

# Ficha Técnica del cultivo de **Caña de Azúcar**



**Noé Aguilar Rivera**<sup>1y2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Km. 1 Carretera Peñuela Amatlan de los Reyes S/N. C.P. 94945, Córdoba, Veracruz México.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Sierra Leona # 550, Col. Lomas 2a. Sección C.P. 78210 San Luis Potosí S.L.P. México

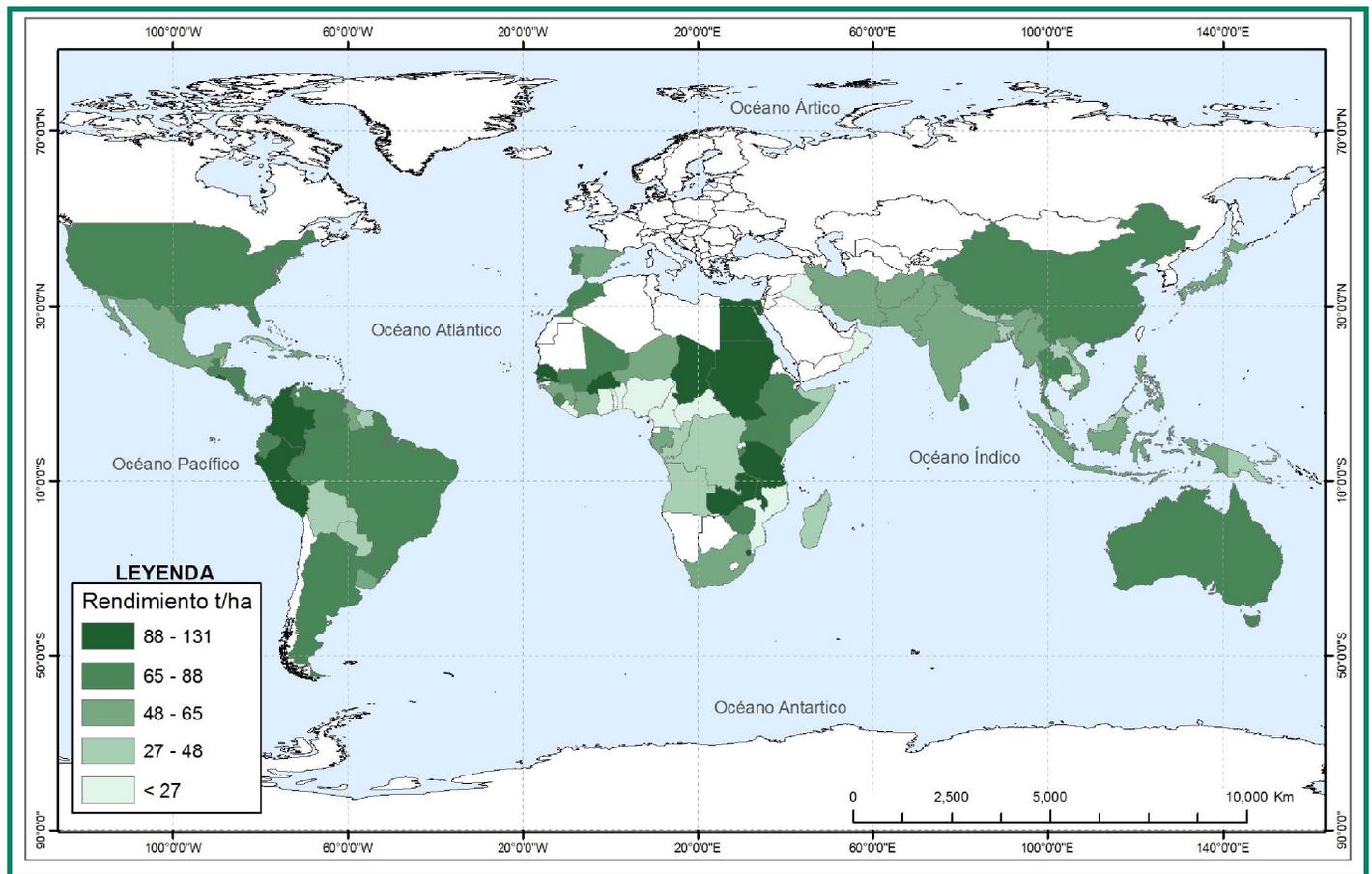
naguilar@uv.mx



## Introducción

La caña de azúcar, más que un cultivo y una actividad empresarial, ha representado toda una cultura para los países productores (alrededor de 130), en virtud de que su presencia ha sido muy amplia e intensa desde el siglo XVI y ha acompañado los procesos de colonización y desarrollo de numerosos países, y son muchas las formas y manifestaciones a través de las cuales esa planta y sus subproductos han intervenido en el quehacer de los pueblo.

Cada una de las regiones cañeras posee características y condiciones productivas singulares que hacen que el potencial productivo, la expectativa de rendimientos agroindustriales y los costos de producción involucrados varíen significativamente (Figura 1).

**Figura 1.** Rendimiento de campo de países productores de caña de azúcar (con datos de FAOSTAT, 2009)

En este sentido, los factores limitantes agroproductivos del cultivo de caña son aquellas propiedades y características del medio o entorno geográfico que en un momento determinado influyen en el desarrollo del cultivo. Estos factores pueden ser diversos y deben agruparse en: Factores que se relacionan con el medio o entorno geográfico, factores que resultan de características edafológicas naturales y factores que son procesos de degradación del suelo por influencia antropogénica y para poder tener una verdadera agricultura cañera sostenible deben realizarse trabajos de investigaciones, especialmente aplicados a los factores limitantes agroproductivos.

Melgar (2010) estableció que los rendimientos máximos de caña de azúcar alcanzan aproximadamente un 65 % del rendimiento teórico, por lo que existe un alto potencial para incrementar la acumulación de sacarosa si los límites bioquímicos y fisiológicos pueden ser identificados y modificados. Para este objetivo se requiere desarrollar investigaciones en ciencias como biología molecular, bioquímica, fisiología y agronomía asociados a factores limitantes y prácticas agro-

nómicas o tecnologías para proteger o incrementar el rendimiento cañero.

Marini et al. (2008) concluyeron que para la cultura de la caña de azúcar son cuatro factores básicos que pueden afectar el desarrollo agrícola regional: los procesos físicos, incluidos las condiciones edafoclimáticas regionales, los componentes estructurales que corresponde a los sistemas agrícolas y prácticas de gestión adoptadas, los efectos institucionales, que impliquen acciones gubernamentales que afectan a los precios, crédito, comercialización, e incentivos, e investigación y desarrollo, y los relacionados con innovaciones para aumentar la producción y resolver los problemas físicos que restringen las actividades relacionadas con la agricultura cañera. Este trabajo se realizó con el objetivo de identificar los factores limitantes agronómicos, fisiológicos y ambientales que determinan la eficiencia fotosintética de la producción de caña de azúcar

# Caña de azúcar

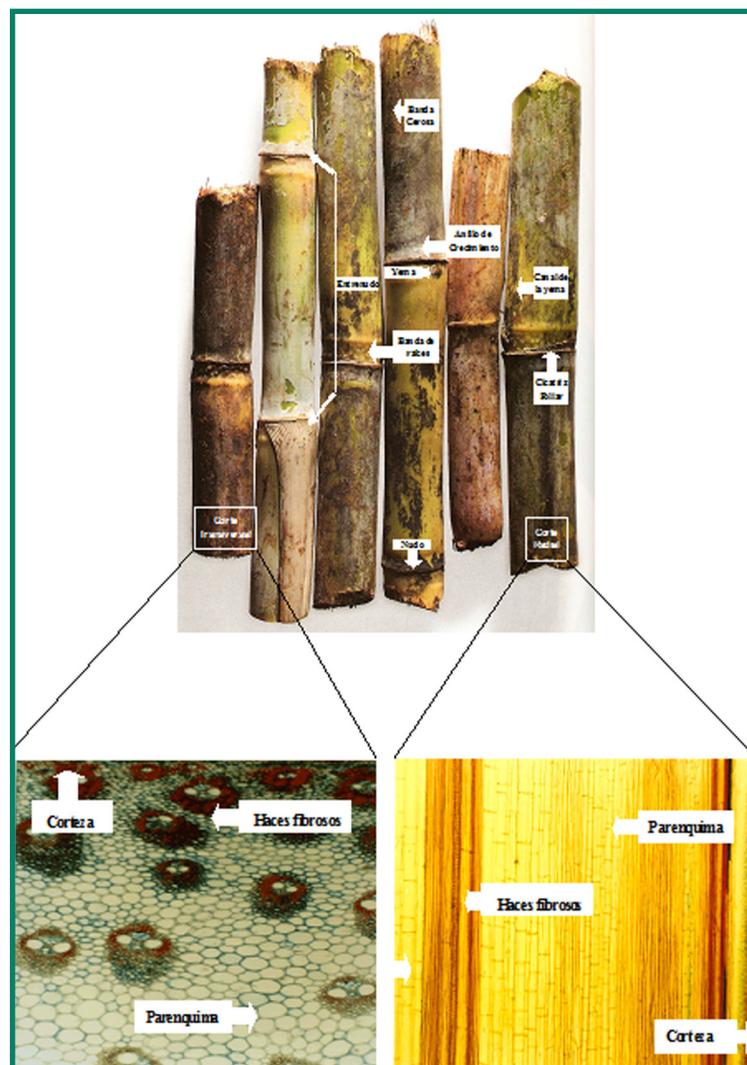
La caña de azúcar es una de las especies de plantas terrestres más eficientes, con alta producción de hojas y de tallos (caña integral) que en su madurez tiene la mitad de su biomasa en forma de fibra y azúcares. Potencialmente la caña puede producir alrededor de 45 t de masa seca año ha-1, al considerar la parte aérea puede producir 22 t azúcar año ha-1. (Moore yMaretzki 1996, De Sousa V, 1993)

Las cañas cultivadas pertenecen a dos grupos, las llamadas nobles, por su tamaño, suavidad y alto contenido de azúcar que pertenecen a la especie *Saccharum officinarum* y los híbridos entre *S. officinarum* y *S. spontaneum*. *Saccharum officinarum* se originó en Nueva Guinea, derivada de una especie local, *S. robustum*. También pudiera derivarse de una especie de otro género, *Erianthus*

*maximus*, o que esta se hibridizara con *Saccharum* para formar las cañas nobles. Tanto *S. officinarum* como *S. robustum* son plantas tropicales. Otras especies silvestres son *S. barberi* y *S. sinense*

El fruto agrícola de esta planta o agroindustrialmente útil para múltiples producciones es el tallo, en el cual se acumula sacarosa en el período de maduración, y que tiene una gran importancia para la producción de azúcares y fibras del tipo liberianas de paredes gruesas que ocasionalmente presentan nudos gruesos. La característica de las gramíneas son las células epiteliales, celdas en forma de saco, las células de parénquima y vasos cilíndricos que presentan un rompimiento perpendicular al eje (Figura 2).

