



# Modelación de la caña de azúcar en Latinoamérica

Estado del arte y base de datos para parametrización



Series de Estudios Temáticos EUROCLIMA  
Acción de Modelación Biofísica de Cultivos

**Autores:**

Fábio Ricardo Marín  
María Alejandra Moreno  
Asdrúbal Farías  
Fernando Villegas  
Joysee Mariela Rodríguez Baide  
Maurits Van den Berg

2018



Esta publicación es un Informe Técnico del Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (JRC, por sus siglas en inglés). La producción científica expresada no implica una posición política de la Comisión Europea ni de ninguno de los institutos colaboradores. Los límites geográficos presentados en una o más de las figuras son puramente una representación gráfica y solo tienen la intención de ser indicativos. Los límites no reflejan necesariamente la posición oficial de la Comisión Europea ni la de los institutos colaboradores. El resultado científico expresado no implica una posición política de la Comisión Europea. Ni la Comisión Europea, ni los institutos colaboradores ni nadie que actúe en su nombre se responsabilizarán del uso que pudiera hacerse de esta información.

#### **Información de contacto**

Nombre: Maurits van den Berg  
Email: maurits.vandenberg @ ec.europa.eu

#### **JRC Science Hub**

<https://ec.europa.eu/jrc>

JRC110325

EUR 29018 ES

---

PDF	ISBN 978-92-79-77322-8	ISSN 1831-9424	doi:10.2760/247719
-----	------------------------	----------------	--------------------

Print	ISBN 978-92-79-77323-5	ISSN 1018-5593	doi:10.2760/79829
-------	------------------------	----------------	-------------------

Luxemburgo : Oficina de Publicaciones de la Unión Europea,

2018 © Unión Europea, 2018

Reproducción autorizada, con indicación de la fuente bibliográfica. La política relativa a la reutilización de los documentos de la Comisión Europea fue establecida por la Decisión 2011/833/UE (DO L 330 de 14.12.2011, p. 39).

Cualquier uso o reproducción de fotografías u otro material que no esté sujeto a los derechos de autor de la Unión Europea requerirá la autorización de sus titulares.

Cómo citar este informe: Marín FR, Moreno MA, Farias A, Villegas F, Rodríguez Baide JM, van den Berg M, *Modelación de la caña de azúcar en Latinoamérica: Estado del arte y base de datos para parametrización*, EUR 29018 ES, Oficina de Puclicaciones de la Unión Europea, Luxemburgo, 2018, ISBN 978-92-79-77322-8, doi:10.2760/247719, JRC110325.

Todas las imágenes © Unión Europea 2018, excepto las imágenes en la parte inferior de la página principal, Fábio Marin (izquierda), krisana - stock.adobe.com (centro) y naypong - stock.adobe.com (derecha), y los logotipos en la página ii, que son propiedad de los respectivos institutos.

# Modelación de la de caña de azúcar en Latinoamérica: Estado del arte y base de datos para parametrización

Fábio Ricardo Marín<sup>1</sup>

María Alejandra Moreno<sup>1</sup>

Asdrúbal Farías<sup>1</sup>

Fernando Villegas<sup>2</sup>

Joysee Mariela Rodríguez Baide<sup>3</sup>

Maurits Van den Berg<sup>3</sup>

1) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo (ESALQ-USP)

2) Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña)

3) Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (por sus siglas en ingles JRC)

## Instituciones colaboradoras

BRASIL



Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"  
Universidade de São Paulo, ESALQ-USP

COLOMBIA



Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de  
Colombia, Cenicaña.

VENEZUELA



Universidad Central de Venezuela

## Tabla de contenidos

Instituciones colaboradoras .....	ii
Prefacio .....	iv
Agradecimientos .....	iv
Resumen ejecutivo .....	v
Executive summary .....	vii
1. Introducción .....	1
2. Estado del arte de la modelación de la caña de azúcar en Latinoamérica ....	3
3. Métodos de levantamiento de la información .....	10
4. Cobertura geográfica de los estudios sobre la caña de azúcar .....	12
5. Sistemas de producción de caña de azúcar en América Latina.....	15
6. Descripción de los datos obtenidos para basar los estudios en modelaje de caña de azúcar .....	33
7. Consideraciones finales .....	37
8. Lista de investigadores e instituciones con trabajos e intereses en el modelaje de caña de azúcar .....	39
9. Referencias.....	42
10. Descripción del anexo digital: experimentos de modelaje y experimentos agronómicos. ....	54
Lista de figuras .....	56
Lista de tablas .....	57

## **Prefacio**

EUROCLIMA es un programa de cooperación regional entre la Unión Europea y América Latina enfocado en el cambio climático y financiado por la Dirección General para la Cooperación Internacional y el Desarrollo (DG DEVCO G/2) de la Comisión Europea ([www.euroclima.org](http://www.euroclima.org)). Su objetivo es facilitar la integración de las estrategias de mitigación y adaptación ante el cambio climático en las políticas y planes de desarrollo en América Latina y el Caribe (LAC). Este informe se llevó a cabo dentro del marco de la segunda fase de EUROCLIMA, dentro del componente tres: Agricultura Sostenible, Seguridad Alimentaria y Cambio Climático; y forma parte de las actividades de desarrollo, investigación, creación de capacidad y aplicación de modelación biofísica, coordinadas por el Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea.

Este informe responde a una de las necesidades identificadas durante los talleres e interacciones con científicos latinoamericanos en cuanto a la falta de información y datos específicos disponibles para calibración de modelos, de los cultivos principales para la región, como es el caso de la caña de azúcar. El objetivo principal de este trabajo fue: producir una base de datos con información específica para el contexto LAC, que permita la calibración y parametrización regional de modelos del cultivo de caña-de-azúcar. Este informe es parte de una serie de documentos similares, sobre: papa, maíz, trigo, arroz, frijol, soja y café.

Los puntos de vista expresados en este estudio son de los autores y no reflejan necesariamente los de la Comisión Europea. Ni la Comisión Europea ni las personas que la representan son responsables del uso que pueda hacerse de la información que se proporciona a continuación.

## **Agradecimientos**

Se agradece a todos los profesionales en el presente estudio quienes contribuyeron con sus datos y a las instituciones que cobijaron e impulsaron los trabajos de investigación. Agradecemos a Giacinto Manfron por elaborar la Figura 1, basada en los datos de FAO GeoNetwork (2007).

## Resumen ejecutivo

El objetivo de este informe es de describir el estado del arte de la modelación de la caña de azúcar en América Latina y el Caribe (LAC) y de proporcionar una base de datos que puede servir para la calibración y evaluación de modelos de crecimiento de la caña.

La caña de azúcar es una de las especies C4 de gran importancia económica y alimentaria, proporcionando cerca del 70% del azúcar mundial. LAC constituyen la principal región productora de caña de azúcar del mundo, con más del 50% de la producción. Sin embargo, el rendimiento de la caña de azúcar muestra una gran variabilidad entre los países Latinoamericanos, reflejando la diversidad de las condiciones ambientales de cultivos y una gran variabilidad de sistemas de producción.

Hay varios modelos de crecimiento de la caña de azúcar, pero sólo dos (APSIM-Sugar y DSSAT / CANEGRO) están disponibles para cualquier tipo de usuario; siendo estos los más utilizados en el mundo y en LAC. Los estudios sobre modelaje de caña de azúcar en LAC se iniciaron en la década de 1970. Después en los años 2000, se observa un nuevo impulso, manteniéndose activo hasta la actualidad, con una relativa concentración de trabajos desarrollados en Brasil donde el cultivo tiene mayor importancia socioeconómica; pero aún se encuentra en un nivel bastante atrasado con relación a lo que se ha hecho en otras importantes zonas productoras como Australia y Sudáfrica. En comparación con el nivel alcanzado en la modelación por otros cultivos (por ejemplo, trigo y maíz) se observa que el estado de desarrollo de los modelos para caña, a nivel mundial, está más atrasado, existiendo oportunidades para la evolución de los modelos.

Para este informe fueron identificados 15 trabajos recientes con potencial de uso de datos para futuros trabajos de desarrollo y calibración de modelos y se obtuvieron datos completos para modelación del cultivo de cuatro experimentos con dos variedades. La distribución geográfica de estos trabajos está concentrada principalmente en Brasil, pero se tiene en Colombia un polo de modelaje que también puede ganar fuerza en los próximos años.

La base propuesta, aunque restringida geográficamente, representa la principal zona productora de caña de azúcar de LAC (y del mundo) con una variación considerable de clima y suelo. La base genética de las variedades presentadas también sugiere que el desarrollo y ajuste de modelos basados en esos datos constituyen un importante primer paso para estudiar los impactos del cambio climático y las posibles opciones de adaptación en la principal zona mundial productora de caña de azúcar.

Iniciativas como EUROCLIMA pueden actuar como polos irradiadores de conocimiento y facilitar la conexión entre los investigadores e instituciones interesados en el tema de la modelación biofísica, acelerando el desarrollo y uso de esas herramientas en América Latina y el Caribe.

**Palabras clave:** *Saccharum*, caña de azúcar, Latinoamérica, modelos de simulación, cambio climático, base de datos, calibración, evaluación.

## Executive summary

The objective of this report is to describe the state of the art of sugarcane modelling in Latin America and the Caribbean (LAC), and to provide a database of experimental data that can serve as a basis for the calibration and evaluation of sugarcane growth models.

Sugarcane is one of the C4 species of great importance from an economic and food perspective, which provides about 70% of global sugar supplies. Latin America and the Caribbean comprise the world's most important sugarcane producing and exporting region. Sugarcane yields vary greatly among Latin-American countries, reflecting a great diversity of environmental conditions and a great variety of production systems. Several models of sugarcane growth exist, but only two of these (APSIM-Sugar and DSSAT / CANEGRO are effectively available for general use; and these are the most commonly used in the world and in LAC.

The first sugarcane modelling studies in Latin America date from the 1970's. After the year 2000 a new impulse was observed, which is maintained until today, with a relative concentration of work developed in Brazil where sugarcane is economically most important compared to the other LAC countries. Nevertheless, sugarcane modelling (development and application) in LAC remains well behind Australia and South Africa. In comparison with the level obtained for other crops (e.g. maize, wheat), it is observed that sugarcane modelling is even more behind; which suggests a wide window of opportunities for further development in this area.

For this report, 15 recent publications were identified, with potential of data sharing for future model development and calibration; and complete datasets for crop model calibration were obtained from four experiments with two varieties. Geographically, these studies show a concentration in Brazil, but Colombia also has a modelling pool, which may gain strength in the coming years.

The datasets collected, even though geographically restricted, represents the main sugarcane producing region of Latin America (and the world), with considerable diversity in climate and soils. The genetic base of the varieties presented also suggests that the development and calibration of models using these data is an

important first step to study climate impacts and adaptation options in the world's main sugarcane producing region.

Initiatives such as EUROCLIMA can act as knowledge hubs and facilitate the connection among researchers and institutes that are interested in biophysical modelling, thus accelerating the development and use of modelling tools in Latin America and the Caribbean.

Key words: *Saccharum*, sugar cane, Latin America, simulation models, climate change, database, calibration, evaluation.

## 1. Introducción

La caña de azúcar (*Saccharum spp.*) es originaria del Sudeste Asiático, específicamente de la región de Nueva Guinea e Indonesia (James, 2004), siendo clasificada taxonómicamente de acuerdo Cronquist (1981) como perteneciente a la familia Poaceae. La caña de azúcar es una de las especies C4 de gran importancia económica y alimentaria, proporcionando cerca del 75% del azúcar mundial (Souza et al., 2008). LAC, según estadísticas de FAOSTAT (2017), constituye la principal región productora de caña de azúcar del mundo, con un promedio de 52% de la producción (2007-2016), a su vez esta región es la principal exportadora de azúcar con un promedio de 68% del total (2004-2013). Brasil es el mayor productor de caña de azúcar del mundo (con el 23% de la producción mundial), siendo también el mayor exportador de azúcar (con más del 50% de las exportaciones mundiales). Además de Brasil, la caña de azúcar es también producida en México, Colombia, Guatemala, Argentina, Cuba, Perú, Ecuador, El Salvador, Bolivia, Nicaragua, Paraguay, Honduras, República Dominicana, Costa Rica y Venezuela (FAOSTAT, 2017, en orden decreciente para el año 2016). En términos de producción, se destaca la drástica reducción ocurrida en Cuba el gran incremento en Brasil, los menores aumentos en México, Colombia, Guatemala y Argentina. Así como la reducción de la producción de la República Dominicana que a partir del año 1984, cuando su producción comenzó a descender de los 10 millones de toneladas, continuando la reducción paulatinamente en las décadas siguientes hasta llegar al nivel de producción de solo 4 millones de toneladas anuales en 2016; y la de Venezuela que también disminuyó por debajo de los 9 millones de toneladas a partir del 2007 manteniendo este decrecimiento hasta la actualidad (Tabla 3).

En la mayoría de estos países, como en las regiones de Asia y África, la historia de la caña de azúcar se mezcla con la historia política y económica de sus respectivos países (García 2005). En Brasil, específicamente, además de la importancia alimentaria y económica (como generadora de empleos y de divisas oriundas de la exportación de azúcar), la caña de azúcar tiene también importancia energética fundamental, siendo responsable por cerca del 15% del suministro total de la energía en el país. Esta energía se suministra principalmente a través del etanol para el transporte vehicular y por medio de la quema del bagazo de la caña y de los restos del cultivo para la generación de electricidad.

Además de LAC, se tiene registros de cultivos comerciales de caña de azúcar en todos los continentes, siendo bastante representativos en India, China, Tailandia, Pakistán, Estados Unidos, Australia, entre otros. Sin embargo, es notorio el relativo retraso de la investigación científica en caña de azúcar si se compara con otros cultivos de importancia económica para los países desarrollados. La mayor parte de la literatura científica sobre el cultivo, especialmente en el campo del modelaje agrícola, es originaria de países como Australia, Estados Unidos, Sudáfrica, Francia y Brasil. Este trabajo tiene por finalidad sistematizar la información disponible sobre el modelaje de la caña de azúcar en LAC y estructurar una base de datos que permita el avance en el modelaje y simulación de sistemas productivos de caña de azúcar en LAC.

## 2. Estado del arte de la modelación de la caña de azúcar en Latinoamérica

En el mundo, hay varios modelos basados en el crecimiento de las plantas (MCP's, o del inglés proceso basado en cultivos) aplicados a la caña de azúcar (Liu & Kingston, 1995; Jones et al., 1988; Inman-Bamber, 1991, Keating et al., 1999, Martiné, 2003; Singels et al., 2008), pero sólo dos (APSIM-Sugar y DSSAT / CANEGRO) están efectivamente disponibles para cualquier tipo de usuario. Por esta razón, estos modelos son los más utilizados en el mundo y también en LAC. A pesar de tener una estructura muy diferente, ambos fueron desarrollados con base en el modelo CERES-Maize de la familia DSSAT. Otro modelo el QCANE desarrollado en Australia (Liu & Kingston, 1995), sigue un enfoque mecanicista con énfasis en la fotosíntesis, respiración y en la partición de los fotoasimilados. En él, todos los fotoasimilados producidos diariamente son divididos en biomasa estructural y en sacarosa en las diferentes partes de la planta. Este modelo tiene por característica principal la simulación del uso de la sacarosa por la planta pudiendo ser utilizada como carbono estructural o en la respiración de mantenimiento. La fotosíntesis diaria total es determinada por la radiación fotosintéticamente activa y la temperatura, calibrada con los datos experimentales locales.

Liu & Kingston (1995) evaluaron el desempeño de los modelos QCANE, APSIM-Sugar y DSSAT / CANEGRO, demostrando que el primero presentó incertidumbres relativamente menores en la simulación de la biomasa con relación a los demás. Antes del QCANE, el primer modelo de caña a distribuir a nivel mundial fue el AUSCANE (Jones et al., 1989), diseñado a partir del sistema EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) para apoyar en el estudio de problemas de erosión del suelo, productividad del cultivo y aspectos económicos. El AUSCANE, sin embargo, fue considerado débil en los aspectos biológicos de la caña de azúcar y compuesto por códigos desestructurados, justificando incluso la iniciativa que dio origen al modelo APSIM-Sugar (O'Leary, 2000).

En 1995, el CIRAD (Francia) desarrolló con base en datos experimentales de las islas La Réunion y Guadeloupe, un modelo de simulación de caña de azúcar denominado MOSICAS (Martiné, 2003), el cual permite a partir de datos de entrada (como: meteorológicos, de suelo, de la planta y variedades, del cultivo y su manejo) calcular diariamente variables ambientales y de crecimiento del cultivo. Según Suguitani

(2006) el modelo es denominado modelo explicativo, porque analiza el sistema como un todo, además de los procesos por separado, describiéndolos cuantitativamente. Siendo evaluado en Brasil por Bernardes et al. (2007), los cuales encontraron una buena correlación entre los datos simulados y observados, resaltando la importancia de este modelo para la investigación del crecimiento y el rendimiento de la caña de azúcar en las condiciones del sudeste brasileño.

El modelo CANEGRO se desarrolló en Sudáfrica con el fin de modelar los procesos fisiológicos más relevantes de la industria azucarera sudafricana (Inman-Bamber, 1991), siendo uno de los modelos más utilizados en todo el mundo. Incluido en el sistema DSSAT (versión 3.1) (Inman-Bamber & Kiker, 1997), y actualizado en la versión 4.5 del DSSAT por Singels et al. (2008), el modelo DSSAT / CANEGRO viene siendo aplicado en diversas regiones del mundo para análisis y en el avance del conocimiento de los sistemas de producción de caña de azúcar (O'Leary, 2000; Inman-Bamber et al., 2002; & 2010, Marin et al., 2016). Singels et al. (2008) presentaron las principales características del DSSAT / CANEGRO, basándose en descripciones fisiológicas del crecimiento y desarrollo de la caña de azúcar incluyendo la fenología, desarrollo del dosel, perfilado, acúmulo y partición de biomasa, crecimiento de raíces, estrés hídrico y el acame del cultivo. Más una otra versión de CANEGRO fue producida por Stella et al (2015), que reimplementaron el modelo de acuerdo con la arquitectura de BioMA. Esta versión fue utilizada por Pagani et al. (2017) en un prototipo de sistema de pronóstico de rendimiento de caña de azúcar, aplicado al Estado de São Paulo, Brasil.

