



LAICA

DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN Y  
EXTENSIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR (DIECA)

# Genética aplicada a la mejora de las plantaciones comerciales de caña de azúcar



Marco A. Chaves Solera

San José, Costa Rica

Agosto 2018

## Contenido

Resumen	2
Introducción	3
1.) Clasificación taxonómica	4
2.) Especies de caña	4
3.) Géneros afines	7
4.) Características básicas y atributos de la caña	8
4.1.) Anatómicas	8
4.1.1.) La raíz	8
4.1.2.) El tallo	9
4.1.3.) Las hojas	9
4.1.4.) La flor	10
4.2.) Fisiológicas	10
4.3.) Genéticas	13
5.) El mejoramiento genético de la caña de azúcar en el mundo	14
6.) Fertilidad de la caña	16
7.) Estaciones experimentales de hibridación	18
8.) ¿Por qué se deterioran las variedades?	24
9.) Biotipo comercial ideal de caña	26
10.) Genoma de la caña de azúcar	29
11.) Bancos de Germoplasma	31
12.) Futuro de la mejora genética ¿hacia dónde vamos?	34
13.) Conclusiones	37
14.) Literatura Citada	38

## Resumen<sup>1</sup>

*Se aborda y desarrolla el tema de las variedades de caña de azúcar de uso comercial y vincula con el trabajo efectuado en el campo del mejoramiento del cultivo, con un enfoque genérico sobre algunas particularidades sobresalientes de la genética de la planta, que definen su ambiente comercial. Se comenta en torno al origen y la clasificación taxonómica; también sobre las especies y géneros afines asociados con la mejora del cultivo. Se anotan algunas características básicas y atributos particulares de la planta y profundiza respecto al trabajo de mejoramiento genético de la caña de azúcar desarrollado en el mundo. El tema de la sexualidad de la caña relacionado al descubrimiento de su fertilidad en el año 1888 es tratado con particular interés, en consideración de que abrió las puertas al cruzamiento y la hibridación que impulsó en pocos años el mejoramiento del cultivo de manera dinámica y determinante en todos los ámbitos. Se explica sucintamente el recorrido histórico seguido por los esfuerzos de cruzamiento de la planta de caña en el mundo, por medio de la creación y operación de programas de mejora genética en diversas estaciones experimentales dedicadas a la hibridación interespecífica e intergenérica. Se establece una cronología secuencial sobre los inicios y evolución de la hibridación en el mundo, tratándolo por los esfuerzos desarrollados en diversos países y connotadas Estaciones Experimentales que liberaron variedades de gran renombre mundial. Se comentan las posibles razones que intervienen y provocan la denominada “declinación varietal”, como acontece con la consanguinidad atribuida al cultivo, expresada por una pérdida sistemática de vigor y capacidad productiva; tipificando complementariamente por características y atributos específicos el biotipo teórico de una caña ideal. El tema de los Bancos de Germoplasma como reserva básica de genes para alimentar los programas de mejoramiento es comentado. Se citan los recientes y muy satisfactorios resultados alcanzados por investigadores internacionales vinculados al CIRAD de Francia, que hicieron posible después de muchos años poder secuenciar con éxito el genoma de la caña de azúcar. Finalmente se analiza y especula un poco sobre el futuro y las rutas tecnológicas y comerciales que debería y podría seguir la mejora genética en pocos años, lo que se cuestiona y plantea con un ¿hacia dónde vamos en materia genética de la caña?*

---

Presentado en: **Congreso Tecnológico DIECA 2018, 7**, Colegio Agropecuario de Santa Clara, San Carlos, Alajuela, Costa Rica. Memoria. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), 29, 30 y 31 de agosto 2018.

<sup>1</sup> Ingeniero Agrónomo, MSc. Gerente. *Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA-LAICA)*, Costa Rica. E-mail: [mchavez@laica.co.cr](mailto:mchavez@laica.co.cr). Teléfono (506) 2284-6066 / (506) 2284- 6067.

## Introducción

El tema de la genética vinculada y asociada con las variedades de caña de azúcar de uso comercial, es un tópico al cual se le otorga particular y especial relevancia en consideración de que mucho del éxito o fracaso productivo, se le atribuye muchas veces sin otras valoraciones complementarias, a este incuestionable y determinante factor de la producción. Acontece sin embargo, que la expresión y manifestación del potencial genético contenido en un determinado clon, viene influenciado en alto grado por el estímulo positivo o negativo que puedan ejercer otros factores de carácter biótico y abiótico que los determinan.

Esta realidad obliga a que todo material promisorio de cultivo que ha superado de manera favorable las fases sucesivas de investigación, prueba y comprobación de campo, sea dotado y proveído de las condiciones edafoclimáticas y de manejo que coadyuven y contribuyan a invocar, estimular y manifestar esa expresión intrínseca positiva. Cuando este condicionante no se da en la medida, oportunidad y magnitud de lo requerido en concordancia con las expectativas establecidas y previstas, los resultados productivos agroindustriales se tornan insuficientes o en su caso deficientes para satisfacer las necesidades empresariales comerciales (Chaves 1995b, 2006b).

A lo anterior hay que agregar que inexorablemente como seres bióticos, las variedades de caña se deterioran con el tiempo por causa de procesos naturales que las hacen económicamente improductivas luego de transcurrido un período de cultivo y explotación comercial perentorio; el cual, vale reconocer, es muy variable entre variedades en consideración del entorno y condición productiva donde se cultiva, como también dependiente del potencial genético intrínseco del material sembrado.

A partir de lo anterior, debe aceptarse que las variedades no son finitas como sería deseable aconteciera con los clones de alto rédito productivo y económico; por lo que todas, sin distingo ni condicionante alguno, pasan por un periodo natural de **surgimiento, crecimiento, máxima expresión, declinación y salida como materiales de uso comercial**, el cual es de duración variable. Ninguna variedad comercial puede exonerarse de esa realidad.

El conocimiento de la genética como base y fundamento de cualquier pretensión de mejora del cultivo de la caña, resulta de especial interés para toda persona que trabaja en la búsqueda de identificar y poner a disposición del sector productivo cañero-azucarero, mejores materiales genéticos respecto a los de uso convencional en el momento para uso comercial; labor que se torna de carácter permanente, continua y sistemática, pues nunca se llega a un final perdurable y satisfactorio, en consideración de la pérdida de vigor y declinación productiva natural que padecen todas las variedades con el transcurrir del tiempo y la explotación comercial (Chaves 2006b).

Bajo esos principios, en el presente documento se aborda y desarrolla de manera genérica el tema de las variedades y el mejoramiento genético de la caña de azúcar, expuesto desde diferentes enfoques, con lo cual se procura ofrecer una perspectiva holística y completa sobre la ruta seguida por la mejora genética de la planta a nivel mundial. Se espera con este aporte, contribuir a la comprensión de las ventajas como también dificultades que el tema ofrece, pese a los incuestionables adelantos disponibles, la búsqueda de mejores clones de caña para adaptarlos y explotarlos en las condiciones y entornos variables y disimiles de producción.

## 1.) Clasificación taxonómica

El género fue descrito originalmente por Carlos Linneo, siendo la especie tipo empleada la *Saccharum officinarum* L. El nombre del género proviene del latín *saccharum* que significa azúcar. En el Cuadro N° 1 se describe la clasificación taxonómica de la caña de azúcar.

**Cuadro 1. Taxones de la caña de azúcar.**

I	Super-Reino	Eucariota
II	Reino	Plantae
III	División	Spermatophyta
IV	Sub-División	Magnoliophytina
V	Clase	Liliatae
VI	Sub-Clase	Liliidae
VII	Orden	Poales
VIII	Familia	Poaceae
IX	Sub-Familia	Panicoideae
X	Tribus	Andropogoneae
XI	Sub-Tribus	Saccharastrae
XII	Género	<i>Saccharum</i>
XIII	Especie	<i>Saccharum</i> spp
XIV	Variedades	Black Cheribón, Criolla, etc.
XV	Cultivares	LAICA 04-825, RB 86-7515, Q 96

Fuente: Adaptado de Arévalo *et al* (2006) y Strasburger *et al* (1988).

## 2.) Especies de caña

A la caña de azúcar se le reconocen seis especies principales asociadas al género *Saccharum*, al cual se le han ligado y descrito más de 30 especies relacionadas (Stevenson 1965; Heinz 1987; Chen 1991; Pérez *et al* 1997; Flores 2001; Moore *et al* 2014). La etimología del término latino "*Saccharum*" es: *azúcar, sustancia dulce, con sabor a sacarina*. Seguidamente se describen las principales especies de caña de interés azucarero:

- a) **Saccharum officinarum L.**: son de tallos gruesos, erectos, perennes, hojas anchas que presentan un grado importante de despaje natural, suaves y de baja fibra, jugos ricos en sacarosa y de alta pureza; poseen además bajo contenido de almidón. Sus tallos son de colores variables en rangos que van del amarillo pálido al púrpura oscuro, los cuales se combinan algunas veces en rayas multicolores. Los entrenudos son cortos y estructurados en forma de barril. La inflorescencia es formada por flores agrupadas en grandes panículas (flor de flores), donde las espiguillas están distribuidas en pares siendo una sésil y la otra pedicelada. Su floración se estima escasa y son pobres en la formación de semilla, lo cual es influenciado y determinado sin embargo por las condiciones ambientales prevalecientes en el lugar. En general los clones de la especie son deficientes en cuanto a adaptación y por ello susceptibles al estrés ambiental; además de muy dispuestas a padecer del ataque de plagas y enfermedades. Los tallos son pesados generando altos tonelajes de campo. Su origen probable se ubica en el archipiélago de Indonesia, Nueva Guinea y el este de la línea de Wallace (línea que marca un límite biogeográfico en el archipiélago malayo y que separa los continentes de Asia y Oceanía); su posible origen se proyecta hasta Filipinas. Se le ubican como posibles ancestros el *S. spontaneum*, *Miscanthus* y *Erianthus arundinaceus*. Algunos investigadores la consideran sin embargo el resultado de la domesticación de especies silvestres (*S. robustum*), que fueron utilizadas ancestralmente para masticar por su baja fibra y sabor dulce agradable favorecido por su contenido de sacarosa. Se presume que ésta fue la especie descrita por Linneo en el año 1753 cuando se transformó en la base de la expansión de la agroindustria azucarera en el Hemisferio Occidental. Citológicamente la especie *officinarum* se califica como un grupo homogéneo típico de la especie, considerando solo los clones con  $2n= 80$  cromosomas que forman 40 pares bivalentes durante la meiosis; se han identificado adicionalmente variaciones cromosómicas con  $2n= 100-140$ . Por sus características, fue y constituye en la actualidad la base de los programas de mejoramiento genético mundial de la caña, siendo por lo general utilizada como progenitor femenino. La especie agrupa las denominadas y bien ponderadas “*Cañas Nobles*”, entre las que pueden nombrarse como más destacadas por su antecedente productivo, las siguientes: Caña Criolla (Black Cheribón), Otaheite (Bourbon, Blanca de Castilla, Lahaina o Habanera); otras nobles reconocidas son la Morada, Cristalina, Yellow Caledonia o Tanna y Badila.
- b) **Saccharum spontaneum L.**: la especie muestra una gran variación morfológica con apariencia zacatosa que va desde hojas muy reducidas que muestran casi solo su nervadura central, sin formación de tallos, hasta formas altas y erectas, de hojas anchas y largos entrenudos rectos; también tallos ahuecados. Presentan prolíficos rizomas de varios metros de longitud. Su contenido en sacarosa es muy bajo. Se

reproduce tanto por la vía sexual como asexual. Es polimórfica exhibiendo la distribución geográfica más amplia de todo el género *Saccharum*, lo que la ubica en zonas tropicales y subtropicales que van desde las islas del Pacífico Sur, Taiwán, la península Malaya hasta Afganistán. Se le considera junto con *S. robustum* una especie silvestre. Posee una amplia y reconocida rusticidad y capacidad de adaptación a condiciones difíciles (frío, calor, sequía, humedad, enfermedades), lo que le permite crecer desde el nivel del mar hasta los 2.700 msnm, encontrándosele aún en el Himalaya. Citológicamente la especie tiene número de cromosomas euploides y aneuploides que varían desde  $2n= 40$  a  $2n= 128$  cromosomas. Esta especie es por lo habitual la que acompaña a *S. officinarum* en los programas de mejora genética en la creación de clones comerciales promisorios, en consideración de que aporta e incorpora características principalmente agronómicas importantes asociadas a resistencia y estrés ambiental, dureza, vigor, ahijamiento y tolerancia a plagas y enfermedades, entre otras. Señala Flores (2001) que sobre esta especie “Existen dos especies = *glagad* de Java y otra de India que tienen participación en la “nobilización” de la caña para la producción de los híbridos: POJ 2878, NCo 310, B 43-62, L 60-14, etc.”

- c) ***Saccharum barberi* Jeswiet**: se dice que estas cañas son muy antiguas. Se distinguen y diferencian de *officinarum* por sus características florales, su rusticidad y su gran tolerancia a condiciones ambientales extremas y difíciles; poseen alta fibra, bajo contenido de sacarosa, tallos de grosor delgado a medio, lo que se expresa en muy bajos tonelajes de caña. Sus entrenudos son largos de forma cilíndrica, con secciones corchosas en la superficie de los entrenudos; las hojas son cortas y de lámina angosta. Gozan de alta tolerancia a plagas y enfermedades. Su origen se ubica en el norte de la India. Su citología establece un  $2n= 81$  a  $2n= 121$  lo que presume un origen interespecífico e incluso intergenérico, resultado de posibles introgresiones (es el movimiento de genes de una especie a otra a consecuencia de un proceso de hibridación interespecífica, seguido de retrocruzamiento). En consideración de poseer una escasa floración y baja fertilidad del polen, limita su empleo en los programas de mejora genética, lo que se asocia con su aneuploidía y a su meiosis irregular. Como clones tipo se citan la Chunee que fue cruzada con las Cheribón de Java, generando los híbridos POJ 36, POJ 213 y POJ 214, entre otros.
- d) ***Saccharum sinense* Roxb**: esta especie resulta muy similar en sus características a *S. barberi*, aunque su origen antiguo casi prehistórico se establece en China, por lo cual son reconocidas como las “cañas chinas”. Son rústicas, altas en fibra, tolerantes a condiciones ambientales difíciles y también al ataque de plagas y enfermedades, se les considera casi inmunes al virus del mosaico. Se utilizan como forraje. Su biotipo representativo es la reconocida variedad Uba, todavía cultivada en algunas zonas de

China, Taiwán y Japón, y también se sembró en Costa Rica durante muchos años. La especie manifiesta tolerancia a factores del clima extremos como la sequía; también algún grado de resistencia al ataque del virus del mosaico y cuenta adicionalmente con la ventajosa propiedad agronómica de perdurar en el campo sin corta, por más tiempo del previsto, sin que esto afecte ni dañe la cepa.