**Figura 2.** El tallo de la caña de azúcar

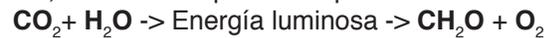


Los dos componentes del rendimiento de caña de azúcar son la cantidad de sacarosa y la producción de biomasa; incrementar uno o ambos eleva el rendimiento. La biomasa puede incrementarse maximizando la captura de radiación y/o la eficiencia de su uso en la fotosíntesis o ambas cosas en la interacción genotipo-ambiente (GXE) que es responsable de hasta el 4 % de la variación del rendimiento de campo (TCH), 5 % del azúcar recuperable (kg sacarosa /tonelada) y 7 % del rendimiento agroindustrial (TSH) (Gilbert et al.2006).

En el dosel de un cultivo, como caña de azúcar, a diferencia de un dosel natural, la distribución espacial depende de la acción humana y es generalmente simétrica y uniforme. Por lo tanto, el desarrollo del dosel de caña difiere significativamente entre los diversos cultivares o variedades sea ciclo plantilla, soca o resoca, la época de plantación o rebrote, espaciamiento entre cepas, factores medioambientales, densidad de plantación de cepas, prácticas de manejo; así el desarrollo del dosel puede controlarse mediante el conocimiento de la interacción entre esos factores con los agroclimáticos para favorecer la formación de nuevos brotes y hojas y evitar la senescencia temprana de las hojas y la disminución de la fotosíntesis (Murillo 2010, Soares et al., 2008, Singels, 2005 y Smit, 2004). Dos de ellos (la distribución del área foliar, tamaño de la hoja y la radiación dentro del dosel de la planta) están relacionados con el proceso fotosintético que reciben la mayor proporción de energía radiante incidente tendrán una eficiencia fotosintética aumentada.

Las variedades comerciales de caña de azúcar son híbridos interespecíficos, principalmente de *Saccharum officinarum* L., *Saccharum spontaneum* L y *Saccharum robustum*. La acumulación de sacarosa en el tallo depende además de la herencia (21 % *S. officinarum* L, 10 % *S. robustum* y 6 % *S. spontaneum* L) a factores morfológicos, enzimáticos, ambientales, disponibilidad de agua e incidencia de enfermedades. Los tallos con alta concentración de sacarosa tienen mayor contenido de humedad y menos fibra, además su epidermis es más gruesa y tienen mayor peso fresco (Miceli, 2002). Sin embargo, la respuesta agro-productiva del cultivo difiere según las condiciones de manejo, la región climática, el tipo de suelo, la variedad y otros factores (Yang, 1997). Por ello, resulta importante estudiar estas diferencias a fin de establecer las estrategias de regionalización de variedades y tecnologías con un fundamento científico y sobre bases sostenibles. En este sentido, la caña de azúcar posee un período vegetativo muy variable, cuya duración depende básicamente de las características del material genético utilizado, y también de la influencia que el clima ejerce en este proceso biológico y en la fotosíntesis (Hunsigi, 2001).

La fotosíntesis de las hojas de la planta de caña de azúcar, como en las plantas superiores:



es dependiente de las propiedades ópticas de las plantas individuales y del flujo luminoso; bajo total iluminación la parte aérea de las hojas son sobresaturadas con luz, mientras condiciones de no saturación existen en lo profundo del dosel. Como consecuencia de esta situación, a nivel planta, el rendimiento está limitado a la cantidad de luz absorbida, transmitida o reflejada al interior que puede penetrar dentro de las hojas del dosel (De Lira et al. 2009 y Soares, 2008). Con este fin, los mecanismos de transporte de fotones dentro de los tejidos foliares, hace necesario comprender los fenómenos biológicos y las características estructurales de estos tejidos y sus componentes, factores como la presencia y distribución de pigmentos en el interior de los tejidos tienen un impacto significativo en cómo las hojas propagan y absorben la luz.

Inman-Bamber, (2005, 1993), concluyo que el desarrollo del área foliar (LAI o IAF; superficie o área de follaje sobre un metro cuadrado de suelo derivado de la fotosíntesis) es crucial para maximizar la captura de radiación solar y la acumulación de biomasa en el rendimiento cañero, ya fisiológicamente el desarrollo del dosel de caña de azúcar es lento en comparación con los demás cultivos anuales y la producción de sacarosa por año puede reducirse considerablemente si la temporada de cosecha se ve limitada por plagas u otros factores como deficiencia de nutrimentos y principalmente por estrés hídrico que genera pérdida de turgencia y una disminución de la tasa de crecimiento y pueden afectar severamente la productividad.

Ustin, (2001) estableció que a pesar de la extensa literatura sobre las características ecofisiológicas a la forma de la hoja de cultivos como la caña de azúcar y su función fotosintética, la mayoría de los estudios no han ido más allá de la identificación cualitativa y la aplicación a evaluar productividad de ecosistemas agrícolas sin examinar los fundamentos de la mecánica de los patrones observados entre la estructura interna de la hoja y la orientación y función fisiológica así la mayoría de estos estudios han quedado a nivel de prototipos como APSIM-Sugarcane (Keating, 2003) y CANEGRO (Inman-Bamber, 1993) entre otros (AUSCANE, CENTURY, Canesim, MOSICAS, SUCRETTE, SUCROS y QCANE) para caña de azúcar (Galdos et al., 2010, Salles et al, 2009, O'Leary, 2000, 1999).

Las similitudes y diferencias entre ambos modelos se basan en como abordan los procesos fisiológicos de la planta de caña de azúcar (Lisson et al. 2005)

Estos modelos cañeros y de otros cultivos han sido diseñados para combinar la variabilidad climática, las respuestas de las propiedades físico-químicas del suelo y fisiológicas de la vegetación para explicar las diferencias de la vegetación ante el estrés, el crecimiento del dosel, y la productividad. Existen muchos modelos para predecir cómo las cosechas responden al clima, los nutrientes, agua, luz, plagas etc. (Zhao et al. 2010, Thorp, 2010 y Curran, 2001, 1990).

En este sentido, la bibliografía existente desde los trabajos de Kumar (1973) consisten en relacionar, de manera simple, los índices espectrales a las características de la hoja y el dosel y simular como los procesos fisiológicos son alterados por la orientación y la captura de la radiación solar que inducen a la planta a expresar su potencial de manera diferencial.

Sin embargo, actualmente la evaluación del potencial productivo de la caña de azúcar es llevado a cabo, generalmente, al finalizar cada zafra anterior a la cosecha, basándose en la experiencia de técnicos, a través de observaciones de campo y muestreos utilizando datos estadísticos de años anteriores, sin considerar la distribución espacial del área plantada y su variabilidad a diversos factores ambientales, lo que trae como consecuencia errores en los estimados de producción, es decir, las mediciones sobre el terreno no se pueden hacer con detalle suficiente para la distribución espacial, prefiriéndose realizar estimados de producción mediante análisis estadístico por lo que la metodología final de evaluación debe abarcar aspectos de varias metodologías y disciplinas (Elmorea et al., 2008; Benvenuti 2005, Krishna Rao, 2002; Fortes, 2006, 2003).

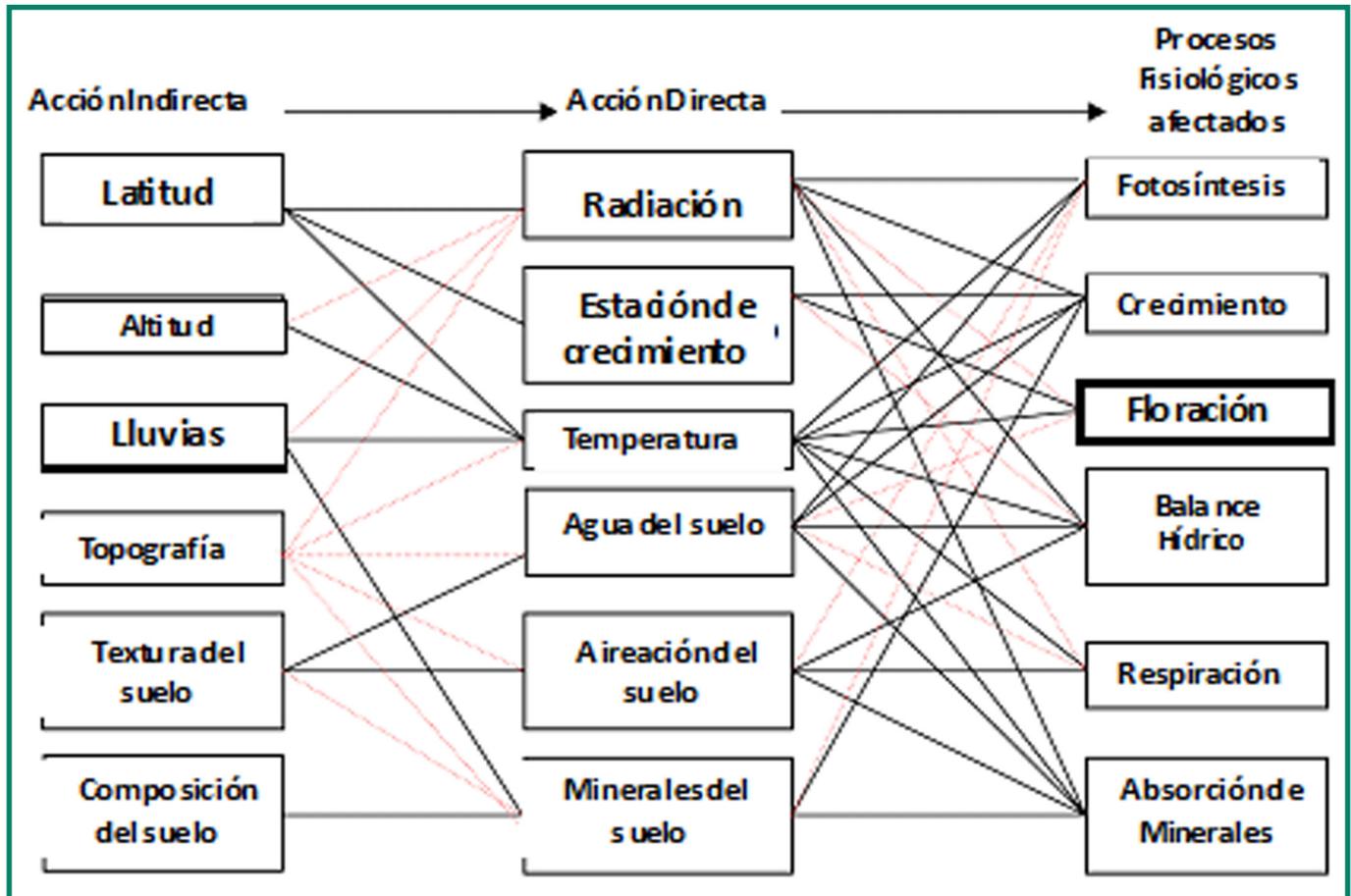
En caña de azúcar, la gestión ambiental del cultivo ha venido exigiendo la predicción del comportamiento de la producción y el riesgo ambiental en los distintos niveles de control en el cultivo comercial, ya que las formas de manejo del suelo, la profundidad y la densidad de plantación, riego, clima, control de la maduración, plagas y enfermedades, etc. como sistemas complejos requieren la construcción de modelos que cumplan los siguientes

objetivos:

