecimiento del dosel para raigrás.

Para el caso de raigrás se determinaron los rangos de tasa de crecimiento del dosel para los cuatro primeros cortes, según los comportamientos de los crecimientos máximos (niveles 1), los cuales se presentan en la Tabla 5.33. El rango de variación del coeficiente está entre 0,0078 a 10,858 $\%.\text{día}^{-1}$ (0,0007 a 1,248 $\%.\text{°C}^{-1}.\text{día}^{-1}$).

Tabla 5.33 Rango de variación de la tasa de crecimiento del dosel para raigrás. Crecimientos promedios máximos.

Valores	Unid	CCD				Promedios
		1er Corte	2do Corte	3er Corte	4to Corte	
Promedio		1,3123	1,5048	1,1319	1,3254	1,3186
Máximo	$\%.\text{día}^{-1}$	10,8580	4,8945	2,7916	3,2977	10,8580
Mínimo		0,0088	0,0078	0,2225	0,5725	0,0078
Promedio		0,1376	0,0996	0,1263	0,1447	0,1271
Máximo	$\%.\text{día}^{-1}.\text{°C}^{-1}$	1,2480	0,5438	0,3534	0,5234	1,2480
Mínimo		0,0008	0,0007	0,0234	0,0550	0,0007

5.7.6 Máxima cobertura del dosel (CD_x) (A:T R:T)

Como la cobertura del dosel fue supervisada a lo largo del ciclo del cultivo por medio de fotografía. Se estableció la máxima cobertura del dosel (CD_x) y la fecha en que se presentó por medio de este seguimiento. Lo cual se hizo tanto para avena forrajera como para raigrás, en las Tablas 5.34 y 5.35 se presentan los resultados encontrados para cada uno de los cultivos respectivamente y las fechas en las cuales se alcanzó.

Para avena forrajera se alcanzó una cobertura del dosel máxima de 99,32% a un promedio de los 122 DDS, sin embargo para los cultivos uno y dos la supervisión de la cobertura no fue más allá de la fecha para el estado fenológico de grano harinoso duro, por lo cual es posible que los valores máximos hubiesen sido algo mayores en fechas posteriores.

Tabla 5.34 Máxima cobertura del dosel (%) alcanzada para la avena forrajera.

Cosecha	CDx		Fecha
	DDS	CDx	
1er Cultivo	114	98,88	15/05/2009
2do Cultivo	115	99,45	18/09/2009
3er Cultivo	134	99,99	25/02/2010
4to Cultivo	123	98,95	19/07/2010
Promedios	122	99,32	

Tabla 5.35 Máxima cobertura del dosel (%) para los diferentes cultivos y cortes de raigrás.

Cosecha	CDx		Fecha
	DDS	CDx	
1er Cultivo	90	99,57	19/03/2009
1er Corte uniforme	42	99,17	05/05/2009
2do Corte uniforme	49	99,16	25/06/2009
3er Corte uniforme	71	99,51	10/09/2009
4to Corte uniforme	52	99,56	05/11/2009
5to Corte uniforme	41	98,91	16/12/2009
6to Corte uniforme	46	98,83	02/02/2010
2do Cultivo	89	99,95	10/05/2010
1er Corte uniforme	41	99,94	25/06/2010
2do Corte uniforme	40	99,93	17/08/2010
3er Corte uniforme	39	95,44	04/10/2010
Promedios			
Cultivo	90	99,76	
1er Corte uniforme	42	99,56	
2do Corte uniforme	45	99,54	
Cortes posteriores	50	98,45	
Promedios después 1er Corte	45	98,81	

Para el caso de raigrás se determinó dicha cobertura máxima para cada corte, por lo cual se extrajo el promedio desde siembra a primer corte el cual fue de 99,76% (Promedios Cultivo) y los promedios para el ciclo desde el primero y segundo cortes y para los demás. Al respecto se observa que en general a medida que el cultivo se desarrolla a través de los diferentes cortes la tendencia es a disminuir el valor de la *CDx*. Para ambos cultivos se tomó el valor promedio de la cobertura del dosel como el valor final el cual se consignó en las Tablas 5.27 a 5.30.

Para AquaCrop se determinan cinco clases de cobertura del dosel según Raes et al., (2010). De acuerdo a esta clasificación tanto la avena forrajera como el raigrás quedarían seleccionados como “Enteramente cubiertos”.

5.7.7 Tiempo de siembra a inicio de senescencia (t_s)(A:T R:T)

Para avena forrajera el tiempo a inicio de senescencia se evaluó en cada uno de los cuatro cultivos realizados tomando el promedio como el valor final, la Tabla 5.36 presenta los días y los grados día [°C.día]. Los valores de grados día oscilan entre 1150 a 1173 °C.día.

Tabla 5.36 Tiempo de siembra a senescencia para avena forrajera.

Cosecha	Días	día.°C⁻¹
1er Cultivo	133	1157
2do Cultivo	134	1164
3er Cultivo	137	1155
4to Cultivo	123	1154
Rango siembra a inicio de senescencia		
Promedios	132	1158
Máximos	137	1173
Mínimos	123	1150

Tabla 5.37 Tiempo de siembra a máximo desarrollo del cultivo para raigrás.

Cultivo - Corte	Días día.°C⁻¹			
Primer Cultivo				
Primer cultivo, Primer corte	98	904		
Primer cultivo 2do corte	51	523		
Primer cultivo 3er corte	54	521		
Primer cultivo 4to corte	54	523		
Primer cultivo 5to corte	53	520		
Primer cultivo 6to corte	57	526		
Primer cultivo 7mo corte	58	531		
Segundo Cultivo				
Segundo Cultivo, Primer corte	89	912		
Segundo cultivo, 2do corte	51	520		
Segundo cultivo, 3er corte	56	524		
Segundo cultivo, 4to corte	55	525		
Promedio entre Cultivos				
Siembra a 1er Corte	94	908		
1er Corte a 2do Corte	51	522		
2do Corte a 3er Corte	55	523		
3er Corte a 4to Corte	55	524		
Etapas Cultivo - Corte		Mínimos	Máximos	
	Días	día.°C⁻¹	Días	día.°C⁻¹
Rango Siembra a primer Corte	89	904	a 98	912
Rango Cortes posteriores al primero	51	520	a 57	526
Último corte a inicio de senescencia	54	525	a 58	531
Promedios		650		656

Para el caso de raigrás debido a que este es un cultivo indeterminado, se generó la senescencia a partir del segundo cultivo después del tercer corte,

de acuerdo al ciclo fenológico del cultivo se estima que antes de alcanzar el inicio de la senescencia el cultivo debe llegar al punto de máximo desarrollo.

Este punto se obtiene cuando el cultivo haya superado el grado de madurez en el estado de grano harinoso duro, el cual se alcanza a los 94 días (DDS) para el primer corte y a los 51 a 55 días en promedio para los siguientes cortes. La Tabla 5.37 muestra el tiempo que el cultivo utilizó para alcanzar este punto en todos los cortes.

En la parte final de la Tabla 5.37 se observa los rangos de desarrollo máximos tanto en días como en °C.día, de los tiempos a los cuales se alcanzó los niveles de máximo desarrollo del dosel.

Para el primer corte el inicio de la senescencia podría establecerse un día después de los 94 días (904 a 912 °C.día) para los cortes posteriores: un día después de los 51 a 58 días (520 a 531 °C.día).

Aunque el raigrás por ser un cultivo indeterminado no presentaría un proceso de senescencia natural a corto plazo, en la Tabla 5.37 se ha presentado el punto de inicio de un posible proceso de senescencia; caso particular de la generación de la senescencia forzada para raigrás; la cual será analizada posteriormente. (Numerales 5.7.8 y 5.7.19).

5.7.8 Coeficiente de declinación del dosel (CDD) (A: C4 R: C2)

La tasa de declinación del dosel para avena forrajera osciló alrededor de $1,5667\%.\text{día}^{-1}$ ($0,1937\%.\text{°C}^{-1}.\text{día}^{-1}$) desde un mínimo de $0,0608\%.\text{día}^{-1}$ ($0,0066\%.\text{°C}^{-1}.\text{día}^{-1}$) hasta un máximo de $5,678\%.\text{día}^{-1}$ ($0,5899\%.\text{°C}^{-1}.\text{día}^{-1}$). En la Figura 5.25 se presenta la curva de declinación del dosel para avena forrajera, determinada de forma práctica sobre el promedio de todas las unidades experimentales (línea azul, símbolo rombos), por medio de observación del proceso de senescencia con supervisión fotográfica como se explicó en el numeral 3.6.8. Superpuesta a ésta se ha ajustado la ecuación de declinación del dosel propuesta por AquaCrop, Raes et al., (2009): [2.36]

El coeficiente de declinación del dosel que mejor ajustó fue de $5,678\%.\text{día}^{-1}$. La línea de declinación del dosel generada por la ecuación [2.36] se presenta en rojo con asteriscos.

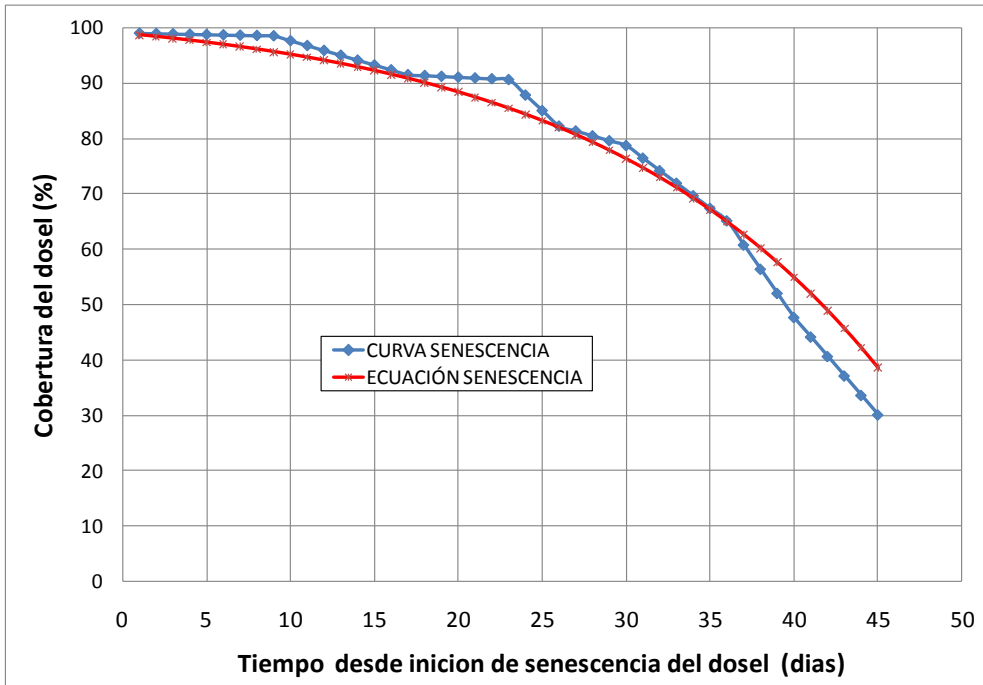


Figura 5.25 Curva de declinación del dosel para avena forrajera.

Para el caso de raigrás se procedió de forma similar obteniendo la curva de declinación del dosel de la Figura 5.26. Sin embargo, debido a que este es un cultivo indeterminado, la generación de la senescencia “forzada” muestra una tendencia a su recuperación (Línea azul con rombos). La curva de la ecuación [2.36] de mejor ajuste con error tendiente a cero, (Curva roja con asteriscos), tiene su característica forma exponencial, con una curvatura generada por su coeficiente de 0,05 que a pesar del ajuste cercano a cero deja ver que sus tendencias son opuestas, por lo cual la ecuación [2.36] muy seguramente no describe adecuadamente el proceso de senescencia del dosel de raigrás. Al menos como ha sido generado en este experimento.

Por esta razón, se realizaron varios ajustes a la ecuación de declinación del dosel de AquaCrop, variando el coeficiente de factorización del exponencial desde 0,05 hasta 50 con el objeto de disminuir su curvatura, de tal manera que se adaptara a lo ocurrido experimentalmente en el proceso de senescencia del raigrás.

A partir de este nuevo coeficiente se ajustó la mejor curva con la misma ecuación [2.36] logrando el ajuste presentado en la Figura 5.27, con un error también cercano a cero, pero esta vez con la misma tendencia de disminución del dosel que presentó el resultado experimental. La curva de declinación del dosel de raigrás tiene una pendiente mucho menor que para los cultivos determinados, y muestra una tendencia a la recuperación del dosel muerto,

esto se debe a sus características de auto renovación que tienen este tipo de cultivos.

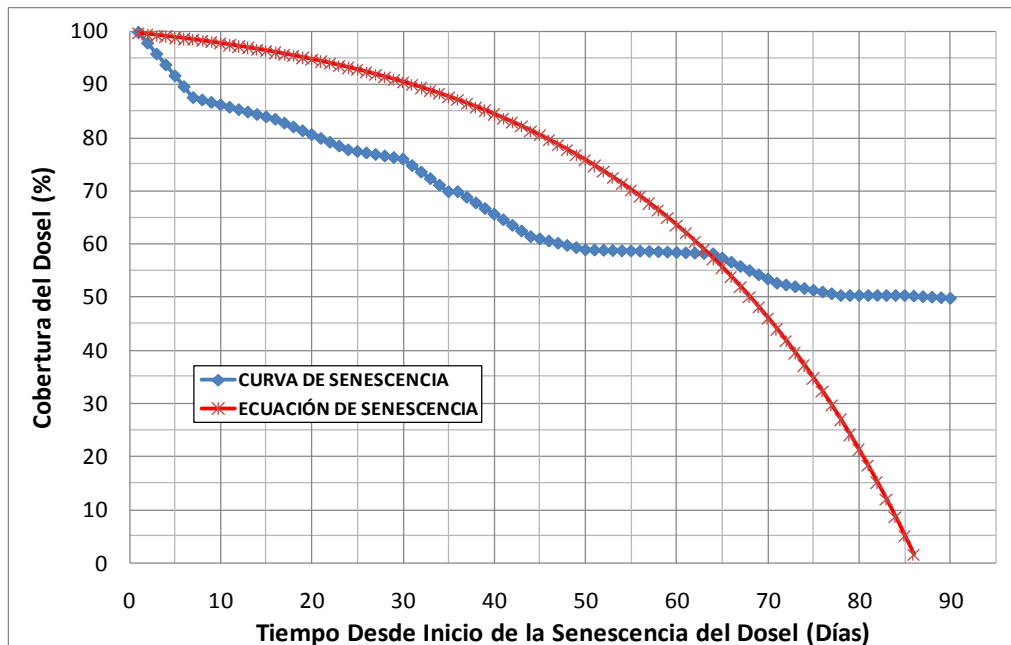


Figura 5.26 Curva de declinación del dosel para raigrás. Coeficiente de factorización exponencial = 0,05, $CDx = 99,76$, $CDD = 3,5146$.

De acuerdo a las características de los cultivos indeterminados, a los resultados experimentales y a los resultados obtenidos en este análisis. Se recomienda que en caso de requerir simular la senescencia del dosel de este tipo de cultivos es necesario cambiar el coeficiente de factorización exponencial de la ecuación de senescencia del dosel de AquaCrop [2.36]. Realizando dicho cambio se garantiza que se logre la tendencia de disminución del dosel a la tasa encontrada en la práctica.

A partir de este nuevo coeficiente se puede determinar el Coeficiente de Declinación del Dosel, (CDD) el cual resultó ser de $1,434 \text{ \%}\cdot\text{día}^{-1}$, para el mejor ajuste de la curva. Es importante resaltar que con el coeficiente de factorización exponencial igual a 50, la ecuación exponencial de declinación del dosel se “linealiza” siendo equivalente a la ecuación presentada en la Figura 5.27, el coeficiente de determinación que se presenta hace referencia al ajuste de mínimos cuadrados de la línea con respecto a la curva de marchitamiento.

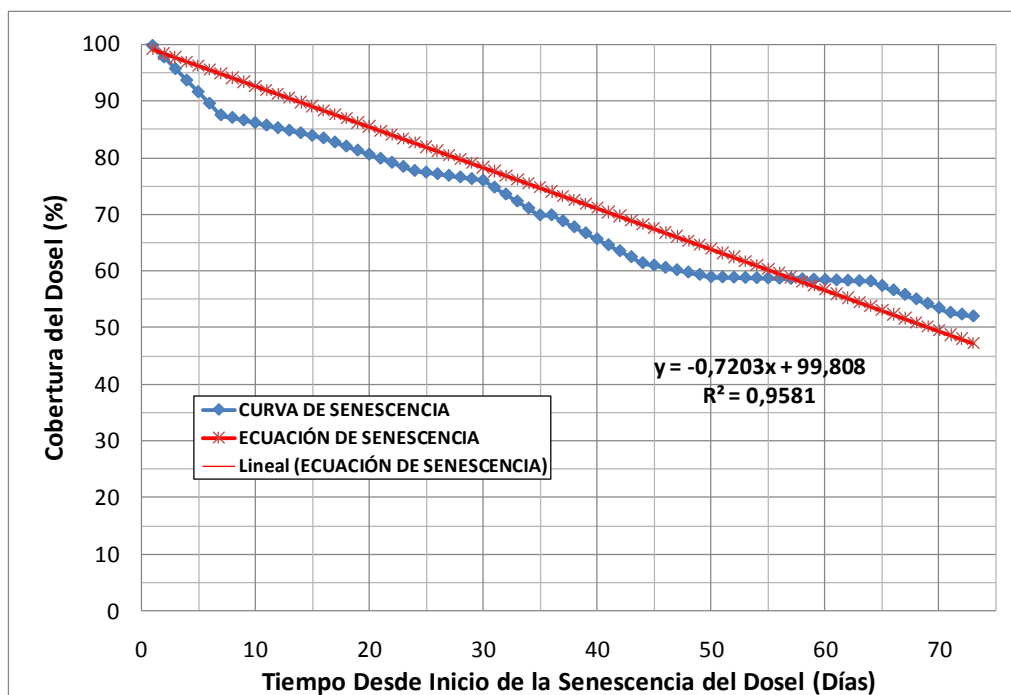


Figura 5.27 Curva de declinación del dosel para raigrás. Coeficiente de factorización exponencial = 50, $CDx = 99,76$, y $CDD = 1,434$, la curva es equivalente a una línea recta con la ecuación de la figura.

Aunque la tendencia general de todas las unidades experimentales presentó este comportamiento y estadísticamente resultan bastante confiables los resultados experimentales. Desde ahora se observa la necesidad de realizar mayor experimentación al respecto en los cultivos indeterminados. Por otro lado sería importante evaluar la senescencia natural a través del tiempo de este tipo de cultivos sin que intervenga el “forzamiento” de dicha senescencia, con el fin de determinar cuál es el tipo de tendencia que prevalece para ellos.

Para la Tabla 5.28, se ha dejado el valor de $CDD = 1,434 \text{ \%}\cdot\text{día}^{-1}$, haciendo el énfasis en su posible variación generada experimentalmente desde $0,0243 \text{ \%}\cdot\text{día}^{-1}$ ($0,0022 \text{ \%}\cdot\text{°C}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$) a $2,2279 \text{ \%}\cdot\text{día}^{-1}$ ($0,275 \text{ \%}\cdot\text{°C}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$) con un promedio de $0,5128 \text{ \%}\cdot\text{día}^{-1}$ ($0,0522 \text{ \%}\cdot\text{°C}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$).

Es importante mencionar que AquaCrop define rangos de clase correspondientes a valores por defecto de la senescencia del dosel de acuerdo a la Tabla 5.38, en la cual se destaca la senescencia del dosel no por medio del CDD sino por periodo de tiempo que el cultivo gasta para llegar a la muerte total.

Tabla 5.38 Clases correspondientes a valores por defecto y rangos para senescencia del dosel expresado en días para alcanzar la muerte total.

Clases	Valores por defecto	Rango
Senescencia muy despacio	5 semanas	Más de 31 días
Senescencia despacio	4 semanas	25 ... 31 días
Senescencia moderada	3 semanas	18 ... 24 días
Senescencia rápida	2 semanas	13 ... 17 días
Senescencia muy rápida	10 días	Menos de 13 días

Tomado de: Raes, D. et al, 2010, Manual del Referencia de AquaCrop, Cap. 2.

Un cálculo adicional reveló que la senescencia completa del dosel de raigrás duraría por lo menos unas 33 semanas, por lo cual quedaría clasificado como de “Senescencia muy despacio”. (ver: numeral 5.7.19).

Por ser esta primera parte sólo la obtención de las variables de entrada al modelo en general los ajustes generados en todos los casos se refieren a diferencias simples entre las curvas o valores. En el proceso de calibración y validación del modelo posteriormente se seleccionaron cinco indicadores de ajuste formales.

5.7.9 Tiempo de siembra a madurez (t_m) (A:T R:T)

El tiempo de siembra a madurez se evaluó en días y en grados día [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$] de acuerdo a la metodología mencionada en el numeral 2.10.3.2 (5) sobre días grado. El período de siembra a madurez se contabilizó hasta el estado de grano harinoso duro, tanto para avena forrajera como para raigrás, estado en el cual se estima que se inicia la madurez.

Para el caso de avena forrajera el promedio de días a madurez fue de 133, (1166 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$) con un rango de 1162 a 1173 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$ teniendo en cuenta los cuatro cultivos realizados.

Para raigrás el promedio de días a madurez se evaluó para el periodo de siembra al primer corte resultando un promedio de días de 100 (972 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$) y un rango de 970 a 974 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$, para los cortes posteriores al primero de 55 días (533 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$) con un rango desde 530 a 540 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$.

5.7.10 Tiempo de siembra a floración (t_f)(A:T R:T)

El tiempo de siembra a floración se determinó hasta el inicio de la floración para ambos cultivos. El promedio de floración para avena forrajera fue de 120 días (1052 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$) con una oscilación entre 1047 a 1057 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$.

Para raigrás se tomó el período entre siembra y el primer corte por separado alcanzando 83 días (799 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$) con un rango entre 795 a 803 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{día}$, y para

cortes posteriores al primero el tiempo a floración en promedio fue de 44 días (422 °C.día) con oscilación entre 418 a 426 °C.día.

Para todos los casos de los periodos fenológicos de los cortes y cultivos se tienen los valores obtenidos en días y días grados en forma detallada, sin embargo no se presentan aquí con el objeto de resumir.

5.7.11 Longitud del estado de floración (L_f) (A:T R:T)

La longitud del estado de floración para avena forrajera fue de 6 días en promedio (56 °C.día) para los cuatro cultivos con una oscilación en días grados de 53 a 58 °C.día.

Para raigrás la longitud de floración se presenta más prolongada dependiendo de la fecha de corte, sin embargo se observa una primera serie de floración de 7 días en promedio (71 °C.día), el cual sugiere el punto del primer corte con una variación en días grados de 62 a 79 días.°C⁻¹, para los cortes posteriores el promedio también es de 7 días (72 °C.día) con una variación en días grado que tiende a aumentar de 64 a 82°C.día.

Es importante mencionar que la longitud del estado de floración se estableció por medio de registros fotográficos desde el momento del asomo de estambres hasta el inicio de la formación de grano acuoso lechoso, tanto para avena forrajera como para raigrás. Sin embargo la tendencia en este último es la continuación del proceso en forma continua, pero con menos vigor.

En general se determina que para forrajes; una vez se termina la etapa de espigadura o estado de bota, comienza la etapa de floración que dura entre una y dos semanas como promedio, esta etapa se considera terminada cuando todos los estambres de una espiga se hacen visibles asomándose a través de las espiguillas. Salsbury y Ross, (1994).

5.7.12 Cultivo determinado unido con floración (D)

El cultivo de avena forrajera es determinado y el cultivo de raigrás se considera indeterminado. Por lo cual para avena forrajera D = SI, mientras que para Raigrás D = NO.

En los cultivos determinados, entre ellos la mayoría de los cereales, la floración ocurre durante un período de unos pocos días posteriores a la finalización del crecimiento vegetativo. El crecimiento vegetativo cesa porque la floración supone la conversión de los meristemos apicales de los tallos a estructuras reproductoras.

En los cultivos indeterminados, entre ellos el algodón y muchas leguminosas de grano como la soya, la floración se solapa con el crecimiento vegetativo y se puede prolongar durante semanas e incluso meses. Esto sucede porque la floración progresa desde meristemos axilares mientras que el meristemo apical continúa produciendo nuevas hojas y nuevas posiciones axilares.

Esta distinción entre cultivos determinados e indeterminados tiene una gran significancia en la adaptación de los cultivos y su manejo. Loomis y Connor, (2002), como en el caso de algunos forrajes, por ejemplo; el raigrás cuya presencia de la floración determina la fecha de corte o entrada del ganado, y que por medio de ésta práctica se obtienen mejores rendimientos durante cosechas repetidas.

Los dos hábitos de floración tienen una significación diferente bajo condiciones de estrés ambiental. La prolongada floración de los cultivos indeterminados permite la compensación de las pérdidas de flores o abortos de semillas producidos por estrés temporal como altas temperaturas o déficits hídricos. Por el contrario, los cultivos determinados son vulnerables a periodos aislados de estrés que puedan ocurrir durante la floración. Loomis y Connor, (2002). En el caso de cultivos forrajeros la indeterminación permite la identificación del máximo nivel de producción de biomasa al inicio de la floración.

5.7.13 Profundidad de raíz mínima efectiva (Z_0) (A:C4 R:C2)

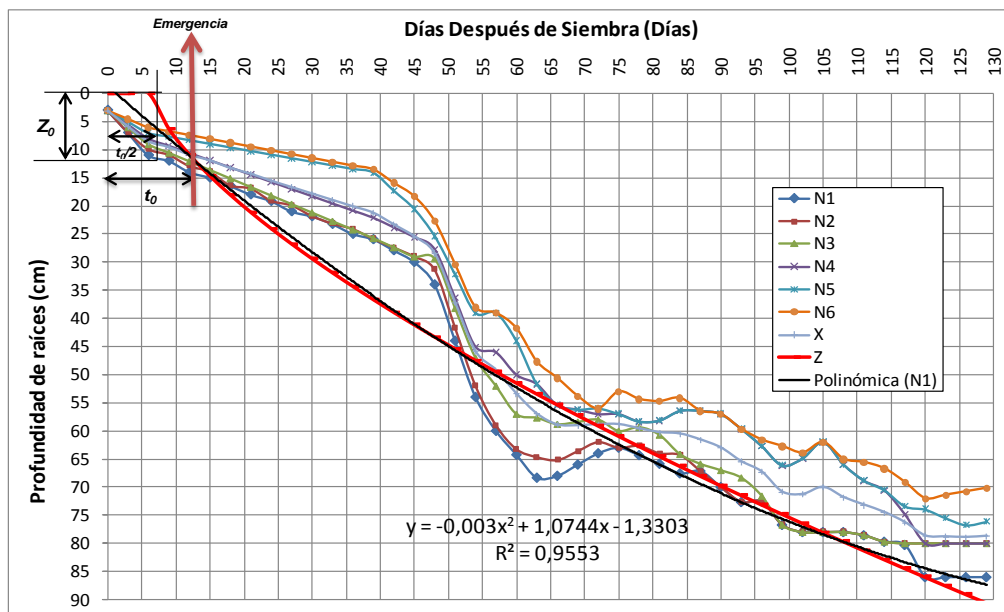


Figura 5.28 Curva de crecimiento de raíces de avena forrajera a través del ciclo vegetativo del cultivo.

La profundidad de raíces se supervisó en los diferentes niveles de los tratamientos durante la realización de los experimentos de los cultivos 4 y 2 para avena forrajera y raigrás respectivamente. El desarrollo de las raíces se presenta en las Figuras 5.28 y 5.29.

La profundidad mínima efectiva se determinó por el método propuesto por AquaCrop (Raes et al., 2009, numeral 2.5.2). En cualquiera de las Figuras 5.28 o 5.29 se ubicaron el punto de emergencia, el cual determina t_0 . En $t_0/2$ se presenta la profundidad mínima efectiva que es la profundidad de raíz a la cual el cultivo es capaz de depender de su propia raíz.

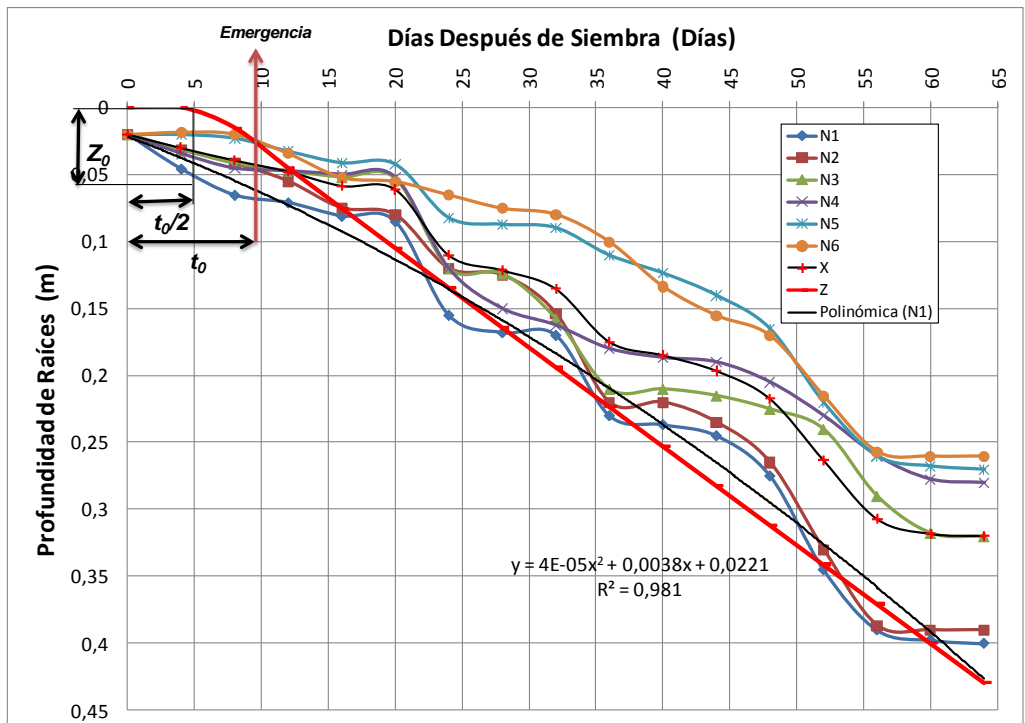


Figura 5.29 Curva de crecimiento de raíces de raigrás a través del ciclo vegetativo del cultivo.

Se observó que las raíces en el nivel de mayor humedad (N1), el frente de raíces siempre permaneció a la mayor de profundidad y que en general se desarrolló un ordenamiento en profundidad de acuerdo al nivel de humedad, terminando en el crecimiento menos profundo para los niveles 6. Para la avena forrajera la profundidad mínima efectiva fue de 0,11 m, mientras que para raigrás se determinó en 0,06 m. En las Figuras 5.28 y 5.29 se ha graficado el proceso de obtención de esta variable para mayor claridad, identificando $t_0/2$. En el eje de las ordenadas se puede leer Z_0 obtenido para los niveles 1, sin restricciones de humedad.

Es importante anotar que para el caso de los balances hídricos la profundidad de raíces mínimas se toma como 0,3 m para la mayoría de cultivos herbáceos. Este es el valor mínimo de esta variable asumida por AquaCrop para los diferentes cálculos. Por otro lado, la totalidad de cultivos que hasta ahora se han calibrado y validado para AquaCrop han determinado este parámetro como 0,3 m, aún cuando experimentalmente se pueden obtener otras profundidades mínimas.

5.7.14 Profundidad de raíz máxima efectiva (Z_x) (A:C4 R:C2)

Por observación directa de campo se realizó la toma periódica de la profundidad de las raíces por medio de calicatas como se explicó en el numeral 3.6.14, la supervisión directa se realizó hasta cuando la profundidad de la raíz tuvo la misma lectura para tres o más observaciones.

La profundidad de las raíces también se graficó en las Figuras 5.28 y 5.29 en las cuales se puede identificar la profundidad máxima alcanzada por cada uno de los cultivos en los niveles sin restricción hídrica (los más profundos). Se observa que para avena forrajera dicha profundidad llega a los 0,86 m, mientras que para raigrás la profundidad alcanza 0,40 m.

5.7.15 Factor de forma que describe la expansión de la raíz (n) (A:C4 R:C2)

La ecuación [2.38] es la que describe la expansión de la raíz en AquaCrop Steduto et al., (2009), y por medio de ella se puede evaluar el factor que describe su forma de expansión “ n ”.

n , es la raíz de la relación de expansión a través del tiempo y fue determinada con base en el desarrollo de la raíz para los niveles sin estrés hídrico (niveles 1). Debido a que experimentalmente existe una variación oscilatoria en el crecimiento de las raíces (Ver Figuras 5.28 y 5.29) se probó un ajuste de varias curvas al desarrollo experimental obtenido, considerando ajustes lineales, exponenciales, de potencias y polinómicos hasta de segundo orden. La curva con más alto coeficiente de determinación fue seleccionada. (Línea negra). Luego se implementó la ecuación de crecimiento de raíces de AquaCrop con la ecuación [2.38] (Línea roja). A partir de estas dos curvas se calcularon los errores entre la línea de mejor ajuste y la ecuación de crecimiento de raíces (Z) de AquaCrop, cuando el error tendió a cero se seleccionó el valor de n .

El valor del factor que describe la expansión de la raíz para avena forrajera fue de 1,4662 y para raigrás alcanzó un valor de 1,0101, aunque en la práctica sólo basta un nivel de precisión de hasta dos decimales para lograr la curva deseada, se presentan los decimales que lograron un error muy

cercano a cero. Los valores calibrados y validados para ambos casos fueron de 1,5 para avena forrajera y de 1,0 para raigrás.

5.7.16 Tiempo de siembra a la máxima profundidad de raíces (t_x) (A:T R:T)

Para avena forrajera la máxima profundidad de raíces fue alcanzada en promedio a los 128 días después de la siembra (1126 °C.día), con un nivel en días grado que oscila entre los 1123 y 1128 °C.día.

Para raigrás la máxima profundidad de raíces se alcanzó a los 64 días después de la siembra, (603 °C.día) completando desde 599 a 606 °C.día.

En las Figuras 5.28 y 5.29 se observa que para los niveles superiores al 1 la máxima profundidad de raíces es siempre inferior a los valores mencionados y que al final todos los niveles tienden a estabilizarse alrededor de su valor final, a pesar de que se amplió el tiempo de observación.

Es importante recalcar que el suelo bajo el cual los cultivos fueron emplazados no presentó restricciones aparentes por lo menos en sus primeros 143 cm de profundidad. (Ver perfil de suelos, Anexo A Suelos).

5.7.17 Coeficiente del cultivo cuando el dosel está completo pero previo a senescencia (Kcb_x) (A:T R:T)

La Tabla 5.39 presenta los coeficientes basales del cultivo de avena forrajera que se alcanzaron en los cuatro cultivos realizados y sus días después de siembra en los cuales se presentaron. De acuerdo a la tabla el valor promedio de Kcb_x considerando los cuatro cultivos redondeado a la centésima fue de 1,03.

Para raigrás se determinaron los coeficientes del cultivo basales para todos los ciclos y cortes identificando también sus días después de corte en los cuales se presentaron. La Tabla 5.40 presenta los valores de Kcb_x obtenidos. En los cuales se destaca el promedio para los ciclos cumplidos desde la siembra hasta el primer corte de 1,11 para los cortes posteriores al primero el valor promedio sólo alcanzó 0,97.

Tabla 5.39 Coeficientes del cultivo cuando el dosel está completo pero previo a senescencia para avena forrajera. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.

Cosecha	Kcb _x	
	DDS	Kcb _x
1er Cultivo	114	1,04
2do Cultivo	115	0,95
3er Cultivo	134	0,94
4to Cultivo	123	1,18
Promedios	122	1,03

Como punto adicional se observa un decrecimiento del Kcb_x a través de los diferentes cortes del cultivo de raigrás en forma mínima pero sostenida. Esto es concordante con el comportamiento de la cobertura del dosel que también presenta una reducción a través del tiempo. (Ver numeral 5.6.4).

Tabla 5.40 Coeficientes del cultivo cuando el dosel está completo pero previo a senescencia para raigrás. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.

Cosecha	Kcb _x	
	DDS	Kcb _x
1er Cultivo	90	1,11
1er Corte uniforme	42	1,01
2do Corte uniforme	49	1,17
3er Corte uniforme	71	0,93
4to Corte uniforme	52	0,91
5to Corte uniforme	41	0,86
6to Corte uniforme	46	0,85
2do Cultivo	89	1,12
1er Corte uniforme	41	0,99
2do Corte uniforme	40	1,06
3er Corte uniforme	39	1,03
Promedios		
Cultivo	90	1,11
1er Corte uniforme	42	1,00
2do Corte uniforme	45	1,11
Cortes posteriores	50	0,92
Promedios después 1er Corte	45	0,97

5.7.18 Factor de declinación del cultivo (f_{edad})(A:C4 R:C2)

A partir de las curvas de Kc , Kcb y Ke , obtenidas para cada uno de los cultivos (avena forrajera y raigrás) es fácil extraer los Kcb subsiguientes al Kcb_x . El efecto de la edad (f_{edad}) se presenta en los siguientes 5 días después

de la máxima transpiración, por lo cual, se analizaron todos los cultivos realizados después de alcanzar la máxima cobertura del dosel extrayendo los valores de Kcb para los siguientes siete días y construyendo las gráficas de las Figuras 5.30 y 5.31.

En dichas figuras se observa bien el efecto de reducción de Kcb_x a través de los días subsiguientes al máximo (línea azul). Sobre esta línea se ha ajustado por mínimos cuadrados la línea recta con mayor coeficiente de determinación encontrada. En las figuras se incluye las ecuaciones lineales respectivas.

Las pendientes de las curvas determinan el factor de ajuste de declinación del Kcb_x . Dado que en las figuras la relación presentada está dada en unidades de fracción al pasar dichos valores a porcentaje quedan para avena forrajera y para raigrás transformados en $0,13\%.\text{día}^{-1}$ y $0,24\%.\text{día}^{-1}$ respectivamente.