- e) **Saccharum robustum Brandes**: se le considera por su origen y distribución geográfica como la especie silvestre más afín y cercana a *S. officinarum*. Se le encuentra creciendo en las montañas y riberas de los ríos en Nueva Guinea e Indonesia, estableciéndose su rigen desde la línea de Wallace de Huxley, a través de Nueva Guinea y Nuevas Hébridas. Se le considera junto con *S. spontaneum* una especie silvestre. La planta es de porte erecto, de gran altura, sus tallos son de grosor medio, duros, leñosos, con alto contenido de fibra y ahuecados en su interior; su contenido de sacarosa es muy bajo. Algunos la consideran una introgresión derivada de *S. spontaneum* con otros géneros. La especie se considera que ha sufrido mucha erosión cromosómica, dando lugar a dos niveles euploides definidos por  $2n= 60$  y  $2n= 80$ , las cuales son consideradas como verdaderas *robustum*. El programa de mejora genética hawaiano las utilizó mucho buscando incorporar altos rendimientos de caña y alta fibra en sus clones comerciales. Se le ha empleado en programas de mejoramiento genético con resultados calificados como poco satisfactorios, destacando la variedad de origen hawaiano **H 37-1933**, de amplio cultivo en las zonas altas de Costa Rica hace algunas décadas.
- f) **Saccharum edule Hassk**: morfológicamente es una especie muy similar a *S. robustum* motivo por el cual algunos investigadores la califican como un mutante de la misma; otros autores sugieren por el contrario la existencia de dos grupos: 1) de Nueva Guinea resultado de la introgresión de *S. robustum* x *Miscanthus* y 2) de Fiji producto de *S. officinarum* x *Miscanthus*. La especie *edule* incluye una serie de poliploides de  $2n= 60, 70$  y  $80$  cromosomas con formas aneuploides, que virtud de sus características florales limitantes no ha mostrado mucho interés para los mejoradores genéticos de la caña, pues por el contrario, sus inflorescencias con abultamientos han sido empleadas por los aborígenes como alimento.

### 3.) Géneros afines

El abundante trabajo genético desarrollado sobre el género *Saccharum* y sus especies en la búsqueda de crear mejores materiales para uso comercial agroindustrial, ha permitido identificar e incorporar otros géneros de interés que son filogenéticamente asociados, considerados dentro del **Complejo Saccharum**, como acontece con *Erianthus* ( $2n = 10, 15, 20, 30, 40$  y  $60$ ), *Miscanthus* ( $2n= 38, 57, 76$ ), *Narenga* ( $2n= 30$ ), *Ripidium* ( $2n = 20, 30, 40, 60$ ), *Diandra*, *Eriochrysis*, *Eccolipus*, *Spodiopogon*, *Sclerostachya* ( $2n= 30$ ), siendo los dos

primeros los más afines. Además, se ha trabajado con los géneros *Sorghum* (2n = 10, 20 y 40), *Zea* (2n= 20), *Pennisetum*, *Bambusa* e *Imperata* y *Arundo donex*, entre otros, con los cuales puede cruzarse la caña de azúcar para generar nuevos híbridos (Moore *et al* 2014). Los cruces intergenéricos resultan de gran interés actual en procura de incrementar la base genética, elevar el vigor híbrido y contrarrestar la endogamia (unión o reproducción entre individuos de ascendencia común); así como la adaptabilidad a condiciones adversas, tolerancia fitosanitaria y alta productividad agroindustrial.

#### **4.) Características básicas y atributos de la caña**

La caña de azúcar (*Saccharum spp*) es una reconocida gramínea tropical de muy amplia distribución mundial, virtud de los amplios usos que despliega, rusticidad demostrada y conocida capacidad de adaptación que posee. La planta de caña, que se cosecha anualmente en el país en regiones cálidas de altura media-baja (<1.000 msnm) y sobre los 18 meses en las zonas más altas (>1.000 msnm), tiene una buena y rápida capacidad de rebrote que es también aprovechada. Seguidamente se anotan algunos aspectos puntuales importantes y destacables de la planta.

##### **4.1.) Anatómicas**

Como toda planta la caña de azúcar posee estructuras externas e internas básicas definidas por la raíz, el tallo, las hojas y la flor, las cuales están vinculadas entre sí por medio de otras estructuras comunes. Dichas estructuras operan como elementos que permiten la distinción, diferenciación y reconocimiento de variedades en el campo; algunas de las cuales se describen someramente a continuación.

**4.1.1.) La Raíz:** constituye todo un sistema que de acuerdo con Dillewijn (1952) y Bacchi (1983) está compuesto por tres subsistemas: a) raíces superficiales, ramificadas y absorbentes, b) raíces de fijación más profundas y c) raíces cordón, que pueden alcanzar hasta 6 m de profundidad. El profuso y poderoso sistema radicular lo compone un robusto rizoma subterráneo. Las raíces propiamente se identifican en su desarrollo inicial en dos tipos principales: a) primordiales del esqueje original (semilla): brotan a partir de la banda de primordios ubicada en el anillo de crecimiento del tallo sembrado, son muy finas, ramificadas y de vida muy corta hasta la aparición de los brotes (a los 2 a 3 meses), b) permanentes: emergen rápido y en gran número de los anillos de crecimiento de los nuevos brotes, son gruesas y proliferan con el desarrollo vegetativo de la planta. Varían con las variedades y son muy influenciadas por los elementos del clima y el manejo agronómico de la plantación. El sistema radicular es determinante en el potencial de adaptación y éxito comercial que pueda tener una determinada variedad, en consideración de los diversos entornos en que es cultivada, siendo sometida por ello, a condiciones de estrés muy

diversos (bióticos y abióticos). Esta estructura es muy importante en la labor de mejora genética de la caña de azúcar y se procura mejorar mediante cruces interespecíficos.

**4.1.2.) El tallo** constituye la sección comercial más importante de la planta virtud de que es donde está concentrada y contenida el azúcar extraíble en el ingenio. Los tallos se agrupan en cepas que se originan a partir de las yemas de la semilla y también las ubicadas en los nuevos brotes subterráneos. Sirve de sostén a las hojas y la inflorescencia. Varían en cantidad, grosor, longitud, color, hábito de crecimiento y capacidad de concentración de sacarosa, lo cual está determinado en alto grado por la variedad y el entorno productivo donde se encuentren sembradas. Los tallos que no poseen ramificaciones son sólidos e industrializables (10 a 15 por metro) y de 2 a 4 metros de altura, con diámetros variables de 3 a 6 cm, lo cual es muy variable, aún en un mismo lugar de siembra. El peso del tallo es muy variable, pudiendo ir desde 0,30 hasta 6 kg. Actúa como conducto para el transporte de agua, nutrimentos y sustancias elaboradas hacia las hojas con movimientos acrópetos (ascendentes), basipetos (descendentes) y también horizontales dentro de la planta. El tallo está anatómicamente compuesto de dos componentes básicos: a) un tejido esponjoso y dulce en la parte central del que se extrae un jugo rico en sacarosa, el cual al ser cristalizado, se convierte en azúcar; b) una sección periférica cerosa, alta en fibra, que durante el proceso de extracción del azúcar constituirá el bagazo, el cual tiene diversos usos siendo el energético el principal. Según su momento de surgimiento los tallos se nombran sucesivamente como primario, secundario, terciario, etc. Se conforman de **nudos** separados por **entrenudos** en los cuales se sitúan a su vez las **yemas** y desarrollan las **hojas**; las yemas germinales presentan diversas formas muy particulares para cada variedad, representando un criterio taxonómico de tipificación e identificación muy utilizada para diferenciar clones. El nudo es una sección dura y fibrosa que separa los entrenudos. La concentración de sacarosa contenida en los tallos industrializables puede variar de tallo a tallo de una misma cepa; como también de la sección superior a la inferior en un mismo tallo, siendo mayor en la base respecto al ápice donde se ubica el **cogollo**.

**4.1.3.) Las Hojas** se forman en los nudos y distribuyen de manera alterna a lo largo del tallo. Se conforman de **lámina, nervadura y vaina** y reconocen además estructuras importantes como la **lígula**, que es de forma tubular y envuelve al tallo y la **aurícula**. Las hojas son muy funcionales y determinantes para la fotosíntesis. La caña de azúcar dispone de un índice de Área Foliar voluminosa (IAF = 4-12 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) como indicara Barbieri (1993), con hojas alternas de amplia lámina que favorecen la captación de luz. Su función fundamental es: a) la captación y conversión de la luz solar en energía química por medio de la fotosíntesis, b) la fabricación de carbohidratos, c) el intercambio gaseoso (respiración) y d) la conversión de los carbohidratos en alimentos nitrogenados. Su grado de adhesión al tallo define el nivel de despaje de la planta, lo que interviene e incide sobre la facilidad de corta de los tallos, la

cantidad de basura (trash) que se transporta e interviene el proceso fabril; también determina mucho la necesidad de quemar la plantación para su cosecha. Es la sección más expuesta, intervenida y afectada de la planta por los factores del clima y los agentes fitosanitarios representados por plagas y enfermedades, lo cual determina la productividad agroindustrial final. Cualquier afectación fitopatológica (hongos, bacterias, virus) con impacto productivo significativo de esta importante sección justifica el cambio inmediato de la variedad sembrada.

**4.1.4.) La Flor** inicia su formación cuando la planta transforma su meristemo apical de crecimiento en tejido floral, lo que da surgimiento a la flor, la cual se manifiesta como una frondosa inflorescencia (panícula sedosa) conformada con flores hermafroditas. Su emisión responde a la fase reproductiva luego de superada la fase vegetativa, donde se genera división celular y activa el crecimiento de la planta. Se constituye de un eje central con articulaciones donde se insertan las espiguillas que contienen una flor hermafrodita con tres anteras, un ovario y dos estigmas. La floración se activa, promueve y manifiesta cuando las condiciones de luz (fotoperiodo), humedad, nutrición y temperatura son favorables. Esta estructura es muy importante para el cultivo pero con visiones, intereses y efectos contrarios, pues para el mejorar genético la flor es muy deseada para fines de cruzamiento, pero muy negativa en términos productivos pues afecta severamente el tonelaje de caña y la concentración de sacarosa.

#### **4.2.) Fisiológicas**

Desde una perspectiva fisiológica y metabólica, la caña de azúcar es una planta que ha sido calificada como excepcional y privilegiada por la naturaleza, virtud de las características, propiedades y atributos que dispone.

En principio, vale señalar que el acumulo de materia seca en la planta se presenta en una forma sigmoidial, por lo que el mismo es determinado y expresado en tres etapas o fases definidas: 1) fase inicial en donde el crecimiento es relativamente lento, ocurriendo actividades importantes como la germinación, el retoñamiento y el ahijamiento de la plantación, 2) fase de crecimiento rápido o "boom de crecimiento" donde se acumula entre el 70-80% de toda la materia seca vegetal de la planta, es la que define en alto grado el tonelaje final y 3) fase final donde el crecimiento se torna de nuevo lento acumulando cerca del 10% de la materia seca, ocurre la maduración y el acumulo sistemático de sacarosa en los tallos, puede aparecer la inflorescencia (no todas las variedades florealan). Este patrón de crecimiento vegetativo es característico y varía según sea la variedad, localidad de cultivo (altitud, clima, suelos, manejo, etc.) y ciclo de cultivo que se sitúa en el caso particular de Costa Rica entre los 10 a 24 meses, siendo mayor entre más alta (msnm) este la plantación.

Como es obvio suponer, cada fase vegetativa está determinada e influenciada con intensidad variable por factores asociados con los elementos del clima, el suelo, el agua y el manejo agronómico y tecnológico que se le preste a la plantación. Ocurren reacciones asociadas y vinculadas a factores de carácter hormonal, lumínico, nutricional, gaseoso, energético, citológico, metabólico, fisiológico, etc.