- Estimación de crecimiento y rendimiento agrícola potencial a diversos ciclos y variedades basados en las características fisiológicas de la planta de caña de azúcar
- Descripción del comportamiento de los elementos a lo largo de la interfaz suelo-raíz-brote a diferentes condiciones ambientales, explorando la variabilidad espacial y temporal derivada del suelo y climas.
- Visualización de alternativas de gestión y uso de la tierra, aplicación de insumos agrícolas en la productividad de la caña de azúcar, teniendo en cuenta el análisis de los impactos ambientales, para la creación de escenarios posibles al menor costo.
- Simulación del gerenciamiento agrícola en factores relevantes para la productividad de la caña de azúcar (Salles et al, 2009, Zhou, 2003, Da Silva, 2001 y Lumsden, 1998)

Esto se debe, según Begue (2008) y Ji-hua Bing-fang (2008), a que la variabilidad en el crecimiento y, por ende, la productividad del cultivo de caña de azúcar (representaría la energía efectivamente utilizada en el proceso de fotosíntesis) está relacionada con múltiples factores complejos que pueden ser dependientes o independientes del tiempo. Los primeros, están relacionados directamente con el sustrato: topografía, tipo de suelo, profundidad y uso anterior del suelo. Factores anuales como: anomalías en la plantación y emergencia o condiciones climáticas; y estacionales, como enfermedades de la planta, malezas, sequía, inundaciones o heladas. Estos factores pueden, a su vez, interactuar generando un patrón espacio-temporal complejo que explique el diagnóstico del vigor del cultivo como combinación del contenido de pigmentos y la abundancia de área foliar debido a que la hoja es el órgano que refleja el estado nutricional de la planta, y que existe una relación directa entre el contenido foliar de un elemento en particular y su nivel de rendimiento y por lo tanto la productividad de la planta de caña de azúcar bajo un particular escenario ambiental y por el otro lado, por un complejo de factores socio-económicos, culturales y tecnológicos (Whittaker, 1997) (Figura 3)

**Figura 3.** Factores de producción de caña de azúcar (Epiphonio et al., 1996)



La variabilidad espacial de los atributos físicos, químicos y biológicos del suelo, influyen la eficiencia de manejo de la cultura cañera y su desenvolvimiento. Además de la variabilidad natural del suelo, las prácticas agrícolas de manejo (fertilización, muestreo, recuperación) son

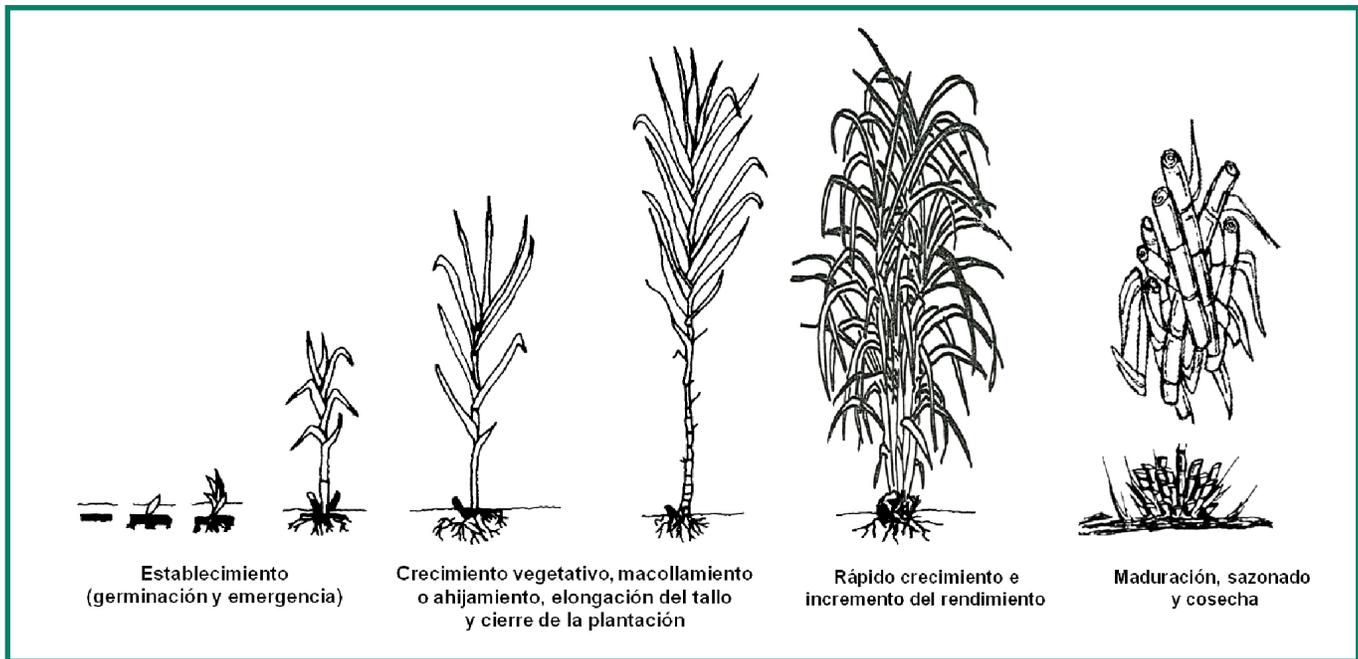
fuentes adicionales de variabilidad. El manejo del suelo puede afectar propiedades químicas, físicas, mineralógicas y biológicas, con impacto principalmente las capas superficiales (Kuang Ning et al. 2006).

## Etapas del cultivo de caña de azúcar

La caña de azúcar tiene esencialmente cuatro fases de crecimiento: a) fase de establecimiento; la cual implica germinación y emergencia, ya sea en plantación (plantillas) o en rebrote o retoños (socas y resocas) de los cuales crecerán nuevos tallos (macollamiento), b) fase

de ahijamiento, formativa o reposo fisiológico, c) fase de crecimiento rápido, y c) fase de maduración y cosecha (Allen, 2006, Humbert, 1974) (Figura 4).

**Figura 4.** Etapas fenológicas del cultivo de caña de azúcar (Benvenuti, 2005, FAO, 2006)



### 1. Establecimiento (germinación y emergencia 30 - 50 días).

La germinación se refiere a la iniciación del crecimiento a partir de las yemas presentes en los tallos plantados o en los que quedan en pie después de la cosecha del cultivo anterior. Durante esta fase es necesaria la disponibilidad adecuada de agua y el control de malezas. El déficit hídrico tiene un impacto significativo sobre el rendimiento de azúcar ya que propicia la reducción de la densidad de población de adultos debido al nuevo e insuficiente sistema de raíces pequeñas y poco profundas (Barbieri, 1993).

La germinación de las yemas es influenciada por factores externos e internos. Los factores externos son la humedad, la temperatura y la aireación del suelo. Los factores internos son la sanidad de la yema, la humedad del esqueje, el contenido de azúcar reductor del esqueje y su estado nutricional.

La germinación produce una mayor respiración y por eso, es importante tener una buena aireación del suelo. Por esta razón, los suelos abiertos, bien estructurados y porosos permiten una mejor germinación. Bajo condiciones

de campo, una germinación en torno del 60% puede ser considerada segura para un cultivo satisfactorio de caña (Humbert, 1974).

La época de plantación, como factor de manejo, incluye los efectos de la edad/calidad de la semilla o esquejes y, en especial, los de las variables ambientales. La incidencia del primer factor se relaciona con diferencias en el estado hídrico, nutricional, fisiológico y con el contenido y tipo de azúcares del esqueje. En cuanto al segundo factor, es ampliamente reconocido que la modificación de la fecha de siembra genera variaciones en el escenario ambiental, principalmente en las condiciones térmicas e hídricas, que inciden en la emergencia, en el desarrollo foliar y en la producción (Romero et al., 2005).

## 2. Crecimiento vegetativo, amacollamiento o ahijamiento, elongación del tallo y cierre de la plantación (50 -70 días).

El crecimiento y el rendimiento son muy sensibles a cualquier déficit de agua en esta etapa exigente; además la planta amacolla, se desarrolla mayor cantidad de follaje y la plantación comienza a cerrar. Es necesario aplicar fertilizante, para que las plantas puedan desarrollarse satisfactoriamente en la siguiente fase. La elongación del tallo es inicialmente rápida y, durante esta fase, el contenido de fibra del tallo es elevado, mientras que los niveles de sacarosa son todavía bastante bajos. Una temperatura cercana a 30°C es considerada como óptima para el ahijamiento (Fauconnier 1975).

El ahijamiento es el proceso fisiológico de ramificación subterránea múltiple, que se origina a partir de las articu-

laciones nodales compactas del tallo primario. El ahijamiento le da al cultivo un número adecuado de hojas activas y tallos, que permiten obtener un buen rendimiento. Diversos factores, tales como la variedad, la luz, la temperatura, el riego (humedad del suelo) y las prácticas de fertilización afectan al ahijamiento. La incidencia de una iluminación adecuada en la base de la planta de caña durante el período de ahijamiento es de vital importancia. Los hijuelos o retoños que se forman primero dan origen a tallos más gruesos y pesados. Los retoños formados más tarde mueren o se quedan cortos o inmaduros. Manejos culturales como el espaciamento, la fertilización, la disponibilidad de agua y el control de las arvenses afectan al ahijamiento (Barbieri, 1993).

## 3. Crecimiento rápido e incremento del rendimiento (180 - 220 días).

Comprende desde el cierre del dosel hasta el inicio del periodo de madurez de los tallos. Se caracteriza por el aumento de biomasa y del número de tallos por área. La humedad es fundamental para que el sistema radical se desarrolle y pueda absorber los nutrimentos. Cualquier déficit de agua comenzaría el proceso de maduración y detendría la acumulación de sacarosa antes de su etapa óptima .

Durante la primera etapa de esta fase ocurre la estabilización de los retoños. De todos los retoños formados sólo el 40 - 50% sobrevive y llega a formar cañas triturables. Esta es la fase más importante del cultivo, en la que se determinan la formación y elongación real de la caña y

su rendimiento. En esta fase ocurre un crecimiento rápido de los tallos con la formación de 4-5 nudos por mes, así como una foliación frecuente y rápida hasta alcanzar un Índice de Área Foliar (IAF) de 6-7 (Barbieri, 1993).