El Simulador de Sistemas de Producción Agrícola (APSIM) fue desarrollado por la Unidad de Investigación en Sistemas de Producción Agrícola (APSRU), grupo colaborativo establecido bajo liderazgo del CSIRO de Australia. Desde su creación, el APSIM fue proyectado como un simulador de sistemas agrícolas que tiene como característica combinar la estimación de rendimiento de los cultivos, de manera precisa e inherente al sistema de gestión, con la previsión de las posibles consecuencias a largo plazo de las prácticas agrícolas sobre los recursos del suelo (Keating et al., 2003). El modelo APSIM-Sugarcane es un módulo del APSIM que tiene sus procesos funcionando de acuerdo con el estadio fenológico para simular el desarrollo vegetal de la caña de azúcar, simultáneamente con el desarrollo de otras

especies vegetales, o en otros contextos diferentes de manejo, clima o tipo de suelo (Keating et al., 1999).

La mayoría de los trabajos desarrollados hasta el momento en LAC involucran los modelos ASPIM y el DSSAT / CANEGRO. Se presenta en la Tabla 1 una descripción comparativa de los procesos simulados y las estrategias de modelaje empleadas.

En LAC, los estudios de modelaje de caña de azúcar son todavía bastante restringidos (ver lista en la Tabla 2), comenzando en Brasil con los trabajos de Ometto (1974), Machado (1981) y Pereira & Machado (1986). En Colombia, Villegas et al (2005) desarrollaron el modelo CASUPRO para aplicaciones en la industria colombiana y su implementación en el sistema del sistema de evaluación del sistema para Agrotechnology Transfer (DSSAT), teniendo como premisa obtener un modelo dinámico, mecanístico (basado en procesos simplificados del suelo y de la planta), con estructura modular, simulación de procesos de balance de carbono - agua - nitrógeno, aplicables a diferentes condiciones e insertado en el DSSAT. El principal énfasis del modelo es la simulación de la masa de tallos y el contenido de sacarosa. En la simulación de la productividad económica son considerados la radiación solar, la temperatura y el fotoperíodo como los factores que determinan la producción. El modelo CASUPRO incluye además características de las variedades de caña de azúcar, como la estructura del tallo y hojas, la población de tallos, la capacidad de producción de biomasa y sacarosa, así como los estadios fenológicos.

Más recientemente, Cortés Bello et al (2013), calibraron y aplicaron el modelo AquaCrop para el análisis de las consecuencias del cambio climático en una región productora de caña de azúcar en Colombia. Los resultados de la simulación muestran una elevación en la productividad de la caña si los escenarios climáticos futuros proyectados por el IPCC se concretan en Colombia, coincidiendo con las estimaciones realizadas por Marin et al. (2012) & Singels et al. (2014) para Brasil.

**Tabla 1. Descripción resumida de los principales procesos abordados por los modelos DSSAT / CANEGRO Y APSIM-Sugar**

DSSAT/CANEGRO (Singels et al., 2008)	APSIM-Sugar (Holzworth et al. 2014)
<b>Temperaturas base, óptima y máxima</b>	
El modelo tiene temperaturas bases diferentes para la fotosíntesis (7 °C), emergencia, inicio de alargamiento y fenología de la hoja (10 °C) e inicio del desarrollo del colmo (16 °C). El último es asumido para cada cultivar específico. No hay una temperatura óptima o máxima para el desarrollo fenológico de la planta.	Para el desarrollo fenológico y del área foliar, la temperatura base se fija en 9 °C para todo el ciclo del cultivo, con una temperatura óptima de 32 °C y una temperatura máxima de 45 °C.
<b>Brotación de tallos</b>	
La brotación de los tallos primarios se simula cuando se produce una acumulación térmica determinada desde la plantación (TTPLNTEM) o en la caña de soca (TTRATNEM). El pico poblacional de brotes ocurre cuando se alcanza una cantidad específica de acumulación térmica del cultivar desde la emergencia (TT_POPGROWTH). La fase de macollamiento dura desde el surgimiento de retoños principales hasta la ocurrencia de pico poblacional de retoños. La fase de senescencia comienza después de alcanzar el pico poblacional de los retoños y continúa hasta la cosecha. La densidad de población se simula usando los parámetros del ecotipo POPCF1, POPCF2 y POPDECAY y los parámetros de cultivares MAX_POP y POPTT16. Los parámetros del ecotipo determinan la tasa de producción de retoños sin estrés y la senescencia, como una función de tiempo térmico. Los parámetros de cultivares determinan el pico (MAX_POP) y la población final de perfiles maduros (POPTT16). Grupos de tallos están dentro y fuera de la categoría de edad de corte en un determinado punto en el tiempo. No hay distinción entre planta y soca más allá del requisito de tiempo térmico para la aparición de los brotes primarios.	La brotación se produce después de un período de latencia, ajustado a 350 °Cd (grados días) para los cultivos de caña planta y 100 °Cd el cultivo de la caña de soca. El número de brotes aumenta rápidamente hasta alcanzar un pico alrededor de 1400 °Cd después de la emergencia, para luego disminuir hasta alcanzar un número estable. La caña soca comúnmente alcanza el pico más temprano que la caña planta. En el modelo, se evita la complejidad de simular la dinámica del macollamiento, a fin de predecir LAI durante el crecimiento inicial. En cambio, el cultivo está diseñado para tener un número constante de tallos durante todo el crecimiento, por lo general se fija en 10 colmos m <sup>2</sup> , aunque este valor puede ser variado como una entrada. El área de la hoja adicional asociada con los tallos que brotan y posteriormente mueren, es capturada por medio de un factor de macollamiento calibrado, que efectivamente aumenta el área de las hojas, que se producen durante el inicio de la fase de macollamiento.
<b>Alargamiento de tallos</b>	
El inicio de la fase de estiramiento de los tallos ocurre cuando una acumulación térmica específica (1800 °Cd para NCo376) se realiza desde la emergencia de los brotes primarios. Esta fase dura hasta la cosecha se calcula como función de la temperatura y de la disponibilidad hídrica.	Siempre que el contenido de agua del suelo sea adecuado, los brotes se estiran desde la superficie del suelo a una velocidad de 0,8 mm / °Cd. La duración térmica entre la emergencia y el inicio del crecimiento del tallo es un coeficiente de genotipo que varía en el rango de 1200 a 1800 °Cd.
<b>FloreCIMIENTO</b>	
No es simulado	No es simulado
<b>Producción de biomasa, fotosíntesis y respiración</b>	
La fotosíntesis se calcula a partir de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada, multiplicada por el parámetro de eficiencia del uso de la radiación (PARCE, g MJ <sup>-1</sup> ). PARCE <sub>max</sub> (1 - exp (-0.08 (T <sub>mean</sub> - T <sub>basephotos</sub> ))), donde PARCE <sub>max</sub> es la eficiencia máxima teórica de conversión de PAR a biomasa a una temperatura ideal (considerado un parámetro de Cultivar) y T <sub>basephotos</sub> y la Temperatura base para la fotosíntesis.  La producción diaria de biomasa se calcula como la fotosíntesis menos la respiración para el mantenimiento y el crecimiento. La Respiración de crecimiento representa el costo para la conversión de carbohidratos a materiales	La radiación global (RAD, MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ) interceptada se utiliza paracalcular la producción diaria de biomasa usando una eficiencia de uso de la radiación (RUE) de 1.80 g MJ <sup>-1</sup> en caña planta, y de 1.65 g MJ <sup>-1</sup> por caña de soca. La tasa de producción diaria de biomasa (BPR) se calcula mediante: BPR = FI * RAD * RUE; Donde RUE es la eficiencia de uso de la radiación (g MJ <sup>-1</sup> ); FI es la fracción de la radiación incidente interceptada por la copa, dada por FI = 1 - (-K * LAI); K es el coeficiente de extinción específico para el cultivo, asumido/ como constante a lo largo del tiempo. En el modelo, la RUE se reduce si la temperatura diaria media desciende por debajo de 15 ° C o es superior a 35 ° C, y se vuelve cero si la temperatura media alcanza 5 o 50 ° C, respectivamente. El estrés hídrico afecta la tasa de fotosíntesis como se explica a continuación.

<b>DSSAT/CANEGRO (Singels et al., 2008)</b>	<b>APSIM-Sugar (Holzworth et al. 2014)</b>
<p>estructurales (Liu &amp; Bull, 2001) y se considera un parámetro de especies (RespGcf) de 0.242 t / t. La respiración para el mantenimiento (Rm) se calcula como una función exponencial de la temperatura. El estrés hídrico afecta la tasa de fotosíntesis como se explica a continuación.</p>	
<b>Partición y acumulación de biomasa</b>	
<p>La partición diaria de la asimilación entre las raíces y la parte aérea se simula como una función no lineal de la biomasa total. Una gran fracción (Max_rootpf = 0.95) se divide en raíces al principio de la vida de la planta, pero ésta disminuye rápidamente con la edad de la planta. La fracción máxima del incremento diario de la biomasa que se reparte a las partes aéreas (en un cultivo maduro) es un parámetro específico del cultivar (APFMX). La repartición a los tallos se inicia sólo después de que el tiempo térmico desde la emergencia ha alcanzado un valor umbral específico del cultivar (CHUPIBASE). Una vez que esto ha sucedido, la fracción de biomasa recién formada que será repartida para los tallos se calcula como una función de la temperatura, pero limitada a un máximo específico para el cultivar (STKPFMAX).</p>	<p>Cuatro componentes de biomasa aérea se modelan: hojas, punteros, material estructural de los tallos y sacarosa; La fracción destinada a las raíces se simula por separado de la biomasa aérea. Entre la emergencia y el inicio del crecimiento del tallo, la biomasa aérea se reparte entre hojas y punteros en la proporción de 1.7: 1. Tras el inicio del crecimiento del tallo 0.7 de biomasa aérea se particiona al tallo, El remanente compartido entre hojas y puntero en la proporción de 1.7: 1. Si la biomasa repartida para las hojas es insuficiente para el crecimiento del área foliar potencialmente estimada para esa fecha (determinado en función del área foliar específica máxima), ocurre reducción de la tasa de crecimiento y de la expansión del área foliar. Si la biomasa repartida a las hojas es superior a lo necesario para el crecimiento del área foliar estimada para ese día hay reducción del área foliar específica hasta un límite inferior y el "exceso" de biomasa es repartido para la producción de sacarosa. Un factor de estrés para el crecimiento de los tallos se calcula como la mayor de las limitaciones de agua, nitrógeno y la temperatura sobre la fotosíntesis. Esto promueve la repartición de sacarosa a expensas del material estructural de los tallos.</p>
<b>Acumulación de sacarosa</b>	
<p>Las capacidades receptoras para el crecimiento estructural y el almacenamiento de la sacarosa se dictan por condiciones ambientales (temperatura, estado del agua), la masa del tallo y las características del cultivar (SUCA, TBFT). La respuesta de acumulación de sacarosa a la temperatura es determinada por un parámetro de especies (FTCON) y un parámetro de cultivar (TBFT). La respuesta de la repartición de la sacarosa al estrés hídrico se captura en el parámetro de ecotipo SWDF2AMP.</p>	<p>Después de una cantidad mínima de biomasa acumulada en el tallo, la biomasa diaria repartida al colmo se divide entre componentes estructurales y de sacarosa. Si la biomasa disponible para la repartición a la hoja es superior a lo necesario para el crecimiento foliar aquel día, según lo determinado por el SLA mínimo, el "exceso de biomasa" se reparte a la sacarosa. La tasa de crecimiento del colmo puede reducirse como consecuencia del estrés por deficiencia hídrica, de nitrógeno y por temperatura limitante a la fotosíntesis.</p>
<b>Crecimiento radicular</b>	
<p>El crecimiento de la raíz esta expresada en términos de la extensión de la profundidad de arraigo, así como el aumento de la masa de raíces y la densidad de longitud radicular por capa del suelo. Este último, junto con la disponibilidad de agua en el suelo, determina el potencial de absorción de agua de los cultivos, siendo utilizados para calcular el nivel de estrés hídrico. La densidad de longitud radicular (RLV) se incrementa mediante la conversión de incrementos de biomasa diarios repartida a las raíces (GRORT) a la longitud total de raíces por área de suelo (RLNEW, cm / cm<sup>2</sup>), asumiendo una longitud específica constante de 5 m G<sup>-1</sup>; RLNEW se distribuye a las capas de suelo enraizadas, de acuerdo con los factores de ponderación (WR) indicados en el archivo de parámetros de suelo. Se supone que el 0.5% de densidad de longitud de raíz (RLV) se pierde cada día (debido a la respiración y / o senescencia).</p>	<p>La biomasa radicular se simula mediante la adición de una proporción de la producción diaria de biomasa aérea al sistema radicular. Esta proporción disminuye de 0.30 en la emergencia hasta una asíntota de 0.20 en la floración. La biomasa radicular se convierte en longitud de raíz a través de una longitud radicular específica de 18 m g<sup>-1</sup>. La profundidad de la raíz en caña planta aumenta en 1,5 centímetros día<sup>-1</sup> en la emergencia, con la profundidad máxima de enraizamiento definido por el usuario. En la cosecha, el 17% de las raíces en toda la capa de suelo ocupado mueren.</p>
<b>Índice de área foliar e interceptación de la radiación solar</b>	
<p>El algoritmo para el surgimiento de hojas en CANEGRO se basa en el concepto de filocón, utilizando un planteamiento</p>	<p>El índice de área foliar verde es el producto del área de hojas verdes por tallo y el número de tallos por área de suelo. El área verde de las</p>

<b>DSSAT/CANEGRO (Singels et al., 2008)</b>	<b>APSIM-Sugar (Holzworth et al. 2014)</b>
<p>de "palo roto". El intervalo filocrón (PI) se define como el tiempo térmico transcurrido entre la aparición de hojas sucesivas sobre un tallo, y se considera un parámetro específico del cultivar. Dos valores de filocrón (R1 y R2) se aplican respectivamente a las hojas abajo y por encima de un límite específico para cada cultivar (PSWITCH). El tiempo térmico se calcula utilizando una temperatura base específica del proceso (TTBASELFEX). La senescencia de hojas verdes en CANEGRO se basa en el supuesto de que una planta sana no puede tener más que un número específico (dependiendo de la variedad) de hojas verdes (LFmax).</p> <p>La interceptación de la radiación fotosintéticamente activa (IPAR) por el dosel se calcula mediante la Ley de Beer. El valor del coeficiente de extinción (Kc) cambia durante el desarrollo del cultivo. En CANEGRO, esta se calcula como una función del número total de hojas por tallos (según se determina en el modelo de tallos primarios. Esta función está determinada por tres parámetros: EXTCFN, EXTCFST y LFNMXEXT.</p>	<p>hojas por tallo es simulada por la suma del área totalmente expandida de hojas sucesivas que aparecen en cada tallo, añadiendo un factor de corrección fijo para contemplar las hojas que están aún en fase de expansión. Se asume que el filocrón aumenta con el tiempo. Estas respuestas se reproducen en el modelo (a través de una serie de interpolaciones lineales) tanto en la caña planta y con la soca. La formación más rápida de la copa en las socas es simulada por la menor necesidad de grados-día para la emergencia y por el mayor vigor del perfilado en relación a la caña-planta. La tasa diaria de senescencia del área foliar verde se calcula en función de los factores de envejecimiento, limitación de la luz, estrés hídrico y helada. El envejecimiento es simulado mediante la limitación del número de hojas verdes en cada tallo. La competición por luz es simulada para inducir la senescencia cuando la fracción de la radiación interceptada alcanza los 0.85. La interceptación de la radiación por el dosel se calcula mediante la Ley de Beer, utilizando un valor del coeficiente de extinción (Kc) de 0.38,</p>
<b>Contenido de agua en el tallo</b>	
<p>Para estimar la humedad del tallo se asume que ésta depende tanto del volumen disponible (representado por la masa seca estructural) como de la masa de sacarosa almacenada.</p>	<p>La humedad del tallo se simula sobre la base de la masa seca del colmo y de la sacarosa. Por cada gramo de tallo estructural crecido, un valor correspondiente de agua se añade al tallo en una proporción que varía con la edad de la planta.</p>
<b>Estrés hídrico</b>	
<p>El modelo asume que el déficit hídrico afecta el crecimiento de dos formas principales: asimilación de carbono y crecimiento expansivo a través de dos índices que representan el estrés hídrico, siguiendo el enfoque propuesto inicialmente por el modelo CERES. Después de una sequía, se asume que la planta recobra sus funciones fisiológicas sólo después de una determinada suma de grados-día, específica para cada cultivar y definida en un parámetro.</p>	<p>El modelo considera el estrés hídrico afectando el crecimiento por la reducción en la tasa de expansión foliar y en la eficiencia de uso de radiación, a través de dos factores o índices asociados a la humedad del suelo, también de acuerdo con el enfoque del CERES. Se asume que el estrés hídrico afecta la partición de carbohidratos en la planta.</p>
<b>Estrés por nitrógeno</b>	
<p>No es modelado en el DSSAT CANEGRO</p>	<p>La demanda de nitrógeno (N) por el cultivo se simula utilizando un enfoque similar a aquella usada en el modelo CERES, en la cual la demanda por N es dada por el producto entre la concentración máxima de N en el tejido y el incremento de masa del tejido. Así, para cada componente de la planta, se estima la masa necesaria de N para atender a la demanda y se verifica la disponibilidad del nutriente para verificar si hay limitación en el suministro y, consecuentemente, estrés por deficiencia. Se asume que el crecimiento es afectado cuando la concentración foliar de N cae por debajo de un valor crítico preestablecido y el estrés es función de la intensidad y de la duración de la deficiencia nutricional. Se asume que hay translocación de N de las hojas senescentes y que el estrés de N también influye en la partición de biomasa en la planta, de modo semejante al que ocurre para la deficiencia hídrica.</p>

En el caso de Brasil, tanto el modelo DSSAT / CANEGRO como el APSIM-Sugar han sido ampliamente utilizados en los últimos años, con un buen número de trabajos (Nassif et al. 2012, Marin et al. 2011; Marin et al. 2012; Barros et al. 2012a; Barros et al. 2012b; Marin et al. 2013; Costa et al. 2014; Marin et al. 2015; Marin et al. 2016; Vianna & Sentelhas, 2014; Vianna & Sentelhas, 2016; Barros et al. 2016; Silva, 2012). Estos trabajos versan sobre diferentes áreas del conocimiento, pero la mayoría de ellos están relacionados con la evaluación de impacto del cambio climático en la producción de la caña de azúcar, las evaluaciones basadas en el concepto de “margen de rendimiento” (van Ittersum et al., 2013), la evaluación de la variabilidad climática y la necesidad de riego (Vianna & Sentelhas, 2014).