Muchos autores han apuntado, descrito y se han referido a las características y los atributos que la planta de caña de azúcar posee, caracterizándolas como propiedades muy exclusivas y especiales que, según el criterio de Chaves (1988, 1991, 2016) compartido también por Montenegro y Chaves (2009, 2011) y Sugarcane (2014), la ubican en un biotipo diferente al que exponen otros cultivos de interés agrícola, asegurando que la caña es *“...una planta excepcional entre las plantas de uso comercial en consideración de poseer varias ventajas y atributos de índole anatómico y fisiológico que la tipifican y caracterizan, entre las cuales pueden citarse como sobresalientes las siguientes:*

- 1) *Dispone de un elevado Índice de Área Foliar (IAF  $\approx$  4-12 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) asimilador de luz que favorece y hace más eficiente la absorción de radiación solar (Barbieri 1993).*
- 2) *Produce una gran cantidad de Materia Orgánica la cual reside en su alta Tasa de Fotosíntesis por unidad de superficie de terreno, que es influenciada a su vez por su alto IAF. Su producción máxima teórica de Materia Seca se reporta en 280 TM/ha/año.*
- 3) *La disposición vertical de sus hojas durante gran parte de su periodo de crecimiento, contribuye significativamente con los puntos anteriores.*
- 4) *Fotosintéticamente es una planta altamente eficiente que pertenece al grupo privilegiado de las Ciclo C<sub>4</sub> (Vía Ácido Dicarboxílico).*
- 5) *Posee estructuralmente dos juegos de cloroplastos (Células del Mesófilo y Células de la Vaina Vascular) que promueven su alta eficiencia fotosintética en la captura y uso del CO<sub>2</sub>, la cual se da por dos vías: a) Vía Normal C<sub>3</sub> de Calvim y, b) Vía alternativa C<sub>4</sub>.*
- 6) *Es capaz de incrementar su Tasa Fotosintética por aumento de la luminosidad, por lo que califica como una planta típicamente de sol y de luz.*
- 7) *Posee un alto Punto de Saturación de Luz estimado en 6,5 a 150 Klux ( $\approx$  65 a 1.500 Wm<sup>-2</sup>).*
- 8) *Posee un alto Punto de Compensación lo que le permite alcanzar altos valores de fijación de CO<sub>2</sub>, lo que corresponde a eficiencias del 5-6% de conversión de energía solar.*

- 9) *Su velocidad de Fotosíntesis es cerca de 2-3 veces superior al de las gramíneas del tipo C<sub>3</sub>, presentando una capacidad fotosintética estimada en 100 mg de CO<sub>2</sub>/dm<sup>2</sup>/hr.*
- 10) *Tolera condiciones extremas (altas y bajas) de temperatura. Se reporta alta tolerancia a temperaturas extremas de hasta 47°C y capacidad productiva, siempre que se utilice riego eficiente. Se estima que los 27°C constituyen la óptima para absorción de nutrimentos, por cuanto temperaturas debajo de 21°C retardan el crecimiento de las raíces, el cual se paraliza a los 10°C.*
- 11) *Tolera como está demostrado una condición hídrica extrema por varios días consecutivos (sequía, inundación).*
- 12) *Tiene capacidad y ventaja de poder fotosintetizar con los Estomas prácticamente cerrados, lo que duplica su eficiencia en el uso del agua y su transpiración relativa, en comparación con otras gramíneas del tipo C<sub>3</sub>.*
- 13) *No posee Respiración Aparente por lo que no “desperdicia energía metabólica potencial”.*
- 14) *Dispone de una enorme y reconocida capacidad para producir masa verde (Biomasa) compuesta fundamentalmente por almidones, azúcares (Reductores y No Reductores), compuestos lignocelulósicos y agua.*
- 15) *Dispone de un poderoso sistema radicular compuesto de tres tipos de raíces diferentes: a) Superficiales-ramificadas y absorbentes, b) de Fijación más profundas y c) Cordones que profundizan hasta 6 m. (Bacchi 1983) que le dan una enorme capacidad de exploración (vertical, horizontal) en el suelo y con ello absorción nutricional y de agua.*
- 16) *Posee una rusticidad y capacidad de adaptación (climática, edáfica y de manejo) a toda prueba, tal como está suficientemente demostrado a nivel de uso comercial.*
- 17) *Sus elevados requerimientos nutricionales son satisfechos en alto grado virtud de sus ventajas (puntos N° 13 y 14) anotadas anteriormente. Este atributo resulta sin embargo contraproducente virtud de que “agota los suelos” cuando no son complementariamente convenientemente fertilizados.*
- 18) *Posee la capacidad demostrada de Fijar Nitrógeno Atmosférico, con aportes importantes a su nutrición.*
- 19) *Para uso pecuario la caña posee y mantiene en periodos secos valores nutritivos y energéticos importantes que le proveen una interesante potencial de uso forrajero.*
- 20) *Su condición de planta Perenne le permite generar materia prima por retoñamiento luego de cada corte, por lo que no requiere inversiones y siembras sucesivas, sólo mantenimiento.*

21) Los parámetros ambientales que afectan de manera más marcada e incidente la Bioconversión de Energía en la caña de azúcar, son: 1) Luz (intensidad y calidad); 2) Concentración de CO<sub>2</sub>; 3) Disponibilidad de agua; 4) Disponibilidad de nutrimentos, y 5) Temperatura, entre otras.

En materia genética la planta de caña mantiene también excepcionalidad al estar el Género *Saccharum* conformado por seis especies tropicales perennes asociadas, que le proveen una alta capacidad de recombinación al ser cruzadas entre si generando una compleja descendencia.”

El producto de interés inmediato y final de todo productor de caña es el azúcar o sacarosa que es cristalizada por la planta de caña en sus tallos, a partir de la conversión de la energía tomada del sol durante la fotosíntesis, el cual es un producto natural que se extrae de la caña. La sacarosa es un disacárido compuesto molecularmente de dos monosacáridos básicos: **glucosa y fructosa**.

#### 4.3.) Genéticas

La caña de azúcar es una gramínea perteneciente a la misma familia (Andropogoneae) que el sorgo (*Sorghum* spp), el maíz (*Zea* spp), el zacate indio o caminadora (*Rottboellia* sp) y el pasto Johnson (*Sorghum halepense*), entre muchas otras. La caña que se cultiva y explota comercialmente en la actualidad es un híbrido compuesto de al menos dos de la cinco especies del género y grupo *Saccharum*: *S. barberi* Jeswiet, *S. officinarum* L., *S. robustum* Brandes & Jesé, ex Grassl, *S. sinense* Roxb y *S. spontaneum*; también se reconoce la especie *S. edule* como parte del Grupo *Saccharum*. Mediante el cruce interespecífico de estas especies se forman híbridos, originando un género muy diferente que satisface los intereses agroindustriales comerciales requeridos por la agroindustria. Esta condición ha generado algún grado importante y preocupante de endogamia, sobre lo cual se comentará más adelante y se procura intervenir, ampliando la capacidad combinatoria del cultivo. En el Cuadro 2 se presenta y caracteriza el género en cada una de las seis especies por su componente cromosómico, su presunto origen y los contenidos de sacarosa y fibra que se estima presentan.



**Cuadro 2. Caracterización de las especies del género *Saccharum*.**

<i>Especie</i>	<i>Origen</i>	<i>Cromosomas</i>	<i>Contenido fibra (%)</i>	<i>Contenido sacarosa (%)</i>
<i>S. spontaneum</i> L. *	<i>Diverso</i>	<i>2n = 40-128</i>	<i>Muy alta 25-40</i>	<i>Muy baja 1-4</i>
<i>S. robustum</i> Brandes & Jesé ex Grassl *	<i>Papua-Nueva Guinea, Indonesia</i>	<i>2n = 60-194, usual 80</i>	<i>Muy alta 20-35</i>	<i>Baja 3-7</i>
<i>S. barberi</i> Jeswiet	<i>Norte de La India</i>	<i>2n = 81-124</i>	<i>Alta 10-15</i>	<i>Media 13-17</i>
<i>S. sinense</i> Roxb.	<i>China</i>	<i>2n = 110-120</i>	<i>Alta 10-15</i>	<i>Media 12-15</i>
<i>S. edule</i> Hassk.	<i>Papua-Nueva Guinea</i>	<i>2n = 60,80 hasta 122</i>	<i>Baja ?</i>	<i>Baja 3-8</i>
<i>S. officinarum</i> L.	<i>La India (?)</i>	<i>2n = 80</i>	<i>Baja 5-15</i>	<i>Alta 18-25</i>
<i>Variedades comerciales: Híbridos de: S. officinarum x S. spontaneum</i>	<i>Diversa</i>	<i>2n = 100 e140</i>	<i>Alta</i>	<i>Alta</i>

\* Especies silvestres. Fuente: Chaves (2016); Moore *et al* (2014).

Como se infiere de la información anterior, la poliploidia ( $2n = 40-124$ ) generada por toda esa diversidad genética le provee presuntamente una amplia capacidad combinatoria a la caña de azúcar, lo que favorece y promueve la búsqueda de diversidad, capacidad de adaptación y alta productividad agroindustrial por medio de la mejora genética, lo cual ha evolucionado muchísimo a nivel mundial principalmente en los últimos 125 años, lo que ha beneficiado también a Costa Rica. Pese a esa amplia capacidad combinatoria, el tema de la existencia de endogamia en el cultivo es importante tenerlo presente pues es una realidad, como se comentará más adelante.

Para fines genéticos y comerciales, cada una de esas especies aporta características, propiedades y también limitantes muy particulares que mediante hibridación se combinan y manifiestan en los clones de uso comercial que mediante el mejoramiento genético “se fabrican” y disponen para uso agrícola (Chaves 2006b).

### **5.) El mejoramiento genético de la caña de azúcar en el mundo**

El desarrollo de la agroindustria azucarera mundial antes de iniciarse la labor de mejoramiento genético propiamente dicha, basada en investigación formal y no en simple experimentación, partió y se sustentó en el desarrollo de las “*cañas nobles*”. Entre esas cañas destacó la variedad Otaheite o caña Borbón, la cual fue muy aceptada a nivel mundial virtud de sus condiciones agronómicas favorables, adaptabilidad y altos rendimientos; perdiendo luego vigencia por el ataque y susceptibilidad que mostró a las enfermedades. Posteriormente se sembró en su substitución la caña Cheribón, también nombrada caña

transparente, en sus tres presentaciones de color principales: *morada, clara y rayada*, elemento que favoreció se le nombrara de diferentes formas en los países donde se cultivó. En Cuba y Barbados se le conoció como Cristalina al ingresar en mezcla con la Otaheite. En Hawái, Fiji e islas Mauricio las cañas nobles conocidas como Tanna o Caledonia también lograron reconocimiento mundial.

Es importante mencionar que la mejora de la caña de azúcar cobra un impulso importante con el descubrimiento de su fertilidad, pues se supuso y creyó por muchos años que la misma era estéril; esto por cuanto los dos clones más cultivados en el Hemisferio Occidental en esa época eran la Criolla y la Borbón que mostraban androesterilidad. El descubrimiento de la fertilidad de la planta aconteció según Stevenson (1965) de manera simultánea pero independiente en el año 1888 en Barbados y en Java. A partir de ese momento el trabajo de mejoramiento del cultivo adquirió una orientación muy diferente, pues se buscó en el cruzamiento y la hibridación la solución a muchos de los problemas que sufrían las plantaciones, sobre todo de carácter fitopatológico con las enfermedades que venían impactando el cultivo de las cañas nobles.

Los primeros estudios se concentraron obviamente en conocer más sobre la inflorescencia, la semilla, la fertilidad y la viabilidad del pólen, la capacidad y técnicas de cruzamiento de la planta y la forma de aproximar los progenitores de interés de cruzar, sobre todo los machos; como también el empleo de clones sin pólen viable como progenitores femeninos. En poco tiempo el trabajo con cruces interespecíficos e intergenéricos fue una realidad y se avanzó en la “**nobilización**” de nuevos híbridos, lo cual consistía en cruzar variedades nobles con silvestres, retrocruzando posteriormente el producto creado con la variedad noble, para fijar los caracteres de interés. Con los años este método generó clones de gran relevancia mundial, como aconteció en el año 1921 cuando se liberó la reconocida **POJ 2878 (POJ 2364 x EK 28)**.

Coinciden los especialistas en reconocer que la caña de azúcar es genéticamente una especie muy compleja, por lo cual su mejoramiento genético en el ámbito de la endocria y la hibridación es problemático. La creación de programas de mejora en el mundo (Java, India, Australia, Sudáfrica, Fiji, Barbados, Cuba, México, Reunión, EUA, Brasil, Guyana) dio pronto lugar a importantes desarrollos en el campo genético, que se manifestaron en el comercial mediante la liberación de clones dotados de adaptabilidad a condiciones adversas, tolerancia a plagas y enfermedades y mayor productividad agroindustrial.

Los actuales cultivares de caña de azúcar empleados comercialmente por nuestros agricultores son híbridos obtenidos a partir del cruzamiento de relativamente unos pocos clones de las especies *S. officinarum* y *S. spontaneum*, principalmente, esto si lo referimos y vinculamos a la enorme cantidad de diferentes especies y biotipos que han sido colectadas

y que se conservan en las colecciones de las distintas estaciones de cruzamiento genético de todo el mundo azucarero. Ésta limitada y relativa estrecha base genética, asociada a la elevada consanguinidad que existe y está demostrada entre los híbridos sembrados comercialmente, y que empleados adicionalmente como progenitores por los programas de obtención de variedades promisorias, son razones que limitan y restringen de alguna manera el avance en los programas de mejora genética de la caña de azúcar. Se reconoce actualmente la imperiosa necesidad de ampliar esa base genética de la caña, asunto en el que muchos laboratorios trabajan con resultados muy esperanzadores. Con el objeto de contrarrestar esa situación y superar la consanguinidad (Pérez *et al* 1997), se han venido retomando en numerosas estaciones a partir de los años 60, los trabajos de nobilización y más recientemente, se han incorporado los cruzamientos intergenéricos utilizando clones pertenecientes a los géneros *Erianthus* spp. y *Miscanthus* spp. como fuentes silvestres inductores de nueva variabilidad.

Expresa Flores (2001) en referencia a diversidad genética, que *“...el limitado uso y explotación de estos recursos ha propiciado que los progenitores actuales sean de alto índice de consanguinidad y como consecuencia, los rendimientos y la resistencia a enfermedades no han sido los esperados.”*

El trabajo de mejoramiento genético de la caña de azúcar es muy particular y específico para la planta, por lo que metodológica y procedimentalmente difiere significativamente del empleado en otros cultivos tradicionales como café, maíz, trigo, arroz, frijol; diferencias establecidas por factores como son:

- ❖ Constitución genética altamente heterocigota (posee dos alelos diferentes en los dos loci correspondientes a un par de cromosomas y por tanto posee condición de alelos dominantes y recesivos), lo que implica alta diversidad a su descendencia.
- ❖ Polinización natural es favorecida por el viento.
- ❖ Propagación asexual mediante estacas facilita la reproducción del material vegetativo.
- ❖ La frecuencia de encontrar biotipos deseables (*seedlings*) es relativamente baja.
- ❖ El trabajo y las evaluaciones de campo presentan dificultades.
- ❖ El tiempo requerido para seleccionar híbridos comerciales promisorios y sobresalientes es muy prolongado (8-12 años).