El riego por goteo, la fertirrigación y la presencia de condiciones climáticas de temperatura y humedad elevadas, y alta radiación favorecen una mayor elongación de la caña. El estrés hídrico reduce la longitud internodal. Temperaturas sobre 30°C, con humedad cercana al 80%, son más adecuadas para un buen crecimiento (Benvenuti, 2005).

## 4. Maduración y sazonado (60 - 140 días).

Se inicia alrededor de dos a tres meses antes de la cosecha para cultivos con ciclo de 12 meses, y de los 12 a los 16 meses de edad para los que completan el ciclo en 18 a 24 meses. En esta fase se requiere un bajo contenido de humedad del suelo, por lo que el riego debe ser reducido y luego detenerse para llevar la caña a la madurez; así se detiene el crecimiento y se propicia la acumulación de carbohidratos y la conversión de azúcares reductores (glucosa y fructosa) a sacarosa (Pereira, 2006). La maduración de la caña ocurre desde la base hacia el ápice y por esta razón la parte basal contiene más azúcares que la parte superior de la planta.

Condiciones de abundante luminosidad, cielos claros, noches frescas y días calurosos (es decir, con mayor variación diaria de temperatura) y climas secos son altamente estimulantes para la maduración. La consecuen-

cia práctica del conocimiento de estas etapas permite al productor una mejor comprensión de lo que ocurre con la planta y ayuda a un manejo eficiente del agua y los nutrimentos. El control parcial del crecimiento vegetativo y la manipulación de la producción de azúcar es factible. El conocimiento de las fases fenológicas de la planta es esencial para maximizar los rendimientos de caña y la recuperación del azúcar (Hunsigi, 2001).

## 5. Cosecha.

Los factores que afectan el sazonado de la planta de caña de azúcar son la edad, el contenido de nitrógeno del suelo y la humedad. Los factores ambientales pueden influir en la acumulación de sacarosa, incluido el estrés hídrico, los nutrimentos y la temperatura. Por regla general, la caña de azúcar es cosechada mediante un corte en la base del tallo, el cual se hace de forma manual o mecánica; la paja se elimina manualmente o es quemada previamente a la cosecha; ésta ocurre antes de la flo-

ración (12 a 18 meses después de la siembra) debido a que la antesis conduce a la reducción en el contenido de azúcar en los tallos (Humbert, 1974, Fauconnier, 1975, Dillewijn 1978) Estas etapas se traslapan cíclicamente entre los ciclos planta, soca y resocas y determinan el calendario de los periodos de zafra y no zafra azucarera y las actividades de campo (Cuadro 1). Se esperan mayores producciones de la caña planta y un decrecimiento a medida que la edad aumenta

**Cuadro 1.** Tecnologías de manejo disponibles en el campo cañero según la fase del cultivo en que se las implemente y los efectos que producen en el cultivo (Romero, 2009)

Fase	Factores de manejo	Efectos observados
I. Emergencia y macollaje	Sistematización y preparación de suelos, época de plantación y/o corte, elección de cultivares; selección y tratamiento de semilla; laboreo etc. Diseño de plantación, surcos de base ancha. Control de malezas. Riego. Fertilización. Plagas y enfermedades	Establecimiento de una alta población de tallos: Aumento del porcentaje y velocidad de brotación Inicio temprano del macollaje Mejor distribución espacial Cierre temprano y rápido inicio de la fase siguiente Alta tasa de desarrollo Altas tasa de crecimiento radicular, foliar y caulinar
II. Crecimiento activo	Fertilización (aplicación en fase I) Riego Plagas y enfermedades Malezas (ejecución fase I)	Altas y sostenidas tasas de crecimiento del cultivo: Asegurar una óptima disponibilidad hídrica y nutricional Mantener una elevada población de tallos Máximo aprovechamiento de las condiciones ambientales del verano Lograr un inicio temprano de la fase siguiente
III. Maduración	Elección de cultivares (distribución por tipo de madurez) Regulación del riego y fertilización en dosis y época adecuada Maduración química	Máxima expresión del potencial azucarero de los genotipos disponibles Inducir una reducción de la tasa de elongación de los tallos Aumentar la tasa de almacenamiento de sacarosa Mantener la actividad fotosintética Disminuir el contenido hídrico de los tallos Mejorar la calidad fabril de la materia prima.
IV Cosecha	Adecuada planificación de la zafra Optimizar la eficiencia de los sistemas de cosecha Minimizar las pérdidas de azúcar Capacidad para reordenar el programa de cosecha por efectos climáticos	Homogenizar la maduración de los distintos cultivares y edades de los cañaverales Lograr bajos niveles de estacionamiento en batey, de residuos de cosecha y pérdidas de materia prima Despuntar en un óptimo nivel Minimizar las pérdidas de azúcar y materia prima por efectos climáticos.

## Factores limitantes climáticos y edafológicos en el rendimiento de caña de azúcar

La caña de azúcar es una planta que presenta una amplia variabilidad y una reconocida capacidad de adaptación cuando es sometida a condiciones desfavorables, de clima, de manejo y de suelo. Es decir, se sustenta en ventajas como su adaptación a un amplio ámbito de condiciones agroecológicas, baja sensibilidad a pobres condiciones de fertilidad del suelo y a regímenes cálido-húmedos prolongados.

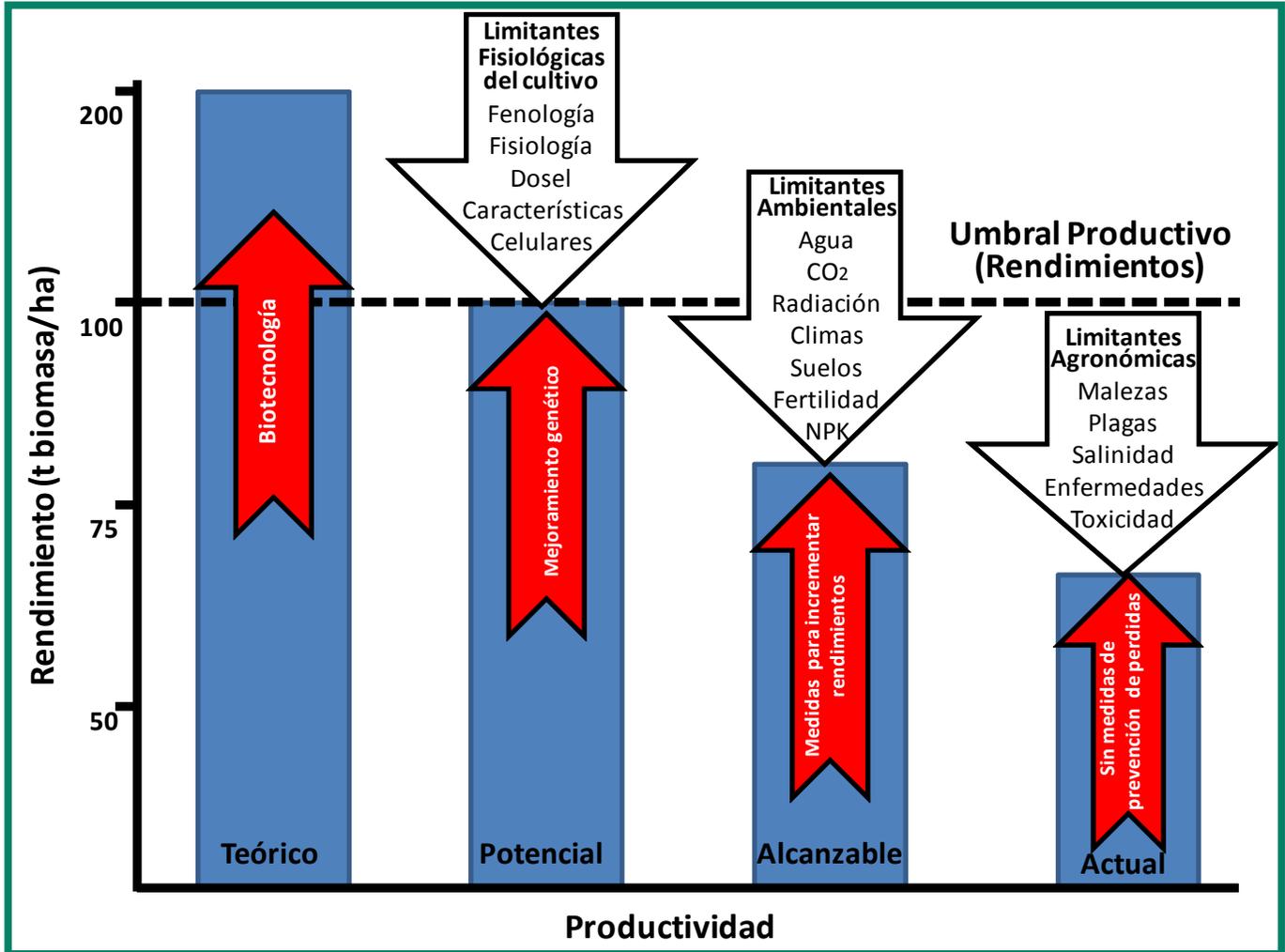
La conformación anatómica y las características fisiológicas propias de la especie (*Saccharum*

*officinarum*), proporcionan los mecanismos necesarios y suficientes para caracterizarla como una planta altamente eficiente, lo que favorece su capacidad de adaptación. Sin embargo, para manifestar su máximo potencial productivo, la caña requiere de un estudio preciso de las condiciones ambientales, meteorológicas y edafológicas (Moore, 2009, FAO, 2009, Salles et al, 2009, De Souza Rolim, 2008, Domingues Carlin, 2008, Inman-Bamber, 2005, Hunsigi, 2001, Chávez, 1999). En lo que respecta a la fertilidad del suelo, se acepta internacionalmente que la planta de caña puede tolerar variaciones severas en la

fertilidad y en el equilibrio nutricional, pese a lo cual los rendimientos agroindustriales decrecen en la medida en que los niveles de fertilidad son bajos o mal equilibrados.

Los factores que limitan la productividad de este cultivo se presentan en la Figura 5 y Cuadro 2.

**Figura 5 .** Factores limitantes de la productividad del cultivo de caña de azúcar (Moore, 2009, Melgar, 2010)



**Cuadro 2.** Limitantes al desarrollo potencial de la productividad cañera (% incidencia)

Variable	Peso (%)
Aptitud Edafo-climática	32.2
Gestión de plagas, malezas y enfermedades	20.3
Fertilización (NPK, MO etc)	17.2
Variedad y Ciclo productivo (P,S, R, Rn)	12.5
Riego y Mecanización	8.5
Tipo de Cosecha (verde o quema)	6.6
Tamaño del predio (ha)	2.7

En relación a los factores anteriores, Kropff, (1997) estableció que la producción potencial de biomasa y sacarosa se logra cuando se dispone de humedad

suficiente, pero también depende del fotoperiodo, la estructura y arquitectura de tallos y hojas, población y distribución de los tallos.

