REVISTA

ENTRE CAÑEROS

NÚMERO 21 • SEPTIEMBRE 2021. ISSN 2215-597X.
Revista trimestral del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA).
Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA).

ENTRE CAÑEROS

PRESENTACIÓN

Presentamos a nuestros exclusivos lectores nuestro número 21 de la Revista Entre Cañeros en la que compartimos material que les puede resultar de interés en el campo de la edafología referente al comportamiento del aluminio y su influencia en la acidez de los suelos y su efecto sobre las plantas de caña de azúcar.

Incluimos también los resultados de un importante trabajo realizado en el país y que tiene que ver con la reacción de las plantas de caña de azúcar a condiciones de estrés por déficit hídrico, cómo se refleja éste en el potencial hídrico de las plantas y el efecto en el desarrollo.

También incorporamos en este número un artículo sobre el potencial uso de microorganismos benéficos en el cultivo de la caña de azúcar, con un enfoque de buenas prácticas para una agricultura de menor impacto ambiental.

Aprovecho este espacio para recordar que el pasado 22 de septiembre se cumplió un aniversario más de la creación de la Ley Orgánica de la Agricultura e Industria de la Caña de Azúcar No 7818 constituida en 1998, marco jurídico mediante la cual se desenvuelve el sector azucarero costarricense en un entorno de equidad.

Me despido dando las gracias a nombre del Comité Editor por mantenerse informado a través de este medio, y los invito a que nos hagan llegar sus consultas y opiniones a la dirección de correo electrónico echavarria@laica.co.cr.

Ing. Erick Chavarría Soto
Coordinador comité editorial
Revista Entre Cañeros
Correo-e: echavarria@laica.co.cr

CONTENIDO

02
Presentación

04
Aluminio: un elemento contraproducente para la productividad y rentabilidad de la caña de azúcar.

46
Caracterización de las relaciones hídricas en cuatro variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) sometidas a estrés hídrico en condiciones de invernadero en Costa Rica .

62
Nuevas propuestas de investigación y desarrollo biotecnológico con microorganismos benéficos para la caña de azúcar.

Revista Entre Cañeros
Número 21, Septiembre del 2021. ISSN 2215-597X

Publicación técnica gratuita del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar
Producida por la Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar.

Avenida 15 y calle 3, Barrio Tournón.
San Francisco, Goicoechea.
10802 San José, Costa Rica.
www.laica.co.cr

Comité Editorial
Ing. Agr. Erick Chavarría Soto, coordinador.
Ing. Agr. José Daniel Salazar Blanco.
Ing. Agr. Julio César Barrantes Mora.
Ing. Agr. José Eduardo Vargas Miranda

En el Sector Cañero Azucarero Costarricense decimos:

NO Trabajo Infantil

¿Qué legislación existe en Costa Rica, para proteger a los niños y adolescentes?

- Constitución Política.
- Código de la Niñez y la Adolescencia
- Código de Trabajo
- Ley 8922 Prohibición del trabajo peligroso e insalubre para personas adolescentes trabajadoras.

¿Qué dice la legislación?

Trabajo Infantil (0-15 años) Es Prohibido	Trabajo adolescente (15-17 años) Permitido con regulaciones
• No permite que los niños se desarrollen física, emocional y psicológicamente. • Les puede causar enfermedades,lesiones o deterioro en la salud. • Causa bajo rendimiento o abandono de la educación.	• Se le debe facilitar al adolescente el espacio para estudiar y asistir al centro educativo. • Se le deben dar las mismas garantías como remuneración y vacaciones que a una persona adulta. • La jornada no puede ser mayor a 6 horas diarias ni 36 semanales. • No pueden realizar trabajo nocturno ni trabajos peligrosos, como: • Estar en espacios insalubres con altas temperaturas, espacios cerrados, alturas peligrosas o estar bajo tierra. • Utilizar herramientas o maquinaria peligrosa. • Levantar peso mayor a 15 kg los hombres y 10 kg las mujeres.

LAICA RSE

"Esta es una sección para opinión y discusión sobre temáticas de índole exclusivamente técnicas en lo referente al entorno de la producción de caña de azúcar a nivel nacional e internacional, los temas publicados en esta sección no representan ni reflejan las políticas internas o externas de LAICA; ni personifican tampoco la manera de pensar o de opinar del Comité Editorial. Los autores deberán de asumir la responsabilidad en lo personal y de manera independiente por lo que publiquen en esta sección."

ALUMINIO: UN ELEMENTO CONTRA PRODUCENTE PARA LA PRODUCTIVIDAD Y RENTABILIDAD DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Marco A. Chaves Solera[1]

Introducción

En las zonas tropicales del mundo donde se hace agricultura, como es el caso de Costa Rica, es común mencionar y señalar a la acidez del suelo como uno de los grandes problemas y limitantes que impiden el desarrollo de una agricultura rentable y competitiva; lo que obliga insoslayablemente, tener que atender y procurar resolver o al menos atenuar, sus efectos y consecuencias. Los suelos ácidos son encontrados no apenas en las zonas tropicales como erróneamente se cree, sino también en zonas templadas; estimando Howeler (1991) citado por Cançado *et al* (1999) que solamente en América Latina hay aproximadamente un billón de hectáreas en esa condición, lo que dimensiona la magnitud del problema.

Méndez y Bertsch (2012) encontraron en Costa Rica al realizar un total de 23.860 análisis de suelos agrícolas, "...que *más de la mitad de los registros (53%) presentaron valores de pH por debajo del nivel crítico, fijado en 5,5 y que el 90% de los datos estuvieron en un rango que va de desde 4,4 hasta 6,7; por lo que encontrar valores de pH por fuera de ese ámbito es poco común en Costa Rica. Suelos con problemas muy acentuados por bajos niveles de pH (menor a 4,5) se presentan únicamente en 7% del total de muestras analizadas, mientras que los suelos con una tendencia más alcalina (valores mayores a 6,5) representan solo el 8% del total de los análisis. En el caso de la acidez intercambiable, el 37% de los datos presentan valores por encima del 0,5 cmol(+)/ l, de los cuales apenas el 10% contempla valores por encima de 2 cmol(+)/ l, lo que puede significar problemas severos por toxicidad de Al. Únicamente 27% de las muestras presentan*

[1] Ingeniero Agrónomo, M. Sc. Colaborador invitado especialista en el cultivo de la caña de azúcar, Costa Rica. E-mail: chavessolera@gmail.com. Teléfono: (+506) 8390-0957

valores de %SA mayores a 10%, y 22% aparecen con una suma de bases por debajo de 5 cmol(+)/ l." Esa condición de acidez de los suelos agrícolas en el caso nacional no es genérica ni tampoco similar en las diferentes localidades geográficas donde se cultiva en lo especifico, caña de azúcar en el país, pues los entornos agro productivos y las condiciones de cultivo prevalecientes en las mismas son muy variables, heterogéneas y disímiles entre sí, como lo mencionara y demostrara Chaves (2019ab) y Chaves y Chavarría (2021).

Aluminio y acidez del suelo:

La acidez del suelo es un concepto amplio y complejo que involucra la participación e interacción de numerosos factores de diversa naturaleza, que generan como resultado un efecto detrimental para el desarrollo y la estabilidad de las plantas sembradas en su ambiente característico tipificado por elementos muy particulares; el cual se manifiesta y expresa de muy diferentes formas. En su formación y actividad es común ubicar elementos asociados con el clima, pedogenéticos, edáficos asociados a factores y actividades físico-químicas y biológicas como las causas; como también, los de carácter antrópico inducidos por el propio agricultor. Los factores interventores pueden ubicarse en bióticos y abióticos. El factor clima desempeña en definitiva un papel fundamental y determinante en este dinámico proceso de intemperización. El tema de la acidez de los suelos tiene diferentes perspectivas desde las que puede ser abordada, desarrollada y tratada, como lo ha demostrado Chaves (1999ab, 2001, 2017b); sin embargo, el objeto central procurado en esta ocasión es otro y a ello nos avocaremos seguidamente.

El alcance y objetivo fundamental pretendido por el presente artículo, es referirse con algún grado de profundidad y especificidad, particularmente a la actividad desarrollada por el elemento químico Aluminio (Al) presente en el suelo y los efectos fisiológicos y metabólicos provocados por el mismo en la planta de caña de azúcar. Se busca aislar e independizar en lo posible y comprender la participación de este elemento dentro de la complejidad de la denominada "acidez del suelo".

La mayoría de los minerales que componen las rocas y forman parte constitutiva de los suelos agrícolas, está conformada y estructurada por silicatos y alumino-silicatos; donde el aluminio combinado con el silicio se encuentra en los feldespatos, las micas y el caolín. Varios minerales han sido señalados como fuentes de aluminio, como es el caso de la basaluminita y alunita (sulfatos de Al), la varisita (fosfatos Al); o como producto de la disolución de la haloisita y la esmectita, entre otros. El aluminio es considerado uno de los elementos metálicos que con mayor abundancia se encuentra presente en la corteza terrestre y también lunar. Señalan Mengel y Kirkby (2001) que más del 15% de la corteza terrestre está formada por Al_2O_3,

siendo junto con el silicio (Si) el principal formador de las redes cristalinas de las arcillas primarias y secundarias. Es por naturaleza insoluble en agua y, por lo general, no se le encuentra disponible participando en reacciones biogeoquímicas. La solubilidad del elemento es muy baja en suelos neutros y alcalinos como para que sea tóxico a las plantas; sin embargo, en las condiciones que establece el medio ácido, el metal puede solubilizarse y movilizarse hacia los ambientes acuáticos, o en su caso, ingresar a las plantas a través de sus raíces. La correlación que existe entre acidez, pH, solubilidad y actividad del aluminio en el suelo, es como se expondrá más adelante, fuerte y directa.