## **6.) Fertilidad de la caña**

Con el descubrimiento de la fertilidad de la caña de azúcar se superó un inconveniente de presunta esterilidad que por muchos años fue una creencia que pasó a verdad, que limitaba la intención y posibilidad de buscar mediante el cruzamiento de clones con potencial y

antecedentes positivos demostrados, introducir en la planta de caña caracteres interesantes y con ello mejorar el cultivo para uso comercial agroindustrial.

De acuerdo con Flores (2001), *“Fue en Barbados, B.W.I. en 1858 cuando se descubrió la fertilidad de la caña siendo el señor Iran A. Harper quién observó unos seedlings (plántulas) que crecían en un campo de caña soca, y le informó al propietario, señor James W. Parris. La noticia sólo tuvo publicidad local, pues pronto cayó en el olvido, pasaron 30 años hasta 1888, para que otros técnicos trabajando independientemente en Java y barbados, efectuaran el descubrimiento de la sexualidad de la caña.”*

Ampliando lo acontecido sobre el tema, describe Stevenson (1965) que *“...el señor J.B. Pilgrim en 1888 observó en el Jardín Botánico de Doods, Barbados la existencia de plántulas de caña. Luego Harrison y Bivell, obtuvieron semilla de las espigas de la caña, que germinadas proporcionaron el material para iniciar el primer programa de mejoramiento en América; y así confirmar el descubrimiento que el señor J.S. Parris había hecho en 1858.”*

En el caso de Java el descubrimiento de la fertilidad fue motivado por circunstancias de índole fitopatológico, cuando el primer director de la Estación Central de Java, Soltwedel, consideró en el año 1885 que las medidas necesario implementar para contrarrestar el impacto provocado por la temible enfermedad virosa del “Sereh”, debían orientarse mediante tres estrategias: higiénicas, terapéuticas y por introducción de nuevas variedades con resistencia al mal. Como observación resultante de dicha estrategia, se evidenció que cañas sembradas en zonas altas (300 a 1000 msnm) y no cerca de las costas mostraban menor infección, lo que condujo a establecer semilleros a esa altitud. Se importaron numerosas variedades procedentes de Asia con algún grado de tolerancia a la enfermedad. El mérito mayor de Soltwedel fue sin embargo poder demostrar que la caña se podía reproducir por medio de semilla sexual (fuzz), lo que resultaba una novedad que condujo pronto a cruzar clones de *S. officinarum* con *S. spontaneum* que dieron lugar a las reconocidas y apreciadas variedades del grupo POJ (Proefstation Oost Java).

La simultaneidad del descubrimiento en esas dos naciones pese a ser reportada durante el mismo año de 1888, tiene diferencias enmarcadas en los periodos de floración de ambas localidades, pues en el Hemisferio Norte la caña emite flor seis meses antes (octubre a noviembre); mientras que en el Hemisferio Sur ocurre de abril a junio, lo cual infiere que los estudios de Soltwedel en Semarang, Java (14° al Sur del Ecuador), fueron primeros por lo que tienen prioridad al ser publicados en el mes de junio de 1888. Los de Harrison y Bovell efectuados en Dodds, Barbados (13° Norte del Ecuador), aparecen citados cuatro meses después, propiamente en setiembre del mismo año. El descubrimiento de la sexualidad de la caña de azúcar indujo y significó un impulso inmenso para la mejora genética del cultivo, al abrir el espacio al cruzamiento interespecífico e intergenérico (Stevenson 1965).

## 7.) Estaciones experimentales de hibridación

Con el objeto de ubicar y contextualizar en el tiempo parte de la labor desarrollada por los mejoradores genéticos del cultivo, seguidamente se anota el inicio del trabajo desarrollado por varias Estaciones Experimentales en materia de cruzamiento e hibridación de la caña de azúcar en el mundo (Flores 2001), la cual ocurrió, como sigue:

1. **Java:** las referencias indican que los primeros estudios se realizaron por Soltwedel en Semarang desde 1882; pasando luego en 1887 a la East Java Experiment Station, ubicada en Pasuruan mejor conocida como Proefstation Oost Java, donde a partir de los primeros cruces interespecíficos entre *S. officinarum* y *S. spontaneum* se dio lugar a los clones **POJ 36** y **POJ 213** en 1893. La historia refiere que en el año 1917 Jeswiet seleccionó empleando el método de la “nobilización” mediante retrocruzas (back-crossing), varios clones del grupo POJ que pronto se posicionaron como materiales comerciales de muy amplia aceptación mundial, como fueron los casos de **POJ 2714**, **POJ 2722**, **POJ 2725**, **POJ 2875**, **POJ 2883** y la que Flores (2001) reconoce y nombra virtud de sus atributos, como la “**campeona mundial POJ 2878**”.
2. **Barbados:** los primeros trabajos de recolección de semilla híbrida generada a partir de cruzamientos naturales por polinización abierta, fueron efectuados por Bovell en el año 1889; a partir de lo cual se obtuvieron dos clones de amplio reconocimiento mundial, como fueron inicialmente la **BH 10-12** (Barbados Hybrid) y la **SC 12-4** seleccionada en la isla Saint Croix en 1912, y más adelante las connotadas **B 43-337**, **B 49-119** y **B 43-62**.
3. **Guyana:** la hibridación desarrollada en Demerara (D) fueron efectuados por Harrison en el año 1889 mediante polinización abierta, destacando en los primeros años algunos clones como **D 74**, **D 109**, **D 145** y **D 1135**, entre otros.
4. **Australia:** el trabajo de hibridación dio inicio en 1890 mediante la selección del clon **Q 813** originado a partir de la variedad Badila (*Saccharum officinarum*) procedente de Nueva Guinea. Posteriormente se fundó el Bureau of Sugar Experiment Stations (BSES), donde se fabricaron clones importantes para la agroindustria mundial, como fueron: **Q 49**, **Q 63**, **Q 68**, **Q 96** y **Q 136**, entre muchas otras. También la Colonial Sugar Refining Co. Ltd, ente de carácter privado, liberó las variedades **Eros**, **Trojan**, **Pindar**, **Ragnar**, etc. y otras variedades nombradas y reconocidas por nombres propios, que fueron seleccionadas para ser cosechadas mecánicamente.

5. **Mauricio o Mauritius:** en este caso fue Perromat el investigador quién en 1891 realizó los primeros trabajos con semilla híbrida producto de la polinización abierta, a partir de lo cual seleccionó variedades como **33P, 55P y 87P**. Fue hasta el año 1931 con la creación de la Sugarcane Research Station conocida actualmente como Mauritius Sugar Industry Research Institute (MSIRI), que se trabajó bajo criterios de mejora modernos. Entre los clones reconocidos de este origen se tiene el **M 147/44**.
  
6. **Hawái, USA:** la hibridación en esta importante estación se inició en el año 1904 utilizando cañas nobles, lo que permitió obtener la variedad **H 109** descendiente de la Lahaina u Otaheite. A partir de 1925 la Estación Experimental perteneciente al Hawaiian Sugar Planters' Association (HSPA) desarrollo actividad liberando clones de amplio uso comercial, como fueron: **H 32-8560, H37-1933, H 44-3098, H 49-5, H 50-7209, H 54-775, H 57-5174 y H 60-8521**, entre muchas otras. Luego del año 1925 esa Estación trabaja con el método de nobilización desarrollado por Jeswiet en Java, en asocio con el empleo de las recién descubiertas soluciones nutritivas asépticas, lo que permitía conservar la vitalidad de los progenitores machos. Adicionalmente diseñaron la técnica del "*melting-pot*" y la siembra de plántulas en grupos o manojos (*bunch-planting*). El aporte de este centro al desarrollo de nuevas técnicas para el progreso de la mejora genética del cultivo fue muy importante. En el año 1997 el HSPA cambia su nombre a Hawaii Agriculture Research Center (HARC). Recientemente la isla cerró el último Ingenio azucarero, con lo da fin a una época de mucha gloria y aporte al desarrollo tecnológico de la caña de azúcar.
  
7. **Cuba:** las actividades iniciaron en el año 1905 en la Central Soledad, ubicada en la Provincia Las Villas. Posteriormente (1914-17) la actividad investigativa se trasladó a la Estación de Santiago de las Vegas y a partir de 1949 a la Estación Jovellanos, situada en la Provincia de Matanzas. Actualmente el trabajo investigativo en el campo genético se desarrolla en el Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA). Clones sobresalientes por sus atributos productivos han destacado comercialmente, como acontece con: **Ja 60-5, Ja 60-19, C 87-51, C 120-78, C 266-14, C 323-68 y My 55-14**, entre muchos otros.
  
8. **Coimbatore, India:** esta connotada y conocida Estación Experimental inicio actividades en el año 1912, para lo cual se abocó al cruzamiento de cañas nobles de *S. officinarum* como la Vellai (Otaheite) con la especie silvestre *S. spontaneum* de la India (64 cromosomas), con lo cual fue posible liberar el clon comercial **Co 205**. Posteriormente se incorporó a la nobilización buscando variabilidad , varias formas de *S. barberi* (Chunne y Kansar) que al cruzarlas con *S. spontaneum* dieron lugar a

los híbridos **Co 213, Co 281, Co 331, Co 290, Co 419**, y las bien reconocidas **Co 421 y Co 997**.

9. **Brasil:** de acuerdo con información proporcionada por el Dr. Djalma Euzébio Simões Neto (comunicación personal, julio 2018), reconocido investigador en el área del mejoramiento genético de la caña de azúcar en Brasil, funcionario de la Universidad Federal Rural del Estado de Pernambuco (UFRPE-RIDESA), las primeras actividades de hibridación en ese país se reportan en el año 1913, las cuales fueron desarrolladas en la Estación experimental de Escada, ubicada en el Estado norteno de Pernambuco, cuyo reconocimiento y producto final operó bajo la sigla EB. Según ese investigador la evolución institucional de actividades en cuanto a mejora genética es la siguiente:

N°	Estado	Estación Experimental	Vigencia	Sigla descriptiva
1	Pernambuco	Escada	1913-1924	EB
2	Río Janeiro	Campos	1916-1972	CB
3	Pernambuco	Barreiros	1924-1933	EB
4	Pernambuco	São Bento - Tapera	1928- ?	SBP
5	Pernambuco	Curado - Recife	1933-1974	(PB) – IANE
6	São Paulo	EECAPO - Piracicaba	1928-1935	
7	São Paulo	IAC - Campinas	1935- +	IAC
8	São Paulo	COPERESTE - Sertãozinho	1963-1969	COP
9	Alagoas	EECA - Rio Largo	1968-1971	
10	São Paulo	COPERSUCAR - Piracicaba	1968- +	SP
11	Nacional	PLANALSUCAR	1971-1990	RB
12	São Paulo	Usina da Barra - Barra Bonita	1975- +	PO
13	Nacional	Universidades Federales (RIDESA)	1990- +	RB

Fuente: Djalma Euzébio Simões Neto (Comunicación personal, julio 2018).

10. **Río Piedras, Puerto Rico:** inicio labores en el campo genético en el año 1913 en Central Fajardo, para luego en 1917 se trasladaron a la Estación Experimental de Mayagüez, donde como resultado del cruzamiento de los híbridos **POJ 2725** con **BH 10-12** y **SC 12-4** se obtuvieron los clones **M 28, M 42** y **MPR 63**. Más adelante se estableció la Estación de Río Piedras, cuyos progenitores fueron reconocidos con la sigla PR como: **PR 980, PR 913 y PR 1000**, entre otras.
11. **Canal Point, Florida:** esta importante y reconocida Estación se creó por parte del USDA en el año 1918 como resultado de los impactos provocados por el mosaico de la caña en Louisiana, afectando la **D 74** y la **Caña Morada**. Esta estación que mejoró significativamente instalaciones, equipamiento y técnicas de cruzamiento, ha

producido a través de los años muy buenas variedades de amplia proyección y uso comercial, como son entre otras: **CP 57-603, CP 70-1284, CP 72-1210, CP 72-2086.**

12. **Natal, Sudáfrica:** La Estación Experimental de la Asociación de Azucareros de Sud África inició actividades de trabajo genético en el año 1929. En un principio operó recibiendo semilla híbrida sexual (fuzz) proveniente de Mauritius y la India (Coimbatore), la cual era sembrada en la localidad de Edgecombe, Natal. De ese material genético adquirido y procedente de la India, se logró liberar la sobresaliente **NCo 310**, considerada luego de la **POJ 2878**, las dos variedades de caña de mayor distribución mundial. El clon **NCo 376** procede del mismo origen y es también aún hoy día muy utilizado. En 1950 se inició el trabajo de hibridación mediante inducción de floración en el lugar.
13. **Colombia:** señalan Cassalet y Ranjel (1995) que el mejoramiento genético en Colombia es reciente, pues en la década de los años treinta la investigación se basó en ensayos agronómicos evaluando básicamente clones importados. El programa de cruzamientos y selección de variedades inició en 1938 en la Estación Experimental de Palmira, con énfasis en la hibridación de cañas nobles de *S. officinarum* y de la especie silvestre *S. spontaneum*. Los primeros clones se identificaron con la sigla **EPC** (Estación Experimental Palmira Colombia).
14. **México:** la Estación donde inició la labor de hibridación de la caña en este país fue establecida de acuerdo con Flores (2001) en Rosario Izapa, Estado de Chiapas, en el año 1951; aunque se indica por parte del mismo autor, que los trabajos para el mejoramiento sistemático del cultivo fueron iniciadas en 1943 por parte de la Secretaría de Agricultura y Fomento (SAF), a partir de germoplasma donado procedente de la Estación Experimental de Canal Point (USA), que fue sembrada en el Ingenio El Potrero, Veracruz.
15. **Louisiana, USA:** los estudios iniciales se reportan en la Universidad Estatal en el año 1950, empleando la floración de los progenitores empleados en los cruzamientos mediante control del fotoperiodo en condiciones controladas de invernadero. De esta Estación se seleccionaron, liberaron y proyectaron comercialmente variedades importantes como fueron **L 60-14** y **L 60-125**, entre muchas otras.
16. **Houma y Baton Rouge (Louisiana) y Weslaco (Texas), USA:** reciben semilla sexual (fuzz) de Canal Point y realizan el proceso de selección en el lugar a partir de lo cual producen híbridos de las siglas **HoCP, LCP** y **TCP**.

