

**DINÁMICA DEL AGUA EN EL SUELO EN FUNCIÓN DEL MANEJO DE LA PAJA DE
CAÑA AZÚCAR MEDIANTE EL MODELO AGROAMBIENTAL APSIM**



TALISSA ALEJANDRA MOSQUERA SABOGAL

**UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**DINÁMICA DEL AGUA EN EL SUELO EN FUNCIÓN DEL MANEJO DE LA PAJA DE
CAÑA AZÚCAR MEDIANTE EL MODELO AGROAMBIENTAL APSIM**

TALISSA ALEJANDRA MOSQUERA SABOGAL

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR EL
TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO**

**ALTERNATIVAS DE MANEJO SOSTENIBLE DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN
LOS RECURSOS FITOGENÉTICOS, SUELO, AGUA, NUTRIENTES VEGETALES,
FITOPROTECCIÓN, POSCOSECHA Y AGROINDUSTRIA.**

**DIRECTOR
DAYRA YICEL GARCÍA RAMÍREZ**

**UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES
PROGRAMA DE INGENIERIA AGRONOMICA
Villavicencio, septiembre 2018**

Nota de aceptación

DAYRA YICEL GARCIA R.
Director de Tesis

AMANDA SILVA
Jurado

SERGIO PARRA
Jurado

Septiembre de 2018
Villavicencio – Meta

DEDICATORIA

Esta tesis es el resultado del esfuerzo conjunto de mi familia por tal motivo es dedicado a ellos gracias al aprendizaje, las aptitudes y valores que he recibido en casa es que podido lograr este proceso como profesional. De igual forma también es dedicado a todos los investigadores del mundo porque aprendí la importancia de explorar nuevos conocimientos ya sean teóricos, prácticos o científicos y se han ganado mi respeto por su constancia y trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecerle a Dios por el día a día, la salud y la sabiduría brindada.

A mi familia por acompañarme de manera incondicional, especialmente a mi madre por su perseverancia y a mi hermana Angélica Castaño Sabogal por enseñarme a creer que todo es posible si así te lo propones. A la familia Hernandez Medina por su apoyo y energía en todo mi proceso.

De igual forma quiero expresar mis sinceros agradecimientos al Comité Gestor del programa 26 de Becas de Verano del Centro Nacional de Pesquisa de Energía y Materiales de Campinas, Brasil por la oportunidad de aprender sobre el cultivo de caña de azúcar para Bioetanol, el conocimiento aprendido y aplicado sobre la importancia de la agricultura de precisión además de una herramienta como los simuladores de producción agrícola, a la doctora Simone T. Ruiz C y la ingeniera Daniele S. Henzler por su enseñanza y tiempo en el Laboratorio Nacional de Ciencia y Tecnología de Bioetanol.

Y que hubiese sido de este trabajo sin la instrucción de mi directora Dayra Yicel García con su orientación constante y tiempo.

'Haz lo que haga latir más fuerte tu corazón'
T.A.M.S.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Planteamiento del problema.....	11
1.2. Justificación.....	12
2. OBJETIVOS.....	13
2.2. Objetivo General.....	13
2.2. Objetivos específicos.....	13
3. MARCO TEORICO.....	14
4. METODOLOGÍA.....	19
5. RESULTADOS	21
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	23
6.1. Evaporación del suelo.....	23
6.2. Escorrentía acumulada.....	25
6.3. Contenido de agua extraída	27
6.4. Rendimiento.....	29
7. CONCLUSIONES.....	33
8. REFERENCIAS.....	34

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cantidades de residuos de paja de caña de azúcar sobre la superficie del suelo.....	20
Tabla 2. Características agronómicas para la simulación.....	20
Tabla 3. Caracterización físicoquímica en cada capa del suelo	21
Tabla 4. Parámetros hídricos por espesor del perfil del suelo: Punto de Marchites Permanente (pmp), Capacidad de Campo (cc) y Conductividad hidráulica (ks)	21
Tabla 5. Parámetros hídricos estimados para caña de azúcar – modelo APSIM.....	22
Tabla 6. Variables evaluadas por APSIM según cada tratamiento	22

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación del funcionamiento de APSIM.....	18
Figura 2. Evaporación del suelo acumulada simulado por APSIM.....	24
Figura 3. Balance hídrico de Boa Vista en el años de 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016	25
Figura 4. Escorrentía sobre la superficie del suelo simulada por APSIM.....	26
Figura 5. Contenido de agua extraída por la planta simado por APSIM.....	28
Figura 6. Precipitación vs Productividad/Rendimiento del Tratamiento 1 por ciclo.....	30
Figura 7. Precipitación vs Productividad/Rendimiento del Tratamiento 2 por ciclo.....	30
Figura 8. Precipitación vs Productividad/Rendimiento del Tratamiento 3 por ciclo.....	31

RESUMEN

El uso integral de caña de azúcar sin quema permite la optimización del proceso de cosecha y maximiza el balance de energía de la planta con el fin de aumentar la cantidad de biomasa disponible para ser convertido en etanol. Si bien la paja tiene un potencial en la industria, también es empleada como cubierta vegetal, siendo un manejo alternativo del suelo a las prácticas tradicionales como la quema de caña en bruto. Según resultados en cosechas del cultivo, se indica que el volumen de paja que queda en el campo varía entre 10 a 30 t ha⁻¹ de materia seca.(Dourado, 2013); cantidad que podría ser incorporada en el suelo mejorando sus propiedades fisicoquímicas.

Usando un modelo de computo llamado APSIM (The Agricultural Production Systems Simulator) se modeló el efecto de diferentes escenarios de coberturas de paja: 0% suelo desnudo; 50% de residuos en el suelo (8 t ha⁻¹); 100% de residuos en el suelo (16 t ha⁻¹) en algunos parámetros hidricos del suelo y de cosecha con información edafoclimática de Boa Vista Quirinópolis, estado de Goiás. Combinando los residuos con la fertilización nitrogenada, la dinámica del agua y la productividad de la caña de azúcar. Como resultado, los datos generados por la simulación demostraron que el manejo de paja como cobertura reduce la evaporación de agua en el suelo, aumentado el contenido de agua disponible para la plantación y los rendimientos sobre la caña de azúcar, especialmente en periodos de sequía, siendo acordes con ensayos similares en campo.

Palabras claves: Agua, caña de azúcar, paja, rendimiento, simulación.

ABSTRACT

The integral use of sugarcane without burning allows optimization of the harvesting process and maximizes the energy balance of the plant in order to increase the amount of biomass available to be converted into ethanol. Although straw has a potential in the industry, it is also used as a vegetative cover, being an alternative soil management to traditional practices such as the burning of raw cane. According to results in crop harvests, it is indicated that the volume of straw left in the field varies between 10 and 30 t ha⁻¹ of dry matter (Dourado, 2013); amount that could be incorporated into the soil improving its physicochemical properties.

Using a computer model called APSIM (The Agricultural Production Systems Simulator), the effect of different scenarios of straw mulch was modeled: 0% bare soil; 50% of residues in the soil (8 t ha⁻¹); 100% waste in the soil (16 t ha⁻¹) in some soil and crop water parameters with edaphoclimatic information from Boa Vista Quirinópolis, Goiás state. Combining waste with nitrogen fertilization, water dynamics and productivity of sugarcane. As a result, the data generated by the simulation showed that the management of straw as a cover reduces evaporation of water in the soil, increasing the water content available for planting and the yields on sugarcane, especially in periods of drought, being consistent with similar trials in the field.

Keywords: *simulation, straw, sugar cane, water, yield.*

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación hace referencia a la necesidad de aplicar software que permitan el modelamiento de cultivos con el fin predecir variables que disminuyan el riesgo de pérdidas económicas, productivas y ambientales.

Teniendo en cuenta que el agua es un factor esencial para elevar la productividad en diversos cultivos existen algunas herramientas que permiten simular la dinámica del agua como tipos de modelos, ya sean de simulación de cultivos específicos, por ejemplo, para trigo y maíz el CERES-Wheat, CORNGRO, SIMTAG, para banano el SIMBA, Swcrop para papa en condiciones tropicales, Swap para caña de azúcar, o por otro lado pueden ser genéricos. Los modelos genéricos pueden ser aplicados a varias especies mediante la utilización de parámetros específicos para cada cultivo: algunos de estos modelos son DSSAT, DAISY, SOILN, EPIC, WOFOST, CROPSYST STICS (Guarín, 2011), MACRO, ISAREG y entre estos APSIM-*The Agricultural Production Systems Simulator* el cual es un marco de modelación modular que ha sido desarrollado por su predecesora, la Unidad de Investigación de Sistemas de Producción Agrícola (APSRU) en Australia. APSIM fue desarrollado para simular procesos biofísicos en sistemas agrícolas, particularmente en lo que se refiere a los resultados económicos y ecológicos de las prácticas de manejo frente al riesgo climático (APSIM, 2018).

APSIM se estructura en torno a módulos de planta, suelo y gestión. Estos módulos incluyen una amplia gama de cultivos, pastos y árboles, procesos del suelo como el balance hídrico, transformaciones N y P, pH del suelo, erosión. APSIM resultó de la necesidad de herramientas que proporcionaran predicciones precisas de la producción de cultivos en relación con el clima, el genotipo, el suelo y el factor de gestión al tiempo que abordaban los problemas de gestión de recursos a largo plazo (APSIM, 2018).