Además del uso de los modelos DSSAT / CANEGRO y APSIM-Sugar, hay también literatura producida en Brasil tratando del modelaje de caña de azúcar con base en otros modelos más simples Marin et al. (2008); Gouvêa et al., (2009); Rudorff & Batista, (1990); Ferreira Jr. et al, (2012); Monteiro y Sentelhas, (2014). Más recientemente, Marin & Jones (2014) propusieron el modelo SAMUCA para simulación del crecimiento de la caña de azúcar con base en procesos biofísicos, que en la actualidad ya posee su versión estocástica (Marin et al., 2017).

### 3. Métodos de levantamiento de la información

La búsqueda de los estudios sobre el modelaje de caña de azúcar se dio principalmente por la literatura publicada en las bases de datos internacionales (Science Direct, Google Scholar y Scielo). Los trabajos considerados en este informe fueron principalmente los artículos publicados en revistas científicas con política de revisión por pares (del inglés, peer reviewed), así como las tesis de doctorado y disertaciones de maestría disponibles en Internet (para facilidad de acceso a los lectores) también se incluyeron en los casos en que el estudio no había sido sometido por los autores a revistas indexadas, e informes técnicos de los institutos de investigación vinculados.

En la Tabla 2 se presenta una lista de autores con contribución relevante para el modelaje de caña de azúcar en América Latina con potencial de uso de datos para futuros trabajos de desarrollo y calibración de modelos, su país de origen y los principales trabajos publicados en este campo de investigación.

**Tabla 2. Estudios sobre modelaje de caña de azúcar en América Latina, por país, autor principal, título de publicación y modelo de simulación utilizado.**

País	Primer Autor	Principales artículos publicados	Año de publicación	Modelo
Brasil	Daniel S P Nassif	Parameterization and evaluation of the DSSAT/Canegro model for Brazilian sugarcane varieties. Pesquisa Agropecuária Brasileira.	2012	DSSAT/CANEGRO
Brasil	Bernandes, M. S.	Evaluation of MOSICAS sugarcane growth model in Brazil.	2007	MOSICAS
Brasil	Fábio R Marin	Sugarcane model intercomparison: Structural differences and uncertainties under current and potential future climates. Environmental Modelling & Software.	2015	DSSAT/CANEGRO
		Parameterization and Evaluation of Predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian Sugarcane. Agronomy Journal.	2011	APSIM-Sugar
		Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. Scientia Agricola. .	2014	SAMUCA
		A Stochastic Method for Crop Models: Including Uncertainty in a Sugarcane Model	2017	SAMUCA
Brasil	Fábio V. Scarpare	Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST. Tese de Doutorado. ESALQ-USP.	2011	SWAP/WOFOST

<b>País</b>	<b>Primer Autor</b>	<b>Principales artículos publicados</b>	<b>Año de publicación</b>	<b>Modelo</b>
Brasil	Julia RF Gouvea	Climate changes and technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical southern Brazil. Scientia Agricola.	2008	FAO
Brasil	Leandro G Costa	Simulação do efeito do manejo da palha e do nitrogênio na produtividade da cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 18,	2011	APSIM-Sugar
Brasil	Leonardo A Monteiro	Potential and actual sugarcane yields in Southern Brazil as a function of climate conditions and crop management	2014	FAO
Brasil	Murilo S Vianna	Performance of DSSAT CSM-CANEGRO Under Operational Conditions and its Use in Determining the 'Saving Irrigation' Impact on Sugarcane Crop. Sugar Tech. 2014	2014	DSSAT/CANEGRO
Brasil	Rômula F Silva	Calibração do modelo DSSAT/CANEGRO para a cana-de-açúcar e seu uso para a avaliação do impacto das mudanças climáticas (Dissertação de Mestrado). UFV, Viçosa-MG.	2012	DSSAT/CANEGRO
Brasil	Maurits van den Berg	Uncertainties in the appraisal of water availability and consequences for simulated sugarcane yield potentials in São Paulo State, Brazil	2000	Adaptación de WOFOST
Brasil	Valentina Pagani	Forecasting sugarcane yields using agro-climatic indicators and Canegro model: A case study in the main production region in Brazil	2017	BioMA/CANEGRO
Colombia	Fernando D Villegas	CASUPRO: an industry-driven sugarcane model, in: ASAE Annual International Meeting. Presented at the Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers, Tampa.	2005	CASUPRO
Colômbia	César Andrés Cortés Bello entre outros	Uso del modelo Aquacrop para estimar rendimientos para el cultivo de caña de azúcar en el departamento del valle del Cauca	2013	AquaCrop
Venezuela	Asdrúbal Farías	Evaluación de la disponibilidad del agua para uso agrícola en un sector del interfluvio Boconó-Masparro	2011	Cropwat/Argis

#### 4. Cobertura geográfica de los estudios sobre la caña de azúcar

A pesar de que el cultivo comercial de la caña de azúcar presenta una buena distribución en LAC (Tabla 3 y Figura 2), la investigación relacionada con el modelaje de sistemas agrícolas es relativamente restringida a algunos países (Tabla 2). En Brasil, donde el cultivo tiene mayor importancia socioeconómica se nota la mayor parte de los estudios en esta línea de investigación. A pesar de la relativa concentración de trabajos científicos desarrollados en Brasil, se puede sacar provecho de la gran diversidad de climas y suelos donde el cultivo es cultivado en Brasil para el desarrollo de modelos más robustos como la adecuada representación de los procesos biofísicos que controlan el crecimiento y desarrollo del cultivo.

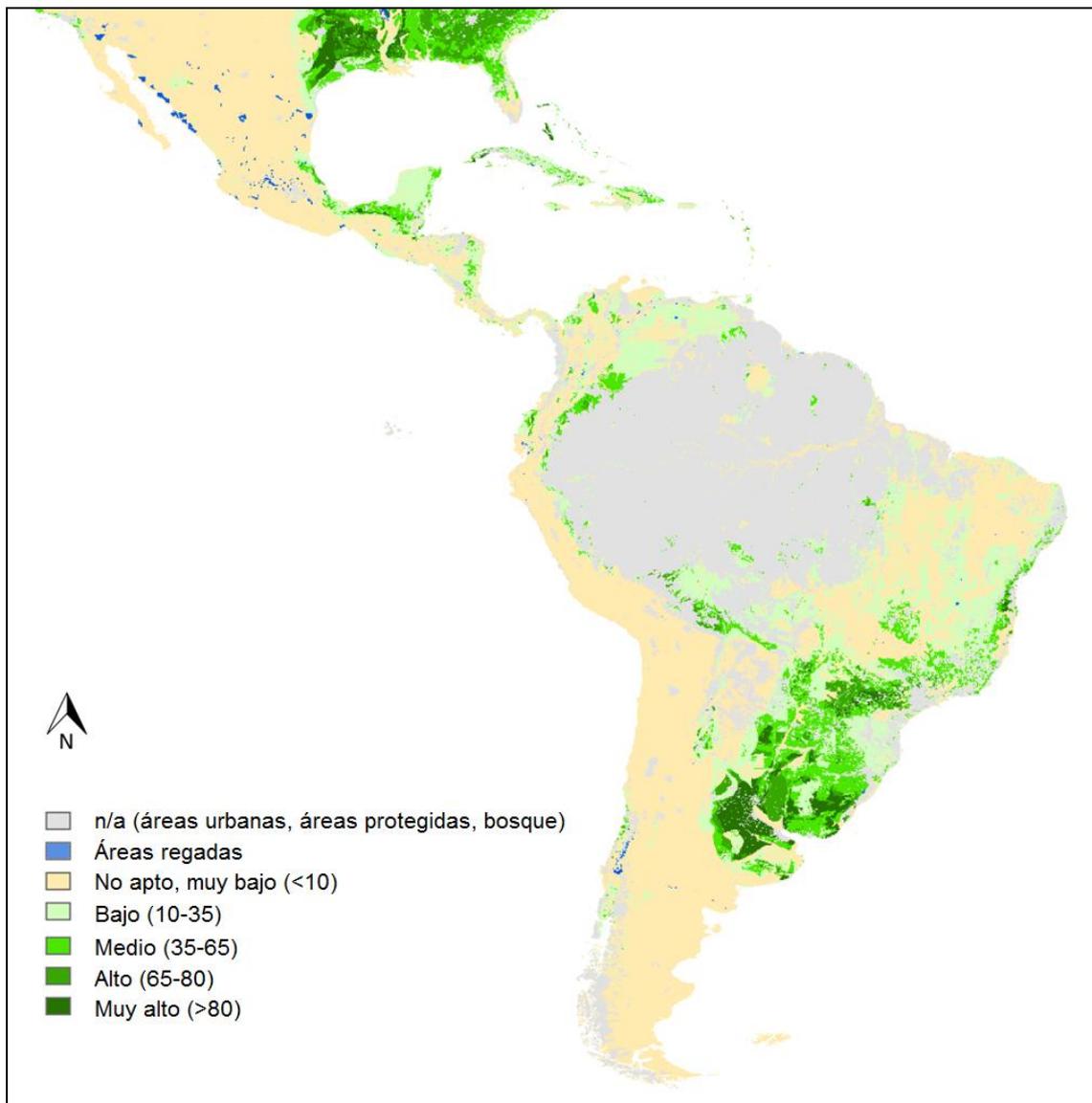
**Tabla 3. Principales productores de caña de azúcar de América Latina y Caribe, sus respectivas áreas de cultivo, rendimiento y producción.**

País/ Bloque	Área (ha 10 <sup>3</sup> )				Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )				Producción (t 10 <sup>6</sup> )			
	1980/ 1990	1991/ 2001	2002/ 2012	2013/ 2016	1980/ 1990	1991/ 2001	2002/ 2012	2013/ 2016	1980/ 1990	1991/ 2001	2002/ 2012	2013/ 2016
Total mundial	15558	18982	22456	26849	59.5	62.9	68.9	70.4	927	1180.4	1551.6	1891
Brasil	3661	4662	7317	10238	60.7	66.7	75.8	73.8	223.4	306.4	557.7	755.8
México	555	607	684	771	69.3	73.7	72.9	74.5	38.6	44.1	49.8	57.4
Colombia	309	384	391	408	81.7	85.9	93	88.9	25.1	32.4	36.4	36.3
Guatemala	80	159	212	264	88.8	96.5	94.8	120.9	7.1	14.8	20	31.9
Argentina	294	278	311	351	51.3	63	73.1	66.2	15	17.5	22.7	23.2
Cuba	1326	1156	519	421	54.5	36	32.4	42.8	72.2	43.8	16.7	18
Perú	63	57	72	86	109.9	116.4	122.3	123.2	6.9	6.6	8.9	10.6
Ecuador	91	84	93	101	62.5	60.1	78.7	84.3	5.6	4.9	7.4	8.5
Bolivia	70	87	129	151	41.1	42.5	48.2	49.7	2.9	3.6	6.2	7.5
El Salvador	35	60	64	79	84.2	77.8	81.3	87.4	2.9	4.6	5.2	6.9
Nicaragua	40	46	52	71	61	67.7	88.1	94.5	2.4	3.1	4.6	6.7
Paraguay	54	57	83	119	45.5	46.9	49.4	53.4	2.4	2.7	4.1	6.3
Venezuela	94	119	123	91	65.5	62.6	69.3	61.5	6.2	7.4	8.5	5.6
Honduras	51	46	73	64	60.1	77.4	77.8	82.9	2.9	3.4	5.7	5.3
República Dominicana	189	180	97	107	48.2	32.2	51.5	44.7	9.1	5.9	4.9	4.8
Costa Rica	45	44	53	65	59.6	81.7	77.8	66.1	2.6	3.5	4.1	4.3
Caribe*	202	134	101	83	46.9	45.8	44	32.1	9.3	6.9	5.1	4.1
Otros**	121	106	110	125	51.7	53.4	54.3	53.2	6.8	6.2	6.4	6.8

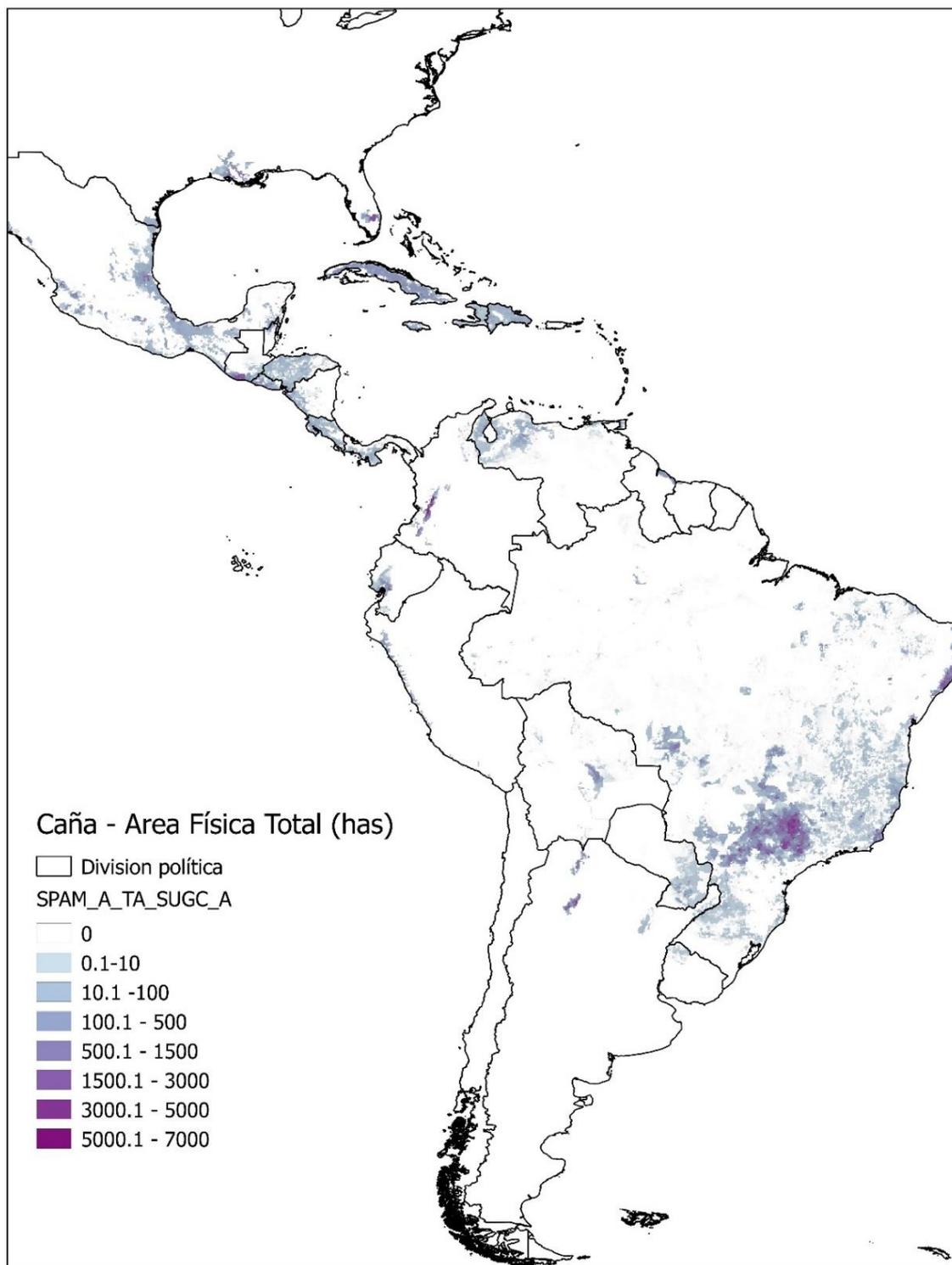
Fuente: FAOSTAT (2017), \* Trinidad y Tobago, Saint Kitts y Nevis, Dominicana, Granada, Saint Vicent y Granadinas, Bahamas, Barbados, Martinica, Haití, Jamaica, Guadalupe, Puerto Rico; \*\* Uruguay, Suriname, Guayana y Guayana Francesa, Belice, Panamá.

Es interesante notar la variabilidad del rendimiento entre los países de LAC, reflejando la diversidad de las condiciones ambientales de cultivos y principalmente, de los niveles de manejo aplicados al cultivo, especialmente el riego, como es el caso del Perú. En los demás países, la caña de azúcar se cultiva prioritariamente en secano y esto se refleja en los niveles medios de rendimiento entre 50 y 90 t ha<sup>-1</sup>, variando

enormemente en función de la precipitación disponible para el cultivo durante los períodos de mayor crecimiento vegetativo del cultivo. En Brasil, en específico, en la mayoría de las áreas comerciales se tienen rendimientos que varían entre 50 y 100 t ha<sup>-1</sup> (Figura 1). Cabe señalar que la caña de azúcar se encuentra en prácticamente todo el Brasil y en buena parte de este, el rendimiento es menor que 50 t ha<sup>-1</sup>, ya que la mayoría de la caña se destina a la alimentación animal o autoconsumo en las propiedades rurales, sin fines comerciales (Figura 1).