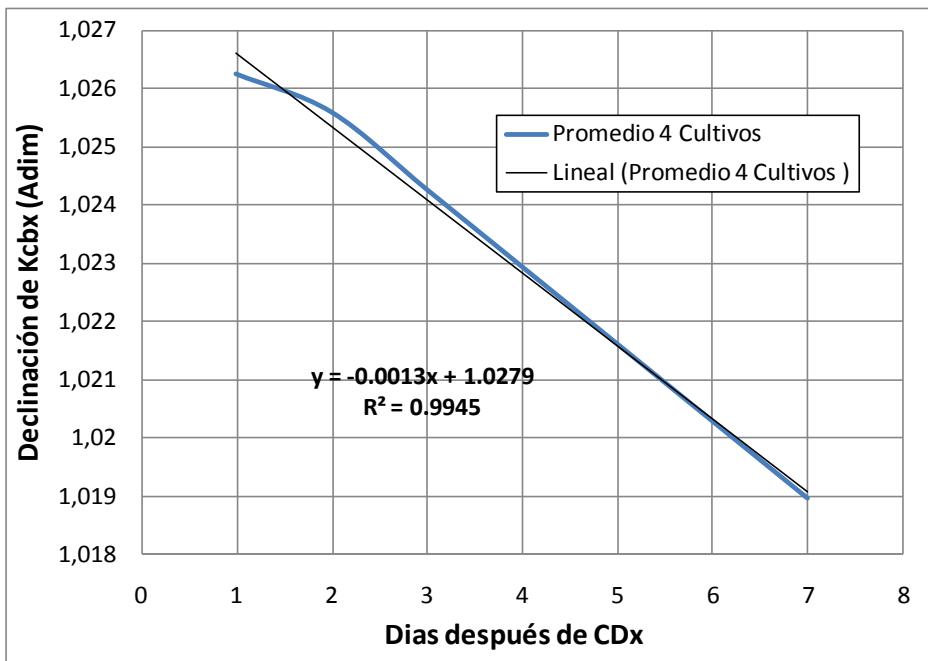


Figura 5.30 Determinación del factor de ajuste de declinación de la avena forrajera.

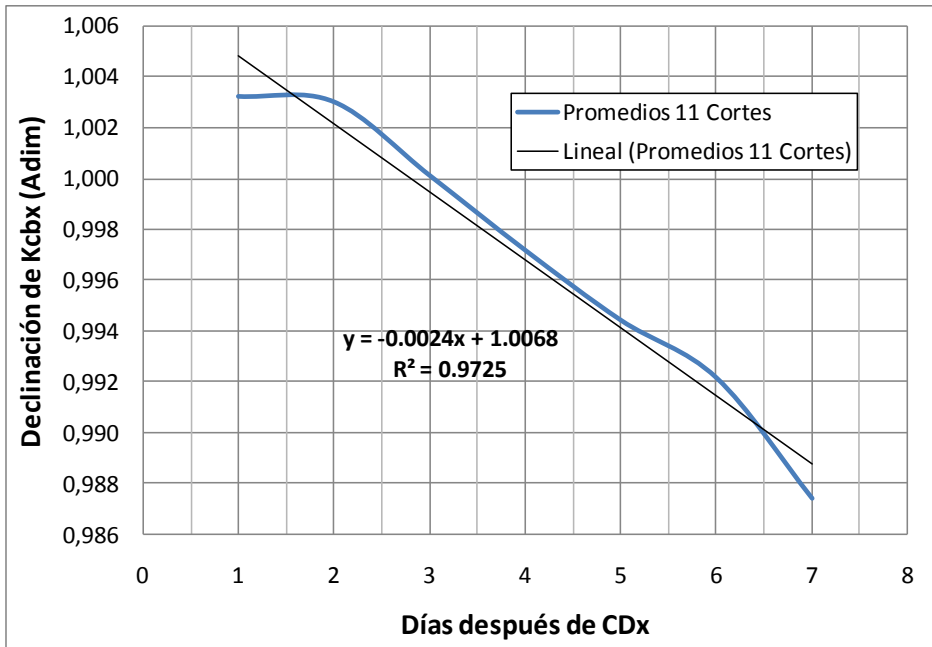


Figura 5.31 Determinación del factor de ajuste de declinación para el raigrás.

5.7.19 Efecto de la cobertura del dosel sobre la reducción de la evaporación del suelo en el estado de estación tardía ($E_{rel,x}$) (A:C4 R:C2)

La determinación de esta variable se realizó por medio de la supervisión de la cobertura del dosel marchito en la estación tardía con fotografía y se evaluó con el programa CobCab, Ferrari et al., (2009).

La construcción de la curva promedio de evaporación (E) (con base en K_e) en la estación tardía, permite ver los niveles de evaporación que se presentan a lo largo de esta estación hasta el momento en que fue supervisado (30% de senescencia para avena forrajera y 51% para raigrás).

Es importante recordar que para el cálculo de la evaporación del suelo se supervisó el proceso de desarrollo de la cobertura del dosel, por medio de fotografía con una frecuencia de 2 veces por semana, al evaluar el área no cubierta por el cultivo se obtiene la proporción de evaporación, por lo cual se puede realizar la curva de evaporación generada por el suelo no cubierto por el cultivo.

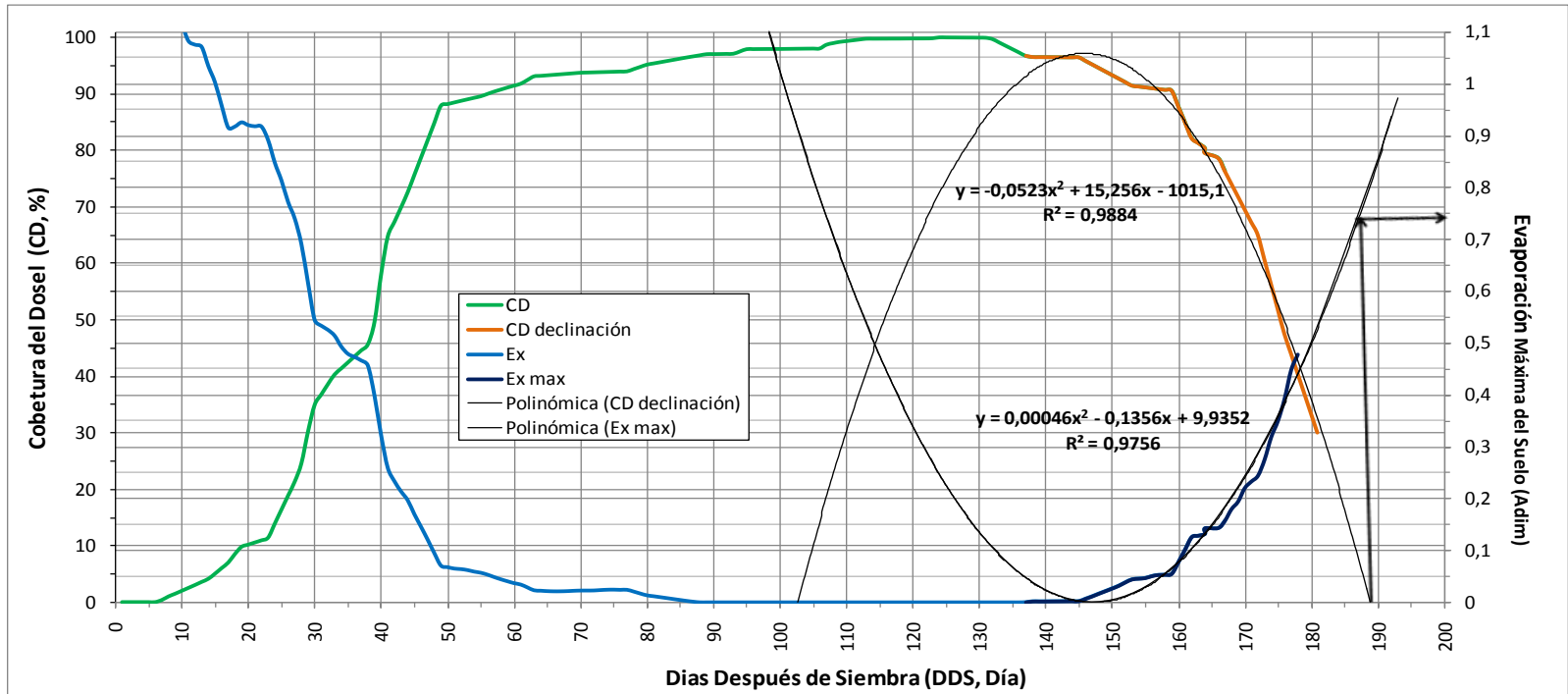


Figura 5.32 Determinación de la evaporación máxima del suelo en senescencia para avena forrajera. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.

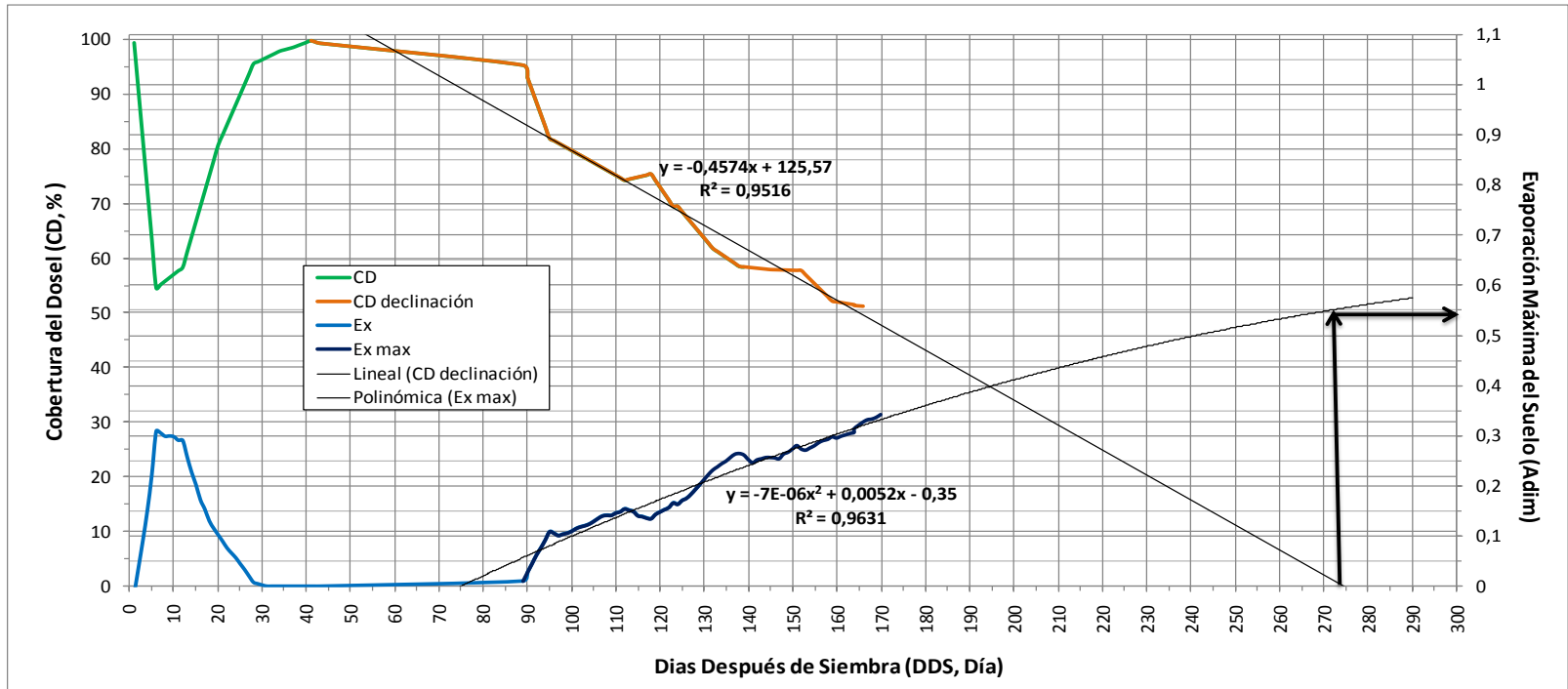


Figura 5.33 Determinación de la evaporación máxima del suelo en senescencia para raigrás. C.I. Tibaitatá, Sabana de Bogotá, Colombia.

Para saber su comportamiento posterior se ajustó la mejor curva, probando varios modelos de ajuste, como lineal, de potencias, exponencial, logarítmico y polinómico hasta de segundo orden. De esta forma se estableció en forma aproximada la tendencia de la evaporación en el proceso de senescencia. De igual modo se procedió con la curva de cobertura del dosel ajustando su mejor aproximación (coeficiente de determinación mayor).

La curva de declinación del dosel muestra el punto donde el dosel finalmente muere en su totalidad (punto de intersección con el eje de las abscisas), además la curva de evaporación (E_x), muestra en dicho punto cuál es el valor máximo de la evaporación que se presenta dada la cobertura del dosel muerto remanente en el suelo. Al transformar este valor máximo alcanzado en porcentaje, se obtiene la reducción de la evaporación lograda por el dosel remanente en el suelo en el estado de estación tardía.

Las Figuras 5.32 y 5.33 muestran el proceso claramente, sobre los resultados así descritos se determinó que para la avena forrajera la máxima evaporación relativa en el estado de estación tardía fue del 67%.

Para la curva de declinación del dosel en el caso de raigrás se usó un ajuste lineal, dada la tendencia de este cultivo a su recuperación en el proceso de senescencia. Después de realizar estos cálculos se determinó que para este cultivo la máxima evaporación relativa en el estado de estación tardía fue del 50%.

Es coherente encontrar que la cobertura del dosel muerto de raigrás alcance mayor cubrimiento que la avena forrajera por las características arquitectónicas del cultivo, pues su mantillo generado es más homogéneo y además sus distancias de siembra son prácticamente nulas, en avena forrajera existe una distancia de siembra entre surcos determinada (p.ej: 0,3 m) que ayuda a que su dosel muerto no tenga cobertura homogénea aunque su dosel pueda eventualmente ser mayor. La distribución del mantillo de raigrás es siempre mejor, lo cual hace que su evaporación relativa máxima al final del ciclo sea menor.

5.7.20 Productividad hídrica normalizada (WP*) (A:T R:T)

La productividad hídrica normalizada para clima (ET_0) y concentración de CO_2 en la atmósfera, se calculó también con base en todos los experimentos realizados considerando los promedios obtenidos sobre los niveles de producción máxima, en relación con la suma de la transpiración alcanzada. De acuerdo a la metodología presentada en el numeral 4.6.20.

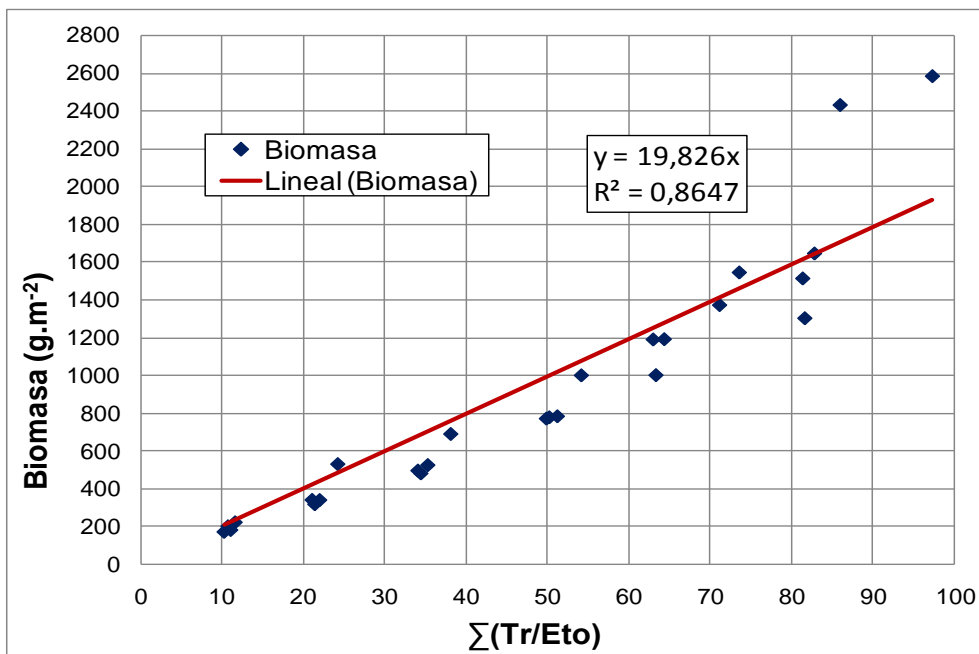


Figura 5.34 Determinación de la productividad hídrica normalizada para Avena Forrajera. C.I. Tibaitatá, 2009 – 2010.

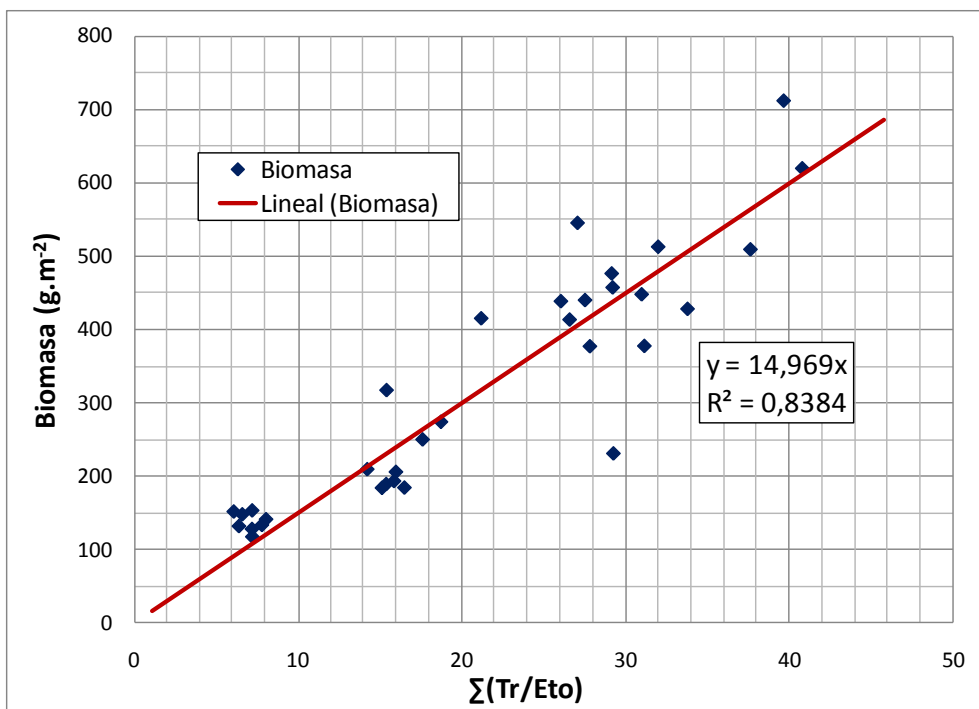


Figura 5.35 Determinación de la productividad hídrica normalizada para raigrás. C.I. Tibaitatá, 2009 – 2010.

Luego se normalizaron los valores encontrados con base en las ecuaciones [2.40] y [2.41]. Para la normalización por CO_2 se tuvo en cuenta las concentraciones reportadas por AquaCrop, de acuerdo al laboratorio de Mauna Loa en Hawai de los años 2009 y 2010 de acuerdo a las fechas de realización de cada uno de los experimentos.

En la Figura 5.34 se presenta la relación entre la biomasa producida y la transpiración normalizada por la ET_0 . La pendiente de la recta que pasa por el origen determino la productividad hídrica normalizada para avena forrajera en un valor de $19,83 \text{ g.m}^{-2}$.

Mientras que para raigrás la productividad hídrica sólo alcanzó un valor promedio de $14,97 \text{ g.m}^{-2}$ tanto para el periodo de siembra a primer corte como para los cortes posteriores, la cual fue determinada por medio de la Figura 5.35.

5.7.21 Productividad hídrica normalizada durante la formación de la cosecha (Como porcentaje de WP^* antes de formación de la cosecha)

Este parámetro expresa cual es el porcentaje de WP^* que se forma fuera del periodo de formación de cosecha.

Si orgánicamente la capacidad de cosecha es rica en aceites y/o proteínas, la WP^* después del inicio de la floración debe ser reducida sobre el período de formación, pero multiplicándolo por un factor de ajuste entrado por el usuario al modelo AquaCrop. Raes et al, (2010). Para el caso de avena forrajera y raigrás debido a que ninguno de los dos cultivos son ricos en aceites o con altos contenidos de proteínas. Este valor es del 100%, lo que indica que no existe corrección alguna de la productividad hídrica después del inicio de la floración.

5.7.22 Índice de cosecha de referencia (IC) (A:T R:T)

El índice de cosecha diferencia la biomasa producida con el fruto del cultivo, (grano o fruto).

El índice de cosecha para avena forrajera se determinó con base en el grano y en la biomasa (MS) producida mientras que para el raigrás se determinó sólo con base en la producción de biomasa. Aunque para forrajes el índice de cosecha tiene mayor importancia sobre la biomasa producida. AquaCrop diferencia el cálculo del IC en el caso de que el cultivo sea de granos/frutos, raíces/tubérculos, cultivos herbáceos o pastos y forrajes. Esta variable no tendría el mismo sentido si se considera por ejemplo: Avena como cereal

(granos) o forraje, por lo cual según el caso habría que utilizar uno u otro índice de cosecha (sobre grano o sobre biomasa producida).

Con base en los valores de la producción de las Tablas 5.11 a 5.14 y sus respectivas producciones de biomasa o grano se calcularon los índices de cosecha para avena forrajera, para este caso, el cálculo del IC sobre biomasa se tomó la relación de la biomasa sin espiga y zoca³ con respecto a la biomasa total. Para el caso de raigrás, se usaron por otra parte, las producciones reportadas en las Tablas 5.15 a 5.25, se tomó la relación de la biomasa sin zoca con respecto a la biomasa total.

Para la avena forrajera el Índice de Cosecha (*IC*) promedio fue de 60,22% sobre biomasa cosechada y de 18,28% sobre grano. Mientras que para raigrás en el primer corte se obtuvo un *IC* de 82,72% sobre biomasa cosechada y para los demás cortes el *IC* aumentó un poco hasta 85,50%, esto es explicable pues en las etapas subsiguientes al primer corte la planta no debe dedicar recursos para la formación de estructuras básicas como raíces o tallos, por lo cual su desempeño es mejorado hacia la producción de forraje. Las cosechas se realizaron con alturas de zoca entre 7 y 10 cm.

Aunque el raigrás produce granos, sus espigas son de difícil recolección si no se cuenta con maquinaria y equipo especializado para esta labor. (la cual no fue accesible para este trabajo).

Es importante destacar que la evaluación de la cosecha de grano y del índice de cosecha no fueron considerados dentro de los objetivos del presente trabajo, debido a que en la producción de forrajes la cosecha es la biomasa producida. Para productores de semilla sería indispensable la determinación del *IC* en el caso de raigrás. Sin embargo, se hicieron algunos aforos manuales, los cuales, no fueron sustentados experimentalmente con análisis estadísticos rigurosos. Como indicativo del *IC* para raigrás sobre grano se obtuvo un promedio de 16,20% con un rango de los aforos realizados desde 7,46 hasta 17,24%.

5.7.23 Construcción del índice de cosecha (*t_{ic}*) (A:T R:T)

Es el tiempo de construcción del índice de cosecha expresado en porcentaje del tiempo requerido para el desarrollo del dosel verde.

Por su definición es necesario determinar el tiempo de desarrollo del dosel verde y también del tiempo de la obtención de la cosecha, la cual se determinó como desde inicio de floración hasta la madurez del grano.

³ *Tocón*

Para avena forrajera se obtuvo un promedio del 12% del tiempo total dedicado a la construcción de la cosecha, mientras que para el raigrás su porcentaje aumenta principalmente por sus características de cultivo indeterminado alcanzando un promedio mínimo de entre 19 y 22%, dependiendo del momento de consolidación del índice de cosecha. Es importante aclarar que este sería un tiempo mínimo dependiendo del momento de segado, pues el proceso continúa indefinidamente hasta el momento del corte, punto en el cual sería limitado.

El referente coeficiente de crecimiento del índice de cosecha (CC/C) de la ecuación [2.45] podría ser derivado posteriormente a la calibración del modelo AquaCrop para avena forrajera y raigrás de acuerdo a la articulación del resto de parámetros evaluados, teniendo en cuenta los valores de t_{IC} referenciados en este apartado. La determinación del IC para estos cultivos forrajeros no es relevante.

Por otro lado, se observa que para la totalidad de los cultivos referenciados como calibrados y validados hasta el momento para AquaCrop este parámetro se ha obtenido en forma empírica o por medio de estimación.

5.7.24 Sumatoria de ET_0 durante el periodo de estrés que puede ser excedido antes de la activación de la senescencia ($\sum ET_{0Estres}$)

Se estima que tanto para avena forrajera como para raigrás la senescencia se dispara inmediatamente cuando existe déficit hídrico. Es decir que no existe un mínimo de déficit de ET_0 soportable por los cultivos estudiados. Aunque esta variable no fue medida, sí se visualizó este hecho en todos los casos de déficit hídrico en los experimentos de campo. Por tal razón a nivel de estimación se determina que su valor es de 0,0 mm para los dos cultivos. Este valor de estimación fue corroborado en los experimentos de estrés que se realizaron posteriormente. (Ver numeral 5.8)

Es de anotar que para todos los cultivos calibrados y validados hasta la presente por los grupos de investigación para AquaCrop esta variable ha sido determinada también como nula, a excepción de la Quinua, pues este cultivo tiene características fisiológicas especiales que lo hacen de alta resistencia a la sequía. Geerts et al., (2009).

5.7.25 Punto anaeróbico del cultivo (Ks_{aer}) (A:C4 R:C2)

El punto anaerobio del cultivo se define como la humedad en porcentaje volumétrico a la cual el cultivo inicia a ser afectado por falta de aire en el

suelo como efecto de la permanencia de la saturación del suelo o como proporción de saturación por encima de la capacidad de campo (CC).

Para la mayoría de los cultivos calibrados y validados para AquaCrop se determinó como rangos establecidos por la Tabla 2.8.

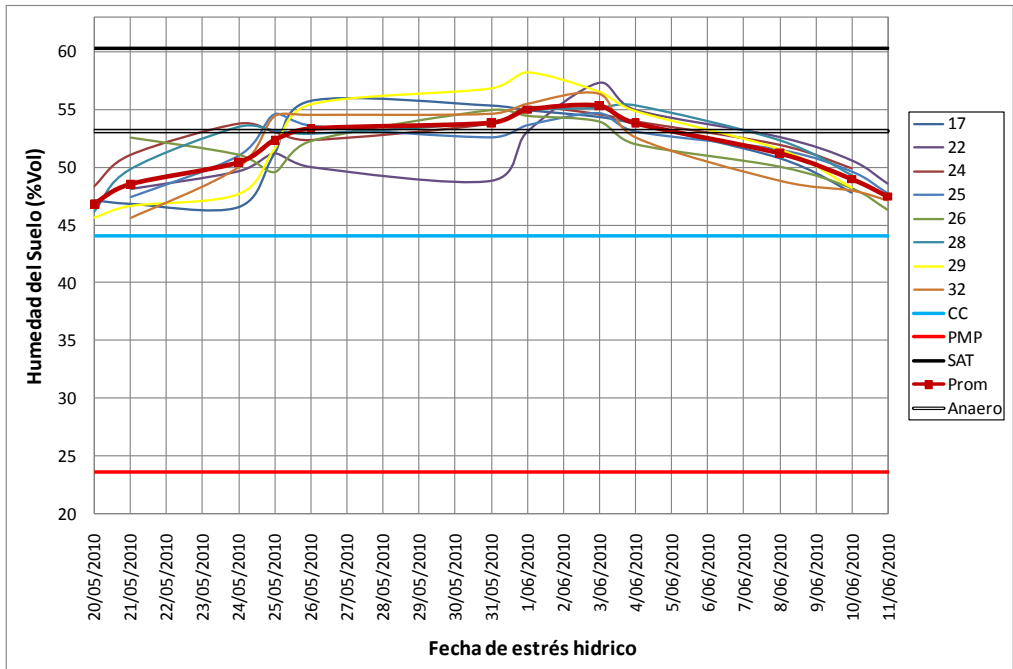


Figura 5.36 Cálculo del punto anaerobio para avena forrajera.

El procedimiento empleado en este trabajo se realizó a partir del comportamiento de los cultivos como respuesta al estrés de aireación provocado por los excesos hídricos ocurridos durante el final de la etapa del último ciclo de cultivo a finales de 2010 en la Sabana de Bogotá donde se ubicaron los experimentos en el C.I. Tibaitatá.

Para su determinación se eligieron las unidades experimentales afectadas por los excesos hídricos, generados por su ubicación alejada de los drenes y por los síntomas de anoxia presentadas en las hojas bajas del cultivo características por su color café-rojizo. Estas unidades experimentales fueron extraídas junto con sus curvas de humedad que resultaron ser las más altas en porcentaje volumétrico.

Las curvas de humedad fueron graficadas desde días antes de que se presentaran los primeros síntomas, (ver Figuras 5.36 y 5.37) y se trazaron las líneas de PMP (rojo claro), CC (azul claro), y Saturación (negro). (Ver Tablas 5.3 y 5.4).

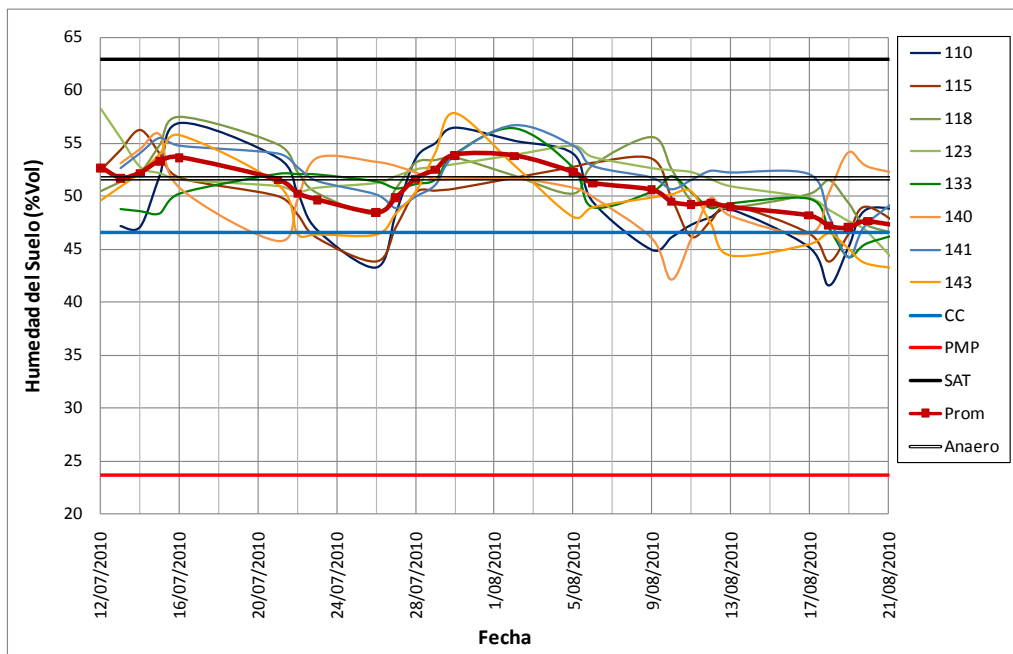


Figura 5.37 Cálculo del punto anaerobio para raigrás.

A partir de las unidades experimentales afectadas se construyó la curva promedio (rojo intenso), tomando el comportamiento de esta curva a lo largo del tiempo de afectación se determinó la recta de mejor ajuste promedio. Esta línea media es la línea anaerobia (Negra doble). Al relacionar dicha línea con respecto a la línea de saturación considerándola como el 100% en humedad volumétrica, se obtiene el porcentaje en volumen con respecto a saturación.

El valor obtenido para avena forrajera fue de -11,8%Vol de humedad bajo saturación, de acuerdo a las clases relacionadas en la Tabla 2.8 dicho valor del punto anaerobio se clasifica como “Sensible a la entrada de agua”. Para el caso de raigrás el valor del punto anaerobio fue de -17.9%Vol de humedad bajo saturación, el cual se clasifica como “Muy sensible a la entrada de agua”. Al respecto Bernal, (2005) menciona que su sistema radicular es muy denso pero superficial, por lo cual no tolera el anegamiento superficial. Aunque para el caso de su rango experimental fue el mencionado, en el momento de calibración y validación fue ajustado también como “sensible a la entrada de agua” con un valor de -12%Vol.

Es importante recordar que el punto anaerobio es sólo el umbral inferior del contenido de humedad bajo saturación al cual la pobre aireación no permite prolongar los límites de la transpiración. A partir de este punto se desarrolla el coeficiente de saturación $K_{s_{aer}}$ desde su nivel 1,0 identificado con los valores indicados hasta el total estrés, en donde $K_{s_{aer}} = 0,0$.

5.8 Estrés hídrico

Los resultados de los experimentos de estrés hídrico para avena forrajera y raigrás que se explicaron en el numeral 3.7 se muestran y discuten en los apartados siguientes.

5.8.1 Diferencias entre tratamientos. Análisis Estadístico

Para determinar las diferencias de las variables respuesta entre los tratamientos se hizo un análisis de varianza para cada uno de los experimentos cada día después de siembra (*DDS*) y después del corte (*DDC*). Para ello se utilizó el Modelo Lineal Multivariado (*GLM*) de SAS (SAS Institute, 2004). Se observó la evolución en cada variable a nivel diario, a excepción de la producción de *MS*, la cual se estableció sólo para el final de cultivo debido a que el método de obtención es destructivo. Se estableció una prueba de rango múltiple de Tukey para observar cuáles de los tratamientos presentaron diferencias significativas y las relaciones entre ellos.

Las Tablas 5.41, 5.42 y 5.43 resumen los resultados obtenidos. Se indican los periodos para los cuales las respectivas variables tuvieron resultados significativamente diferentes entre tratamientos ($\alpha=0,05$). Para cada variable se presentan los promedios por tratamientos de la variable observada y su respectivo grupo de Tukey. Los agrupamientos de Tukey resultaron variables a través del ciclo del cultivo: para la cobertura del dosel (*CD*) se muestran los resultados para el día que mayores diferencias entre tratamientos se obtuvieron, (valores entre paréntesis), mientras que para la materia seca (*MS*), el ancho de la hoja (*AH*) y la altura de planta (*AP*) se muestran las medias finales.

5.8.1.1 Avena forrajera

La Tabla 5.41 presenta un resumen de los resultados estadísticos para avena forrajera, los tratamientos se iniciaron 22 *DDS*, pero sólo hasta 47, 49, 53 y 49 *DDS* se observaron diferencias significativas entre tratamientos para la *GS*, la *CD*, el *AH* y la *AP* respectivamente. Aunque los rangos de variación de la *GS* en promedio oscilaron desde 306 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ hasta 6 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ en los periodos de mayor estrés, al final del ciclo, cuando todos los tratamientos estuvieron cercanos al *PMP*, a excepción del control, los promedios de los tratamientos variaron desde 180.7 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ para T0 hasta 29.2 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ para T4.

Tabla 5.41 Resumen de los análisis estadísticos de las variables observadas en el experimento de estrés hídrico para avena forrajera.

Variable=	125 Biomasa Promedio (Kg.ha ⁻¹) †	Periodos significancia (desde –hasta)			
		47 – 125 (108) Conductancia Estomatal (mmol.m ⁻² .s ⁻¹) †	49 – 125 (97) Cobertura del Dosel (%) †	53 – 125 Ancho de hoja (mm) †	49 - 125 Altura de planta (cm) †
Tratamiento					
T0-Control	16424.5 A	180.7 A	96.0 A	20.9 A	89.7 A
T1	9952.9 B	112.0 B	88.8 A B	16.8 A B	62.0 B
T2	5586.4 C	77.8 B C	81.8 B C	13.2 B C	41.2 C
T3	3668.3 C D	67.1 C D	68.6 C D	12.7 B C	32.8 C D
T4	2527.6 D	29.1 D	58.6 D	11.7 C	31.5 D

DDS: Días después de siembra

†: Agrupaciones de Tukey

Para la conductancia estomática la máxima diferencia entre tratamientos se alcanzó a los 108 DDS. El promedio de CD osciló entre el 96% del suelo cubierto para T0 y 58.6% para T4. La máxima diferencia entre tratamientos se alcanzó a los 97 DDS con hasta tres grupos de Tukey, sin embargo las CD tienden a equilibrarse a medida que avanza el ciclo del cultivo. El AH también se vio afectado por el estrés hídrico. El control T0 presentó anchos de hoja promedios de 20.9 mm frente a los 11.7 mm de T4. El valor medio de la AP osciló entre los 89.7 cm para T0 y los 31.5 cm para T4. Por último la biomasa total producida expresada como MS osciló entre 16.424,5 kg·ha⁻¹ de T0 a los 2.527,6 kg·ha⁻¹ de T4.

5.8.1.2 Raigrás

En la Tabla 5.42 se muestran los resultados para los periodos de siembra a primer corte de raigrás, y de primer a segundo corte en la Tabla 5.43. Los tratamientos se iniciaron a los 22 DDS, pero sólo hasta 42, 41, 57 y 74 DDS se observaron diferencias significativas entre tratamientos para GS, CD, AH y AP respectivamente. Al tratarse de un cultivo perenne, se debe diferenciar entre por lo menos dos periodos, uno desde la siembra hasta un primer corte, y el otro desde el primer corte hasta un segundo corte.

Para el primer periodo, los rangos de variación de la GS van desde 581 hasta 10 mmol.m⁻².s⁻¹ en promedio para el primer ciclo y de 661 a 10 mmol.m⁻².s⁻¹ para el segundo ciclo, mientras que el promedio de los tratamientos varió entre 363.3 mmol.m⁻².s⁻¹ (T0) y 40.7 mmol.m⁻².s⁻¹ (T4) y entre 466.4 mmol.m⁻².s⁻¹ (T0) y 26.2 mmol.m⁻².s⁻¹ (T4) en el segundo periodo. La máxima diferencia entre tratamientos se alcanzó 66 y 157 DDS respectivamente logrando hasta cuatro agrupamientos de Tukey. El valor medio de la CD osciló en el primer periodo entre 100% (T0) y 53.1% (T4) y en el rango de 100% (T0) a 34.7% (T4) para el segundo periodo, presentando diferencias significativas desde el principio del corte debido al proceso previo de estrés. La máxima diferencia entre tratamientos se alcanzó a 89 y 166 DDS, para raigrás también se tienden a equilibrar las coberturas en forma tardía en los diferentes tratamientos.