En este caso se busca realizar una simulación que evalúe el efecto del manejo de paja de caña como cobertura sobre la dinámica del agua en el cultivo de caña de acuerdo a las cantidades de residuos (kg ha^{-1}) de paja sobre la superficie del suelo a través del modelo APSIM para conocer el impacto en la productividad del cultivo adoptando esta práctica agrícola en condiciones de estrés hídrico-sequía.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los residuos de cosecha en el cultivo de caña de azúcar como cobertura, es una nueva tendencia en el manejo del suelo, existe poca información sobre el uso adecuado de la paja de caña para optimizar los rendimientos en comparación con los sistemas que no adoptan ésta práctica en relación con la humedad que se preserva en el suelo, en donde es necesario definir qué cantidades proporcionan

mayores beneficios dependiendo de las diferentes condiciones edafoclimáticas y, con referencia a lo anterior, una de las incógnitas que se tiene en la industria es el efecto de ésta práctica alternativa en la productividad en condiciones de estrés hídrico por lo que se quiere conocer ¿Si se puede simular diferentes cantidades de cobertura de paja en relación al efecto que tiene en algunos parámetros hídricos y el rendimiento del cultivo de caña?.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Se emplea un modelo de simulación agrícola para anticipar las cantidades de residuo de paja como cobertura más convenientes y óptimas para el cultivo de caña de azúcar principalmente en condiciones de sequía, apoyando el proceso de la toma de decisiones en diversas disciplinas, áreas de diseño y manejo de la industria de bioetanol. De igual forma permite un mayor aprovechamiento de los recursos y el desarrollo de directrices de gestión de los mismos. Destacando que hoy más que nunca, el aumento de la producción de alimentos depende de la utilización prudente de los recursos. Además, cuestiones como el cambio climático, la variabilidad del clima, el suelo y el secuestro de carbono a largo plazo, efectos en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad del medio ambiente se han convertido en aspectos importantes (UGA,2008); esta investigación contribuye a hacer el cultivo más sostenible conociendo la dinámica y los efectos de los principales factores involucrados en el desarrollo agrícola tratando de minimizar los costos y obteniendo los mayores rendimientos posibles.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Simular el efecto de diferentes escenarios (% coberturas de paja) en algunos parametros hidricos del suelo y de cosecha.

2.2. Objetivos Específicos

Modelar los efectos de la paja de caña como cobertura sobre la superficie del suelo.

Comparar si los resultados obtenidos por el algoritmo APSIM es congruente con resultados de campo en condiciones similares.

Modelar variables de la dinámica del agua.

3. MARCO TEÓRICO

La caña de azúcar es uno de los principales cultivos del mundo, sembrada en más de cien países, y es una fuente económica importante en zonas rurales. De igual manera la biomasa obtenida como subproducto de la industria cañera constituye el mayor recurso desde todos los puntos de vista, ya que, en una tonelada de caña fresca, aproximadamente, el 32 % es de bagazo integral y el 28 % de paja y cogollo de caña (Residuo Agrícola Cañero, RAC), los cuales son la biomasa más importante que se procesa (Dopíco Ramírez et al., 2013).

Se destaca que la paja constituye una fuente de energía renovable que además de sus fines energéticos otra vía de utilización es en sistemas agroambientales al incorporarse como cobertura en el suelo.

Brasil siendo el mayor productor mundial de caña de azúcar; azúcar y etanol de caña, ha sido también un modelo en el uso de las energías renovables, en particular, para la producción de biocombustibles (Balat, 2011) significativo a nivel social y ambiental; recogió cosecha de caña (2016-2017) con un récord de 694.54 millones de toneladas del producto, un crecimiento del 4.4 % frente a la producción de la última cosecha. (CONAB, 2016).

En Colombia, la producción de caña de azúcar es durante todo el año, se siembra principalmente en el valle del río Cauca con una alta densidad de molinos de caña de azúcar y destilerías de etanol. Colombia produce cerca de 34.900 toneladas métricas de caña de azúcar al año, siendo dentro de América del Sur uno de los principales productores de azúcar de todo el mundo en cuanto a rendimientos.

El Ministerio de Agricultura en su último informe de rendición de cuentas del 2016 al 2017 reporta que la producción de caña para molienda alcanzó 23,2 millones de toneladas. El rendimiento promedio nacional de azúcar por hectárea fue de 15,8 t/ha de azúcar crudo para el periodo 2013-2017, el más alto de los principales países productores, seguido por Australia (12,2 t/ha) y Guatemala (11,5 t/ha) como consecuencia de la transferencia de tecnología y la aplicación de agricultura específica por sitio, realizados por el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar en Colombia - CENICAÑA. La producción de azúcar llegó a 2.091.218 toneladas. La producción de bioetanol se redujo 3%, llegando a 415,6 millones de litros, caídas que se explican por factores climáticos y la incertidumbre sobre la producción de biocombustibles. Por su parte, las ventas de azúcar en el mercado nacional fueron de 1.457.757 toneladas, y las exportaciones registraron 518.423 toneladas, cayendo 28%, debido a las dificultades para mantener los niveles de producción y el menor contenido de sacarosa. Los principales destinos de las exportaciones de azúcar fueron Perú (41%), seguido por Chile, Ecuador y Estados Unidos (9%). (MAD, 2017).

Según balance del sector azucarero colombiano la producción de caña molida para el 2017 fue de 22,220,952 t, con una producción de azúcar de 2,033,471 t de las

cuales se exportaron 648,951 t. En alcohol se obtuvieron 334,623 litros de los cuales se vendieron 333,141 litros. (Asocaña,2017). Las ventas corresponden al volumen de etanol con adición de aproximadamente 2% de desnaturalizante (gasolina) destinadas para atender el mercado de oxigenación. (Asocaña,2017).

Con la creciente capacidad de las computadoras y la inmensa investigación en el campo de la ciencia de la computación, se otorgan nuevas herramientas en la Agricultura de Precisión en donde los modelos de simulación es una de las herramientas más importantes y más interdisciplinarias; los modelos de simulación de cultivos tienen varias aplicaciones actuales y potenciales en respuesta a temas relacionados con la investigación, el manejo de cultivos y la planificación. Durante tres décadas esos modelos se han aplicado, en lo fundamental, en países de clima templado por los beneficios que aportan. En los países altamente desarrollados la simulación es una herramienta principal en los procesos de toma de decisiones, el manejo de empresas y la planeación de la producción (Hernandez & Soto, 2009).

El uso de modelos, es un instrumento muy común en el estudio de sistemas de toda índole. Los modelos son especialmente importantes, porque ayudan a comprender el funcionamiento de los sistemas. El empleo de modelos facilita el estudio de los sistemas, aun cuando estos puedan contener muchos componentes y mostrar numerosas interacciones, como puede ocurrir si se trata de conjuntos bastante complejos y de gran tamaño. El trabajo de modelación constituye una actividad técnica como cualquiera otra, y dicha labor puede ser sencilla o compleja, según el tipo de problema específico que deba analizarse (Wadsworth,2008).

La modelación comenzó a tener importancia en agronomía y en otras áreas biológicas, dada su capacidad de suministrar información en un enfoque sistemático de todo el sistema biológico o de una parte, como es el sistema de producción agrícola (Guevara, 2007). Esta herramienta puede ser útil para el desarrollo de estrategias de gestión, la intervención y relevante para la adquisición de decisiones agrícolas (Nassif et al., 2012). Una evolución importante ha sido considerar al productor como un sujeto que participa en la modelación y no como un componente más del sistema a modelarse, en el denominado modelaje participativo. En Colombia los procesos que se aproximan a este modelaje se orientan hacia las experiencias de cartografía participativa y de sistemas de alerta temprana participativa pero muy puntuales, los cuales se ven limitados al momento de categorizar y sistematizar la información para la incorporarla en modelos de simulación (Fernández, 2013) a diferencia de un país como Brasil que cuenta con avances tecnológicos en la sistematización de los datos recopilados en campo. En Colombia las técnicas de simulación de crecimiento de los cultivos han sido utilizadas especialmente por los centros de investigación agrícola, haciendo uso de modelos existentes en el mundo, ya que en Colombia no se ha desarrollado un modelo de simulación propio (Fernández, 2013).

3.1. Modelos de predicción agroambientales

Según informe del IDEAM son:

- 3.1.1. El modelo de Desnitrificación -Descomposición (*Denitrification - Decomposition / DNDC*) es un modelo de simulación basado en los procesos de la bioquímica de carbono y nitrógeno en diversos agroecosistemas. El modelo puede ser utilizado para predecir el crecimiento del cultivo, la temperatura del suelo y los regímenes de la humedad, la dinámica del carbono del suelo, la lixiviación de nitrógeno y las emisiones de gases como el óxido nitroso (N_2O), el óxido nítrico (NO), nitrógeno (N_2), amoníaco (NH_3), el metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2)².
- 3.1.2. *DSSAT (Decisión Support System for Agrotechnology Transfer)* por sus siglas en inglés, es un modelo predictivo, determinístico, diseñado para simular el crecimiento del maíz, la dinámica del nitrógeno en el suelo, el comportamiento del agua y la temperatura a escala de campo; también se utiliza en investigación básica y aplicada sobre los efectos del cambio climático global (Ospina J. 2006). El modelo DSSAT (Sistema de Apoyo para la toma de Decisiones en la Transferencia Agrotecnológica) consta de seis módulos para simular el crecimiento de 16 cultivos de importancia económica y ha demostrado alta confiabilidad bajo distintas condiciones de clima, suelo y manejo (Jones & et Al, 1993 citado por Giraldo & et Al, 1998).
- 3.1.3. *CROPWAT*: Herramienta de apoyo a las decisiones desarrollada por la División de Tierras y Aguas de la FAO. CropWat 8.0 para Windows es un programa de computación que puede ser usado para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos y de sus requerimientos de riego en base datos climáticos y de cultivo ya sean existentes o nuevos. Además, el programa permite la elaboración de calendarios de riego para diferentes condiciones de manejo y el cálculo del esquema de provisión de agua para diferentes patrones de cultivos.
- 3.1.4. *CropSyst (Modelo de Simulación de Sistemas de cultivo)* es un modelo de simulación de crecimiento de multi-cultivo, multi-anual, el cual fue desarrollado con énfasis en una interfaz fácil de usar, y con un enlace al software SIG y un generador de tiempo (Stockle, 1996 citado por Fernández, 2013).
- 3.1.5. *WOFOST* es una herramienta para el análisis cuantitativo del crecimiento y producción de los cultivos anuales. El crecimiento del cultivo es simulado en base a los procesos ecofisiológicos. (Boogaard & De Wit, 2011)