En los suelos ácidos la toxicidad ocasionada por el aluminio constituye una de las limitaciones más serias y comprometedoras para la producción eficiente y rentable de los cultivos desarrollados en esas condiciones particulares, aun los que se caracterizan y califican por sus propiedades y atributos anatómicos, genéticos y fisiológicos como excepcionales y en algún grado tolerantes a desarrollarse en condiciones adversas, como es el caso particular de la caña de azúcar, como lo expresara Chaves (2020b). Especialistas en la materia como Fassbender y Bornemisza (1994), expresan que *"El factor más perjudicial para las plantas en suelos fuertemente ácidos es la toxicicidad del Al, particularmente cuando el pH es inferior de 5,0"*. En ambientes agroproductivos de condiciones cálidas y húmedas como las prevalecientes en algunas localidades cañeras de Costa Rica (Chaves 2019ab, Chaves y Chavarría 2021), predominan suelos que se encuentran en un estado avanzado de desarrollo, intemperización y envejecimiento, con taxonomías del Orden Ultisol y también Oxisol, de la cual hay identificada un área muy pequeña sembrada con caña en el cantón de Buenos Aires, Zona Sur, como lo han señalado Chaves y Chavarría (2017ab) y Chaves (2017a).

La acidez del suelo depende del contenido de hidrógeno ionizable (H^+), del elemento aluminio existente en diferentes formas disociables y, en menor grado, de los iones hierro y manganeso presentes, todos en estado de equilibrio con la solución del suelo donde ocurren muy variadas reacciones de hidrólisis (Fassbender y Bornemisza 1994).

La acidificación progresiva de los suelos es debida a la sustitución constante y continua que se da de las bases intercambiables calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na), por hidrógeno (H^+) y aluminio (Al); por causa de su pérdida por lixiviación, fijación, extracción por las plantas y también por el uso de fertilizantes de contenido ácido como son por su orden el sulfato de amonio, fosfato diamónico, urea, nitrato de amonio y fosfato monoamónico, entre otros (Malavolta 1981). Los aniones como iones acompañantes presentes en la solución del suelo, cuando son removidos por causa de la percolación, arrastran los cationes ligados provocando su pérdida. Suelos tropicales como los nacionales, sujetos a las altas temperaturas y alta precipitación pluviométrica durante casi todo el año, en relación a la evapotranspiración, presentan por lo general un estado avanzado de intemperización que favorece y promueve la intensa remoción y pérdida de cationes y sílice por lixiviación y, consecuentemente, el acúmulo de sesquióxidos de hierro y aluminio (óxido que contiene tres átomos de oxígeno con dos átomos o radicales de otro elemento como hierro (Fe), aluminio (Al_2O_3), manganeso (Mn) y cromo (Cr).

Se considera que el índice de pH donde las concentraciones de aluminio alcanzan valores más perjudiciales depende tanto del grado de sensibilidad de la planta como de varios factores del suelo, como son entre otros la mineralogía de las arcillas presentes, el contenido de materia orgánica existente, la actividad de otros cationes y aniones y la salinidad total del suelo. Bajo esta condición, la proporción de Al^{3+} presente en el complejo de cambio y en la solución del suelo alcanza concentraciones que presentan síntomas característicos afines a cada especie vegetal.

Manifiesta Salas (1996) al respecto, que *"El valor crítico de pH al cual el Al libre o intercambiable se convierte en tóxico depende de varios factores de suelo que incluyen la predominancia de minerales arcillosos, los niveles de materia orgánica, la concentración de otros cationes y aniones, el contenido de sales totales y en particular las especies y cultivares de plantas."*

El Cuadro 1 expone un detalle de los ámbitos de acidez de mejor adaptación interpretado por su índice de pH, de 42 importantes cultivos de trascendencia comercial, el cual se ubica entre 5,0 y 7,5; para la caña es de 5,5 a 6,5.

Cuadro 1.

Ámbitos de acidez del suelo expresado por el valor de pH más adecuados para 42 cultivos agrícolas.

Cultivo	Índice de pH	Cultivo	Índice de pH
Alfalfa	6,5 - 7,5	Lechuga	6,0 - 7,0
Algodón	5,5 - 6,5	Maíz	5,5 - 6,5
Apio	6,0 - 7,0	Manzana	5,7 - 7,5
Arroz	5,0 - 6,5	Mostaza	5,5 - 6,5
Avena	5,5 - 7,0	Nabo	5,5 - 6,5
Berenjena	5,5 - 6,0	Okra	6,0 - 6,5
Calabaza	5,5 - 6,5	Papa	5,0 - 5,5
Café	6,0 - 7,0	Papa Dulce	5,0 - 5,7
Caña de Azúcar	5,5 - 6,5	Pasto	5,5 - 7,0
Caupí	5,5 - 7,0	Pepino	5,5 - 6,7
Cebada	5,5 - 7,0	Remolacha	6,0 - 7,0
Cebolla	6,0 - 6,5	Repollo	5,7 - 7,0
Centeno	5,5 - 7,0	Sandía	5,0 - 5,5
Cítricos	5,0 - 7,0	Sorgo	5,5 - 7,0
Coliflor	6,0 - 7,0	Soya	5,5 - 7,0
Chile Dulce	5,5 - 6,5	Tabaco	5,2 - 5,7
Espárrago	6,0 - 7,0	Tomate	5,5 - 6,7
Espinaca	6,0 - 7,0	Trébol	6,0 - 7,0
Fresa	5,2 - 6,5	Trigo	6,0 - 7,0
Frijol	5,5 - 6,7	Uva	6,5 - 7,5
Guisante	6,0 - 7,0	Zanahoria	5,7 - 7,0

Fuente: Malavolta (1976).
* Indica las fajas de pH más favorables para el desarrollo de las plantas.

Caracterización del elemento

Propiedades

El aluminio es un elemento químico metálico muy conocido en agricultura pese a no formar parte de estructuras o tener vínculo directo con funciones metabólicas específicas; de símbolo Al y número atómico 13. No forma parte de los 16 elementos reconocidos (más otros incorporados recientemente) y nombrados en la nutrición vegetal como "esenciales", motivo por el cual **no se le considera un nutrimento esencial ni tampoco benéfico** (Epstein y Bloom 2006). Indican Anderson y Bowen (1994) al respecto, que no se le conoce función metabólica específica; tampoco que sea esencial o funcional, siendo inmóvil dentro de la planta. Pese a ello, se le han ubicado algunos efectos positivos en algunas plantas al intervenir por ejemplo el color de las flores. Se trata de un metal plateado no ferromagnético y sumamente liviano (posee una bajísima densidad de 2,7 g/ml a 20ºC), con una masa atómica de 26,98 g/mol. El estado del aluminio en su forma natural es sólido, blando y maleable. Es un elemento químico de aspecto plateado y pertenece al grupo de los metales. Su punto de fusión es muy bajo (660 °C) y el de ebullición muy alta (2.450 °C). De valencia 3 y estado de oxidación +3. Se reconoce por su alta conductividad eléctrica y térmica, lo mismo que por su gran reflectividad. El aluminio es anfótero (puede reaccionar como un ácido o una base), por lo cual puede reaccionar con ácidos minerales para formar sales solubles con desprendimiento de hidrógeno. El elemento fue descubierto y reportado por Hans Christian Oersted en el año 1825.

El aluminio se encuentra en el suelo en forma de óxidos e hidróxidos y también en minerales primarios y secundarios, los cuales

se disuelven liberando sus iones constituyentes a la solución del suelo. Nunca se le encuentra presente en forma libre en la naturaleza, pero si muy ampliamente distribuído en las plantas y en casi todas las rocas, sobre todo en las ígneas, que contienen aluminio en forma de minerales de alúmino silicato. Cuando estos minerales se disuelven, según las condiciones químicas prevalecientes en el lugar, es posible precipitar el aluminio en forma de arcillas minerales, hidróxidos de aluminio o ambos. En esas condiciones se forman las "bauxitas" que sirven de materia prima fundamental en la producción industrial de aluminio.

En el caso particular de Costa Rica, la empresa Aluminium Company of America (ALCOA) firmó en 1964 un contrato administrativo con el Gobierno para la exploración de la bauxita en San Isidro del General, cantón de Pérez Zeledón, donde la presencia del mineral es alta, negociando la posible instalación de una planta transformadora de la bauxita en alúmina, etapa previa a la obtención del aluminio. Esta situación generó un gran conflicto de repercusión social en el país en abril de 1970; dando con ello inicio a una de las etapas más importantes en la historia de las luchas sociales en el país para proteger el ambiente. Todo giró alrededor de la bauxita y el aluminio.

Los efectos del metal son importantes debido a los graves problemas de acidificación que generan en los suelos y su medio. El elemento puede asimismo acumularse en las plantas y causar problemas de salud a los animales que las consumen. Las concentraciones del elemento parecen ser muy altas en lagos acidificados, por lo que sus implicaciones ambientales son serias. Existen, sin embargo, algunas eviden- cias, como lo señalara Foy (1974), sobre efectos favorables del aluminio en el crecimiento de las plantas cuando sus concentraciones son bajas, aunque el mecanismo de acción, expresa, no está aún claro.

Solubilidad y reacción en el suelo

La solubilidad del aluminio se da en condiciones de acidez, la cual actúa sobre las estructuras octaédricas de los coloides minerales del suelo, solubilizándolas y rompiéndolas, con lo cual se liberan los iones Al^{3+} que están contenidas y retenidas dentro de ellas. El Al^{3+} soluble genera H^+ en presencia de agua, acentuando y agudizando aún más la condición de acidez, activando una reacción en cadena en la cual los H^+ generados por el Al contribuyen a que más cristales arcillosos se quiebren y liberen nuevos iones Al^{3+}. Al haber más presencia de ese metal en el medio, hay en consecuencia más acidez en el medio, se rompen más cristales y se tendrá aún más Al^{3+}. La reacción implicada es de carácter continuo, progresivo y por tanto permanente; por lo que entre mayor sea la condición de acidez (pH más bajo) mayor intensidad se tendrá en la reacción. La reacción generadora de la acidez es la siguiente:

$$Al^{3+} + 3H_2O \Rightarrow Al(OH)_3 + 3H^+$$

Se considera que la presencia y distribución del aluminio en el suelo, es el resultado de las siguientes reacciones: 1) competencia entre "ligandos" por aluminio que pueden ser especies solubles, o ligandos en partículas que pueden reaccionar con cationes, o especies que pueden precipitar especies de Al (estas formas de competición son las que determinan la distribución potencial del Al en el suelo), y 2) competencia entre el Al y otros cationes por ligandos, reacciones que determinan la distribución actual de Al en el suelo; como lo señalara Salas (1996).