Tabla 5.42 Resumen de los análisis estadísticos de las variables observadas del experimento de estrés hídrico para raigrás (siembra a primer corte).

DDS	105	Periodos de significancia (desde – hasta)			
		42 – 105 (66)	41 – 105 (89)	57 – 105	74 – 105
Variable=	Biomasa Promedio	Conductancia Estomatal	Cobertura del Dosel	Ancho de hoja	Altura de Planta
Tratamiento	(Kg.ha ⁻¹) †	(mmol.m ⁻² .s ⁻¹) †	(%) †	(mm) †	(cm) †
T0-Control	6468.1 A	363.3 A	100.0 A	7.9 A	32.4 A
T1	5018.2 A B	152.2 B	99.4 A B	5.8 B	24.1 B
T2	3291.4 B C	105.4 B C	81.9 A B	5.7 B	21.9 B C
T3	2784.6 B C	51.3 C D	81.2 B	5.6 B	21.1 B C
T4	1513.2 C	40.7 D	53.1 C	4.9 B	16.0 C

DDS: Días después de siembra

†: Agrupaciones de Tukey

Tabla 5.43 Resumen de los análisis estadísticos de las variables observadas del experimento de estrés hídrico para raigrás (primer corte a segundo corte).

DDS	166	Periodos de significancia (desde – hasta)			
		121 – 166 (157)	106 – 166	127 – 166	111 - 166
Variable=	Biomasa Promedio	Conductancia Estomatal	Cobertura del Dosel	Ancho de hoja	Altura de Planta
Tratamiento	(Kg.ha ⁻¹) †	(mmol.m ⁻² .s ⁻¹) †	(%) †	(mm) †	(cm) †
T0-Control	4261.3 A	466.4 A	100.0 A	9.6 A	58.4 A
T1	3977.3 A	209.0 B	77.2 B	5.6 B	21.1 B
T2	3555.2 A	51.3 C	61.5 C	5.2 B C	19.9 B
T3	3133.2 A B	49.0 C	53.9 C	5.1 B C	19.9 B
T4	1891.5 B	26.2 C	34.7 D	4.5 C	12.5 C

DDS: Días después de siembra

†: Agrupaciones de Tukey

Respecto del promedio del *AH*, el control (T0) presentó un *AH* de 7.9 mm frente a los 4.9 mm del T4 en el primer periodo y entre 9.6 mm (T0) y 4.5 mm (T4) para el segundo periodo. El valor promedio de la *AP* osciló entre los 32.4 cm de T0 y los 16 cm de T4 para el primer periodo y entre 58.4 cm (T0) y 12.5 cm (T4) para el segundo periodo. Tanto para el *AH* y la *AP* se observa que algunos tratamientos obtuvieron resultados similares, sin embargo, las producciones fueron significativamente diferentes entre estos. Por último la biomasa total producida expresada como *MS* osciló entre 6.424,5 kg.ha⁻¹ para T0 a los 2.527,6 kg.ha⁻¹ para T4 para el primer periodo y de 4.261,3 kg.ha⁻¹ (T0) y 1.891,5 kg.ha⁻¹ (T4) para el segundo periodo. Las altas diferencias entre primer y segundo corte se debieron a que después del primer corte el cultivo no se recuperó lo suficiente, a pesar de haber equilibrado los tratamientos con riegos a saturación durante los tres días siguientes a la cosecha.

5.8.2 Evolución temporal de las variables respuesta

La Figura 5.38 muestra los resultados de las variables respuesta (a) *CD*, (b) *GS*, (c) *AP* y (c) *AH* supervisadas para avena forrajera, durante su ciclo de crecimiento.

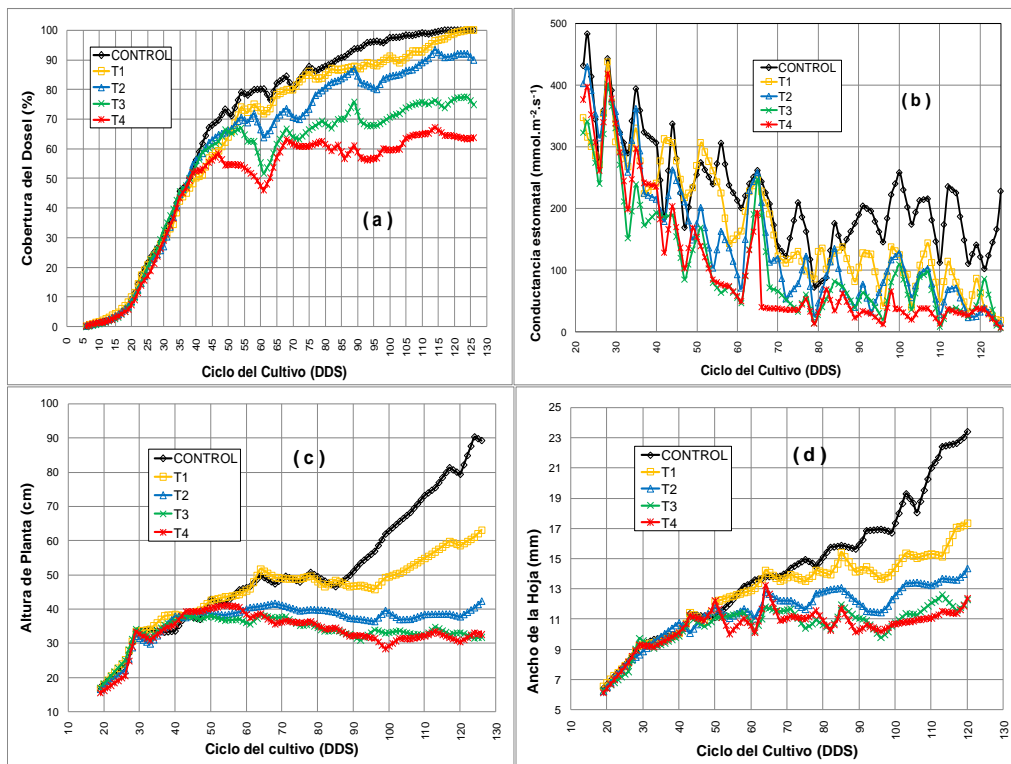


Figura 5.38 Tendencias del comportamiento de las variables respuesta (a) *CD*, (b) *GS*, (c) *AP* y (d) *AH* supervisadas para avena forrajera, durante su ciclo de crecimiento bajo cuatro procesos de estrés hídrico.

Las variables *CD*, *AP* y *AH* mostraron un crecimiento continuo para el tratamiento testigo, el cual sobresale por encima de los demás en todos los casos, mientras que los tratamientos de estrés hídrico presentan desarrollos inferiores para las variables observadas.

Por medio del comportamiento de las variables respuestas fue posible observar en qué momento su desarrollo fue limitado por el nivel de estrés hídrico aplicado y cuál era este nivel en ese momento el cual se determinó por el nivel del *AAT* previsto según el tratamiento de la Tabla 5.41, y la observación del balance hídrico de cada unidad experimental.

En general las *CD* de los tratamientos presentaron desarrollos crecientes pero disminuyeron a medida que el nivel de estrés fue más severo. La *AP* presentó limitaciones en el crecimiento a los 55 *DDS* para T2, T3, y T4 con un nivel de estrés hídrico alcanzado de 70 a 96 % *AAT*, posteriormente T1 limita su crecimiento a los 90 *DDS* con 70% *AAT*. El *AH* mostró también limitaciones en su crecimiento desde los 50 *DDS* para los mismos tratamientos, y niveles de % *AAT*.

La GS presentó un comportamiento generalmente decreciente a medida que avanzó el ciclo del cultivo, con claras diferencias entre el control (T0) y los demás tratamientos.

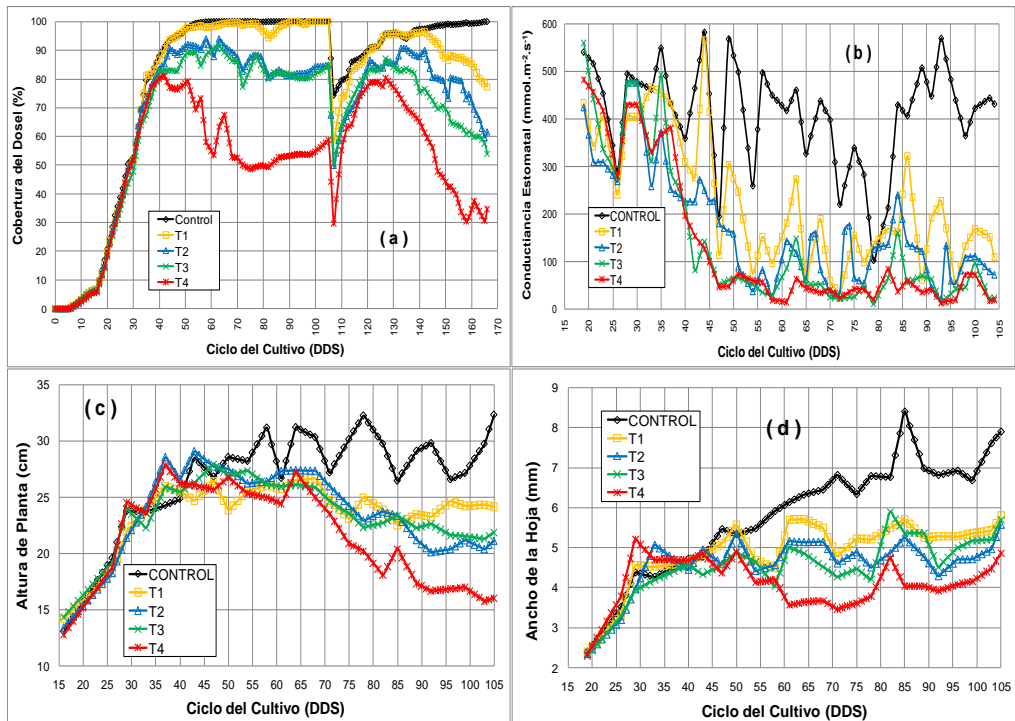


Figura 5.39 Tendencias del comportamiento de las variables respuesta (a) *CD*, (b) *GS*, (c) *AP* y (c) *AH* supervisadas para raigrás, durante su ciclo de crecimiento de siembra a primer corte y ciclo de primer corte bajo cuatro procesos de estrés hídrico.

La Figura 5.39 muestra los resultados de las variables respuesta (a) *CD*, (b) *GS*, (c) *AP* y (c) *AH* supervisadas para los dos cortes de raigrás, durante su ciclo de crecimiento.

La *CD* se vio afectada por los niveles de estrés hídrico a partir de los 41 DDS con un nivel de agotamiento de 75% *AAT* para T4 alcanzando una máxima cobertura de tan solo el 80% comparada con el 100% para el control (T0). Los tratamientos T2 y T3 alcanzaron 90% de *CD* observándose seriamente afectados por el estrés hídrico a los 66 *DDS* con 70 a 90% *AAT*. Para el segundo corte los niveles inician con importantes diferencias debido a la influencia de los tratamientos de estrés previos.

La *AP* presentó desarrollos crecientes para todos los tratamientos en mayor o menor medida hasta los 65 *DSS* en el cual los tratamientos T1 a T4 decrecen con niveles de agotamiento que variaron desde 60 a 96% *AAT*. El *AH* se

desarrolló en forma creciente para el control a lo largo del ciclo de crecimiento, sin embargo para los tratamientos su crecimiento fue menor y en el caso de T4 fue decreciente a partir de los 50 DDS con 95% AAT. Para la GS, se observaron diferencias entre tratamientos a partir de 40 DDS, desde cuando los tratamientos se separaron del control por cierre de estomas en el raigrás.

5.8.3 Interpretación del Coeficiente de estrés hídrico

El modelo AquaCrop simula el proceso de estrés hídrico de las especies herbáceas por medio del coeficiente de estrés hídrico, que es una forma práctica de afectar directamente los procesos de desarrollo del cultivo, por esta razón, es importante interpretar las respuestas de los diferentes desarrollos del cultivo debidas al estrés hídrico.

Con cada valor de las variables fuente *CD*, *GS*, *AP* y el *AH* se obtuvo también el contenido de agua en el suelo con el objeto de relacionarlos entre sí, por medio del coeficiente de estrés hídrico *Ks* tanto para avena forrajera como para raigrás.

Para interpretar el coeficiente de estrés hídrico *Ks*, se tomó el nivel de desarrollo de las variables fuente obtenido por el control como el valor máximo logrado en condiciones sin estrés, el cual fue comparado proporcionalmente a los desarrollos alcanzados de los tratamientos con estrés hídrico.

Además se relacionó el control y los tratamientos de las variables respuestas, con los diferentes procesos de estrés hídrico generados, esto permitió observar los umbrales superiores de los parámetros fuente pero no mostró el momento en el cual algunos de estos parámetros detienen su crecimiento. Para determinar esto, fue necesario tener en cuenta los resultados de los procesos de desarrollo en campo de estas variables (numeral 5.8.2) como son: *CD*, *AP* y *AH*.

Las funciones *Ks* ecuación [2.50] (funciones del coeficiente de estrés hídrico del modelo AquaCrop) se ajustaron de acuerdo a las respuestas experimentales de los parámetros fuente, por medio del mejor ajuste del factor de forma con el error cuadrático medio de los coeficientes de estrés hídrico de los parámetros fuente observados por medio de la ecuación [3.8] explicado en el numeral 3.7.4.7.

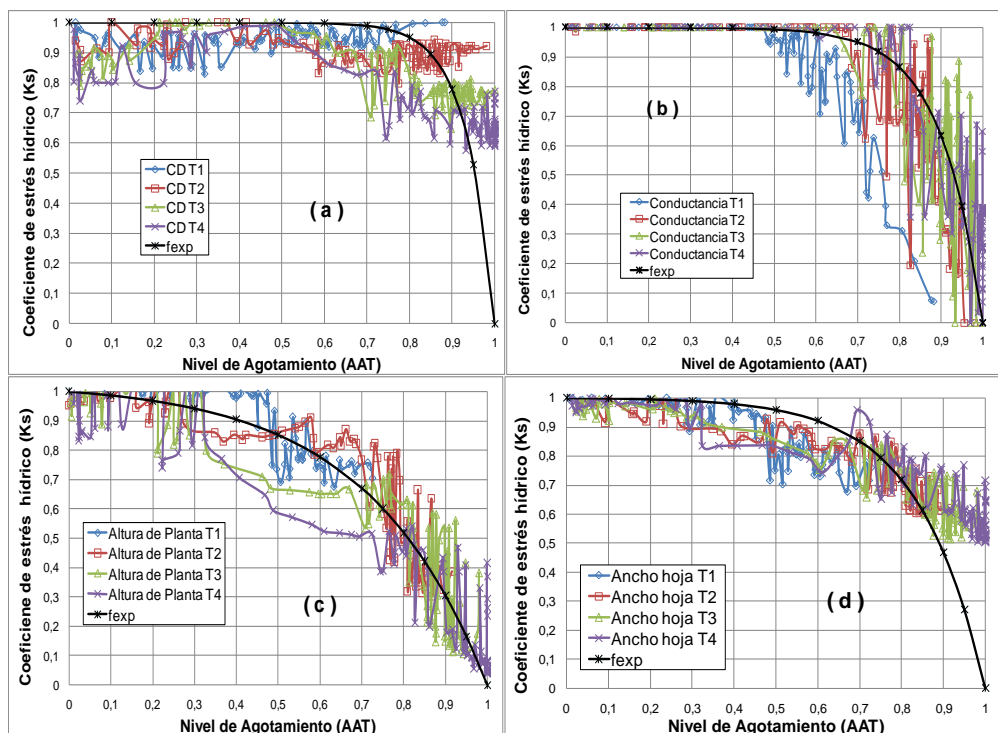


Figura 5.40 Variación del coeficiente de estrés hídrico en avena forrajera para CD (a), GS (b), AP (c), y AH (d) para varios niveles de agotamiento de agua en el suelo.

Las Figuras 5.40 y 5.41 muestran los ajustes alcanzados para los coeficientes de estrés hídrico K_s , para avena forrajera y raigrás respectivamente para (a) CD, (b) GS, (c) AP, y (d) AH, para los niveles de agotamiento de agua en el suelo (AAT) de los cuatro procesos de estrés hídrico generados en los tratamientos.

Para avena forrajera (Figura 5.40) la CD no presenta restricciones importantes hasta un agotamiento de 0,7 para los tratamientos de mayor estrés, sus coeficientes de estrés hídrico K_s disminuyen hasta valores de 0,6 para los niveles de agotamiento de agua cercanos a PMP. Para la GS los valores de los resultados encontrados se distribuyen en forma convexa (hacia afuera) en una zona de dispersión que inicia en 0,5 AAT para un coeficiente de estrés cercano a 1 y se despliega hasta un valor superior a 0,9 AAT cercano al PMP con un coeficiente de estrés hídrico de cero. La ecuación [2.50] de mejor ajuste de acuerdo a AquaCrop, (Raes et al., 2009) alcanzó un factor de forma f_{exp} de 7,5.

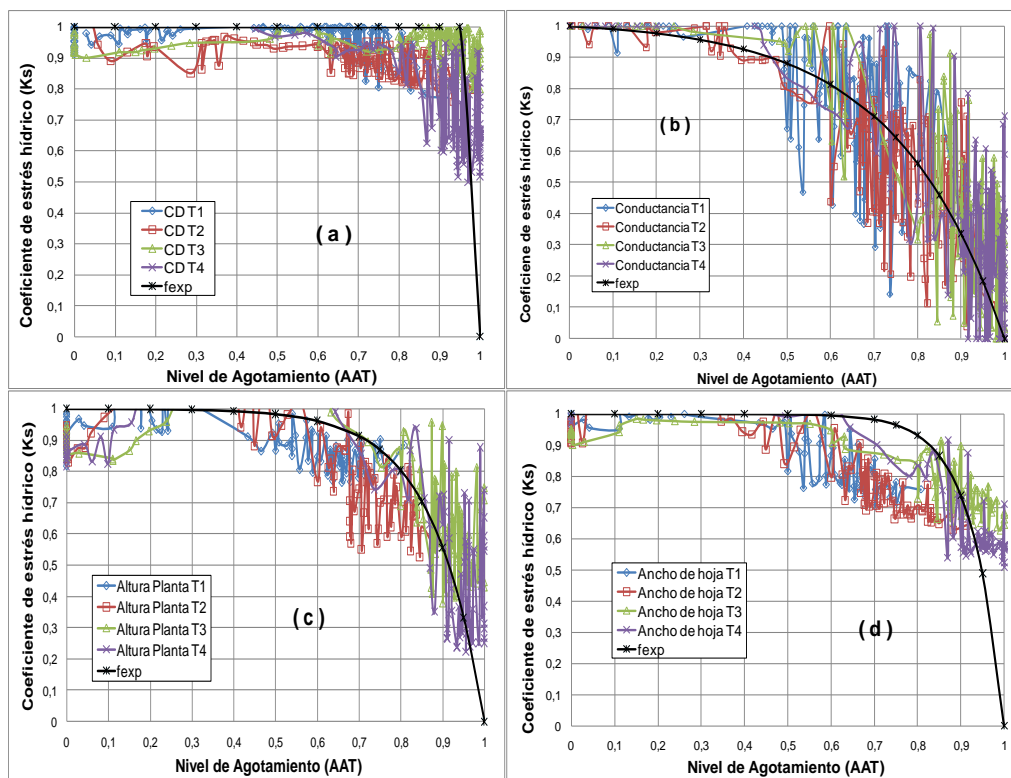


Figura 5.41 Variación del coeficiente de estrés hídrico para raigrás en respuesta a *CD* (a), *GS* (b), *AP* (c), y *AH* (d) para varios niveles de agotamiento de agua en el suelo.

La relación entre *AAT* y *Ks* expresado a partir del parámetro fuente *AP* de avena forrajera mostró alta sensibilidad al estrés hídrico, porque la curva de *Ks* inicia su disminución en niveles bajos (0,2 *AAT*). El factor de forma de *Ks* ajustó en 3,4, la dispersión de los datos oscila entre 0,3 y 0,4 unidades de *Ks*. El coeficiente *Ks* describe adecuadamente los resultados encontrados del estrés hídrico obtenidos para la *AP*. Ver Figura 5.41c.

El efecto del *AH* sobre el *Ks* por el *AAT* de avena forrajera, inicia disminuyendo *Ks* desde 1,0 con 0,3 de *AAT* hasta 0,5 para *PMP*. La curva de la ecuación [2.50] solo describe adecuadamente los valores de *Ks* hasta 0,8 del *AAT*, con un factor de forma de 6,3. El *AH* crece a medida que se desarrolla el cultivo, pero si el agua es limitada en un punto cualquiera del ciclo del cultivo, el *AH* no tiende a reducirse drásticamente, incluso para niveles de agotamiento cercanos al *PMP*.

Para la *CD* de raigrás (Figura 5.41a) *Ks* es cercano a uno, hasta un nivel alto de estrés hídrico (0,95 *AAT*), esto indica que no existe efecto aparente del estrés en la reducción de la *CD* sino sólo hasta muy altos niveles de estrés hídrico. El umbral superior fue de 0,95, pero no disminuye en forma

apreciable para altos valores de *AAT*, y no alcanza valores inferiores a 0,5 en niveles cercanos a *PMP*, este comportamiento experimental del *Ks* para la *CD* hizo que el factor de forma ajustara en un valor alto de 194.

La *GS* genera un *Ks* que muestra un umbral superior temprano, que disminuye mayormente a partir de 0,5 del *AAT*. Los valores de *Ks* presentan alta dispersión con oscilaciones que varían hasta el 80%, el mejor ajuste de la curva presentó un factor de forma de 4,2.

El efecto del estrés hídrico sobre la *AP* generó un *Ks* con un umbral de 0,55 aprox. y se reduce hasta 0,2 para niveles de agotamiento superiores a 0,9. El factor de forma ajustó en 8,1. La variación del *AH* por los niveles de estrés hídricos generados en función del *AAT* muestran un *Ks* que presenta un umbral superior de 0,5 del *AAT* y que disminuye hasta 0,55 para niveles de *AAT* cercanos a *PMP*. La curva de estrés hídrico, sólo describe adecuadamente los resultados hasta un agotamiento de 0,9 aprox. Con un factor de forma de 13,4. Las Tablas 6.5 y 6.6 muestran en forma resumida los resultados de este análisis de estrés hídrico tanto para avena forrajera como para raigrás respectivamente.

5.8.4 Ajuste de los coeficientes de estrés hídrico para AquaCrop

En primer lugar, con base en los resultados experimentales de estrés hídrico se extrajeron los valores respectivos conformando las Tablas 5.44 y 5.45, para la conductancia estomática se tomaron los valores tal y como resultaron del análisis de cierre de estomas obtenido en campo. Sin embargo, el modelo AquaCrop no considera los valores de “p-infer” por debajo de 1, por lo que se tomaron como “1”.

Para los valores de la expansión del dosel por estrés hídrico, debido a que se observaron tres tipos de respuestas experimentales, a saber: cobertura del dosel, altura de planta, y ancho de la hoja, se tomó el promedio de estos tres.

Para los parámetros de “expansión del dosel”, debido a que para el caso de avena forrajera el valor de “p-infer” resultó ser “1” y el modelo considera valores de 0,8 como máximos, dependiendo del valor de “p-super” (que fue de 0,4). Por esta razón no fue posible que el modelo asumiera el valor de 1, pues al tiempo de ejecución el modelo tiende a cambiar este valor de “1” por “0,8”, por lo cual se decidió dejarlo en 0,8 a pesar de que experimentalmente los valores en todos los casos señalaron la magnitud de 1. Algo parecido ocurrió con el caso de raigrás.

Tabla 5.44 Resultados del análisis de estrés hídrico para avena forrajera.

Parámetro Fuente	p- Super	p-Infer	f-forma
Conductancia Estomatal	0,65	0,9	7,5
Cobertura del dosel	0,8	1,0	24,7
Altura de planta	0,2	1,0	3,4
Ancho de la hoja	0,3	1,0	6,3
Promedio Expansión Dosel	0,4	1,0	11,5

Tabla 5.45 Resultados del análisis de estrés hídrico para raigrás.

Parámetro Fuente	p- Super	p-Infer	f-forma
Conductancia Estomatal	0,5	0,95	4,2
Cobertura del dosel	0,85	1,0	194
Altura de planta	0,55	0,95	8,1
Ancho de la hoja	0,6	1,0	13,4
Promedio Expansión Dosel	0,67	0,98	10,75

El resultado de este proceso arrojó que las interrelaciones de los tres umbrales no siempre se activan en el orden esperado: de expansión del dosel, cierre estomatal y senescencia temprana, sino que el umbral de la senescencia temprana podría interponerse al cierre de estomas, como se observa en las Figuras 6.2 y 6.4.

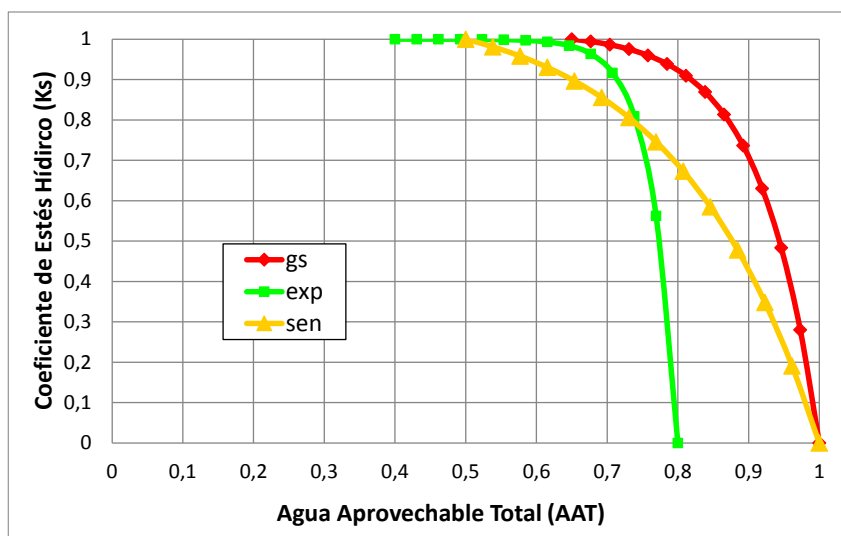


Figura 5.42 Comportamiento de la interrelación de los tres indicadores de estrés hídrico de acuerdo a lo encontrado experimentalmente y a los ajustes alcanzados para AquaCrop.

Para observar qué tan posible puede ser en la realidad este fenómeno se presenta la Figura 5.42, en la cual se superponen el comportamiento de los

tres efectos para el caso de avena forrajera. En él se presenta las formas y umbrales tal y como quedaron definitivamente para la avena forrajera. Observe cómo los umbrales superiores quedaron en el orden: 1) expansión del dosel, 2) senescencia del dosel, y 3) cierre estomatal, sin embargo a medida que avanza el nivel de estrés disminuyendo el agua aprovechable total, el efecto predominante cambia el orden pasando de senescencia del dosel a expansión del dosel.

El efecto final quedará idéntico a lo explicado con base en la Figura 2.14, es decir que las líneas conservarían el orden de intervención en el estrés de 1) expansión del dosel, 2) senescencia del dosel y 3) cierre estomatal. El tramo de curva de la senescencia temprana del dosel que intercepta a la curva de expansión del dosel, lo que hace es suavizar ésta en su factor de forma en ese tramo. Por otro lado, no se debe olvidar que lo que el modelo intenta hacer con estos coeficientes es tratar de simular en forma aproximada lo que en realidad ocurre físicamente y que en conjunto lo resumen los tres efectos.

6. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA AVENA FORRAJERA Y RAIGRAS

6.1 Análisis de sensibilidad de variables

Las Tablas 6.1 a 6.3 muestran un resumen de una fracción de los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad de las variables analizadas. Se consideraron como valores base los calibrados y validados finalmente y a partir de ellos se generaron los máximos y mínimos para cada variable según el caso. De esta forma se obtuvo la variabilidad de los niveles de biomasa mostrados. En las tablas referidas se presentan las diferencias de biomasa obtenidas en comparación con los valores calibrados, para cada variable analizada.

Para el caso de las variables de estrés hídrico, con el objeto de que se evidenciaron los extremos máximos y mínimos alcanzados por cada una de ellas, se “apagaron” en el modelo las demás variables de estrés complementarias a las estudiadas, por ejemplo: al estudiar las variables de expansión del dosel se apagaron las variables de cierre estomatal, y senescencia del dosel y en algunos casos de declinación del cultivo (f_{edad}). De esta manera se puede saber exactamente el rango máximo de variación de la biomasa con base en la variable estudiada y los límites de biomasa que es capaz de afectar.

El análisis de sensibilidad mostró que en general las variables más importantes a la hora de modificar la biomasa son las consignadas en el cuadro de la izquierda del diagrama, (Figura 4.2) o variables conservadoras de primer nivel. Para el caso de avena forrajera, sobresalen también las variables de construcción de la raíz, y la densidad de siembra. La variable de senescencia del dosel resulta también importante en los procesos de activación de la declinación del cultivo por falta de agua.

Respecto de las variables para avena forrajera se observa una alta sensibilidad para el caso de la profundidad inicial de la raíz Z_0 pues en tan sólo una diferencia en profundidad de 7 cm, se presenta una diferencia de producción de biomasa de 8 a 21929 kg.ha⁻¹. Esto se debió a que la muestra

Tabla 6.1 Análisis de sensibilidad para las variables de entrada al modelo AquaCrop - Caso avena forrajera. (Muestra sobre base de variables calibradas).

Nombre Variable	Notación	Unidad	Tipo	Valores	Variación de parámetros			Biomasa (kg.ha ⁻¹)			Diferencias con valores calibrados			Porcentaje
				Calibrados	Mínimo	Máximo	Rango	Mínimo	Máximo	Rango	Mínimo	Máximo	Rango	%
Productividad Hídrica	WP	gm ²	Conservador	20	15,6	21,4	5,8	14874	20348	5474	-4200	1274	5474	28,70
Coefficiente máximo del Cultivo	Kcx	Adm	Conservador	1,17	0,94	1,18	0,24	15310	19211	3901	-3764	137	3901	20,45
Cobertura de una semilla al 90% de emergencia	Cs	cm ²	Conservador	1	0,98	3,23	2,25	18979	22972	3993	-95	3898	3993	20,93
Coefficiente de crecimiento del dosel	CCD	fracción	Conservador	0,09374	0,0097	0,09374	0,08404	1473	19074	17601	-17601	0	17601	92,28
Cobertura máxima del dosel	CDx	fracción	Manejo	0,9755	0,9	0,9999	0,0999	18378	19169	791	-696	95	791	4,15
Profundidad mínima de raíces	Z0	m	Manejo	0,11	0,074	0,14	0,066	8	21929	21921	-19066	2855	21921	114,93
Profundidad máxima de raíces	Zx	m	Manejo	0,46	0,4	0,86	0,46	16	22065	22049	-19058	2991	22049	115,60
Factor de forma de la raíz	n	Adm	Conservador	1,5	1,4	1,6	0,2	20	20916	20896	-19054	1842	20896	109,55
Coefficiente de declinación del dosel	CDD	fracción	Conservador	0,05678	0,0061	0,05678	0,0507	20444	19074	-1370	1370	0	-1370	-7,18
Umbral superior para expansión del dosel	Psuper	fracción	Conservador	0,4	0	1	1	1423	5281	3858	-3858	0	3858	73,05
Umbral inferior para expansión del dosel	Pinfer	fracción	Conservador	0,8	0	1	1	3882	5281	1399	-1399	0	1399	26,49
Factor de forma para expansión del dosel	fexp	Adm	Conservador	11,5	0	24,7	24,7	6471	6230	-241	1190	949	-241	-4,56
Umbral para cierre estomatal	Psto	fracción	Conservador	0,65	0,4	0,85	0,45	7212	7407	195	1931	2126	195	3,69
Factor de forma para cierre estomatal	fsto	Adm	Conservador	7,5	0	10	10	7371	7373	2	2090	2092	2	0,04
Umbral para senescencia del dosel	Psen	fracción	Conservador	0,5	0,2	0,98	0,78	5	21933	21928	-19069	2859	21928	114,96
Factor de forma para senescencia del dosel	fsen	Adm	Conservador	2,5	2	4	2	17171	20233	3062	-1903	1159	3062	16,05
Coefficiente de declinación del cultivo	fedad	fracción	Conservador	0,13	0,1	0,3	0,2	19128	18738	-390	54	-336	-390	-2,04
Efecto de cobertura del dosel muerto	Erelx	%	Conservador	67	0	77	77	19074	19074	0	0	0	0	0,00
Tiempo a emergencia	T0	días	Manejo	15	7	15	8	22894	19074	-3820	3820	0	-3820	-20,03
Tiempo a máxima profundidad radical	Tz	días	Cultivar	129	129	134	5	19074	17509	-1565	0	-1565	-1565	-8,20
Tiempo a senescencia	Ts	días	Cultivar	133	123	137	14	19074	19074	0	0	0	0	0,00
Tiempo a madurez	Tm	días	Cultivar	134	124	138	14	16845	19938	3093	-2229	864	3093	16,22
Tiempo a floración	Tf	días	Cultivar	119	112	126	14	19068	19076	8	-6	2	8	0,04
Longitud de floración	Lf	días	Conservador	6	6	7	1	19074	19075	1	0	1	1	0,01
Temperatura crítica	Tc	°C	Conservador	5,5	3	11,1	8,1	19074	17054	-2020	0	-2020	-2020	-10,59
Densidad de siembra	Ds	p/ha	Manejo	2640000	990000	4290000	3300000	9	21014	21005	-19065	1940	21005	110,12
		kg.ha ⁻¹		80	30	130	100							

Tabla 6.2 Análisis de sensibilidad para las variables de entrada al modelo AquaCrop - Caso raigrás primer corte. (Muestra sobre base de variables calibradas).

Nombre Variable	Notación	Unidad	Tipo	Valores	Variación de parámetros			Biomasa (kg.ha ⁻¹)			Diferencia con los valores calibrados			Porcentaje
				Calibrados	Mínimo	Máximo	Rango	Mínimo	Máximo	Rango	Mínimo	Máximo	Rango	%
Productividad Hídrica	WP	gm ²	Conservador	15	10,6	18,9	8,3	5711	10183	4472	-2370	2102	4472	55,34
Coefficiente máximo del Cultivo	Kcx	Adm	Conservador	1	0,85	1,17	0,32	6798	9371	2573	-1283	1290	2573	31,84
Cobertura de una semilla al 90% de emergencia	Cs	cm ²	Conservador	0,76	0,5	0,93	0,43	7202	8437	1235	-879	356	1235	15,28
Coefficiente de crecimiento del dosel	CCD	fracción	Conservador	0,10858	0,0078	0,10858	0,10078	1665	8081	6416	-6416	0	6416	79,40
Cobertura máxima del dosel	CDx	fracción	Manejo	0,9738	0,9	0,9995	0,0995	7827	8140	313	-254	59	313	3,87
Profundidad mínima de raíces	Z0	m	Manejo	0,06	0,02	0,07	0,05	7547	8176	629	-534	95	629	7,78
Profundidad máxima de raíces	Zx	m	Manejo	0,4	0,26	0,4	0,14	165	8081	7916	-7916	0	7916	97,96
Factor de forma de la raíz	n	Adm	Conservador	1	0,9	11	10,1	7765	7958	193	-316	-123	193	2,39
Coefficiente de declinación del dosel	CDD	fracción	Conservador	0,01434	0,0024	0,0223	0,019849	8531	7472	-1059	450	-609	-1059	-13,10
Umbral superior para expansión del dosel	Psuper	fracción	Conservador	0,25	0,25	0,85	0,6	9427	11198	1771	-1771	0	1771	15,82
Umbral inferior para expansión del dosel	Pinfer	fracción	Conservador	0,98	0,95	1	0,05	5995	10226	4231	-5203	-972	4231	37,78
Factor de forma para expansión del dosel	fexp	Adm	Conservador	10,8	8,1	16	7,9	10174	11198	1024	-1024	0	1024	9,14
Umbral para cierre estomatal	Psto	fracción	Conservador	0,5	0,2	0,85	0,65	8691	11198	2507	-2507	0	2507	22,39
Factor de forma para cierre estomatal	fsto	Adm	Conservador	4,2	4,1	4,5	0,4	10558	10558	0	-640	-640	0	0,00
Umbral para senescencia del dosel	Psen	fracción	Conservador	0,3	0,2	0,98	0,78	6339	11123	4784	-1742	3042	4784	59,20
Factor de forma para senescencia del dosel	fsen	Adm	Conservador	2,5	2	4	2	7846	8421	575	-235	340	575	7,12
Coefficiente de declinación del cultivo	fedad	fracción	Conservador	0,24	0,1	0,3	0,2	8288	7993	-295	207	-88	-295	-3,65
Efecto de cobertura del dosel muerto	Erelx	%	Conservador	50	0	60	60	8081	8081	0	0	0	0	0,00
Tiempo a emergencia	T0	días	Manejo	9	1	9	8	9684	8081	-1603	1603	0	-1603	-19,84
Tiempo a máxima profundidad radical	Tz	días	Cultivar	67	60	67	7	8775	8081	-694	694	0	-694	-8,59
Tiempo a senescencia	Ts	días	Cultivar	98	89	98	9	8059	8081	22	-22	0	22	0,27
Tiempo a madurez	Tm	días	Cultivar	105	94	105	11	6748	8081	1333	-1333	0	1333	16,50
Tiempo a floración	Tf	días	Cultivar	87	79	87	8	8015	8081	66	-66	0	66	0,82
Longitud de floración	Lf	días	Conservador	8	4	8	4	8075	8081	6	-6	0	6	0,07
Temperatura crítica	Tc	°C	Conservador	11,1	3	12	9	8666	8081	-585	585	0	-585	-7,24
Densidad de siembra	Ds	p.ha ⁻¹	Manejo	11600000	4640000	18560000	13920000	43	8736	8693	-8038	655	8693	107,57
		kg.ha ⁻¹		50	20	80	60							

Tabla 6.3 Análisis de sensibilidad para las variables de entrada al modelo AquaCrop - Caso raigrás cortes posteriores. (Muestra sobre base de variables calibradas).