- 3.1.6. *AquaCrop* es un modelo descriptivo que simula la biomasa y el rendimiento potencial cosechable de un cultivo en respuesta a la disponibilidad de agua. Es un modelo que estima el rendimiento de cultivos herbáceos donde se incluyen forrajes, vegetales, frutas, aceite, raíces y tubérculos.
- 3.1.7. Modelo *ET0 CALCULATOR* es un software desarrollado por la División de Tierras y Aguas de la FAO. Su función principal es la de calcular la evapotranspiración de referencia (ET₀) de acuerdo con las normas de la FAO.
- 3.1.8. El modelo *SIMPROC (Simulador de la Productividad de Cultivos)*, fue desarrollado por el centro AGRIMED de la Universidad de Chile y utilizado en la Primera Comunicación Nacional de Cambio Climático. El modelo SIMPROC simula el crecimiento y producción de los cultivos, integrando los principales procesos ecofisiológicos y su regulación climática.
- 3.1.9. AGROMET 2.9.0.3 es un modelo agroclimático desarrollado por Crespo G. en México. Este modelo incluye: Estimación de rendimientos potenciales de cultivos, Cálculo de constantes solares como: hora y puesta del sol, duración del día, Radiación teórica extraterrestre, radiación fotosintéticamente activa, Cálculo de calendario de riego de cultivos, Cálculo del Índice de Satisfacción de las necesidades hídricas de cultivos, Cálculo de horas frío, Unidades frío (UF), Estimación de datos climáticos faltantes, y modelos para estimar temperaturas y humedad relativa horarias.
- 3.1.10. Por último, se nombra el modelo *APSIM (The Agricultural Production Systems Simulator)* que simula los efectos de las variables ambientales y las decisiones de gestión sobre la producción agrícola, los beneficios y las variables ambientales (por ejemplo, la erosión del suelo) APSIM incluye pastos, ganado, árboles y más de 30 cultivos.

APSIM contiene una serie de módulos para simular el crecimiento, el desarrollo y el rendimiento de cultivos, pastos y bosques y sus interacciones con el suelo. Actualmente existen módulos de cultivo para cebada, canola, garbanzo, algodón, caupí, cáñamo, frijol, altramuza, maíz, mijo, mucuna, frijol mungo, frijol blanco, maní, guisantes, sorgo, soja, girasol, trigo y caña de azúcar. Actualmente se hallan módulos autónomos, como cultivos individuales, cada uno separado con sus correspondientes componentes con la capacidad de conmutar entre procesos opcionales dentro de sub-módulos o entre sub-módulos completos opcionales facilitando el análisis comparativo lógico de enfoques de modelados. (Keating, et al., 2003)

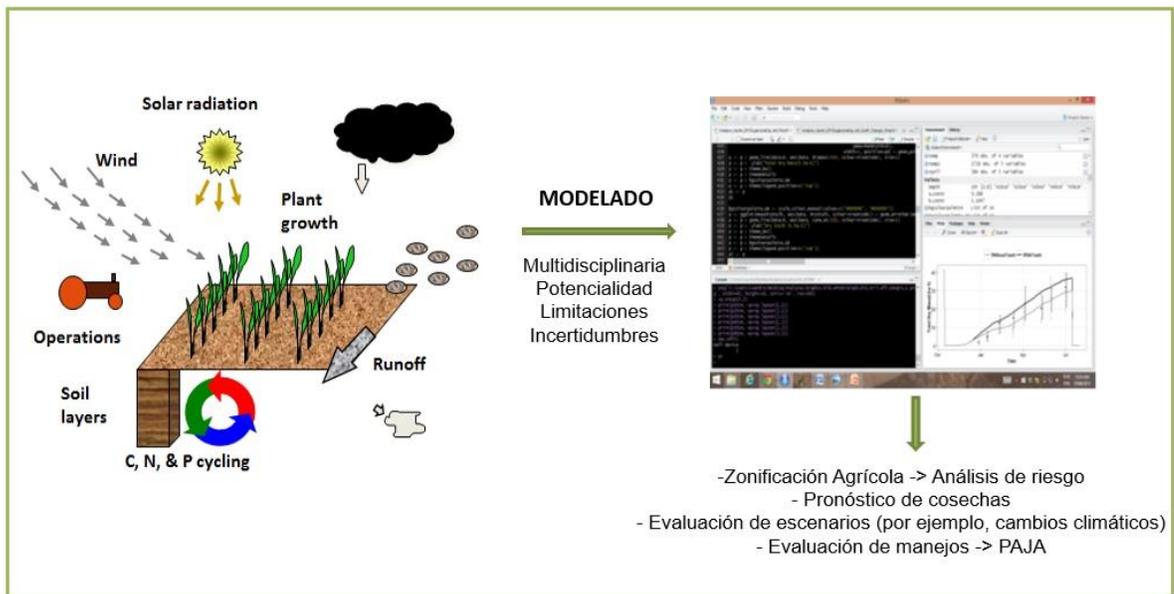


Figura 1. Representación del funcionamiento de APSIM (Herramienta científica basada en la representación simplificada de un sistema a través de algoritmos).

El modelo simula el crecimiento, el uso del agua, la dinámica de nitrógeno (N), peso seco de azúcar y fresco, la concentración de biomasa rendimiento de la caña para los cultivos de plantas y de socas en respuesta al clima, el suelo, manejo y los factores genotípicos (Keating, 1998). APSIM es un modelo utilizado con credibilidad para simular los procesos clave de la interacción suelo-planta-atmósfera (Keating, et al., 2003).

4. METODOLOGÍA

La simulación se realizó recopilando información de campo, condiciones climáticas, propiedades físicas y químicas del suelo brindada por el Laboratorio Nacional de Ciencia y Tecnología de Bioetanol-CTBE del área ubicada en las coordenadas 18° 32' S y 50° 26' O en Quirinópolis-estado de Goiás con una altitud de 500 msnm, una precipitación anual de 1400 mm, un tipo Typic hapludox.

El modelo opera en un paso de tiempo diario en respuesta a los datos meteorológicos de entrada, características del suelo y acciones de manejo del cultivo; el crecimiento del dosel de hojas usa la radiación interceptada para producir el asimilado. Los procesos fisiológicos de los cultivos representados en el modelo responden al ambiente de radiación y temperatura y, son sensibles al suministro de agua y nitrógeno.

Los datos climáticos fueron obtenidos directamente de la Estación Meteorológica de la Planta Boa Vista (75860-000) tomando radiación solar (w/m^2), temperatura máxima y mínima ($^{\circ}C$), velocidad del viento ($m\ s^{-1}$), humedad relativa (%) y precipitaciones (mm) ingresados a la plataforma. Además los mismos se procesaron para obtener una de las variables que APSIM solicita: temperatura diaria del suelo, calculada con el Promedio Anual de Temperatura (TAV) y Amplitud Anual de la Temperatura Media Mensual (AMP) a través del programa Microsoft DOS en primera instancia.

El segundo paso en el procesamiento de datos a la plataforma para la simulación se inicia en base a la caracterización físicoquímica (Ver Tabla 3) del suelo, pasando las unidades aplicando la función de pedotransferencia (Barros et al., 2013) para obtener los parámetros hídricos del suelo (capacidad de campo, punto de marchites permanente y conductividad hidráulica) ajustados a través del modelo de Van Genuchten (1980) para ser ingresados y analizados por la plataforma en el módulo SOILWAT.

Las propiedades físicas del suelo se cuantificaron en muestras tomadas en zanjas de hasta 0,40 m de profundidad dividida en 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; De igual forma los registros de agua disponible obteniendo lecturas del potencial de la matriz de suelo (kPa) y la temperatura ($^{\circ}C$) medidos cada 6 horas las cuales seguidamente también se indicaron en la plataforma de APSIM.

En Surface Organic se seleccionó el tipo de residuo, es decir, paja de caña de azúcar y se plantearon las tres escenarios como si los residuos se dejaran sobre la superficie del suelo con características edafoclimáticas constantes (Ver Tabla 1). En Inicial Nitrógeno se cambió según el patrón de fertilización en campo para caña de azúcar y, en Fertilice se eligió a los dos meses con 120 kg ha⁻¹ (Ver Tabla 2) y

la fecha de siembra debido a la correlación entre agua en el suelo y el efecto de paja en la planta.

Las variables seleccionadas a evaluar son la evaporación del suelo acumulada (*es*) la escorrentía acumulada (*Runoff*), contenido de agua extraída (*esw*), y rendimiento (*Canefw*) como resultado a ser analizados por el modelo, las cuales se simulan configurando la siguiente selección de módulos del modelo: Balance hídrico del suelo representados en SOILWAT y Materia orgánica del suelo manejados por el módulo RESIDUE simulados en cada profundidad del suelo ya que los residuos superficiales puedan tener un impacto en el balance hídrico del suelo a través de la escorrentía y la evaporación en conjunto con la fertilización nitrogenada SOILN e ingresando los conjuntos de datos requeridos:

Tabla 1. *Cantidades de residuos de paja de caña de azúcar sobre la superficie del suelo.*

Tratamientos	Peso (t ha ⁻¹)	Representación en gráficos	Descripción
T1	0	----	0% Suelo desnudo
T2	8	----	50% de residuos
T3	16	----	100% de residuos

Con relación al modulo SOILN del cultivo se tuvo en cuenta la fecha de siembra y el manejo de fertilización usual en la caña de azúcar (Ver Tabla 2)

Tabla 2. *Características agronómicas para la simulación*

Características	
Fecha de siembra	20/12/12
Abono de siembra	500 Kg Ha ⁻¹ / 8-25-25
Abono caña soca	120 Kg Ha ⁻¹ N
Abono caña soca 2	120 Kg Ha ⁻¹ N

Tabla 3. Caracterización físicoquímica en cada capa del suelo – Usina Boa Vista.