La producción alcanzable u obtenible depende de la acción de los factores que limitan a la producción potencial como son la disponibilidad de agua y de nutrimentos. Estos factores se manifiestan en problemas para el cultivo, y son:

- La disponibilidad de agua y su suministro; es decir, la cantidad, frecuencia y la intensidad de las lluvias, la disponibilidad y eficiencia del riego y la calidad del agua.

- Las características físicas y químicas del suelo: textura, estructura, profundidad, pH, salinidad y sodicidad
- La presencia de niveles freáticos elevados que son nocivos para el cultivo, lo que se relaciona con la existencia, profundidad, separación y eficacia de un sistema de drenaje.
- Los factores que se derivan del genotipo de caña, como floración temprana y el grado de erección del tallo.
- Un clima ideal para el cultivo de caña es el que presenta dos estaciones distintas: una caliente y húmeda, para proporcionar la germinación, el macollaje y el desarrollo vegetativo, seguida de otra fría y seca, para lograr la madurez y la consecuente acumulación de sacarosa en los tallos.
- Arvenses o malezas nocivas, plagas, enfermedades, agentes contaminantes, fenómenos naturales (inundaciones, heladas, huracanes y quemaduras accidentales).
- Tecnología; por ejemplo, la disponibilidad de la infraestructura de riego y de drenaje, mecanización y el conocimiento del sistema.
- Administración, en lo relacionado con el manejo del cultivo
- Factores ambientales, políticos, sociales y económicos, como la tenencia de la tierra y el tamaño de la unidad productiva.

La producción real o actual depende de la acción de los factores que reducen la producción obtenible o potencial:

## Factores climáticos

La caña de azúcar se adapta a un amplio rango de condiciones climáticas, pero se desarrolla mejor en regiones tropicales, cálidas y con amplia radiación solar (Humbert, 1974). Las características climáticas ideales para lograr una máxima producción de azúcar de caña son:

La presencia de una estación calurosa larga, con alta incidencia de radiación solar y una adecuada humedad. La planta utiliza entre 148 a 300 g de agua para producir 1 g de materia seca.

La presencia de una estación seca, soleada y fresca, libre de heladas, es necesaria para la maduración y cosecha. El porcentaje de humedad cae drásticamente a lo largo del ciclo de crecimiento de la caña, de un 83% en plantas muy jóvenes a un 71% en la caña madura, mientras que la sacarosa aumenta de menos de 10% hasta 45% del peso seco (Humbert, 1974).

**Lluvia:** Una precipitación total entre 1500 y 1800 mm es adecuada en los meses de crecimiento vegetativo, siempre que la distribución de luz sea apropiada y abundante. Después debe haber un período seco para la maduración. Durante el período de crecimiento activo la lluvia estimula el rápido crecimiento de la caña, la elongación y la formación de entrenudos. Sin embargo, la ocurrencia de lluvias intensas durante el período de maduración no es recomendable, porque produce una pobre calidad de jugo y favorece el crecimiento vegetativo; además, dificulta las operaciones de cosecha y transporte (FAO, 2009, Dos Santos et al., 2005, Inman-Bamber, 2005, Hunsigi, 2001, Fogliata, 1995). En condiciones

adecuadas, el rendimiento se incrementa en proporción directa con la cantidad de agua disponible, y por cada 10 mm de agua utilizada se puede obtener alrededor de 1 t de caña por hectárea (BSES, 1991), lo que influye directamente en las prácticas de manejo del cultivo.

**Temperatura:** El crecimiento está directamente correlacionado con la temperatura. La temperatura óptima para la brotación (germinación) de los esquejes es de 32°C a 38°C. La germinación disminuye bajo 25°C, llega a su máximo entre 30-34°C, se reduce por sobre los 35°C y se detiene cuando la temperatura sube sobre 38°C. Temperaturas sobre 38°C reducen la tasa de fotosíntesis y aumentan la respiración. Por otro lado, para la maduración son preferibles temperaturas relativamente bajas, en el rango de 12-14°C, ya que ejercen una marcada influencia sobre la reducción de la tasa de crecimiento vegetativo y el enriquecimiento de azúcar de la caña. A temperaturas mayores la sacarosa puede degradarse en fructosa y glucosa, además de estimular la fotorrespiración, que produce una menor acumulación de azúcares. Por otro lado, condiciones severas de frío inhiben la brotación de las socas y reducen el crecimiento de la caña. Temperaturas inferiores a 0°C producen el congelamiento de las partes más desprotegidas, como las hojas jóvenes y las yemas laterales. El daño depende de la duración de la helada. El ataque del carbón y su diseminación es mayor a temperaturas ambientales de 25-30°C. De modo similar, la diseminación de la pudrición roja es mayor a temperaturas altas (37-40°C) cuando las demás condiciones son similares. La incidencia de la marchitez es mayor cuando las temperaturas mínimas caen drásticamente. La incidencia de la mosca pinta (*Aeneolamia spp.*) es alta en el verano, cuando las

temperaturas del aire son más elevadas. También una mayor incidencia de la mosca pinta ha sido observada cuando la diferencia entre la temperatura máxima (día) y mínima (noche) es pequeña (Pereira, 2006).

**Humedad relativa:** Durante el período de crecimiento rápido, las condiciones de alta humedad (80 - 85%) favorecen una rápida elongación de la caña. Valores moderados, de 45 - 65%, acompañados de una disponibilidad limitada de agua, son beneficiosos durante la fase de maduración (Inman-Bamber, 2005, Fogliata, 1995).

**Luz Solar:** La caña se ubica en el grupo de las plantas con vía fotosintética  $C_4$ , que poseen anatomía tipo "Kranz". Las hojas poseen dos tipos de cloroplastos: los localizados en las células del mesofilo y los de las células de la vaina vascular, con los cuales la planta es capaz de fijar  $CO_2$  por dos vías: a) por la vía normal  $C_3$ , y b) por la vía alternativa  $C_4$ , en compuestos de cuatro carbonos como ácido málico, principalmente, ácido aspártico o ácido oxalacético. Esa refijación de  $CO_2$  en los haces vasculares de la vaina como fosfoglicerato (3-PGA) posibilita una mayor eficiencia fotosintética y utilización de la energía solar, puesto que su tasa fotosintética aumenta con la luminosidad, hasta alcanzar valores superiores a 60 lux (lumen /m<sup>2</sup>) (600 w/m<sup>2</sup>) de intensidad, con una variación entre 6,5 a 150 lux (65 a 1500 w/m<sup>2</sup>), en función de la variedad, lo que le confiere un elevado punto de saturación de luz. La caña alcanza valores de fijación de  $CO_2$  elevados, lo que refleja su elevada capacidad fotosintética y alto punto de compensación. Se asegura que posee una eficiencia que va de 5 a 6% en la conversión de energía solar (Salles et al, 2009, Benvenuti, 2005 y Hunsigi, 2001). Adicionalmente, la caña no presenta fotorespiración aparente, con lo cual no elimina o pierde  $CO_2$  por las hojas a tasas rápidas, simultáneamente con la absorción de  $CO_2$  por la fotosíntesis y estimulada por la luz. Su velocidad de fotosíntesis es cerca de dos o tres veces superior a la de las gramíneas  $C_3$ , presentando una capacidad fotosintética de 34 a 86 mg  $CO_2$ /dm<sup>2</sup>/h. La vía  $C_4$  permite realizar la fotosíntesis con los estomas prácticamente cerrados, lo que duplica su eficiencia en el uso del agua y su transpiración relativa (fotosíntesis líquida/transpiración), en comparación con otras gramíneas del tipo  $C_3$ . Por esta razón, la caña utiliza el agua con mayor eficiencia, manteniendo a su vez, una mayor adaptabilidad en condiciones de déficit de humedad o sequía (De Souza Rolim, 2008).

El Índice de Área Foliar (IAF) que describe la dimensión del sistema asimilador de una comunidad vegetal, así como otros índices vegetales, constituyen una excelente aproximación para evaluar la capacidad de desarrollo del follaje y, consecuentemente, de su capacidad fotosintética

total, denominada productividad primaria bruta. La caña presenta en este sentido una gran área foliar, con un IAF elevado (4 a 10) de acuerdo con la variedad; sus hojas son casi verticales durante la mayor parte de su período de crecimiento y la anchura de la lámina foliar es variable, lo que eleva significativamente su eficiencia en la interceptación de luz (Xin-Guang Zhu, 2008, Chávez, 1999).

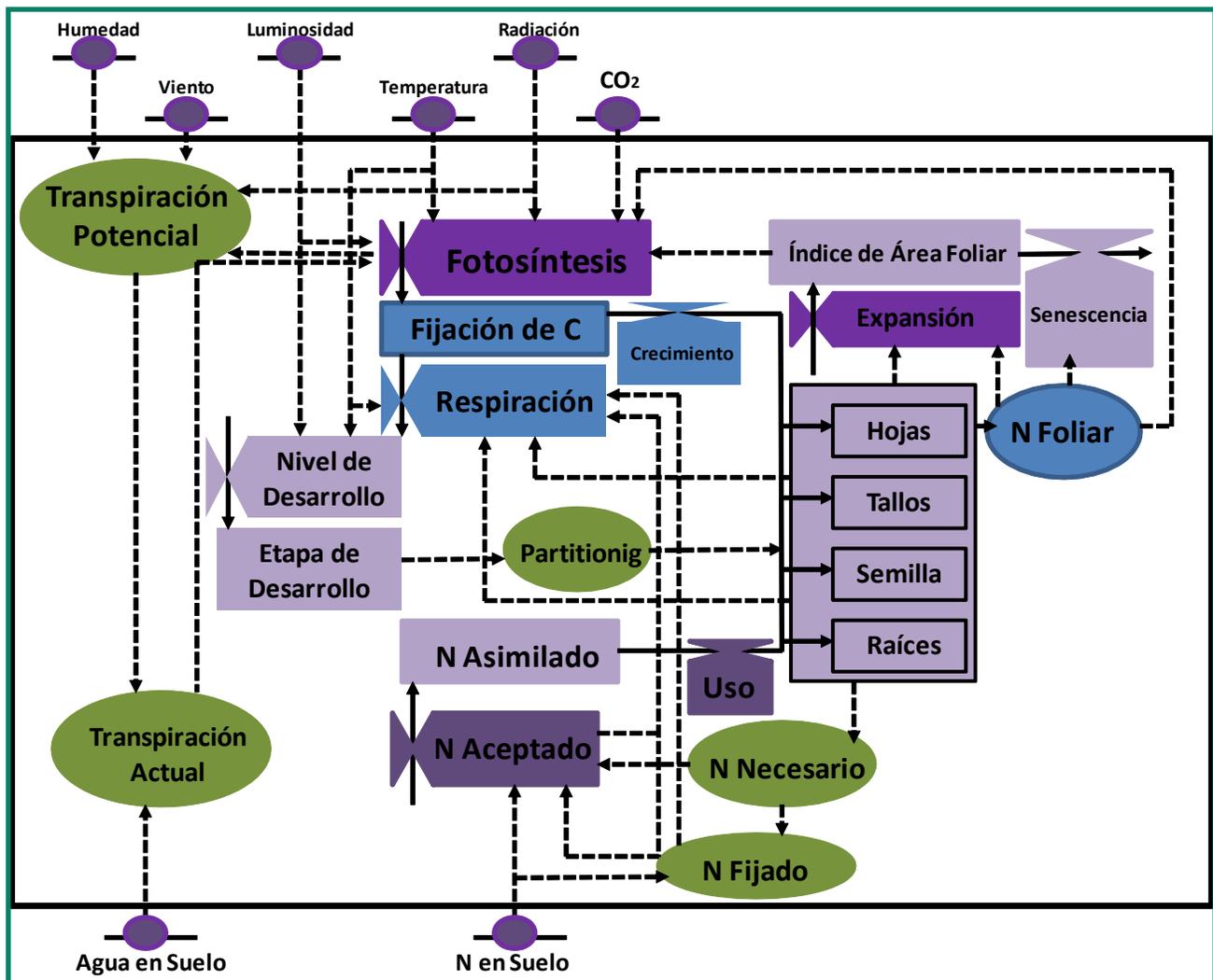
En el follaje de la caña las primeras seis hojas superiores interceptan el 70% de la radiación y la tasa fotosintética de las hojas inferiores disminuye debido al sombreado mutuo. Por lo tanto, para una utilización efectiva de la energía radiante se considera como óptimo un valor de 3.0-3.5 de Índice de Área Foliar (Barbieri, 1993).