Nombre Variable	Notación	Unidad	Tipo	Valores	Variación de parámetros			Biomasa (kg. ha ⁻¹)			Diferencia con los valores calibrados			Porcentaje
				Calibrados	Mínimo	Máximo	Rango	Mínimo	Máximo	Rango	Mínimo	Máximo	Rango	%
Productividad Hídrica	WP	gm2	Conservador	15	10,6	18,9	8,3	4564	8138	3574	-1895	1679	3574	55,33
Coefficiente máximo del Cultivo	Kcx	Adm	Conservador	1	0,85	1,17	0,32	5423	7696	2273	-1036	1237	2273	35,19
Cobertura de una semilla al 90% de emergencia	Cs	cm2	Conservador	3,67	3,13	4,71	1,58	6345	6597	252	-114	138	252	3,90
Coefficiente de crecimiento del dosel	CCD	fracción	Conservador	0,10858	0,0078	0,10858	0,10078	3917	6459	2542	-2542	0	2542	39,36
Cobertura máxima del dosel	CDx	fracción	Manejo	0,9738	0,9	0,9995	0,0995	6194	6518	324	-265	59	324	5,02
Profundidad mínima de raíces	Z0	m	Manejo	0,4	0,26	0,4	0,14	6459	6459	0	0	0	0	0,00
Profundidad máxima de raíces	Zx	m	Manejo	0,4	0,26	0,4	0,14	6381	6459	78	-78	0	78	1,21
Factor de forma de la raíz	n	Adm	Conservador	1	0,9	11	10,1	6459	6459	0	0	0	0	0,00
Coefficiente de declinación del dosel	CDD	fracción	Conservador	0,01434	0,00243	0,022279	0,019849	4512	4471	-41	-705	-746	-41	-0,63
Umbral superior para expansión del dosel	Psuper	fracción	Conservador	0,25	0	1	1	5216	5217	1	-1	0	1	0,02
Umbral inferior para expansión del dosel	Pinfer	fracción	Conservador	0,98	0	1	1	5067	5216	149	-150	-1	149	2,86
Factor de forma para expansión del dosel	fexp	Adm	Conservador	10,8	0	16	16	5189	5217	28	-28	0	28	0,54
Umbral para cierre estomatal	Psto	fracción	Conservador	0,5	0	1	1	3611	5217	1606	-1606	0	1606	30,78
Factor de forma para cierre estomatal	fsto	Adm	Conservador	4,2	0	6	6	4594	4594	0	-623	-623	0	0,00
Umbral para senescencia del dosel	Psen	fracción	Conservador	0,3	0,2	0,98	0,78	3324	5217	1893	-1893	0	1893	36,29
Factor de forma para senescencia del dosel	fsen	Adm	Conservador	2,5	2	4	2	5100	5112	12	-117	-105	12	0,23
Coefficiente de declinación del cultivo	fedad	fracción	Conservador	0,24	0,1	0,3	0,2	6472	6453	-19	13	-6	-19	-0,29
Efecto de cobertura del dosel muerto	Erelx	%	Conservador	50	0	60	60	6459	6459	0	0	0	0	0,00
Tiempo a emergencia	T0	días	Manejo	4	1	9	8	6953	5713	-1240	494	-746	-1240	-19,20
Tiempo a máxima profundidad radical	Tz	días	Cultivar	4	60	67	7	6459	6462	3	0	3	3	0,05
Tiempo a senescencia	Ts	días	Cultivar	51	89	98	9	6459	6459	0	0	0	0	0,00
Tiempo a madurez	Tm	días	Cultivar	52	94	105	11	6459	7438	979	0	979	979	15,16
Tiempo a floración	Tf	días	Cultivar	41	79	87	8	6459	6470	11	0	11	11	0,17
Longitud de floración	Lf	días	Conservador	6	4	8	4	6459	6462	3	0	3	3	0,05
Temperatura crítica	Tc	°C	Conservador	11,1	3	12	9	6713	6459	-254	254	0	-254	-3,93
Densidad de siembra	Ds	p.ha-1	Manejo	11600000	4640000	18560000	13920000	5709	6728	1019	-750	269	1019	15,78
		kg.ha-1			20	80	60							

de variables se sensibilidad se realizaron con base en los reportes de precipitación real para el periodo del cultivo 1 de avena forrajera, el cual tuvo niveles bajos de precipitación al inicio del cultivo, esto impide que el cultivo germine adecuadamente por el bajo nivel de agua aprovechable del suelo durante los primeros días en los cuales la profundidad de la raíz por muy pequeña; cerca 7 cm; no alcanza a producir suficiente biomasa, por lo cual se activa la senescencia temprana del dosel. Al hacer una simulación bajo un criterio de alta humedad del suelo al inicio del cultivo (Nivel de agotamiento del 10%), con la misma profundidad inicial, se observa que la biomasa producida fue de 21134 kg.ha⁻¹.

En general las variables fenológicas no tienen mucha sensibilidad a la respuesta de la biomasa, a excepción del tiempo a emergencia, y el tiempo a madurez porque ambos determinan el tiempo de desarrollo del cultivo.

Como era de esperarse las variables de estrés hídrico generan alta sensibilidad del modelo a los procesos de estrés hídrico, pero en su conjunto pueden enmascarse unas a otras.

La última columna de estas tres tablas muestran los porcentajes de variación que cada variable genera de acuerdo a su sensibilidad al desarrollo de la biomasa.

6.2 Calibración del modelo para cultivos forrajeros

De acuerdo a la metodología prevista en el capítulo 4, se desarrolló el procedimiento de calibración tanto para avena forrajera como para raigrás, a continuación se presentan los resultados obtenidos en esta etapa, para ambos cultivos.

6.2.1 Caso Avena Forrajera

Para avena forrajera se usó el cultivo 1, para la calibración, pues fue el que resultó más apto para este proceso de acuerdo a los indicadores estadísticos establecidos. La Figura 6.1 presenta los reportes que generó AquaCrop de los ajustes alcanzados por este cultivo considerando los resultados de campo obtenidos. En el cuadro **(a)**, se observa la línea de la biomasa simulada por AquaCrop y los puntos de observación de biomasa obtenidos en campo experimentalmente con sus respectivas desviaciones estándar.

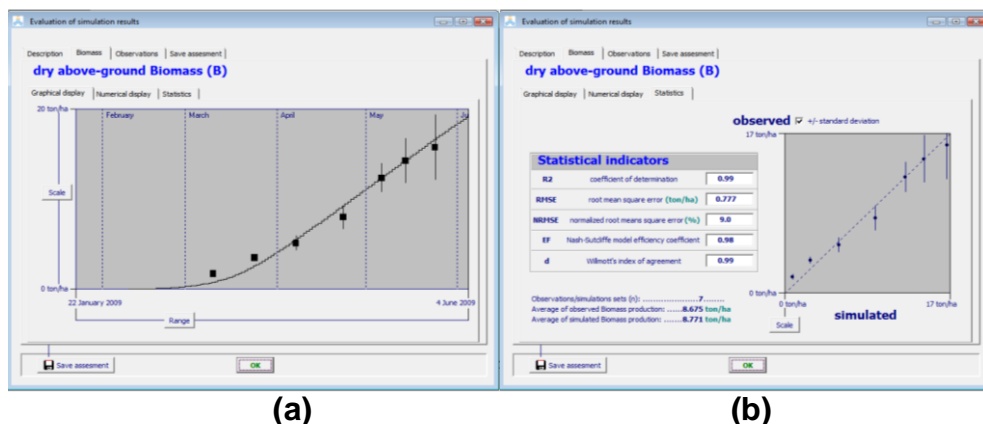


Figura 6.1 Evaluación gráfica y cuantitativa del ajuste logrado de la calibración del modelo AquaCrop para el caso de avena forrajera.

La simulación describe adecuadamente todos los valores de biomasa observados especialmente los de la cosecha final. Los parámetros y variables usados (tanto conservadores como no conservadores) para esta calibración del modelo AquaCrop se presentan en la Tabla 6.4 y constituyen los valores de calibración finales de avena forrajera propuestos aquí para el modelo AquaCrop.

Las condiciones del clima, fueron las reales ocurridas durante la etapa experimental y discutidas en la sección 5.3, las características del suelo también se presentaron en forma detallada en la sección 5.2.2, las condiciones de manejo principalmente de la química de suelos y la fertilidad se aplicaron en la sección 5.2.1.

Para las condiciones iniciales de la simulación se consideró el suelo a capacidad de campo y las fechas de inicio y finalización de los ciclos de los cultivos son los relacionados en la Tabla 5.1. Además se tuvieron en cuenta los valores reales de lámina de agua aplicados durante los experimentos realizados.

El modelo AquaCrop maneja también un archivo del contenido de las concentraciones de CO₂, históricas monitoreadas en el laboratorio Mauna Loa de Hawaii, el cual fue usado para el establecimiento de esta variable durante los procesos de calibración.

Tabla 6.4 Valores ajustados para el cultivo de avena forrajera resultados del proceso de ajuste del modelo AquaCrop.

No 1. Fenología del cultivo				
Símbolo	Descripción	Tipo ^{(1),(2),(3),(4)}	Valores Indicativos / rangos	Forma de Obtención
1.1 Umbrales de temperaturas del aire				
1 T _{base}	Temperatura Base (°C)	Conservativo ⁽¹⁾	5°C	Fuente: FAO, Ecocrop 2007
2 T _{corte}	Temperatura Superior (°C)	Conservativo ⁽¹⁾	30°C	Fuente: FAO, Ecocrop 2007
3 T _{stress}	Temperatura de estrés (°C)	Conservativo ⁽¹⁾	5,5 °C	Estimado
1.2 Desarrollo de la cobertura del dosel verde				
4 C _s	Cobertura de la superficie del suelo por una individual semilla al 90% de emergencia (cm ² .planta ⁻¹)	Conservativo ⁽²⁾	1,00 cm ² .semilla ⁻¹	Medido, Media del nivel 1 - 1 desviación Estándar
5 D _s	Número de plantas por hectárea	Manejo ⁽³⁾	2.640.000 planta.ha ⁻¹	Estimado
6 t ₀	Tiempo de siembra a emergencia (crecimiento en días grado)	Manejo ⁽³⁾	13 días (106, (70 a 123 día.°C ⁻¹))	Medido
7 CCD	Coefficiente de crecimiento del dosel (fracción por crecimiento en días grado)	Conservativo ⁽¹⁾	9,374 %·día⁻¹	Medido, calculado
8 CD _x	Máxima cobertura del dosel (%)	Manejo ⁽³⁾	97,55%	Medido
9 t _s	Tiempo de siembra a inicio de senescencia (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾	132 días (1158, (1154 a 1164 día.°C ⁻¹))	Medido
10 CDD	Coefficiente de declinación del dosel (fracción por crecimiento en días grado)	Conservativo ⁽¹⁾	5,678 %·día⁻¹	Medido, calculado
11 t _m	Tiempo de siembra a madurez, p.ej. longitud del ciclo del cultivo (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾	133 días (1166, (1162 a 1173 día.°C ⁻¹))	Medido
1.3 Floración				
12 t _f	Tiempo de siembra a floración (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾	120 días (1052, (1047 a 1057 día.°C ⁻¹))	Medido
13 L _f	Longitud del estado de floración (crecimiento en días grado)	Conservativo ⁽¹⁾	6 días (56, (53 a 58 día.°C ⁻¹))	Medido
14 D	Cultivo determinado	Conservativo ⁽¹⁾	SI	Estimado
1.4 Desarrollo de la zona de raíces				
15 Z ₀	Profundidad de raíz mínima efectiva (m)	Manejo ⁽³⁾	0,11 m	Medido, calculado
16 Z _x	Profundidad de raíz máxima efectiva (m)	Manejo ⁽³⁾	0,46 m	Medido
17 n	Factor de forma describiendo la zona de expansión de la raíz	Conservativo ⁽¹⁾	1,5	Medido, calculado
18 t _z	Tiempo desde siembra a la máxima profundidad de raíces (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾ Ambiental ⁽³⁾	128 días (1126, (1123 a 1128 día.°C ⁻¹))	Medido
2. Transpiración del Cultivo				
19 Kcb _x	Coefficiente del cultivo cuando el dosel es completo pero previo a la senescencia	Conservativo ⁽¹⁾	1,17	Medido, calculado
20 f _{edad}	Factor de declinación del cultivo (%/día) como un resultado de la senescencia, deficiencia de nitrógeno , etc.	Conservativo ⁽¹⁾	0,13 %·día ⁻¹	Medido, calculado
21 Erel _x	Efecto de cobertura del dosel sobre la reducción de evaporación del suelo en el estado de estación tardía	Conservativo ⁽¹⁾	67%	Medido, calculado
3. Producción de biomasa y formación de cosecha				
3.1 Productividad del cultivo por el agua				
22 WP*	Productividad hídrica normalizada para ET ₀ y CO ₂ (gramos/m ²)	Conservativo ⁽¹⁾	20 g·m ⁻²	Medido, calculado
23 WP* _c	Productividad hídrica normalizada para ET ₀ y CO ₂ durante la formación de la cosecha (como porcentaje de WP* antes de formación de la cosecha)	Conservativo ⁽¹⁾	100%	Estimado
4 Estrés				
4.1 Estrés hídrico en el suelo				
24 P _{exp,lower}	Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral superior	Conservativo ⁽¹⁾	0,80	Estimado
25 P _{exp,upper}	Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral inferior	Conservativo ⁽¹⁾	0,40	Medido, calculado
26 f _{shape}	Coefficiente de factor de forma para estrés hídrico para la expansión del dosel	Conservativo ⁽¹⁾	11,5	Medido, calculado
27 P _{slo}	Umbral de agotamiento de agua en el suelo para control estomatal - Umbral superior	Conservativo ⁽¹⁾	0,65	Medido, calculado
28 f _{slo}	Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico para control estomatal	Conservativo ⁽¹⁾	7,50	Medido, calculado
29 P _{sen}	Umbral de agotamiento de agua en el suelo para senescencia del dosel - Umbral superior	Conservativo ⁽¹⁾	0,5	Estimado
30 f _{sen}	Coefficiente de Factor de forma para estrés hídrico para senescencia del dosel	Conservativo ⁽¹⁾	2,5	Estimado
31 ΣET _{Destrés}	Suma (ET ₀) durante el período de estrés para ser excedido antes de que la senescencia sea activada	Conservativo ⁽¹⁾ Cultivar ⁽⁴⁾	0,00	Estimado, la senescencia se dispara de inmediato se presenta el estrés hídrico
32 Ks _{soil}	Punto anaeróbico en %Vol (con referencia a saturación)	Ambiental ⁽³⁾	-12 %Vol	Medido, calculado

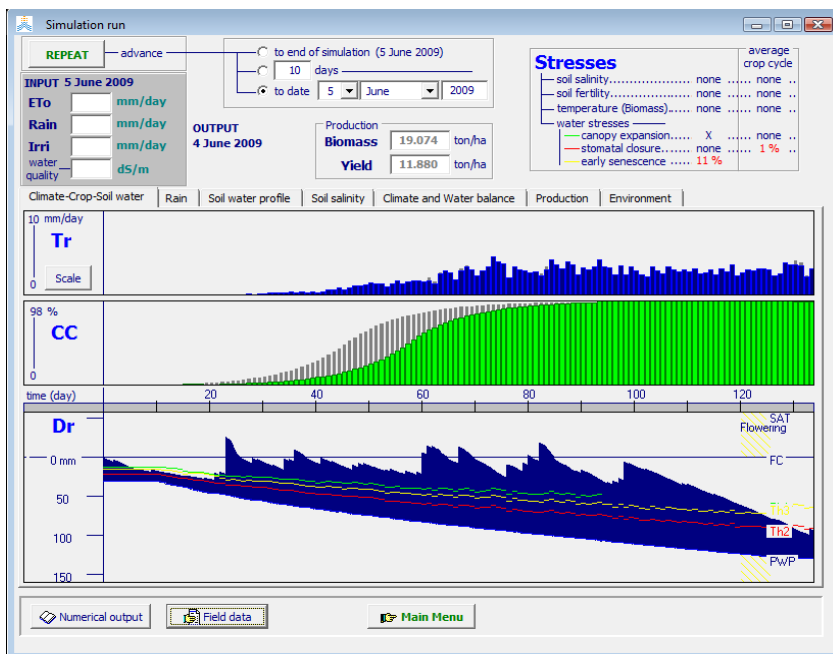


Figura 6.2 Salida gráfica y cuantitativa del modelo AquaCrop obtenida en las condiciones de calibración del modelo para avena forrajera.

La Figura 6.1 (b), presenta el diagrama de los valores observados (eje y) contra los simulados (eje x) en el cual se identifica que tres de los valores caen sobre la recta (1:1) y los demás valores están muy cerca de ella, dos por debajo y dos por encima, los indicadores estadísticos muestran en forma cuantitativa, el nivel de acercamiento logrado.

Respecto a los indicadores estadísticos, en primer lugar se encuentran los coeficientes de determinación y el índice de agregación de Willmott con un ajuste casi perfecto de 0,99, el coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe se acerca a su ajuste también casi perfecto con un valor de 0,98, además la raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado, se determinó con un valor de sólo el 0,9% entrando dentro de una valoración de excelente, por último la raíz cuadrada del error cuadrático medio con un valor de 0,777 t.ha⁻¹ mostrando un buen ajuste promedio.

El despliegue que presenta AquaCrop muestra también los promedios observados y estimados de la producción de biomasa, en 8,675 y 8,771 t.ha⁻¹ respectivamente, con siete observaciones.

En la Figura 6.2 se muestra la salida del modelo AquaCrop, para el ejercicio de calibración de la avena forrajera. El modelo despliega tres paneles de figuras en las cuales se presenta: la transpiración (Tr, parte superior), el

desarrollo del dosel (CC, parte intermedia), y el perfil del suelo con el desarrollo de la raíz (Dr, parte inferior).

Existe plena correspondencia entre los tres diagramas, la influencia del bajo nivel hídrico al comienzo del ciclo en el perfil del suelo hizo que el nivel del desarrollo del dosel no fuera completo durante los primeros 60 días del ciclo del cultivo (CC, la sombra gris presenta el nivel potencial de desarrollo del dosel).

Es importante resaltar que las líneas umbral para expansión foliar (verde), cierre estomático (roja) y senescencia temprana del dosel (amarilla) se disponen de acuerdo a lo establecido en el experimento de estrés hídrico explicado anteriormente. Tanto para el caso de avena forrajera como para raigrás.

La elección de estos coeficientes de estrés, tanto en sus umbrales como en sus factores de forma fueron determinados de acuerdo a los análisis realizados en el numeral 5.8.4.

Como los valores respectivos de senescencia temprana del dosel no fueron analizados experimentalmente se decidió dejar los valores que el modelo asume por defecto tanto para avena forrajera como para raigrás y con base en estos iniciar el proceso de calibración usándolos como variables a ajustar, y llegando a las variables presentadas en las Tablas 6.4 y 6.5.

6.2.2 Caso Raigrás

Debido a que el modelo AquaCrop aún no ha sido abierto para cultivos forrajeros, y como raigrás además es un cultivo perenne, fue necesario manejarlo como cultivo de producción de granos, considerando su condición de gramínea. Cada corte fue simulado independientemente considerando sus condiciones iniciales y finales de acuerdo a al manejo real en el campo.

Para la primera etapa desde siembra a primer corte se tomó en cuenta la cobertura de la superficie del suelo de una semilla individual al 90% de emergencia, observada en campo y la producción final en el momento del corte, de tal manera que los desarrollos posteriores que pudiera generar el modelo, no se tuvieron en cuenta.

Para los cortes posteriores al primero con el objeto de simular la cobertura remanente en la superficie del terreno, a partir de las observaciones de campo en porcentaje de cobertura del dosel se calculó el equivalente a la cobertura de una semilla individual al momento de emergencia y se tomó este valor como cobertura inicial.

A partir de los registros de campo se estableció que después del corte, el cultivo se resiente disminuyendo aún más su cobertura durante unos pocos días hasta el momento en que nuevamente inicia a expandir el desarrollo del dosel. Este breve periodo de tiempo fue simulado como un tiempo a emergencia y depende de qué tan alto o bajo haya sido el corte realizado.

Para raigrás se utilizó el cultivo 1 corte 2, para la calibración, el cual fue el que alcanzó mejores indicadores estadísticos. La Figura 6.4 muestra los resultados de AquaCrop de los ajustes alcanzados en la simulación del cultivo, en la cual se presenta la línea de simulación de biomasa generada por el modelo y los puntos de observación de biomasa obtenidos en campo con sus respectivas desviaciones estándar. Se observa que los valores de biomasa mayores caen en la línea (1:1) mientras que los menores quedan a lado y lado de esta, en esta figura se resaltan también los indicadores estadísticos establecidos por AquaCrop.

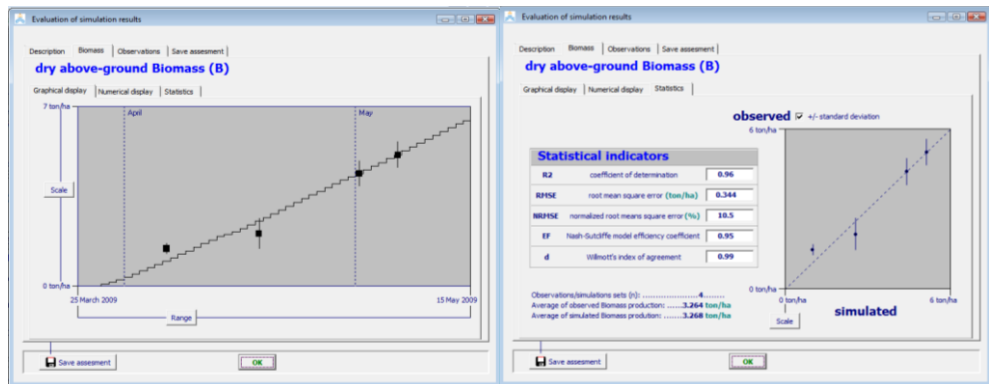


Figura 6.3 Evaluación gráfica y cuantitativa del ajuste logrado de la calibración del modelo AquaCrop para el caso de raigrás.

Aquí también se observa una buena simulación de los resultados de biomasa para raigrás, en este caso dos de los puntos observados caen sobre la línea de simulación y los otros dos uno a cada lado de ella, los puntos que caen sobre la línea son al tiempo de la cosecha, o cuando se acostumbra a hacer incursión del ganado en el lote.

El ajuste logrado se estableció con base en la determinación de las variables que se presentan en la Tabla 6.5, en donde se establecen las variables conservadoras y no conservadoras del cultivo.

Tabla 6.5 Valores ajustados para el cultivo de raigrás resultados del proceso de ajuste del modelo AquaCrop.

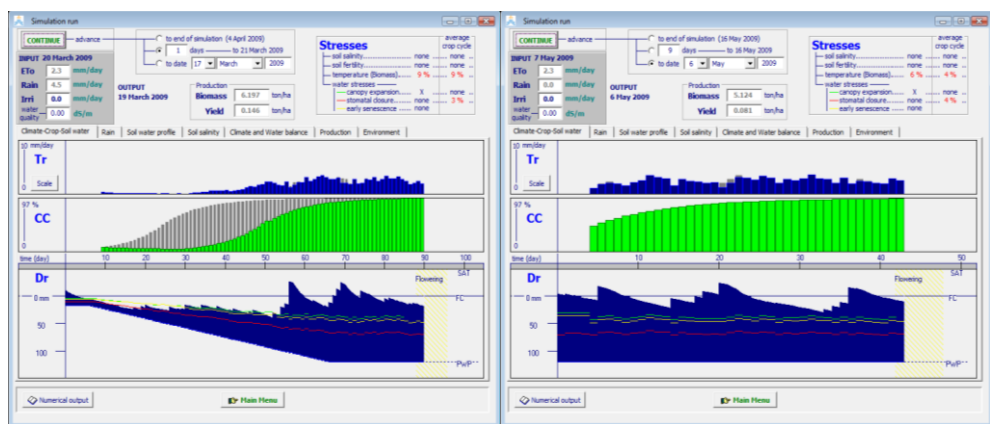
No 1. Fenología del cultivo				
Simbolo	Descripción	Tipo ^{(1),(2),(3),(4)}	Valores Indicativos / rangos	Forma de Obtención
1.1 Umbrales de temperaturas del aire				
1 T _{base}	Temperatura Base (°C)	Conservativo ⁽¹⁾	4°C	Fuente: FAO, Ecocrop 2007
2 T _{corte}	Temperatura Superior (°C)	Conservativo ⁽¹⁾	35°C	Fuente: FAO, Ecocrop 2007
3 T _{stres}	Temperatura de estrés (°C)	Conservativo ⁽¹⁾	11,1 °C	Por defecto (estimado)
1.2 Desarrollo de la cobertura del dosel verde				
	Cobertura de la superficie del suelo por una individual semilla al 90% de emergencia (cm ² .planta ⁻¹)		Primer Corte: 0,76 cm ² .semilla ⁻¹ Cortes Posteriores: 3,67 cm ² .planta ⁻¹	Medido, La media + 1 desviación estándar, Cerca del 40% de CD remanente después del corte.
4 Cs		Conservativo ⁽²⁾		
5 Ds	Número de plantas por hectárea	Manejo ⁽³⁾	11.600.000 planta.ha ⁻¹	Estimado
	Tiempo de siembra a emergencia (crecimiento en días grado)		Primer Corte: 9 días (88, (84 a 91 día.°C ⁻¹)) Cortes Posteriores: Recuperación después del corte 6 días (65, (25 a 87 día.°C ⁻¹))	
6 t ₀		Manejo ⁽³⁾		Medido
7 CCD	Coefficiente de crecimiento del dosel (fracción por crecimiento en días grado)	Conservativo ⁽¹⁾	10,858 %·día ⁻¹	Medido, calculado
8 CDx	Máxima cobertura del dosel (%)	Manejo ⁽³⁾	97,38%	Medido
	Tiempo de siembra a inicio de senescencia (crecimiento en días grado)		Primer corte: 94 días (908, (904 a 912 día.°C ⁻¹)) Cortes Posteriores: 54 días (524, (520 a 531 día.°C ⁻¹))	
9 t _s		Cultivar ⁽⁴⁾		Medido
10 CDD	Coefficiente de declinación del dosel (fracción por crecimiento en días grado)	Conservativo ⁽¹⁾	1,434 %·día⁻¹	Medido, calculado
	Tiempo de siembra a madurez, p.ej. longitud del ciclo del cultivo (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾	Primer corte: 100 días (972, (970 a 974 días.°C ⁻¹)) Cortes posteriores: 55 días (533, (530 a 540 días.°C ⁻¹))	Medido
11 t _m				
1.3 Floración				
	Tiempo de siembra a floración (crecimiento en días grado)		Primer corte: 83 días (799, (795 a 803 días.°C ⁻¹)) Cortes posteriores: 44 días (422, (418 a 426 días.°C ⁻¹))	Medido
12 t _f		Cultivar ⁽⁴⁾		
	Longitud del estado de floración (crecimiento en días grado)		Primer corte: 7 días (71, (62 a 79 día.°C ⁻¹)) Cortes Posteriores: 7 días (72, (64 a 82 día.°C ⁻¹))	Medido
13 Lf		Conservativo ⁽¹⁾		
14 D	Cultivo determinado	Conservativo ⁽¹⁾	NO	
1.4 Desarrollo de la zona de raíces				
15 Z ₀	Profundidad de raíz mínima efectiva (m)	Manejo ⁽³⁾	0,06 m	Medido, calculado
16 Zx	Profundidad de raíz máxima efectiva (m)	Manejo ⁽³⁾	0,40 m	
	Factor de forma describiendo la zona de expansión de la raíz			
17 n		Conservativo ⁽¹⁾	1,00	Medido, calculado
	Tiempo desde siembra a la máxima profundidad de raíces (crecimiento en días grado)	Cultivar ⁽⁴⁾		
18 t _z		Ambiental ⁽³⁾	64 días (603, (599 a 606 días.°C ⁻¹))	Medido
2. Transpiración del Cultivo				
19 Kcb _x	Coefficiente del cultivo cuando el dosel es completo pero previo a la senescencia	Conservativo ⁽¹⁾	1,00	Medido, calculado
	Factor de declinación del cultivo (%/día) como un resultado de la senescencia, deficiencia de nitrógeno, etc.			
20 f _{edad}		Conservativo ⁽¹⁾	0,24 %·día ⁻¹	Medido, calculado
21 Erel _x	Efecto de cobertura del dosel sobre la reducción de evaporación del suelo en el estado de estación tardía	Conservativo ⁽¹⁾	50%	Medido, calculado
3. Producción de biomasa y formación de cosecha				
3.1 Productividad del cultivo por el agua				
22 WP*	Productividad hídrica normalizada para ET ₀ y CO ₂ (gramos/r	Conservativo ⁽¹⁾	15 g.m⁻²	Medido, calculado
	Productividad hídrica normalizada para ET ₀ y CO ₂ durante la formación de la cosecha (como porcentaje de WP* antes de formación de la cosecha)			
23 WP _c		Conservativo ⁽¹⁾	100%	Estimado
4 Estrés				
4.1 Estrés de agua en el suelo				
24 P _{exp,lower}	Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral superior	Conservativo ⁽¹⁾	0,98	Medido, calculado
25 P _{exp,upper}	Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral inferior	Conservativo ⁽¹⁾	0,25	Medido, calculado
26 f _{shape}	Coefficiente de factor de forma para estrés hídrico para la expansión del dosel	Conservativo ⁽¹⁾	10,8	Medido, calculado
27 P _{sto}	Umbral de agotamiento de agua en el suelo para control estomatal - Umbral superior	Conservativo ⁽¹⁾	0,5	Medido, calculado
28 f _{sto}	Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico para control estomatal	Conservativo ⁽¹⁾	4,2	Medido, calculado
29 P _{sen}	Umbral de agotamiento de agua en el suelo para senescencia del dosel - Umbral superior	Conservativo ⁽¹⁾	0,3	Estimado
30 f _{sen}	Coefficiente de Factor de forma para estrés hídrico para senescencia del dosel	Conservativo ⁽¹⁾	2,5	Estimado
31 ΣET _{oestrés}	Suma (ET ₀) durante el periodo de estrés para ser excedido antes de que la senescencia sea activada	Conservativo ⁽¹⁾	0,00	dispara inmediatamente se presenta el estrés hídrico.
		Cultivar ⁽⁴⁾		
32 Ks _{aer}	Punto anaeróbico en %Vol (con referencia a saturación)	Ambiental ⁽³⁾	-12 %Vol	Medido, calculado

Las condiciones del clima, fueron las reales ocurridas durante la etapa experimental y discutidas en la sección 5.3, las características del suelo también se presentaron en forma detallada en la sección 5.2.2, las condiciones de manejo principalmente de la química de suelos y la fertilidad se explicaron en la sección 5.2.1.

Para las condiciones iniciales de la simulación se consideró el suelo a capacidad de campo y las fechas de inicio y finalización de los ciclos de los cultivos fueron los relacionados en la Tabla 3.3.

Además se tuvieron en cuenta los valores reales de lámina de agua aplicados durante los experimentos realizados. Estos valores de calibración constituyen la propuesta que se hace aquí para las simulaciones de la producción de raigrás con el modelo AquaCrop.

Con respecto a los indicadores estadísticos, en primer lugar se establece el índice de agregación de Willmott con un ajuste casi perfecto midiendo el grado de acercamiento del modelo a los datos observados con un valor de 0,99. El coeficiente de determinación r^2 alcanza un valor de 0,96 mostrando también un buen ajuste, mientras que el coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe alcanzó un valor de 0,95 estableciendo también un ajuste muy bueno cercano al ajuste perfecto de 1. La raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizada alcanzó un porcentaje muy cercano a 10% en el límite superior establecido para ajustes excelentes por este índice. Y por último la raíz cuadrada del error cuadrático medio se estableció con un valor de 0,344 t.ha⁻¹ mostrando que el nivel del error promedio en las unidades manejadas es también bajo.



(a)

(b)

Figura 6.4 Salida gráfica y cuantitativa del modelo AquaCrop obtenida en las condiciones de calibración del modelo para el período de siembra a primer corte y segundo corte, para raigrás.

El promedio de la producción de biomasa simulada fue calculado por el modelo en 3.268 t.ha^{-1} , mientras que la observada fue muy similar con 3.264 t.ha^{-1} , con las cuatro observaciones de aforos realizadas experimentalmente.

En la Figura 6.4 se presenta la salida del modelo AquaCrop, para la calibración de raigrás, comparando la etapa de siembra a primer corte y el corte siguiente.

En la Figura 6.4(a), se establece la etapa desde la siembra a primer corte. El hecho de que las líneas de estrés del umbral de expansión del dosel (verde), cierre estomático (roja) y senescencia temprana del dosel (amarilla) estuvieran por encima del nivel de agua rápidamente aprovechable al inicio del ciclo, fue la causa de que el cultivo no alcanzara su potencial de expansión del dosel oportunamente, sino en forma tardía en este periodo. Por esta razón, se observa que el desarrollo potencial de raigrás (sombra gris) es muy superior al alcanzado por el dosel (verde).

En la Figura 6.4(b) se observa que el nivel inicial del dosel verde es más alto, simulando el nivel del corte establecido en el campo, en este caso cercano al 40% remanente de cobertura del dosel que queda en el campo después del corte. Por otro lado, en ambas figuras el dosel cae drásticamente al final, en el momento del corte, en adelante no se considera su desarrollo. El proceso de simulación se llevó de esta forma individualmente para cada corte, hasta cubrir todos los cortes realizados experimentalmente.

6.2.3 Comparaciones

La Tabla 6.6 muestra los resultados de los indicadores estadísticos establecidos para ambos cultivos, los cuales miden el grado de acercamiento entre las estimaciones del modelo con los valores observados de los ajustes alcanzados.

En general se observa que ambos cultivos obtuvieron buenos indicadores estadísticos cuantitativos. Sobresale el caso de avena forrajera con valores un poco superiores a raigrás. Sin embargo, para el caso del indicador de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), la magnitud de las diferencias entre las estimaciones y las observaciones para raigrás son inferiores que para avena forrajera. Esto se debió seguramente a que las magnitudes de valores para raigrás también son menores.

Tabla 6.6 Indicadores estadísticos alcanzados en la calibración de avena forrajera y raigrás.

Indicador	Cultivos Calibrados	
	Avena Cultivo 1	Raigras RC1C2
R2	0,99	0,96
RMSE(t.ha ⁻¹)	0,777	0,344
NRMSE(%)	9,0	10,5
EF	0,98	0,95
d	0,99	0,99

6.3 Validación

6.3.1 Caso avena forrajera

La validación se desarrolló de acuerdo a la metodología establecida en el numeral 4.4. Se tomó como base el cultivo seleccionado para la calibración, se usaron los mismos parámetros y variables conservadores y no conservadores, y se probaron las condiciones de cada uno de los cultivos establecidos experimentalmente, conservando sólo sus variables fenológicas.

Estas variables se establecieron con base en los grados días necesarios para alcanzar los estados fenológicos, los cuales fueron equivalentes en todos los casos.

Tabla 6.7 Indicadores estadísticos de ajuste del modelo AquaCrop alcanzados en la calibración y validación de avena forrajera.

Tipo Ajuste	Cultivo	R2	RMSE(t.ha ⁻¹)	NRMSE(%)	EF	d
Calibrado	Cultivo 1	0.99	0.777	9.0	0.98	0.99
	Cultivo 2	0.93	2.202	23.9	0.85	0.96
Validados	Cultivo 3	0.96	2.771	20.4	0.91	0.97
	Cultivo 4	0.99	0.613	8.7	0.98	0.99
Promedio		0.96	1.86	17.67	0.91	0.97

La Tabla 6.7 presenta los indicadores estadísticos de ajuste alcanzados por las simulaciones hechas con el modelo AquaCrop a la hora de validar la calibración realizada en cada uno de los cultivos experimentales, en general se determinó una excelente aproximación entre los valores simulados y observados para todos los cultivos.

Para los cultivos 2 y 3 la raíz cuadrada del error cuadrático medio que hace énfasis en las diferencias entre las estimaciones y las observaciones superan las 2 t.ha⁻¹, sin embargo, es importante resaltar que estos cultivos fueron los

que obtuvieron mayores producciones de biomasa alcanzando hasta casi 27 t.ha⁻¹ de materia seca para el caso del cultivo 3. El promedio de este indicador fue de 1,86 t.ha⁻¹ valor que indica un ajuste bueno, considerando que la validación se hizo sobre varios cultivos.

El indicador de la raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado (NRMSE) en el peor de los casos resultó con un valor de 23,9% lo que lo ubica como un ajuste aceptable, sin embargo, el promedio de todos los cultivos alcanzó sólo 17,67% lo que le da crédito de buena estimación del modelo en conjunto.

Para los indicadores R^2 , EF , y d , sus promedios se establecieron en valores iguales o superiores a 0,91 lo que los ubica en un rango para estos estadísticos que indican un muy buen ajuste.

Lo anterior indica que en general la validación del modelo AquaCrop para avena forrajera, establecido con los parámetros conservadores y no conservadores utilizados presenta muy buenas posibilidades de estimación de los valores observados en campo.

6.3.2 Caso Raigrás

Con base en el cultivo 1 corte 2 como calibrado, se validaron todos los demás cultivos y cortes considerando los mismos parámetros y variables tanto conservadores como no conservadores del cultivo.

Se probaron también las condiciones de cada corte y cultivo realizados en campo, se conservaron las variables fenológicas, considerando los valores con base en grados día para los estados fenológicos, se consideró el mismo valor de estos para todos los cultivos, lo cual hizo que el valor en días pudiera ser diferente según el caso.