Espesor del perfil (cm)	pH	C	M.O.	H+ Al	SB	CTC	V	Arena	Arcilla	Limo	Densidad	Porosidad
	CaCl ₂	%	g dm ⁻³	---mmolc--- dm ⁻³			%	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g cm ⁻³	m ³ m ⁻³	
0-10	5,5	2,13	32	23	66	89	74	267	547	186	1,37	0,58
10-20	5,5	1,96	27	23	59	82	72	249	561	190	1,29	0,61
20-40	5,5	1,27	22	21	45	66	68	225	580	195	1,23	0,63
40-60	5,6	0,97	18	20	35	55	64	226	599	175	1,2	0,63
60-100	5,7	0,90	30	18	30	48	62	234	595	171	1,19	0,64

Cabe destacar que fueron modificados Inicial wáter con 202 mm, con base a la disponibilidad de agua estimada para todo perfil. En la sección Wáter se sustituyeron los valores adquiridos (parametros hidricos) de punto de marchites permanente, capacidad de campo y conductividad hidraulica según los establecidos por el Modelo APSIM-Sugarcane, además se calculó el promedio según la profundidad de otros valores ya generados como el punto de marchites permanente para la caña (SugarLL), el agua disponible para el cultivo (PAWC), Conductividad Hidráulica (KL) y el porcentaje de raíces en determinado volumen del suelo (XF) siendo ingresados por último a la plataforma.

5. RESULTADOS

Se cambiaron las unidades de la caracterización fisoquimica de cada capa del suelo aplicando la función de pedotransferencia (Barros et al., 2013) obteniendo los siguientes parámetros hídricos del suelo: capacidad de campo, punto de marchites permanente y conductividad hidráulica (Ver Tabla 4).

Tabla 4. Parámetros hídricos estimados por capas del perfil del suelo: Punto de Marchites Permanente (θ_{pmp} , mm mm⁻¹), Capacidad de Campo (θ_{cc} , mm mm⁻¹) y Conductividad hidráulica (k_s , mm dia⁻¹).

Profundidad (cm)	θ_{pmp}	θ_{cc}	K_s
0-10	0.37412514	0.460594	0.079894
10-20	0.37584252	0.477079	0.222248
20-40	0.37906306	0.489563	0.397055
40-60	0.37712445	0.49307	0.584123
60-100	0.40801478	0.511804	0.253994

Los valores calculados de punto de marchites permanente para la caña (SugarLL), el agua disponible para el cultivo (PAWC), Conductividad Hidráulica (KL) y el porcentaje de raíces en determinado volumen del suelo (XF) son los siguientes:

Tabla 5. *Parámetros hídricos estimados para caña de azúcar- modelo APSIM*

Profundidad (cm)	SugarLL (mm³.mm⁻³)	PAWC (mm)	KL (día⁻¹)	XF (0-1)
0-10	0.29	37.50	0.10	1.00
10-20	0.29	36.00	0.10	1.00
20-40	0.31	51.00	0.09	1.00
40-60	0.32	66.00	0.06	1.00
60-100	0.34	58.50	0.05	1.00

Tabla 6. *VARIABLES EVALUADAS POR APSIM SEGÚN CADA TRATAMIENTO DURANTE (2013/2014), (2014/2015), (2015/2016).*

Variable Evaluada	Año	T1 -suelo desnudo	T2 -50% residuos	T3 -100% residuos
<i>Evaporación del suelo</i>	2013 -2014	508 mm	250 mm	40 mm
	2014 -2015	790mm	460mm	95mm
	2015 -2016	1030mm	720mm	155mm
<i>Escorrentía</i>	2013 -2014	150 mm	58 mm	57 mm
	2014 -2015	237 mm	140 mm	101 mm
	2015 -2016	266 mm	164 mm	126 mm
<i>Contenido de agua extraída por la planta</i>	2013 -2014	60500 mm ³	81000 mm ³	81250 mm ³
	2014 -2015	100100 mm ³	12150 mm ³	14000 mm ³
	2015 -2016	14600 mm ³	15700 mm ³	17850 mm ³
<i>Rendimiento</i>	2013 -2014	124,37 t Ha ⁻¹	115,46 t Ha ⁻¹	140.46 t Ha ⁻¹
	2014 -2015	92,1 t Ha ⁻¹	107.19 t Ha ⁻¹	125.24 t Há ⁻¹
	2015 -2016	104 t Ha ⁻¹	96.33 t Ha ⁻¹	105.19 t Ha ⁻¹

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de las variables evaluadas en la simulación: la evaporación del suelo acumulada, la escorrentía acumulada, el contenido de agua extraída, y el rendimiento fueron comparados con resultados de investigaciones en campo bajo condiciones similares con la discusión de los parámetros como se muestra a continuación:

6.1. Evaporación del suelo (mm)

Como se demuestra en la Figura 2, la evaporación del suelo en el T1 (suelo desnudo) presentó un crecimiento exponencial acentuado al comparar con los otros tratamientos, especialmente durante el periodo del 2013-2014 se presentó una época de sequía crítica (Ver Figura 3) debido al fenómeno del niño que afectó el Norte de Brasil con un periodo de intensa sequía y altas temperaturas en la región centro oeste del país revela el Banco de Desarrollo de América Latina, siendo más lineal a partir de 2014 hasta 2016.

El T3 (100% de residuo) disminuyó su evaporación debido a que el albedo fue influenciado directamente por la porción de suelo cubierto por los residuos, así como por la temperatura y humedad presente en la superficie del suelo.

Blanco de Pablo et al. (1980) mencionan que el albedo de las superficies del cultivo y suelo afectan el valor de la radiación neta de la superficie, la cual constituye la fuente principal de energía para el proceso de evapotranspiración. Siendo dos procesos directamente proporcionales, a mayor albedo, mayor evaporación, caso contrario ocurre con la humedad en la superficie.

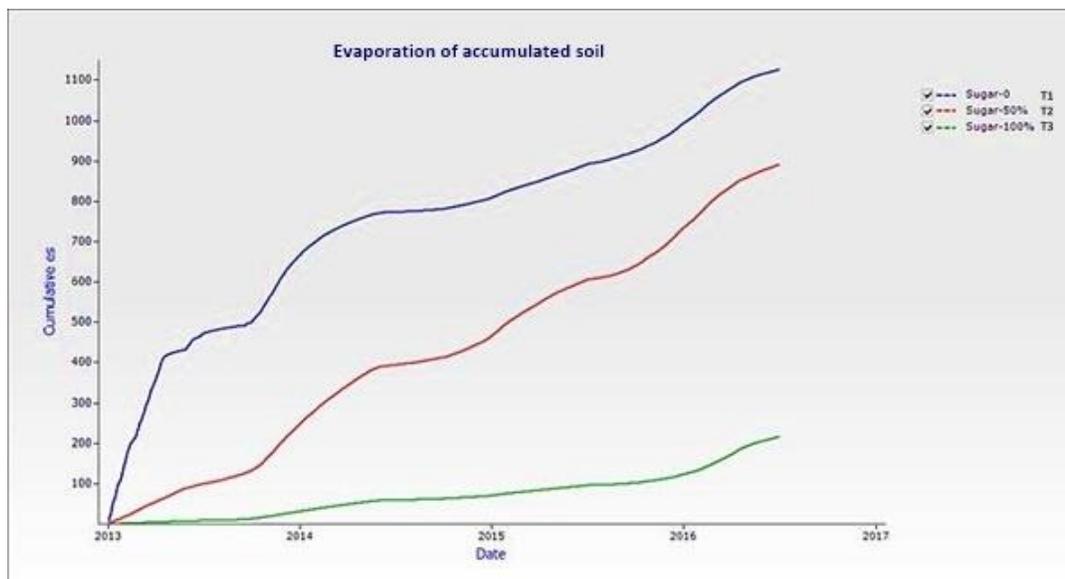


Figura 2. Evaporación del suelo acumulada.

En un estudio realizado en la misma ubicación llamado *Evaluación de los efectos de diferentes cantidades de paja de azúcar en temporal variabilidad del contenido y la temperatura de la humedad del suelo* publicado por el CTBE / CNPEM, Laboratorio Brasileño de Ciencia y Tecnología del Bioetanol, PO Box 6170, CEP 13083-970, Campinas-SP, Brasil evaluaron la variabilidad temporal del contenido de humedad, la temperatura del suelo y el rendimiento de la caña de azúcar en respuesta a diferentes cantidades de cobertura de paja (SM), a lo largo de dos temporadas (2014/2015 y 2015/2016). Los tratamientos fueron suelo desnudo, 50% y 100% de paja (SM) en donde en promedio, 50 SM y 100 SM disminuyeron amplitud en las temperaturas del suelo en 4.2 °C y 5.6 °C, respectivamente, en comparación con el tratamiento a suelo desnudo en el 2014/2015. En la temporada 2015/2016 la diferencia en el suelo la temperatura entre los tratamientos fue más tenue y 100 SM suprimió las temperaturas promedio y máximas 2.5 °C y 2.1 °C (Barbosa, et al. 2017), similar a los resultados que proyecta la simulación en relación a la evaporación (hasta con un 88% mayor en suelo desnudo) ya que son directamente proporcionales dado que la temperatura controla la tasa de evaporación y aireación (Lehnert,2013) además , la temperatura del suelo es uno de los factores más importantes que influyen en los procesos de propiedades del suelo involucradas en la planta crecimiento. (Bradford & Wallenstein, 2010)

Vasconcelos (2002) estudiando el desarrollo del sistema radicular y de parte aéreas de socas de caña de azúcar en dos sistemas de cosecha (caña cruda y caña quemada), verificó que una alteración del sistema de colecta para caña cruda reduce la amplitud térmica del suelo y aumenta el contenido de agua y de materia orgánica en el suelo. Simulación de la acumulación de materia seca por encima del suelo fue consistente con esas afirmaciones, mostrando que, a baja acumulación de materia seca, mayor evaporación del suelo.