17. **Guatemala:** de acuerdo con información proporcionada por el Dr. Héctor Orozco Vásquez (comunicación personal, julio 2018), destacado mejorador genético del Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA), la primera hibridación en ese país se realizó en la campaña del periodo 1992-1993 en la Estación Experimental Camantulul de CENGICAÑA, y fue bajo condiciones de faroles puestos en el lugar en donde estaba sembrada la Colección Nacional. Esta primera campaña dio origen a las variedades sigla **CG** de la serie 95 de las cuales ninguna llegó a ser comercial.
  
18. **Ecuador:** información proporcionada por parte del Dr. Raúl O. Castillo (comunicación personal, julio 2018), Director General del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador (CINCAE), revela que ese centro realizó cruzamientos sin buenos resultados desde 1999, basados en floración natural de las variedades introducidas. Fue a partir del año 2003 cuando se iniciaron los trabajos de inducción de floración en forma efectiva, usando la casa de fotoperiodo. A partir del año 2008, el 90% de las semillas empleada en las evaluaciones proviene de sus cruzamientos y desde el 2012 el 100% de semilla que evalúan en el proceso de selección se obtiene de sus trabajos nacionales de hibridación. Concluye y asegura en torno al tema, que los cruzamientos efectivos se iniciaron en el año 2002; pues en casi todas las pruebas realizadas entre 1999 y el 2001 no se obtuvo semilla de buena calidad.
  
19. **Costa Rica:** De acuerdo con lo señalado por Chaves y Bermudez (2012) y Chaves (2016), el programa de mejora genética siguiendo la vía sexual y no la asexual mediante introducción de clones del exterior, inicio formalmente a partir de 1982 con la creación de la **Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA)**, lo que operó por varios años mediante la adquisición de semilla verdadera (fuzz) por donación de países amigos. Señala Chaves (2017) al respecto, que *“Luego de 1983 se procede con la importación de semilla sexual o verdadera (fuzz) procedente de México, Barbados y dos Estaciones de Brasil. Se importaban 10 g de semilla por cruce y de 10 a 20 cruces de cada estación por año.”* Fue sin embargo en el año 1998, cuando se realizaron las primeras pruebas formales de hibridación en el país, los cuales culminaron con los cruzamientos dirigidos de clones de interés agroindustrial con fundamento en su antecedente productivo, lo que se fortaleció luego del año 2000 (Durán y Alfaro 2015). Los clones nacionales fueron nombrados y reconocidos tanto nacional como internacionalmente por medio de la sigla **LAICA**, en reconocimiento a la institución que los generó como fue la **Liga Agrícola**

**Industrial de la Caña de Azúcar.** No se utilizó la sigla CR (Costa Rica) como se pudiera pensar, en consideración de que ya aplicaba en República Dominicana.

En torno al mismo asunto y revalidando la necesidad de buscar autonomía y clones de origen propio, aseguran Durán y Oviedo (2015), que *“Si bien es cierto que con la importación de variedades de caña de azúcar del extranjero, se han venido cubriendo las necesidades de nuevas variedades que se tienen en las regiones, es muy importante contar en este campo con una alternativa propia, independiente, que permita buscar nuestras propias variedades, ya que con los derechos de propiedad intelectual, día con día se ha ido dificultando o encareciendo la adquisición de nuevos materiales. Otra consideración importante de señalar dentro de esta justificación, es el hecho de que en Costa Rica a diferencia de muchos países, la caña de azúcar se cultiva en una diversidad muy grande de ambientes, lo que hace aún más difícil encontrar soluciones varietales únicamente partiendo de variedades importadas.*

*Por este motivo en el año 1998 se pensó en la conveniencia de realizar cruzamientos en nuestro país, que permitieran obtener la semilla sexual requerida por el programa, para llevar adelante esta línea de selección y aumentar a la vez la producción de clones LAICA. Fue así como los primeros cruzamientos de caña de azúcar en Costa Rica se realizaron en el año 1998 y ya para el año 2000, la cantidad de cruces realizados permitió sembrar únicamente semilla sexual nacional, labor que se ha mantenido así hasta la fecha en que nos encontramos. Del año 2000 para acá se han incrementado el número de cruces a realizar por año o campaña de cruzamiento, trabajando con cruces biparentales como con poli cruces, además, se han incorporado en este trabajo una mayor cantidad de variedades, tanto comerciales como promisorias, con la finalidad de ampliar un poco más la diversidad genética”.*



En el Cuadro 3 se expone una secuencia histórica para diferentes países referentes en la materia genética, organizados según año de inicio de las actividades de cruzamiento e hibridación de clones de caña de azúcar.

**Cuadro 3.**  
**Evolución mundial del mejoramiento genético de la caña de azúcar según país y año aproximado de inicio de las actividades de cruzamiento e hibridación.**

País	Año
Java	1882
Barbados	1889
Guyana	1889
Isla de Reunión, Francia	1889
Australia	1890
Mauricio, Gran Bretaña	1891
Hawái, USA	1904
Cuba	1905
Coimbatore, India	1912
Brasil	1913
Río Piedras, Puerto Rico	1913
Canal Point, Florida, USA	1918
Natal, Sudáfrica	1929
Brasil, IAC	1935
Colombia	1938
México	1943
Louisiana, USA	1950
Houma y Baton Rouge (Louisiana) y Weslaco (Texas), USA	
Brasil, Copersucar	1968
Brasil, PLANALSUCAR/RIDESA	1970
Guatemala	1992
Costa Rica	1998
Ecuador	2002
Brasil, Canaviales	2003
Brasil/Canaviales/MONSANTO	2008

Fuente: elaborado por el autor con información variada.

### 8.) ¿Por qué se deterioran las variedades?

Como se comentó al inicio todos los seres vivos y en este particular los clones de caña de azúcar, pasan por un periodo natural de **surgimiento, crecimiento, máxima expresión, declinación y salida** como materiales de interés para uso comercial. Por este motivo, algunos de los aspectos primordiales sobre los que trabajan los programas de mejora genética en el mundo son los de procurar acortar el periodo de estudio y surgimiento,

manifestado con la liberación de un clon promisorio para uso comercial, luego acelerar y dinamizar su etapa de crecimiento, aceptación y siembra por parte de los agricultores; como también, prolongar al máximo su empleo comercial para finalmente tratar de extender su fase de deterioro y declinación como opción de siembra. Todo ese proceso se concibe pragmáticamente como **“vida comercial económica de una variedad”**.

La **declinación varietal** es un concepto importante, real y complejo que sucede en el campo, que ha sido calificado por Chaves *et al* (1982, 1995, 1998) y Chaves (2006ac) como un **“Síndrome”**, describiéndola como *“...un proceso caracterizado por una lenta, progresiva y marcada reducción de los rendimientos agrícolas (TMC/ha), hasta el punto de volver antieconómico el cultivo y la permanencia de una variedad luego de acontecidos varios cortes o cosechas sucesivas.”* Señala ese mismo autor sobre el tópico, que *“...dicho Síndrome es ocasionado por la presencia de agentes bióticos y abióticos que operando de manera por lo general simultánea y en grado variable, ocasionan el problema de declinación productiva paulatina y sistemática de las plantaciones comerciales. Entre los posibles agentes causales cita los siguientes:*

- 1. Deterioro sistemático de la fertilidad de los suelos.*
- 2. Desarrollo paulatino de un estado físico desfavorable del suelo.*
- 3. Efecto acumulativo de las plagas y las enfermedades.*
- 4. Presencia de enfermedades carentes de síntomas y signos externos que las evidencien, o que pudieran no haber sido aún identificadas.*
- 5. Cosechas muy tempranas de la planta sin respetar su ciclo vegetativo.*
- 6. Desconocimiento del ciclo natural de maduración de la variedad, entre otros.”*

A lo anterior habría hoy que agregar otros elementos que operan también como inductores, promotores y favorecedores de ese deterioro, entre los que están los siguientes:

1. Afectación por factores climáticos extremos: *sequía, inundación, estrés térmico, viento*, etc.
2. Manejo y atención agronómica deficiente manifestada en control de malezas, nutrición, uso de equipo mecánico, etc.
3. No renovación oportuna y satisfactoria de plantaciones deficientes.
4. Uso de semilla de baja calidad y baja pureza genética.
5. Deficiente preparación del terreno para la siembra.
6. Exceso de mecanización.

## 7. Uso desproporcionado e incorrecto de agroquímicos en particular madurantes químicos.

Lo acontecido en Costa Rica con la variedad **SP 71-5574** en el año 2007 fue muy revelador, al ser severamente atacadas las plantaciones comerciales de manera imprevista y destructiva por la Roya Naranja (*Puccinia kuehnii*) en la zona de Pérez Zeledón. Este fue un triste pero buen ejemplo de lo que puede acontecer con cualquier variedad comercial de caña en un periodo de tiempo corto y limitado. Dicha variedad fue arrasada y prácticamente sacada del plano comercial en el país en un término de tiempo muy corto. El caso fue realmente dramático y ejemplarizante por concurrir e intermediar varios elementos no previstos, como fueron: 1) el clon podía calificarse como el mejor en términos de concentración de sacarosa, con rendimientos promedio arriba de 123 kg/t caña, 2) dominaba el área de cultivo de la región con una siembra local superior al 97%, 3) la enfermedad no había sido reportada como presente en el país ni en el Continente Americano, excepto algunos reportes no confirmados de su posible presencia no confirmada en Florida, USA, 4) la región afectada era la más pequeña del país en cuanto a área sembrada y 5) la zona se ubica en una localidad aislada y alejada del resto del área cañera costarricense (Barrantes y Chavarría 2007, 2010; Chaves 2008abc, 2012; COMISIÓN PARA LA VIGILANCIA DE PLAGAS Y REACTIVACIÓN DE LA ACTIVIDAD CAÑERA DE LA REGIÓN SUR 2008; Chavarría y Barrantes 2009; Chavarría *et al* 2016).

Como se indicó, nada hacía presagiar ni remotamente la posible ocurrencia de una situación fitosanitaria como la acontecida en el lugar, lo que demuestra la sensibilidad de la caña de azúcar al impacto desequilibrante de los factores bióticos detrimentales, principalmente los atribuidos a plagas y enfermedades, sobre lo cual se deben tener siempre dispuestas y disponibles otras opciones de cultivo emergentes para enfrentar y contrarrestar cualquier impacto. Resulta válido reconocer que ningún clon está exento de padecer deterioro y afectación por causas naturales, pues es parte de su misma naturaleza biológica.

## 9.) Biotipo comercial ideal de caña

El trabajo científico de los mejoradores genéticos tiene muy clara y definida la meta procurada alcanzar ojalá en el menor tiempo y con la mayor consistencia posible, cual es fabricar y liberar para uso comercial materiales genéticos que satisfagan los requerimientos básicos y fundamentales que cualquier clon de caña debe mantener, lo cual viene asociado a propiedades ligadas con rusticidad, adaptabilidad, fitosanidad, características agronómicas deseables, maduración homogénea y consistente, rendimientos agroindustriales altos y sostenibles, entre otros (Chaves 2006b, 2015, 2016).

Como se ha comentado en el presente documento, las características genéticas como es el caso de la poliploidia de la caña y la posibilidad de incorporar variabilidad mediante el empleo de cruces interespecíficos e intergenéricos, resulta ser una ventaja pero a la vez una dificultad, lo cual forma parte del trabajo del mejorador. No hay duda en reconocer que la caña de azúcar es una planta genéticamente muy compleja. Algunos investigadores como Ming *et al* (2006) y Le Cunff *et al* (2008), reconocen que los cultivares modernos de caña, exhiben alrededor del 70-80% de sus cromosomas enteramente derivados de *S. officinarum*, de 10-20% proveniente de *S. spontaneum* y muy pocas cromosomas producto de la recombinación interespecífica.

Como ha sido señalado y demostrado por muchos investigadores, la base genética de los híbridos comerciales actuales de caña de azúcar es muy limitada, lo que obliga enfatizar en la necesidad de ampliarla y aumentarla para incorporar nuevos y significativos avances en la mejora del cultivo.

En un intento teórico por procurar identificar y tipificar el biotipo ideal y deseable de la caña de azúcar que todo productor anhela tener sembrada en el campo, Chaves (1995a), definió un total de 38 asuntos anatómicos, fisiológicos, metabólicos y productivos que deberían estar contenidos, integrados y ser expresados por dicho clon, entre los que cita de manera sucinta y genérica los siguientes:

- 1) Poseer gran capacidad de adaptación (rusticidad).
- 2) Estar dotado de un sistema radicular con gran capacidad exploratoria en el suelo.
- 3) Tener un ángulo de inserción de las hojas en el tallo de 45° que optimice la captación de luz.
- 4) Tamaño de yema vegetativa pequeña para evitar daño físico y pérdida de poder germinativo.
- 5) Disponer de una buena capacidad de germinación (superior al 90%).
- 6) Excelente capacidad de retoñamiento en ciclos (socas) sucesivos.
- 7) Ahijamiento óptimo que permita obviar el efecto de competencia y que asegure altas poblaciones de tallos.
- 8) Poseer tasa de crecimiento rápida que reduzca efectos competitivos por malezas.
- 9) Alta vigorosidad en el ritmo general de desarrollo de la plantación.
- 10) Cepa vigorosa y estructuralmente bien conformada.
- 11) Tolerante a la mecanización en todas las fases de cultivo.
- 12) Población de tallos persistente y estable hasta cosecha, siendo ideal una población superior a 100 mil tallos industrializables por hectárea (15 tallos/metro a 1,5 m).
- 13) Evitar producción de hijos (mamones) en etapa próxima a cosecha.
- 14) Tallos industrializables largos mayores a 1,80 metros, con entrenudos de aproximadamente 16 cm.