Toxicidad y daño por aluminio

Sobre este tópico tan particular y complejo es importante señalar y reconocer el excelente aporte literario que hacen Carreño y Chaparro-Giraldo (2013) en torno al tema, exponiendo desde diferentes perspectivas todo el amplio vínculo y relaciones del elemento con los vegetales.

Sintomatología

El diagnóstico visual siempre resulta importante para detectar e inferir la presencia de posibles anomalías y problemas en un cultivo, en este caso de carácter nutricional, sea por insuficiencia (deficiencia) o por exceso (toxicidad) de algún factor ausente o presente en exceso en el medio. El criterio de identificación seguido es de carácter comparativo aplicado y referenciado sobre un patrón relativo, considerado y calificado como normal para secciones específicas de la planta, por lo general, en el caso de la caña el área foliar, los tallos y las raíces. Los efectos del aluminio en la planta se asemejan mucho a las deficiencias nutricionales, debido posiblemente a las restricciones que sobre las funciones y actividad radicular impone. Por ser el criterio un tanto subjetivo y hasta circunstancial, en la práctica no resulta conveniente basar recomendaciones de fertilización exclusivamente en este razonamiento, lo que es temerario y hasta peligroso; lo cual no obvia sin embargo su validez como guía para dictaminar en primera instancia con alguna certeza la presencia de un posible problema.

En el caso del aluminio, la raíz es la sección donde en primera instancia se presenta el efecto, el cual posteriormente se expresa en pérdida de crecimiento, plantas raquíticas, marchitas, poco desarrolladas, de color pálido o descolorido (clorosis), tallos finos, delgados, muy débiles y manchas necróticas por afectación y obstrucción en la funcionalidad del sistema radicular (Chaves 2020e). Puede asegurarse, por tanto, que el primer efecto observable del aluminio en las plantas se evidencia en una limitación manifiesta en el crecimiento de las plantas. El síntoma foliar tradicional se asemeja mucho a la deficiencia provocada por el fósforo con atrofiamiento total de las plantas y hojas de color verde-oscuro, debido posiblemente a la inhibición que ese nutrimento sufre en su absorción y translocación a la sección aérea. Indican Foy (1974) y Foy *et al* (1978), que los ápices de la raíz y las raíces laterales se engrosan y tornan color marrón. En otras especies las hojas jóvenes pueden curvarse y enrollarse, colapsando en sus puntos de crecimiento, de manera similar al síntoma de deficiencia evidenciado por calcio. Es conocida y comprobada la interferencia que el Al en exceso provoca en el transporte y empleo de otros elementos esenciales, como acontece con Ca, Mg, K, Mo y Fe. En esta materia Foy *et al* (1978) plantea una interesante relación del aluminio sobre la fisiología y el metabolismo de las plantas.

En la práctica agrícola de campo, tener un sistema radicular deficiente u obstruido en su actividad fisiológica normal, genera serios problemas al cultivo que redundan en una baja germinación, retoñamiento limitado, poco ahijamiento, mal encepamiento, bajas tasas de crecimiento y producción de biomasa, y con ello, afectación del tonelaje de materia prima cosechada y azúcar fabricado en el ingenio, lo que a su vez impacta la rentabilidad y la competitividad de la empresa cañera. En suelos cultivados naturalmente ácidos, esta condición puede con frecuencia, aumentar al descender en el perfil del suelo, de modo que la profundidad activa del sistema radicular de la planta está restringida y el agua y los nutrimentos subsuelo no pueden ser absorbidos. La vida

comercial útil de la plantación se ve además severamente reducida (Chaves 2020ae).

Señalan Fassbender y Bornemisza (1994) al respecto, que los síntomas provocados por la toxidez por aluminio, *"...se parecen, con frecuencia, a los que se dan por deficiencias de P o Ca. Se sabe que las plantas jóvenes son particularmente sensitivas a la acidez."*

En torno al mismo tema, apunta Malavolta (1987), que los síntomas por toxidez en la caña de azúcar, se expresan como *"...hojas con amarillamiento y necrosis de los márgenes y puntas; poco desarrollo de los retoños; raíces cortas, pardas y gruesas (coraloides)." Por su parte, Figueiredo (2018) anota en adición al asunto, que "La toxicidad del aluminio provoca en el suelo la fijación del fósforo tornándose menos disponible para las plantas. Como consecuencia, las hojas más viejas adquieren una coloración morada y se tornan pequeñas y más estrechas, disminuyendo la capacidad fotosintética de la planta." Agrega también que "...bajo la presencia exagerada de aluminio está comprometido el crecimiento de los tallos, que en esas condiciones se presentan más finos y con acortamiento de los entrenudos."*

Asegura el mismo autor, que *"Las raíces afectadas con la presencia de aluminio se presentan más cortas, engrosadas y con coloración castaña en forma de manchas, denotando una mal formación. Eso ocurre porque cuando expuestas al aluminio las raíces alteran su crecimiento y desarrollo, como consecuencia de los desórdenes en las reacciones químicas a nivel celular."*

Declaran Anderson y Bowen (1994) en su clave de identificación referenciada a la identificación de problemas nutricionales en la caña, que los síntomas del aluminio en raíces afectadas se manifiestan, por *"Formación de muy pocas raíces laterales y las que se forman tienen puntas anormalmente gruesas; el daño a las raíces se parece a aquel causado por nemátodos; las plantas son muy susceptibles al estrés por sequía y deficiencia de fósforo (Figura 1)."*

Figura 1.

Toxicidad por aluminio en raíces de caña (Anderson y Bowen, 1994).

Toxicidad

Con un pH próximo o menor de 4,5, la acidez del suelo limita de forma severa la producción, principalmente por la presencia de aluminio intercambiable Al^{3+} y excesos complementarios de algunos otros micronutrimentos como hierro (Fe) y manganeso (Mn), que en altas concentraciones pueden ocasionar toxicidad y muerte del vegetal. Las plantas jóvenes son más sensibles y susceptibles que las maduras. El ión posee efecto tóxico en concentraciones en orden micromolar en la solución del suelo. Se tiene por demostrado que cuando la concentración de Al^{3+} en el medio acuoso o solución del suelo es de 1 a 2 ppm, se tendrá intoxicación sobre los tejidos vegetales. No existen sin embargo niveles críticos foliares consolidados para el aluminio; sin embargo, Chaves (1988) encontró efecto de diferentes relaciones Ca:Mg del suelo sobre los contenidos de aluminio foliar cuando empleó sulfatos. La toxicidad por aluminio se ha encontrado que viene por lo general acompañada de altas concentraciones de Fe y Mn, y bajas de Ca y Mg en los tejidos de la planta. La investigación ha comprobado que el grado de toxicidad por aluminio varía significativamente y depende en alto porcentaje de la especie de planta involucrada, las condiciones y estado fenológico de crecimiento de la misma, las concentraciones presentes en el medio y el tiempo de exposición a que es sometido el tejido.

Afirman Anderson y Bowen (1994), que, en Australia, la toxicidad del aluminio está asociada directamente con la llamada *"toxicidad ácida"*, donde el problema está relacionado con la combinación de acidez, alta concentración de Al, Fe y/o Mn y bajos contenidos de Ca, K, Mg y P en el suelo. Agregan esos investigadores que la toxicidad puede ocurrir en suelos minerales cuando el Al ocupa más del 30% de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC); igualmente en suelos arenosos de baja CIC, bajas concentraciones de Al en la solución del suelo pueden causar problemas de toxicidad.

La condición fisicoquímica del suelo interpretada en este caso por el Grado Porcentual de Saturación de Aluminio, permite clasificar y ubicar los cultivos de acuerdo a la relación de sensibilidad-susceptibilidad que tengan en relación a ese agresivo ión metálico. Como se infiere del Cuadro 2 existen marcadas diferencias que deben ser tomadas en cuenta al momento de desarrollar cualquier proyecto o emprendimiento agroindustrial.

El crecimiento de distintas especies vegetales en los suelos ácidos depende de su relativa tolerancia a los niveles de Al y Mn presentes en el medio, como también de sus necesidades relativas de Ca y Mg; lo que genera diferencias considerables entre y dentro de las especies de cultivos en cuanto al grado de tolerancia a la acidez del suelo.

Cuadro 2.

Porcentaje de Saturación de Aluminio (%SA) tolerado por algunos cultivos en suelos ácidos.

Cultivo	% SA tolerado		
	Alto	Medio	Bajo
Gramíneas			
Arroz	X		
(porte alto)		X	
Maíz		30 - 40	
Sorgo			15
Trigo			10
Leguminosas			
Soya		X	10
Frijol Negro			X
Frijol Blanco	60		X*
Maní	X	40	
Caupí			
Gandúl			
Hortalizas	75	30	
Camote		30	
Papa			
Yuca		X	
Plátano			

Cultivo	% SA tolerado		
	Alto	Medio	Bajo
Frutas			
Banano		X	
Marañón		X	
Coco		X	
Granadilla		X	
Carambola		X	
Mango		X	
Cítricos		X	
Piña	X		
Pejibaye		X	
Forestales			
Eucalipto		X	
Gmelina		X	
Jacaranda		X	
Pino		X	
Otros			
Cacao		X	
Café		40	
Caña Azúcar		X	
Palma Aceitera		X	
Pimienta		X	

Fuente: Bertsch (1998).
* Menos tolerantes que los frijoles negros.

Con fundamento en la respuesta diferencial que las plantas muestran no solo a la afectación directa por presencia de aluminio en el medio medida en este caso por su % de saturación; sino también al efecto indirecto que la condición de acidez impone en las relaciones, interacciones y actividad fisicoquímica y microbiológica del suelo, se muestra en el Cuadro 3, donde se ubican algunos cultivos importantes en cuanto a su grado relativo de tolerancia a la acidez. Cabe señalar al respecto, que diversos autores sitúan la caña de azúcar como una planta tolerante al aluminio como se expone seguidamente.