Para el caso de los ciclos de siembra a primer corte contrastados con los cortes posteriores, sólo se cambió según el caso el valor de la cobertura del dosel inicial de acuerdo a los valores observados en campo de 0,76 cm², por un valor de 3,67 cm² para los cortes posteriores al primero de la cobertura inicial por planta, equivalente a una cobertura del dosel remanente de cerca del 40%.

En la Tabla 6.8 se presentan los indicadores estadísticos de ajuste alcanzados por las simulaciones del modelo AquaCrop sobre cada uno de los cultivos y cortes experimentales con los cuales se validó el conjunto de variables del cultivo de raigrás. En general se observó una excelente aproximación entre los valores observados y simulados para todos los cultivos y cortes.

Todos los indicadores estadísticos estuvieron muy homogéneos entre los diferentes cortes y cultivos. En el caso de raigrás se logró por ejemplo un ajuste perfecto para el corte 4 del cultivo 2, con indicadores inmejorables.

El caso que menor acercamiento hubo entre los valores de biomasa observados y simulados fue para el cultivo 1 corte 6, con valores de la raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado (NRMSE) de 22,7% con lo cual se ubica este indicador como aceptable para ese caso.

Mientras que para el caso del cultivo 2 corte 2 el indicador de la raíz cuadrada del error cuadrático medio se presenta como el de mayores diferencias en promedio de los valores observados con los simulados, con un valor de 0,8 t.ha⁻¹, sin embargo es un valor bastante aceptable, considerando que este es el escenario más crítico.

Tabla 6.8 Indicadores estadísticos de ajuste del modelo AquaCrop alcanzados en la calibración y validación de raigrás todos los cortes (Cn) y cultivos (RCn).

Tipo Ajuste	Cultivo y Corte	R2	RMSE(t.ha ⁻¹)	NRMSE(%)	EF	d	
Calibrado	RC1C2	0.96	0.344	10.5	0.95	0.99	
	RC1C1	0.99	0.318	7.5	0.96	0.99	
	RC1C3	0.97	0.428	14.2	0.92	0.98	
	RC1C4	0.97	0.459	13.6	0.95	0.99	
	RC1C5	0.99	0.389	10.4	0.96	0.99	
Validados	RC1C6	0.85	0.673	22.7	0.76	0.94	
	RC1C7	0.98	0.486	17.7	0.84	0.97	
	RC2C1	1.00	0.498	7.1	0.93	0.98	
	RC2C2	0.99	0.801	18.6	0.86	0.96	
	RC2C3	0.99	0.581	22.0	0.64	0.95	
	RC2C4	1.00	0.067	2.2	1.00	1.00	
	Promedios		0.97	0.459	13.3	0.89	0.98

Pero en general los indicadores para todos los cultivos y cortes presentan mejores niveles que los valores críticos mencionados. Por ejemplo, se obtuvo un índice de ajuste de Willmott (**d**) de 0,98 indicando un ajuste casi perfecto, seguido de un coeficiente de determinación promedio de 0,97 el cual también está muy cercano al ajuste ideal.

El coeficiente de eficiencia de Nash-Shtcliffe (**EF**) alcanzó un valor promedio de 0,88 el cuál, considerando el amplio rango de este coeficiente, es bastante bueno.

La raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado alcanzó un porcentaje promedio del 13,6% ubicándose como un buen ajuste. En cuanto a

la raíz cuadrada del error cuadrático medio, su valor promedio fue de 0,47 t.ha⁻¹ lo que indica una baja desviación y un ajuste aceptable.

6.4 Simulación de otras condiciones agroecológicas para evaluar la sensibilidad del cultivo al complejo Suelo – Agua - Clima

De acuerdo a la metodología prevista para el análisis de sensibilidad se obtuvieron resultados para diferentes láminas de riego, fertilización, texturas de suelos, y niveles freáticos. Aquí se presentan y discuten estos resultados obtenidos.

6.4.1 Comportamiento del modelo AquaCrop con la variación de diferentes láminas totales de riego aplicadas al cultivo

Se probaron varias formas de aplicación del riego, considerando variaciones del nivel de agotamiento del agua rápidamente aprovechable, láminas constantes y frecuencias variables a través del ciclo del cultivo con el fin de hacer diferentes aplicaciones totales de agua. Esto reportó variaciones considerables en la producción de biomasa de avena forrajera que llegaron a aumentar hasta el 64% para una lámina 391 mm, para láminas superiores a los mil mm las producciones fueron negativas comparadas con la producción de secano.

En la Figura 6.5 se presenta la graficación de la variación de la producción de biomasa en función de varias láminas totales de riego aplicadas a través del ciclo de avena forrajera, las comparaciones se hicieron con base en la producción de secano para una campaña típica promedio de producción del cultivo, en la cual se presentan cerca de 272 mm de lluvia.

La Figura 6.5, muestra que a partir de una lámina de 391 mm, se estaría aplicando irrigación que no contribuye al aumento de la producción de biomasa por lo cual se estaría perdiendo agua ya sea por escorrentía o por percolación profunda, lo cual contribuiría también a la disminución en la biomasa producida.

Para el caso de raigrás se hizo la diferenciación entre lo que ocurre para los periodos de siembra a primer corte y los cortes posteriores. Fue necesario considerar esta separación debido a que para el primer caso se considera el establecimiento del cultivo con un ciclo más largo comparado con los cortes posteriores, mientras que para estos se presenta una cobertura remanente después del corte que influye en el nivel de biomasa final.

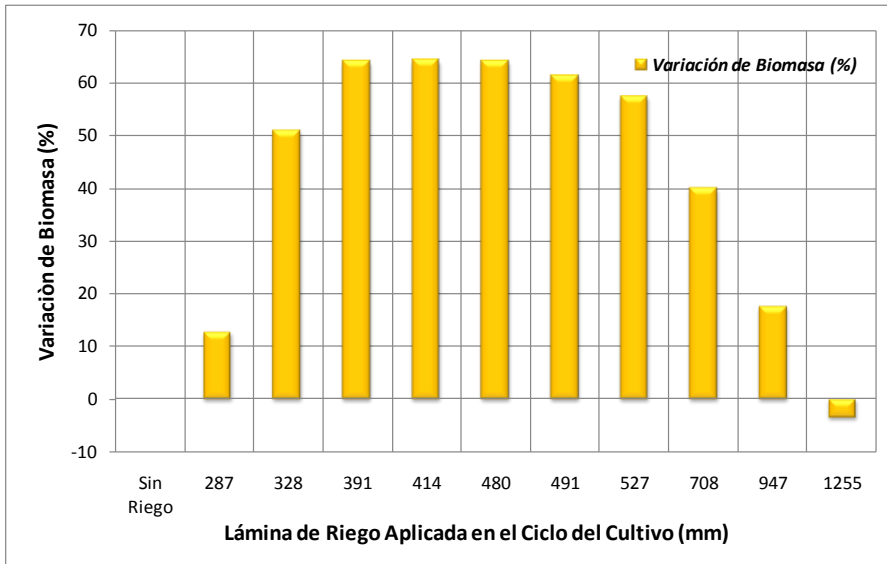


Figura 6.5 Variación de la producción de biomasa de avena forrajera para diferentes láminas de riego, estimadas por el modelo AquaCrop.

La Figura 6.6(a) muestra lo que ocurre con la variación de las láminas totales para el período de siembra a primer corte, en la cual se identifica un porcentaje de aumento de la variación de biomasa con la lámina de riego de hasta del 44% sobre la producción de secano, para una lámina neta de 326 mm. Por otro lado, para los cortes posteriores el aumento de la biomasa alcanzó un porcentaje de hasta 52% para una lámina neta de agua cerca de 255 mm Figura 6.6(b).

Para ambos casos la variación de biomasa tiende a disminuir después de estos valores máximos. Las comparaciones se hicieron con base en una campaña típica en la cual la lluvia promedio estuvo alrededor de 207 mm para el periodo de siembra al primer corte, mientras que para los cortes posteriores alcanzo un valor promedio de 118 mm.

Es importante recordar el comportamiento de las funciones de producción para ambos cultivos, en comparación con los resultados de estos análisis. Para el caso de avena forrajera, la función de producción alcanzó una lámina óptima de 384 mm, contra 391 mm simulados por AquaCrop (ver Figuras, 5.21 y 6.6). Para el caso de raigrás la función de producción mostró valores máximos para una lámina de 398 mm, (Figura 5.22) para el ciclo de siembra a primer corte, mientras que en las simulaciones de AquaCrop el máximo se presentó en 326 mm. Para los ciclos posteriores al primer corte la lámina máxima se ubicó en 258 mm considerando los valores observados, contra 255 mm para los valores estimados por AquaCrop (Figura 6.6), estas diferencias se pueden explicar por el hecho de que la función de producción es una línea recta y en realidad la mayoría de valores máximos observados

en campo se presentaron entre los 300 y 350 mm para la etapa de siembra a primer corte, (ver Figura 5.22).

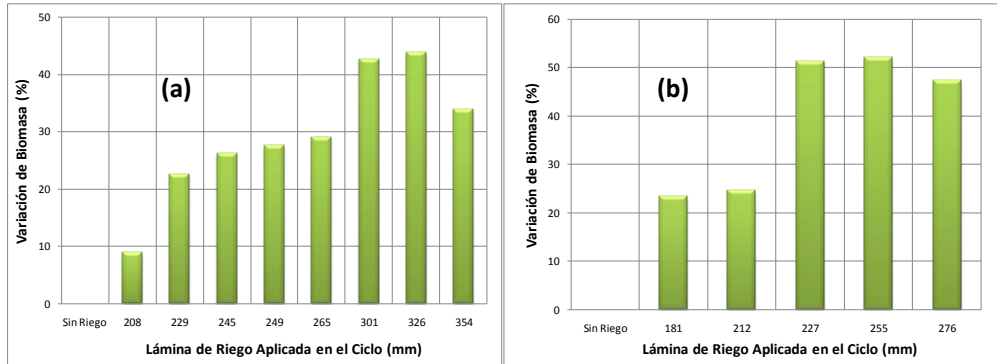


Figura 6.6 Variación de la producción de biomasa de raigrás para diferentes láminas de riego, estimadas por el modelo AquaCrop. (a) de siembra a primer corte, (b) cortes posteriores al primero.

6.4.2 Comportamientos del modelo AquaCrop considerando varios niveles de fertilización del suelo.

Aunque en general los cultivos forrajeros son poco fertilizados, al menos en el altiplano Cundiboyacense, el modelo AquaCrop tiene la posibilidad de establecer varios niveles de fertilidad que manejan rangos desde cercano al óptimo, hasta muy pobre fertilización. Con el fin de observar el efecto que sobre la producción de biomasa genera el manejo de fertilidad deficitaria del suelo se realizó este análisis de simulación para varios niveles de fertilización de los cultivos.

En la Figura 6.7 se presenta la variación en biomasa de avena forrajera obtenida en función de diferentes niveles de fertilización del suelo. Debido a que en la etapa de calibración se consideró una fertilización del 100% es decir fertilización óptima, los niveles considerados fueron variados desde el 90% hasta un 40%. Es importante recalcar que el modelo no realiza balance de nutrientes en forma exhaustiva, sino que maneja rangos de fertilidad que se pueden asimilar a porcentajes de la fertilización óptima. Estos rangos de fertilidad deben calibrarse con parcelas experimentales en las cuales se deberían relacionar los efectos de la producción con la fertilidad. (Raes, et al. 2009 B).

En la Figura 6.7, se observa que para cada uno de los cultivos experimentales de avena forrajera, se presenta una reducción en porcentaje de biomasa a medida que se disminuye el nivel de fertilización considerado. La reducción del nivel de fertilización al 40% alcanzó porcentajes de disminución de la biomasa hasta niveles del -56% para el cultivo 3. Una reducción de la

fertilización al nivel del 90% no afectó significativamente la reducción de la producción de biomasa, e incluso fue casi nula para el cultivo cuatro debido probablemente a que dicho cultivo fue establecido durante el periodo húmedo de “La Niña” del año 2010, y no presento restricciones apreciables de humedad en el suelo, lo cual contribuyó a que la baja disminución de la fertilización no afectara la producción.

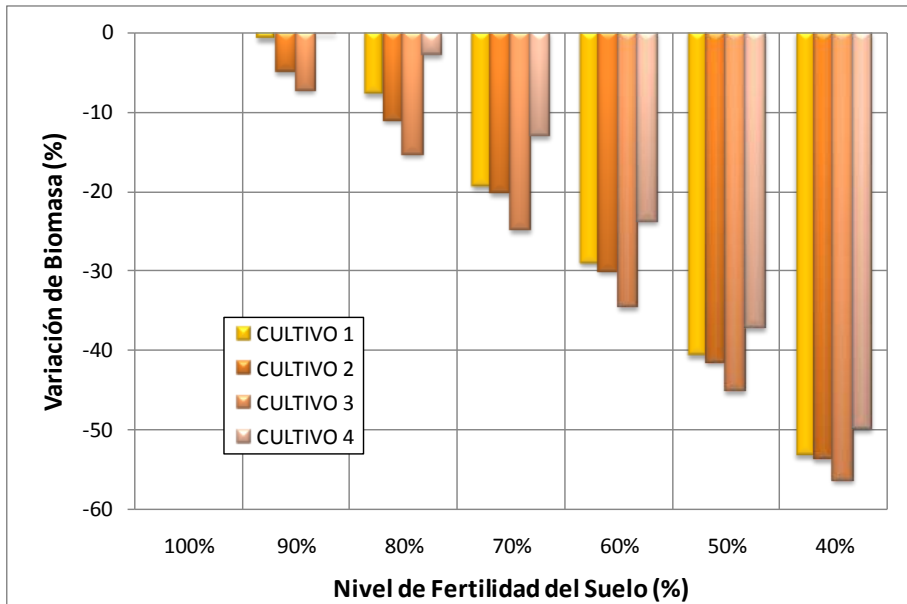


Figura 6.7 Reducción del rendimiento de la producción de biomasa de avena forrajera debido al déficit de fertilidad del suelo estimado por el modelo AquaCrop.

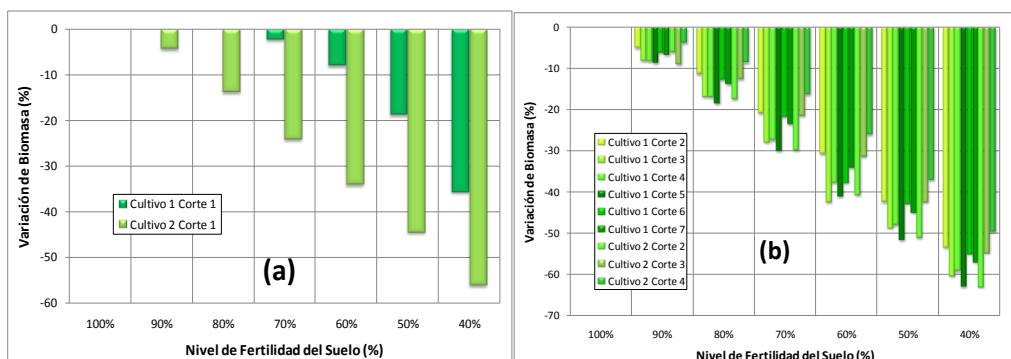


Figura 6.8 Reducción del rendimiento de la producción de biomasa de raigrás debido al déficit de fertilidad del suelo estimado por el modelo AquaCrop. (a) de siembra a primer corte, (b) cortes posteriores.

En la Figura 6.8 se presenta la variación en biomasa de raigrás obtenidas con base en varios niveles de fertilización del suelo, en la parte (a) se muestra el

periodo de siembra a primer corte en el cual se observa que en general el cultivo 2 fue más susceptible a la disminución de la fertilización alcanzando niveles de reducción de la biomasa de hasta el -56,2%.

El cultivo dos de raigrás se estableció durante los meses de febrero a mayo del 2010, y fue a partir de abril que se presentaron excesos por las altas precipitaciones de “La Niña” por lo cual el cultivo resultó afectado. Por esta razón se presentó esta tendencia a disminuir mayoritariamente su producción comparado con el cultivo uno. En contraposición el cultivo 1 no se ve disminuido incluso para niveles del 80% de fertilización y sólo alcanzó niveles máximos de reducción de biomasa de -35,7%.

Para el caso de los cortes posteriores al primero (Figura 6.8 (b)) se observa que en todos los casos existe disminución de la producción de biomasa, y en general las producciones de biomasa disminuyen hasta niveles cercanos a -60% para un nivel de fertilidad del 40%, si el nivel de fertilidad es cercano al óptimo del 90% su reducción en general no superará el -10% en la biomasa obtenida. La influencia de las condiciones climáticas externas hace que los diferentes cortes no tengan desarrollos de la biomasa idénticos.

6.4.3 Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes texturas del suelo.

Debido a que el modelo AquaCrop está orientado a la determinación de la producción de biomasa a partir del agua, es clave para éste el almacenamiento de agua en el perfil, el cual es determinado por la textura del suelo y las características hidrofísicas del mismo. Por esta razón se realizó el análisis de la influencia de diferentes texturas del suelo a la respuesta de la producción de biomasa. En la Tabla 6.9, se presentan las características hidrodinámicas de los suelos usados para estas simulaciones, dichas características están incluidas dentro de la base de datos de AquaCrop en el módulo de suelos, el suelo experimental para la avena forrajera, se constituyó como la textura de referencia.

En la Figura 6.9 se presentan los resultados de las simulaciones sobre las diferentes texturas, para el caso de avena forrajera, en dónde se observa que para las texturas franco arenosa y franca aumentan las producciones de biomasa comparadas con el suelo experimental, es evidente que estas texturas poseen muy buenas características hidrofísicas facilitando el almacenamiento de agua, la infiltración del suelo y por lo tanto permiten mayor absorción de agua por las raíces del cultivo.

La textura franco limosa prácticamente queda igual, lo cual es lógico dado que las características promedias del suelo experimental el cual ha sido caracterizado en la Tabla 5.5, son similares a las de un suelo franco limoso.

El diagrama muestra que para el caso del resto de texturas la producción disminuye, siendo crítica para el suelo franco limo arcilloso, con una disminución del porcentaje de biomasa hasta de -33,5%. Se probó también para suelo arcilloso arrojando una producción nula. La limitación de los suelos arcillosos se establece por la baja infiltración del suelo y la baja conductividad hidráulica saturada, la cual impide el movimiento del agua dentro del perfil del suelo.

Tabla 6.9 Texturas y características hidrofísicas de los suelos considerados para el análisis de sensibilidad en la producción de biomasa de cultivos forrajeros.

Horizontes	Denominación	Profundidad de la capa	Punto de Marchitez Permanente	Capacidad de Campo	Saturación del suelo	Agua Disponible Total	Conductividad Hidráulica Saturada	Tau	Curva Número	Agua Rápidamente Evaporable
Número	Unidades	m	%vol	%vol	%vol	mm.m ⁻¹	mm.día ⁻¹			mm
1	Arenoso	0,92	6	13	36	70	1500	1,0	65	4
1	Franco Arenoso	0,92	10	22	41	120	500	0,76	65	7
1	Franco	0,92	15	31	46	160	250	0,6	65	9
1	Franco Limoso	0,92	13	33	46	200	150	0,5	75	11
1	Franco Arcilloso	0,92	23	39	50	160	100	0,43	75	11
1	Franco Limo Arcilloso	0,92	23	44	52	210	20	0,25	80	13

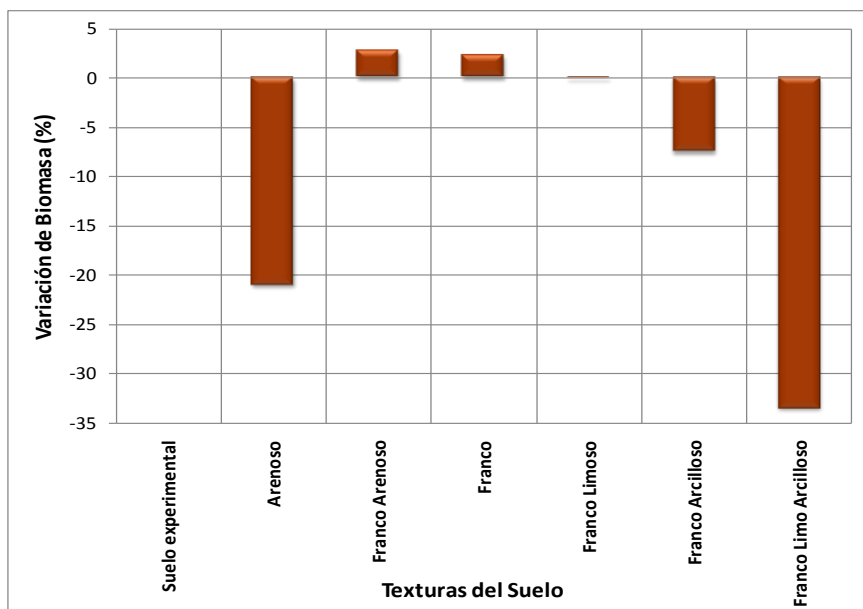


Figura 6.9 Variación de la producción de biomasa de avena forrajera estimada por el modelo AquaCrop en función de diferentes texturas del suelo.

Es de esperarse que un suelo con una fase alta de arenas posea baja capacidad de retención de humedad, lo cual hace que la cantidad de agua disponible para la planta sea también menor, lo que limita la transpiración de la planta por ausencia de humedad en el suelo, a pesar de que haya buena disponibilidad externa de ella. Para el suelo arenoso la disminución de la biomasa alcanzó el 21%, y los aumentos en biomasa para el suelo franco arenoso y franco fueron de 2,8 y 2,3% respectivamente.

La Figura 6.10, muestra los resultados de las simulaciones sobre varias texturas del suelo para la producción de biomasa de raigrás, tanto para el periodo de siembra a primer corte como para cortes posteriores al primero, comparadas con el suelo experimental, en este caso para los suelos franco arenoso, franco y franco limoso las producciones mejoran en porcentajes bajos mientras que para los suelos arenosos y pesados como los franco arcilloso y franco limo arcilloso se presentan disminuciones en la producción de biomasa que llegan hasta niveles del -44% en los periodos de siembra a primer corte y del -30% para los cortes posteriores al primero. El aumento en biomasa que se presenta para los suelos francos asciende a 3.5% para el periodo de cortes posteriores al primero, mientras que a tan solo el 1.2% para el periodo de siembra a primer corte.

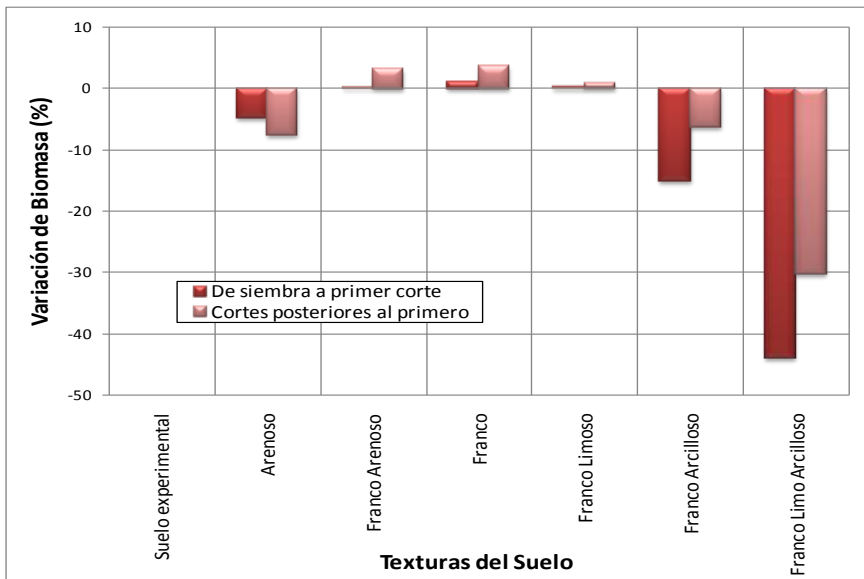


Figura 6.10 Variación de la producción de biomasa de raigrás estimada por el modelo AquaCrop en función de diferentes texturas del suelo.

6.4.4 Comportamiento del modelo AquaCrop considerando varios niveles freáticos del suelo.

Se establecieron niveles freáticos a varias profundidades del suelo, con el objeto de simular su influencia en la variación de la biomasa (Materia Seca) tanto para avena forrajera como para raigrás. Estas simulaciones dejaron ver la influencia de los efectos del ascenso capilar en el perfil del suelo, el cual se incorpora al balance hídrico afectando la producción del cultivo.

La Figura 6.11, muestra los resultados obtenidos para el caso de avena forrajera en el cual se verificaron las profundidades del *NF* de 4,1, 4, 3, 2, 1, 0,5, 0,3, 0,2, 0,1, 0,05, y 0 m, sin embargo las barras 0,05, y 0,2 m no se presentan por ser muy similares a sus vecinas.

Las profundidades mayores a 4,1 m no afectaron la producción de biomasa por lo que fueron equivalentes a ausencia total del *NF*, sólo a partir de esta profundidad se comienza a aumentar la producción con base en el aporte capilar que para 4 m aumentó el mayor porcentaje con el 16,1% y fue positivo hasta los dos metros de profundidad del nivel freático con 13,2% de aumento.

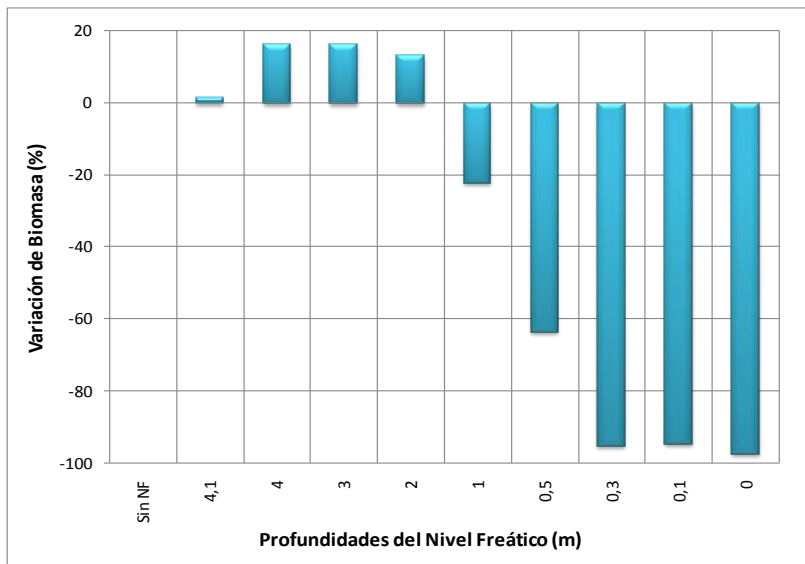


Figura 6.11 Variación del rendimiento de la producción de biomasa de avena forrajera debido a la influencia del nivel freático del suelo, estimado por el modelo AquaCrop.

Para saber desde qué profundidad inicia la afectación del *NF* en los diferentes cultivos se hizo una simulación cada 10 cm, por lo cual se observó que para el caso de avena forrajera y el suelo considerado, esta influencia del *NF* se inició a los 4,1 m con un leve aumento de la producción de biomasa, el aumento del nivel del agua a 4 m presentó un aumento cercano al 15% de la

biomasa, porque la conductividad del suelo permite un nivel de aporte adecuado de agua suplementaria al cultivo a esta profundidad.

A partir de 1 m de profundidad los efectos del aporte capilar del nivel freático producen niveles de biomasa negativos con -22,3%, y sigue en disminución hasta 0,3 m alcanzando -95,3% de reducción de la biomasa, estos niveles de encharcamiento hacen que las condiciones anaerobias del terreno afecten gravemente la producción de biomasa, provocando que el modelo genere disminución de la expansión del dosel, cierre de estomas, senescencia temprana y por lo tanto disminución en la transpiración y el desarrollo de la planta en general.

La profundidad de raíces de la avena en los suelos experimentales aumentó hasta los 0,86 m, sin embargo el cultivo de calibración alcanzó el valor de 0,46 m de profundidad efectiva de raíces, por esta razón profundidades del nivel freático menores a los 0,5 m afectaron desde -63,5% la reducción de la producción de biomasa.

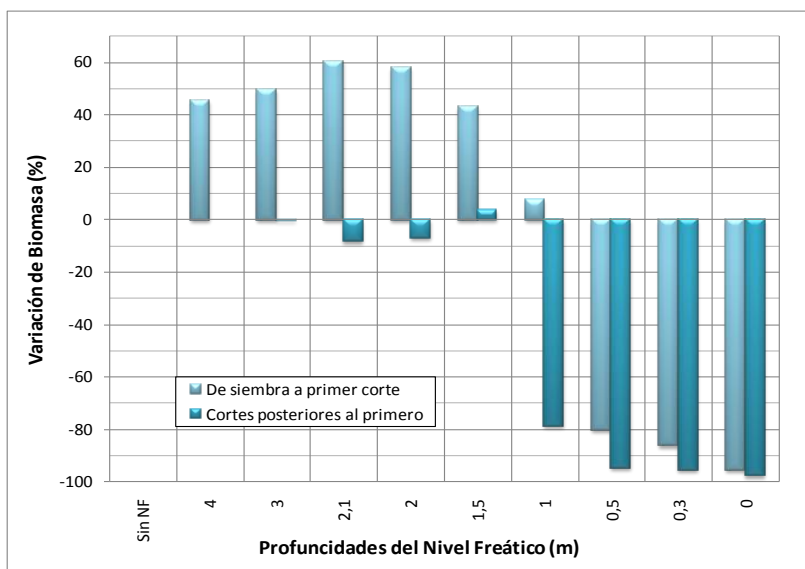


Figura 6.12 Variación del rendimiento de la producción de biomasa de raigrás debido a la influencia del nivel freático del suelo, estimado por el modelo AquaCrop.

Para el caso del análisis sobre los niveles freáticos para raigrás se observó un comportamiento diferencial entre los períodos de siembra al primer corte con respecto a los cortes posteriores. La Figura 6.12 muestra la comparación de la variación porcentual de la biomasa entre las dos etapas, para el caso de siembra a primer corte se presentó aumento en la producción de biomasa desde los 4 m de profundidad del *NF* hasta incluso el metro, para los 2,1 m se presentó el mayor incremento de biomasa para este ciclo con 60,6%, sin

embargo para los cortes posteriores al primero el máximo incremento se presentó para una profundidad de 1,5 m del NF de tan solo 3,5% de biomasa. A partir de profundidades del NF de 0,5 m las variaciones en biomasa para ambos periodos son negativas alcanzando incluso disminuciones de biomasa cercanas al 100%.

Es importante resaltar que los ciclos de siembra a primer corte, y los cortes posteriores fueron probados con sus respectivas épocas de desarrollo, los cuales presentan periodos climáticos diferentes, las épocas de siembra para el periodo de siembra a primer corte fueron épocas secas (Diciembre, Enero, Febrero y Marzo), mientras que los ciclos posteriores al primer corte fueron épocas principalmente húmedas lo que ocasiona que los aportes freáticos puedan afectar positivamente la producción de biomasa en esos ciclos hasta el punto en que ya se presenta disminución por la influencia del anegamiento.

6.5 Articulación de los resultados obtenidos

Los resultados obtenidos constituyen los elementos básicos y variables determinantes tanto a nivel conservador como no conservador, es decir local. Con base en estos elementos, el modelo AquaCrop puede determinar el proceso de producción de biomasa para avena forrajera y para raigrás y para la estimación de la cosecha en el caso de la avena forrajera.

El modelo tomará dichos parámetros o variables como base y los reemplazará en el proceso de simulación de la producción de biomasa y cosecha construyendo así las curvas respectivas y estimando el volumen de la producción y las cantidades tanto de biomasa como del rendimiento para los casos particulares.

Los elementos y variables o parámetros obtenidos en el presente trabajo se articulan de la siguiente manera según se refieran a avena forrajera o raigrás.

6.5.1 Integración para la Avena Forrajera

La investigación relacionada en este trabajo se resume con las Figuras 6.13 a 6.15 en las cuales se muestra cómo se integran los resultados encontrados de los principales parámetros y variables de entrada para el modelo AquaCrop, para el caso de avena forrajera.

En la Figura 6.13 se presenta la curva de desarrollo del dosel de un cultivo hipotético de avena forrajera en desarrollo óptimo sin restricción de agua ni nutrientes o plagas y enfermedades.

En dicha figura se destacan las curvas de crecimiento del dosel junto con la curva de declinación del dosel, en las cuales se ubican los respectivos índices de crecimiento y declinación. Además, se presenta la productividad hídrica normalizada y el índice de cosecha, los cuales serán la base para la estimación de la cosecha y los coeficientes de cobertura del dosel inicial y máximo. Las ecuaciones de AquaCrop ilustran la función de los parámetros mencionados y los sectores donde son utilizadas.

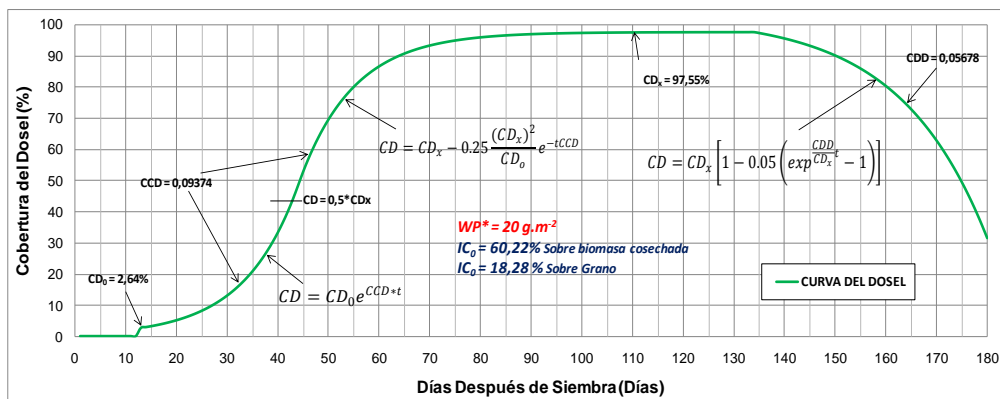


Figura 6.13 Simulación del desarrollo del dosel para avena forrajera.

La curva del dosel de avena forrajera tiene una forma típica de cultivos anuales de cobertura homogénea, la productividad hídrica está en el límite superior de los cultivos C3 (20 g.m^{-2}) de acuerdo a lo reportado por Raes et al., (2009a) y Steduto et al., (2009).

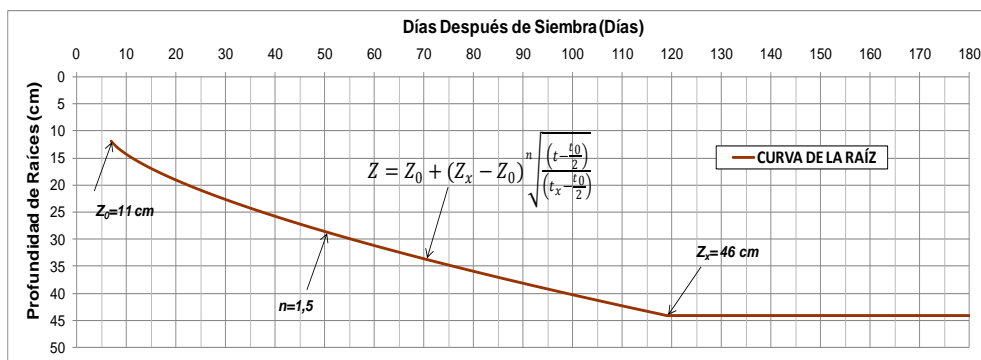


Figura 6.14 Simulación del crecimiento de raíces para avena forrajera.

En la Figura 6.14 se presenta la simulación de la expansión de la raíz para el mismo cultivo de avena forrajera, en ella se ubican las profundidades máxima y mínima efectiva de la raíz, además del factor de forma que describe el proceso de crecimiento de la raíz, la ecuación que se presenta describe una curvatura leve.

La Figura 6.15 presenta la simulación de los eventos fenológicos del mismo cultivo hipotético para avena forrajera, en el cual se describen los tiempos de los principales estados de desarrollo del cultivo y su duración en días después de siembra. En este caso la avena forrajera tiene un ciclo total hasta inicio de senescencia de 133 días.

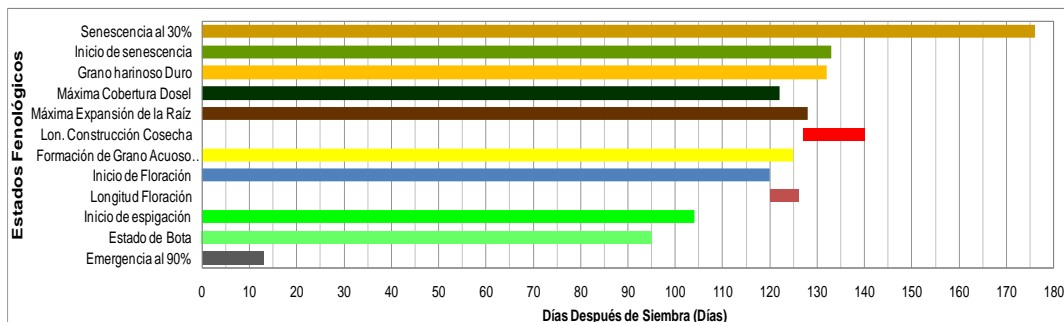


Figura 6.15 Simulación de los tiempos de crecimiento fenológico para Avena Forrajera.

La Tabla 6.10 presenta los tiempos promedios de los estados fenológicos de los cultivos forrajeros de avena y raigrás, en ella se muestran los valores en días calendario y en días-grado.

Tabla 6.10 Tiempos promedio de los estados fenológicos de los cultivos de avena forrajera y raigrás.