**Figura 1. Productividad potencial limitada por agua (toneladas/ha) de caña de azúcar en América Latina. Fuente: JRC con datos de FAO GeoNetwork (2007).**



**Figura 2. Distribución geográfica del cultivo de caña de azúcar en América Latina y Caribe según el área total cultivada por celdas de cuadrícula de 10 km x 10 km de resolución. Fuente: JRC con datos de SPAM generados por You et al., (2016).**

## 5. Sistemas de producción de caña de azúcar en América Latina

Los sistemas de producción en LAC como en otras partes del mundo dependen de las características agroclimáticas y socioeconómicas donde se desarrolla el cultivo, pudiendo variar en el tamaño de las unidades productoras desde el pequeño hasta las empresas agroindustriales (ingenios azucareros), pasando por los medianos y grandes productores, así como también en el nivel tecnológico desde un nivel poco tecnificado o de subsistencia hasta el altamente tecnificado. Estas características se encuentran en la mayoría de los países de LAC, cambiando su porción de país en país, a continuación, se presentará la información referente a algunos países de la región. Los países con mayor acumulación de hectáreas por rejilla de 10 Km x 10Km son Brasil, Colombia, Argentina, Guatemala y México, lo cual podría indicar o estar relacionado a la presencia de fincas de mayor tamaño en estos países. Países donde la acumulación de hectáreas cultivadas con caña por rejilla es menor, lo cual puede indicar menor tamaño de fincas, en los que hay una distribución del cultivo en un número mayor de rejillas son: Cuba, Haití, República Dominicana, Honduras, El Salvador y Nicaragua. Por otro lado, según el área total cultivada por país, los principales productores en orden decreciente son: Brasil, México, Colombia, Guatemala, Argentina, Cuba, Perú, Ecuador, Bolivia, El Salvador, Nicaragua, Paraguay, Honduras y Costa Rica.

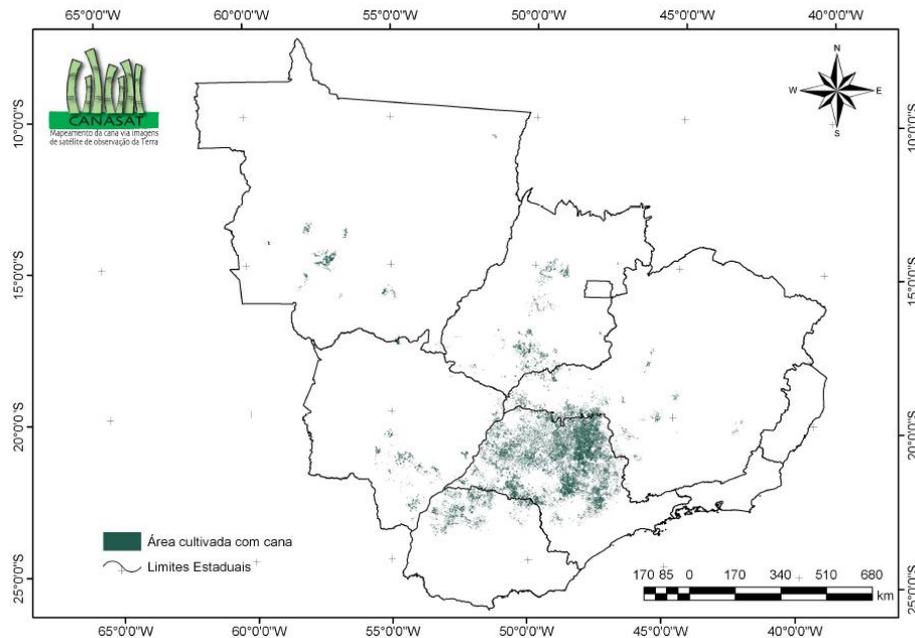
### Brasil

Los sistemas de producción vigentes en Brasil son predominantemente de secano, ya que las regiones principales productoras de caña en el país cuentan con lluvias que oscilan entre 1000 mm y 1500 mm anuales. En la región Centro-Oeste de Brasil (región del Cerrado) (Figura 2), a pesar del alto volumen acumulado de lluvias a lo largo del año, la distribución se concentra entre noviembre y marzo, habiendo una sequía bien definida y pronunciada (ya que la temperatura permanece elevada incluso durante el invierno) entre abril y octubre. En este ambiente, es común el uso del llamado riego de salvación, que consiste en la aplicación de dos o tres láminas de riego (con volumen total entre 60 y 100 mm anuales), durante la estación seca, con el objetivo de aliviar el estrés hídrico y evitar la muerte del cultivo por deficiencia hídrica. Esta severa deficiencia hídrica durante el invierno brasileño asociado a los débiles suelos de la región central del Brasil explica en gran parte las bajas productividades de la caña de azúcar observadas en esa región (Figura 1). En el

Centro-Oeste de Brasil, aunque en pequeña proporción, el cultivo de la caña se produce también en sistemas de riego por suministro pleno, con excelentes rendimientos dadas las condiciones adecuadas para el cultivo en cuanto a la radiación solar y la temperatura del aire.

En la región noreste de Brasil, especialmente en la parte costera (conocida como Tableros Costeros), a pesar de las condiciones adecuadas de temperatura del aire y la lluvia, hay cierta limitación hídrica durante parte del año debido a los suelos bajos y que limitan el desarrollo del cultivo durante períodos Secos. En esta región, hay también buen número de áreas bajo riego y, destacándose los sistemas de riego por goteo y aspersión. En estas áreas con suplementación hídrica, los niveles de productividad son elevados debido a las condiciones favorables para el crecimiento y desarrollo del cultivo. En la región noreste, hay un área instalada en la región semiárida con irrigación plena a partir de las aguas del Río São Francisco, donde la productividad alcanza niveles superiores a los 150 t ha<sup>-1</sup> en las parcelas con suelos más adecuados al cultivo.

La región sudeste de Brasil concentra la mayor área de caña de azúcar (Figura 3) y el sistema de producción es principalmente bajo riego. El Estado de São Paulo concentra la mayor parte de esa producción, con áreas de caña desde la región centro-este del estado pasando por el extremo sur, extremo norte y llegando hasta la parte Oeste del estado, en la frontera con el Mato Grosso do Sul. Hay variación de suelos en cuanto a la fertilidad química y capacidad de retención de agua, con mejores condiciones en la región Centro-Norte. En esta parte, la formación basáltica favoreció la formación de suelos profundos, bien drenados y con buena fertilidad química, lo que asegura niveles de productividad elevados al cultivo de la caña de azúcar. Se asocia a esta condición favorable de suelos, hay también buenas condiciones climáticas para el desarrollo de la caña en prácticamente todo el Estado, explicando la buena adaptación del cultivo en esa región y la formación de un polo agroindustrial relevante para la economía de Brasil.



**Figura 3. Distribución espacial de las áreas cultivadas con caña de azúcar en la región Centro-Sur de Brasil - cosecha 2008/2009. Fuente: Silva et al., 2009.**

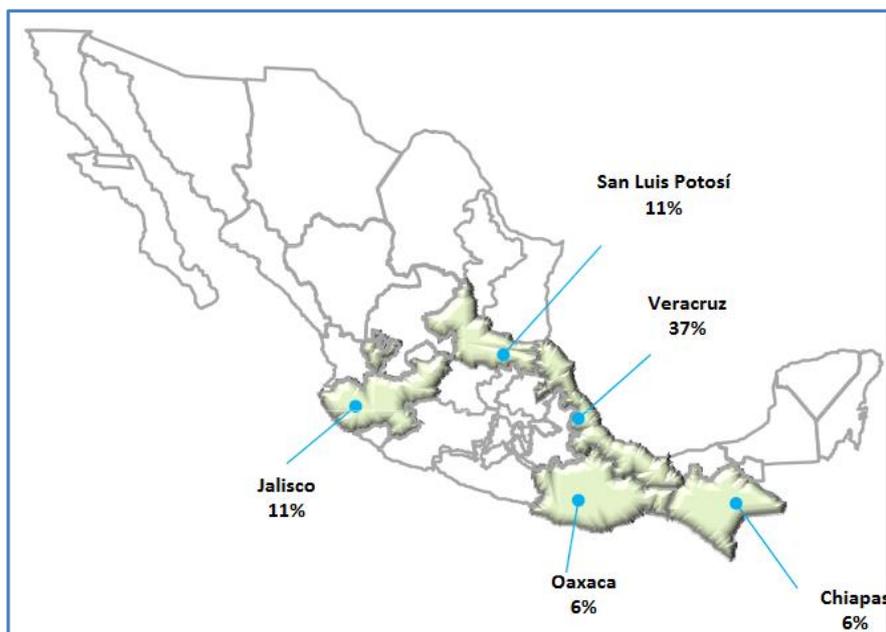
Actualmente, la mayoría de las áreas de caña de azúcar de Brasil son cosechadas mecánicamente y por eso se dispensa el uso del fuego, para la quema del cañaveral. Esta modificación ocurrió más fuertemente a partir de 2004 y la sustitución de la caña cosechada después la quema se redujo paulatinamente hasta 2009, cuando la mayoría de las áreas ya se cosechaba en verde.

### México

México es el sexto mayor productor de azúcar del mundo (FAOSTAT, datos de 2010-2014). En el periodo 2012-2016 su producción anual promedio fue de 56.1 millones de toneladas de caña, con un rendimiento promedio de 73.4 toneladas ha<sup>-1</sup> y un área en producción que alcanzó las 781,054 hectáreas en el 2016 (FAOSTAT, 2017), de las cuales alrededor del 40% son de regadío (Sentíes-Herrera et al., 2017). El número de ingenios en operación en el país es 51 (Sentíes-Herrera et al., 2017, temporada 2015/2016). La industria azucarera en México es históricamente una de las más importantes, debido a su relevancia económica y social; esta genera más de dos millones de empleos en forma directa e indirecta. La demanda interna de azúcar es alta, con una demanda total de 5.4 millones de toneladas anuales. En el 2009 el país sufrió una fuerte reducción de la producción de 6 millones de toneladas a causa de:

climatología poco favorable (menor lluvia en época de maduración), incremento de precios de los fertilizantes y envejecimiento del campo cañero (SAGARPA, 2012).

La producción de caña se distribuye en 15 estados y 227 municipios en cinco regiones: Norte (Sinaloa), Pacífico (Nayarit, Colima, Jalisco y Michoacán), centro (Morelos y Puebla), noreste (Tamaulipas y San Luis Potosí), del Golfo (Veracruz, Tabasco, Oaxaca y el sureste (Campeche, Chiapas, Quintana Roo). Veracruz ocupa el primer lugar a nivel nacional en términos de producción de azúcar, área plantada y cosechada; Sin embargo, Morelos es la región con los mayores rendimientos por hectárea ( $112 \text{ toneladas ha}^{-1}$ ), Chiapas ( $86.5 \text{ toneladas ha}^{-1}$ ) y Jalisco ( $85 \text{ toneladas ha}^{-1}$ ) (Aguilar et al. 2010; Aguilar, 2009; Ruiz-Ramírez et al., 2011). En la Figura 4 abajo, se observan los estados que tienen la mayor producción de caña en el país: Veracruz, Jalisco, San Luis Potosí, Oaxaca y Chiapas.



**Figura 4. Estados con mayor producción de caña de azúcar en México.**

Fuente: SAGARPA (2012)

El período de cosecha de la caña de azúcar se extiende de noviembre a junio. Sin embargo, el 82% de la producción se obtiene de enero a mayo.

La mayoría de las unidades de producción de caña de azúcar son pequeñas ( $<4 \text{ ha}$ ) con una estructura de tenencia de la tierra ejidal o comunal (Aguilar-Rivera et al., 2012).

En cuanto a productores, hasta el 2012 el número total de productores de caña del país fue de 164,000, generando alrededor de 450,000 empleos directos y empleando aproximadamente 2,200,000 personas en la producción y mercadeo de azúcar (SAGARPA, 2012).

### **Colombia**

Colombia, en 2010 mantuvo el primer lugar a nivel mundial en términos de desempeño en productividad, representando más del 40% del PIB agrícola. El país presenta uno de los más altos rendimientos de caña del mundo, con una media por encima de 120 toneladas ha<sup>-1</sup> (Cortés Bello et al., 2013). En las regiones típicas de producción de caña, es común la presencia de suelos ácidos (pH entre 4.0 y 5.5). En 2013, los departamentos con la mayor área de caña plantada fueron: Antioquia, con 33,314 has; Santander con 23,304 has; Boyaca y Cundinamarca con 21,037 y 17,510 has respectivamente (Rueda et al., 2015).

Las variedades de caña cultivadas actualmente en Colombia son en gran parte oriundas de otros países, siendo las más importantes aquellas oriundas de JAVA (POJ), Barbados (B), Hawaii (H), Puerto Rico (PR), India (CO, Coimbra, Estados Unidos (CP), Venezuela (V), Brasil (SP, CB) y República Dominicana (DR).

Entre las principales enfermedades registradas en el Valle del Cauca, un aumento de “raquitismo” se observó en las variedades PR 61-632, 74-275, POJ 28-78 y MZC y enfermedades causadas por el virus del mosaico (SCMV) fueron reportadas en variedades altamente sensibles en las márgenes del río Cauca y Antioquia y en el rango de 57-603 CP debido al aumento de las plantaciones de esta variedad en el momento. En la cuenca del río Suarez virus del mosaico fue divulgado (Osorio 2007).

### **Guatemala**

La agroindustria cañera Guatemalteca ha crecido desde 1960 y actualmente sitúa a Guatemala como el quinto mayor exportador de azúcar del mundo y la segunda en América Latina. El aumento de la productividad ha sido más notable en los últimos 20 años. En la década de 1980-1990 se produjeron, en promedio, 6.77 toneladas de azúcar por hectárea, mientras que en la década de 2000-2010 esta media subió a 10.11 (Melgar et al., 2014).

Los grupos de suelos predominantes a áreas productivas tienen Mollisoles secos que ocupan el 37.1% del área, seguido de suelos Entisoles con baja retención de agua

por la presencia de capas de arena en las partes más superficiales del perfil, con el 19.9%. Otros suelos importantes son los Andisoles, con buen drenaje y profundo, Molisoles alta fertilidad y Andisoles superficie que ocupan 13.4, 8.4 y 7.6%, respectivamente, del área (Villatoro, 2008).

En la cosecha 2010-2011 fueron recolectadas en la costa sur de Guatemala cerca de 230 mil hectáreas de caña de azúcar, que produjeron 19.2 millones de toneladas. Actualmente, el país cuenta con 12 centrales azucareros que gestionan el 82% de las tierras cultivadas, con capacidad de molienda de 135 mil toneladas de caña al día.

Durante el período 1990-2010 en la composición varietal de la Industria Azucarera de Guatemala, presentó un predominio de variedades CP del Canal Point Estación Experimental, de Florida. De la variedad CP72-2086 que en la cosecha 2002/2003, ocupó el 75% del área plantada. La variedad CP72-2086 ha ocupado más del 40% de las áreas plantadas en los últimos 10 años, superando las 8 toneladas de azúcar por hectárea. Desde 1999, con el fin de amenizar los efectos del raquitismo, el país implementó el servicio de análisis por métodos serológicos, y en el año 2010, implementó la detección molecular de enfermedades para las variedades importadas (Fernández 2013). Las primeras variedades fueron oficialmente liberadas por el conjunto de variedades CENGICAÑA en 2006, donde lanzaron 66 variedades, siendo las PR75-2002 y CG96-59, las más importantes (Bouroncle et al., 2014).

La interacción entre las fases fenológicas y épocas de corte / plantación explica los resultados variables en la respuesta de la caña al riego. Se observan mayores resultados cuando el corte / plantación se realiza en el primer tercio de la cosecha (15 de noviembre - 15 de enero), principalmente lugares de menor altitud, como un resultado del período seco más largo. Los estudios realizados en la región indicaron incrementos de 27-36 toneladas  $ha^{-1}$  en suelos arenosos, mientras que en suelos arcillosos se observaron incrementos entre 15 y 28 toneladas  $ha^{-1}$ .

La caña de azúcar se recolecta en Guatemala durante la estación seca (verano), de noviembre a abril, aunque en algunos casos, dependiendo de los volúmenes de producción puede ser prorrogado hasta mediados de mayo.

## Argentina

Argentina proporciona aproximadamente el 1.5% de la producción mundial de azúcar. En este país el sector azucarero presenta dos actividades definidas: la primera, representada por la producción de caña de azúcar y la segunda por la industria. El grado de integración entre una actividad y la otra depende de la región productora, del tamaño de las haciendas y de la ubicación de las centrales azucareras (Pérez et al., 2007). Argentina obtuvo una producción anual de 22.5 y 21.9 millones de toneladas en 2015 y 2016 de caña respectivamente, en una área plantada de aproximadamente 333 y 331 mil ha respectivamente (FAOSTAT, 2017), principalmente en la región noroeste del país. La provincia de Tucumán representa la principal región productora de azúcar con aproximadamente el 66% del total, seguida por las provincias de Salta y Jujuy con el 33.5% y por último el Litoral con menos del 1%. Así las 23 plantas se sitúan en las regiones productoras, 15 en Tucumán, 3 en Jujuy, 2 en Salta y 3 en el Litoral. Las principales variedades plantadas son HoCOP 85-845, HoCOP 89-888, Fam 81-77, LCP 85-376, LCP 85-384, L 75-33, L 91-281, RA 87-2, RA 87-3, RA 89-686 y TUCCP 77-42. En la mayoría de las áreas de caña de azúcar de Argentina hay la cosecha mecanizada (78%), pero la práctica de la quema del cañaveral aún se utiliza incluso en las áreas mecanizadas (Benedetti y Valeiro 2011; Pérez et al., 2007; Sopena et al., 2011).

## Cuba

La industria del azúcar en Cuba entre 1990 y 2001 tuvo una reducción drástica en el número de plantas y del área plantada de caña de azúcar, resultando en una disminución del 56%, incluso los rendimientos disminuyeron en un 39%. El área plantada ha continuado reduciéndose y en la actualidad el área de plantación de caña de azúcar es de aproximadamente 442 mil ha, los rendimientos alcanzaron 40 toneladas ha<sup>-1</sup> durante la cosecha 2011-2012. En un censo de variedades en el año 2010 hallaron 107 variedades de caña de azúcar entre nacionales y extranjeros plantadas en Cuba. El 62.41% del área plantada y representado por 10 cultivares, en orden decreciente las mayores cultivares son: C86-12, C323-68, C86-503, C1051-73, C87-51, Co997, CP52-43, SP70-43, 1284, C90-469 y C90-530. En los últimos años los cultivares que han presentado incremento desde 2010 en el área plantada son: C90 469, CP52 43, C90 530 y C90 317 (Caraballosa et al. 2011 y González-Corzo 2015).