- 15) Tallos de grosor adecuado no excesivo con diámetros entre 3,0 y 3,5 cm.
- 16) Tipo de crecimiento (erecto, reclinado y/o postrado) adaptado a la localidad de cultivo (alta-media-baja en msnm), y condición particular de producción y cosecha utilizada (manual-mecánico).
- 17) Sección del cogollo (palmito) corta y poco voluminosa.
- 18) Tallos flexibles que eviten volcamiento “*acame*” y problemas con quebraduras.
- 19) Ausencia total de características negativas para la calidad, como son: rajaduras, ahuecamiento, tallos deformes, raíces adventicias, yemas laterales (lalas) germinadas, entre otras.
- 20) Poseer un alto despaje.
- 21) Preferiblemente con ausencia de floración.
- 22) Vainas sin presencia de pelos urticantes.
- 23) Planta sea por naturaleza de bajos requerimientos nutricionales.
- 24) Tolerante y selectiva al efecto de los plaguicidas, principalmente herbicidas.
- 25) Planta de porte alto y hojas verticales para reducir el distanciamiento entre surcos.
- 26) Población de tallos adaptable a manejo tecnológico, aceptando prácticas asociadas a paso de maquinaria, uso de agroquímicos, etc.
- 27) Ideal que muestre capacidad de fijación simbiótica de Nitrógeno.
- 28) Apariencia general del cultivo, dado por varios atributos, agradable a la vista.
- 29) Tallos de fácil corta, acomodo, carga y transporte al Ingenio.
- 30) Fitosanidad debe ser total, sin decoloraciones ni afecciones de ningún tipo.
- 31) De ciclo vegetativo preferiblemente corto, no superior a 13 meses.
- 32) De maduración natural homogénea (uniforme), de duración temprana e intermedia según condición y características del lugar. Concentración de sacarosa se mantenga alta y estable el mayor tiempo posible durante la zafra.
- 33) Calidad de los jugos mantenga estabilidad ante influencia de lluvias significativas de alta intensidad y persistentes.
- 34) Tonelaje de caña elevado con productividades no inferiores a 90 toneladas/ha.
- 35) Mantener sostenibilidad productiva en cosechas sucesivas y una vida y uso comercial prolongado, no menor a siete cosechas consecutivas rentables.
- 36) Bajo grado de deterioro (inversión) de los jugos luego de realizada la cosecha. Estable entre el periodo cosecha-molienda.
- 37) Tener buena cantidad de jugos clarificables (refractarios), contenido de fibra aceptable (13,5-14,5%), alta sacarosa en caña (+13%), purezas elevadas (+87%) y baja producción de miel final (<30 kg/t).
- 38) Alta producción de azúcar por unidad de área que no debe ser inferior a 12 toneladas/ha.

En el documento original Chaves (1995a) amplía en aportar razones y justificar juicios de valor en torno a esos atributos, expresando con objetividad como corolario, que *“Como se comprenderá es bastante difícil por no decir imposible, identificar una variedad para uso comercial que reúna todas las características y propiedades anotadas, razón por la cual el Programa Nacional de Mejoramiento Genético y los técnicos que lo desarrollan, se esmeran y proyectan a tratar de optimizar muchas de ellas que tipifiquen entonces lo que conocemos como una buena variedad.”*

Hay coincidencia mundial en reconocer que las mejores variedades comerciales de caña de azúcar, son aquellas que generan los mayores rendimientos agroindustriales y réditos económicos en relación con el costo, el tiempo y el esfuerzo administrativo y productivo implicado.

## **10.) Genoma de la caña de azúcar**

Muy recientemente fue informado y replicado mundialmente un sonado logro genético de enorme importancia y trascendencia para el futuro del cultivo de la caña de azúcar, el cual indudablemente en poco tiempo permitirá avances enormes al poder direccionar y orientar el trabajo de los mejoradores genéticos de la planta (Chilebio 2018). La noticia cliché fue *“Logran secuenciar el complejo genoma de la caña de azúcar”*, informando al respecto, que *“La caña de azúcar fue la última planta cultivada importante en tener su genoma secuenciado. Esto fue debido a su enorme complejidad: el genoma comprende entre 10 y 12 copias de cada cromosoma, mientras que el genoma humano tiene solo dos copias por cada cromosoma.”*

El reconocimiento de tal hito histórico es atribuido a un connotado y calificado grupo internacional de especialistas en la materia, el cual fue coordinado por el CIRAD de Francia (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement o Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo), tal como fue informado en la revista *Nature Communications* apenas el pasado 6 de julio del 2018 (Garsmeur *et al* 2018) y reiterado en CIRAD (2018).

Consideran los investigadores que el genoma de la caña de azúcar es mucho más complejo que el del sorgo, lo que se atribuye a varias consideraciones, como:

- Posee alta poliploidia (gran cantidad de copias de cada categoría de cromosomas).
- Posee aneuploidía (número variable de copias según sea la categoría del cromosoma).
- Por el origen bioespecífico de los cromosomas.
- Presencia de diferencias estructurales y cromosómicas interespecíficas recombinantes.

El trabajo implicó tener que adecuar y ajustar las técnicas convencionales de secuenciación existentes, pues resultaban insuficientes. El estudio proyectó lo que tiempo atrás el CIRAD tenía por investigado y demostrado, al reconocer la similitud y *“colinealidad”* que existía entre los genomas del sorgo y la caña de azúcar, lo que implicaba y aportaba un alto grado de paralelismo entre genes ubicados en un mismo orden. Con ese principio, se empleó el genoma del sorgo como plantilla para ensamblar y seleccionar los fragmentos de interés del genoma de la caña para poder secuenciar, para lo cual se utilizó como material vegetal el clon originado en la isla de Reunión sigla R 570.

La técnica validada permitirá secuenciar la totalidad del genoma de la caña y con ello revelar las variaciones que pudieran existir entre las diversas variedades. De acuerdo con los investigadores involucrados *“tener una secuencia de referencia para una especie cambia radicalmente todos los enfoques genómicos y genéticamente más amplios para esa especie.”* El logro permitirá ahora a los mejoradores de la caña profundizar en la biología molecular, con lo cual las pruebas de investigación de campo se pueden desarrollar de manera complementaria con las de detección molecular, con lo que *“este nuevo conocimiento genético servirá para crear nuevas variedades para una gama más amplia de usos”*.

De su investigación Garsmeur y compañeros (2018) expresaron, lo siguiente *“La caña de azúcar (Saccharum spp.) Es un cultivo importante para la producción de azúcar y bioenergía. Su genoma altamente poliploide, aneuploide, heterocigótico e interespecífico presenta grandes desafíos para producir una secuencia de referencia. Explotamos la colinealidad con sorgo para producir una secuencia del genoma monoploide basado en BAC de la caña de azúcar. Se seleccionó un camino de mosaico mínimo de 4660 BAC de caña de azúcar que cubre mejor la parte rica en genes del genoma de sorgo en base a la creación de perfiles de genoma completo, secuenciado y ensamblado en una ruta de embaldosado único de 382 Mb de una secuencia de alta calidad. Se pronostica un total de 25,316 modelos de genes que codifican proteínas, el 17% de los cuales no muestran colinealidad con sus ortólogos de sorgo. Mostramos que las dos especies, S. officinarum y S. spontaneum, involucradas en cultivares modernos difieren por sus elementos transponibles y por algunos grandes reordenamientos cromosómicos, que explican su distinto tamaño del genoma y distintos números cromosómicos básicos al tiempo que sugieren que la poliploidización surgió en ambos linajes después de su divergencia.”*

De manera coincidente, un selecto grupo de investigadores del Centro de Biología Molecular e Ingeniería Genética (CBMEG) y la Universidad de Campinas (UNICAMP) de Brasil, publicaron en la Revista Frontiers Plant Science N° 28 de marzo 2018 (Mancini *et al* 2018), el artículo *“Targeted Sequencing by Gene Synteny,” a New Strategy for Polyploid Species: Sequencing and Physical Structure of a Complex Sugarcane Region”*. El objetivo del

estudio fue obtener secuencias de genes de la caña que fueran de interés económico. Revelan en el mismo que lograron identificar en que secciones del código genético de la variedad de caña SP 80-3280 están situados los fragmentos de genes responsables por la producción de azúcar. Señalan al respecto que *“La estrategia utilizada para el descubrimiento, además de abrir puertas para mejoras y modificaciones genéticas que aumenten la capacidad de la caña para producir sacarosa, también puede ser empleada para crear variedades de caña resistentes a plagas.”* Reconocen y ratifican asimismo esos investigadores lo expresado por otros grupos de trabajo similares, respecto a la complejidad del ADN de la caña de azúcar, lo que indudablemente ha limitado y dificultado alcanzar logros con la agilidad de otras plantas.

Estos importantes y trascendentes avances de secuenciación del genoma de la caña de azúcar, vienen a sumarse a las 33 especies de la familia de las gramíneas que ya se han codificado, entre las que están algunas de gran importancia económica y alimentaria, como son el maíz, el sorgo, el arroz, el trigo y la cebada, entre otros.

#### **11.) Bancos de Germoplasma**

Los denominados Bancos de Germoplasma o colecciones de variedades son necesarios y muy importantes en la mejora genética de la caña de azúcar, en consideración de que los programas de cruzamiento e hibridación tienen un vínculo y dependencia directa de ellos, por tener accesible y disponible el germoplasma (progenitores) requerido para realizar esa labor. No hay duda en afirmar que el éxito de un programa de mejoramiento de plantas, está supeditado a la calidad de la base genética contenida en los progenitores que se tengan disponibles. Un Banco de Germoplasma no debe confundirse con un simple *“jardín de variedades”*, pues es más complejo que eso, ya que mantienen genética y potencialmente los materiales debidamente caracterizados, conformando una reserva de material genético sobresaliente y valioso para ser utilizado en la fabricación de nuevas variedades.

Como principio fundamental, se debe considerar que los bancos al operar como colecciones de materiales de interés por sus características y atributos, operan como fuentes de variabilidad genética, cuya utilización y aprovechamiento permiten obtener variedades nuevas dotadas con mejores características agronómicas, mayor tolerancia o resistencia a las principales plagas y enfermedades, agroindustrialmente más productivas al generar más tonelaje de materia prima, mayor concentración y estabilidad de sacarosa y consecuentemente más productividad de azúcar por unidad de área (t/ha).

La composición de los bancos o colecciones es muy variable en cuanto a cantidad, diversidad y calidad de los materiales genéticos contenidos, en consideración de las capacidades, recursos disponibles y requerimientos de los programas de mejora vinculados. Por lo general, en cuanto a contenido genético se considera germoplasma básico, el

perteneciente al género *Saccharum* y géneros afines, como también el de híbridos del género *Saccharum* spp. Su composición depende y nutre de las introducciones que se hagan a partir de: a) expediciones internacionales de colecta a lugares de reconocida diversidad y origen del cultivo, como son por ejemplo Nueva Guinea, el archipiélago de Indonesia, la India, islas Fiji, Tailandia, Filipinas y Taiwán, entre otros, b) intercambio entre países, c) prospecciones nacionales y d) trabajos de mejora nacional, entre otros.

La mayor recolección y base genética del cultivo se encuentra confinada en la **“Colección mundial de la caña de azúcar”**, ubicada y replicada en dos localidades y continentes: 1) Canal Point, Florida, USA y 2) Cannanore, la India. Sobre la primera, informan Ming *et al* (2006) que está compuesta de 1.394 accesiones entre especies de caña y otras gramíneas asociadas, distribuidos como sigue: *Saccharum officinarum* (397), *S. spontaneum* (348), *Saccharum* spp (229), *S. robustum* (85), *S. barberi* (58), *S. sinense* (42), híbridos comerciales (193), *Erianthus* (23), *Miscanthus* (18) y *Narenga* (1).

Por su parte, citan Moore *et al* (2014), que en el 2010 habían para en la colección norteamericana en las especies *S. officinarum* un total de 748 accesiones, para *S. spontaneum* 635, *S. robustum* 128, *S. barberi* 57, *S. sinense* 61, *S. edule* 22 y de *Erianthus* 282, para un total de 1.933 accesiones. En el caso de la India eran respectivamente: 764, 598, 145, 43, 29 y 16 por un total de 1.595 materiales genéticos; no reportando accesiones de *Erianthus*.

Es por lo general común que los países azucareros que cuentan con mayor tradición, desarrollo tecnológico y recursos, que disponen además de estaciones experimentales, cuenten con colecciones propias para sustentar y operar sus Programas de Mejoramiento Genético orientados al desarrollo de sus propias variedades. El INICA (2003) de Cuba, hace un recuento internacional en relación con el número total de accesiones o variedades disponibles, informando que Fiji reporta 6.000 accesiones, Estados Unidos 5.020, Australia 4.020 materiales, India 3.979, Brasil 3.736, Cuba 3.386 y Barbados un total de 2.567.

La colección de un Banco de Germoplasma bien concebido esta por lo general contenido de forma amplia y muy variable, como ejemplo se anota el reportado para el caso de Cuba por Pérez *et al* (1997):

1) Formas originales:

1.1) Formas de las especies del género *Saccharum*: *officinarum*, *spontaneum*, *sinense*, *robustum*, *barberi*.

1.2) Formas de géneros afines: *Erianthus arundinaceus*, *Erianthus sara*, *Erianthus maximus*, *Erianthus elegans*, *Miscanthus* spp, *Arundo donex*.

2) Híbridos en diferentes estadios de avance generacional:

F1 intergenérico (*Saccharum*, *Sorghum*, *Miscanthus*, *Pennisetum*, *Bambusa*).

F1 de *S. spontaneum* x *S. officinarum*.

F1 de *S. spontaneum* x híbrido comercial.

F1 de *S. robustum* x *S. officinarum*.