Estados Fenológicos	Avena Forrajera		Raigrás	
	Días Calendario	Días Grado	Días Calendario	Días Grado
Emergencia al 90%	13	100.8	9	83.6
Estado de Bota	95	829.6	62	550.9
Inicio de espigación	104	910.0	69	616.9
Inicio de Floración	120	1055.0	83	755.0
Formación de Grano Acuoso lechoso	125	1092.6	90	822.5
Máxima Expansión de la Raíz	126	1114.9	64	570.9
Máxima Cobertura Dosel	122	1070.4	89	813.5
Grano harinoso Duro	132	1147.3	94	864.8
Inicio de senescencia	133	1156.7		

6.5.2 Integración para Raigrás

La integración de los resultados para raigrás se presenta en las Figuras 6.16 a 6.18, en ellas se muestran la curva del dosel con sus respectivas ecuaciones y parámetros, así como la productividad hídrica normalizada, el índice de cosecha sobre la biomasa cosechada y un acercamiento al índice de cosecha sobre grano (semilla).

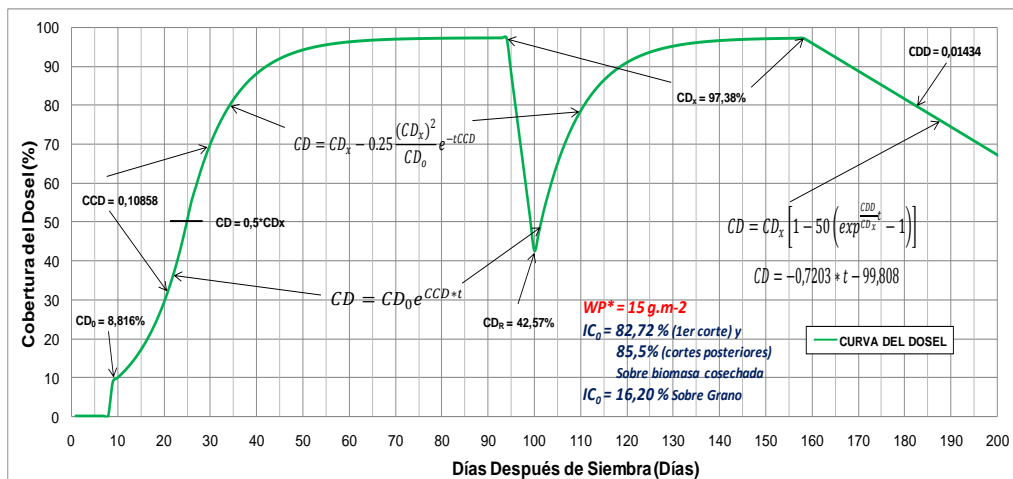


Figura 6.16 Simulación del desarrollo del dosel para raigrás.

La cobertura del dosel inicial CD_0 se presenta un tanto alta debido seguramente a la alta densidad de siembra utilizada (11,6 millones de plantas por hectárea aprox.). Aunque la cobertura del dosel máxima promedio fue de 99,76% obtenido en los experimentos, en el proceso de calibración se estableció en un valor de 97,38% quedando dentro del grupo de “casi enteramente cubierto”, según los rangos establecidos por AquaCrop.

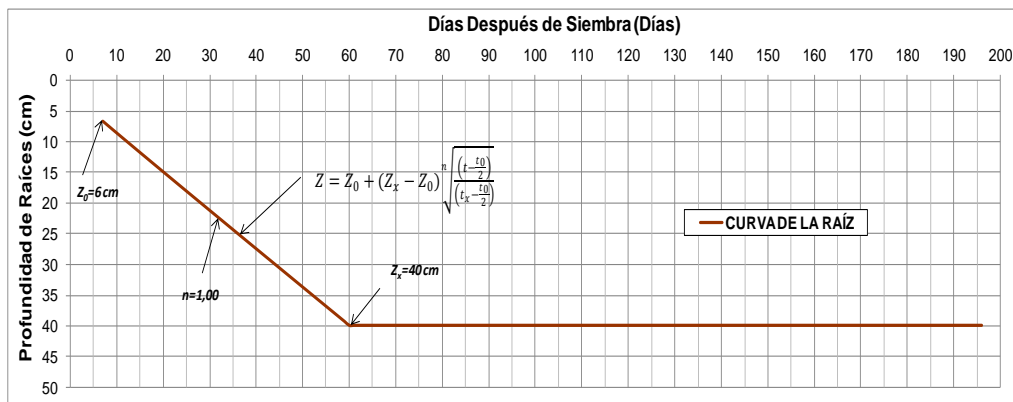


Figura 6.17 Simulación del crecimiento de raíces para raigrás.

Cuando se alcanza la cobertura máxima del dosel se simula el corte a los 94 DDS. Luego se presenta un periodo de recuperación de 6 días, el nuevo ciclo se inicia con una cobertura remanente en el suelo de 42,67% y continúa con los mismos parámetros anteriores, pero esta vez con un periodo de sólo 54 DDC hasta alcanzar nuevamente la máxima cobertura.

El ciclo de desarrollo se repite indefinidamente. Finalmente se simula la curva de senescencia “forzada” como se observa en la Figura 6.16, la cual

responde a una declinación en forma de línea recta. Además, se presentan los parámetros para la linealización de dicho proceso, este comportamiento que se generó en forma artificial, (como se explicó en el numeral 5.7.8) muestra el efecto observado por la inducción a la senescencia temprana del dosel.

La Figura 6.17 presenta la curva de expansión de la raíz para raigrás con su profundidad mínima efectiva a 6 cm y su máxima hasta 40 cm, la curvatura es casi recta con un coeficiente de crecimiento de sólo 1.00. A diferencia de los cultivos anuales la curva sólo crece en la primera parte del desarrollo del cultivo, hasta antes del primer corte.

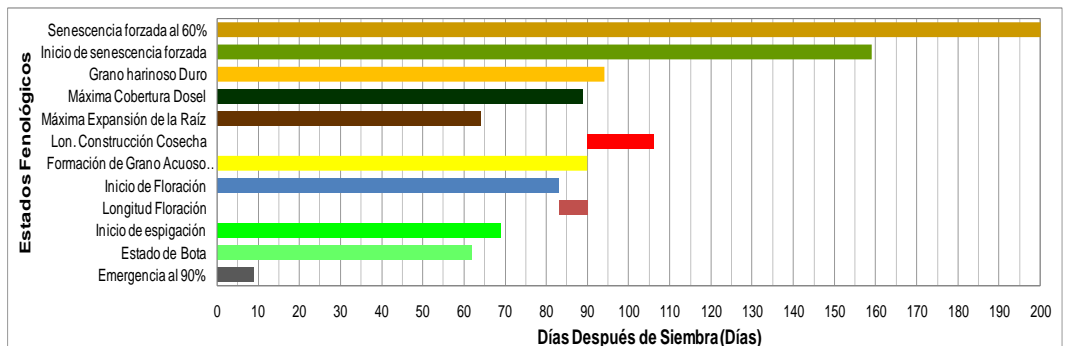


Figura 6.19 Simulación de los tiempos de crecimiento fenológico para raigrás.

La Figura 6.18 muestra los tiempos de los eventos fenológicos del raigrás, hasta el primer corte, su desarrollo inicial hasta madurez se presenta a los 95 días después de siembra. La Tabla 6.12 muestra los tiempos promedio de los estados fenológicos para raigrás tanto en días calendario como en día-grado.

Como ya se explicó anteriormente, se espera un proceso repetido de los eventos fenológicos de corte en corte con una reducción de su ciclo a madurez de sólo hasta un promedio de 54 días, que puede variar dependiendo de las fechas de corte. Desde luego la profundización de la raíz permanece constante desde el primer ciclo de desarrollo.

Las Figuras 6.13 a 6.18 resumen y explicitan los procesos que el modelo AquaCrop desarrolla internamente para simular el crecimiento de los cultivos estudiados, el modelo utilizaría estas variables y parámetros además de las explicadas previamente en los procesos de simulación.

La simulación presentada en estas figuras representan los desarrollos potenciales, sin embargo las variables que tienen que ver con el estrés hídrico, actúan con el fin de atenuar los desarrollos de acuerdo a la influencia las limitaciones hídricas reduciendo los desarrollos del dosel y por lo tanto la producción de biomasa, de acuerdo a lo explicado atrás.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Respecto a la Sabana de Bogotá como ecosistema experimental

- La Sabana de Bogotá es parte integral de la cuenca alta del río Bogotá, con un clima frío durante todo el año, óptimas condiciones para la producción agropecuaria y alta vocación de ganadería de lechería especializada, por lo cual se desarrolló el presente trabajo. Su potencialidad agroclimática expresada en el comportamiento más o menos homogéneo a través del año de la evapotranspiración de referencia permite que se pueda realizar la producción de forraje en forma continua con buenos niveles de producción durante todo el año.
- Los suelos de la región de estudio (Sabana de Bogotá) y en especial del sitio experimental son Andisoles, con altos contenidos de cenizas volcánicas y materia orgánica, ya caracterizados en los textos y en el Anexo A "*Perfil taxonómico de la serie de suelos*". Estos suelos tienen unas condiciones físicas especiales por lo cual presentan comportamientos diferenciales con respecto a las características físicas y algunas químicas. Con respecto a las características físicas los puntos de porcentaje de saturación del suelo (*Sat%*) y punto de marchitez permanente (*PMP*) no responden a la curva de tensión ordinaria expuesta por Richards, (1931). En el caso del punto de saturación el IGAC, (2000) reportó humedades superiores a saturación hasta de 146,55%Vol para el horizonte más profundo, de todos modos los puntos de saturación del perfil siempre estuvieron por encima del 100% (Ver Anexo A) para la misma serie de suelos en el perfil respectivo, esto aparentemente podría estar "errado" pero en este proyecto se encontraron resultados similares que obligaron a repetir las pruebas varias veces y a presentar la nutrida tabla de datos de las características físicas (*Tabla 5.3*).
- Los suelos Andisoles por un lado brindan excelentes productividades agrícolas pero no responden en la forma tradicional a la determinación de algunas de las características físicas. Como la determinación del "Punto anaeróbico del cultivo (*Ksaer*)" depende en gran medida del punto de saturación del suelo, los resultados encontrados en este trabajo deben

observarse sólo como una aproximación en esta variable específica, hasta tanto no sean corroborados por otras investigaciones en suelos no volcánicos.

- Recomendación: Se abre una puerta a la investigación en física de suelos y métodos alternativos para la identificación de los puntos hidrofísicos del suelo como capacidad de campo, punto de marchitez permanente y punto de saturación de suelos con altos contenidos de cenizas volcánicas y materia orgánica o condiciones especiales en la determinación de dichas constantes.
- El presente trabajo permite dar un paso sobre la optimización del recurso hídrico para la producción agropecuaria en la región de la Sabana de Bogotá, pues con base en el modelo AquaCrop y los resultados obtenidos se podrá estimar la producción de biomasa en el proceso productivo del sistema de ganadería en general (leche y carne) a partir del agua y la huella hídrica, obteniendo mejores aproximaciones a la determinación de la carga ganadera, las unidades productivas, la productividad de forraje y leche, la programación del riego complementario, la planeación de la producción, y el ordenamiento territorial de la región con base en la disponibilidad del recurso hídrico.

7.2 Respecto al Modelo AquaCrop (FAO)

- El modelo AquaCrop es una de las mejores herramientas para la simulación de la obtención de biomasa y la producción, pues incorpora varios aspectos innovadores del conocimiento actual sobre el desarrollo de cultivos que lo hacen único. Entre las principales ventajas se pueden mencionar: la separación de la evaporación y la transpiración en el proceso productivo, la productividad hídrica normalizada por el clima y por el CO_2 , la separación entre biomasa y producción estimada a partir del comportamiento del índice de cosecha, la posibilidad de manejar escalas de tiempo menores al ciclo total del cultivo, y el uso de la cobertura del dosel en vez del dispendioso índice de área foliar como elemento de valoración del crecimiento. Además de la introducción de un número relativamente pequeño e intuitivo de variables y parámetros. Estos elementos lo hacen combinar el mejor equilibrio entre la simplicidad, exactitud y robustez.
- El hecho de que la productividad hídrica sea normalizada por el CO_2 , asegura que el modelo pueda utilizarse para estimar los efectos del cambio climático global, no sólo en la actualidad sino para comportamientos futuros. Aquí la contribución del presente trabajo da un avance fundamental pues al aportar resultados sobre la producción y

desarrollo de los pastos (en particular raigrás) que constituyen una de las mayores coberturas vegetales del planeta tierra ayudaría al perfeccionamiento de la determinación de las dinámicas del CO₂, y su influencia en el cambio climático global causadas por los procesos de captura y liberación.

- Aún el modelo AquaCrop no ha introducido el manejo de cultivos forrajeros, lo cual ha limitado algunos aspectos del desarrollo del presente trabajo, como por ejemplo la imposibilidad de trabajar con los eventos de corte de la biomasa que se considera para este tipo de especies. Además se tienen limitaciones en las restricciones de entrada al modelo tanto en las variables conservadoras y no conservadoras al considerar otro tipo de cultivo (por ejemplo: cultivos de grano o de hoja) como base para la construcción de un nuevo cultivo forrajero no considerado.
- El acertado enfoque de los ideólogos y diseñadores del modelo de hacer un manejo diferenciado entre variables y parámetros conservadores y no conservadores, asegura que el modelo tenga una alta seguridad de manejo para el usuario final, además de su robustez y exactitud lograda, de tal forma que las variables no conservadoras puedan ajustarse en forma local, logrando así una calibración *insitu* ideal y asegurando con las variables conservadoras obtener resultados mucho más realistas en las estimaciones.
- La interfaz de usuario del modelo AquaCrop, constituye una ayuda excelente para el interesado, pues ilustra de forma adecuada tanto los desarrollos fenológicos como el ciclo del cultivo con base en esquemas bien definidos, de las variables y parámetros tanto de entrada como de salida, los procesos, las limitaciones, los desarrollos en el tiempo, los entornos de clima, agua, suelo, cultivo, y algunas prácticas culturales, etc. que ayudan al usuario en forma fácil intuitiva y amena a entender y desarrollar los procesos de simulación en una forma muy eficaz.
- Recomendación: Dado que el modelo AquaCrop no calcula la evapotranspiración de referencia sino que ésta debe ser alimentada externamente por medio del programa “ET₀ Calculator” FAO, Raes, (2009), cuyo uso resulta dispendioso y engorroso por la poca amigabilidad de dicho software. Es recomendable realizar un módulo de determinación de la ET₀ dentro del modelo considerando los mismos criterios de agilidad, intuición, ilustración y facilidad de manejo de AquaCrop. Esto además eliminaría posibles errores de entrada por el usuario en el cálculo de la evapotranspiración de referencia por medio de un único y sólido archivo de clima.

- Con el fin de probar algunos de los resultados encontrados en este trabajo se trató de realizar un cultivo prototipo en la versión de AquaCrop 4.0, tomando como tipo de cultivo la selección de “cultivos herbáceos”, debido a que aún no estaba habilitado el tipo: “pastos y forrajes”. Sin embargo algunas de las variables conservadoras y no conservadoras del modelo no respondieron pues se excedían los límites mínimos o máximos de tolerancia de dichas variables, es el caso de la densidad de siembra, el coeficiente de crecimiento del dosel, el coeficiente de declinación del dosel, mínima profundidad de raíces, construcción de cosecha, e índice de cosecha. Finalmente fue necesario usar el tipo de cultivos de “frutos y granos” para hacer la calibración de los cultivos forrajeros estudiados.
- Recomendación: Para futuras versiones se recomienda incluir un nuevo tipo de cultivo; por ejemplo; genérico, con el cual se pueda trabajar “libremente” sin someter sus parámetros de entrada tanto conservativos como no conservativos a restricciones o límites máximos o mínimos, con el cual se pueda trabajar en el campo investigativo con nuevas especies. Esto ayudaría a agilizar el proceso de validación y calibración de nuevas especies de interés local que posteriormente podrían ser incorporadas a las especies calibradas y validadas por el equipo de AquaCrop.
- Se recomienda para cultivos forrajeros disminuir el valor de la profundidad de raíces inicial (Z_0) ya que su valor real experimental es en general inferior al valor mínimo considerado por AquaCrop (para la mayoría de cultivos calibrados y validados hasta la presente esta variable no es inferior a 0,3 m), Se podría considerar, valores mínimos de 0,1 m, con el fin de simular mejor el crecimiento radical y que los balances hídricos sean más realistas en consideración a los niveles de agua que aportarían en el volumen de control de las especies forrajeras.

7.3 Respecto a la metodología empleada

- El método experimental usado de una fuente lateral de riego que genera un gradiente de humedad fue una metodología de campo muy útil, de fácil manejo y relativamente bajo costo que ayuda a generar los tratamientos requeridos de una forma muy simple, a pesar de sus restricciones estadísticas, su facilidad de instalación, manejo, y grado de respuesta que se obtiene es un método que responde bien a las exigencias; no en vano; es uno de los métodos de mayor uso en el concierto global de la investigación en lo que se refiere a experimentación a partir del agua como función de variación de lámina de riego.
- Para la determinación de las variables de estrés fue necesario, sin embargo, establecer una nueva metodología bajo invernadero, debido a

que los experimentos de gradiente al ser a libre exposición, no permitieron llevar el suelo a niveles cercanos al punto de marchitez permanente, con el objeto de poder evaluar altos niveles de estrés hídrico en los cultivos.

- Para la determinación de algunas de las variables y parámetros de entrada al modelo se establecieron metodologías apropiadas, las cuales dieron buenos resultados, es el caso de la determinación del momento de la germinación al 90% por medio de seguimiento por medios fotográficos, al igual de los procesos de crecimiento y declinación del dosel y hasta el seguimiento de los estados fenológicos.
- La obtención de las curvas de K_c , K_{cb} , y K_e , dentro de la determinación de los requerimientos hídricos, y la huella hídrica de los dos cultivos por medio del balance hídrico diario para cada unidad experimental, especialmente para los niveles sin restricción hídrica (niveles 1) fue fundamental en la determinación de algunos de los resultados, como el Coeficiente máximo del cultivo (K_{cb_x}), el factor de declinación del cultivo (f_{edad}), la productividad hídrica normalizada (WP^*) y hasta en la etapa de senescencia, la determinación de la evaporación relativa máxima durante el estado de estación tardía, (E_{rel}), valores que fueron medidos y no sólo estimados.
- Para el caso de avena forrajera se hizo el seguimiento del proceso de envejecimiento sólo durante el cuarto cultivo, y para raigrás fue determinado en el final del cuarto corte del segundo cultivo. Se usaron las unidades experimentales de todos los niveles y su mantillo (*moulch*) fue supervisado también por medios fotográficos. Para su cálculo fue utilizado el método propuesto por Raes et al., (2009), el cual resultó ser bastante interesante y con buenos resultados.
- La metodología propuesta para la determinación del estrés hídrico es novedosa, así como el análisis de los experimentos, pues en la literatura científica no se encontraron ensayos similares. El método de desecación de las unidades experimentales en diferentes intensidades garantizó que el experimento invariablemente mostrara resultados de respuesta al estrés hídrico y que dichas respuestas se presentaran en varias etapas fenológicas y afectarían las variables dependientes supervisadas.

7.4 Respecto a los resultados obtenidos

- Del conjunto de experimentos realizados, se observa que las mejores respuestas de la producción de biomasa al agua alcanzadas por la avena forrajera se obtuvieron en el año 2009 en la época tradicional de lluvia (cultivo 3 con $26,97 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) y para el raigrás, durante 2010 en la época

inicial del año que aunque tradicionalmente es seca, en este año fue inusualmente húmeda, (cultivo 2, siembra a primer corte con $9,93 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) pues se lograron las más altas producciones en ambos casos.

- Por otro lado, los experimentos que mejores resultados aportaron por las diferencias significativas de sus tratamientos y las claras distinciones en sus respuestas de producción de biomasa se presentaron en la época del veranillo de mitad de año, en el año 2009; tanto para avena forrajera (cultivo 2) como para raigrás (cultivo 1 corte 4) y se debieron a las altas diferencias alcanzadas en las humedades del suelo por el método del gradiente a lo largo del ciclo del cultivo.
- La Cobertura del dosel para una semilla en la emergencia (C_s), el Coeficiente de crecimiento del dosel (CCD), el Coeficiente de declinación del Dosel (CDD), el Factor de forma de la expansión de la raíz (n), el Factor de declinación del cultivo (f_{edad}), el Efecto de la cobertura del dosel sobre la reducción de la evaporación del suelo en el estado de estación tardía (E_{rel}), y la Productividad hídrica normalizada (WP^*) obtenidos tanto para avena forrajera como para raigrás son resultados novedosos del presente trabajo.
- La productividad hídrica normalizada (WP^*) tanto para avena forrajera como para raigrás resultaron dentro de los límites superior e inferior establecidos por AquaCrop para cultivos C3, (15 a $20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) Raes et al., (2009), con $19,83 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ en promedio para avena forrajera y $14,97 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ para raigrás, lo cual establece la idoneidad de los resultados alcanzados y ratifica la tesis en la que se basa el modelo. Al momento de calibración y validación los valores fueron redondeados en 20 y $15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ para avena forrajera y raigrás respectivamente.
- En el caso de cultivos indeterminados como el raigrás (*Lolium perenne*) se presenta como un proceso de difícil evaluación la senescencia natural del cultivo, pues habría que realizar investigaciones a largo plazo con altos niveles de control. Se observó en los experimentos que existe una tendencia a la reducción de la cobertura del dosel máximo después de cada corte que a largo plazo seguramente disminuirá la producción de biomasa y crearía una línea envolvente de declinación del dosel que trasciende a través de los diferentes cortes.
- Recomendación: Desde ahora se observa la necesidad de realizar mayor experimentación con cultivos indeterminados como el pasto raigrás, con el fin de establecer la posibilidad de existencia de la curva de envolvente de senescencia, la recuperación del cultivo una vez superado el punto de marchitez permanente y los procesos de senescencia temprana del dosel por causas naturales.

- En el caso de avena forrajera se observó que la altura del dosel o altura de planta podría incorporarse en la descripción del desarrollo del dosel, pues este elemento ayudaría a mejorar la estimación de la producción de biomasa comparado solo con la cobertura del dosel. Se observó que se lograron mejores producciones con comportamientos iguales o similares del desarrollo de la cobertura del dosel; pero sin embargo; para mayores alturas de planta, las cuales presentaban diferencias significativas, sustentando de esta forma mejor la producción de biomasa.

7.5 Respecto de las respuestas de los forrajes estudiados al estrés hídrico

- Los umbrales superiores del coeficiente de estrés hídrico (K_s) para avena forrajera obtenidos experimentalmente del parámetro fuente cobertura del dosel (CD) fueron cercanos a 0,7 del agua aprovechable total (AAT). Para la altura de planta (AP) fueron 0,2 AAT , para el ancho de la hoja (AH) 0,3 AAT , y para la conductancia estomática (GS) de 0,5 AAT . El umbral inferior para el cierre de estomas estuvo ubicado en el nivel de agotamiento máximo (1 AAT), es decir el punto de marchitez permanente PMP . Los factores de forma que más se aproximan a los resultados experimentales fueron 24,7, 3,4, 6,8, y 7,5 para CD , AP , AH y GS respectivamente.
- Para el caso de raigrás los umbrales superiores del coeficiente de estrés hídrico (K_s) obtenidos experimentalmente del parámetro fuente CD fueron cercanos a 0,95 AAT , para AP fue de 0,55 AAT , para el AH de 0,5 AAT y para GS de 0,5 AAT . Para raigrás el umbral inferior para el cierre de estomas fue determinado también en el nivel de agotamiento máximo (1 AAT), es decir el PMP . Los factores de forma que más se aproximan a los resultados experimentales fueron 194, 8,1, 13,4; y 4,2 para CD , AP , AH y GS respectivamente.
- Los resultados de campo para avena forrajera mostraron que a pesar de que el comportamiento de los parámetros fuente de CD , AP y AH fueron crecientes en la mayoría de los casos, se observaron claramente los DDS para los cuales dichos parámetros suspendieron el crecimiento del cultivo, por detenimiento del desarrollo del parámetro supervisado y por lo tanto permitieron observar en cuál estado del nivel de agotamiento del agua en el suelo sucedió esto.
- El umbral inferior para activar la suspensión del crecimiento de la CD en avena forrajera puede encontrarse desde un nivel de agotamiento que varía desde 70 a 96 % AAT . Hay que tener en cuenta que entre más pronto en el ciclo del cultivo se presente el estrés hídrico, más alto es el

nivel de agotamiento observado. Por otro lado, se encontró que en todos los tratamientos, las respuestas para la suspensión del crecimiento del cultivo no fueron idénticas debido a que se sucedieron en diferentes estados de desarrollo.

- Para raigrás las respuestas de todos los tratamientos sucedieron a diferentes estados del ciclo del cultivo. Los resultados de campo indican que el umbral inferior en el cual ya no hay crecimiento del dosel puede variar en un rango mucho más amplio, incluso 40 a 97% del AAT. Esto indica que el raigrás es mucho más susceptible al estrés hídrico que la avena forrajera. Sin embargo, para raigrás, niveles de agotamiento bajos pueden generar estrés incluso en periodos tempranos en el ciclo del cultivo.
- Para avena forrajera se alcanzaron diferencias significativas en todos los tratamientos de estrés hídrico para *MS*, *GS*, *CD*, *AH* y *AP*. Las producciones de biomasa obtenidas presentaron diferencias significativas para todos los tratamientos alcanzando una reducción de la producción por estrés hídrico de hasta del 84.6% para el tratamiento de más rápido aumento del nivel de agotamiento (estrés).
- Para raigrás se alcanzaron diferencias significativas en todos los tratamientos de estrés hídrico para *MS*, *GS*, *CD*, y *AP*. El *AH* no presentó diferencias significativas entre los tratamientos. Sin embargo, si las hubo entre los tratamientos y el control. Las producciones de biomasa obtenidas presentaron diferencias significativas para la mayoría de los tratamientos durante el ciclo de siembra a primer corte con una reducción de la producción por estrés hídrico de 76.6%. Para el segundo ciclo la reducción de la producción por estrés hídrico con respecto al control fue de sólo el 44,4% debido a la poca recuperación que logró el cultivo después de los procesos de estrés ejercidos durante el primer ciclo.

7.6 Respecto de la calibración y validación del modelo AquaCrop para avena forrajera y raigrás

- Si bien, el margen de variación de las variables y parámetros de entrada al modelo AquaCrop es bastante bajo debido a que la mayoría de ellas fueron establecidas en campo, las magnitudes calibradas y validadas de las variables tanto para avena forrajera como para raigrás finalmente estuvieron dentro de los rangos observados y niveles admisibles de sus desviaciones estándar
- Las respuestas de biomasa simuladas y valoradas con sus respectivos indicadores estadísticos resultaron muy buenas, alcanzando valores de

ajuste para avena forrajera superiores a 0,91 y para raigrás superiores a 0,88 para sus coeficientes de determinación (R^2), de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF) y el índice de agregación de Willmott (d). Esto tiene mayor relevancia considerando que las validaciones se hicieron sobre varios cultivos y todos ellos mostraron buenos indicadores, lo que ratifica la buena elección de las variables conservadoras y no conservadoras tanto de avena forrajera como de raigrás durante la calibración y validación.

- La evaluación de la sensibilidad de los cultivos con respecto al nivel de irrigación tanto para avena forrajera como para raigrás mostró que los valores máximos óptimos estimados por el modelo AquaCrop estuvieron muy cercanos a los determinados en campo por la función de producción y que determinan la huella hídrica. Estos valores fueron determinados por niveles de irrigación de 388 mm de agua aplicada para una producción de 22,2 t.ha⁻¹ de avena forrajera y para raigrás una producción de cerca de 9 t.ha⁻¹ con una lámina de 398 mm.
- El resto de las simulaciones realizadas para determinar la sensibilidad de los cultivos a diferentes condiciones agroecológicas mostraron que el modelo AquaCrop con base en las calibraciones y validaciones logradas tanto para avena forrajera como para raigrás es capaz de replicar condiciones reales plausibles de la variación en fertilidad de los suelos, niveles freáticos y texturas del suelo.
- Recomendación: Es recomendable hacer mayor experimentación en campo con el objeto de mejorar tanto los rangos de los valores del estrés hídrico como la forma de su consideración por el modelo AquaCrop. Esta recomendación se basa en los resultados de los experimentos de estrés hídrico, y la forma como el modelo AquaCrop toma y maneja los parámetros de estrés, especialmente, en la reducción del dosel, cierre estomático, la senescencia temprana del dosel, y sus umbrales de actuación en las simulaciones.

7.7 Respecto al logro de los objetivos planteados

- El objetivo principal del presente trabajo de investigación fue la determinación de la potencialidad de producción de biomasa de cultivos forrajeros con base en las relaciones hídricas con sus características fisiológicas, los niveles de consumo de agua de las especies, y las condiciones de eficacia del clima y el suelo presentes. Este se logró por medio de la calibración y validación del modelo AquaCrop para pasto raigrás y avena forrajera. Y se sustentó con base en los resultados de campo obtenidos de los experimentos realizados junto con la

determinación de la información de sus desarrollos y ciclos fenológicos, del clima, el suelo y las condiciones ambientales en general.

- Los cuatro resultados específicos se obtuvieron de la siguiente manera:
- En primer lugar la determinación de la biomasa total y/o potencial y la huella hídrica de los cultivos forrajeros de interés como resultado de la captura de energía presente y la evapotranspiración real. La biomasa total para avena forrajera fue determinada en un nivel $22,2 \text{ t.ha}^{-1}$ en promedio con valores máximos que pueden llegar a alcanzar hasta 27 t.ha^{-1} en el entorno productivo de la Sabana de Bogotá. Para raigrás la biomasa total alcanzó niveles de hasta 9 t.ha^{-1} , para el período de siembra a primer corte, y de 6 t.ha^{-1} para los cortes posteriores al primero. La biomasa potencial queda determinada a partir de las simulaciones que se pueden realizar con el modelo AquaCrop, además de las simulaciones que se pueden realizar con múltiples escenarios. La huella hídrica intrínseca para avena forrajera fue determinada en 175 L.kg^{-1} y para raigrás en 442 L.kg^{-1} y 431 L.Kg^{-1} .
- El segundo objetivo, centrado en la determinación de los parámetros y variables requeridos por el modelo AquaCrop para la estimación de la potencialidad productiva de biomasa para los cultivos forrajeros de interés, teniendo en cuenta el clima y el suelo de su entorno de producción quedaron determinados por los valores de las variables y parámetros ajustados para los cultivos de avena forrajera y raigrás resultados del proceso de validación y calibración del modelo AquaCrop. Entre los más importantes se pueden mencionar: la productividad hídrica normalizada, los coeficientes de crecimiento y declinación del dosel, el factor de forma del crecimiento de raíces, el coeficiente máximo del cultivo, el factor de declinación del cultivo, los coeficientes y umbrales de estrés hídrico para expansión del dosel, conductancia estomática y senescencia del dosel y la longitud de los estados fenológicos.
- El tercer objetivo constituye la calibración y validación del modelo AquaCrop para las especies forrajeras de interés con el objeto de establecer un modelo de obtención de biomasa a partir del agua de estas especies forrajeras, esto se logró con los resultados de la calibración y validación del modelo AquaCrop para avena forrajera y raigrás, alcanzando ajustes de $R^2=0,92$, $RMSE=1,86 \text{ t.ha}^{-1}$, $NRMSE=17,67\%$, $EF=0,91$, y $d=0,97$ para avena forrajera y de $R^2=0,97$, $RMSE=0,47 \text{ t.ha}^{-1}$, $NRMSE=13,6\%$, $EF=0,88$, y $d=0,98$ para raigrás. Se determinaron dos cultivos sintéticos uno para cada especie, los cuales constituyen los “prototipos” que son el punto de partida para la estimación de la biomasa a partir del uso del agua en diferentes condiciones de los cultivos mencionados.

- Por último se estableció el grado de sensibilidad de los parámetros y/o variables de mayor importancia en el proceso de estimación de la producción de biomasa de los cultivos de raigrás y avena forrajera por medio de las simulaciones de otras condiciones agroecológicas para evaluar la sensibilidad del cultivo al complejo Suelo – Agua – Clima, en estos análisis se encontró que es posible aumentar la producción de biomasa de avena forrajera con el manejo del riego hasta niveles superiores al 60%, y para raigrás hasta del 50%.
- Además, se encontró disminución en la producción de biomasa hasta de más del 50% por efectos de limitaciones de la fertilidad del suelo en un 40% para avena forrajera, y para raigrás estas disminuciones de biomasa pueden superar el 60%. Por cambios en la textura del suelo pueden haber tanto aumentos como disminución en la producción de biomasa que fluctúan entre el +5% y el -35% para avena forrajera, y de +5% y -40% para raigrás. El aporte de agua por niveles freáticos puede aumentar la producción de biomasa hasta cerca de un 20% en el caso de avena forrajera y para raigrás hasta el 60% y se pueden disminuir para ambos cultivos por anegamiento hasta incluso perder la cosecha.
- El estudio de los forrajes es complejo, tanto por la variedad existente como por el alto nivel de adaptación que han logrado en casi toda la superficie de la tierra, en todos los climas, paisajes, y zonas agroecológicas, además por la gran influencia que tienen en la cobertura vegetal del planeta, no es fácil elegir cuál de todos ellos es digno de estudiar y por qué. En este trabajo se ha querido iniciar por dos especies representativas, una de ellas de ciclo anual como es la avena forrajera un cereal, de ciclo determinado, principalmente usado para corte. Y la otra el pasto raigrás una gramínea, de ciclo indeterminado, principalmente usado para pastoreo. Con ello se ha querido investigar en la respuesta de la producción de biomasa al agua, y los efectos del estrés hídrico que presentan estas dos líneas de forrajes con características opuestas pero de gran importancia ecológica y económica a nivel global.

7.8 Proyecciones de Investigación en el área

Los resultados de investigación del presente trabajo dejan ver múltiples posibilidades de investigación en varias áreas afines, complementarias, o proyecciones de los aspectos trabajados aquí.

En primer lugar es evidente la línea de investigación en calibración y validación del modelo AquaCrop en varios cultivos de interés en el trópico así como cultivos de interés general. Para el caso de pastos y forrajes se abre

una puerta de investigación en este tipo de cultivos. Una vez se coloque a disposición el apartado de tipo de cultivo en “Cultivos de Forrajes”, se podrá hacer este clase de investigaciones sin limitación del uso del software en cuanto a los cultivos forrajeros.

Otro de los campos de proyección para investigación es la determinación del estrés hídrico de las especies en general, basados en la determinación de los coeficientes de estrés hídrico, y en las respuestas de estrés del cultivo, como conductancia estomática o cierre de estomas, desarrollos del dosel, y senescencia temprana del dosel, así como otros aspectos que inhiban el desarrollo tanto del cultivo como la disminución de la producción.

La determinación del coeficiente aeróbico del cultivo merece un estudio detallado no sólo en avena forrajera y raigrás, sino en el resto de cultivos. Aquí se hizo una aproximación a su valor la cual no constituye un elemento determinante ni definitivo. Estos valores fueron necesario ajustarlos durante el proceso de calibración y validación, especialmente para el caso de raigrás (-17.9%) el cual resultó ser inferior a los rangos considerados por AquaCrop. Este campo de investigación en cuanto a tiempos y niveles de inundación de cultivos es una línea de trabajo que hay que abordar considerando los eventos extremos que sobre vienen por efectos del cambio climático global e inundaciones que se afrontan en varios países en la producción de cultivos en zonas afectadas.

Un tema que está tomando gran relevancia en el ámbito científico tanto nacional como internacional es la determinación de la huella hídrica de los cultivos y los aspectos económicos del agua. Este tópico se puede afrontar desde varios puntos de vista, por ejemplo: desde su determinación intrínseca como el inverso de la productividad hídrica, también mirada desde la valoración de sus fuentes hídricas que determinan las huellas hídricas de colores (verde, azul, y gris) y que pueden ser valoradas espacialmente. Pero también con la connotación económica de la eficiencia de producción del sistema productivo, considerando la función de producción, que determina si es mejor producir uno u otro cultivo alternativo de cara a las limitaciones en disponibilidad del agua a nivel local, regional y nacional.

Por otro lado, y con el fin de solo dejar propuestos los temas más relevantes no se puede olvidar la necesidad de hacer investigaciones en la determinación de las variables hidrofísicas en suelos volcánicos y/o con altos contenidos de materia orgánica, especialmente en la determinación de los puntos de saturación, la conductividad hidráulica saturada y el punto de marchitez permanente. Es importante mejorar las metodologías de laboratorio o de determinación de dichos parámetros para estos suelos.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abril, M. y González, C. 1999. Zonificación por balance hídrico de la cuenca alta y media del río Bogotá, utilizando SIG. Trabajo de grado. Ingeniería Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 215 p.
- Adams, J. E., G. F. Arkin and J. T. Ritchie 1976. Influence of row spacing and Straw mulch on first stage drying. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 436-442.
- Alarcón, V.C.; Trebejo, V.I. Sanabria, Q.J. y Pérez D.N. 2011. Caracterización Agroclimática de la Región Cusco. Ministerio del Ambiente. Viceministerio de desarrollo estratégico de los recursos naturales. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Programa de Adaptación al Cambio Climático (PACCPERÚ), Senamhi, Agencia Suiza para el desarrollo y la cooperación (COSUDE). Perú. 242 p. http://issuu.com/pacc_peru/docs/erc-002.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje, 56. Food and Agriculture Organization, Roma, 298 p.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization. Roma.
- Amer, K., y J.L. Hatfield. 2004. Canopy resistance in potato as affected by soil and meteorological parameters. *Agron. J.* 96:978–985.
- Amigone, M.A., Kloster, A.M., Bertram, N.A. y Masiero, B. Estabilidad de rendimiento de forraje de cultivares de avena en el sudeste de Córdoba. Inta EEA, Marcos Juárez, Córdoba (Argentina). 1h.
- Amundson, R.G.; A.R. Ali, A.J. Belsky. 1995 Stomatal responsiveness to changing light intensity increases rain-use efficiency of below-crown vegetation in tropical savannas Original Research Article *Journal of Arid Environments*, Volume 29, Issue 2, February 1995, 139-153.
- Anderson, M.C., J.M. Norman, W.P. Kustas, F. Li, J.H. Prueger, and J.R. Mecikalski. 2005. Effects of vegetation clumping on two-source model estimates of surface energy fluxes from an agricultural landscape during SMACEX. *J. Hydrometeorol.* 6:892–909.
- Araya, A.; Habtu, S.; Hadgu, K.; Kebede, A. Dejne, T. 2010. Test of AquaCrop Model in Simulating Biomass and Yield of Water Deficient and Irrigated Barley (*Hordeum Vulgare*) *Agric. Water Management J.* 97: 1838 – 1846.
- Argote, G. y Halanoca, M. 2007. Evaluación y selección de gramíneas forrajeras tolerantes a condiciones climáticas del altiplano del Puno. APPA – ALPA. Cusco, Perú, 5 p.