Se ha estimado que el 80% del agua es perdida por acción de la energía solar, un 14% se pierde por efecto del viento y un 6% se pierde por acción de la temperatura y la humedad. Altas velocidades de viento, superiores a 60 km/hora, son perjudiciales para cañas ya crecidas, al causar la tendedura y el rompimiento de las cañas. Además, el viento favorece la pérdida de humedad de las plantas, agravando así los efectos dañinos del estrés hídrico (Chandra, 2005)

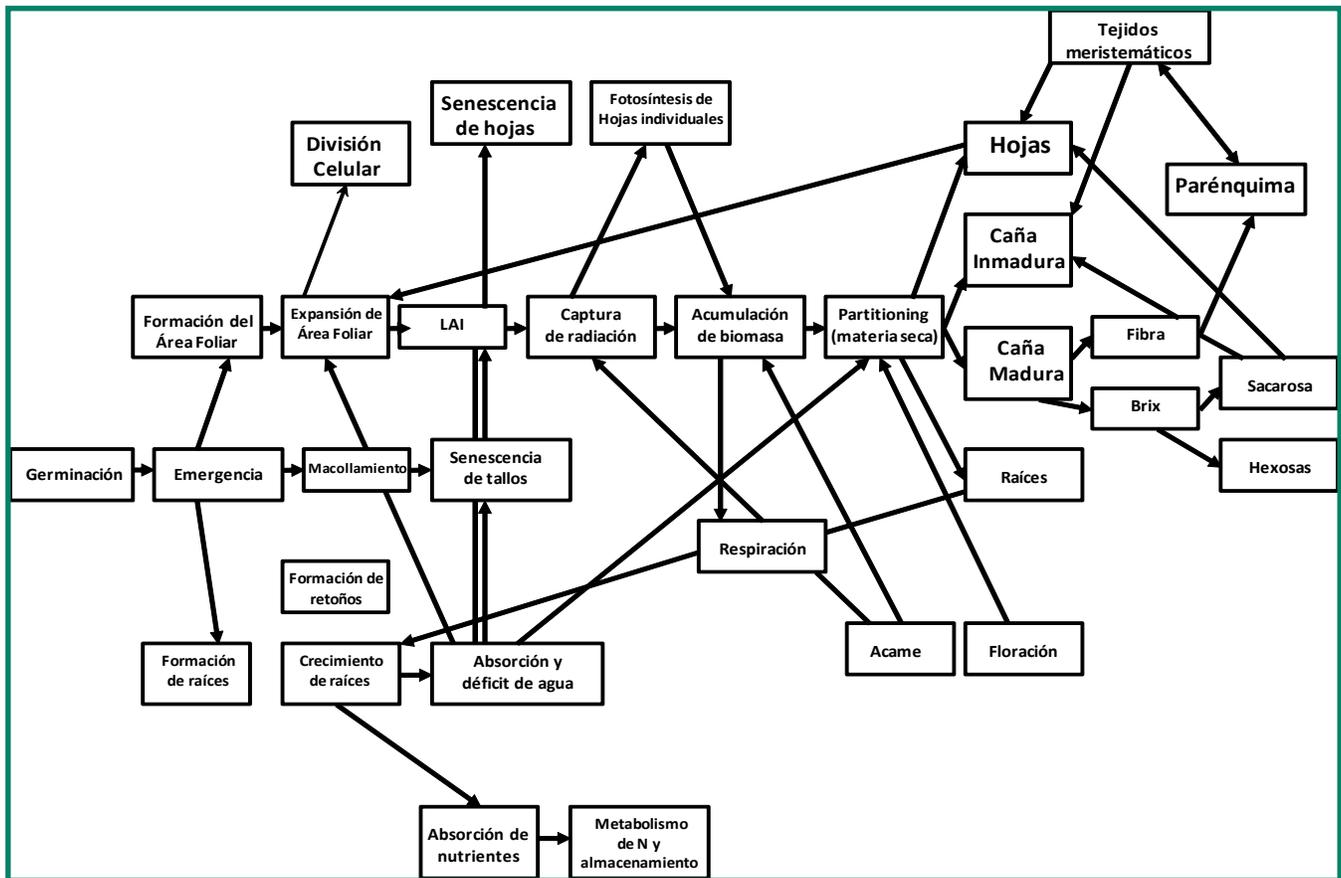
Majeke (2008) definió que el conocimiento de la composición bioquímica foliar es fundamental para describir, comprender, predecir y modelar el comportamiento de los ecosistemas debido a que los procesos ecológicos que involucran el intercambio de materia y energía están relacionados a componentes bioquímicos y a un estatus nutricional en los que los macronutrientes (nitrogeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre) y micronutrientes (hierro, cobre, manganeso, zinc, boro y molibdeno) son básicos para el desarrollo y productividad de las plantas agrícolas.

Los factores limitantes descritos influyen directamente en la fotosíntesis de la caña de azúcar, el proceso fundamental que determina la productividad del 90% o más de la biomasa seca y del 100% de los productos útiles: la sacarosa y el bagazo. (Figuras 6 y 7).

Figura 6. Mecanismo de la Fotosíntesis en caña de azúcar (Waclawovsky 2010, Moore 2009, 2005)



**Figura 7.** Modelo conceptual de la formación de biomasa en caña de azúcar (Moore, 2009)



Todas las características y propiedades anatómicas, fisiológicas y genéticas anotadas anteriormente, tipifican a la caña de azúcar como una planta de alta rusticidad, sobresaliente capacidad de adaptación, y elevado potencial de producción y conversión de energía solar (Chávez, 1999).

Sin embargo, este conocimiento es crucial para desarrollar relaciones precisas entre las propiedades ópticas y las características funcionales de la hoja, o

para mejorar los modelos que se utilizan directamente para interpretar los datos de muestreo en campo o por metodologías de percepción remota cuando se combina con modelos de cobertura y cartografía de la actividad fotosintética de la planta desde el espacio para evaluación de la productividad en el contexto de agricultura de precisión (Thorp, 2010, Adam et al. 2009, Schaepman, 2009, Jacquemoud, 2009, 2001, Hatfield et al. 2008 y Nagendra, 2008).

## Factores edafológicos

El suelo es el medio para el crecimiento de la planta. Proporciona nutrientes, agua y anclaje a las plantas en crecimiento. La mantención de condiciones físicas, químicas y biológicas adecuadas en el suelo, es necesaria para lograr mayor crecimiento, rendimiento y calidad de la caña de azúcar. La caña de azúcar puede ser cultivada exitosamente en diversos tipos de suelo, desde los arenosos a los franco-arcillosos y arcillosos

Las condiciones edáficas ideales para el cultivo de la caña de azúcar son: suelo bien drenado, profundo, franco, con una densidad aparente de 1.1 a 1.2 g/cm<sup>3</sup> (1.3 - 1.4 g/cm<sup>3</sup> en suelos arenosos), con un adecuado equilibrio entre los poros de distintos tamaños, con porosidad total superior al 50%; una capa freática debajo de 1.5 a 2 m de profundidad y una capacidad de retención de la humedad disponible del 15% o superior (cm<sup>3</sup> de agua por cm<sup>3</sup> de suelo) junto a las climáticas constituyen la base para el

desarrollo del cultivo.

El pH óptimo del suelo es cercano a 6.5, pero la caña de azúcar puede tolerar un rango considerable de acidez y alcalinidad del suelo. Por esta razón se cultiva caña de azúcar en suelos con pH entre 5.0 y 8.5. El encalado es necesario cuando el pH es inferior a 5.0, y la aplicación de yeso es necesaria cuando el pH sobrepasa 9.5. Las infestaciones por nematodos ocurren naturalmente en suelos muy arenosos (Barbieri, 1993). Por otra parte, Arreola *et al.* (2004) plantearon que para producir una tonelada de tallos molederos, el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) requiere de 1.2 kg de N, 0.7 kg de P y 3.0 kg de K, por lo cual es considerado un cultivo extractivo; además, se ha detectado que sólo 30% del N del fertilizante es utilizado por el cultivo de la caña de azúcar (Salgado *et al.*, 2010, 2008) (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Condiciones climáticas y edáficas para el cultivo de caña.