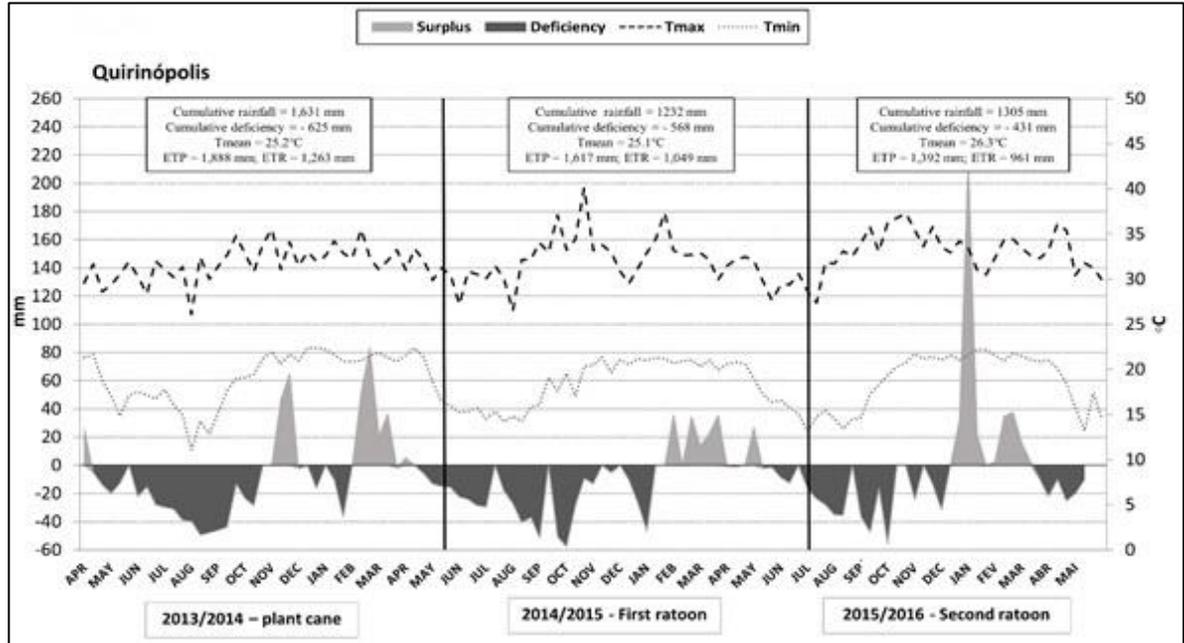


Figura 3. Balance hídrico de Boa Vista en el años de 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 (excedente y deficiencia, mm) y temperatura (máximo y mínimo, ° C) para ubicaciones de Boa Vista Quirinópolis, durante la planta de caña (2013/2014), primero (2014/2015) y segundo ciclo (2015/2016) estaciones (Tmedia es la temperatura media a lo largo del ciclo de cultivo, ETP y ETR el potencial y la evapotranspiración real).

Fuente: Barbosa, et al. 2017. 25ª Conferencia y Exposición Europea de Biomasa, 12-15 de junio de 2017, Estocolmo, Suecia.

6.2. Escorrentía (mm)

Como resultado de la simulación, se diferencia el T1 (suelo desnudo) con mayor escorrentía que los demás tratamientos donde el agua sobre la superficie no es aprovechada por el cultivo lo que explica una menor extracción de agua (Ver T1 Figura 4). El T2 se halló intermedio y el T3 indicó un menor volumen de escorrentía, es decir, mayor retención de agua en el suelo.

El nivel de escorrentía se mantuvo bajo, sin variación entre los tratamientos con paja debido a un amplio período de sequía en el 2013/2014 y el 2014/2015 (Ver figura 3) en donde no hubo interceptación de agua en el cultivo, siendo constantes hasta inicio del 2014 debido a que se presentó una lluvia temporal empezando a correr el efecto de la cobertura, hayándose una menor diferencia entre el T2 y T3.

Al presentarse precipitaciones de febrero a abril de 2014, se observa un flujo de agua lento debido a que el suelo en esta ubicación tiene una gran cantidad de microporos, cuya proporción tiende a aumentar con la profundidad del suelo, una vez el agua que ocupa los microporos capilares se mantiene unida a partículas de arcilla por fuerzas de tensión, lo que contribuye a la lentitud en el movimiento del agua (Barbosa, et al. 2017).

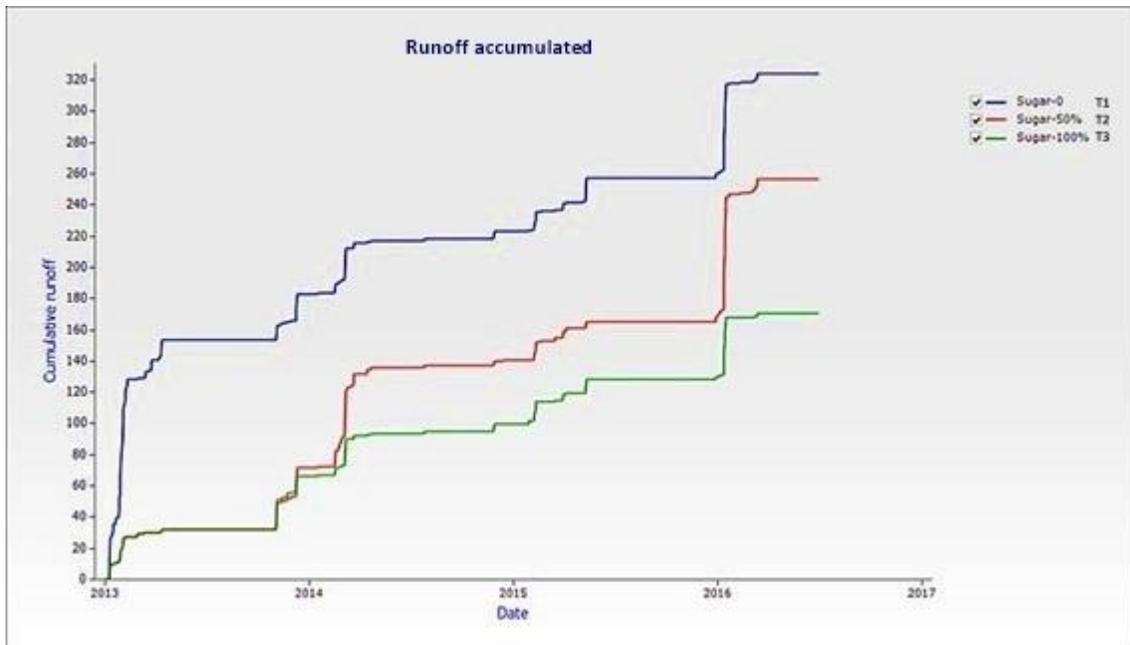


Figura 4. Escorrentía sobre la superficie del suelo

En una investigación realizada en Piracicaba, SP, Brasil sobre el *Efecto del manejo de la paja de la caña de azúcar en las propiedades físico-hídricas de un suelo* la presencia de la cobertura vegetal no afectó a varios componentes del balance hídrico entre ellos el escurrimiento superficial, flujo de agua en el suelo en el límite inferior del volumen de suelo en estudio y almacenamiento de agua en el suelo. No se presentaron diferencias significativas (TIMM, 2002), opuesto al resultado de la simulación.

Orlando Filho et al. (1998) y Camilotti et al. (2005) estudiaron los efectos del tipo de cultivo de caña verde y caña quemada y concluyeron que el mantenimiento de la paja (de caña en bruto) aumentó el agua en el suelo, capacidad de retención de agua. Peres et al. (2010), evaluaron las consecuencias del manejo de 15 t ha⁻¹ de residuos, una pérdida de agua de suelo en las capas 0-0,20 m y 0,20-0,40 m verificaron que, en la primera capa del suelo, la pérdida de agua en el tratamiento sin paja (-0,223% por día) fue más que la observada en el tratamiento con paja (-0,103% por día) similar al resultado obtenido por la simulación. Para la superficie del suelo de 0,20-0,40 m, la disminución de los valores de humedad volumétrica del

suelo, en ambos los tratamientos, fue bien menor. Esos autores también cuantificaron los porcentajes en términos de pérdida de agua y verificaron que, en el tratamiento sin paja, la pérdida fue de $0,45 \text{ mm dia}^{-1}$ y en el tratamiento con paja, esta fue de $0,21 \text{ mm dia}^{-1}$; es decir, hubo una disminución de 53,3% en la pérdida de agua en debido a la cobertura del suelo.

La presencia de vegetación, su densidad, estructura, altura, tiempo de instalación y permanencia son determinantes en el proceso de infiltración (o en su reverso: la formación de escorrentía superficial). La velocidad de infiltración en suelos con cobertura es muy superior a la que presentan los suelos agrícolas correspondientes como es evidente en el T3 (100% de residuos). Ello se debe al elevado contenido en materia orgánica de los suelos que soportan vegetación natural evolucionada, a la acción de las raíces primarias y secundarias creando innumerables canalillos hasta el subsuelo, al aumento de oportunidad de infiltración por disminuir la vegetación la velocidad de escurrido y a la imposibilidad de que se formen encostramientos superficiales (tastanas) en el suelo gracias a la acción protectora de la paja. (Martínez de Azagra & Navarro, 1996).

6.3. Contenido de agua extraída (mm)

Los resultados obtenidos por la simulación, al inicio del desarrollo del cultivo se evidencia una absorción de agua pareja por tratamientos debido a la ausencia de lluvias hasta noviembre del 2013, no se observan diferencias entre T1 y T2 debido a deficiencia de agua entre diciembre de 2013 a febrero de 2014. (Ver Figura 3)

La simulación indica un patrón inferior entre el T1 con suelo desnudo con que con el T3 con el 100% de residuos.

En el T1 hubo menor absorción de agua por parte de la caña. En el T3 se evidencia que el volumen de agua aprovechado por la planta es asumido en mayor proporción al registrar más agua extraída, por tanto, reduciendo la pérdida de agua por escorrentía. La diferencia entre el T1 suelo desnudo y T3 con 16 t ha^{-1} es de un 17% aproximadamente de contenido de agua para la planta al final del ciclo (Ver Figura 5).