Cuadro 3.

Tolerancia relativa de algunas plantas cultivadas a la acidez del suelo.

Muy tolerante	Tolerante	Sensible	Muy sensible
Altramuz	Algodón	Cebada	Alfalfa
Avena	Fresa	Coliflor	Apio
Caupí	Maíz	Berenjena	Cebolla
Centeno	Pepino	Nabo	Chile Dulce
Maní	Trébol Rosado	Repollo	Espárrago
Papa	Ruibarbo	Tabaco	Espinaca
Piña	Tomate	Trébol Dulce	Lechuga
Sandía	Uva	Trébol Rojo	Remolacha
		Trigo	

Fuente: Malavolta (1976).

Genéricamente se ha encontrado efectos diferenciales, notando que la forma de Al^{3+} afecta más a las plantas monocotiledóneas como la caña de azúcar; en tanto que en las dicotiledóneas las especies tóxicas $Al(OH)^{2+}$ o $Al(OH)_2^{+}$ son las que más daño provocan.

Trabajando en solución nutritiva y con dosis altas de Al^{3+}con siete cultivares de caña en Brasil (NA 56-79, CB 41-76, CB 53-98, CP 51-22, IAC 51-205, IAC 52-150 e IAC 58-480), Azeredo (1982) encontró pérdidas de un 20% en el peso de las raíces de los clones CB 41-76 y IAC 58-480, al ser sometidas a concentraciones de 1 y de 56 a 7,49 ppm de Al^{3+}. Notó interferencia en las concentraciones de nutrimentos (K, S, Ca, Al) en las raíces, tallos (N, Ca, Mg, Al) y hojas (Ca, Mg, S, Al). Concluyó a su vez, que la raíz era el mejor indicador para evaluar el efecto tóxico del Al en la planta de caña. Martín y Evans (1964) no encontraron, sin embargo, efectos sobre el sistema radical de la caña al exponerse a una concentración de aluminio de 10 ppm, lo que si sucedió en contenidos entre 50 y 500 ppm. Se demuestra en esos resultados la presencia de alguna tolerancia importante de la caña de azúcar al aluminio. De acuerdo con Epstein y Bloom (2006), la *"Exposición a niveles de Al^{3+} que comúnmente ocurren en suelos ácidos (10-100µM) inhibe inmediata y severamente el crecimiento radicular."*

En otro estudio, **Hetherington *et al* (1986)**, investigadores australianos, seleccionaron 34 cultivares de caña para determinar a nivel de campo su nivel de tolerancia al aluminio en un suelo conocido por ser tóxico para el frijol mungo y la soya; encontrando en su estudio variabilidad en el comportamiento de los mismos, aunque no observaron síntomas típicos de toxicidad en las raíces. En un segundo experimento controlado, nueve de esos clones con tolerancia variable fueron expuestos al aluminio, encontrando variación significativa y diferencial en sus resultados, donde se identificó cultivares que diferían en cuanto a su grado de tolerancia a concentraciones variables al Al en solución. Todos los clones mostraron síntomas de toxicidad en las concentraciones de 5 a 26 mM, donde se observó una reducción del 10% en la longitud de las raíces, las cuales se incrementaron significativamente al 50% en las concentraciones más altas de 10 a 160 mM. En general, concluyeron que la caña de azúcar presenta una tolerancia relativamente alta al Al. En Sudáfrica se ha reportado también tolerancia diferencial de las variedades de caña a las altas concentraciones de aluminio contenidas en el suelo.

Se indica en la literatura que cuando la concentración de aluminio en la solución del suelo alcanza concentraciones superiores a 1 ppm, está comprobado, que va a tener incidencia e implicaciones directas sobre el crecimiento de las plantas, provocando intoxicación en los tejidos. -Concluye Figueiredo (2018) en relación al tema, que *"Es interesante destacar que, de manera general, la caña de azúcar admite una cierta tasa de tolerancia a la toxicidad de aluminio. Aún así, es deseable que los programas de mejoramiento busquen la identificación y selección de cultivares resistentes a los elevados niveles de aluminio en el suelo, con la finalidad de reducir los costos de manejo y proporcionar mayores lucros a las unidades sucroenergéticas."*

Con base en los resultados recabados, se concluye que la planta de caña de azúcar es considerada y calificada, como lo señalaran Hetherington *et al* (1986), Figueiredo (2018) y Chaves (1988), como tolerante en grado variable a la presencia aluminio comparada con otras especies como maíz, soya y muchas legumbres. Esa tolerancia no es sin embargo absoluta, ni tampoco exime a la planta de sufrir algún grado de afectación en su capacidad productiva.

El aluminio soluble en el medio acuoso del suelo puede penetrar al interior de las células radiculares, lo cual inhibe el crecimiento de las raíces y dificulta la absorción de agua y nutrimentos esenciales como fósforo y calcio, entre otros. La toxicidad por aluminio puede causar en la planta alteraciones en el crecimiento, efectos sobre la permeabilidad de la membrana, variaciones nutricionales y de contenido vacuolar; por tanto, puede provocar desviaciones metabólicas y fisiológicas producidas en las células radiculares como sitio primario de la acción del metal. Los puntos de mayor afectación por aluminio corresponden a componentes de la pared celular, lo que altera sus propiedades mecánicas afectando la elongación de las células. La inhibición de la elongación radical está relacionada con daño provocado en las células de la caliptra (llamada cofia o pilorriza, que es una cobertura cónica que rodea al ápice de la raíz), que actúan como sensores en condiciones adversas. Pareciera que la interacción entre el aluminio y la elongación celular es más determinante que la prevaleciente entre el Al y la división celular.

Se ha comprobado que la zona de transición de la raíz es la más sensible a sufrir consecuencias por la presencia y acción del aluminio, ubicándose la misma entre el área de división celular activa y la zona de elongación celular rápida; motivo por el cual, es importante estar siempre atento a la posible presencia de signos o síntomas manifestados en una evidente afectación del ritmo normal de crecimiento y desarrollo de la planta. Ryan *et al* (1993) encontraron que al exponer los 10-15 mm terminales de la raíz del maíz a solución con aluminio, el crecimiento se inhibió, y al hacerlo discrecionalmente solo en su sección terminal (2-3 mm), incluyendo el ápice y el meristemo, ocurrió inhibición al crecimiento; lo cual no sucedió cuando toda la sección radical, excepto la terminal, fue expuesta al metal, mostrando por el contrario un crecimiento normal. Queda claro que el meristemo es el sitio principal de actividad y toxicidad por aluminio en la raíz.

De acuerdo con Figueiredo (2018), "La presencia de aluminio en las plantas provoca un aumento de la producción de hemicelulosa, un carbohidrato componente de la pared celular, dejándola rígida e impidiendo el alargamiento de las células. En casos más extremos, puede haber extravasación del contenido citoplasmático por las membranas, comprometiendo aún más la estructura celular." Agrega el investigador sobre el mismo tema, que "...el aluminio tóxico ejerce influencia negativa en la actividad de la enzima reductasa nitrato, responsable por la asimilación de nitrógeno en las plantas. El resultado es la ocurrencia de alteraciones en los contenidos de clorofilas, pigmentos responsables por la recepción de la luz en una de las fases vitales de la fotosíntesis, de modo que interfiere en el proceso fotosintético."

El apoplasto como espacio extracelular periférico al plasmalema (conocida como membrana plasmática, membrana celular, membrana citoplasmática) de las células vegetales por el que fluyen agua, nutrientes y otras sustancias, es por aproximación el primer compartimento de la raíz que tiene contacto con las diferentes especies químicas de aluminio presentes en el suelo que son potencialmente tóxicas a la planta; siendo, asimismo, la región de mayor acumulación del metal. El plasmalema es una capa o bicapa lipídica de fosfolípidos y otras sustancias que delimita toda la célula, dividiendo el medio extracelular del intracelular, lo que contribuye a mantener el equilibrio entre el interior y el exterior; tiene permeabilidad selectiva, lo que le permite seleccionar las moléculas que deben entrar y salir de la célula. Además de inhibir el crecimiento longitudinal de la raíz, el aluminio provoca deformación, haciéndolas más pequeñas y muy gruesas, lo que disminuye su capacidad para absorber agua y los nutrientes disueltos en la solución del suelo. Al poco tiempo de exponer los tejidos al aluminio, la susceptibilidad y fitotoxicidad se manifiesta por un retraso en el crecimiento de la raíz y el abundante crecimiento de raíces laterales cortas que se tornan gruesas y frágiles, lo que se supone ocurre debido a la alta afinidad del metal con grupos fosfatos, sulfatos y carboxilos, con los cuales forma complejos estables, en particular de Al-fosfato; los cuales constituyen componentes celulares de la pared y membrana celular y ácidos nucleícos, entre otras. Se sabe que pese a que la membrana plasmática es casi impermeable a cationes trivalentes como el Al^{3+}, la presencia de bajas tasas de aluminio tóxico para la célula, pueden ingresar y movilizarse hacia el citoplasma por medio de mecanismos aún poco conocidos. Se indica que el metal afecta la síntesis de ADN y la regulación de las proteínas que controlan la progresión del ciclo celular. Se reconoce que el Al puede ser absorbido a la doble hélice del ADN inhibiendo la separación de las hebras.

La teoría nutricional en el campo vegetal señala que la inhibición que se da en el crecimiento de la raíz ante la presencia de aluminio en el medio, puede ser atribuída a factores como los siguientes:

1) Alteración en la capacidad de intercambio catiónico en la pared celular

2) Variaciones surgidas en el potencial de membrana, que intervienen directamente la toma y retardo en la absorción de cationes divalentes del medio como Ca^{2+} y Mg^{2+}

3) Inducción de estrés oxidativo víaperoxidación lipídica

4) Reemplazo de Mg^{2+} o Fe^{3+} enreacciones celulares

5) Interacción con el citoesqueleto (red de fibras proteícas y otras moléculas que determinan la forma y estructura celular)

6) Interferencia con vías de señalización y

7) Alianza directa con el ADN o el ARN. Se ha encontrado que, al acumularse en la raíz, el aluminio impide la absorción y traslado principalmente de Ca y P a la sección superior de la planta provocando su insuficiencia.