## Perú

La caña de azúcar considerada uno de los principales cultivos agroindustriales en el Perú, genera un aporte importante al valor bruto de la producción agropecuaria y en especial en el subsector agrícola (MINAGRI, 2013).

Según datos de FAOSTAT (2017) tiene un rendimiento aproximados de los últimos 9 años de alrededor de 126 toneladas ha<sup>-1</sup> con una producción en crecimiento desde 1993 y en la actualidad (2011-2016) ha fluctuado entre los 9 y los 11 millones de toneladas año<sup>-1</sup>(FAOSTAT, 2017).

No obstante, el elevado rendimiento de la producción nacional, la fuerte presión por un mayor consumo de la industria nacional ha llevado a que se priorice el mercado nacional. Las exportaciones tienen volúmenes poco significativos y responden a tratamientos especiales que permiten exportar en condiciones favorables (MINAGRI, 2017).

Perú tiene 128.5 millones de hectáreas disponibles de tierra, de los cuales un 12% está en la costa, un 28% en la sierra y el 60% en la selva (Bobadilla, 2016). Así la caña de azúcar se cultiva en las regiones de la costa, la selva y en los valles interandinos. Las mayores extensiones de siembra, aproximadamente un 77%, se ubican en la costa, debido a la climatología, al rendimiento agrícola (t/ha), así como a las condiciones logísticas y de desempeño (Bobadilla, 2016). Los departamentos de la región de la costa que concentran la mayor superficie cosechada al año 2012, son La Libertad con el 45.7% y Lambayeque con el 31.7%, ambos concentran el 77.4% de la superficie cosechada nacional. Los demás departamentos concentran el 22.6%, esto es Lima con 14.9%, Ancash con 7.0% y Arequipa con 0.7% respectivamente (MINAGRI,2013).

De 180 países, a nivel mundial, el Perú ocupa el lugar 17 respecto a la disponibilidad hídrica; su costa representa la región más vulnerable. En relación a los cultivos de caña de azúcar, la costa norte tiene los valles en donde la escasez de agua es más crítica debido a prácticas ineficientes de riego y cultivo, a la limitada infraestructura existente, al mal aprovechamiento de los recursos existentes, a la elevada variabilidad estacional en el caudal de los ríos (fuertes sequías o grandes inundaciones) y a la deficiente gestión (Bobadilla, 2016).

La región de la costa, es una zona seca, con precipitaciones promedio de 200 mm y se caracteriza por un período entre los meses de diciembre y abril de precipitaciones promedio de 13 mm y una temperatura de 32°C; en los demás meses del año, carentes de lluvias, la temperatura promedio es de 25°C. El clima en su área de influencia es del tipo desértico o árido tropical, y los valores de las temperaturas máximas y mínimas promedio son de 37 °C y 19°C, respectivamente (Bobadilla, 2016).

Otro factor que interviene en la producción es el fenómeno de “El Niño” es una variable aleatoria que siempre ha estado presente a lo largo de la historia del cultivo de la caña de azúcar, de manera que si bien la producción nacional va a mostrar una tendencia creciente en el tiempo, al menos a partir del año 2000 se observa como en ciertos años el impacto negativo en los cultivos afecta su producción, además del impacto negativo del fenómeno de “El Niño” 2015-2016, que afectó principalmente la infraestructura vial y de riego, más que al cultivo en particular (MINAGRI, 2017).

Del total de la superficie cosechada, aproximadamente un 64% es propiedad de empresas azucareras (formado por diez ingenios azucareros) y un 34% de productores independientes. La principal actividad de los ingenios es la producción de azúcar para el consumo humano, y como productos secundarios se obtienen la melaza y el bagazo; la melaza se utiliza para producir alcohol, bebidas, alimento para ganado y papel; el bagazo, para la generación de energía (Bobadilla, 2016).

Las empresas Casa Grande, Cartavio, Laredo, Paramonga, Tután y Pomalca tienen en conjunto una participación aproximada del 80% de la superficie cosechada a nivel nacional, el resto de las empresas participaron con el 20%. Aquí también se encuentran productores independientes que tienen áreas sembradas de caña de azúcar que al momento de cosechar realizan la molienda en las empresas azucareras que les brindan tal servicio (MINAGRI, 2013).

Según el MINAGRI (2013) la capacidad instalada para producir azúcar al año 2010 estaba cercana a las 52,000 toneladas de caña molida por día para producir los diferentes subproductos derivados de este cultivo. De acuerdo con Bobadilla (2016), la distribución porcentual de la capacidad de molienda instalada de los diez ingenios en orden decreciente es la siguiente: Casagrande (27.7%), Caratavio (13.9%), Tuman

(11.7%), Pucalá (11.1%), Pomalca (9,4%), Paramonga (8.3%), Laredo (7.2%), San Jacinto (5.5%), Andahuasi (3.6%) y Chucarapi (1.5%).

Uno de los principales problemas tecnológicos que limitan el nivel competitivo de la industria azucarera nacional está en el uso de las variedades que datan de la década de 1930 y que ocupan más del 90 % del área total sembrada en los ingenios azucareros. Además, los métodos agrícolas que se utilizan datan de la década de 1970 y son aplicadas de forma ineficiente y sin considerar un manejo integrado del cultivo con buenas prácticas agrícolas (Bobadilla, 2016). Siendo las variedades más cultivadas son la H32 – 8560, H37 – 1933 y la P12 - 745 (Azul de Casa grande) (MINAGRI, 2017).

Los cultivos de caña de azúcar en la mayoría de las zonas productoras son irrigados a partir de obras de captación y acumulación de las aguas superficiales (Bobadilla, 2016). Las condiciones de clima y suelo de la región permiten la cosecha del cultivo de la caña de azúcar en cualquier época del año, (no hay cosecha estacional o zafra). La siembra se realiza en las modalidades mecánica y manual. A su vez las siembras también son todo el año siempre y cuando exista disponibilidad del recurso hídrico en las diferentes zonas productoras. La producción máxima tiene lugar entre los meses de octubre y enero, debido a mayores valores de radiación solar y temperatura. En consecuencia, en el calendario de cosechas solo los meses de septiembre, noviembre y diciembre tienen participaciones del 9.6%, 10.5% y 9.6% mayores que en el resto de los meses (MINAGRI, 2013; Bobadilla, 2016).

En Perú la caña de azúcar como en muchos lugares del mundo se realiza la quema de la planta a fin de facilitar su cosecha manual. La cosecha tradicional se inicia primero con la quema del cultivo, para efectuar luego el corte manual de la caña, sigue el denominado alce y acarreo que se lleva a cabo mediante máquinas que colocan la materia prima en camiones o tráileres que hacen el transporte final hacia la planta (Dancé & Sáenz, 2016).

### **Ecuador**

Según FAOSTAT (2017) el país alcanzó un rendimiento entre los 82.7 toneladas ha<sup>-1</sup>, con una producción de caña de azúcar de 8.6 millones de toneladas, donde el 62% de los productores son medianos productores con superficies de 5 a 50 ha, 21% pequeños productores de 2 a 5 ha y 17% son grandes productores de 50 a más de

200 ha. Con una superficie total sembrada de 77 223 hectáreas distribuidas en 5 provincias Guayas (65%), Cañar (26%), Loja (4%), Imbabura (4%) y Los Rios (2%) (MAG, 2017).

Las industrias ecuatorianas juntas proveen la azúcar para el mercado nacional, que consume un 99 % de la producción. Los cinco principales ingenios son San Carlos, Valdez, La Troncal (Coazúcar), Isabel María, Miguel Ángel. En la zafra 2015-2016, los tres ingenios más grandes se cosecharon 72,423.8 ha, San Carlos (23,434.6 ha), Valdez (26,279.6 ha) y La Troncal (22,709.5 ha), en conjunto se molieron 6,087,255 TM de caña, con una producción de 536,523 toneladas de azúcar. Los ingenios pequeños produjeron 88,095 TM adicionales. Sumando una producción total de 624,618 TM de azúcar (CINCAE, 2016)

En cuanto a cosecha mecánica y manual, en el ingenio Valdez los cañicultores cosecharon el 40.5% en forma mecanizada y 59.5% manual; mientras que, a nivel de ingenio el 98.5% mecanizada. El ingenio La Troncal (COAZÚCAR), los cañicultores cosecharon 33.3% mecanizado y 66.7% manual y en canteros propios del ingenio fue 83.6% mecanizado y 16.4% manual. En el caso del ingenio San Carlos los cañicultores cosecharon el 10.2% mecanizado y el 89.8% manual; mientras que a nivel de ingenio (caña propia y asociados), el 92.5% fue corte mecanizado y solamente el 7.5% manual (CINCAE, 2016).

Del total del área cosechada (72.4 mil ha), la distribución porcentual de las principales variedades de caña de azúcar cosechadas en los ingenios San Carlos, Valdez y COAZÚCAR en la Zafra 2016 es CC85-92 (38%), ECU-01 (28%), EC-02 (7%), CR74-250 (5%), EC-03 (4%) y otras introducidas por los ingenios (18%). A nivel de proveedores de caña o cañicultores CC85-92 (55%); Ragnar (28%); ECU- 01 (8%), CR74-250 (4%) y otras variedades introducidas por los ingenios (5%) (CINCAE, 2016).

## **Bolivia**

La caña de azúcar en Bolivia presenta una media de rendimiento en los últimos cinco años de 49.4 toneladas ha<sup>-1</sup>, un 12.5% de sacarosa (Pol%), con una media de 8 cortes. Las regiones que concentran la mayor producción son el departamento de Santa Cruz tiene más de 78,000 ha plantadas y 4 centrales azucareros, y el

Departamento de Tarija con 12,000 ha y 2 centrales azucareros (Burgos et al., 2002 y Portal Caña 2015).

### **El Salvador**

El rendimiento en los últimos años estuvo alrededor de los 87.6 toneladas ha<sup>-1</sup>, con un crecimiento en la producción a partir del año 2005 alcanzando una producción en la actualidad de 7,202,141 toneladas de caña de azúcar, con un área plantada para 2017 de aproximadamente 82,000 ha (USDA, 2017). La caña de azúcar representa el 2.7% del PIB del EL Salvador siendo responsable por el 12% del PIB agropecuario y agroindustrial. El Salvador es el segundo mayor productor y exportador de azúcar de Centroamérica con 80% de la producción de melaza es destinado a la exportación y exporta 500000 TM de azúcar (AAES, 2017).

La presencia de áreas de caña de azúcar se encuentra en cerca de 175 municipios del país. Sin embargo, en los 25 municipios de mayor extensión se concentra el 83.9% del área total cañera; repartido en cuatro regiones productoras (Occidente, Central, Centro-Oriente y Oriente). Sin embargo, el peso de mayoritario se encuentra en los municipios del Occidente y Central, en municipios muy asociados a la localización de los ingenios: municipios de Izalco y Sonsonate, para el Central Izalco; municipio El Paisnal, para la Cabaña; municipio Apopa, para Ingenio El Ángel; municipio San Vicente, para el Ingenio Jiboa; y municipio San Miguel, para el Ingenio Chaparrastique (MAG, 2012).

Actualmente, el sector azucarero cuenta con alrededor de 7,000 productores de caña de azúcar los cuales se encuentran en diferentes zonas del territorio nacional, y están clasificados en productores independientes quienes representan un 40% del total de productores de caña y asociaciones cooperativas que representan un 60% (CONSAA, 2016b). En el país existen 6 ingenios que son los que realizan el proceso de extracción de los azúcares siendo éstos los siguientes: El Angel (23%), Izalco (22%), Chaparrastique (21%), La Cabaña (14%), Jiboa (14%) y La Magdalena (6%) (CONSAA, 2016a).

La instalación de los ingenios se terminó a fines de los años setenta del siglo pasado; en la actualidad se cultiva cerca del doble de caña que en esos años; la expansión de áreas se ha hecho en las zonas del Bajo Lempa (en ambos márgenes del río) y en el Oriente. Adicionalmente, junto a las tierras anteriormente algodonerías, parte de las

tierras actualmente cañeras provienen de tierras de pastos, granos básicos, y áreas arbustivas. La distancia media de las áreas con caña y los Ingenios es de 70 kilómetros (MAG, 2012).

A nivel nacional existen 87 variedades cultivadas de caña de azúcar, de las cuales 4 ocupan la mayoría del área cultivada con caña, en orden decreciente son: CP-72-2086, MEZCLA, PR-1013 y PINDAR. Estas variedades concentran el 68% del total de área sembrada a nivel nacional. A su vez más del 25% de estas se encuentran sembradas en suelos no aptos, o en elevación poco idónea para ser cultivadas. Por lo que muchas veces rendimientos que se esperaba obtener de una variedad se ven disminuidos, considerando que el manejo varía según el productor y el Ingenio que proporciona asistencia técnica (Díaz, et al., 2004).

En el resto de Centroamérica, la necesidad del riego ha sido siempre más frecuente. Los días de zafra se acercan a un poco más de 160 días (cerca de 5.5 meses); en años anteriores las zafras duraban, en promedio, un poco menos. Cabe tener en cuenta que las posibilidades de extender el ciclo de zafra a más meses están limitadas por la mayor frecuencia, en los últimos años, de lluvias tempranas (antes de mayo) y también de lluvias tardías (después de octubre), las cuales dificultan las actividades de corte. Sin embargo, en los últimos años la industria ha tenido la necesidad creciente de contar con riego complementario, en especial en las áreas de expansión del Oriente, esa mayor demanda de agua está creando presiones adicionales sobre la disponibilidad de aguas subterráneas (MAG, 2012).

### **Nicaragua**

La actividad azucarera en Nicaragua genera más del 4% del PIB, contando la agroindustria azucarera nicaragüense con más de 74,000 hectáreas sembradas con caña de azúcar, más de 800 productores privados de caña y 4 ingenios azucareros ubicados principalmente en el área pacífica del país, en los departamentos de Chinandega, Managua y Rivas: San Antonio (30300 ha), Monte Rosa (26000 ha), CASUR (7,000 ha) y Montelimar (6,300 ha) (Salgado & Pineda, 2010; CNPA, 2017).

La producción nacional alcanza un promedio de 6.7 millones de toneladas entre 2012-2016 (FAOSTAT, 2018), con un rendimiento promedio de 95.7 toneladas ha<sup>-1</sup> durante el mismo periodo. La producción de caña de azúcar en la región del pacífico de Nicaragua se caracteriza por llevar a cabo diferentes prácticas agrícolas con el

objetivo de obtener mejores rendimientos en cantidad y calidad de la caña, en especial cuando su destino es la producción de azúcar. La práctica menos adoptada es el control de maleza (Pacheco & Mónica, 2015).

Para la siembra y producción de caña de azúcar se utilizan dos tipos de tecnologías: de riego y seco. Aunque no hay datos precisos del área bajo riego, se sabe que al menos el 50% del área, que es la cultivada por los ingenios, se hace con esta tecnología, más algunas áreas pertenecientes a productores independientes (López, 2003). Según Pacheco & Mónica, (2015) los productores con riego representan el 11.25 % de los productores de caña de azúcar. La producción de caña con riego, normalmente utilizada por los ingenios azucareros, se caracteriza por tener diferentes tipos de tecnología de riego como: gravedad, aspersión y goteo. (Pacheco & Mónica, 2015; López, 2003).

La siembra inicia durante los meses de junio a octubre. La siembra comercial empieza en el mes de noviembre con el inicio de la zafra y se concluye en el mes de Junio con la zafrita, que es la siembra de la caña temporal. Hay dos tipos de siembra, la convencional (manual) y la mecanizada. De los cuatro ingenios existentes, solo el ingenio San Antonio realiza la siembra manual y mecanizada. El ingenio Monte Rosa la realiza manual y semi-mecanizada al igual que el ingenio CASUR y el ingenio Montelimar la realiza de manera 100% manual (Munguia & Ramos, 2017).

En Nicaragua por las características agroecológicas, la caña de azúcar florece en el periodo de septiembre a noviembre, cuando tiene por los menos siete meses de edad. La cosecha se hace de manera manual y mecanizada: en el ingenio San Antonio, el 40% de la cosecha de caña se hace de forma manual y el 60% de forma mecanizada. En el ingenio Monte Rosa el corte manual se realiza en un 75% del área y un 25% es cosechado en forma mecánica, en el ingenio CASUR la mayor parte de la cosecha es manual, siendo el 10% mecanizado y en el ingenio Montelimar toda su cosecha es manual (Munguia & Ramos, 2017).

## **Paraguay**

La producción nacional de caña de azúcar alcanzo un promedio de 5.9 millones de toneladas entre el 2012-2016, con un rendimiento promedio de 50 toneladas ha<sup>-1</sup> (FAOSTAT, 2017). Las principales regiones productoras de Paraguay son: la región Centro-Este con aproximadamente el 60% del área plantada y el 80% de la

producción, con 5 plantas (3 de ingenios azucareros y 2 azúcar+etanol); Región Centro con 20% del área plantada, 15% de la producción y 3 centrales azucareros; Región Bajo Chaco, con el 5% del área plantada de caña de azúcar usada como forraje y para la fabricación de miel. La época de plantación generalmente es en los meses de febrero a marzo, debido a riesgo de helada, siendo las variedades más plantadas: TUC 77-42, TUC 72 - 16, SP 80- 1842, RB 835054, RB 835486, SP 70-1284, SP 701143, RB 72454, RB 855536, RB 855113, SP 81-3250, RB 725828 y PR 61-632. Con un promedio de 4 cortes (Cabrera 2010 y Ministerio de Agricultura y Ganadería 2011).

### **Honduras**

De acuerdo con APAH (2017) en términos comparativos Honduras ocupa la cuarta posición en cuanto a la producción total de caña generada en los seis países que conforman el istmo centroamericano. La agroindustria azucarera en Honduras contribuye con el 1.5% del PIB nacional, 13% del PIB agrícola. El 70% del azúcar se distribuye en Honduras y un 30% se exporta, en tanto que a nivel de las exportaciones la Unión Europea y Estados Unidos consumen un 4 % cada uno y lo restante se envía al mercado mundial. Actualmente más de 55 mil hectáreas de caña son sembradas en el país produciendo más de quinientas mil toneladas métricas de azúcar al año, manejada por siete ingenios la participación porcentual de cada ingenio en la superficie total caña de azúcares la siguiente: La Grecia (23%), CAHSA (18%), AZUNOSA (15%), SER Chumbagua (15%), Tres Valles (13%), Azucarera Choluteca (11%) y AYSA (6%). La producción nacional de caña alcanzo un promedio de 5,385,760 toneladas en el periodo 2012-2016, con un rendimiento agrícola según datos de ese periodo en FAOSTAT (2017) de aproximadamente 83.1 toneladas ha<sup>-1</sup>.