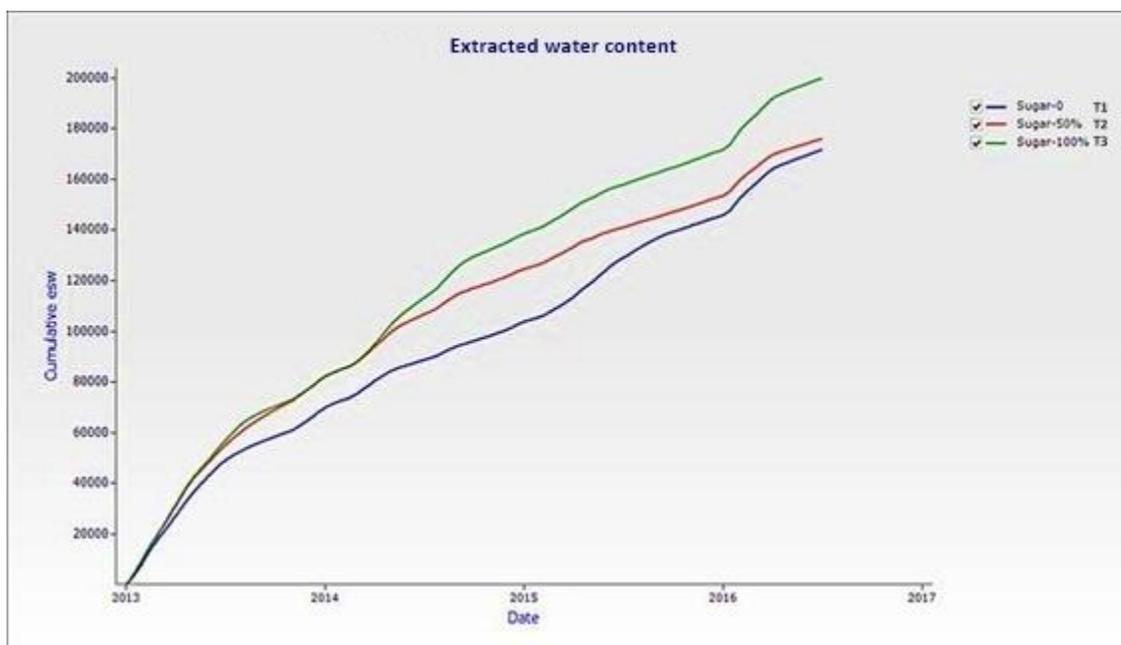


Figura 5. Contenido de agua extraída por la planta.

Barbosa, et al. 2017 evaluaron el efecto con tratamientos similares a la simulación con cero y el 50% de residuo de paja como cobertura, que correspondió a 8.2 t ha^{-1} , no fue suficiente en éstos tratamientos para retener una cantidad adecuada de agua disponible para la absorción de las plantas obteniendo rendimientos menores que en el tratamiento con el 100% de residuos.

El requerimiento de agua para la caña de azúcar varía de 1.600 a 2.500 mm/año y el resultado está dentro del rango, variación que depende principalmente de la zona donde se desarrolla el cultivo y la etapa de crecimiento en que se encuentre la planta. Estudios confirman que a medida que la evaporación del suelo está relacionada con la pérdida de agua en la capa superficial, el patrón lo asocian con un menor volumen de agua disponible para la planta, y por lo tanto con un menor desarrollo en términos de acumulación de materia seca durante el ciclo (Ver T1, Figura 5 y 6).

Es importante que la planta extraiga el agua óptima para su crecimiento y desarrollo porque en el tronco de la caña está constituido con un valor de referencia del 73% a 76% de agua. Si la planta aprovecha mejor el agua en manera productiva, factor que afectará positivamente la fertilización. Rendimientos altos que dan más transpiración y menos desperdicio de agua en el drenaje y evaporación directa como aconteció en el Tratamiento 3. (YARA, 2017)

En una investigación realizada en el 2006 en la región de Araras –SP *Evaluación de los efectos de la cubierta de paja de caña de azúcar en la unidad y en la pérdida de agua del suelo* se estudió la influencia de la cobertura de paja de caña de azúcar cosechada mecánicamente en los valores de la humedad volumétrica de un Latosol Rojo-Oscuro, distrófico, A moderado, de textura arcillosa. La variación de la humedad volumétrica del suelo fue evaluada en las capas de 0-0,20 m y 0,20-0,40 m de profundidad. Los tratamientos consistieron en la cobertura del suelo con cantidades de paja de la caña de azúcar equivalente a 0 sin paja y 1,5 kg m² con paja (0 y 1,5 10⁴ kg ha⁻¹). Los resultados obtenidos en la capa de 0-0,20 m mostraron que en el período estudiado hubo reducción de los valores de la humedad volumétrica del suelo del 0,103% por día, en la condición con paja, y del 0,223% por día, en la condición sin paja, más del doble en relación con la primera condición. Cuando se consideró la capa de 0,20-0,40 m, la disminución de los valores de la humedad volumétrica del suelo fue bien menor que la verificada en la situación anterior, del orden del 0,116% al día, con la condición paja y del 0,159% por día, en la condición sin paja hallándose menor agua para que la planta extraiga. (Lavorenti et al., 2010).

6.4. Rendimiento (t/Ha⁻¹)

El rendimiento en el T1 (suelo desnudo) fue menor que en los demás tratamientos, se destaca que decreció de forma inesperada en la primera soca, como consecuencia de la sequía acurrada en el año 2014 como se puede observar en la Figura 6.

El T2 si presentó un rendimiento característico de la caña (Ver Figura 7), es notorio que la sequía generó un menor impacto en la caña con suelo cubierto; Potencialmente, con un 50% de residuos, los beneficios de una mayor retención de agua en el suelo fueron superiores con respecto al T1. En el T3 empleando el máximo de residuos se logran rendimientos similares a los obtenidos en el T2 (Ver Figura 8), en efecto se muestra un menor estrés hídrico para la caña en la época seca. El T3 tiene una media de productividad de 123,58 t ha⁻¹ lo que equivale a un 13,78% más que el T2 y un 15,84 % más que el T1. Además, la gráfica expresa un gradiente decreciente común del ciclo de la caña.

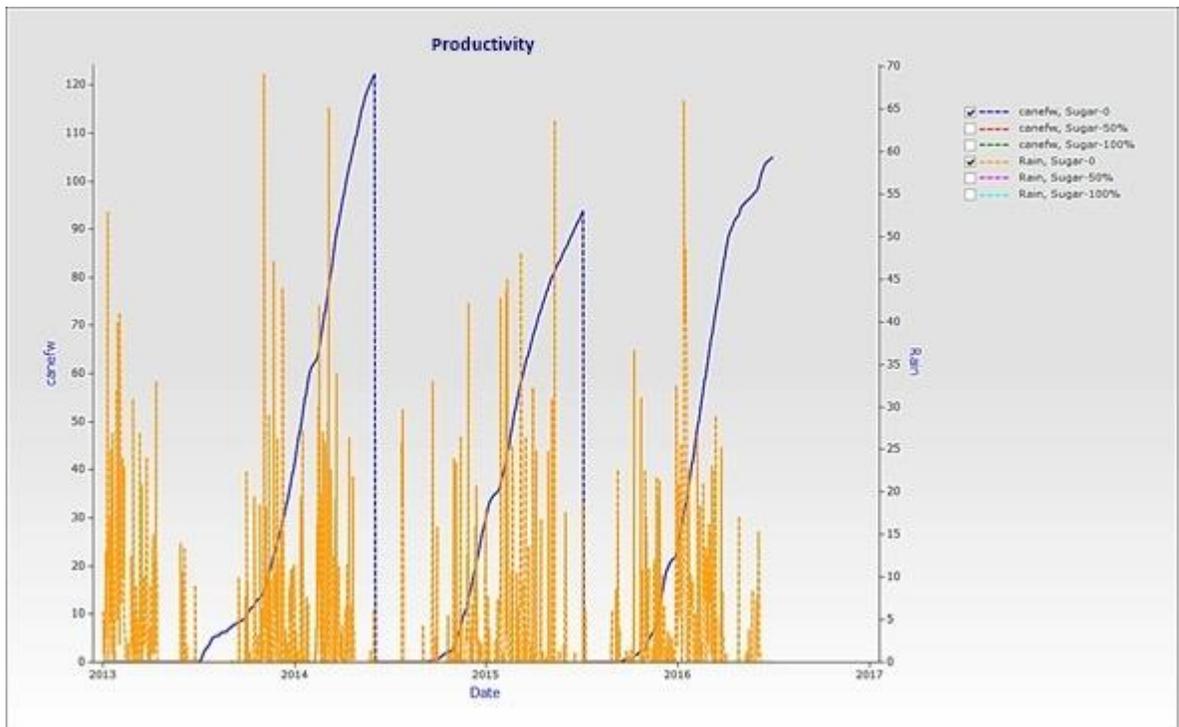


Figura 6. Precipitación vs Productividad del Tratamiento 1 (T1 – suelo desnudo) por ciclo.