En términos generales se ha encontrado que la presencia de Al^{3+} interfiere con la división y la elongación de las células, modifica la estructura, el funcionamiento y la permeabilidad de las membranas plasmáticas, incrementa la rigidez de la pared celular, disminuye la respiración, obstaculiza la actividad normal de varias enzimas, afecta la absorción de agua y con ello la absorción, transporte y metabolismo de varios nutrientes se ve reducida, motivo por el cual el estrés por Al^{3+} se manifiesta a nivel bioquímico y biológico. El aluminio parece influenciar de manera negativa las enzimas vinculadas con la asimilación del N en las plantas (Conçado *et al* 1999).

Asegura Salas (1996) en torno al tema citando numerosos investigadores, que *"Revisando la literatura es a menudo difícil separar la primera respuesta de la planta, la inhibición del crecimiento radical, con las respuestas secundarias que resultan del daño del sistema radical al producirse aumento en la rigidez de la pared celular, reducción en la duplicación del ADN, la fijación del P en formas menos solubles, disminución en la respiración celular, la interferencia en las enzimas que gobiernan la fosforilación de azucares y la paralización del transporte y la absorción de agua y nutrimentos."*

El calificado y amplio estudio realizado y publicado por Foy *et al* (1978) en relación a la toxicidad de metales y en particular a la generada por el aluminio, resulta un clásico casi obligado de consultar en esta materia.

Formas tóxicas

El aluminio contenido en el suelo puede estar unido por "ligandos" o estar presente en otras formas químicas que no son necesariamente tóxicas para los vegetales, tales como los aluminosilicatos y precipitados como silicatos de aluminio, que se encuentran mezclados con metales como sodio (Na), potasio (K), hierro (Fe), calcio (Ca) y magnesio (Mg). Acontece que en condiciones ácidas (pH <5,0) los iones aluminio convencionalmente conocido como Al^{3+} presentes en su forma hexahidratada $Al(H_2O)_6^{3+}$

se solubilizan y adquieren actividad química, tornándose peligrosos pues afectan los tejidos vegetales del sistema radical. Cuando el pH se eleva, el $Al(H_2O)_6^{3+}$ sufre desprotonaciones sucesivas que conducen a formar $Al(OH)^{2+}$ y $Al(OH)^{2+}$. De acuerdo con Kochian (1995), al elevar el índice de pH a un valor neutro se forma gibsita ($Al(OH)_3$) que es relativamente insoluble; en tanto que el valor de pH común en el citoplasma de la célula (≈pH 7,4) el ión aluminato ($Al(OH)^{4-}$) se constituye en la especie dominante. El Al^{3+} es la forma química del metal que más ha sido relacionada con la fitotoxicidad de los tejidos; sin embargo, mediante mediciones hechas en raíz, se han determinado otras especies de aluminio que son aún más fitotóxicas. La literatura ubica al catión trivalente como la especie más tóxica para las plantas, pues afecta de manera directa los procesos fisiológicos, bioquímicos y metabólicos de la mayoría de las plantas cultivadas.

Las especies de aluminio monohidróxido [$Al(OH)_2^+$, $Al(OH)_2^+$ y $Al(OH)_4^-$], presentes en solución del suelo derivadas de la forma hexahidratada, al elevarse los valores de pH entre 5 ,0 y 6,2 no son tóxicas para las plantas. Se reportan varios tipos de Al tóxico en el medio acuoso, que incluyen Al libre (Al^{3+}), polímeros de Al y complejos de Al de bajo peso molecular. En condición de pH neutro el aluminio se encuentra en forma insoluble como $Al(OH)_3$, limitando la solubilidad de otros compuestos de Al; pero en caso que el pH se incremente a valores cercanos a los encontrados en el citoplasma (pH 7,4) se forma el ión aluminato ($Al(OH)_4$), que representa la especie dominante en esa condición.

Se ha encontrado que el principal factor que regula y controla la concentración de aluminio en la solución del suelo es el pH, como lo demuestra el Cuadro 4 al exponer las ecuaciones de hidrólisis del elemento que se generan en función del valor de pH prevaleciente en el medio. Se infiere a partir de esos resultados, que la solubilidad del Al es baja o nula en el ámbito de pH de 5,5 a 7,5, donde ocurre precipitación y el aluminio queda relativamente insoluble como $Al(OH)_3$ sin afectación sobre las plantas. De igual manera, sucede que la solubilidad del Al se eleva en valores de pH por debajo de 5,5 y encima de 7,5. Con los cambios del pH las formas de Al presente en la solución del suelo también cambian.

En torno a cuál es la forma de aluminio más tóxica para las plantas no existe consenso al respecto; sin embargo, es claro que esa respuesta viene determinada y condicionada por el grado de solubilidad del elemento en el suelo. Se ha encontrado en ese sentido que en pH de 4,0 la forma Al^{3+} se encuentra presente en un estado de mayor solubilidad; siendo por tanto potencialmente más absorbida por las raíces de las plantas y, consecuentemente, resulta más tóxica para los tejidos. Cuando el pH se eleva de 4,0 a 4,5 unidades, la solubilidad del Al^{3+} se ve disminuída, aumentando con ello la concentración de $Al(OH)^{2+}$; observando, asimismo, que en pH de 4,5 la forma $Al(OH)^{2+}$ es más toxica que la de Al^{3+} como lo anotara Moore (1974).

Como se comentó con anterioridad, además del pH la toxicidad del aluminio depende de muchos otros factores del suelo, como son los minerales de arcilla predominantes, el contenido de materia orgánica, las concentraciones de otros cationes y el contenido de fósforo en el medio. Resulta importante también saber, que cuando hay contenidos elevados de materia orgánica en el suelo, esta forma complejos muy fuertes y estables con el aluminio que favorecen una mayor tolerancia al elemento sin afectar los rendimientos; razón por la cual, suelos ricos en materia orgánica presentan menores problemas con el Al, lo cual se favorece también con su incorporación.

Cuadro 4.

Hidrólisis del aluminio en función del grado de acidez del medio.

Hidrólisis del Al							pH del suelo	Solubilidad del Al
Al^{3+}	+	H_2O	⟷	$Al(OH)^{2+}$		H^+	≤ 4,0 a 4,5	↑ Aumenta
$Al(OH)^{2+}$	+	H_2O	⟷	$Al(OH)_3^+$		H^+	4,5 a 5,5	
$Al(OH)_2^+$	+	H_2O	⟷	$Al(OH)_3$		H^+	5,5 a 7,5	Baja o nula
$Al(OH)_3$	+	H_2O	⟷	$Al(OH)_4^-$		H^+	7,5 a 9,0	↓ Aumenta
$Al(OH)_4^-$	+	H_2O	⟷	$Al(OH)_5^-$		H^+	9,0 a 9,5	
$Al(OH)_2^-$	+	H_2O	⟷	$Al(OH)_6^-$		H^+	9,5 a 10,0	

Fuente: McLean (1976).

Al intervenir y modificar la condición de acidez del suelo (pH), la afectación de los procesos biológicos y microbiológicos es evidente y muy sentida, pues muchos procesos naturales vinculados con la actividad bacterial asociada con la materia orgánica y su mineralización se ven limitados, entre ellos la fijación de nitrógeno, la amonificación y la nitrificación, entre otros (Chaves 2021bcd). La actividad microbiana es importante y necesaria para proveer y mantener la dinámica microbiológica, un estado de fertilidad del suelo y nutricional satisfactorio de las plantas. Los microorganismos del suelo conducen la biodegradación de la materia orgánica y constituyen un importante reservorio lábil de C, N y P, entre otros.

Mecanismos de tolerancia

En torno a este importante y trascendental tema, Chaves (1988) realizó una amplia revisión de literatura en la cual hizo un abordaje que le permitió ubicar los mecanismos vegetales de tolerancia al aluminio, lo cual se transcribe seguidamente:

"Los mecanismos de tolerancia de las plantas al aluminio son varios, no existiendo un único que explique por completo la diferenciación entre especies y entre cultivares de la misma especie. La descripción detallada de esos mecanismos ha sido hecha por varios investigadores como, por ejemplo, Foy et al (1978), Foy (1984) y Marschner (1986). Esos mecanismos son atribuídos a ciertas propiedades y comportamientos morfológicos, fisiológicos y bioquímicos, entre los cuales se destacan:

a. **Variaciones Ontogénicas y Diferencias Anatómicas:** la estructura radicular interpone una resistencia física (exclusión) al paso del Al al protoplasma, a través de las estrías de Caspary de la endodermis. Asimismo, factores de tiempo o velocidad de crecimiento y diferenciación de los tejidos tienen efecto importante en la prevención al Al. Otros elementos, como espesura del tejido cortical, estructura de la pared celular y ápice radicular y profundidad del tejido meristemático apical, pueden caracterizar diferencias en cuanto a tolerancia.

b. **Capacidad de Modificar el pH de la Rizosfera:** efecto promovido por la liberación de radicales (OH^- y $HCO3^-$) de los exudados metabólicos, estableciendo reacciones de precipitación con Al en el exterior de la raíz.

c. **Capacidad de Intercambio Catiónico Radicular Variable:** en altas concentraciones, los iones pueden, conjuntamente con H+, concurrir por los sitios de intercambio catiónico en el espacio de Donnan, disminuyendo la CTC de la raíz, lo que modifica la permeabilidad de la membrana plasmática. Especies con alta CTC (dicotiledóneas) son, generalmente, menos tolerantes al Al, comparadas con las de menor CTC (monocotiledóneas).

d. **Absorción y Translocación de Aluminio:** el Al forma complejos estables (efecto quelante) con varios solutos orgánicos de peso molecular variable, como los polifenoles y ácidos orgánicos (ácido cítrico), que impiden su absorción, concentración y translocación interna. En general, la concentración de Al en las raíces se asocia negativamente con la producción.

e. **Absorción, Translocación y Utilización de Calcio:** la tolerancia diferencial al Al está asociada con la mayor capacidad de la planta para absorber y transportar el Ca en presencia del aluminio. Así, una planta con alta translocación de Ca es poco sensible al Al.

f. **Absorción Diferencial y Translocación de K y Mg:** de forma semejante al Ca, estos elementos también reflejan la tolerancia al Al, pues plantas susceptibles presentan deficiencias en los mismos.

g. **Metabolismo de Absorción de Fósforo:** el Al forma complejos Al-P que reducen la disponibilidad del P en la solución externa de las raíces. Esas reacciones de precipitación y/o adsorción ocurren también en el espacio libre aparente de la raíz, siendo independientes de los procesos metabólicos."