F1 de *S. robustum* x híbrido comercial.

F1 de *S. barberi* x *S. officinarum*.

F1 de *S. sinense* x *S. officinarum*.

F1 de *S. sinense* x híbrido comercial.

F2 de *S. spontaneum* x *S. officinarum*.

F2 de *S. robustum* x *S. officinarum*.

F2 de *S. sinense* x *S. officinarum*.

F2 tri específico (*S. officinarum*, *S. robustum*, *S. spontaneum*).

BC1 intergenérico de *Bambusa* x *S. officinarum*.

BC1 *S. spontaneum* x *S. officinarum*.

BC1 *S. spontaneum* x híbrido comercial.

BC1 *S. sinense* x *S. officinarum*.

BC1 *S. sinense* x híbrido comercial.

BC1 *S. robustum* x *S. officinarum*.

BC1 *S. robustum* x híbrido comercial.

BC1 tri específico (*S. spontaneum*, *S. officinarum*, *S. robustum*).

Híbridos naturales.

3) Híbridos comerciales:

Híbridos comerciales.

Híbridos de origen desconocido.

En el caso de Costa Rica se cuenta con un Banco de Germoplasma de caña sembrado en terrenos de la Universidad Técnica Nacional (UTN), ubicada en Cañas, provincia de Guanacaste, a 10 msnm, clima seco con régimen Ústico y terrenos francos del orden

Inceptisol. Cuenta con un total aproximado de 1.049 materiales genéticos correspondiente básicamente a híbridos comerciales de diferente origen (sigla descriptiva), año, naturaleza y características agronómicas y agroindustriales, que son empleados en el trabajo de hibridación que da lugar a los híbridos sigla LAICA nacionales. Dichos clones provienen de 4 continentes, 28 países y pertenecen a 75 siglas descriptivas diferentes, lo que denota gran variabilidad (Angulo *et al* 1999; Chaves 2013). Cita y actualiza Durán (2018) informando, que dicho banco está compuesto actualmente de 1.049 materiales genéticos.



## 12.) Futuro de la mejora genética: *¿hacia dónde vamos?*

Incuestionablemente el futuro es incierto y fortuito, pero en materia de genética de variedades pareciera que en una alta probabilidad es predecible en cuanto a lo que puede acontecer a mediano plazo y, por proyección, definir y construir el camino que debe seguirse para procurar atenuar, mitigar, corregir y redireccionar el trabajo de mejora de la planta de caña hacia derroteros correctos.

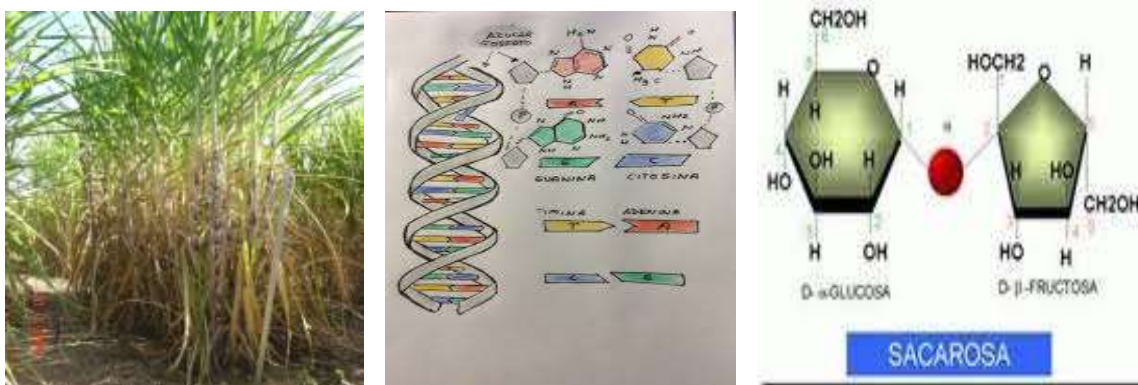
Es conocido que la modificación permanente de las plantas desde el periodo Neolítico es el que le ha permitido a la humanidad aumentar la producción y mejorar la calidad de los alimentos a lo largo de la historia. Como también aceptado de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), que en los próximos 50 años se tendrá que producir más alimentos, incrementando la producción, se estima, en un 70% para lograr abastecer la población mundial en el año 2050. El reto de mejora es grande y la caña forma también parte importante de esa expectativa, no apenas por el azúcar, la melaza y sus derivados; sino también por el enorme potencial energético que posee, lo cual amerita y justifica provocar avances en varias direcciones.

El trabajo científico en materia de genética de variedades de caña de azúcar no es excepción, pues deberá concentrarse en procurar entender los mecanismos evolutivos de la planta que permitan identificar, seleccionar, incorporar y exaltar las características sobresalientes de su genoma que influyen en mejoras de todo tipo, desde características asociadas a la rusticidad y la adaptabilidad a condiciones adversas inductoras de estados severos de estrés provocados por factores incidentes en la actualidad, como son sequía, excesos de humedad, suelos ácidos o con sales, tolerancia a plagas, enfermedades, compactación de suelos; también adaptabilidad de la planta a la cosecha mecanizada en verde, hasta una mejora incremental en términos de la calidad de la materia prima manifestada por un mayor tonelaje de caña (t/ha) y mayor concentración de sacarosa recuperable (kg/t caña) en los tallos de la planta.

La alta variabilidad e intensidad de los fenómenos climáticos, las exigencias comerciales, ambientales y sociales, obligan actualmente a modificar las estrategias seguidas para la producción agrícola eco eficiente, rentable y competitivo. En este sentido, urge la necesidad de contar con plantas resistentes y adaptadas a fin de que los efectos del cambio climático tengan el menor impacto posible. Antes, muchos de estos cambios en las variedades vegetales se conseguían de forma intuitiva. Ahora, gracias a los dinámicos y profundos avances de la investigación científica en el campo genético y azucarero mundial, existen diferentes técnicas de mejora más precisas con incorporación de la Biotecnología, como acontece con la selección asistida por marcadores moleculares o la transgenia, que es una de las últimas técnicas que se ha incorporado en la mejora de plantas. Uno de los retos de futuro fundamentales de la agroingeniería, es fabricar variedades de plantas más ecoeficientes con el objeto de aumentar la producción sin incrementar los recursos de espacio, consumo de agua y uso de agroquímicos invertidos al cultivarlas, todo en un contexto de cambio climático y de contexto comercial que dificultará la labor (Chaves 2017).

Por lo general, cuando se habla de Biotecnología todo se direcciona hacia los cultivos transgénicos como algo que rompe moldes y resuelve problemas graves, lo cual es parcialmente cierto. En realidad, la modificación genética selectiva de cultivos con el uso de procesos biotecnológicos es sólo una de las muchas técnicas usadas a lo largo de la historia de la agricultura para mejorar las variedades. La gran diferencia es que lo que antes se hacía a base de prueba y error, ahora se puede hacer de forma direccionada y controlada modificando sólo aquello que se quiere modificar. A futuro el país y la agroindustria azucarera deberán debatir y tomar posición en torno al empleo comercial de las plantas transgénicas de caña de azúcar; por ahora, los enfoques deben trabajar en procurar obtener el biotipo de planta requerido para enfrentar las exigencias impuestas por los entornos productivos y los mercados comerciales.

Con una visión objetiva y prospectiva de futuro, Chaves (2016, 2017) planteo con carácter de retos y desafíos sectoriales, institucionales y tecnológicos, como se anota en el Cuadro 4, varias demandas vinculadas a condiciones de estrés, adaptabilidad y productividad, concebidas en tópicos específicos como el ambiental, de insumos y recursos y también de manejo agronómico; que estima, deben atenderse de inmediato y procurar resolverse en el muy corto plazo, virtud de su imperiosa necesidad e impacto productivo y ecológico implicados. Los centros e instituciones de investigación deberán incorporar y desarrollar próximamente estudios en esa dirección.



**Cuadro 4.**

**Desafíos tecnológicos necesarios resolver y satisfacer en el cultivo de la caña de azúcar.**

Ambientales	Insumos y recursos	Manejo agronómico
Tolerancia a la sequía	Ahorro y uso eficiente del agua	Clones para abrir zafra
Tolerancia al exceso de humedad	Maximizar el potencial genético intrínseco	Clones para media zafra
Tolerancia al choque térmico	Optimizar las necesidades nutricionales	Clones para cerrar zafra
Tolerancia a la acidez del suelo	Maximizar la concentración de sacarosa en los tallos	Clones para suelos pesados
Tolerancia a plagas y enfermedades	Asegurar homogeneidad productiva	Clones de alto despaje para cosecha mecanizada en verde
Tolerancia a herbicidas	Asegurar eficiencia agroindustrial con el empleo de bajos requerimientos de insumos	Vida comercial prolongada y sostenida
Alta eficiencia fotosintética	Control de floración	Simbiosis con bacterias fijadoras de Nitrógeno

Fuente: Adaptado de Chaves (2016).

### 13.) Conclusiones

A partir de la analizado y comentado puede inferirse y concluirse lo siguiente:

- 1) El instrumento genético constituye y representa sin lugar a dudas la herramienta más efectiva para atender y satisfacer con éxito las necesidades alimentarias futuras, y resolver muchos de los problemas que prevalecen actualmente y limitan la producción agropecuaria.
- 2) La capacidad combinatoria y de variabilidad de la caña de azúcar pareciera en principio ser muy alta, interpretación basada en su poliploidia y sus atributos genéticos particulares; sin embargo, la realidad ha revelado una alta consanguinidad que mantiene una condición de endogamia, que debe ser superada introduciendo nuevas fuentes de variabilidad genética.
- 3) Los cruzamientos interespecíficos e intergenéricos han sido importantes para introducir caracteres de valor para el acondicionamiento productivo comercial del cultivo.
- 4) No hay duda que la especie *Saccharum officinarum* ha sido la más importante en aportar características asociadas a los fines comerciales que se buscan en la planta, ligadas al contenido de sacarosa y calidad de jugos; mientras que *Saccharum spontaneum* ha incorporado rusticidad, adaptación y resistencia/tolerancia fitosanitaria al ataque y afectación por plagas y enfermedades.
- 5) Las variedades nobles (*S. officinarum*) y la nubilización como práctica de mejora para reforzar caracteres sobresalientes, marcaron pauta por mucho tiempo y fueron determinantes en el trabajo orientado a la fabricación de mejores clones de caña.
- 6) El descubrimiento de la sexualidad y fertilidad de la planta marco sin lugar a dudas un antes y un después en prácticamente todos los factores asociados con el desarrollo tecnológico y comercial del cultivo.
- 7) El abordaje del trabajo de mejora genética de la caña de azúcar se ha desarrollado por muchos años en todo el mundo cañero sin distinción de diferencias geográficas, lo que revela una importante vinculación de los esfuerzos investigativos por intereses y objetivos comunes.
- 8) Pese a las presuntas diferencias genéticas existentes entre clones de origen y naturaleza muy diversa, pareciera existir en la caña de azúcar un grado importante y preocupante de endogamia (unión o reproducción entre individuos de ascendencia común; es decir, de una misma familia u origen), como ha sido demostrado, que debe superarse para lograr incorporar mayor variabilidad.
- 9) La definición e idealización de un biotipo perfecto de caña para uso comercial, no pasa de la utopía, pues resulta imposible integrar y asociar tantos factores y

elementos deseables en una variedad; razón por la cual, la identificación de los mejores caracteres debe ser la meta.

- 10) La reciente secuenciación del genoma de la caña de azúcar abre un importante e interesante espacio para la investigación y la mejora genética direccionada y asistida por nuevos y efectivos instrumentos genéticos, que indudablemente harán el trabajo de laboratorio y campo más efectivo, más corto en tiempo y posiblemente menos oneroso.
- 11) Muchos tópicos nuevos surgirán en pocos años asociados con transgénesis, propiedad intelectual, adjudicación de instrumentos metodológicos, uso de la biodiversidad y apropiación y uso popular de variedades, que deberán ser debatidos y sobre los cuales se deberá tomar posición sectorial, institucional y nacional.
- 12) La importancia y trascendencia del tema genético resulta incuestionable como argumento técnico e institucional, para justificar y apoyar todos los esfuerzos que en materia de mejora del cultivo se realicen en el país.
- 13) Se debe continuar y fortalecer el apoyo para que DIECA continúe con el desarrollo del programa de cruzamiento e hibridación orientada a la fabricación y liberación de clones nacionales sigla LAICA.
- 14) Mucho de la estabilidad y crecimiento competitivo futuro de la agroindustria azucarera costarricense, descansa en la capacidad que pueda tener la organización, por medio de DIECA, de generar y cultivar sus propias variedades comerciales nacionales de caña; por cuanto el dinámico avance en materia de propiedad intelectual, apropiación de recursos fitogenéticos y metodológicos, limitaciones para continuar con la adquisición de clones por los medios tradicionales convencionales del intercambio y, la imperiosa necesidad de atender y satisfacer requerimientos muy propios de nuestro entorno productivo, obligan a lograr la independencia y autosuficiencia en esta materia en el menor tiempo posible.