La producción de caña de azúcar en Honduras es regada a través de diversos métodos de riego siendo el más usado es el de aspersión móvil, seguido por el riego por goteo, en términos porcentuales de superficie la distribución de los métodos es la siguiente: aspersión móvil (36%), goteo (30%), aspersión semi-fijo (23%), gravedad (10,77%) y pivote (0,23%) (APAH, 2017).

### **República Dominicana**

En la República Dominicana la producción nacional de caña alcanzo un promedio de 4,784,642 toneladas durante el periodo 2012-2016, con un rendimiento de 45

toneladas ha<sup>-1</sup> durante el mismo periodo (FAOSTAT, 2017). Durante la cosecha 2014-2015 el país tuvo una molienda de 4,535,333 toneladas de caña en un período de 180 días, distribuido en 4 centrales azucareros, siendo el principal Central Romana con 2 746 060 toneladas equivalente al 60% del total, seguida por las centrales Cristóbal Colón con 988 475 toneladas (22%), Barahona con 631 477 (14%) y Porvenir con 169 321 toneladas (4%). Para una producción de azúcar de 495 979 toneladas, distribuidas en un 64% en Central Romana, el 20% Cristóbal Colón, el 13% Baranhona y el 3% Porvenir (Ramos 2015).

### **Costa Rica**

En Costa Rica la producción anual promedio de entre 2012-2016 de caña fue de 4,237,034 toneladas, con un rendimiento promedio en ese periodo de 66.8 toneladas ha<sup>-1</sup>. El área plantada de caña fue aproximadamente 69,030 has en 2016 (FAOSTAT, 2017). Los ambientes en los que se encuentra la caña tienen una alta variabilidad altitudinal que van desde 0 a 1,600 msnm., La causa de esta variabilidad es que el país se encuentra dividido en 5 regiones para el plantío de caña de azúcar, distribuidas de acuerdo con la importancia en el Pacífico Seco con un clima tropical, lluvias de 1,700 mm por año<sup>-1</sup> y temperatura media de 27°C tiene un área cultivada de 43,000 has; el Valle Central Occidental es la segunda región productora con un clima tropical con lluvias superiores a los 2,000 mm por año<sup>-1</sup>, una temperatura media de 22.5°C con un área de plantación de 11,740 has, región del Valle Central Oriental con 6,300 has, clima tropical, precipitación anual superior a los 2,500 mm y temperatura media de 22.5°C; en San Carlos clima tropical lluvioso, un área de 5,200 has, precipitación mayor de 3,000 mm, temperatura media de 26°C; al Sur con un área de 1,600 has, un clima tropical lluvioso superior a los 2,500 mm y una temperatura media de 23°C. Las variedades plantadas son extranjeras entre las siguientes: 4 de Australia (Q68, Q68 (F), Q96 y Pindar), 3 de Hawai (H 57-5174, H 56-4848 y H 68-1158), 2 de Brasil (SP 70-1284, SP 70-1143), 1 de Barbados (B 70-355) y 1 de República Dominicana (CR 61-01) (Ministerio de Agricultura y Ganadería 2011 & (Solera et al., 2015).

### **Venezuela**

Las condiciones agroclimáticas de Venezuela son muy variables para la producción de la caña de azúcar, siendo cultivada en diferentes regiones desde áreas con alta pluviosidad, como al sur del Lago Maracaibo y las planicies del Oeste, como en áreas

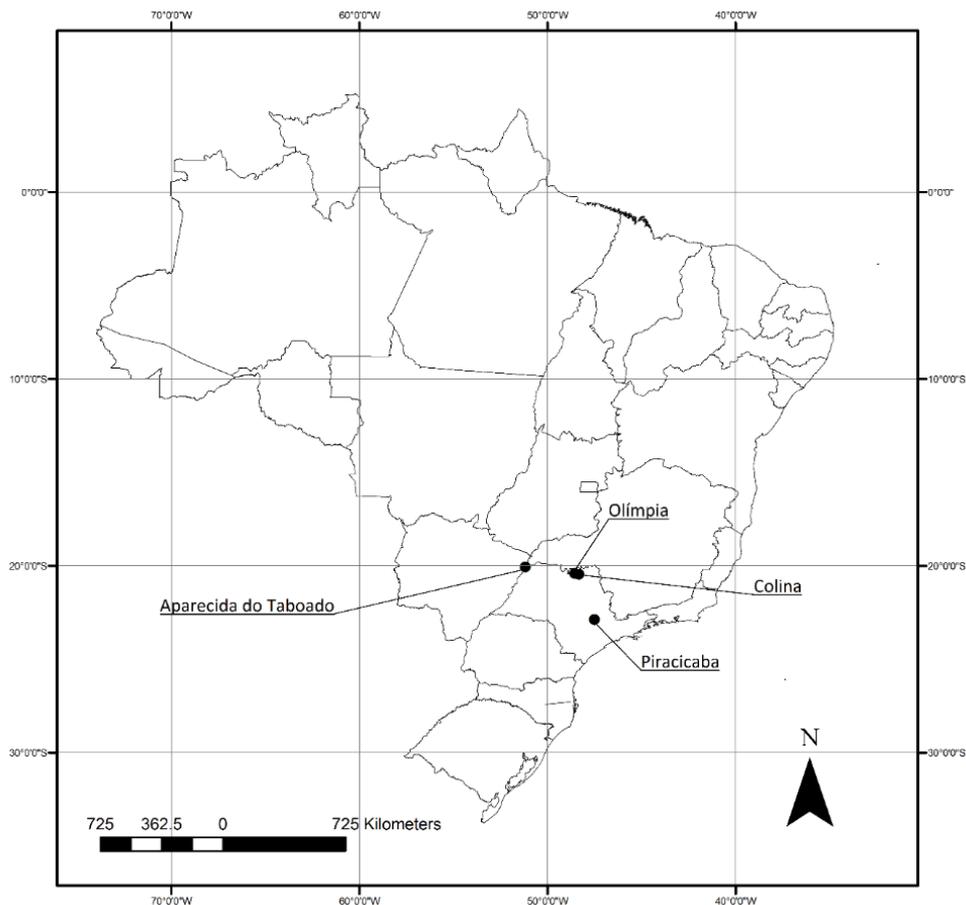
de baja precipitación, tales como centrales y occidentales. Esto refleja la gran importancia del cultivo para el país, especialmente si se considera el déficit de cerca del 30% en la producción nacional de azúcar (Uzcátegui, 1985, Bastidas et al., 2009). Desde 2005 se observa tendencia de caída en la producción venezolana de caña de azúcar, con una caída de 9 millones de toneladas en 2006 a cerca de 6 millones en 2014 (Ramírez et al., 2011). El promedio de producción nacional entre 2012-2016 fue de 5,948,262 toneladas de caña de azúcar, con un rendimiento promedio de 62.8 toneladas ha<sup>-1</sup> en el mismo periodo; en tanto que el área sembrada se redujo de 102,877 hectáreas en 2014 a solo 52,230 hectáreas en 2016 (FAOSTAT, 2017). El análisis comparativo de un grupo de 8 variedades, la variedad PR 61-632 se destacó por su crecimiento, introduciendo un aspecto general aceptable, con una resistencia a las principales enfermedades y buena producción de caña de azúcar. Para 3 ciclos de cosecha y con una edad media de 12 meses, Uzcátegui y Bastardo (1988) evaluaron cerca de 30 variedades y recomendaron la V71-39, por presentar características agronómicas deseables y mayor potencial producción en diferentes regiones y épocas de corte /plantación. Amaya (2000), evaluó por 6 meses un grupo de 10 variedades, donde el V71-39 también mostró mayor porcentaje de germinación (64%) y altura de la planta (2.30 m), en las condiciones de Valle de Santa Cruz de Bucaral, del estado Falcón (Bastidas et al., 2009). Rea et al. (1994), caracterizaron a 14 variedades de caña de azúcar seleccionadas por FONAIAP, y descubrieron que la variedad V 71-39, produce cerca de 140 toneladas de caña por hectarea con contenido de sacarosa (Pol%) de 14%, mostrando resistencia a las principales enfermedades que afectan la cosecha. Silva (1995), evaluó en el área de influencia del Central Pastora 12 variedades comerciales de caña de azúcar, nuevamente con buenos resultados para la V71-39 (Bastidas et al., 2009).

En Venezuela, como en la mayoría de los países productores de caña de azúcar del mundo, hay un programa de introducción, adquisición y selección de variedades de caña, este se realiza por el Fondo Nacional de Investigación Agrícola (FONAIAP) de CENIAP-INIA, que comienza con la obtención sexuada de semillas a través del híbrido (Rea et al., 1994). Estudios realizados en 14 cultivares, de los cuales 6 fueron obtenidos en Venezuela (V71-39, V74-7, V75-6, V77-12, V77-24 e V78-1), tres de Barbados (B75-49, B75-403 y B76-226), dos de los EUA (CP72-2086 y CP74-2005), dos de Cuba (C323-68 e C371-67), y uno de México (Mex64-1487) (Rea et al., 1994).

Estudios sobre los genotipos B81-509, V84-25, B81-494 y B80-408 presentaron resultados significativamente mayores en comparación con otros materiales genéticos (Rea & De Sousa Vieira 2002). Sin embargo, en las regiones con pocas precipitaciones las variedades que deben ser consideradas para la siembra son: C323-68, B75-403, PR61-632 y 226 B76 (Marcano et al. 2003).

## 6. Descripción de los datos obtenidos para basar los estudios en modelaje de caña de azúcar

Se obtuvieron datos completos de cuatro experimentos conducidos en Brasil con las variedades RB72-454 y SP83-2847 (Figura 4). Estas variedades ya llegaron a ser las dos principales variedades brasileñas, pero vienen siendo sustituidas paulatinamente por variedades nuevas, principalmente por cuestiones fitosanitarias.



**Figura 5. Localización de los experimentos de campo usando las variedades RB72-454 y SP83-2847.**

Uno de los experimentos contó con dos tratamientos hídricos (secano y totalmente irrigado por aspersión), mientras que los tres restantes crecieron bajo condición de secano, pero con lluvia suficiente para atender la necesidad hídrica del cultivo y asegurar crecimiento y desarrollo adecuados.

Estos conjuntos de datos tenían diferentes tipos edafoclimáticos (Tabla 4) representativos de las principales zonas de producción de caña de Brasil.

Todos los experimentos recibieron niveles adecuados de nitrógeno fósforo y potasio según las recomendaciones técnicas para sus respectivas regiones, como también tuvieron control adecuado de plagas, enfermedades y malas hierbas, habiendo sido plantados con colmos sanos con densidad variando entre 13 y 15 gemas m<sup>-2</sup>. Los experimentos fueron implantados con espaciamentos entre líneas que oscilan entre 1.4 m y 1.5 m.

**Tabla 4. Localización, fechas de plantación y cosecha, clima, suelo, tratamiento hídrico y profundidad máxima del sistema radicular en los sitios experimentales obtenidos.**

Dataset	Localidad	Fechas de Siembra y cosecha	Cultivares	Ciclo <sup>1</sup>	Clima <sup>22</sup>	Suelos	Prof. máx do sist. raíz	Tratamientos
1	Piracicaba/SP, 22°52'S, 47°30'W, 560m asml	10/29/2004 and 9/26/2005	RB72-454 SP83-2847 NCo376	PC	21.6°C 1230mm Cwa	Argissolo Vermelho (Typic Hapludults)*	400 cm	Irrigated, Rainfed
2	Aparecida do Taboado/MS, 20°05'19"S, 51°17'59"W, 335m asml	7/1/2006 and 9/8/2007	SP83-2847	R1	23.5 °C 1560mm Aw	Latossolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	400 cm	Rainfed
3	Colina/SP, 20°25'S, 48°19'W, 590m asml	2/10/2004 and 6/15/2005	RB72-454 SP83-2847	PC	22.8 °C 1363mm Aw	Latossolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	400 cm	Rainfed
4	Olimpia/SP, 20°26'S, 48°32'W, 500m asml	2/10/2004 and 6/15/2005	RB72-454 SP83-2847	PC	23.3 °C 1349mm Aw	Latossolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	400 cm	Rainfed

Los datos referentes al límite inferior de retención de agua (LWL) (similar al concepto de punto de marchitez permanente), límite superior drenado (UWL) (similar a la capacidad de campo) y humedad volumétrica de saturación (SWL) (Tabla 5) fueron medidos en Olimpia, Colina y Aparecida del Taboado. Los valores de humedad del suelo a -10 kPa (UWL), a -1500 kPa (LWL) y a saturación (SWL) se estimaron utilizando funciones de pedotransferencia (PTF, Tomasella et al., 2000) junto con el método de estimación de micro y macro porosidad del suelo establecido por Stolf,

<sup>1</sup> PC – caña-planta; R# – representa el número de soca.

<sup>2</sup> Respectivamente: temperatura media anual, precipitación total anual y clasificación climática de Köppen.

Thurler, Bacchi y Reichardt (2011). Los datos de entrada para las PTF's fueron obtenidos en PROYECTO RADAMBRASIL (1986). Para el experimento en Piracicaba, los parámetros hídricos del suelo fueron obtenidos a partir de medidas de laboratorio en muestras inalteradas de suelo.

**Tabla 5. Propiedades de los suelos de los experimentos obtenidos.**

Profundidad	PMP (LWL) cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	Superior (0,1 atm) CC (UWL) cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	Humedad Vol. a Sat. (SWL), cm cm <sup>-3</sup>	Densidad g cm <sup>-3</sup>	Carbono Orgánico %	Arcilla %	Limo, %	pH water	Capacidad de Intercambio Cationico (CIC) cmol kg <sup>-1</sup>
Dataset 1 – Latossolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox) <sup>1</sup>									
20	0.200	0.310	0.480	1.37	1.24	48.5	4.5	4.1	4.5
40	0.225	0.330	0.480	1.36	0.90	52.0	4.5	4.1	3.2
100	0.238	0.338	0.485	1.19	0.45	59.8	4.0	4.4	2.7
450	0.250	0.350	0.490	1.13	0.10	59.0	10.0	4.6	2.1
Dataset 2 – Latossolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox) <sup>1</sup>									
20	0.220	0.360	0.520	1.34	1.70	50.0	8.5	4.6	5.0
40	0.235	0.355	0.495	1.29	0.81	54.0	9.0	4.6	3.2
100	0.240	0.343	0.473	1.25	0.05	57.0	8.0	4.2	2.7
450	0.250	0.335	0.470	1.22	0.05	57.0	8.0	4.2	2.7
Dataset 3 – Latossolo Vermelho-Escuro (Typic Hapludox) <sup>1</sup>									
20	0.115	0.210	0.440	1.31	0.81	18.5	6.5	5.5	5.9
40	0.120	0.220	0.440	1.22	0.59	21.0	8.5	4.7	3.9
100	0.120	0.210	0.420	1.21	0.06	21.0	8.0	5.3	2.8
450	0.120	0.210	0.420	1.21	0.06	21.0	8.0	5.3	2.8
Dataset 4 – Latossolo Vermelho-Escuro (Typic Hapludox) <sup>1</sup>									
20	0.115	0.215	0.440	1.32	0.75	19.0	5.5	5.9	4.3
40	0.120	0.220	0.440	1.25	0.57	22.0	8.5	5.2	4.4
100	0.120	0.210	0.420	1.22	0.05	22.0	8.0	4.8	4.7
450	0.120	0.210	0.420	1.22	0.05	22.0	8.0	4.8	4.7

Los datos meteorológicos de las localidades incluyen radiación solar global, temperatura máxima y mínima, así como precipitación total diaria. Para el conjunto de datos 1, la temperatura del aire, la velocidad del viento, la humedad relativa y la radiación solar fueron recolectados por estaciones meteorológicas automáticas (EMA) instaladas cerca del experimento. Para el conjunto de datos del sitio 2, la temperatura del aire y la radiación solar fueron recolectadas por EMA instalada a unos 15 km del sitio experimental. El terreno plano de la región tiende a minimizar el error derivado de esa distancia. Los sitios 4 y 5 están distantes aproximadamente 30 km

uno del otro en relieve plano y una EMA instalada en posición intermedia fue utilizada para medir los datos de radiación solar y temperatura. La lluvia fue medida localmente en cada experimento. Para todos los locales, en los días con datos faltantes de radiación solar, fueron estimados con fundamentados en el método de Bristow & Campbell (1984), que se mostró el más eficiente respecto a los probados por Conceição & Marin (2007) y por Marin & Carvalho (2012) para diferentes regiones de Brasil. Los datos faltantes de temperatura y lluvia se completaron utilizando el programa WGEN (Richardson & Wright, 1984), así como datos de estaciones próximas cuando estaba disponible.

En el sitio 1, los datos detallados sobre el crecimiento del cultivo se recogieron regularmente cada 4-5 semanas a lo largo del ciclo, cubriendo las siguientes variables: índice de área foliar (LAI), población, masa seca de la parte aérea y de los tallos, y el número de hojas verdes, masa fresca de los colmos y parte aérea, además del contenido de sacarosa en el caldo (Pol). Para el sitio 2, se registraron: la población de plantas, masa de tallo y altura de las plantas 3 veces a lo largo del ciclo, mientras que el Pol fue recolectado 9 veces a partir de la mitad del ciclo hasta la cosecha. Para los sitios 4 y 5, la población de plantas, masa de tallos y altura de las plantas fueron recogidas sólo una vez a lo largo del ciclo, mientras que el Pol fue medido 13 veces a partir de la mitad del ciclo hasta la cosecha.