En el mismo sentido Marschner (1986) resume y simplifica la defensa de las plantas en tres mecanismos básicos:

1) Exclusión de absorción
2) Inactivación en las raíces
3) Acumulación en las partes aéreas

Por su parte, Conçado *et al* (1999) aseguran que no todas las especies vegetales responden de igual manera al estrés por aluminio, habiendo sido demostrada la tolerancia diferencial al elemento entre cultivares de diferente especie. Expresan esos investigadores, que *"Clásicamente, la tolerancia está dividida en dos grupos principales: 1) tolerancia en consecuencia de mecanismos de exclusión, donde el aluminio está impedido de alcanzar sus sitios de toxicidad y, así, conferir su efecto fitotóxico, y 2) tolerancia consecuencia de mecanismos internos, en que el aluminio consigue penetrar en el interior de la célula, más tiene su acción fitotóxica neutralizada."*

Siendo más específicos, algunos autores relacionan y asocian la baja Capacidad de Intercambio Catiónico (CTC) de la pared celular de la raíz con la tolerancia al aluminio, indicando que raíces con baja CTC adsorben menos Al en relación con las de alta capacidad; lo cual no es sin embargo de consenso general. También se teoriza en torno a la acción selectiva de la membrana plasmática en cuanto a tolerancia, accionada por las propiedades eléctricas de su superficie, manifestada por la densidad de cargas negativas presentes, donde a más carga menos tolerancia por mayor asociación y afinidad con el catión. Se supone que una proporción importante del Al contenido en el sistema radical se fija en el espacio libre.

La tolerancia al aluminio puede darse también por la presencia de ácidos orgánicos y polifenoles que detoxican el Al presente por quelación; como ocurre particularmente con la planta de té, la cual absorbe una gran cantidad de Al, el cual almacena en las hojas más viejas donde es luego detoxificado por compuestos orgánicos.

Pese a la contundencia de sus efectos, hay plantas que reportan tener algún grado importante de tolerancia a la exposición al aluminio, el caso del té (*Camelli sinensis*) y la botarrama (*Vochysia ferruginea*) son las más reconocidas entre otros vegetales. Indica Foy (1974) al respecto, que *"Las plantas superiores contienen normalmente cerca de 200 ppm de Al en la materia seca. En el té, los niveles pueden llegar a ser tan altos como 2000 a 5000 ppm, y según Chenery (1955) el Al es necesario para el crecimiento normal del arbusto de té."* De manera general, se ha encontrado que el contenido de Al en las raíces es mucho más alto que en las secciones superiores del vegetal.

Métodos de medición

El método empleado para medir y evaluar el nivel de tolerancia de las plantas al aluminio resulta determinante en la búsqueda de materiales genéticos que cuenten con algún grado importante de tolerancia al mismo. Varios criterios han sido desarrollados en esa orientación con el fin de elucidar los procesos genéticos, fisiológicos y metabólicos ligados a la tolerancia al metal; además de buscar una mayor eficiencia en la selección para ese carácter.

Entre los métodos empleados pueden mencionarse, entre otros, los siguientes:

a) **Evaluaciones de campo** cuya representatividad de las condiciones del entorno es buena, aunque son lentas, debiendo llegar hasta el final del ciclo vegetativo; son además muy onerosas. La interferencia de factores poco controlables como el clima puede distorsionar los resultados.

b) **Evaluaciones en ambiente controlado (invernadero, laboratorio)**, sea empleando suelo o solución nutritiva, aportan un mayor control de factores interventores. Su aporte se concentra en minimizar la interferencia y sesgo generado por los mismos, distorsionando el efecto del aluminio.

c) **Uso de soluciones nutritivas** para desarrollar las plantas, permiten evaluar de manera rápida un grupo elevado de genotipos, con ahorro importante de recursos económicos y espacio físico. Admite aislar el efecto de toxicidad y ejercer un control más preciso de los factores interventores que podrían enmascarar efectos.

d) **Empleo de colorantes** como acontece con el empleo de hematoxilina para colorear la raíz, lo que permite discriminar genotipos tolerantes de sensibles de manera precoz y no destructiva. El método se basa en la propiedad colorimétrica de la hematoxilina, que genera una coloración azul-purpura se acompleja con el aluminio.

e) Determinación de la **concentración de calosa (polisacárido vegetal importante para reparar sitios con heridas mecánicas en las plantas. Se produce en la pared celular a partir de la enzima calosa sintasa) en ápices radiculares.**

f) Medición de **tasas de actividad fotosintética.**

g) Medición del **nivel de lignina**.

h) Evaluación de las **tasas de exudación de algunos ácidos orgánicos.**

i) Determinación de la **síntesis de proteínas genotipo específica.**

j) **Técnicas de biología celular y molecular**.

Mecanismos genéticos de defensa

La generación y empleo de genotipos de caña tolerantes a la toxicidad por aluminio, representa sin lugar a dudas una de las mejores y más efectiva estrategia para el uso y manejo agrícola de los suelos ácidos; lo cual, aunado al correcto y oportuno tratamiento del substrato, incrementa la probabilidad de éxito de poder desarrollar una agricultura competitiva y rentable en esas condiciones. La interferencia de factores del entorno, principalmente ambientales, limita y torna difícil evaluar y seleccionar genotipos con la seguridad deseada, lo cual conduce a reconocer y aceptar, que el fenotipo de una planta aporta y constituye una medida imperfecta del verdadero potencial intrínseco de la misma. Cabe señalar que la literatura reporta la presencia de alteraciones en la expresión génica por causa del estrés ambiental. Confirman Conçado y compañeros (1999) que, el aislamiento de genes inducidos por aluminio ha sido ya realizado con éxito, lo que abre sin lugar a dudas un espacio tecnológico muy interesante para el trabajo biotecnológico.

En este sentido, nuevas variedades de plantas son originadas a partir de la selección de genotipos y biotipos sobresalientes. Como se ha reiteradamente señalado, la toxicidad por Al^{3+} constituye el factor más limitante del crecimiento y desarrollo de las plantaciones de caña cultivadas en suelos ácidos, sobre todo si el pH es <5,5, agudizando aún más el problema en valores inferiores sobre todo en el ámbito de 4,0 a 5,0. La raíz es en este caso el primer órgano afectado por su presencia, motivo por el cual la severidad en la inhibición de la elongación radicular establece una definición clara y se constituye en un referente e indicador determinante para valorar e interpretar la posible tolerancia o susceptibilidad de las variedades a la presencia de aluminio en el medio; la adaptación y posible solución inicia por tanto por este órgano. Se ha encontrado que las concentraciones del metal afectan de manera diferencial la elongación de la raíz, verificando que la concentración de aluminio radicular es en los suelos ácidos superior a la encontrada en la sección aérea de la planta; a partir de lo cual se infiere que los niveles de aluminio presentes en el suelo tienen efecto directo sobre la producción de caña. Señala Salas (1996) al respecto, que la división celular se paraliza en pocas horas (1-2 hr) des-

pués de exponer la raíz de la planta a soluciones con aluminio; la cual, al reactivarse de nuevo, se torna muy lenta al compararla con raíces no expuestas.

Wheeler *et al* (1992) estudiando por citología ápices de raíz de trigo, no encontraron evidencia de daño por aluminio en cultivares tolerantes cuando fueron expuestos al metal; lo cual si aconteció en los susceptibles después de tres días.

Se han establecido en plantas dos **mecanismos generales de tolerancia al aluminio, nominados como apoplástico y simplástico.** El primero es simple y consiste en asegurar la exclusión del aluminio para prevenir su penetración al interior de las células, lo que involucra y establece la creación de barreras físicas o la exudación de compuestos a través de la raíz; en tanto que el segundo mecanismo, involucra la detoxificación y eliminación interna del elemento.

Entre las posibles barreras físicas que pueden eventualmente evitar el ingreso del metal en las plantas se destaca la permeabilidad selectiva de la membrana plasmática, la formación de una barrera de acidez (pH) en la zona radicular (rizosfera); o también en el apoplasma o apoplasto de la raíz e inmovilización del aluminio en la pared celular por producción de calosa (polisacárido que impregna algunas membranas y tapona los agujeros de las paredes transversales de los tubos cribosos).

Los compuestos fenólicos y ligandos quelatantes representan las principales sustancias exudadas por la raíz que están en capacidad de evitar la entrada del aluminio fitotóxico a la célula radical. Señalan Epstein y Bloom (2006) al respecto, que *"Un componente de tolerancia es la exudación radicular de ácidos orgánicos-tanto malato, citrato, oxalato cuanto ma*lato y citrato, dependiendo de la especie- que forman complejo con Al^{3+} en la rizosfera." Agregan adicionalmente, que "Algunas especies exudan ácidos orgánicos apenas cerca del ápice radicular, el tejido más sensible, y apenas en respuesta a la presencia de Al^{3+} en la rizosfera, disminuyendo entonces el costo metabólico de la tolerancia al aluminio."

Plantas como arroz, trigo, cebada, maíz y soya tienen la capacidad de modificar el pH de la rizosfera y precipitar el aluminio.