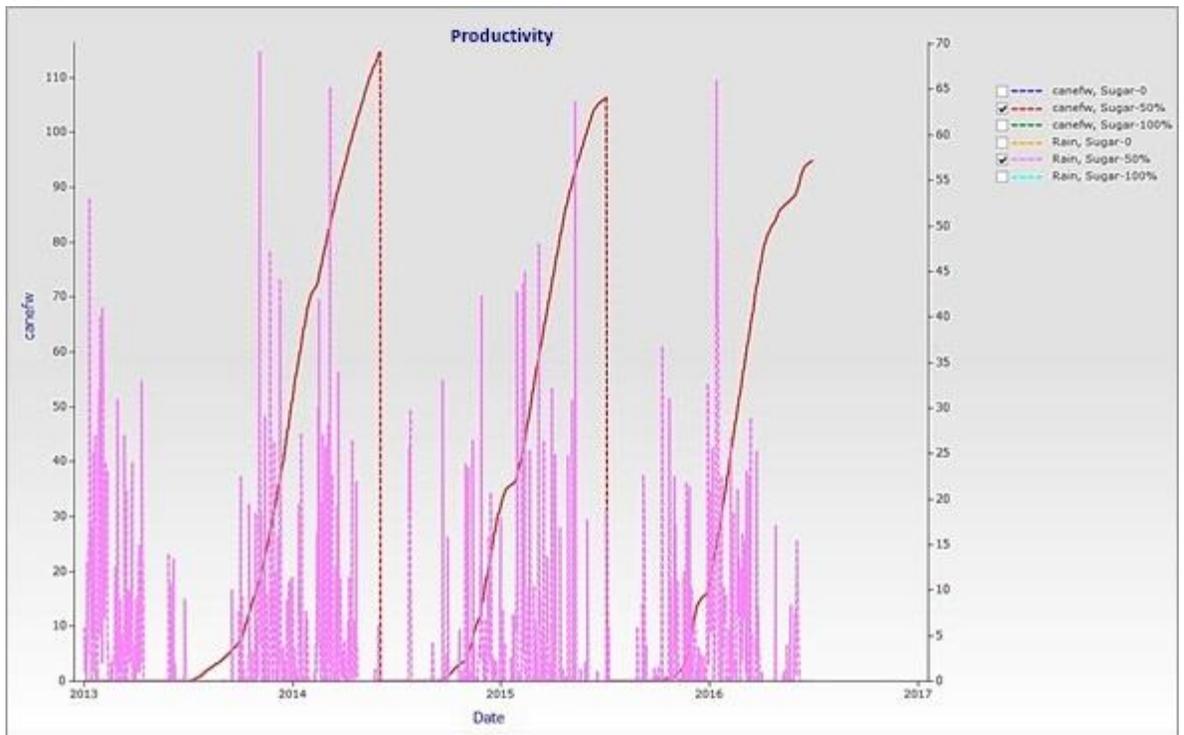


Figura 7. Precipitación vs Productividad del Tratamiento 2 (50% de residuo) por ciclo.

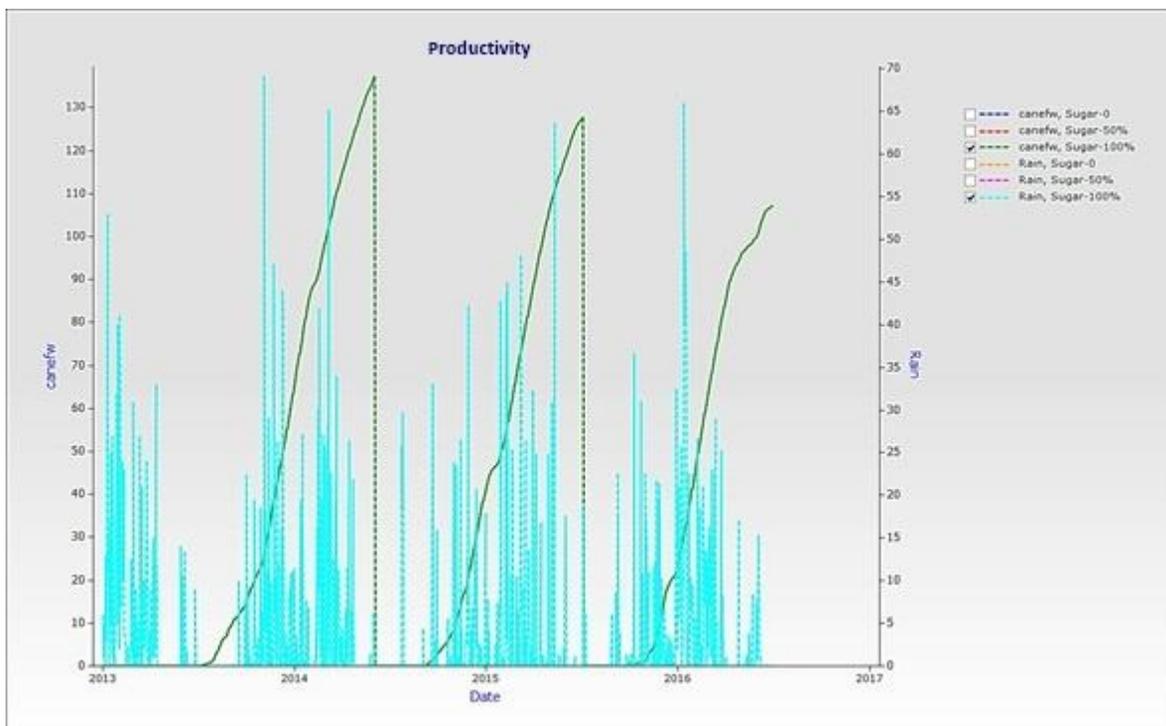


Figura 8. Precipitación vs Productividad del Tratamiento 3 (100% de residuo) por ciclo.

Al comparar los rendimientos obtenidos por cada tratamiento principalmente la soca del año 2015 como resultado de la deficit hidrico que se presentó en la zona, se observan notables diferencias entre los tratamientos. Las toneladas cosechadas entre cada soca fue mayor en épocas de sequía en los tratamientos con cobertura de paja como ocurrió en el T2 y en el T3 que con el T1 con suelo desnudo, cabe destacar que en el ciclo de la caña de azúcar la productividad desciende por cada soca obtenida según el material sembrado.

Barbosa, et al. 2017 con la misma ubicación, información y fechas empleadas para la simulación, reportan el rendimiento de la caña de azúcar en toneladas de tallo por hectárea (TSH) para la soca (2014/2015) y el segundo (2015/2016) retoño con similares tratamientos en donde el tratamiento con suelo desnudo y con el 50% de residuos obtienen 138 t ha^{-1} en cada uno, sin diferencias significativas entre ellos pero con diferencias significativas con el tercer tratamiento (100% de residuos) con un rendimiento de 178 t ha^{-1} de caña. De igual forma durante el 2015/2016 en donde los tratamientos con suelo desnudo y con el 50% de residuos obtienen 122 t ha^{-1} y 126 t ha^{-1} respectivamente, con diferencias significativas en el tercer tratamiento con 100% de residuos obteniendo un rendimiento de 145 t ha^{-1} , resultados similares a los obtenidos en la simulación. Tominaga et al. 2002 vinculan mayor contenido de agua en el suelo con una mayor productividad en rendimiento de la caña de azúcar, lo cual se observa en la simulación como se demuestra previamente, la paja retiene mayor contenido de agua (Ver figura 5).

La variabilidad del clima en la región noreste de Brasil y en las regiones de Minas Gerais, ha sido una de las principales causas de la reducción de la productividad agrícola (Carvalho et al, 2000). La disponibilidad de agua es esencial para el crecimiento y los rendimientos de la caña de azúcar y, los niveles de productividad agrícola en la región de la caña de azúcar del noreste siguen siendo bajos y esto pueden estar asociados con el déficit hídrico sufrido en algunas cosechas (Barbosa,2000) problema que posiblemente puede ser mitigado con el manejo de paja como cobertura vegetal según los casos nombrados anteriormente y el resultado de la simulación, sin embargo, es importante continuar con múltiples investigaciones.

Los rendimientos pobres están relacionados con una insuficiencia de la humedad del suelo más que con una insuficiencia de la lluvia. La agricultura de secano, tropical y subtropical, dependen de un adecuado suministro de agua en la zona radical del suelo. Se ha estimado que el agua del suelo limita la producción de los cultivos en aproximadamente tres cuartas partes de los suelos cultivables del mundo y es el principal factor responsable de los bajos rendimientos en las temporadas secas y en los trópicos y subtropicos semiáridos. (YARA, 2017) . De acuerdo con Silva et al. (2008) o régimen de deficiencia hídrica de 200 mm anual, ideal sería para el cultivo de caña de azúcar, valor a tener en cuenta.

Este resultado también fue consistente con las expectativas basadas en los beneficios reportados de los residuos sobre el crecimiento de los cultivos en Brasil (Ball-Coelho et al., 1992); Australia (Vallis et al., 1996; Thornburn et al., 2000) y Sudáfrica (Graham et al., 2002; Antwerpen et al., 2002).

La simulación de sistemas agrícolas es una herramienta importante que complementa los experimentos en campo. Sin embargo como indica (Guevara, 2007), la experimentación y las observaciones no pueden ser reemplazadas por los modelos, pero existe una estrecha relación entre ambos enfoques que hacen que genere una aproximación o no a la realidad, y en conjunto la simulación e investigación puedan enriquecer la comprensión y el conocimiento sobre el funcionamiento del sistema del cultivo.

7. CONCLUSIONES

La comparación en los diferentes resultados señalan que el mantenimiento de la paja de la caña de azúcar en superficie del suelo es una práctica agrícola importante para la conservación del agua en sus las capas superficiales.

La evaporación del suelo, el contenido de agua extraída por la planta y el rendimiento como variables de la dinámica de agua y de cosecha evaluadas, fueron acordes a resultados en campo en investigaciones bajo condiciones similares con los obtenidos en la simulación.

Se logró modelar la escorrentia superficial, sin embargo, no coincidió con estudios similares recientes, aunque la paja como cobertura vegetal es determinante en este proceso.

El efecto del manejo de la paja influye en los rendimientos de la caña de azúcar de acuerdo a la condiciones edafoclimaticas, indicando que la eliminación total de la paja como residuos de cosecha sobre el suelo tiende a reducir significativamente el desempeño del cultivo según la simulación y datos obtenidos en campo en Barbosa, et al. (2017).

El uso de residuos vegetales como cobertura puede reducir la pérdida de productividad en zonas con déficit hídrico o crisis de sequias ya que la evaporación del agua en la superficie es limitada por la cobertura de paja en el suelo.