Propiedad	Nivel de aptitud al cultivo de caña de azúcar			
	Alta	Media	Baja	No Apta
Temperatura anual (°C)	22-32	20/22-32/35	18-20	<18
Precipitación media anual (mm)	>1,500	1,250-1,500	1,250-1,000	<1,000
Radiación solar (horas/año)	1800-2200	1800-1400	1400-1200	<1200
Índice de severidad de sequía	Leve	Moderada	Fuerte a Muy Fuerte	Severa
Pendiente (%)	0-8	8-16	16-30	>30
Altitud (msnm)	Hasta 400	400-850	850-1,300	>1300
Drenaje externo	bueno moderado	imperfecto-moderado	pobre	pobre-inundable
Drenaje interno	bien drenado	Mod. bien drenado	Imp. drenado algo ex. drenado	muy pobre drenado
Profundidad (cm)	>100	80-100	50-80	<50
Textura	Franco-Arcilloso	Arcilloso	Franco-Arenoso	Arenoso
pH	6.6 – 7.3	6.1 – 6.5 7.4 -8.3	5.6 -6.0 > 8.3	< 5.5
CIC (meq/100g)	> 20	15 - 20	15-10	< 10
Materia orgánica (%)	> 5	3-5	2-3	1-2
N (%)	>0.4	0.1 - 0.4	0.032 – 0.1	<0.032
Nitrógeno disponible) kg ha <sup>-1</sup>	> 300	300-225	225-150	<150
P (ppm)	>40	39-18	17-9	<9
K ppm	>468	468-82	78-42.9	<39
Ca (ppm)	>2004	1002-2004	400-1002	<400
Mg (ppm)	>365	158-365	60-158	<60
Azufre SO <sub>4</sub> (ppm)	>20	20-15	15-10	<10
Boro (ppm)	1.5 – 2.0	1.0 – 1.5	0.5 – 1.0	< 0.5
Cu (ppm)	1.2-2.5	0.8-1.20	0.3-0.8	<0.3
Fe (ppm)	16.0-25.0	10.0-16.0	5.0-10.0	<5.0
Mn (ppm)	29.0-50.0	14.0-29.0	5.0-14.0	<5.0
Zn (ppm)	5.0-8.0	3.0-5.0	1.0-3.0	<1.0
Na (ppm)	<345	345-575	575-920	>920
Cloruros (meq/L)	<10	15-23	26-36	>36
Salinidad (mmhos/cm)	< 8	8 - 12	12 - 16	> 16
Relación Ca/Mg	>15	2.5-15	1.5-2.5	<1.5
Relación Ca/K	>25	25-15	15-5	<5

**Cuadro 3 (Continuación)**

Propiedad	Nivel de aptitud al cultivo de caña de azúcar			
	Alta	Media	Baja	No Apta
Relación C/N	8-12	12-15	15-30	>30
Rendimiento esperado (t/ha)	>80	80-55	55-40	<40

**Fuente.** (Quintero 2008, Ortega 2007, Wahid, 2004, Hunsigi, 2001, Vázquez 1987, Chávez, 1999, Fogliata, 1995, Humbert, 1974, Fauconnier, 1975, Dillewijn 1978)

Para Graeff y Claupein, (2003) estos factores ambientales y edafológicos determinan directa o indirectamente modelos de distribución, dinámica de procesos y desarrollo de los cultivos y al incorporar los sistemas de información geográfica (SIG) y de geoposicionamiento (GPS) permiten evaluar la función y procesos de agroecosistemas cañeros a escala global, regional y local y eliminar la necesidad de llevar a cabo extensivos y costosos muestreos de grandes áreas agrícolas (Aguilar et al. 2010, Adiku, 2006 y Fourty, 1996).

Xavier et al. (2006) y Gers (2003), concluyeron en sus estudios que, si bien las herramientas de sensores remotos no reemplazarán lo métodos tradicionales de monitoreo de caña de azúcar en el futuro próximo, facilitarán la identificación de áreas nuevas de producción o expansión de pequeños productores con mejores resoluciones espaciales, espectrales y temporales.

Por lo tanto, los métodos de muestreo de suelos y monitoreo en tiempo real en caña de azúcar requieren: (1) mejorar nuestra comprensión de la dinámica de los sistemas de producción de caña de azúcar, (2) servir como un sistema de alerta temprana, lo que permite acciones correctivas o preventivas más oportunas, y (3) proporcionar puntos de referencia para monitorerar los cambios en el rendimiento cañero (Abdel-Rahman, 2010, 2008).

En este contexto, la percepción remota en caña de azúcar (Johnson eta al. 2005, Narciso, 1999) puede jugar un papel único por su capacidad de proporcionar en tiempo real, y de forma rápida, sinóptica, y relativamente accesible datos en grandes áreas cañeras, es decir, la percepción remota, como modelo agrícola, permite llevar a cabo mediciones radiométricas ( $\approx 400\text{--}2500$  nm) a gran escala integrando las características bioquímicas y biofísicas del dosel, donde diferentes datos o información deben ser integrados a diversas escalas combinándola de diversas fuentes, tales como modelos matemáticos y observaciones en el espacio y el tiempo de las variables de interés para obtener resultados confiables (Murillo et al, 2010, Xie et al. 2008).

Dorigo et al. (2007) definieron que la aplicación de la percepción remota en los modelos agrícolas se divide en dos categorías: (I) métodos de base empírica o estadística que buscan una relación estadística entre información espectral (reflectancia, absorbancia, y transmitancia) de los cultivos y medidas biofísicas, o bien las propiedades bioquímicas del dosel y (II) métodos físicos que se basan en los principios de propagación de radiación dentro de un dosel agrícola. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones de la percepción remota en la agricultura son enfoques híbridos o combinación de ambos métodos, el uso de modelos físicos ayuda a establecer la relación estadística entre la señal espectral y los parámetros biofísicos de interés.

Las técnicas de percepción remota son técnicas eficaces, rápidas, no destructivas, y accesibles en forma operativa y exacta, al adquirir información de extensas superficies durante una temporada agrícola en numerosas ocasiones y en detectar cambios en los procesos fisiológicos y bioquímicos como fijación de carbono, Producción primaria bruta (GPP), índice de área foliar (LAI), radiación fotosintéticamente activa (PAR), evapotranspiración (ET), ciclo y deficiencia de nutrientes (N, K, P, Ca, Mg), productividad primaria neta (NPP), materia seca, estrés hídrico, nutrimental o derivado de plagas, malezas o enfermedades, identificación de especies y estado de salud y vigor vegetal, posicionamiento in situ, inventario de cultivos, estructura del dosel, topografía, en la interface de la interacción energía radiante-dosel a un amplio margen de escalas al incorporar conocimientos de matemáticas, física, química y biología en un contexto de agricultura de precisión. Es decir, optimizar las prácticas culturales como una función de la variabilidad espacial y temporal dentro de los campos de cultivo, por lo que se requiere desarrollar métodos capaces de recuperar con precisión variables biofísicas a nivel dosel registradas de la señal de reflectancia por plataformas de teleobservación (Aguilar et al. 2010, Xie et al. 2008, Xavier et al, 2006, Elwadie, 2005, Schaepman, 2005 y Koetz, 2005).

## Literatura citada

- Abdel-Rahman, E. M., Ahmed F. B. and van den Berg, M., 2010. Estimation of sugarcane leaf nitrogen concentration using in situ spectroscopy. *International Journal of applied Earth Observation and Geoinformation*, 12S, S52–S57.
- Abdel-Rahman E. M; F. B. Ahmed. 2008. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum spp. hybrid*) production: a review of the literature *International Journal of Remote Sensing*, 1366-5901, 29(13): 3753 – 3767
- Adam Elhadi and Mutanga 2009. Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review. *Wetlands Ecol Manage*. En: [http://uqu.edu.sa/files2/tiny\\_mce/plugins/filemanager/files/4280125/Multispectral%20and%20hyperspectral%20remote%20sensing.pdf](http://uqu.edu.sa/files2/tiny_mce/plugins/filemanager/files/4280125/Multispectral%20and%20hyperspectral%20remote%20sensing.pdf)
- Adiku A. M. 2006. PIXGRO: A model for simulating the ecosystem CO<sub>2</sub> exchange and growth of spring barley *Reichstein Ecological Modelling* 190: 260–276
- Aguilar, N.; Galindo, G.; Fortanelli, J. y Contreras, C. 2010. Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. *Avances en investigación agropecuaria. AIA*. 14(2): 29-48.
- Allen R. G. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos por organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación *fao estudio FAO riego y drenaje* 56, Roma,. 323 p.
- Arreola-Enriquez, J ;Palma-López, D. J.;Salgado-García 2004. Evaluación de abono organo-mineral de cachaza en la producción y calidad de la caña de azúcar *TERRA Latinoamericana*. 22(3):351-357
- Barbieri, V. 1993. Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*); um modelo matemático-fisiológico de estimativa. 142p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba
- Begue A., P. Todoroff, J. Pater 2008. Multi-time scale analysis of sugarcane within-field variability: improved crop diagnosis using satellite time series? *Precision Agric* 9: pp.161–171
- Benvenuti, F. A. 2005. Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos *Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola* 120 p.
- Chandra P., I.S. Singh and S.B. Singh. 2005. Biochemical Changes During Flowering of Sugarcane. *Sugartech* 7(4): 160-162
- Curran P.J. 2001. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: Testing the Kokaly and Clark methodologies *Remote Sensing of Environment* 76(3):349-359
- Curran P. 1990. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine *J Tree Physiology* 7,33-48.
- Chávez M. 1999. Nutrición y fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica. *XI Congreso Nacional Agronómico/ III Congreso Nacional de Suelos* 1999, Pp.193-214
- Da Silva F. 2001. Levantamento de modelos matemáticos descritos para a cultura da cana-de-açúcar. *Rev. biociênc., Taubaté*, 7(1):-14-20.
- De Lira, V.; Barbosa da Silva, B.; Dantas Neto, J.; Sobral de Farias, M. S.; Cândido Bezerra, M. V.; Soares Franco, E. y Centeno, C. R. M. 2009. Análise espectral de índice de vegetação em área irrigada com cana-de-açúcar. *Engenharia Ambiental* 6(1):113-120.
- De Souza Rolim G. 2008. Validation of the deardorff model for estimating energy balance components for a sugarcane crop. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 658(4):325-334, July/August 2008
- De Sousa V., Rea S. 1993. Correlación entre los componentes de rendimiento y calidad en cinco cultivares híbridos de caña de azúcar. *Caña de Azúcar*, 11(01): 45-52.
- Dillewijn, C. Van. 1978. *Botánica de la caña de azúcar*. Edit. Rev. I.C.L. La Habana. 460p.
- Domingues Carlin S. 2008. Parâmetros biométricos e produtividade da cana-de-açúcar após tombamento dos colmos. *Bragantia, Campinas*.67(4):845-853
- Dorigo W.A. R. Zurita-Milla, M.E. Schaepman. 2007. A