#### 14.) Literatura Citada

- 1) Angulo, A.; Durán, J.R.; Chaves, M. 1999. **Composición genética del Banco de Germoplasma de caña de azúcar de Costa Rica.** Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, Congreso Nacional de Entomología, 5, Congreso Nacional de Fitopatología, 4, Congreso Nacional de Suelos, 3, Congreso Nacional de Extensión Agrícola y Forestal, 1, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: *Manejo de Cultivos*. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED, julio. Volumen II. p: 233-234. También en: Participación de DIECA en el XI Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, julio 1999. p: 73-74. También en: Congreso de ATACORI "Randall E. Mora

- A.", 13, Guanacaste, Costa Rica, 1999. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica, setiembre. p: 14-15.
- 2) Arévalo, R.A.; Bertoncini, E.I.; Guirado, N.; Chaila, S. 2006. **Los términos Cultivar o Variedad de caña de azúcar (*Saccharum spp.*)**. Revista Chapingo Serie Horticultura 12(1): 5-9.
  - 3) Bacchi, O.O.S. 1983. **Botânica da cana-de-açúcar**. En: Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. José Orlando Filho (Coordenador). Piracicaba, São Paulo, Brasil. IAA/PLANALSUCAR. P: 25-37.
  - 4) Barbieri, V. 1993. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. Têse de Mestrado. ESALQ-USP, Piracicaba, Brasil. 142 p.
  - 5) Barrantes Mora, J.C.; Chavarría Soto, E. 2007. **Informe: acciones estratégicas realizadas y en proceso como respuesta para enfrentar el ataque de roya en la Región Sur**. Pérez Zeledón, Costa Rica, LAICA-DIECA. 26 p.
  - 6) Barrantes Mora, J.C.; Chavarría Soto, E. 2010. **Historia de la enfermedad Roya Naranja (*Puccinia kuehni*) en la Región Sur: génesis y acciones iniciales**. Pérez Zeledón, Costa Rica, LAICA-DIECA, mayo. 26 p.
  - 7) Cassalett Dávila, C.; Ranjel Jiménez, H. 1995. **Mejoramiento Genético**. En: El cultivo de la caña de azúcar en la zona azucarera de Colombia. Cassalett, C.; Torres, J.; Isaacs, C. (eds). Cali, Colombia. CENICAÑA. P: 63-81.
  - 8) Chavarría, E.; Barrantes, J.C. 2009. **Situación de la roya naranja (*Puccinia kuehni*) en Costa Rica. 2007 – 2009**. Congreso Azucarero ATACORI "Cooperativa Agrícola Industrial El General R.L.", 17, Colegio de Ingenieros Agrónomos, San José, Costa Rica, 2009. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 2 y 3 de setiembre del 2009.
  - 9) Chavarría S., E.; Barrantes M., J.C.; Villalobos M., C.L.; Valverde A., W. 2016. **Actualización de la reacción a la roya naranja (*Puccinia kuehni*) de las principales variedades comerciales y promisorias de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en ciclo de caña planta en Costa Rica**. Revista "Entre Cañeros" N° 5, San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, agosto. p: 36-52.
  - 10) Chaves S., M.A.; Arias V., J. E.; Corrales, J.L. 1982. **Rendimiento y calidad de cuatro variedades de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) cultivadas en altura**. Congreso Agronómico Nacional, 5, San José, Costa Rica, 1982. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, julio. Volumen 1. p: 156-157.
  - 11) Chaves Solera, M.A. 1988. **Efeito de Relações Ca:Mg, utilizando Carbonatos e Sulfatos, sobre o crescimento e a nutrição mineral da cana-de-açúcar**. Tesis

Magister Scientiae. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 186 p.

- 12) Chaves Solera, M.A.; Ribeiro, A.C.; Alvarez V., V.H.; De Felipo, B.V.; Novais De, R.F. 1991. **Efecto de relaciones Ca:Mg, utilizando Carbonatos y Sulfatos, sobre el crecimiento y la nutrición mineral de la caña de azúcar.** Congreso Tecnológico de la Caña de Azúcar, 3, San José, Costa Rica, 1989. Memorias. San José, LAICA-DIECA. p: 159-200.
- 13) Chaves Solera, M.A. 1995a. **Características de la variedad ideal de caña para la producción de azúcar en Costa Rica.** Simposio sobre Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar en Costa Rica, 1, Puntarenas, Costa Rica, 1995. Memorias. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, setiembre. p: 293-306.
- 14) Chaves Solera, M.A. 1995b. **Varietades de caña de azúcar de uso comercial en Costa Rica: una sinopsis histórica.** Simposio sobre Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar en Costa Rica, 1, Puntarenas, Costa Rica, 1995. Memorias. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, setiembre. p: 307-323.
- 15) Chaves Solera, M.; Calderón A., G.; Angulo M., A.; Barrantes M., J.C.; Rodríguez R., M.; Alfaro P., R.; Chavarría S., E.; Rodríguez F., J.M. 1998. **Estimación del área cultivada con caña de azúcar en Costa Rica y determinación del índice de rendimiento agrícola, según región y rango de entrega de materia prima al ingenio.** San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, marzo. 189 p.
- 16) Chaves Solera, M. 2006a. **Importación de variedades de caña de azúcar a Costa Rica por parte de DIECA. Periodo 1982-2006.** Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 16, Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 16. Heredia, Costa Rica, 2006. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), agosto. Tomo II. p: 566-574.
- 17) Chaves Solera, M. 2006b. **Importancia de las variedades de caña de azúcar como factor de productividad y competitividad agroindustrial.** Revista de Agricultura y Ganadería de Centroamérica (Costa Rica), 1er Aniversario. San José. p: 58-60.
- 18) Chaves Solera, M. 2008a. **¿Por qué se cultiva predominantemente una sola variedad de caña de azúcar en la zona sur de Costa Rica?** San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, noviembre. 24 p.
- 19) Chaves Solera, M. 2008b. **Plan Estratégico y Plan de Acción previsto desarrollar para atender y contrarrestar la presencia de la roya naranja (*Puccinia kuehni*) en las plantaciones de caña de azúcar de Costa Rica.** San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, 31 marzo. 8 p.

- 20) Chaves Solera, M. 2008c. **Estrategia general para contrarrestar la presencia de la roya naranja (*Puccinia kuehnii*) en Costa Rica**. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, abril. Presentación Electrónica en Power Point. 42 Láminas.
- 21) Chaves Solera, M.; Bermúdez Loria, A.Z. 2012. **Dinámica de cultivo comercial de las variedades de caña de azúcar en Costa Rica: *análisis histórico***. Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Latinoamérica y el Caribe (ATALAC), 8, y Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar (TECNICAÑA), 9, Santiago de Cali, Colombia, 2012. Memorias. Cali, Colombia, ATALAC/TECNICAÑA, setiembre 12 al 14, Centro de Eventos Valle del Pacífico. Tomo I Campo. p: 151-169. Presentación Electrónica en Power Point. 14 Láminas.
- 22) Chaves Solera, M.A. 2013. **Composición del Banco de Germoplasma de caña de azúcar de Costa Rica**. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, enero. 28 p.
- 23) Chaves Solera, M. 2015. **Principales variedades de caña cultivadas comercialmente en algunos países de tradición azucarera del continente americano**. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, marzo. 25 p.
- 24) Chaves Solera, M.A. 2016f. **La mejora genética de la caña de azúcar en Costa Rica**. Congreso Nacional Agropecuario, Forestal y Ambiental, 14, Centro de Conferencias del Hotel Wyndham Herradura, Heredia, Costa Rica, 2016. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Colegio de Ingenieros Agrónomos de Costa Rica, octubre 27 al 29. 28 p.
- 25) Chaves Solera, M.A. 2017. **Enfoque biotecnológico integral en DIECA: *pasado, presente y futuro***. Revista Entre Cañeros N° 7. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, enero. p: 5-18.
- 26) Chen, J.C.P. 1991. **Manual del azúcar de caña. Para fabricantes de azúcar de caña y químicos especializados**. Editorial LIMUSA, S.A. México D.F. p: 27-30.
- 27) Chilebio. 2018. **Logran secuenciar el complejo genoma de la caña de azúcar** (en línea sitio web). Consultado 20 de julio 2018. Disponible en <http://www.chilebio.cl/2018/07/18/logran-secuenciar-el-complejo-genoma-de-la-cana-de-azucar/>.
- 28) CIRAD. 2018. **The highly complex sugarcane genome has finally been sequenced** (en línea sitio web). Consultado 20 de julio 2018. Disponible en <https://www.cirad.fr/en/news/all-news-items/press-releases/2018/sugarcane-genome-sequencing>.

- 29) COSTA RICA. COMISIÓN PARA LA VIGILANCIA DE PLAGAS Y REACTIVACIÓN DE LA ACTIVIDAD CAÑERA DE LA REGIÓN SUR. 2008. **INFORME. Resultados del Estudio de la Situación de la Roya Naranja (*Puccinia kuehnii*) en el cultivo de la Caña de Azúcar en los Cantones de Pérez Zeledón y Buenos Aires.** San Isidro de El General, Costa Rica, setiembre. 21 p.
- 30) Dillewijn, C. Van. 1952. **Botany of Sugarcane.** Chronica Botánica Co. Waltham, Mass. Trad. Español Instituto del Libro. La Habana, Cuba. 460 p.
- 31) Durán Alfaro, J.; Oviedo Alfaro, M. 2015. **La hibridación de la caña de azúcar en Costa Rica. ¿Qué se ha hecho?** Congreso Tecnológico DIECA 2015, 6, Coopevictoria, Grecia, Alajuela, Costa Rica. Memoria Digital. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), 20 y 21 de agosto. 16 p.
- 32) Durán Alfaro, J.R. 2018. **Avances en el desarrollo de variedades serie LAICA con un enfoque de alta sacarosa.** Seminario Internacional Producción y Optimización de la Sacarosa en el Proceso Agroindustrial, 2, Puntarenas, Costa Rica, 2018. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), junio 5 al 7, Hotel Double Tree Resort by Hilton. 75 p.
- 33) Flores Cáceres, S. 2001. **Las variedades de caña de azúcar en México.** 1<sup>era</sup> Edición. México D.F. 308 p.
- 34) Garsmeur, O.; Droc, G.; Antonise, R.; Grimwood, J.; Potier, B.; Aitken, K.; Jenkins, J.; Martin, G.; Charron, C.; Hervouet, C.; Costet, L.; Yahiaoui, N.; Healey, A.; Sims, D.; Cherukuri, Y.; Sreedasyam, A.; Kilian, A.; Chan, A.; Van Sluys, M.A.; Swaminathan, K.; Town, Ch.; Bergès, H.; Simmons, B.; Glaszmann, J.C.; van der Vossen, E.; Henry, R.; Schmutz, J.; D'Hont, A. 2018. **A mosaic monoplloid reference sequence for the highly complex genome of sugarcane** (en línea, sitio web). Nature Communications 9, Article number: 2638 (2018). 36 p. Consultado 20 de julio 2018. Disponible en <https://www.nature.com/articles/s41467-018-05051-5>.
- 35) Heinz, D.J. 1987. **Sugarcane improvement through breeding.** New York, U.S.A. Elsevier Science Publishers B.V. 603 p.
- 36) INICA. 2003. **Programa de fitomejoramiento. Impacto en la producción azucarera cubana.** H.J. Suárez; J. Gómez y S. Segura (edts). Cuba.
- 37) Le Cunff, L.; Garsmeur, O.; Raboin, L.M.; Pauquet, J.; Telismar, H.; Aselvi, A.; Grivet, L.; Philippe, R.; Begum, D.; Deu, M.; Costst, L.; Wing, R.; Glaszmann, J.C.; D'Hont, A. 2008. **Diploid/Poliploid sintenic shuttle mapping and haplotype-specific chromosome walking toward a rust resistance Gene (Bru 1) in highly polyploidy sugarcane (2n~ 12x ~115).** Genetics 180: 649-660.

- 38) Mancini, M.C.; Cardoso-Silva, C.B.; Sforça, D.A.; Pereira de Souza, A. 2018. **“Targeted Sequencing by Gene Synteny,” a New Strategy for Polyploid Species: Sequencing and Physical Structure of a Complex Sugarcane Region.** *Frontiers Plant Science* N° 28, March. 13 p.  
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.00397/full>
- 39) Ming, R.; Moore, P.H.; Wu, K.K.; D’Hont, A.; Glaszmann, J.C.; Tew, T.L.; Mirkov, T.E.; da Silva, J.; Jifon, J.; Rai, M.; Schnell, R.J.; Brumbley, S.M.; Lakshmanan, P.; Comstock, J.C.; Paterson, A.H. 2006. **Sugarcane Improvement through Breeding and Biotechnology.** *Plant Breeding Reviews* 27: 15-118.
- 40) Montenegro Ballester, J.; Chaves Solera, M. 2009. **Emisión de gases por la caña de azúcar: propuesta metodológica para realizar un balance de carbono.** Congreso Azucarero ATACORI “Cooperativa Agrícola Industrial El General R.L.”, 17, Colegio de Ingenieros Agrónomos, San José, Costa Rica, 2009. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 2 y 3 de setiembre del 2009. 18 p.
- 41) Montenegro Ballester, J.; Chaves Solera, M. 2011. **Contribución del sector cañero a la mitigación del cambio climático.** Congreso Azucarero Nacional ATACORI “MSc. Teresita Rodríguez Salas (+)”, 18, Colegio de Ingenieros Agrónomos, San José, Costa Rica, 2011. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 8 y 9 de setiembre del 2011. 14 p. Conferencia Electrónica en Power Point. 54 Láminas.
- 42) Moore, P.H.; Paterson, A.H.; Tew, T. 2014. **Sugarcane: The Crop, the Plant, and Domestication.** En: *Sugarcane: Physiology, Biochemistry and Functional Biology.* 2014. edited by Paul H. Moore, Frederick C. Botha. John Wiley & Sons, Inc. p: 1-17.
- 43) Pérez Oramas, G.; Bernal Liranza, N.; Chinea Martín, A.; O’Relly Legón, J.P.; De Prada Esquivel, F. 1997. **Recursos genéticos de la caña de azúcar.** La Habana, Cuba. Publicaciones IMAGO. Instituto Nacional de Investigaciones de la caña de azúcar. 249 p.
- 44) Stevenson, G.C. 1965. **Genetics and Breeding of Sugar Cane.** Longmans Trop. Sc. Series, London. 284 p.
- 45) Strasburger, E.; Noll, F.; Schenck, H.; Schimper, A. F. W. 1988. **Tratado de Botánica.** 6ª ed. Española. Traducción de la 32ª ed. Alemana por Oriol de Bolós. Barcelona. Mirin. 1038 p.
- 46) **Sugarcane: Physiology, Biochemistry and Functional Biology.** 2014. edited by Paul H. Moore, Frederick C. Botha. John Wiley & Sons, Inc. 693 p.