REFERENCIAS

APSIM. APSIM Model. (2018). Consultado el 29 de marzo de 2018 de <https://www.apsim.info/AboutUs/APSIMModel.aspx>

Balat, M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. (2011). *Energy Conversion and Management*, 52(2):858-875.

Ball-Coelho, B. E.; Tiessen, H.; Stewart, A. J. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. *Plant and Soil*. (1992). Society for Sugar Research & Promotion 2013, 142(2): 297–305.

Barbosa, Leandro; Carvalho, João; Hernandes, Thayse; Leal, Manoel Menandro, Lauren; & Ruiz Correa, Simone ASSESSING THE EFFECTS OF DIFFERENT AMOUNTS OF SUGARCANE STRAW ON TEMPORAL VARIABILITY OF SOIL MOISTURE CONTENT AND TEMPERATURE. (2017). 10.5071/25thEUBCE2017-4AV.2.6.

Barbosa, G.V.S.; Souza, A.J.R.; Rocha, A.M.C.; Ribeiro, C.A.G.; Ferreira, J.L.C.; Soares, L.; Cruz, M.M.; Silva, W.C.M. Novas variedades RB de cana-de-açúcar para Alagoas. Maceió: UFAL; Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar. (2000). 16p. (Boletim Técnico Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar).

Barros, A.; Jong van Lier, Q.; Maia, A.H.N.; Scarpere, F. Pedotransfer functions for estimation of water retention parameters of northeast Brazilian soils. (2013) *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 379-391.

Blanco de Pablos, A.; Sanchez, I.; Sanchez, S.C. Evaporación de agua en el suelos de distintas texturas. (1980). *Centro Edafol. Biol. Apl.*, 6.

Boogaard H.L. & De Wit A.J.W. User's guide for the WOFOST Control Center 1.8 and WOFOST 7.1.3 crop growth simulation model WOFOST Control Centre 1.8 and WOFOST 7.1.3. (2011). Alterra, Wageningen University & Research Centre, Wageningen.

Bradford MA & Wallenstein MD, Allison D. Soil carbon response to warming dependent on microbial physiology (2010). *Nature Geosci.*, 3:336-340. doi:10.1038/ngeo846

Camilotti, F.; Andrioli, I.; Dias, F.; Casagrande, A.; Silva, A.; Cordero, M., y otros. La labranza prolongado efecto JF sistemas con y sin cultivo de soca de caña en bruto sobre algunas propiedades físicas del suelo. (2005). *Ingeniería Agrícola*, 25 (1), 189-198.

Carvalho, D.F; Marques, D.C; Ferreira, E.J; Olivera, L.F.C. Efeito do tamanho de séries históricas na demanda de irrigação do perímetro irrigado do gorutuba, MG. (2000). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina grande, V.4, n.3, P. 396-402.

CTBE - Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol. (2017).

Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2016/2017: Terceiro levantamento.(2016) Brasília.

Dopico R., D., León M., T. S., Medina E., M., & Triana Hernández, O. Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad (Vols. vol. 47, núm. 2,). (2013) (I. C. Azúcar, Ed.) La Habana, Cuba: ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar.

Dourado Hernandes, Thayse Aparecida. Modelagem Computacional para Avaliação dos Impactos do Cultivo da Cana sobre os Recursos Hídricos; Programa de Capacitação Institucional PCI (CNPq). (2013).Campinas, Sao Paulo.

Fernández, Mery Esperanza. Diagnóstico de modelos agroclimáticos, Informe sobre la evaluación del riesgo agroclimático por sectores. (2013). Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo – FONADE e Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

Garcia da Costa, L. Simulação do efeito de palhada e adubação nitrogenada na produtividade de cana-de-açúcar. (2012). 86p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Carlos Centro de Ciências Agrárias.

Graham, M.; Haynes, R.; Meyer., J. Soil organic matter content and quality: Effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. (2002). Soil Biology and Biochemistry, 34(1): 93–102.

Guarín Giraldo, Germán Wbeimar. *Impacto de la Variabilidad Climática en la Producción de Banano en el Urabá Antioqueño*. Capitulo 6 Modelos de Simulación en la Agricultura. (2011). Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, pp 23.

Guevara, E. La simulación del desarrollo, crecimiento y rendimiento en maíz. (2007). Consultado el 03 de abril de 2018. Disponible en: <http://www.fertilizando.com/articulos/simulaciondesarrollocrecimiento yrendimientoenmaiz.asp>

Hernández, Naivy, Soto, F, & Caballero, A. Modelos de simulación de cultivos: Características y usos. (2009). *Cultivos Tropicales*, 30(1), La Habana, Cuba. 00. Recuperado el 05 de abril de 2018, de

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S025859362009000100014&lng=es&tlng=es.

Jones, J.W., Hoogenboom, G., C.H. Porter, K.J. Boote, Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J. y J.T. Ritchie. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* (2003)

Keating, B. A., Carberry, G. L., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., y otros. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation, *European Journal of Agronomy.* (2003).18(3-4), 267-288.

Keating, M. R. Modelización de los sistemas de producción de caña de azúcar. Desarrollo y el rendimiento del módulo de la caña de azúcar. (1998). NI Huth CSIRO Agricultura Tropical,, 306 Carmody Road, St. Lucia, Queensland 4067, Australia .

Lavorenti, Norberto; Peres, Joseph G.; Souza, Claudinei F. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA CUBIERTA DE PAJA DE CANA DE AZÚCAR EN LA UNIDAD Y EN LA PÉRDIDA DE AGUA DEL SUELO. 2010. *Ing Agric.*, Jaboticabal, v 30, n 5, pp 875-886, set/out.

Lehnert M. The soil temperature regime in the urban and sub-urban landscapes of olomoric, (2013). Czech Republic. *Moravian geographical reports*, 21(3): 27-36.

Martínez de Azagra, A. & Navarro Hevia, J. Hidrología Forestal. El ciclo hidrológico. (1996). p. 25, 26, 202. Universidad de Valladolid

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MAD. Informe de rendición de cuentas del pp 231. (2017). Colombia.

Ministerio de Agricultura y Ganadería. Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica. (1991) San José, Costa Rica.

Nassif, D. S.; Marin, F. R.; Pallone Filho, W. J.; Resende, R. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. (2012). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(3), 311-318

Orlando Filho, J.; Rossetto, R.; Muraoka, T.; Zotelli, H. Efectos del sistema de eliminación de la paja (de caña en bruto de caña quemada) sobre algunas propiedades del suelo. (1998). *STAB: azúcar, alcohol y subproducto*, 16: 30-33.

Pereira, J. C.; Hernandez, F. B.; Neale, C. ; Teixeira, A. Planejamento do plantio da cana-de-açúcar no noroeste paulista baseado no balanço hídrico. (2011). UNESP, Brasil. (Proceso 09/52467-4).

Peres, J.G.; Souza, C.F.; Lavorenti, N.A. Avaliação dos efeitos da cobertura de palha de cana-de-açúcar na umidade e na perda de água do solo. (2010). Engenharia Agrícola, 30(5): 875-886.

Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S., Aikat, K. Bioethanol production from agricultural wastes: an overview. (2012). Renewable Energy, Vol. 37, No. 1, Jan., pp. 19-27.

Sector Agroindustrial de la Caña - ASOCAÑA. Balance Azucarero Mensual Colombiano 2000-2017 (Toneladas). (2018). Actualización 06 de febrero de 2018. Cali - Colombia. Consultado el 23 de febrero de 2017.

Silva, F.A. M.; Miiller, A. G.; Lima, J. E. F. W.; SILVA, E. H. LOPES, T. S. Avaliação da oferta e da demanda hídrica para o cultivo de cana-de-açúcar no Estado de Goiás. Anais :IX Simpósio Nacional Cerrado; II Simpósio Internacional Savanas Tropical. Embrapa Cerrados, Brasília-DF, (2008).

Stockle C. The CropSyst Model: A Brief description. Biological Systems Engineering Dept. Washington State University. Citado por Fernández, Mery Esperanza. (2013). Diagnóstico de modelos agroclimáticos, Informe sobre la evaluación del riesgo agroclimático por sectores. Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo – FONADE e Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

TIMM, Luís Carlos. Efeito do manejo da palha da cana-de-açúcar nas propriedades físico-hídricas de um solo. 2002. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. doi:10.11606/T.11.2002.tde-05082002-170447. Acesso em: 2018-09-24.

Thorburn, P., Keatin, B., F. R., & Wood., A. Long-term changes in soil carbon and nitrogen under trash blanketing. (2000). Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, 22: 217–224.

Thornburn, Peter J.; Porbert, Mervyn E.; Robertson, A. Modelización de la descomposición de los residuos superficiales de la caña de azúcar Con APSIM - Residuo. (2001). Queensland 4740, Australia: MackayMC.

Tominaga, T.; Cássaro, F.; Bacchi, O.; Reichardt, K.; Oliveira, J.; Timm, L. Variability of soil water content and bulk density in a sugarcane. (2002). Australian Journal of Soil Research, 40(4):604-614.

University of Georgia-UGA. Assessing crop production, nutrient management, climatic risk and environment sustainability. (2008). Training program on DSSAT version 4.

Vallis, I.; Parton, W.; Keating, B.; Wood, A. Simulation of the effects of trash and N fertilizer management on soil organic matter levels and yields of sugarcane. (1996). *Soil and Tillage Research*,38(1–2), 115–132.

Van Antwerpen, R.; Thorburn, P. J.; Horan, H.; Meyer, J.; Bezuidenhout., C. The impact of trash management on soil carbon and nitrogen: II Implications for sugarcane production. (2002). *Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association*, 76: 269–280.

Vasconcelos, A.C.M. Desenvolvimento do sistema radicular da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual. (2002). 140p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

Wadsworth, J. Análisis de sistemas de producción animal. Tomo 2: Las herramientas básicas. (2008). (Estudio FAO Producción y Sanidad Animal 140/2).

YARA. Increased Water Use Efficiency.(2017). Disponible en: www.yara.com.pe/cropnutrition/crops/canadeazucar/medioambiente/aprovechar-mejor-el-agua/