- review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 9: 165–193
- Dos Santos M.; J. Vieira Rocha; R. A. Camargo Lamparelli. 2005. Spectral variables, growth analysis and yield of sugarcane. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, v.62, n.3, May/June 199-207 pp.
- Elmorea, A. J.; Xun Shib, N. J.; Gorenceb, Xia Lic; Haiming Jind, F.; Wangc y Xiaohao Zhange. 2008. Spatial distribution of agricultural residue from rice for potential biofuel production in China. *Biomass and Bioenergy* 32(1): 22–27.
- Elwadie E. 2005. Remote Sensing of Canopy Dynamics and Biophysical Variables Estimation of Corn in Michigan *Agron. J.* 97:99–105.
- Epiphanio, J. C. N.; Gleriani, J. M.; Formaggio, A. R. Rudorff, B. F. Theodor. 1996. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília.* 31(6): 445-454
- FAO 2006. Crop Water Management for Sugarcane. EN: <http://www.fao.org/landandwater/aglw/cropwater/sugarcane.stm>
- FAOASTAT. 2009. Estadísticas de producción. <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>.
- Fauconnier, R; Bassereau, D. 1975. La caña de azúcar. Técnicas agrícolas y producciones tropicales. Editorial Blume. Barcelona, España. 405 p.
- Fogliata, F. A. 1995. Agronomía de la caña de Azúcar. Vol 2. El Graduado, 1451 p. Tucumán, Argentina
- Fortes, C. y Demattée, J.A.M. 2006. Discrimination of sugarcane varieties using Landsat 7 ETM+ spectral data'. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (7):395-1412
- Fortes C. 2003. Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de canade-açúcar pelo sensor orbital ETM+/LANDSAT7. 131p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba
- Fourty, Th., F. Baret, S. Jacquemoud, G. Schmuck, and J. Verdebout. 1996. Leaf Optical Properties with Explicit Description of Its Biochemical Composition: Direct and Inverse Problems. *Remote Sens. Environ.* 56:104-117
- Galdos M. V 2010. Simulation of sugarcane residue decomposition and aboveground growth *Plant Soil* 326:243–259
- Gers, C., & Schmidt, E. 2001. Using SPOT4 satellite imagery to monitor area harvested by small scale sugarcane farmers at Umfolozi. 75th South African Sugar Technologists' Association (SASTA) (pp. 28–33).
- Gilbert R.A. J.M. Shine. 2006. The effect of genotype, environment and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA *Field Crops Research* 95:156–170
- Graeff, S., Claupein, W., 2003. Quantifying nitrogen status of corn (*Zea may L.*) in the field by reflectance measurements. *Eur. J. Agron.*, 19(4):611-618.
- Ji-hua, M. and Bing-fang, W. 2008. Study on the crop condition monitoring methods with remote sensing. [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8\\_pdf/10\\_WG-VIII-10/05.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/10_WG-VIII-10/05.pdf) (Consultado 11 de marzo de 2010)
- Hunsigi G. 2001. Sugarcane in Agriculture and industry. Eastern Press Pvt Ltd., Bangalore India 491 p
- Keating B.A 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation *Europ. J. Agronomy* 18:267-288
- Koetza B., F. Baretb, J. Hill 2005. Use of coupled canopy structure dynamic and radiative transfer models to estimate biophysical canopy characteristics. *Remote Sensing of Environment* 95: 115– 124
- Krishna Rao PV, Venkateswara I and Venkateswara Rao V 1999. Remote sensing approach for acreage estimation of sugarcane crop in part of Kirishna district Andhra Pradesh. *Proc STAI* 61: 79-87.
- Kropff M. 1997. Intensive sugar cane production. *Proceedings of sugar symposium.* CAB International Wallingford UK.
- Hatfield J. L, A. A. Gitelson, S. Schepers, and C. L. Walthall 2008. Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. *J. Agronomy Journal* 100:S-117–S-131.
- Humbert, R. P. 1974. El cultivo de la caña de azúcar. Edit. CECSA. México D.F. 719 p.
- Inman-Bamber N.G. and Smith D.M., 2005. Water relations in sugarcane and response to waters déficits. *Fields Crops Research*, 92, 185-202 pp.
- Inman-Bamber N.G. T. L. Culverwell and M.G. McGlinchey. 1993. Predicting yield responses to irrigation

- of sugarcane from a growth model and field records. Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association - June 199. Pp 66-72
- Lisson S.N. N.G. Inman-Bamber B.A. Keating 2005. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. *Field Crops Research* 92:321–335
- Jacquemoud, SL Ustin. 2001 Leaf optical properties: A state of the art Physical measurements & signatures in remote sensing. International symposium N°8, Aussois, France (08/01/2001, pp. 223-232.
- Jacquemoud S 2009. PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment* 113: S56–S66
- Johnson, R.M., Viator, R.P., Veremis, J.C., Richard Jr., E.P. y Zimba, P.V. 2005. 'Discrimination of sugarcane varieties with hyperspectral reflectance measurements and plant pigment analysis'. *Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists*, vol. 25.
- Kumar R. and L. Silva 1973. Reflectance Model of a Plant Leaf. <http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1016&context=larstech>
- Lumsden TG 1998. Simulation of sugarcane yield at the scale of a mill supply area *Proc S Afr Sug Technol Ass*72:12-17
- Majeke B , J. van Aardt and MA Cho. 2008. Imaging spectroscopy of foliar biochemistry in forestry environments. *Southern Forests*, 70(3): 275–285
- Marini F. R.; G. L. Carvalho; E. D. Assad. 2008. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, Vol. 43 pp.1449-1455.
- Melgar M. 2010. Tendencias de la investigación en caña de azúcar a nivel mundial CENGICAÑA Presentación de resultados de investigación Zafra 2009 - 2010 Guatemala pp. 10-17
- Miceli G.F., 2002. Regulación enzimática de la acumulación de sacarosa en cañas de azúcar (*Saccharum* spp.). *Agrociencia* (36):4, 411-419.
- Moore P.H. 2009. Sugarcane Biology, Yield, and Potential for Improvement. Workshop BIOEN on Sugarcane Improvement 18 e 19 de março, São Paulo. En: <http://www.fapesp.br/materia/5064/bioen/workshop-bioen-on-sugarcane-improvement-18-e-19-3-2009-.htm>
- Moore, P. y Maretzki, A. 1996. Sugarcane. Photoassimilate Distribution in Plant and Crops. Marcel Dekker Inc. p 643-669. New York-Basel-Hong Kong.
- O'Leary, G. J. 2000. A review of tree sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. *Field Crops Research*, 68: 97–111,.
- Moore, P. 2005. Integration of sucrose accumulation processes across hierarchical scales: towards developing an understanding of the gene-to-crop-continuum. *Field Crops Research* 92 119:135.
- Murillo, P.J., Osorio, C.A., Carbonell, J.A. y Palma A.E. 2010. 'Monitoring sugarcane crops in the Cauca river valley (Colombia), using MODIS satellite images'. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technology*, 27:1-5.
- Nagendra H. 2008. High resolution satellite imagery for tropical biodiversity studies: the devil is in the detail *Biodivers Conserv* 17:3431–3442
- Narciso, G. y Schmidt, E. 1999. 'Identification and classification of sugarcane based on satellite remote sensing'. *Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association*, 73:189-194.
- O'Leary, G. J. 1999. Modeling sugarcane production systems i. development and performance of sugarcane module. *Field Crops Research*. 61: 253–271,.
- Ortega A. diagnóstico de suelos. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Estación Experimental Agropecuaria Salta. En: <http://www.inta.gov.ar/salta/info/documentos/Suelos/DIAGNOSTICO%20SUELOS.pdf>
- Pereira 2006. Variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo em áreas intensamente cultivadas *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*.10(2):294–305,
- Prochnow Ramme F.L., 2008. Perfis temporais NDVI e sua relação com diferentes tipos de ciclos vegetativos da cultura da cana-de-açúcar. Universidade Estadual de Campinas Faculdade de engenharia agrícola. Dissertação Doutor em Engenharia Agrícola, 116 p.
- Quintero Durán R.2008. Efectos de la aplicación de elementos menores en caña de azúcar en suelos del valle del río Cauca. Pp. 18-25. En: [http://www.tecnicana.org/pdf/2008/tec\\_v12\\_no20\\_2008\\_p18-26.pdf](http://www.tecnicana.org/pdf/2008/tec_v12_no20_2008_p18-26.pdf)

- Romero E.R. 2009. Manual del cañero. 1era edición ISBN 978-987-21283-7-1. Editado por Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) Tucuman Argentina 232 p.
- Romero R. 2005. Emergencia y crecimiento inicial de caña planta de la variedad TUCCP 77- 42 en diferentes épocas de plantación. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán Tomo 82 (1-2): 37-44.
- Romero, E. R.; 2005. Importancia de la calidad de la materia prima en la productividad de la agroindustria azucarera. Gacetilla Agroindustrial de la EEAOC N° 67 – Agosto, 1-13 p.
- Salgado S. 2010. Lotificación del campo cañero: una metodología para iniciar la agricultura de precisión en ingenios de México Interciencia. Mar 2010, 35 (3): 183-190.
- Salgado S. 2008. Programa sustentable de fertilización para el ingenio Pujiltic, Chiapas, México Terra Latinoamericana 362 26(4):361-373.
- Salles M.S., E. Gomes Ferreira B. physiological model to estimate the maturity of sugarcane. 2009, Sci. Agric. 66(5):622-628
- Schaepman M. 2009. Earth system science related imaging spectroscopy—An assessment Remote Sensing of Environment 113:S123–S137
- Shu-Kuang Ning, Ni-Bin Chang, Kai-Yu Jeng. 2006. Soil erosion and non-point source pollution impacts assessment with the aid of multi-temporal remote sensing images. Journal of Environmental Management 79: 88–101
- Singels A. 2005. The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. Field Crops Research 92 (2005) 249–260
- Smit, M A 2004. differences in canopy development of two sugarcane cultivars under conditions of water stress: preliminary results. Proc S Afr Sug Technol Ass 78:149-152
- Soares A. S.,2008. Incident light orientation lets C4 monocotyledonous leaves make light work differently. Nature Precedings : hdl:10101/npre.2008.1672.1
- Vázquez A. A. 1997. Guía para interpretar el análisis químico del suelo y agua. Segunda edición. UACH. 31 p.
- Thorp. K. R. 2010. assimilating leaf area index estimates from remote sensing into the simulations of a cropping systems model. Journal American Society of Agricultural and Biological Engineers. 53(1): 251-262
- Waclawovsky A. 2010. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. Plant Biotechnology Journal (2010) 8: 263–276
- Wahid A. 2004. Analysis of toxic and osmotic effects of sodium chloride on leaf growth and economic yield of sugarcane Botanical Bulletin of Academia Sinica, Vol. 45, , 133-141
- Whittaker A. 1997. Carbon Partitioning during Sucrose Accumulation in Sugarcane Internodal Tissue. Plant Physiol. 115: 1651-1 659
- Ustin,S. L Jacquemoud S 2001.Simulation of photon transport in a three-dimensional leaf: implications for photosynthesis Plant, Cell and Environment 24: 1095–1103
- Xavier, A.C., Rudorff, B.F.T., Shimabukuro, Y.E., Berka, L.M.S. y Moreira, M.A. 2006. 'Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop'. International Journal of Remote Sensing, 27(4):755-768.
- Xie Yichun, , Zongyao Sha, and Mei Yu 2008. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. Journal of Plant Ecology 1(1):9–23
- Xin-Guang Zhu, Stephen P Long and Donald R Ort 2008. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? Current Opinion in Biotechnology 2008, 19:153–159
- Yang, S. J. 1997.The water use efficiency of sugar cane crop – a review. ISSCT Irrigation Workshop. Townsville, Australia, Sept. 15 – 19, 22 p
- Zhao Chunjiang, Jihua Wang 2010. Spectral indices sensitively discriminating wheat genotypes of different canopy architectures. Precision Agric 11:557–567
- Zhou M.M., A Singels 2003. physiological parameters for modeling differences in canopy development between sugarcane cultivars. Proc S Afr Sug Technol Ass: 610-625