La **detoxificación interna** del aluminio por su parte, sucede cuando el metal ha penetrado al simplasma celular (continuum del citoplasma que favorece su interconexión), siendo quelatado por aniones de carboxilatos que son secuestrados en vacuólas (Carreño y Chaparro-Giraldo 2013).

La tolerancia al aluminio es una característica compleja de abordar y más de resolver, que por su naturaleza genética parece ser poligénica, al estar controlada por la acción de varios genes y no exclusivamente al efecto de uno específico, como lo señalaran Cançado *et al* (1999). Anotan esos mismos investigadores, que *"En algunos estadíos del desarrollo de la planta, un mecanismo puede ser más importante que otro y, por tanto, el control genético simple de la tolerancia al aluminio puede existir en estadíos específicos del crecimiento."* La intensidad del estrés se identifica también como un factor que puede tener influencia marcada en el grado de tolerancia, pues la expresión genética puede ser influenciada y alterada por el grado de estrés que tenga la planta al aluminio (Chaves 2021a). Asegura K0chian (1995) al respecto, que *"En general para la gran mayoría de las especies vegetales, la tolerancia al aluminio es tenida como característica dominante, poligénica, que puede ser controlada por uno o más genes de acción mayor o varios genes modificadores."*

La vía genética busca habilitar la transferencia de genes mediante el empleo de mecanismos tradicionales de hibridación mendeliana o mutaciones; también mediante el empleo de modernos procedimientos moleculares con el uso de la selección asistida con marcadores y herramientas biotecnológicas mediante la ingeniería genética. La identificación y manipulación de genes de interés, se ha visto favorecida con el advenimiento, desarrollo y perfeccionamiento de las técnicas biotecnológicas, donde el uso de marcadores moleculares tipo isoenzimas cumplen un papel determinante en este esfuerzo tecnológico. En este proceso se torna necesario

entender e identificar a nivel molecular, la presencia de genes y los mecanismos que confieren tolerancia al aluminio, entre los cuales se han identificado los que operan mediante la detoxificación interna y la exclusión del aluminio en el medio. Los genes involucrados en codificar proteínas transportadoras de aniones orgánicos u otros compuestos, así como factores de transcripción y enzimas detoxificadoras de especies reactivas de oxígeno (ROS); se ha comprobado, que son los que potencialmente están en capacidad de proveer alguna tolerancia al aluminio. Algunos genes responsables de inducir tolerancia se han identificado en plantas de arroz.

Mencionan Conçado *et al* (1999) citando a Zhang *et al* (1995), algunas evidencias de reducción de la absorción de Al por periodos cortos de tiempo, mediante el uso de inhibidores de la síntesis proteíca responsable de transportar el Al a través de la membrana plasmática, propiamente con cicloexamida, las cuales no tenían sin embargo efecto en cultivares tolerantes de trigo. Suponen esos investigadores a partir de esos resultados, que la expresión normal de esos genes es suprimida en genotipos tolerantes al aluminio. Aseguran, asimismo, no en- contrar aun evidencias directas de la existencia de proteínas de membrana específicas para intervenir el transporte del aluminio. Otros autores vinculan la inhibición del influjo del ión Ca^{2+} al interior de la célula por causa del Al como causa de su toxicidad.

La posible obtención de variedades tolerantes o menos susceptibles al efecto del aluminio, puede y debe maniobrarse preferentemente por medio de tres estrategias consideradas como principales, como es el caso de:

1) **Mejora genética tradicional-convencional**, basada en principios de cruce y recombinación sexual mediante hibridaciones dirigidas, utilizando parentales y sus descendientes seleccionados por sus antecedentes, conducidos y operados en dirección a resolver una característica agronómica determinada y deseada. Este procedimiento es lento y no asegura resultados positivos en lo nutricional ni en lo productivo.

2) **Mejoramiento por la vía molecular**, que implica el desarrollo de poblaciones segregantes específicas para la tolerancia al estrés mineral de interés por resolver; para lo cual se deben identificar marcadores moleculares apropiados que contribuyan a la tolerancia al estrés por aluminio, para posteriormente realizar selección asistida por marcadores. El procedimiento es rápido, muy especializado y oneroso.

3) **Ingeniería genética** conservando la integridad del genotipo parental, insertando solo una pequeña porción adicional de información que controla la característica deseada introducir. Igual al anterior.

En esta materia se considera que el mejoramiento por la vía molecular resulta más favorable para los fines y objetivos procurados, ya que permite mediante el empleo de marcadores moleculares, evaluar con más rapidez un mayor número de genotipos al mismo tiempo, lo cual puede facilitar y agilizar la selección de líneas superiores tolerantes al aluminio en menos tiempo. Cuando la estrategia es operada en el campo, las formas y las concentraciones de aluminio varían en espacio y tiempo, haciendo más onerosa, compleja, menos

representativa y prolongada esta labor. Estas consideraciones resultan determinantes para decidir la mejor vía a seguir de acuerdo con las condiciones disponibles y existentes.

Situación nacional

En varias oportunidades y por diferentes medios se ha mencionado, demostrado y hecho énfasis en las condiciones heterogéneas y cambiantes que se observan en las disímiles regiones y localidades geográficas que producen comercialmente caña de azúcar en Costa Rica; de lo cual dan fe las publicaciones realizadas por Chaves (1999b, 2001, 2017b, 2020c) y Chaves y Chavarría (2021), donde se consigna, recoge y resume mucho de lo realizado en el país en este importante y determinante campo.

Entre toda la materia que cubre ese complejo y determinante factor de la productividad agroindustrial, el tema de la acidez y corrección de los suelos resulta de especial preferencia, virtud de los efectos, las implicaciones negativas e impactos que provoca y afectan el desarrollo normal de las plantaciones de caña, comprometiendo su estabilidad productiva comercial, como lo ha manifestado y consignado Chaves (1988, 1991, 1993, 1999a, 2002, 2019c, 2020cd, 2021).

No hay duda en reconocer que la acidez del suelo es una condición que está presente y aqueja en grado variable a buena parte de las regiones que producen caña en el país, afectación que se da, como se ya se comentó, de manera directa y también indirecta, interviniendo y afectando la integridad, el balance y la estabilidad general de las plantaciones y emprendimientos agro empresariales.

En el Cuadro 5 se expone una am- plia valoración e interpretación de esa condición exclusivamente para 30 cantones de antecedente y trayectoria cañera conocida, extraídos del amplio estudio realizado por Méndez y Bertsch (2012) para los suelos nacionales de uso agropecuario. La muestra aplicada y de nuestro interés comprende un total de 13.338 análisis de laboratorio, donde se interpretó la condición de los suelos de esas localidades, expresada en porcentaje, ubicadas para varios indicadores de carácter químico referentes y representativos de esa condición.

Por tratarse de un tema de acidez solo se utilizaron variables relacionadas e indicadoras de esa condición, como son: valor de pH, Acidez Intercambiable (Al^{3+} + H^{+}) e índice de Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE = Ca^{+2} + Mg^{+2} + K^{+} + Acidez Intercambiable) dados en cmol(+)/l; adicionalmente se incorporó el Grado de Saturación por Acidez ((Acidez Intercambiable/CICE) * 100) expresado en porcentaje. Importante señalar que dichos indicadores fueron referidos a su condición extrema más afín con la acidez y presencia de aluminio asimilable en el medio, como son: pH < 5,5; Acidez en grado medio (0,5 -1,5) y alto (> 1,5 cmol(+)/l); CICE bajo (≤ 5 cmol(+)/l) y Saturación media (10-50%) y alta (> 50%).

Los valores de grado medio incorporados operan en este caso como precursores y predecesores de un posible problema futuro caso se agudicen; siendo los de nivel alto los más reveladores para lograr interpretar y satisfacer con mayor fidelidad e inmediatez el objetivo pretendido. Como referente importante y de muy alto vínculo con la materia abordada, como ya se comentó, se anotan los Órdenes y Subórdenes taxonómicos de los suelos predominantes en cada localidad sembrada con caña de azúcar, como lo señalaran Chaves (2017a) y Chaves y Chavarría (2017ab).

Cuadro 5.

Caracterización química de suelos (13.338 muestras) de 30 cantones cañeros de Costa Rica respecto a su acidez.

Región / cantón	No. Muestras	PH Bajo <5,5	Acidez (Al^{3+} + H^+) Medio 0,5-1,5	Acidez (Al^{3+} + H^+) Alto >1,5	CICE Bajo ≤ 5	Saturación Acidez Medio 10 - 50	Saturación Acidez Alto >50	Taxonomía Dominante (%)	
		Unidades	cmol(+)/l			%		Orden	Suborden
GUANACASTE	**3.363**								
Liberia	277	48	16	4	6	9	2	Inceptisol (35,0%)	Ustepts (34,6%)
Carrillo	1.087	2	1	0	0	0	0	Vertisol (31,2%)	Usterts (31,2%)
Cañas	1.216	2	1	0	0	0	0	Mollisol (23,4%)	Ustolls (23,4%)
Abangares	52	6	8	4	0	4	0	Entisol (8,8%)	Orthents (7,9%)
Bagaces	532	9	2	0	1	0	0	Ultisol (1,3%)	Ustults (1,3%)
Santa Cruz	74	4	4	0	3	0	0	Alfisol (0,3%)	
Nicoya	125	15	2	2	0	1	0		
VALLE CENTRAL	**2.348**								
Alajuela	714	34	20	7	12	18	3	Andisol (38,8%)	Ustands (34,6%)
Atenas	41	85	27	37	2	34	7	Ultisol (29,1%)	Ustepts (23,7%)
Grecia	367	89	31	50	47	45	33	Inceptisol (24,2%)	Humults (19,4%)
Naranjo	256	86	45	26	22	54	7	Entisol (4,4%)	Ustults (9,2%)
Poas	302	75	37	12	30	39	6	Vertisol (3,5%)	Orthents (4,4%)
Valverde Vega	77	71	47	0	12	27	0		
San Mateo	48	73	40	15	8	27	2		
Palmares	97	78	15	42	2	38	9		
San Ramón	273	81	32	15	21	35	7		
Santa Bárbara	104	42	22	5	16	25	1		
Puriscal	69	86	25	35	4	38	3		
ZONA NORTE	**2.694**								
San Carlos	1.690	74	29	19	22	31	8	Ultisol (47,3%)	Udults (44,7%)
Los Chiles	1.004	74	21	3	11	17	1	Inceptisol (44,6%)	Udepts (34,2%)
								Entisol (5,5%)	Aquepts (10,3%)
								Andisol (2,3%)	Orthents (5,1%)
								Histosol (0,3%)	Humults (2,6%)
TURRIALBA/JV	**3.744**								
Turrialba	879	72	36	23	20	39	7	Andisol (53,7%)	Udands (53,7%)
Jiménez	963	75	39	20	22	44	3	Inceptisol (31,1%)	Udepts (31,1%)
Paraíso	759	60	17	33	4	32	8	Ultisol (15,2%)	Humults (15,2%)
Alvarado	487	46	25	2	30	26	0		
Oreamuno	656	42	22	2	20	20	0		
PACIFICO CENTRAL	**442**								
Puntarenas	359	22	10	0	2	3	0	Inceptisol (79,1%)	Ustepts (79,1%)
Esparza	30	23	10	7	17	13	0	Entisol (15,8%)	Orthents (12,1%)
Montes Oro	53	42	17	2	23	23	0	Ultisol (5,1%)	Ustults (4,2%)
									Aquents (3,7%)
									Humults (1,9%)
ZONA SUR	**747**								
Pérez Zeledón	561	72	39	23	38	37	17	Ultisol (95,3%)	Humults (95,3%)
Buenos Aires	186	60	29	14	7	15	6	Entisol (2,8%)	Fluvents (2,8%)
								Inceptisol (1,9%)	Ustepts (1,9%)