- Ayara, A.; Keesstra, S.D.; Stroosnijder, L. 2010. Simulating Yield Response to Water of Teff (*Eragrostis tef*) with FAO's AquaCrop Model. *Field Crops Research J.* 116: 196 – 204.
- Arévalo, D.; Lozano, J.; y Sabogal, J. 2012. Estudio nacional de la huella hídrica Colombia. Sector Agrícola. En: *Sostenibilidad tecnología y humanismo*. Bogotá, 101- 126 pp.
- Arguello A, H; Calle P, L; Ramírez C. A; Guevara P. P; y López Q, L. 2006. Reuso de aguas residuales para riego de hortalizas. *Lit. Michel*, Bogotá, D.C. 40 p.
- Asseng, S.; y Hsiao, T. C. 2000. Canopy CO₂ assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting. *Field Crops Res.* 67: 191-206.
- Baker, J.M. 2003. Recalcitrant problems in environmental instrumentation. *Agron. J.* 95:1404–1407.
- Baker, J.M., y C.H.M. van Bavel. 1987. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. *Plant Cell Environ.* 10:777–782.
- Baker, J.M., and J.L. Nieber. 1989. An analysis of the steady-state heat balance method for measuring sap flow in plants. *Agric. For. Meteorol.* 48:93–109.
- Baldocchi, D.D., E. Falge, L. Gu, R. Olson, D. Hollinger, S. Running, P. Anthoni, K. Ch. Bernhofer, R. Davis, J. Evans, A. Fuentes, G. Goldstein, B. Katul, X. Law, Y. Lee, T. Malhi, W. Meyers, W. Munger, K.T. Oechel, U. Paw, K. Pilegaard, H.P. Schmid, R. Valentini, S. Verma, T. Vesala, K. Wilson, and S. Wofsy. 2001. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 82:2415–2434.
- Baldocchi, D.B., Luxmoore, R.J. and Hatfield, J.L., 1991. Discerning the forest from the trees: an essay on scaling canopy stomatal conductance. *Agric. For. Meteorol.*, 54: 197-226.
- Barrios Gonzales, J.M. 1999. Comparative study of three approaches in the computation of soil water balance, Master Dissertation IUPWARE. K.U. Leuven University, Leuven, Belgium. 93 pp.
- Batista, M. Cvistgaard, C. 2006. Comportamiento estadístico de la superficie, producción y rendimiento de tomate industrial. Ministerio de desarrollo agropecuario, Dirección Nacional de Agricultura. Panamá, 9h.
- Bausch, W.C., and C.M.U. Neale. 1989. Spectral inputs improve corn crop coefficients and irrigation scheduling. *Trans. ASAE* 32:1901–1908.
- Bear, J. 1972. *Dynamics of fluids in porous media*. American Elsevier, NY, USA: 338-346.
- Bernal, J.E. 1998. Fertilización de pastos mejorados. In: Guerrero, R. *Fertilización de cultivos en clima frío*. Monómeros Colombo Venezolanos S.A. Bogotá, Col. 277-328.
- Bernal M, J. L. 2005. *Manual de manejo para pastos cultivados para zonas alto andinas*. Ministerio de Agricultura, Dirección de Crianzas, Dirección general de promoción agrícola. Perú, Junio de 2005. 32 p.
- Belmans, C., J.G. Wesseling and R.A. Feddes 1983. Simulation of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *J. of Hydrol*, 63: 271-286.

- Black, C.C. y B. Osmond. 2003. Crassulacean acid metabolism photosynthesis: "working the night shift". *Photosynth. Res.* 76, 329-341.
- Boogaard, H., Van Diepen, C.; Rötter, R.; Cabrera, J.; and Van Laar., H. 1998. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5. Tech. Doc. 52. DLO-Winand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands.
- Boote, K.J., J.W. Jones, and G. Hoogenboom. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model. p. 651–692. In R.M. Peart and R.B. Curry (ed.) *Agricultural systems modeling and simulation*. Marcel Dekker, New York.
- Bouman, B.A.M., H. Van Keulen, H.H. Van Laar, and R. Rabbinge. 1996. The "school of de Wit" crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agric. Syst.* 52:171–198.
- Bradford, K.J., y Hsiao.T.C. 1982. Physiological responses to moderate water stress. p. 263–324. En: O.L. Lange et al. (ed.) *Physiological plantecology. II. Water relations and carbon assimilation*. Encyclopedia of Plant Physiology, New Series. Vol. 12B. Springer-Verlag, New York.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J.P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H. 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, vol. 18, n° 3-4, p. 309-332.
- Brown, H., Huth, N.I., Holzworth, D.P., Zyskowski, R.F., Teixeira, E.I., Hargraves, J.N.I., Moot, D., 2014. Plant modelling framework: software for building and running crop models on the apsim platform. *Environ. Model. Softw.* 62, 385 -398.
- Businger, J.A., J.C. Wyngaard, Y. Izumi, and E.F. Bradley. 1971. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.* 28:181–189.
- Bustos, M.; Arguello, H.; Díaz, M. y Ortiz, J. 2004. Programa integral de transferencia de tecnología para la producción limpia y comercialización de hortalizas en la sabana de Bogota. Componente 1: Tratamientos de Aguas, Universidad Nacional de Colombia, Unidad Ambiental del Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola de la Facultad de Ingeniería y con la colaboración de la Facultad de Agronomía. Febrero de 2004, Bogotá D.C., s.p.
- Cabazos, T. y Rodriguez, O. 1992. Manual de prácticas de física de suelos. Trillas, Escuela superior de agricultura hermanos Escobar, México 99 p.
- Campbell, P.K.E., E.M. Middleton, J.E. McMurtrey, L.A. Crop, and E.W. Chappelle. 2007. Assessment of vegetation stress using reflectance or fluorescence measurements. *J. Environ. Qual.* 36: 832–845.
- Carlassare, M. y Karsten, H. D. 2002. Species Contribution to Seasonal Productivity of a Mixed Pasture under Two Sward Grazing Height Regimes. 10.2134/ Agron J. 2002.8400 Vol. 94 No. 4, p. 840-850
- Carnahan, B., H.A. Luther and J.O. Wilkes 1969. *Applied numerical methods*. John Wiley & Sons Inc., NY, USA: 429-444.
- Castañón, G. 2000. *Ingeniería del riego: utilización racional del agua*. Paraninfo S.A., Thompson Learning, Madrid, 198 p.

- Castillo, F. E., Castellví S., Francesc. (y otros 15 autores). 1996. "Agrometeorología". Ministerio de agricultura, pesca y alimentación, Mundi-Prensa, Madrid, 517 p.
- Cérmaik, J., and J. Kuciera. 1981. The compensation of natural temperature gradient in the measuring point during the sap flow rate determination in trees. *Biol. Plant.* 23:469–471.
- Chen, W., Shen, Y.Y., Robertson, M.J., Probert, M.E., Bellotti, W.D., 2008b. Simulation analysis of Lucerne – wheat crop rotation on the loess Plateau of Northern China. *Field Crop. Res.* 108 (2), 179-187.
- CIREN, 1989. Requerimientos de clima y suelo; cereales, cultivos industriales y flores. Centro de Información de Recursos Naturales, Manuales de cultivos. 53 p.
- Corp, L.A., J.E. McMurtrey, E.M. Middleton, C.L. Mulchi, E.W. Chappelle, and C.S.T. Daughtry. 2003. Fluorescence sensing systems: In vivo detection of biophysical variations in field corn due to nitrogen supply. *Remote Sens. Environ.* 86:470–479.
- Corporación Autónoma de Cundinamarca (CAR). 2006. Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá. Resumen Ejecutivo. Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica del río Bogotá. Bogotá, D.C., 104 p.
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). 2005. Manual técnico. Producción y utilización de recursos forrajeros en sistemas de producción bovina de las regiones Caribe y Vales Interandinos. Bogotá. Colombia. P.11.
- Cortés, G.E. 1994. Atlas agropecuario de Costa Rica. Gonzalo Cortés Enríquez (Edi.); Introducción Juan Rafael Lizano. 1 ed. San José, C.R.: EUNED, 532 p.
- Cruz G., Manka C., Pedocchi R. 2000. Regionalización agroclimática del litoral centro – oeste del Uruguay. *Agrociencias*. Vol. IV. – No.1, pp. 87-92.
- Denmead, O.T., and R.H. Shaw. 1960. The effects of soil moisture at different growth stages of growth on the development and yield of corn. *Agron. J.* 52:272–274.
- Denmead, O.T., and R.H. Shaw. 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agron. J.* 54:385–390.
- Descheemaeker, K. 2006. Pedological and hydrological effects of vegetation restoration in enclosures established on degraded hill slopes in the highlands of Northern Ethiopia. Ph.D. diss., *Dissertationes de Agricultura No. 725* K.U. Leuven Univ., Leuven, Belgium.
- De León, L.A.; Arriba, B.A.; y De La Plaza, M.D.C. 1998. Caracterización Agroclimática de la Provincia de Granada. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Dirección General de la Producción Agraria. Madrid. 197 p.
- Díaz M., L. 2009. Estadística multivariada inferencia y métodos. Departamento de estadística, Facultad de ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá. 529 p.
- Doherty, J. 2005. PEST Model Independent Parameter Estimation, User manual: 5a Ed. Watermark numerical computing. 336 p. [http:// www2.epa.gov/ sites/production/ files/ documents /PESTMAN.PDF](http://www2.epa.gov/sites/production/files/documents/PESTMAN.PDF), [http:// www.pesthomepage.org/](http://www.pesthomepage.org/).

- Dolling, P.J., Robertson, M.J., Asseng, S., Ward, P.R., Latta, R.A. 2005. Simulating Lucerne growth and water use on diverse soil types in a Mediterranean-type environment. *Aust. Res.* 56 (5), 503-515.
- Doorenbos, J.; and Kassam, A.; with Bentvelsen, C.; Branscheid, V.; Plusje, J. Smith, M.; Uittenbogaard, G.; Van Der Val, H. 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper (FAO)*, no. 33. Land and Water Developmet Div., Rome, Italy. 193 p.
- Doorenbos, J.; and Pruitt, W. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper (FAO)*, no. 24. Land and Water Developmet Div., Rome, Italy. 156 p.
- Dregne, H.E. 1982. Dryland soil resources. *Sci. and Technol. Agric. Rep.*, Agency for Int. Dev., Washington, DC.
- Ehler, W.L., S.B. Idso, R.D. Jackson, and R.J. Reginato. 1978. Wheat canopy temperatures: Relation to plant water potential. *Agron. J.* 70:251–256.
- Enberson, L.D., M.R. Ashmore, H.M. Cambridge, D. Simpson, and J.P. Tuovinen. 2000. Modelling stomatal ozone flux across Europe. *Environmental Pollution* 109 (2000) 403-413.
- FAO. 2010. Cultivos para heno, cereales, y gramíneas forrajeras. Departamento de Agricultura y Protección del Consumidor. FAO. Roma, Italia. [http:// www.fao.org/ docrep/ 007/ x7660s /x7660 s 0 9.htm](http://www.fao.org/docrep/007/x7660s/x7660s09.htm).
- FAO, 2009. The ET0 Calculator. Ver 3.1. To calculate Reference evapotranspiration (ET0) according to FAO standards. FAO. Roma, Italy. <http://www.fao.org/nr/water/eto.html>.
- FAO. 1993 – 2007. ECOCROP. The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database. Version 2007. AGLS. FAO. Rome, Italy. <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/about>
- Falkenmark, M. and Rockström, J. 2004. Balancing water for humans and nature: The new approach in ecohydrology, earthscan, London, UK.
- Farahani, H.J. Izzi, G. and Oweis, T.Y. 2009. Parametrization and Evaluation of the AquaCrop Model for full and Deficit Irrigated Cotton. *Agron J.* 101: 448 – 459.
- Feddes, R.A. Kowalik, P.J, and Zaradny, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. *Pudoc. Simulation Monographs*, Wageningen, Netherland, 189 p.
- FEDEGAN. 2014. Plan de desarrollo grnadero 2014 -2019. Por una ganadería moderna sostenible y solidaria. Fondo nacional de ganado, FNG. Fondo de estabilización de precios. Bogotá. Noviembre de 2014. 323 p.
- Ferrari, M; Pozzolo, O.; y Ferrari, H. 2009. “Desarrollo de un Software para estimación de la cobertura vegetal” Cob Cal Ver 2.0.0.61” Patente no. 649082. Estación experimental agropecuaria INTA. Concepción del Uruguay, 5 p.
- Forsythe, W. 1980. Física de Suelos. Manual de Laboratorio. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, San José, Costa Rica. IICA. 212 p.
- Freid, M. Y Broeshart 1967. The Soil Plant System In relation to inorganic nutrition. New York, Academic Press, 358 p.

- Fuentes, J. 1996. Técnicas de riego. Ediciones Mundi-Prensa. España. 471 p.
- Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (FUBJTL), Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales (CIAA) y COLCIENCIAS. 2001. "Producción de tomate bajo invernadero". Editores: Rebeca Lee y Hugo Escobar. Bogotá. D.C. Colombia. 136 p.
- Fundación para el Desarrollo Participativo Comunitario (FUNDEPCO). 2014. Atlas agroclimático de Bolivia. <http://fundepco.org/publicacion/atlas-agroclimatico-de-bolivia/>.
- Garcés R., C. 1976. Estudio ultradetallado de suelos con fines de riego y drenaje en el centro nacional de investigaciones agropecuarias Tibaitatá. Tesis. M.Sc. Programa de estudios para graduados en ciencias agrarias. Universidad Nacional de Colombia. – Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Bogotá, 140 p.
- García, C. M. 2003. Agroclimatic study and drought resistance análisis of Quinoa for an irrigation strategy in the Bolivian Altiplano. Ph.D. diss. Dissertaciones de Agricultura, No. 556. K. U. Leuven Univ., Leuven, Belgium.
- García-Vila, M. Fereres, E. Mateos, L. Orgaz, F. And Steduto, P. 2009. Deficit Irrigation Optimization of Cotton with AquaCrop. *Agron J.* 101 : 477 – 487.
- Gardner, B.R., D.C. Nielsen, and C.C. Shock. 1992a. Infrared thermometry and the Crop Water Stress Index: I. History, theory, and baselines. *J. Prod. Agric.* 5:462–466.
- Gardner, B.R., D.C. Nielsen, and C.C. Shock. 1992b. Infrared thermometry and the Crop Water Stress Index: II. Sampling procedures and interpretation. *J. Prod. Agric.* 5:466–475.
- Geerts, S.; Raes, D. García, M.; Miranda, R.; Cusicanqui, J.A.; Taboada, C.; Mendoza, J. ; Huanca, R.; Mamani, A.; Condori, O.; Morales, B.; Osco, V.; and Steduto, P. 2009. Simulating Yield Response of Quinoa to Water Availability with AquaCrop. *Agron J.* 2009 101: 499 – 508.
- González-Fernández, I., V.Bermejo, S.Elvira, J.Sanz, B.Gimeno, and E. Alonso.2010. Modelling annual pasture dynamics: Application to stomatal zone deposition. *Atmospheric Environment* 44, (2010) 2507- 2517.
- Granier, A. 1985. Une nouvelle methode pour la mesure du flux de selve brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.* 42:193–200.
- Guerrero, R. 1972. Fertilidad de suelos diagnóstico y control. 325 p.
- Hanks, J.R. ; Keller, J. ; Rasmussen, V. P. and Wilson, G.D. 1976. Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crops production studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 426-429.
- Hanks, R. J., Keller, J., Rasmussen V.P. and Wilson, D.G. 1974. Model for prediction plant yield as influenced by water use. *Agron. J.* Vol. 65. pp. 650 – 665.
- Hanks, J.R., D.V. Sisson, R.L. Hurst, and K.G. Hubbard. 1980. Statistical analysis of results from irrigation experiments using the line-source sprinkler system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:886-888.
- Hanks, J.R. 1983. Yield and water-use relationships: An overview. In H.M. Taylor et al. (ed.) *Limitations to efficient water use in crop production.* ASA, Madison, WI.p. 393–411.

- Hatfield, J.L. 1985. Wheat canopy resistance determined by energy balance techniques. *Agron. J.* 77:279–283.
- Hatfield, J.L. 1983. Remote sensing estimators of potential and actual crop yield. *Remote Sens. Environ.* 13:301–311.
- Hatfield, J.L., A.A. Gitelson, J.S. Schepers, and C.L. Walthall. 2008. Remote sensing of agronomic parameters: Advances in science. *Agron. J.* 100 (suppl).
- Hatfield, J.L., and J.M. Baker (Ed.). 2005. *Micrometeorology in agricultural systems*. Agron. Monogr. 47. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.
- Hatfield, J.L., R.J. Reginato, and S.B. Idso. 1984. Evaluation of canopy temperature–evapotranspiration models over various crops. *Agric. For. Meteorol.* 32:41–53.
- Hatfield, J.L., J.H. Prueger, and W.P. Kustas. 2004. Remote sensing of dryland crops. p. 531–568. In S.L. Ustin (ed.) *Remote sensing for natural resource management and environmental monitoring, manual of remote sensing*. Vol. 4. 3rd ed. John Wiley, Hoboken, NJ.
- Heilman, J.L., W.E. Heilman, and D.G. Moore. 1981. Remote sensing of canopy temperature at incomplete cover. *Agron. J.* 73:403–406.
- Heng, L.K.; Hsiao, T.C.; Evett, S.; Howell, and Steduto, P. 2009. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. *Agron J.* 101: 488 – 498.
- Hoekstra, A. Y. and Chapagain, A.K. 2006. Water footprints of nations. UNESCO. [http://www.waterfootprint.org/ Reports/ Hoekstra_and_Chapagin_2006.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Hoekstra_and_Chapagin_2006.pdf). Consultado: 2013/06/15.
- Hoekstra, A.Y.; Chapagain, A.K. Aldaya, M. M.; y Mekonnen, M.M. 2010. Manual de evaluación de la huella hídrica. Definiendo una norma global. Consejo de Supervisión de la Water Footprint Network. 137p. [http:// es. watershedconnect. Org / documents / water _ footprint _ assessment _ manual _ setting _ the _ global _ standard](http://es.watershedconnect.Org/documents/water_footprint_assessment_manual_setting_the_global_standard).
- Holzworth, D. P; N I. Huth; P. G. deVoil, E. J. Zurcher, N. I. Herrmann, G. McLean, K. Chenu, E. J. van Oosterom, V. Snow, C. Murphy, A. D. Moore, H. Brown, J. P.M. Wish, S. Verrall, J. Fainges, L. W. Bell, A. S. Peake, P. L. Poulton, Z. Hochman, P. J. Thorburn, D. S. Gaydon, N. P. Dalgliesh, D. Rodriguez, H. Cox, S. Chapman, A. Doherty, E. Teixeira, J. Sharp, R. Cichota, I. Vogeler, F. Y. Li, E. Wang, G. L. Hammer, M. J. Robertson, J. P. Dimes, A. M. Whitbread, J. Hunt, H. van Rees, T. McClelland, P. S. Carberry, J. N.G. Hargreaves, N. MacLeod, C. McDonald, J. Harsdorf, S. Wedgwood, and B. A. Keating. 2014. APSIM - Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. In: *Environmental Modelling & Software*. 62, 327 – 350 pp.
- Hoogland. J. C., Belmans, C. And Feddes, R.A. 1981. Root water uptake model depending on soil water pressure heads and maximum water extraction rate.
- Hoogenboom, G., P.W. Wilkens, and G.Y. Tsuji. 1999. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) v.3. Vol. 4. Univ. of Hawaii, Honolulu.
- Hoyos, G. R.; Gutiérrez, G.T.; y Peñate F.M. 2010. Zonificación agroclimática del territorio de Cuba aplicada a los rendimientos agrícolas del tabaco negro con el uso de SIG. Cuba Tabaco. Centro de Meteorología Agrícola, Instituto de Meteorología, CITMA. Vol.11 No. 2, 2010. 50 -58 pp.

- Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 24:519–570.
- Hsiao, T.C., y Bradford, K.J. 1983. Physiological consequences of cellular water deficits. p. 227–265. In H.M. Taylor et al. (ed.) *Limitations to efficient water use in crop production*. ASA, Madison, WI.
- Hsiao, T.; L. Heng,; P. Steduto,; B. Rojas; D. Raes, y E. Fereres 2009. AquaCrop— The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize *Agron. J.* 2009 101: 448-459.
- Hsiao, T.C., P. Steduto, and E. Fereres. 2007. A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrigation Sci.* 25:209–231.
- Hsiao, T.C., E. Fereres, E. Acevedo, and D.W. Henderson. 1976. Water stress and dynamics of growth and yield of crop plants. p. 281–305. In O. L.
- Idso, S.B., R.D. Jackson, P.J. Pinter, Jr., R.J. Reginato, and J.L. Hatfield. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. For. Meteorol.* 24:45–55.
- Instituto Colombiano Agropecuario, (ICA). 1994. Fertilización en diversos cultivos, Quinta Aproximación. Subgerencia de Investigación, Sección Recursos Naturales, Manual de Asistencia Técnica No. 25. Noviembre de 1992. 64 p.
- Instituto Colombiano Agropecuario, (ICA). 1988. Curso taller de riego por goteo. Edición: Forero S. J. A., Programa Manejo de Aguas, ICA. Bogotá (Colombia), 109 p.
- Instituto Colombiano Agropecuario, (ICA). e Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC). 1987. Zonificación agroecológica de Colombia. Programa de Manejo de agua y tierra (ICA), y Subdirección de cartografía del IGAC. 168 p.
- Instituto de geografía de México. (DGDM) 1990. Atlas nacional de México. Tres tomos. Instituto de geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC) 1989. Cundinamarca: características geográficas. Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC) 2000. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca. Departamento Administrativo Nacional del Estadística (DANE) e IGAC, Subdirección de agrología. Bogotá, D.C., 901 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC) y Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM). 1984. Estudio regional integrado del altiplano cundiboyacense. Sabana de Bogotá.
- Jackson, R.D., S.B. Idso, R.J. Reginato, and P.J. Pinter, Jr. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.* 17:1133–1138.
- Jaramillo, J. Rodríguez P.V. Guzmán M.A. Zapata M.A. 2006. El cultivo de tomate Bajo Invernadero, Boletín Técnico. Corpoica, Centro de Investigaciones la selva. Rionegro, Antioquia, 48 p.
- Jarvis, P. G. 1976. The Interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical transactions of Royal Society of*

- London. Series B, Biological Sciences, Vol. 273, Issue 927, A Discussion on Water Relations of Plants. Feb, 26, 593-610.
- Jensen, M.E., Burman, R.D., y Allen, R.G. (ed). 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70., Am. Soc. Civil Engrs., New York, Estados Unidos de América, 360 p.
- Johnson. D. E., 2000. Métodos multivariados aplicados al análisis de datos. International Thomson Edi. México. 566 p.
- Johnson. D. E., U.N. Chaudhuri, and E.T. Kanemasu. 1983. Statistical analysis of line-source sprinkler experiments and other nonrandomized experiments using multivariate methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47; 309-312.
- Jones, C. A.; Dyke, P.T.;Williams, J.R.; Kiniry, J.R.;Benson, V.W.;Griggs, R.H. 1991. EPIC: An operational model for evaluation of agricultural sustainability. *Agricultural Systems*, Vol. 37, Issue 4; 341-350.
- Jones, C.A., and Kiniry. J.R. 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station, TX.
- Jones, J.W., G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijsman, and J.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18:235–265.
- Kanemasu, E.T., G.W. Thurtell, and C.B. Tanner. 1969. The design, calibration, and field use of a stomatal diffusion porometer. *Plant Physiol.* 44:881–885.
- Karunaratne, A. S.; Azam-Ali, S.N.; Izzi, G. and Steduto, P. 2011. *Experimental Agriculture*. In press. Published online: 2011.
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.I., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.I., Freebairn, D.M., Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 18(3-4), 276 -288.
- Keller, J. and R.D. Bliesner.1990. *Sprinkler and Trickle Irrigation*, AVI Book, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Klute, A., 1986. Water retention: laboratory methods. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, second ed. American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, USA, (Agronomy; no. 9), pp. 635–662.
- Krause, P., Boyle, D. P., and Bäse, F. 2005. Advances in Geosciences Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances In Geosciences*, 89–97.
- Law, B.E., E. Falge, L. Gu, D.D. Baldocchi, P. Bakwin, P. Berbigier, K. Davis, A.J. Dolman, M. Falk, J.D. Fuentes, A. Goldstein, A. Granier, A. Grelle, D. Hollinger, I.A. Janssens, P. Jarvis, N.O. Jensen, G. Katul, Y. Mahli, G. Matteucci, T. Meyers, R. Monson, W. Munger, W. Oechel, R. Olson, K. Pilegaard, K.T. Paw U, H. Thorgeirsson, R. Valentini, S. Verma, T. Vesala, K. Wilson, S. Wofsy. 2002. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agric. For. Meteorol.* 113:97–120.

- Lawes, R., Robertson, M. 2008. Seasonal variability of Rhodes grass production in the northern West Australia wheatbelt. In: Unkovich, M. (Ed.), *Global Issues. Paddock Action, Proceedings of 14th Agronomy Conference 2008: 21 -25 September 2008, Adelaide, South Australia.*
- Legates, D. R., and McCabe, G. J. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35, 233–241.
- Levitt, J. 1980. Responses of plants to environmental stresses. Vol II. Water, radiation, salt, and other stresses. Academic Press, New York, NY. 607 p.
- Li, F.Y., Snow, V.O., Holzworth, D.P., 2011. Modelling the seasonal and geographical pattern of pasture production in New Zealand. *N. Z. J. Agric. Res.* 54 (4), 331 – 352.
- Li, F.Y., Newton, P.C.D., Liewering, M., 2013. Testing simulations of intra- and inter-annual variation of the pasture production response to elevated CO₂ from an 11-year FACE experiment on grazed pasture. *Glob. Change Biol.* 20 (1), 228 – 239.
- Loomis, R. S. y Connor, D. J. 2002. *Ecología de Cultivos. Productividad y manejo en sistemas agrarios.* Grupo Mundi – Prensa, Madrid. 591 p.
- Luthin, J. N. 1965. Mediciones de la conductividad hidráulica in situ, teoría y descripción general del método. 464 – 503 pp.
- Lüttge, U. 2004. Ecophysiology of crassulacean acid metabolism. *Ann. Bot.* (2004) 93 (6): 629-652.
- Malagón, D. 1976. *Física de Suelos.* Instituto Geográfica Agustín Codazzi, (IGAC), Bogotá, (Col.). 622 p.
- Martínez, A. y C. Jasso-Chavarría. 2005. Rotación Maíz- Avena forrajera con labranza de conservación en el altiplano de San Luis Potosí, Mexico. *Redalyc, Red de revistas científicas de América Latina, y el Caribe, España y Portugal. Universidad Autónoma Chapingo. Terra Latinoamerica, Vol. 23, Núm. 2, abril.junio, 2005, pp. 257-263.*
- Martínez, Gamiño, M.A. y Jasso-Chaverría, C. 2005. Rotación Maíz- Avena forrajera con labranza de conservación en el altiplano de San Luis Potosí, Mexico. *Redalyc, Red de revistas científicas de América Latina, y el Caribe, España y Portugal. Universidad Autónoma Chapingo. Terra Latinoamérica, Vol. 23, Núm. 2, abril. Junio, 2005, pp. 257-263.*
- Martínez, P.F. 2001. Cultivo de tomate en invernadero frío. En: *Memorias del Curso INIAAECI. Horticultura protegida y semiprotegida, Santa Cruz de la Sierra. Bolivia. 22 a 26 de octubre de 2001.*
- McMaster, G. S. and W.W. Wilhelm 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology* 87: 291-300.
- Mendoza, A, Escorcía, W. y García, D.M., 2001. Programa Plan de Ordenamiento Territorial de la Cuenca Alta del Río Bogotá. (POTCARB). Bogotá, D.C. 44 p.
- Merriam, J. L., Keller, J., Alfaro, J. 1973. *Irrigation System Evaluation and Improvement.* Department of Agricultural and Irrigation Engineering. Utah Water Research Laboratory. Utah State University. Logan, Utah. September, 1973, II-1,- II-28 pp.

- Ministerio de agricultura y desarrollo rural (MADR). 2007. Convocatoria nacional para la cofinanciación de programas y proyectos de investigación, desarrollo tecnológico e innovación para el sector agropecuario por cadenas productivas, Programa: Desarrollo de estrategias de manejo y mejoramiento de la calidad del recurso hídrico en sistemas de producción de leche del trópico alto de Cundinamarca y Boyacá. Bogotá. D. C. 65 p.
- Ministerio de agricultura y desarrollo rural (MADR). 2006. Estadísticas Agropecuarias, Dirección de política sectorial.
- Mitchell, G.; Griggs, R. H.; Benson, V. y Williams, J. 1993. The EPIC Model. Environmental Policy Integrated Climate, formerly Erosion Productivity Impact Calculator. User's – Guide – Draft. Ver 5300. The Texas Agricultural Experiment Station Blackland Research Center, and The United States Department of Agriculture Agricultural Research Service Grassland, Soil and Water Research Laboratory, and The United States Department of Agriculture Natural Resource Conservation Service. Temple, Texas., s.p.
- Molano B., J. 1998. Medio ambiente y vida natural en los páramos. Estudios geográficos, Madrid. Internet. <http://www.lablaa.org/blaavirtual/faunayflora/pam/indice.htm>.
- Monomeros Colombo Venezolanos S.A. 1988. Fertilización de cultivos en clima frío. Barranquilla. 1988. 216 p.
- Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Proc. R Soc. London, Ser. B* 281:277–294.
- Monteith, J.L. 1994. Principles of resource capture by crop stands. p. 1–15. In J.L. Monteith et al. (ed.) *Resource capture by crops*. Nottingham Univ. Press, Leicestershire, England.
- Moore, A.D., Donnelly, J.R., Freer, M., 1997. GRAZPLAN: decision support systems for Australian grazing enterprises. III. Pasture growth and soil moisture submodels, and the GrasGro DSS. *Agric. Syst.* 55 (4), 535 – 582.
- Murphy, G.M. 2008. Atlas agroclimático de la Argentina. Edt. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires. 250 p.
- Nafría G.D.; Garrido, dP.N.; Álvarez A.M.; Cubero, J.D. Fernández, S.M. Villarino, B. I. Gutiérrez, G.A. y Abia L.I. 2013. Atlas agroclimático Castilla y León. Junta de Castilla y León. Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Agencia Estatal de Meteorología. España. 135 p.
- Nilsen, E.T. y D.M. Orcutt. 1996. *Physiology of plants under stress. Abiotic factors*. John Wiley and Sons, New York, NY. 689 p.
- Moran, M.S., T.R. Clarke, Y. Inoue, and A. Vidal. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface–air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 49:246–263.
- Norman, J.M., W.P. Kustas, and K.S. Humes. 1995. A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. *Agric. For. Meteorol.* 77:263–293.
- Norman, J.M., W.P. Kustas, J.H. Prueger, and G.R. Diak. 2000. Surface flux estimation using radiometric temperature: A dual-temperature-difference method to minimize measurement errors. *Water Resour. Res.* 36:2263–2274.

- Nozomu, M. y Carrijo, O.A. 1998. Cultivo protegido do tomateiro. Brasília: *EMBRAPACNPH*, Circular Técnica de EMBRAPA Hortalças, 13 p.
- Olson, G.L. S.R. Smith, T.D. Phillips, and G.D. Lacefield. 2006. Annual and perennial ryegrass report. Agricultural experiment station. University of Kentucky – College of Agriculture. UK. Rp.544
- Omernik, J.M. 1987. Ecoregions of the conterminous United States. Map (scale 1:7,500,000). *Ann. Assoc. Am. Geograph.* 77(1):118- 127.
- Omernik, J.M. 2004. Perspectives on the nature and definition of ecological regions. *Environ. Manage.* 34(Suppl. 1):27–38.
- Ordoñez F. y Bojórquez R. Custodio. 2004. Establecimiento del *Lolium multiflorum* con cinco densidades sobre pasturas degradadas como una alternativa a la siembra de cultivos agrícolas. *Rev. investig. vet. Perú*, vol.15, no.2, p.87-91. ISSN 1609-9117.
- O'Toole, J.C., N.C. Turner, O.P. Namuco, M. Dingkuhn, and K.A. Gomez. 1984. Comparison of some crop water stress measurement methods. *Crop Sci.* 24:1121–1128.
- Palacios, Y. 1989. El cultivo de tomate en Colombia. En: Taller Sudamericano de manejo integrado de plagas y el cultivo de hortalizas. Santa Cruz de la Sierra. Bolivia. 13.p
- Pardo I., A. 2001. Horticultura. En: Memorias del Curso INIA-AECI. Horticultura protegida y semiprotegida, Santa Cruz de la Sierra. Bolivia. 22 a 26 de octubre de 2001.
- Patel, N.R., A.N. Mehta, and A.M. Shekh. 2001. Canopy temperature and water stress quantification in rainfed pigeonpea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.). *Agric. For. Meteorol.* 109:223–232.
- Paydar, Z., Huth, N., Ringrose-Voase, A., Young, R., Bernardi, T., Keating, B. Cresswell, H., 2005. Deep drainage and land use systems. Model verification and systems comparison. *Aust. J. Res.* 56 (9), 995-1007.
- Payero, J.O. Melvin, R.S. Irmak, S. and Tarkalson, D. 2006. Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. *Agric. Water Manag.* 84, 101-112.
- Pérez P., A. 2000. La estructura ecológica principal de la Sabana de Bogotá. Sociedad Geográfica de Colombia, Disertación de los martes del Planetario. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR. 37 p.
- Pfister, S., and Bayer, P., 2013. Monthly water stress: spatially and temporally explicit consumptive water footprint of global crop production. *Journal of Cleaner Production.* XXX (2013) 1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.031>.
- Philip, J. R. 1957. Evaporation, moisture and heat fields in the soil. *J. Meteorol.* 14; 354 - 366.
- Philip J.R. 1974. Fifty years progress in soil physics. *Geoderma* 12 (4): 265–280.
- Potters, G., T.P. Pasternak, Y. Guiez, K.J. Palme y M.A.K. Jansen. 2007. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends Plant Sci.* 12(3), 99-105.
- Prueger, J.H., y W.P. Kustas. 2005. Aerodynamic methods for estimating turbulent fluxes. p. 407–436.

- Ramos, J. y Espinoza, J. 1999. El cultivo de la avena forrajera bajo riego en aguas calientes. INIFAP. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo rural, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Norte Centro, Campo experimental Pabellón. Aguascalientes (Mexico). 10 p.
- Raes, D. 1982. A summary simulation model of the water budget of a cropped soil. Dissertation of Agriculture n° 122. K.U.Leuven University, Leuven, Belgium. 110 p.
- Raes, D. 2009. The ETo Calculator. Evapotranspiration from a reference surface. Reference manual. Version 3.1. FAO. Land and Water Division. 37 h.
- Raes, D., H. Lemmens, P. Van Aelst, M. Vanden Bulcke and M. Smith 1988. IRSIS – Irrigation scheduling information system. Volume 1. Manual. K.U.Leuven, Dep. Land Management, Reference Manual 3. 199 p.
- Raes, D.; Geerts, S.; Kipkorir, E.; Wellens, J. and, Sahli, A. 2006. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. *Agric. Water Manage.* 81:335 – 357.
- Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T.; and Fereres, E. 2009. (A) AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water. Reference Manual. FAO. Roma. Sp.
- Raes, D.; Steduto, P. Hsiao, T. C; y Fereres. E. 2009. (B) AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description *Agron. J.* 101: 438-447.
- Rallison, R.E. 1980. Origin and evolution of the SCS runoff equation. p. 912 – 924. In. Proc. Symp. On Watershed Management. ASCE, New York.
- Rawls, W.J.; Brakensiek, D.L.; y Saxtonn. 1982. Estimation of soil water properties. In: American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan. Transactions of the Asabe, 25 (5): 1316-1320.
- Reynolds, W.D.; D.E. Elrick; E.G. Youngs; A. Amoozegar; H.W.G. Booltink; J. Bouma. 2002. Saturated and field-saturated water flow parameters. In: Methods of Soil Analysis, Part 4—Physical Methods, Dane, J.H. & Topp, G.C. (Eds). Soil Science Society of America. Madison, USA. p. 797-878.
- Richards, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous media. *Physics* 1: 318-333.
- Rickert, K.G., Stuth, J.W., McKeon, G.M., 2000. Modelling pasture and animal production. In: Field and Laboratory Methods for Grassland and Animal Production Research, pp. 29 – 66.
- Ritchie, J. T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8(5): 1204 – 1213.
- Ritchie, J.T., Godwin, D.C. and Otter-Nacke. S. 1985. CERES-Wheat: A simulation model of wheat growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station.
- Rojas M., J. 2007. Planteamiento de la Agro-Cadena del tomate en la región central sur de Costa Rica. Ministerio de agricultura y ganadería, Dirección región central sur, Programa regional de hortalizas. Puriscal, 75 h.