## 7. Consideraciones finales

El modelaje de la caña de azúcar ha evolucionado con cierta rapidez en los últimos 10 años en América Latina, especialmente en Brasil, pero aún se encuentra en un nivel bastante atrasado en relación con lo que se ha hecho en Australia y también en Sudáfrica. En comparación con el nivel alcanzado por otros cultivos (por ejemplo, trigo y maíz) se observa que el estado de desarrollo de los modelos, en términos mundiales, es aún más atrasado, existiendo oportunidades para la evolución de los modelos.

En América Latina, los estudios sobre modelaje de caña de azúcar se iniciaron en la década de 1970, seguido por un largo período (de aproximadamente 30 años) con poco número de publicaciones en esa línea de investigación. Después de los años 2000, se observó un nuevo impulso en esta línea de investigación, manteniéndose relativamente activa hasta la actualidad. Los modelos más usados en LAC para la modelación de la caña son DSSAT/CANEGRO y APSIM-Sugarcane, mas WOFOST, CROPWAT, AquaCrop, SWAP, y SAMUCA también marcan su presencia.

Muchos de los trabajos de investigación recopilados tienen como principal interés la evaluación agronómica de las variedades de caña en ambientes específicos o bajo condiciones experimentales variantes. Existe un número reducido de trabajos con enfoque a la evaluación de efectos del cambio climático y a la evaluación de la capacidad de las herramientas de funcionar para la predicción del rendimiento de la caña.

Aunque la mayoría de los trabajos realizados no tenían el propósito específico de recolección de datos de campo orientados al modelaje del cultivo, es posible utilizar datos de experimentos paralelos para mantener un buen ritmo en las investigaciones en esa línea.

La distribución geográfica de estos trabajos está concentrada principalmente en Brasil, pero se tiene en Colombia un polo de modelaje que también puede ganar fuerza en los próximos años, una vez que hay personal entrenado en el área y con alto nivel de conocimiento sobre el cultivo y sobre las técnicas de modelaje. Sin embargo, otras instituciones de países para los que el cultivo es de interés podrían beneficiarse de tales herramientas, como así también podrían tener datos agronómicos que permitan trabajar con estas herramientas en sus países.

La base propuesta, aunque restringida geográficamente, representa la principal zona productora de caña de azúcar de América Latina (y también del mundo) con una variación considerable de clima y suelo. La base genética de las variedades presentadas también sugiere que el desarrollo y ajuste de modelos basados en esos datos ofrecerán un importante primer paso para estudiar los impactos del cambio climático y las opciones de adaptación en la principal zona productora de caña mundial.

Iniciativas como EUROCLIMA pueden actuar como polos irradiadores de conocimiento y facilitar la conexión entre los investigadores e instituciones interesados en el tema del modelaje, acelerando el desarrollo y uso de esas herramientas en América Latina.

## 8. Lista de investigadores e instituciones con trabajos e intereses en el modelaje de caña de azúcar

A continuación, se presenta la lista de instituciones e investigadores que tienen actividad relacionada con el modelaje de caña de azúcar en América Latina.

### ARGENTINA

Fábio Bardin

Ledesma Agroindustrial, Av. Rivadavia S/N Libertador General San Martín, 4512 Libertador Gral San Martín, Jujuy, Argentina

[fbardin@ledesma.com.ar](mailto:fbardin@ledesma.com.ar)

### BRASIL

Allan Cunha Barros

Universidade Federal de Alagoas, Campus Arapiraca. Av. Manoel Severino Barbosa, s/n. Bom Sucesso. 57309005 - Arapiraca, AL – Brasil. Telefone: (82) 996101005

[allan-cunha@hotmail.com](mailto:allan-cunha@hotmail.com)

Daniel S P Nassif

Universidade Federal de São Carlos. Rodovia Lauri Simões de Barros, km 12 - SP-189 - Aracaçu, Buri - SP, 18290-000.

[dspnassif@gmail.com](mailto:dspnassif@gmail.com)

Fábio Vale Scarpore

Universidade de São Paulo (USP). Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA). Av. Centenário, 303 - São Dimas, Piracicaba - SP, 13400-970. Telefone: (19) 3429-4611.

[fabioscarpare@hotmail.com](mailto:fabioscarpare@hotmail.com)

Fábio R Marin

Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Av. Pádua Dias, 11 – Caixa Postal 09, 13418-900. Piracicaba-SP

[fabio.marin@usp.br](mailto:fabio.marin@usp.br)

Rubens Duarte Coelho

Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Av. Pádua Dias, 11 – Caixa Postal 09, 13418-900. Piracicaba-SP

[rdcoelho@usp.br](mailto:rdcoelho@usp.br)

Santiago Quadra

Embrapa Informática Agropecuária. Av. Dr. André Tosello, 209 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-886. Telefone: (19) 3211-5700

[santiago.cuadra@embrapa.br](mailto:santiago.cuadra@embrapa.br)

Simone Toni Ruiz Correa

Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE). Rua Giuseppe Máximo Scalfaro, 10.000 - Bairro Guará. Campinas, São Paulo | CEP 13083-100. Telefone: +55 (19) 3512-1010.

[simone.correa@bioetanol.org.br](mailto:simone.correa@bioetanol.org.br)

Vinicius Bof Bufon

Embrapa Cerrados. Endereço: Brasília/ Km 18, BR-020, Brasília - DF, 73310-970.

[vinicius.bufon@embrapa.br](mailto:vinicius.bufon@embrapa.br)

COLOMBIA

Fernando de Jesús Villegas Trujillo

Cenicana. Estación Experimental vía Cali-Florida km 26. Tel: (57) (2) 6876611 ext. 5168. Fax: (57) (2) 2607853. Dirección postal: Calle 58 Norte 3BN-110 Cali - Colombia.

[fvillegas@cenicana.org](mailto:fvillegas@cenicana.org)

César Andrés Cortés Bello

Mitigation Action Plans & Scenarios (MAPS Programme). United States Agency for International Development (USAID) – Colombia.

VENEZUELA

Asdrúbal Jesús Farías Ramírez

Universidad Central de Venezuela - Facultad de Agronomía. Ciudad Universitaria, Los Chaguaramos. Caracas, Venezuela.

[ajfara@gmail.com](mailto:ajfara@gmail.com)

Franklin Paredes

Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales “EZEQUIEL ZAMORA” (UNELLEZ). San Carlos - Venezuela). Av. 23 de Enero, Redoma de Punto Fresco, Sede UNELLEZ – Barinas – Venezuela.

[franklinparedes75@gmail.com](mailto:franklinparedes75@gmail.com)

## 9. Referencias

Aguilar R.N., 2009. Ficha Técnica del cultivo de Caña de Azúcar. Sivicaña, I, p.16. Disponible en: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RT/article/view/1266>.

Aguilar R.N. et al., 2011. Factores de competitividad de la agroindustria de la caña de azúcar en México. *Región Y Sociedad*, 23(52), pp.261–297. Disponible en at: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-39252011000300009&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-39252011000300009&script=sci_arttext&tlng=pt).

Aguilar R.N. et al., 2010. Competitividad internacional de la industria azucarera de México. *Theoria*, 19(1), pp.7–29.

Amaya, M. 2000. Evaluación de diez variedades de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) con fines paneleros en el Valle de Santa Cruz de Bucaral. Municipio Unión. Estado Falcón. Trabajo Especial de Grado. Falcón, Venezuela. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda. Programa de Agronomía, 70 p.

ASOCAÑA, 2016. Aspectos Generales del Sector Azucarero Colombiano 2015-2016: Informe Anual. 94 p.

Asociación Azucarera de El Salvador (AAES). (2017). Impactos económicos <http://azucardeelsalvador.com/impactos-economicos/#PIB>

Asociación de productores de azúcar de Honduras (APAH). 2017. Memoria de Sostenibilidad 2017. [www.azucar.hn](http://www.azucar.hn)

Ávila, Á. & Carvajal, Y., 2015. Agrocombustibles y soberanía alimentaria en Colombia\*. *Cuadernos de Geografía - Revista Colombiana de Geografía*, 24(1), pp.43–60. Disponible en: [file:///C:/Users/TEMP.LENOVO-B40-20.010/Desktop/agrocumbustibles y soberanía alimentaria en Colombia.pdf](file:///C:/Users/TEMP.LENOVO-B40-20.010/Desktop/agrocumbustibles%20y%20soberan%C3%ADa%20alimentaria%20en%20Colombia.pdf).

Barros, A. C., Souza, J. L., Coelho, R. D., Barros, A. H. C., dos Santos Almeida, A. C., & da Silva Junior, J. M. 2016. Parametrização do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades de cana-de-açúcar em Alagoas. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 10(3), 631.

Barros, A.C.; Coelho, Rubens Duarte; Marin, F. R.; Polzer, D.L. Produtividade da cana-de-açúcar RB83-2847 irrigada em Paranavaí, Paraná. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 6, p. 97-105, 2012.

Barros, A.C.; Coelho, Rubens Duarte; Marin, F. R.; Polzer, D.L. Utilização do modelo Canegro para estimativa de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e não irrigadas para as regiões de Gurupi-TO e Teresina-PI. Irriga (UNESP Botucatu), v. 17, p. 189-207, 2012.

Bastidas, L., Rea, R. & Sousa, O. De, 2009. Potencial azucarero y panelero de cinco cultivares de caña de azúcar en el valle de Santa Cruz Bucaral, Estado de Falcon, Venezuela. *Agronomía ...*, 59(2), pp.137–148.

Benedetti, P. & Valeiro, A.H., 2011. Seguimiento de quemas de cañaverales en Tucumán durante el año 2009. *Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales*, 1(1), pp.64–67.

Bernardes, M. S., Suguitani, C., Laclau, P. R., Martiné, J. F., & Chopart, L. 2007. Evaluation of Mosicas sugarcane growth model in Brasil. In *Proc Int Soc Sug Cane Technol* (Vol. 26, pp. 589-592)

Bouroncle, C. et al., 2014. La agricultura cultivo de Guatemala y el cambio climático: ¿Dónde están las prioridades para la adaptación? CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS), p.8.

Burgos, G.L. et al., 2002. Bolivia, el trabajo infantil en la zafra de la caña de azúcar: azúcar: Una evaluación rápida OFICINA INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ed., La Paz, Bolivia: PROGRAMA INTERNACIONAL PARA LA ERRADICACIÓN DEL TRABAJO INFANTIL-IPEC SUDAMERICA.

Cabrera, A., 2010. Para Épocas de Sequía, Caña de Azúcar como fuente de forraje en el Chaco Central, pp.1–3.

Caraballosa, V., García, M. & Llerena, E., 2011. Zonificación agroclimática de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en la provincia de Sancti Spíritus. *Centro Agrícola*, 38(2), pp.57–62. Disponible en [http://cagricola.uclv.edu.cu/descargas/pdf/V38-Numero\\_2/cag102111792.pdf](http://cagricola.uclv.edu.cu/descargas/pdf/V38-Numero_2/cag102111792.pdf)

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador (CINCAE). 2017. Informe Anual 2016. El Triunfo, Ecuador. 70 p.

Comité Nacional de Productores de Azúcar (CNPA). 2017. <http://www.cnpa.com.ni/ingenios.php>.

Consejo Salvadoreño de la Agroindustria Azucarera (CONSAA). 2016a. INFORME FINAL DE PRODUCCION ZAFRA 2015-2016.

Consejo Salvadoreño de la Agroindustria Azucarera (CONSAA). 2016b. INFORME de rendición de cuentas periodo junio 2016 – mayo 2017.

Cortés Bello, C.A., Bernal Patiño, J.G., Díaz Almanza, E.D., Méndez Monroy, J.F. 2013. Uso del modelo Aquacrop para estimar rendimientos para el cultivo de caña de azúcar en el departamento del Valle del Cauca. Relatório Técnico FAO. 55p. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/field/009/i3427s/i3427s.pdf>. Acessado em 9 febrero 2018.

Costa, L.G.; Marin, F R.; Nassif, Daniel S. P.; Pinto, H.M.S.; Lopes-Assad, M L. Simulação do efeito do manejo da palha e do nitrogênio na produtividade da cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Impresso), v. 18, p. 469-474, 2014.

Cronquist, Arthur. An integrated system of classification of flowering plants. Columbia University Press, 1981. Cronquist, A. 1981. An integrated system of classification of flowering plants. New York: Columbia University Press. 1262p.

Dancé Caballero J. J. & Sáenz Yaya D. F. 2016. La cosecha de caña de azúcar: impacto económico, social y ambiental la cosecha de caña de azúcar: impacto económico, social y ambiental. Revista CEEI.

Díaz Ayala, S. P., Gracias Serrano, F. E., & Romero Huevo, C. M. 2004. Caracterización del cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en El Salvador (Doctoral dissertation, Universidad de El Salvador).

Edinter, A., 2014. El cultivo de caña de azúcar en Guatemala,

FAO, 2007. Suitability of global land area for rainfed production of sugar crops (high level of inputs) (FGGD). FAO Geonetwork. Disponible en: [www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home](http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home) [Acceso: febrero 9, 2018]

FAOSTAT, 2017. Sugarcane yield and production in LA. Disponible en: [www.fao.org/faostat/en/#data/QC](http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC) [Acceso: septiembre 28, 2017]. FAO, Rome.

Farías, A., 2011. Evaluación de la disponibilidad del agua para uso agrícola en un sector del Interflúvio Boconó-Masparro. Venezuela: Universidad Central de Venezuela.

Fernández, M. 2013. Efectos del cambio climático en la producción y rendimiento de cultivos por sectores. Colombia. FONADE.

Fernández, M., 2013. Diagnóstico de modelos agroclimáticos: Disponible en:<http://www.cambioclimatico.gov.co/documents/21021/21138/Uso+de+Modelos+agroclimaticos.pdf/9f53a23d-9afa-4fda-aad3-5fe407c6cfea>.

Ferreira Jr, A, R., Souza, J.L. de, Lyra, G.B., Teodoro, I., Santos, M.A. dos, Porfirio, A.C.S., 2012. Growth and photosynthesis of sugarcane based on biometric and meteorological variables. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16, 1229–1236. doi:10.1590/S1415-43662012001100012

Garcia Chavez, L.R., 1999. Comercialización y seguridad alimentaria con relación al azúcar en América Latina y el Caribe. Disponible en: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2001396065>.

García, A.S., 2005. Azúcar en américa. LXV, pp.9–31.

González-Corzo, M., 2015. La agroindustria cañera cubana: transformaciones recientes M. González-Corzo, ed., New York: Bildner Center for Western Hemisphere Studies.

Gouveia, E. R., Nascimento, R. D., Souto-Maior, A. M., & Rocha, G. D. M. 2009. Validação de metodologia para a caracterização química de bagaço de cana-de-açúcar. *Quim Nova*, 32(6), 1500-1503.

INEGI. 1998. Análisis a nivel nacional de la producción de caña de azúcar. Disponible: [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/380/702825118518/702825118518\\_2.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/380/702825118518/702825118518_2.pdf)

Inman-Bamber, N.G. 1991. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. *South African Journal of Plant and Soil*, 8: 93-99.

Jones, C. A., Wegener, M. K., Russell, J. S., McLeod, I. M., & Williams, J. R. 1989. AUSCANE-Simulation of Australian sugarcane with EPIC.

Jones, C.A.; Wegener, M.K.; Russel, J.S.; Mcleod, I.M.; Williams, J.R. Auscane – simulation of Australian sugarcane with EPIC. Brisbane: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1988. 194p.

Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., ... & McLean, G. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European journal of agronomy*, 18(3), 267-288, 2003.

Keating, B.A; Robertson, M.J; Muchow, R.C; Huth N.I. Modelling sugarcane production systems. Development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Res.*, 61, pp. 253-271, 1999.

Liu, D.L.; Kingston, G. Qcane: a simulation model of sugarcane growth and sugar accumulation. In: Robertson, M.J. (Ed.). *Research and modelling approaches to assess sugarcane production opportunities and constrains*. St. Lucia: University of Queensland, 1995. p.25-29.

Lizana Bobadilla, V. M. 2016. El etanol carburante en la costa norte del Perú. Impactos energético, ambiental y socioeconómico.

López L., J. G. 2003. Comercialización de la Caña de Azúcar en Nicaragua, casos comparativos con Honduras y Costa Rica. Proyecto IICA/EPAD. 68 p. <http://repiica.iica.int/docs/B0427e/B0427e.pdf>

Machado, Eduardo Caruso. Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum sp*). 1981.

Marcano, M., García, M. & Caraballo, L., 2003. Prueba comparativa de variedades de caña de azúcar en el noreste del Estado Monagas, Venezuela. *Bioagro*, 15(3), pp.221–225.

Marin, F. R.; Jones, J. W.; Royce, F.; Pellegrino, G. Q.; Assad, Eduardo Delgado; Barbosa, F.J. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. *Climatic Change*, p. 1-2, 2012.

Marin, F. R.; Jones, J. W.; Royce, F.; Suguitani, C.; Donzelli, J.L.; Pallone Filho, W. J.; Nassif, D.S.P. Parameterization and Evaluation of Predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian Sugarcane. *Agronomy Journal*, v. 103, p. 304, 2011.

Marin, F.R.; Carvalho, GL. Spatio-temporal variability of sugarcane yield efficiency in the state of São Paulo, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* (1977. Impressa), v. 47, p. 149-156, 2012.

Marin, F.R.; Jones, J. W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. *Scientia Agricola* (USP. Impresso), v. 71, p. 1-16, 2014.

Marin, F.R.; Jones, J.W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 71, p. 1-17, 2014

Marin, F.R.; Jones, J.W.; Boote, K.J. A Stochastic method for crop models: Including uncertainty in a sugarcane model. *Agronomy Journal*, v. 109(2), p. 1-13, 2017.

Marin, F.R.; Martha, G.; Cassman, K.; Grassini, P. Prospects for Increasing Sugarcane and Bioethanol Production on Existing Crop Area in Brazil. *BioScience*, v. 1, p. 1-1, 2016.

Marin, F.R.; Ribeiro, Rafael V.; Marchiori, Paulo E. R. How can crop modeling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, v. 26, p. 49-63, 2014.

Marin, F.R.; Thorburn, P. J.; Costa, L. G.; Otto, R. Simulating Long-Term Effects of Trash Management on Sugarcane Yield for Brazilian Cropping Systems. *Sugar Tech*, p. 1-2, 2013.

Marin, F.R.; Thorburn, Peter; Nassif, Daniel S. P.; Costa, L. G. Sugarcane model intercomparison: Structural differences and uncertainties under current and potential future climates. *Environmental Modelling & Software*, v. 1, p. 1-2, 2015.

Martiné, J.F. Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle. 2003. 130p. Thèse (Docteur) – Institut National Agronomique Paris-Grignon,

Melgar, M., Meneses, A., Orozco, H., Pérez, O., Espinosa, R., 2014. El cultivo de caña de azúcar en Guatemala. Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICANA). Artemis Edinter, Guatemala. <https://cengicana.org/info/el-cultivo-de-la-cana-de-azucar-en-guatemala>

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) 2012. Análisis de la producción azucarera en el salvador y sus vínculos con procesos de cambio del uso del suelo, la deforestación y degradación de ecosistemas forestales. Número de Contrato: 83109114. Proyecto: REDD/CCAD-GIZ. Número de referencia: 08.2211.4-001.00.

Ministerio de agricultura y ganadería (MAG). 2017. <http://sinagap.agricultura.gob.ec/index.php/produccion-cana-de-azucar>.

Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). 2013. Caña de azúcar principales aspectos de la cadena agroproductiva. Dirección General de Competitividad Agraria. Dirección de Información Agraria. [www.minagri.gob.pe](http://www.minagri.gob.pe)

Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). 2017. Producción de caña de azúcar en el Perú, perspectivas. Boletín perfil técnico N°5. Dirección general de políticas agrarias. Dirección de estudios económicos e información agraria. [www.minagri.gob.pe](http://www.minagri.gob.pe)

Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2011. Cultivo de Caña de Azúcar L. V. Vera, ed., La Asunción, Paraguay.

Monteiro, L.A., Sentelhas, P.C., 2013. Potential and Actual Sugarcane Yields in Southern Brazil as a Function of Climate Conditions and Crop Management. Sugar Tech 16, 264–276. doi:10.1007/s12355-013-0275-0

Munguia Brenes, P. M., & Ramos Castillo, E. D. C. 2017. Sectores Económicos: Estructura productiva del azúcar en Nicaragua periodo 2009-2013 (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua).

Nassif, D.S.P.; Marin, F. R.; Rezende, R.; Pellegrino, G. Q. 2012. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. Pesquisa Agropecuária Brasileira 47: 311-318.

O'Leary, G.J. 2000. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. Field Crops Research, 68: 97-111.

Ometto, J. C. 1974. Equação para a estimativa de evapotranspiração potencial, sua aplicação no cálculo das necessidades hídricas e do rendimento agro-industrial da cana-de-açúcar na região de Piracicaba–SP. 1974. 129 p. Tese de Doutorado. Tese (Livre Docência)-Escola Superior de Agricultura" Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Osorio, G., 2007. Manual Técnico: Buenas Prácticas Agrícolas -BPA- y Buenas Prácticas de Manufactura -BPM-en la Producción de Caña y Panela, Antioquia, Colombia.

Pacheco, G. & Mónica, B. 2015. Lineamientos estratégicos para la determinación del canon de aprovechamiento de agua en Nicaragua: el caso del cultivo de la caña de azúcar/Mónica Belén Guanopatín Pacheco.

Pagani, V., Stella, T., Guarneri, T., Finotto, G., van den Berg, M., Marin, F. R., Acutis, M., and Confalonieri, R. 2017. Forecasting sugarcane yields using agro-climatic indicators and Canegro model: A case study in the main production region in Brazil. *Agricultural Systems* 154, 45-52.

Pereira, Antonio Roberto; Machado, Eduardo Caruso. Um simulador dinâmico do crescimento de uma cultura de cana-de-açúcar A dynamic simulator of the sugarcane crop growth. *Bragantia*, v. 45, n. 1, p. 107-122, 1986.

Pérez, B.O. & Melgar, M., 2000. Sugar Cane Response to Potassium Fertilization on Andisol, Entisol, and Mollisol Soils of Guatemala. , 14(1), pp.20–22.

Pérez, D. et al., 2007. Estado actual y evolución de la productividad del cultivo de caña de azúcar en Tucumán y el noroeste argentino en el período 1990-2007 Publicación., EEAOC.

Pocovi, M.I., Collavino, N.G. & Mariotti, J.A., 2011. Aspectos de biodiversidad relacionados con la mejora genética de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en Argentina. *Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales*, 1(1), pp.11–15.

Portal Caña, 2015. Crece el cultivo de la caña de azúcar en Bolivia, p.1.

Poulsen, T. G., P. Moldrup, T. Yamaguchi, P. Schjønning, and J. A. Hansen. 1999. Predicting Soil-Water and Soil-Air Transport Properties and Their Effects on Soil-Vapor Extraction Efficiency. *Ground Water Monitoring & Remediation* 19, no. 3: 61-70.

Radambrasil Project. 1973–1986. Levantamento de recursos naturais. Vol. 31, 32 Inst.32 Inst. Brasileiro Geogr. Estatística, Rio de Janeiro, Brazil.

Ramírez Nuñez, V., Lozada, G., Arellano J., Calderón, M., Andrade, C., 2011. Un modelo de producción y consumo de azúcar en Venezuela. *Revista Ciencia e Ingeniería*. Edición Especial: “Jornada de Modelado y Simulación”, pp.61–72. Disponible en: <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/cienciaeingenieria/article/view/3940>

Ramos, C., 2015. Informe Zafra Azucarera 2014/2015, Santo Domingo, República Dominicana.

Razo, C. et al., 2007. Producción de biomasa para biocombustibles líquidos: el potencial de América latina y el Caribe, Disponible en: [http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/4581/S0700830\\_es.pdf?sequence=1](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/4581/S0700830_es.pdf?sequence=1).

Rea, R. & De Sousa Vieira, O., 2002. Genotype x environment interactions in sugarcane yield trials in the central-western region of Venezuela. *Interciencia*, 27(11), pp.620–624.

Rea, R., Souza, O. De & González, V., 1994. Caracterización de catorce variedades promisorias de caña de azúcar en Venezuela. , 12(1), p.3–45.

Reichardt, K., Nielsen, D.R., Biggar, J. 1972. Horizontal infiltration into layered soils. *Proc. of Soil Sci. of America*, Madison, v. 36, n.6, p. 858-863.

Rivera, A. et al., 2010. Competitividad internacional de la industria azucarera de México. *Theoria*, 19(1), pp.7–29.

Rudorff, B. F. T., & Batista, G. T. 1990. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. *Remote sensing of Environment*, 33(3), 183-192.

Rueda, F. et al., 2015. Aplicación de una metodología de análisis de datos obtenidos por percepción remota orientados a la estimación de la productividad de caña para panela al cuantificar el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) Application of a method of anal., 16, pp.25–40.

Ruiz-Ramírez, J. et al., 2011. Time Series Analysis Forecasting in Sugar Cane Production. TERRA LATINOAMERICANA, 29(1), pp.103–109.

SAGARPA. 2012. Importancia de la agroindustria de la caña de azúcar. Disponible: <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Documents/Cultivos%20Agroindustriales/Impactos%20Ca%C3%B1a.pdf>

Salgado E., Pineda K. 2010. Ficha de Mercado para la Industria Azucarera en Nicaragua. Instituto Nacional de Promoción de la Competencia (PROCOMPETENCIA). Programa COMPAL Proyecto para Nicaragua. <https://unctadcompal.org/wp-content/uploads/2017/03/NICARAGUA-Ficha-mercado-Azucar-NUEVO.pdf>

Santos, A.C.A.S. 2008. Assessment of genotypes of sugarcane for climate conditions of Aparecida do Taboado- MS. [abstract in English]. Master Thesis. Ilha Solteira: Unesp.

Scarpate, F.V.; Jong Van Lier, Q.; Ruiz-Correa, S.T.; Barros, A.H.C.; Marin, F.R.; Nassif, D.S.P. Modelos de crescimento da cana-de-açúcar e sua parametrização. Revista de Agricultura, Piracicaba, v. 87, p. 66-80, 2012.

Sentíes-Herrera, H.E., Trejo-Téllez, L.I., Gómez-Merino, F. C. (2017). The Mexican sugarcane production system: History, current status, and new trends. In "Sugarcane" (R. Murphy, ed.), pp. 39-72. Nova Science Publishers. [https://www.novapublishers.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=63650](https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=63650)

Silva, E. 1995. Ensayo sobre germinación de 12 variedades comerciales en el área de influencia del Central Pastora. Fundazúcar, Venezuela. Boletín N° 17, pp.13-16.

Silva, R.F. da, 2012. Calibração do modelo DSSAT/CANEGRO para a cana-de-açúcar e seu uso para a avaliação do impacto das mudanças climáticas (Dissertação de Mestrado). UFV, Viçosa-MG.

Singels, A.; Jones, M.; Van der Berg, M. DSSAT v.4.5 DSSAT/CANEGRO: sugarcane plant module: scientific documentation. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling: South African Sugarcane Research Institute,

Singels, A; Jones, M; Marin, FR; Ruane, A; Thorburn, P. Predicting Climate Change Impacts on Sugarcane Production at Sites in Australia, Brazil and South Africa Using the Canegro Model. SugarTech, v. 18, p. 347-355, 2013.

Solera, M.C., José, S. & Rica, C., 2015. Principales variedades de caña cultivadas comercialmente en algunos países de tradición azucarera del Continente Americano.

Sopena, R.A. et al., 2011. Caracterización de los daños por heladas en caña de azúcar en Tucumán en los años 2009 y 2010. Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales, 1(1), pp.55–58.

Stella, T., Francone, C., Yamaç, S. S., Ceotto, E., Pagani, V., Pilu, R., and Confalonieri, R. (2015). Reimplementation and reuse of the Canegro model: From sugarcane to giant reed. Computers and Electronics in Agriculture 113, 193-202.

Suguitani, Carlos. Entendendo o crescimento e produção da cana de açúcar: avaliação do modelo Mosicas. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Tasso Jr., L.C. 2007. Agrotechnology characterization of sugarcane cultivars (*Saccharum* spp.) in central-north region of State of Sao Paulo. [Abstract in English]. Jaboticabal, Brazil: PhD dissertation in Plant Production- Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista.

USDA. 2017. 2017. El Salvador Sugar Annual 2017 Sugar production improved due to favorable weather. GAIN Report Number: ES1701

Uzcátegui, C. y J. Bastardo. 1988. Evaluación de variedades de caña de azúcar en el valle de Aragua. Período 1985-1989. Caña de Azúcar 6(2), pp.75-104.

Valade, A.; Ciais, P.; Vuichard, N.; Viovy, N.; Caubel, A.; Huth, N.; Marin, F.; Martiné, J.-F. Modeling sugarcane yield with a process-based model from site to continental scale: uncertainties arising from model structure and parameter values. Geoscientific Model Development, v. 7, p. 1225-1245, 2014.

van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Research*, 143, 4-17.

Vianna, Murilo dos Santos; Sentelhas, Paulo Cesar. 2016. Performance of DSSAT CSM-CANEGRO under operational conditions and its use in determining the 'Saving irrigation' impact on sugarcane crop. *Sugar Tech*, 18(1), 75-86.

Vianna, Murilo dos Santos; Sentelhas, Paulo Cesar. Simulation of the water deficit risk in sugarcane-crop expansion regions in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 49, n. 4, p. 237-246, 2014.

Villatoro, B., Pérez, O., Suárez, A., Castro, O., Rodríguez, M., & Ufer, C. Zonificación agroecológica para el cultivo de caña de azúcar en la zona cañera de la Costa Sur de Guatemala—Primera Aproximación. Memoria. Presentación de resultados de investigación. *Zafra*, 2009, 226-239. 2008. Villatoro, B.O.P.A.S.O.C.M.R.C.U., 2008. Zonificación-Agroecológica-para-el-Cultivo-de-la-Caña-de-Azúcar-,

Villegas, F.D.; Daza, O.H.; Jones, J.W.; Royce, F.S. CASUPRO: an industry-driven sugarcane model. In: ASAE Annual International Meeting. Presented at the Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers, Tampa. 2005.

Vizcaino, A. & Flores, S., 2010. Introducción. In 2do Congreso Internacional sobre el Manejo Sustentable de la Caña de Azúcar.

You, L., U. Wood-Sichra, S. Fritz, Z. Guo, L. See, and J. Koo. 2016. Spatial Production Allocation Model (SPAM) 2005 v3.1. Disponible en <http://mapspam.info/>

## 10. Descripción del anexo digital: experimentos de modelaje y experimentos agronómicos.

La guía del usuario se describe en el anexo digital (documentos de Word). La base de datos de los experimentos esta presentada en formato Excel, dividida en hojas de cálculo donde está la información climática, de suelos, cultivos y manejo. Esta es la información mínima requerida para poder alimentar a los modelos de caña de azúcar. En la hoja de Excel que contiene datos de los cultivos se han utilizado los acrónimos usados en la plataforma DSSAT que fueron descritos por IBSNAT. Además, se presenta información referente al modelaje para diversos países de América Latina y estudios agronómicos con potencial para ser usados en la validación, los cuales fueron encontrados sólo para Brasil. Consulte en el anexo digital mayor detalle de los datos colectados.

En cuanto a los modelos referidos en este informe a continuación se presenta una lista con algunos de ellos y sus enlaces de descarga:

**AQUACROP:** Es un modelo genérico de crecimiento de cultivos desarrollado por la FAO para evaluar el efecto del medio ambiente y la gestión en la producción de cultivos, puede ser descargado en el portal <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html> elegir de 32 o 64 bits.

**CROPWAT:** es un programa específico para el cálculo de las necesidades de agua de cultivo y los requisitos de riego basados en los datos de suelo, clima y del cultivo. El portal de descarga es <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/>

**WOFOST:** modelo genérico que puede ser usado para una amplia gama de cultivos su descarga puede ser realizada en el portal <https://github.com/ajwdewit/WOFOST>

**Plataforma DSSAT:** Incluye el modelo específico para caña de azúcar Canegro. Para realizar su descarga es necesario registrarse en el portal <https://dssat.net/downloads/dssat-v47>

**Plataforma APSIM:** Incluye el módulo para caña de azúcar APSIM-Sugarcane. Para su descarga es necesario hacer un registro en el portal <https://www.apsim.info/APSIM.Registration.Portal/Main.aspx>. Una vez registrado, recibirá un correo electrónico con el enlace de descarga y la contraseña.

**Plataforma BioMA:** Para la caña de azúcar incluye una reconstrucción del modelo CANEGRO/DSSAT. Para realizar la descarga de BioMA debe ingresar al portal Agri4Cast Software (<http://agri4cast.jrc.ec.europa.eu/DataPortal/Index.aspx?o=s>), suscribirse y seleccionar entre la lista de versiones disponibles la versión para LAC de EUROCLIMA: BioMA Spatial – EUROCLIMA 2 version, o la versión más actualizada de esta.

## Lista de figuras

- Figura 1. Productividad potencial limitada por agua (toneladas/ha) de caña de azúcar en América Latina. Fuente: JRC con datos de FAO GeoNetwork (2007)..... 13
- Figura 2. Distribución geográfica del cultivo de caña de azúcar en América Latina y Caribe según el área total cultivada por celdas de cuadrícula de 10 km x 10 km de resolución. Fuente: JRC con datos de SPAM generados por You et al., (2016). ..... 14
- Figura 3. Distribución espacial de las áreas cultivadas con caña de azúcar en la región Centro-Sur de Brasil - cosecha 2008/2009. Fuente: Silva et al., 2009. .... 17
- Figura 4. Estados con mayor producción de caña de azúcar en México. .... 18
- Figura 5. Localización de los experimentos de campo usando las variedades RB72-454 y SP83-2847. .... 33

## Lista de tablas

Tabla 1. Descripción resumida de los principales procesos abordados por los modelos DSSAT / CANEGRO Y APSIM-Sugar.....	6
Tabla 2. Estudios sobre modelaje de caña de azúcar en América Latina, por país, autor principal, título de publicación y modelo de simulación utilizado.....	10
Tabla 3. Principales productores de caña de azúcar de América Latina y Caribe, sus respectivas áreas de cultivo, rendimiento y producción. ....	12
Tabla 4. Localización, fechas de plantación y cosecha, clima, suelo, tratamiento hídrico y profundidad máxima del sistema radicular en los sitios experimentales obtenidos.....	34
Tabla 5. Propiedades de los suelos de los experimentos obtenidos.....	35



## **PONERSE EN CONTACTO CON LA UNIÓN EUROPEA**

### **En persona**

En la Unión Europea existen cientos de centros de información Europe Direct. Puede encontrar la dirección del centro más cercano en: [https://europa.eu/european-union/contact\\_es](https://europa.eu/european-union/contact_es)

### **Por teléfono o por correo electrónico**

Europe Direct es un servicio que responde a sus preguntas sobre la Unión Europea. Puede acceder a este servicio:

- marcando el número de teléfono gratuito: 00 800 6 7 8 9 10 11 (algunos operadores pueden cobrar por las llamadas);
- marcando el siguiente número de teléfono: +32 22999696; o
- por correo electrónico: [https://europa.eu/european-union/contact\\_es](https://europa.eu/european-union/contact_es)

## **BUSCAR INFORMACIÓN SOBRE LA UNIÓN EUROPEA**

### **En línea**

Puede encontrar información sobre la Unión Europea en todas las lenguas oficiales de la Unión en el sitio web Europa: <https://europa.eu>

### **Publicaciones de la Unión Europea**

Puede descargar o solicitar publicaciones gratuitas y de pago de la Unión Europea en:

<https://publications.europa.eu/es/publications>

Si desea obtener varios ejemplares de las publicaciones gratuitas, póngase en contacto con Europe Direct o su centro de información local ([https://europa.eu/european-union/contact\\_es](https://europa.eu/european-union/contact_es)).

## JRC Declaración de objetivos

La misión del Centro Común de Investigación, como servicio de ciencia y conocimiento de la Comisión Europea, es apoyar las políticas de la UE con argumentos independientes durante todo el ciclo de las mismas.



**EU Science Hub**  
[ec.europa.eu/jrc](https://ec.europa.eu/jrc)



@EU\_ScienceHub



EU Science Hub - Joint Research Centre



Joint Research Centre



EU Science Hub