- Rouphael, Y., M. Cardarelli, E. Rea, and G. Colla. The influence of irrigation system and nutrient solution concentration on potted geranium production under various conditions of radiation a temperatue. *Scientia Horticulturae*, Volume 118, Issue 4, 4 November 2008, Pages 328-337.
- Rucoba G., A., Anchondo N., A., Luján A., C. y Olivas G., J. 2006. Análisis de rentabilidad de un sistema de producción de tomate bajo invernadero en la región centro-sur de chihuahua. *Revista Mexicana de Agronegocio*, Jul- Dic. Año/vol. 10 No. 019. Universidad Autónoma de Laguna, Torreón, México. 11 p.
- Ruiz, A de J.; Medina, G.; González I. J.; Ortiz, C.; Flórez, H. E.; Martínez, R.; y Byerly, M. 1999. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Libro Técnico Núm. 3, CIRPAC, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Conexión Gráfica. Guadalajara, Jalisco, México. 324 p.
- Salemi, H.; Soom M.; Lee, T. S.; Mousavi, S. F.; Ganji. A. and Yusoff, M.K. 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. *African J. of Agric. Research*. 610: 2204 – 2215.
- Salisbury, F. B. y Ross C. W. 1994. *Fisiología vegetal*. Grupo Editorial Iberoamericana, 759 p.
- Salvatierra, H. C., Pérez G., U. 1997. “Análisis multitemporal de la cobertura y uso de la tierra en el apoyo de los sensores remotos”. En: VIII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial, Mérida, 16 p.
- Sánchez L., G.D. 2001. Diagnóstico del cultivo del tomate bajo invernadero en Cundinamarca y Boyacá. Documento de trabajo. 6 p.
- Sánchez L., G. D. 2002. Producción de tomate bajo cubierta. En: Taller de hortalizas, productividad – mercadeo, Corpoica, Tibaitatá, (Mosquera), Octubre 23 – 24 de 2002.
- Santibañez Q.F.; Uribe M. J.M. 1993. Atlas agroclimático de Chile. Ministerio de Agricultura, Fondo de Investigación Agropecuaria. Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería y Suelos. 99 p.
- SAS Institute Inc., 1993. Guía introductoria al SAS: edición revisada. Cary, NC., USA: SAS Institute Inc., 104 pp.
- SAS Institute Inc., 1996. SAS/STAT Software: Changes and enhancements through release 6.11. SAS Institute Inc., Cary, NC. 1104 pp.
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/STAT® 9.2. User's guide, second edition. Internet: <http://www.okstate.edu/sas/v7/sashtml/books/stat/chap37/index.htm>
- SAS Institute. 2004. User's guide: Statistics. SAS Inst., Cary, NC.
- Scholander, P.F., H.T. Hammel, E.D. Broadstreet, and E.A. Hemmingsen. 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148:339–346.
- Schoner, Carl A. Kearney, Thomas E. and Melvin R. George. 1982. Udata oat hay variety trials. Varieties and time of harvest were evaluated for influence on yield. *California Agriculture*, January - February, 1982. 20 - 22 pp.
- Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). 2006. “Cultivo del tomate.” Sena. Central Mayorista de Antioquia. En: medio magnético. CD.

- Shabgguan, Z. M. Shao, J. Dyckmans. Interaction of osmotic adjustment and photosynthesis in winter wheat under soil drought. *Journal of Plant Physiology*, Volume 154, Issues 5–6, May 1999, Pages 753-758
- Shao, H.B., L.Y.Chu, C.A. Jaleel y C.X. Zhao. 2008. Water – deficit stress – induced anatomical changes in higher plants. *C.R. Biol.* 331, 215-225.
- Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, (SCCS). 1997. *Fertirrigación*. Editor: Francisco Silva. Santa Fe de Bogotá, Colombia. 164 p.
- Soil Conservation Service. 1991. *Soil – Plant – Water relationships*. Section 15. Irrigation, p. 1-1-156. En *National engineering handbook*. Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC.
- Squella N., Fernando y Ormeño N., Juan. 2007. "La Avena como Cultivo forrajero, Inia.Chile, 36p.
- Smeal, D.; O'Neill, M.K.; y Arnold, R.N. 2005. Forage production of cool pasture grasses as related to irrigation. vol. 76, No. 3, pp. 224-236.
- Smedema, L.K., and D.W. Rycroft. 1983. *Land drainage – planning and design of agricultural drainage systems*. Batsford Ltd., London, U.K.
- Smith, D.L. 1987. *Rockwool in Horticulture*. Ed. Grower Book. London, United Kingdom, 153 p.
- Smith, M. 1992. CROPWAT, a computer program for irrigation planning and management. FAO Estudio de Riego y Drenaje 46, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.
- Steduto, P. 1996. Water use efficiency. p. 193–209. In L.S. Pereira et al. (Ed.) *Sustainability of irrigated agriculture*. NATO ASI series E: Applied sciences. Kluwer, Dordrecht, the Netherlands.
- Steduto, P., y Albrizio. R. 2005. Resource use efficiency of field grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. II. Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency. *Agric. For. Meteorol.* 130:269–281.
- Steduto, P.; Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2007. On the conservative de biomass water productivity. *Irrig. Sci.*, 25: 189-207.
- Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Raes D., y Fereres, E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles *Agron. J.* 2009 101: 426-437.
- Steduto, P.; Raes, D. Hsiao, T. C.; Fereres, E.; Heng, L. Izzi, G. and Hoogeveen, J. 2008. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Méditerranéennes, Series A, No. 80: 285 – 292.*
- Steenhuis, T.; Winchell, M.; Rossing, J. Zollweg, J. and Walter, M. 1995. SCS Runoff equation revisited for variable – source runoff area. *J. Irrig. Drain. Eng.* 121: 234-238.
- Steinfeld, H.; Gerber, P.; Wassenaar, T.; Castel, V.; Rosales, M.; and Haan, C. 2006. *Livestock's Long Shadow*. Environmental issues and options. Food And Agriculture

- Organization of the United Nations, (FAO) And The Livestock, Environment and Development, (LEAD). Rome. 390 p.
- Steiner, J. and Hatfield, J. 2008. Winds of Change: A Century of Agroclimate Research Agron. J. 2008 100: 132-152.
- Steiner, J.L., J.C. Day, R.I. Papendick, R.E. Meyer, and A.R. Bertrand. 1988. Improving and sustaining productivity in dryland regions of developing countries. Adv. Soil Sci. 8: pp 79–122.
- Stewart, B.A., and J.L. Steiner. 1990. Water use efficiency. Adv. Soil Sci. 13: pp 151–173.
- Stöckle, C.O., and R.L. Nelson. 2000. Cropsyst user's manual (v. 3.0).
- Suárez, G. 1986. Algunos parámetros hidrodinámicos usados en riego y drenaje. En: Manual de Riego y Drenaje. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Santa fe de Bogotá. 80 p.
- Swinbank, W.C. 1951. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. J. Meteorol. 8:135–145.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2006. Plant Physiology. 4th ed. Sinauer Associates, Sunderland, M.A., 782 p.
- Tanner, C.B., and T.R. Sinclair. 1983. Efficient water use in crop production: Research or re-research. p. 1–27. In H.J. Taylor et al. (ed.) Limitations to efficient water use in crop production. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.
- Tarjuelo, M.J.M. 1995. El riego por aspersión y su tecnología. Mundi-Prensa. Madrid. 491 p.
- Taylor, S. A. and Ashcroft, G. L. 1972. Physical edaphology. Utah State University. W. H. Freeman and company. San Francisco. 533 p.
- Teixeira, E.I., Moot, D.J., Brown, H.E. 2009. Modelling seasonality of dry matter partitioning and root maintenance respiration in Lucerne (*Medicago sativa* L.) crops. Crop Past. Sci. 60 (8), 778-784.
- Terán, C. 1990. “Análisis regional de duración caudal para la sabana de Bogotá”. Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Agrícola, Bogotá, 261 p.
- Terán C.; Jiménez, C.; González, C.; y Villaneda, E. 1998. “Metodología para la zonificación agroclimática de la región de La Mojana usando el sistema de información geográfica Arc/Info. En: Corpoica Ciencia y Tecnologías Agropecuarias. No. 2 Vol. 2. 19-26 pp.
- Terán, C.; Valenzuela, M.; Villaneda, E. y Cubillos, 2007. Determinación de requerimientos hídricos del tomate bajo cubierta en la Sabana de Bogotá, Colombia. Informe Final. Corporación Colombiana de Investigación, Corpoica. C.I. Tibaitatá, Bogotá, Colombia. 55 p.
- Todorovic, M; Albrizio, R.; Zivotic, L.; Abi Saab, M.; Stöckle, Claudio and Steduto P. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST Models in the Simulation of Sunflower Growth under Different Water Regimes. Agron J. 101:509-521.
- Tsuji, G.Y., G. Uehara, and S. Balas. 1994. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) v3. Univ. of Hawaii, Honolulu.

- Urresstarazu, M. 2004. Tratado de cultivo sin suelo. Ediciones Mundi-Prensa, Universidad de Almería, Consejería de Agricultura y Pesca, tercera Edición, Madrid, 914 p.
- USDA. 1964. Estimation of direct runoff from strong rainfall. National Engineering Handbook, Washington D.C. USA. Section 4 Hydrology, Chapter 4: 1 – 24.
- Van Diepen, C.A., J. Wolf, H. Van Keulen, and C. Rappoldt. 1989. WOFOST: A simulation model of crop production. *Soil use and management* 5:16–24.
- Van Ittersum, M.K., P.A. Leffelaar, H. Van Keulen, M.J. Kropff, L. Bastiaans, and J. Goudriaan. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *Eur. J. Agron.* 18:201–234.
- Van Soest, P. J. 1994. Nutritional ecology of the ruminant. Cornell University Press. 2nd. Ed. 476 pp.
- Verburg, K., Bond, W.J., Hirth, J.R., Ridley, A.M., 2007. Lucerne in crop rotations on the Riverine Plains. 3*. Model evaluation and simulation analyses. *Aust. J. Agric. Res.* 58 (12), 1129 – 1141.
- Villalobos, F. J. and E. Fereres. 1990. Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies. *Agron. J.* 82:1153-1159.
- Walker, G.L., and J.L. Hatfield. 1979. Test of the stress-degree-day concept using multiple planting dates of red kidney beans. *Agron. J.* 71:967–971.
- Wanjura, D.F., and D.R. Upchurch. 2000. Canopy temperature characterizations of corn and cotton water status. *Trans. ASAE* 43:867–875.
- Williams, J. R. 1994. The EPIC Model. U.S. Department of Agricultural Research Service Grass land, Soil and Water Research Laboratory. Temple, Texas. U.S.A. s.p.
- Willmott, C. J. 1984. On the evaluation of model performance in physical geography. In *Spatial Statistics and Models*, Gaile GL, Willmott CJ (eds). D. Reidel: Boston. 443–460.
- Wiegand, C.L., and L.N. Namken. 1966. Influences of plant moisture stress, solar radiation, and air temperature on cotton leaf temperature. *Agron. J.* 58:582–586.
- Wratt, D.S., A. Tait, G. Griffiths, P. Espie, M. Jessen, J. Keys, M. Ladd, D. Lew, W. Lowther, N. Mitchell, J. Morton, J. Reid, S. Reid, A. Richardson, J. Sansom, and U. Shankar. 2006. Climate for crops: Integrating climate data with information about soils and crop requirements to reduce risks in agricultural decision-making. *Meteorol. Applic.* 13: pp 305–315.
- Wright, J.L. 1982. New evapotranspiration crop coefficients. *J. irrig. and Drain. Div., ASCE*, 108 (IR2): 57-74.
- Yaacov Bar Am. 2002. “El cultivo en suelo de las variedades de tomate, bajo condiciones de invernadero.” En: Curso sobre producción intensiva de hortalizas. Ministerio de Agricultura y desarrollo Rural, Asohofrucol, Corpoica, C.I. Tibaitatá, Mosquera. pp. 4-19.
- Yachiyo engineering Co. Ltd. y Asia Air Survey Co. Ltd. 2002. The study on the sustainable groundwater development in Bogotá plain in the republic of Colombia. Japan International Cooperation Agency, Water Supply and Sewerage Company of Bogotá in the Republic of Colombia. Interim Report. Bogotá. 3 -173 p.

Zhang, L., R. Lemeur, and J.P. Goutorbe. 1995. A one-layer resistance model for estimating regional evapotranspiration using remote sensing data. *Agric. For. Meteorol.* 77:241–261.

ANEXO A. PERFIL TAXONÓMICO DE LA SERIE DE SUELOS EN LA QUE SE DESARROLLARON LOS EXPERIMENTOS¹

Los suelos de los experimentos pertenecen al Complejo Pachic Haplustands – Humic Haplustands – Fluventic Dystrutepts. Símbolo RMQ. Fases RMQa, RMQb.



Figura A.1 Terraza del paisaje de planicie fluvio lacustre en clima ambiental frío y seco. Municipio de Mosquera. (Foto: Terán, C. 2008).

¹Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC) 2000. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) e IGAC, Subdirección de agrología. Bogotá, D.C., 901 p.

La clasificación taxonómica de estos suelos predominantes en un 14% en el departamento de Cundinamarca es: Orden: Andisol; Suborden: Ustands; Grangrupo: Haplustands, Subgrupo: Pachic Haplustands.

Los suelos pertenecientes a esta unidad cartográfica se localizan en los municipios de Sibaté, Soacha, Mosquera y Madrid (Cundinamarca, Colombia), entre 2000 y 3000 msnm. El clima ambiental es frío y seco, caracterizado por temperaturas entre 12 y 18 °C y precipitaciones promedio anual entre 500 y 1000 mm.

Esta unidad ocupa la posición de terrazas del río Bogotá, el relieve es ligeramente plano a ligeramente inclinado con pendientes que varían entre 1 y 5% (**Figura A.1**).

Estos suelos han evolucionado en su mayoría a partir de ceniza volcánica, son profundos a muy profundos, bien a moderadamente bien drenados y de texturas finas a moderadamente gruesas. El déficit de humedad (clima ambiental frío seco) representa un limitante para el establecimiento de ciertos cultivos agrícolas.

Tabla A.1 PERFIL No. MU – 1.

Fecha:	11/06/1996		
Taxonomía:	Pachic Haplustands		
Símbolo:	RMQa		
Localización Geográfica:	Departamento:	Cundinamarca	Municipio: Sibaté
Sitio:	La Colonia, Beneficiencia de Cundinamarca		
Altitud:	2570 m		
Coordenadas Geográficas:	Latitud:	4°29'52"	Longitud: 74°15'23"
Fotografía aérea:	74 Vuelo:	C - 2520	Faja: 11 Plancha: 246
Paisaje:	Planicie	Tipo de relieve: Terraza	
Relieve:	Ligeramente plano	Pendiente:	2%
Material Parental:	Ceniza volcánica		
Clima ambiental:	Frío y seco		
Precipitación promedio anual:	843 mm		
Temperatura promedio anual:	14 °C		
Clima edáfico:	Isomésico, ústico		
Drenajes:	Interno:	medio,	Externo: lento, Natural: Bien drenado
Profundidad efectiva:	Muy profunda		
Horizontes diagnóstico:	Epipedón:	úmbrico;	Endopedón: cámbico
Uso actual:	Ganadería extensiva		
Limitantes de uso:	Ninguno		
Vegetación natural:	Pastos naturales		
Descrito por:	Gutiérrez, J y Ibarra, C.		

El Orden Andisol se presentan en áreas que han recibido aportes significativos de ceniza volcánica, son profundos, ricos en materia orgánica y de perfiles A/B/C; evolucionan en sectores de paisaje montañoso los pisos térmicos muy frío, frío y medios, húmedos y muy húmedos. Los regímenes

edáficos de humedad y temperatura permiten clasificación dentro de los Subórdenes Cryands, Udands y Ustands.

Los suelos Ustands cumplen en todas sus partes con los conceptos del Suborden, por tanto se clasifican a nivel de Gran Grupo como Haplustands, algunos poseen epipedones de color negro y espesor superior a 50 cm, con lo cual se incluyen en el Subgrupo Pachic Haplustands, (RMQ).

Estos suelos se clasifican en un Paisaje de Planicie; Tipo de relieve: Terrazas; Material Parental: Mantos de ceniza volcánica sobre depósitos clásicos hidrogénicos; y Clima: Frío seco.

La unidad cartográfica está integrada por los suelos Pachic Haplustands (**Figura A.2**) en una proporción estimada del 35%, Humic Haplustans en un 35% y Fluventic Dystrustepts en el 30% restante de la unidad. Con un área de 15.196 ha.

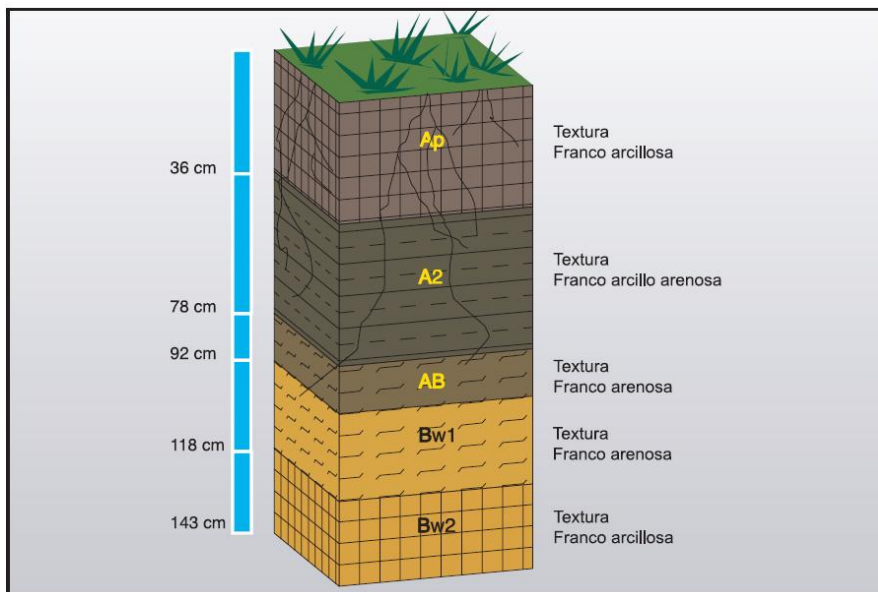


Figura A.2 Suelos Pachic Haplustands, perfil MU-1.

Tabla A.2 Descripción del perfil MU-1.

00 - 36 cm Ap	Color en húmedo pardo muy oscuro (10YR2/2); textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares mediana, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado no pegajosa, no plástica; pocos poros finos; abundantes raíces finas y medianas; abundante actividad de macroorganismos; límite gradual, ondulado; pH: 5.6.
36 - 78 cm A2	Color en húmedo negro (10YR2/1); textura franco arcillo arenosa; estructura granular fina, fuerte; consistencia en húmedo friable, en mojado no pegajosa, no plástica; frecuentes poros finos y medianos; abundantes raíces finas y medianas; abundante actividad de macroorganismos; fuerte reacción al NaF; límite gradual, ondulado; pH: 6.0.
78 - 92 cm AB	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2), mezclado con pardo muy oscuro (10YR2/2) en un 30%; textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares fina y mediana, moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; abundantes poros finos y medianos; frecuentes raíces finas; abundante actividad de macroorganismos; reacción violenta al NaF; límite abrupto, plano; pH: 6.3.
92 - 118 cm Bw1	Color en húmedo pardo amarillento (10YR5/6); textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares gruesa, fuerte; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa, ligeramente plástica; abundantes poros finos y medianos, pocos gruesos; pocas raíces finas y medianas; frecuente actividad de macroorganismos; reacción fuerte al NaF; límite claro, plano; pH: 6.2.
118 - 143 cm Bw2	Color en húmedo pardo amarillento claro (10YR6/4); textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares gruesa, fuerte; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa, plástica; frecuentes poros finos, medianos y gruesos; pocas raíces finas y medianas; poca actividad de macroorganismos; fuerte reacción al NaF; pH: 6.2.

Tabla A.3 Propiedades físicas de los suelos.

Número Perfil	Profund. cm	Nomenc.	Granulometría %			Clase Textural	Densidad		Porosidad %			Humeda d Aprox. %	Punto de Saturac. %	Tensiones (bar)			
			Arena	Limo	Arcilla		Real	Aparente	Micro	Macro	Total			0,3	1	5	15
MU - 1	0 - 36	Ap	38	32	30	FAr	2,15	0,72	46,73	19,78	66,51	39,23	111,11	78,1	61,8	48,3	38,8
	36 - 78	A2	54	24	22	FArA	2,2	0,68	48,29	20,8	69,09	28,32	103,65	72,4	59,3	49,2	44,1
	78 - 92	AB	76	16	8	FA	2,21	0,64	53,04	18	71,04	24,83	139,29	104	97,5	83,6	79,1
	92 - 118	Bw1	76	16	8	FA	2,37	0,74	68,78	0	68,78	28,3	120,3	92,5	84,2	72,3	64,2
	118 - 143	Bw2	44	20	36	FAr	2,35	0,6	55,77	18,69	74,47	31,47	146,55	110	102	86,2	78,3

Tabla A.4 Propiedades químicas de los suelo.

No. Perfil	Profundidad cm	Nomenc.	CICA meq/100gr	CICE meq/100gr	CICV meq/100gr	Ca meq/100gr	Mg meq/100gr	K meq/100gr	Na meq/100gr	Sat.Bases %	CO %	P ppm	pH 1.1
MU - 1	0 - 36	Ap	53,4	13,9	39,5	12,4	1,3	0,10	0,1	26,03	10,01	8,0	5,6
	36 - 78	A2	25,8	16,5	9,3	15,0	1,4	0,04	0,1	64,11	7,99	4,0	6,0
	78 - 92	AB	44,3	6,4	37,9	5,5	0,8	0,02	0,1	14,49	4,73	3,0	6,3
	92 - 118	Bw1	32,7	3,1	29,6	2,5	0,5	0,01	0,1	9,51	1,64	3,0	6,2
	118 - 143	Bw2	32,9	4,0	28,9	3,1	0,7	0,01	0,2	12,19	1,51	7,0	6,2

Tabla A.5 Análisis especiales para Andisoles.

No. Perfil	Profundidad cm	Nomenc.	Espesor				Retención PO4	Índice Melánico
			Horizonte cm	Fe	Al	Al+1/2Fe		
MU - 1	0 - 36	Ap	36	1,86	5,36	6,29	92	1,6
	36 - 78	A2	42	2,03	6,8	7,82	97	-
	78 - 92	AB	14	2,32	13,44	14,6	-	-
	92 - 118	Bw1	26	1,7	13,24	14,09	-	-
	118 - 143	Bw2	25	1,56	15,44	16,22	-	-

Los suelos del subgrupo Pachic Haplustands (perfil de la **Figura A.2**) son de evolución moderada a baja (a partir de ceniza volcánica), muy profundos, bien drenados y de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas.

Tienen una distribución de horizontes Ap (0-36 cm de profundidad), A2 (de 36-78 cm), AB (78-92 cm), Bw1 (92-118 cm), Bw2 (118-143 cm). El primer horizonte (Ap) es pardo o muy oscuro, de textura franco arcillosa y estructura blocosa subangular moderadamente desarrollada; el AB es negro, de textura franco arcillo arenosa y estructura granular fuertemente desarrollada; el AB es de colores pardo grisáceo muy oscuro y pardo muy oscuro, textura franco arenosa y estructura blocosa subangular moderadamente desarrollada; el Bw 1 es pardo amarillento, de textura franco arenosa y estructura blocosa subangular desarrollada; el último horizonte reportado (Bw2) es pardo amarillento claro, de textura franco arcillosa y estructura blocosa subangular fuertemente desarrollada (**Figura A.2**)

Son suelos de reacción mediana a ligeramente ácida, alta capacidad de intercambio catiónico, baja saturación de bases, contenidos bajos de magnesio, potasio, fósforo y medios a altos de calcio; la fertilidad de estos suelos es moderada.

El proceso específico de los suelos con cenizas volcánicas es el de la Andolización, que consiste en la transformación de los materiales piroclásticos para generar productos especialmente alofánicos, los cuales establecen uniones estables con los compuestos húmicos, produciendo una melanización superficial, mediante la acumulación de compuestos órgano-minerales. Las características y propiedades de los Andisoles están estrechamente asociadas con los procesos evolutivos que los tipifican. Estos pueden integrarse en el concepto de Andolización, con dos subprocesos específicos relacionados fundamentalmente con la formación de Al - humus, de preferencia en los epipedones, y la generación de productos alofánicos en los endopedones. El epipedón Melánico, máximo grado del proceso de Andolización, aparece con frecuencia en los suelos de Cundinamarca en los pisos térmicos medio, frío y muy frío.

ANEXO B. LA SABANA DE BOGOTÁ COMO ECOSISTEMA EXPERIMENTAL

B.1 Justificación

Para el planteamiento de la presente propuesta se tuvo en cuenta que los sistemas de ganadería de leche especializada tienen especial importancia en la SB, el cual es un entorno agrícola del trópico alto, con altas y prometedoras posibilidades económicas, por su potencialidad biofísica, cercanía al principal centro de consumo del país, buenas vías y comunicaciones y altos niveles de suministros y servicios.

Otro de los temas de interés es la identificación actual de la región de la SB desde el punto de vista biofísico, con el fin de establecer a grandes rasgos principalmente el nivel de información existente y la conformación de la región, como información básica para la sustentación y extrapolación de las variables no conservativas o menos conservativas de las especies estudiadas.

También se observaron los aspectos de la agroclimatología de la región con especial énfasis en los recursos hídricos y en la potencialidad del uso del agua para la producción agrícola.

En este resumen se presenta lo relativo a los aspectos generales de la región de la SB, para posteriormente en el capítulo siguiente, adentrarse en los avances de la modelación de la biomasa a partir del agua y en el capítulo de metodología tener en cuenta la relación entre el entorno del ecosistema con y su incidencia tanto en las variables y parámetros no conservativos como conservativos de las especies de estudio.

B.2 La cuenca de sabana de Bogotá

La región de la Sabana de Bogotá (SB) está compuesta por la cuenca alta del río Bogotá, la cual está constituida por varias sub-cuencas de ríos que tributan al río Bogotá, antes y durante el transcurso del río en la Sabana. La región comprende desde el nacimiento del río hasta el sitio denominado “salto del Tequendama”, en donde se regula mediante las compuertas de Alicachín.

La **Figura B.1**, muestra la ubicación geográfica de la región de la Sabana de Bogotá.

B.2.1 Descripción General



Figura B.1 Localización geográfica de la región de la Sabana de Bogotá (Colombia).

La región de la SB, está situada en el centro de Colombia dentro del departamento de Cundinamarca, entre las coordenadas 4°05' a 5°00' de Latitud Norte, y 73°50' a 74°15' de Longitud al Oeste de Greenwich. (Figura B.1).

del Neusa), Teusacá, Frío, Chicú, Juan Amarillo, Fucha, Tunjuelito (embalse de Chisacá y la Regadera), Balsillas, Soacha, Muña (embalse del Muña).

La Figura B.2 Muestra el sistema hidrográfico de la cuenca alta del río Bogotá en la que se observan la ubicación topológica de los ríos y embalses así como las áreas urbanas representadas por las zonas en gris.

B.2.2 Administrativa

La SB hace parte del entorno administrativo del Distrito Capital aunque lo supera en área. Ubicado dentro del departamento de Cundinamarca, en la sabana se encuentra la ciudad de Bogotá, capital de la República de Colombia y del departamento de Cundinamarca, sin embargo, éste último no tiene jurisdicción administrativa sobre este territorio.

B.2.3 Complejo Físico

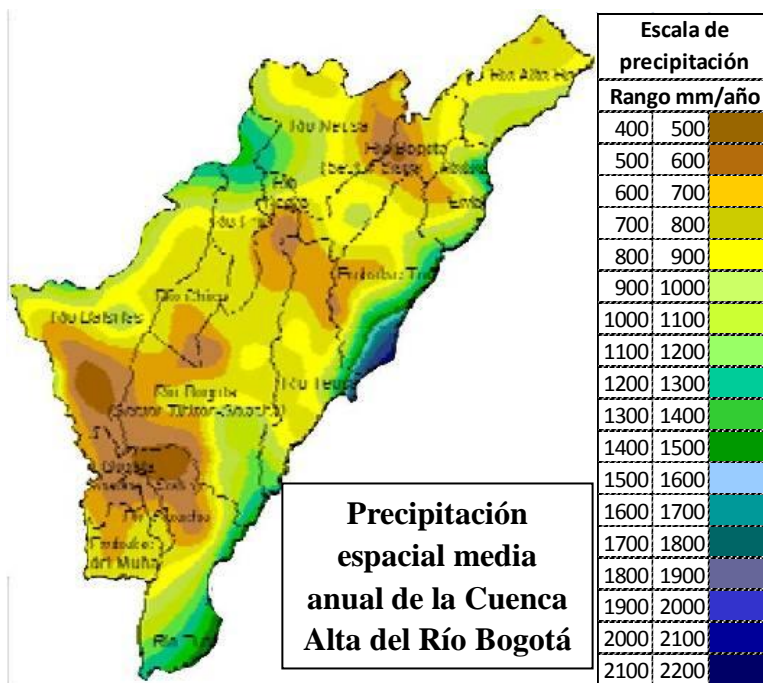


Figura B.3 Precipitación media anual en la cuenca alta del río Bogotá¹.

¹ Fuente: CAR., (2006)

B.2.3.1 Morfología

La SB, está compuesta por formaciones del cuaternario entre las que sobresalen: La Formación Sabana, que está constituida por rocas de permeabilidad primaria no consolidadas y tienen mala permeabilidad. Los aluviones y los abanicos aluviales que están compuestos por arenas, gravas, limos y arcillas y que son suelos con buena permeabilidad. IGAC-ORSTOM, (1984).

B.2.3.2 Litofases y suelo

Geológicamente, en el periodo cuaternario los procesos de erosión y deposición fueron los que modelaron la actual forma tanto del Altiplano de Bogotá como de la Cordillera, donde se acumularon grandes cantidades de sedimentos terciarios. La litología está formada por depósitos lacustres y fluvio-glaciares y sedimentos epicontinentales, areniscas, lutitas negras y calizas dominantes, predominando los suelos Andisoles en la mayor parte de la región, es importante mencionar que estos suelos han recibido altos aportes de cenizas volcánicas y son ricos en materia orgánica, IGAC, (2000) (Ver Anexo A Suelos).

B.2.3.2 Clima

Debido a su situación geográfica, se encuentra en la zona de influencia de la circulación atmosférica tropical que se caracteriza por: - Núcleos de altas presiones, localizados en cada hemisferio. – Una faja de bajas presiones denominada Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) que se desplaza de Norte a Sur siguiendo el movimiento aparente del sol.

En el transcurso del año la temperatura media mensual no tiene variaciones significativas (de 0.8°C a 1.1°C), lo que es normal si se considera la situación geográfica tropical de la zona.

La Figura B.3 Presenta la situación espacial de la precipitación en la SB, la cual registra valores desde 400 a 2200 mm.año⁻¹, destacándose como las zonas de menor nivel de lluvias la subcuenca del río Soacha y parte de las subcuencas del río Bogotá sector Salto–Soacha, embalse del Muña, río Bogotá sector Tibitoc–Soacha y río Balsillas. La mayor precipitación se registra en los extremos orientales de las subcuencas del embalse de Tominé y río Teusacá. CAR, (2006).

Climatológicamente corresponde al piso térmico frío, con temperaturas anuales que oscilan de los 12°C a los 18°C, se extiende desde los 2000 a los

3000 msnm. y al piso térmico de páramo con temperaturas inferiores a los 12°C, en altitudes superiores a los 3000 msnm.

La Tabla B.1 presenta la caracterización climática general de la región.

Tabla B.1 Principales Características del clima de la cuenca alta del río Bogotá

Elemento del clima	Valor medio
Temperatura media anual	14.0°C
Temperatura máxima media anual	19.9°C
Temperatura mínima media anual	8.2°C
Temperatura mínima	5.2°C
Presión atmosférica	152 mbar
Humedad relativa media anual	72%
Precipitación media anual	1013 mm

B.2.4 Vegetación y usos del suelo

B.2.4.1 Vegetación actual

La distribución de la vegetación por pisos bio-climáticos corresponde al Andino, Andino alto y a Páramo.

- Piso Andino

Es una franja que se extiende entre los 2000 a los 3000 msnm.; la pluviosidad varía entre los 600 a los 1200 mm anuales y en las zonas altas es de 1200 a 2000 mm.año⁻¹. La vegetación típica se caracteriza por la disminución del tamaño de los árboles en comparación a otros pisos de menor altitud. Las especies predominantes son: “canelo” (*Magnoliaceae sp.*), “arrayán” (*Mirtacea sp.*), “sietecuecos” (*Tibouchina sp.*), “riñón” (*Brunellia sp.*), “cape” (*Clusiaceae sp.*), etc.

El uso corresponde, básicamente, a ganadería y a cultivos transitorios de hortalizas y flores. En la parte alta y sobre los flancos también se encuentran cultivos temporales, papa (*Solanum tuberosum*), hortalizas, y pastos.

- Piso Alto Andino

Se presenta en las partes altas de los cordones montañosos que rodean a la cuenca alta del río Bogotá. Se extiende desde los 3000 a los 3500 msnm. con precipitaciones que oscilan entre los 1200 a los 1500 mm.año⁻¹. La vegetación típica de este piso se representa por árboles de talla pequeña y algunas gramíneas.

Los árboles que forman relictos son principalmente el “palo colorado” (*Rosácea polylepis*), “encenillo” (*Weimannia tomentosa*), “romero” (*Alnus jorullensis*), “diente de león” (*Taraxacum officinale*), etc.

Las características climáticas no permiten un desarrollo intensivo de las actividades del hombre por lo que la producción agrícola es baja, representada sólo por el cultivo de papa.

- **Piso de Páramo**

Se caracteriza por la ausencia de árboles y abundancia de gramíneas, entremezcladas con arbustos y plantas en forma de cojines o almohadillas. La pluviosidad varía entre los 1500 a los 2000 mm anuales.

Las gramíneas que crecen en los prados del páramo forman densos manojos de hojas apretadas entre si y muy erguidas, pertenecientes a los géneros de *calamagrostis* y *festuca*. Los arbustos son pequeños y ramosos, con hojas pequeñas, alargadas y cubiertas de pelo en el envés o en ambas caras. Las especies predominantes son: “sangretoro” (*Rumex acetosella*), “carrielito” (*Castilleja fisifolia*), “chuite” (*Hypericum bratys*), “frailejón” (*Espeletia bogotansis*), “arnica” (*Senecio formosus*), “licopodio” (*Lycopodium contigum*) y “chusque” (*Chusquea sp.*). A pesar de las bajas temperaturas, la acidez del suelo y la alta humedad relativa, el hombre ha intervenido este piso básicamente con actividades ganaderas. Salvatierra y Pérez, (1997).

B.2.4.2 Vegetación potencial

En los últimos 18 años en la cuenca del río Bogotá se han perdido más de 9000 ha de páramo, muy probablemente, vegetación la cual se ha quemado y tumbado para el establecimiento de cultivos y pastos para ganadería. Acciones que van en detrimento de la calidad y cantidad de agua aprovechable para la cuenca y su población.

Han sin embargo aumentado en 3200 ha, los bosques primarios y secundarios, quizá a causa de abandono de tierras. Las plantaciones forestales, han tenido un pequeño auge, incrementándose desde 1985 al año 2003 en 6000 ha, viéndose una activación de este renglón económico.

Las zonas cubiertas con pastos han aumentado en 12.300 ha, especialmente en la parte alta de la cuenca del río Bogotá, probablemente por razones de extensión de la frontera agropecuaria.

Las área sin vegetación también han duplicado su superficie en las últimas dos décadas, hasta cubrir algo más de 5650 ha, se ha evidenciado este

fenómeno por el aumento de áreas mineras y de la desertificación de algunas tierras. CAR, (2006).

Los centros urbanos también manifiestan un alto crecimiento aumentando en 32.337 ha, por causa del desplazamiento de personas del campo a las cabeceras municipales y al crecimiento de la población.

Producción ganadera: Básicamente orientada a la lechería especializada. Caracterizado por una alta selección de razas y un buen grado de tecnificación. Esto ha sido contribuido por condiciones físicas favorables, red vial densa y la cercanía a los principales centros de consumo (especialmente a la ciudad de Bogotá) lo que facilita la comercialización del producto.

Se calcula que un 40% de la superficie total de la zona de estudio, correspondiente a la sabana de Bogotá, se encuentra cubierta con pastos para destino a la ganadería.

Producción minera: En la zona se realiza extracción de calizas y dolomita (Municipio de Guasca), lo cual ha contribuido a la deforestación.

Producción de flores: La floricultura se encuentra localizada principalmente al norte de la región, aunque ha venido expandiéndose sobre todo el altiplano de Bogotá debido a la presencia de una red vial en buenas condiciones como también a la proximidad del aeropuerto internacional. Los cultivos son básicamente transitorios ocupando una superficie aproximada del 10% del área total de estudio.

Vegetación natural: La intensa ocupación del terreno con fines agropecuarios ha significado una disminución muy significativa de los bosques naturales dando lugar a un porcentaje bastante apreciable de bosques secundarios y relictos de bosque natural intervenido. También es interesante observar agrupaciones de formaciones arbustivas, densas, con alturas que oscilan entre 1 y 4 metros del nivel del suelo.

Plantaciones forestales: La superficie cubierta con reforestaciones y plantaciones de coníferas y eucalipto es de considerable importancia en la región destinándose, básicamente, como cortinas rompevientos y para la producción de materia prima para la industria de la celulosa. Salvatierra y Pérez, (1997).

Aunque se realizó una revisión más exhaustiva de la región de estudio, en la que se incluyeron además aspectos de: características socioeconómicas, hidrología, caracterización de unidades hidrológicas y subcuencas, algunos cálculos hidrológicos generales, y análisis de la conformación de sistema

hidrológico, y erosión, no se han incluido en el presente documento para reducción de espacio.

Aunque la región ha sido estudiada previamente desde muchos puntos de vista, la estimación o determinación de la potencialidad de la producción de biomasa y en especial la determinación de las zonas o subregiones con posibilidades de producción de pasturas forrajes o praderas no han sido determinadas previamente, sin embargo Abril y González, (1999) realizaron un análisis agroclimático general de la región. Dicho trabajo fue basado en la metodología para la zonificación agroclimática de la región de la Mojana mediante el sistema de información geográfica Arc/Info, Terán et. al., (1998).

Salvatierra y Pérez, (1997), realizaron un análisis multitemporal de la cobertura vegetal de la SB, en el que encontraron los procesos de variación de la cobertura de la región comparando las imágenes de satélite Lansat TM de los años 1986 y 2001 reportando algunos de los resultados resumidos aquí.