Fuente: Elaborado por el autor con información de Méndez y Bertsch (2012), Chaves (2017a) y Chaves y Chavarría (2017ab).
CICE = Capacidad Intercambio Catiónico Efectiva (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Acidez Intercambiable).
Nota: Los valores corresponden al porcentaje de muestras analizadas que se ubicaron en la condición particular anotada.
Interpretación: Rojo (> 61%)= severa, alta incidencia; Amarillo (40-60%)= de cuidado, debe prestarse atención y manejo adecuado.

Partiendo de esas consideraciones, pueden inferirse y concluirse a partir del Cuadro 5, entre otras cosas, lo siguiente:

1) Como punto de referencia genérica importante y muy reveladora, vale mencionar que la presencia de suelos intemperados, degradados con reconocido antecedente ácido y alta Acidez Intercambiable favorecida por las concentraciones elevadas de aluminio asimilable, como son los suelos del Orden taxonómico **Ultisol**, esta geográficamente demarcada en prioridad de relevancia como sigue: Zona Sur (95,3%), Zona Norte (47,3%), Valle Central (29,1%), Turrialba/JV (15,2%), Pacífico Central (5,1%) y Guanacaste (1,3%). Como Sub Orden el tipo **Humults** es el más encontrado dentro de la organización taxonómica. Esta condición de origen pedogenético determina y proyecta fehacientemente la situación existente y esperable en relación con la condición de los suelos respecto al tema abordado.

2) En los suelos del orden Ultisol con presencia predominante de la arcilla caolinita (1:1), el silicio se lava mientras que las concentraciones de aluminio y hierro (forma oxidada) se incrementan y concentran como sesquióxidos (óxido que contiene tres átomos de oxígeno con dos átomos (o radicales) de otro elemento como Al o Fe), confiriendo por ello una coloración pardo-rojiza o rojiza característica a los mismos.

3) La condición de acidez de los suelos sembrados con caña de azúcar en Costa Rica es geográfica y territorialmente muy diferente, no teniendo cabida ni siendo por ello válidas las generalizaciones.

4) Por su condición, los cantones que mayores problemas presentan con las variables de acidez son según indicador los siguientes: **pH bajo** (< 5,5): Grecia, Naranjo, Puriscal, Atenas, San Ramón, Palmares, Jiménez, Poas, San Carlos, Los Chiles, San Mateo, Pérez Zeledón, Turrialba y Valverde Vega, los cuales superan el 71% de presencia según análisis realizados, valor considerado como muy preocupante.

5) En el caso de la Acidez Intercambiable la situación más crítica, aunque no extrema, se ubica en Grecia, Valverde Vega, Naranjo, Palmares y San Mateo, respectivamente.

6) Por su parte, el cantón de Grecia presenta una condición baja en su CICE lo que denota bajo contenido en bases catiónicas y alto en Acidez Intercambiable.

7) La Saturación por Acidez no parece ser alta y preocupante en ninguno de los 30 cantones evaluados, aunque si de cuidado en algunos donde la situación podría eventualmente agravarse si no se toman las medidas correctivas pertinentes inmediatas, como acontece particularmente en Naranjo, Grecia y Jiménez.

8) Es notorio adicionalmente, como algunas localidades en particular presentan condiciones que ameritan su atención y tratamiento, como sucede particularmente con los cantones de Grecia, Naranjo, Jiménez, Valverde Vega y San Mateo.

9) Los antecedentes y la larga experiencia particular en el campo cañero, han demostrado con bastante certeza y confiabilidad que hay otras localidades que, aunque no manifestaron en el estudio indicado una condición de acidez limitante, se conoce que son problemáticos por su condición de alta acidez, como acontece con los cantones de Pérez Zeledón, Turrialba, Atenas, Los Chiles, San Carlos y Buenos Aires, entre otros; lo que sugiere tenerlo y tomarlo en consideración al momento de formular programas de fertilización comercial. En el Cuadro 6 se expone un detalle local de los análisis realizados en la Zona Sur, donde siete distritos del lugar evidenciaron tener serias limitantes con la acidez del suelo y sus componentes.

Los estudios de Barrantes y Chaves (2020), Calderón y Chaves (2020), Chaves y Barquero (2020), Angulo, Rodríguez y Chaves (2020), amplían en lo particular para la condición específica de la Zona Sur, Turrialba/JV, Zona Norte y Guanacaste, respectivamente.

10) Es definitivo que solo el análisis físico-químico detallado del suelo del lugar específico donde esta situada la plantación, puede constatar y rendir crédito sobre la condición particular de una determinada localidad y unidad productiva, motivo por el cual lo prudente y recomendable es proceder con el mismo de manera periódica y con buena representatividad.

Cuadro 6.

Condición de acidez de suelos cañeros de la Zona Sur según distrito.

Distrito	pH	Acidez Intercambiable	CICE	Saturación Acidez
		cmol (+) / 1		%
Cajón	4,3	3,05	5,41	56,4
San Isidro	4,3	2,10	3,71	56,6
Buenos Aires	4,8	1,70	5,48	31,0
San Pedro	4,6	1,70	3,65	46,6
Volcán	4,5	1,54	4,18	39,4
Potrero Grande	4,7	1,02	9,30	10,6
General Viejo	5,3	0,55	6,85	8,7
Promedio	4,7	1,48	5,63	31,5
Rango Óptimo *	5,5- 6,5	0,51 - 1,5	5,01-25	10,1-50

* De acuerdo con Méndez y Bertsch (2012).

¿Cómo actuar y qué hacer?

El problema de la acidificación vinculada directamente con la presencia de acidez activa e intercambiable en el suelo no es un asunto fácil de comprender y más aún de resolver, pues la naturaleza y características de los factores y mecanismos implicados, hacen que las soluciones sean complejas y requieran de mucho tiempo para poder intervenir con efectos benéficos y favorables, los elementos generadores de afectación al sistema agroproductivo. Sin embargo, existen algunas acciones que resulta importante tener presente y válido implementar para confrontar con algún grado relativo de éxito la afectación esperada, entre las que están entre otras las siguientes:

- Prevención
- Evitación y exclusión
- Recursos e insumos químicos
- Opción genética

No cabe la menor duda que la mejor forma de evadir tener que sufrir los embates y efectos negativos de los factores y elementos vinculados con la acidez, como es el caso del aluminio, contrarios al desarrollo normal de las plantas, lo representa la **Prevención**. La medida pasa a su vez por la debida, oportuna y correcta planificación y administración de labores y actividades, con lo cual es posible considerar y prever con la antelación debida, las acciones que es necesario implementar para mitigar posibles y eventuales impactos. Las acciones involucradas incluyen ubicar la mejor y más conveniente localidad geográfica (zona, finca, lote) de siembra, definir las fechas posibles de cultivo, realizar el muestreo y análisis representativo del suelo, contar con información (serie de tiempo amplia) climática actualizada y específica del lugar, tener información sobre antecedentes de manejo agronómico de la finca, definir la variedad por cultivar y las labores por desarrollar. Entre todas ellas no hay duda que la decisión implicada con la nutrición y fertilización adquiere prioridad, lo que involucra tener que, de ser necesario, corregir y acondicionar el suelo en cuanto a su acidez; decisión que debe ser prevenida y estructurada con suficiente antelación en todos sus alcances técnicos y económicos.

Por **evitación y exclusión** debe entenderse la decisión sabia, juiciosa pero extrema por parte del agricultor, administrador o inversionista de la empresa involucrada, de no enfrentar por prudencia un problema complejo y difícil de resolver como son los vinculados con acidez intercambiable y aluminio soluble; lo cual significa procurar evitarlo o excluirlo de previo, antes de incurrir en esfuerzos infructuosos, pérdidas productivas, gastos innecesarios y sin

retorno. Es una realidad que, si no se cuenta con los recursos y mecanismos necesarios para atender con la capacidad necesaria una situación grave de acidez y toxicidad por aluminio, lo mejor es obviarla y proceder por otra vía de solución, como puede ser inclusive tener que cambiar de cultivo, buscar plantas tolerantes o en definitiva aceptar los impactos y consecuencias que se van a tener con el acto agrícola. Esta medida no puede obviarse y tampoco puede ser absoluta, pues los alcances pueden ser parciales y dirigidos a ciertas áreas específicas de la finca, donde el problema es mayor.

El uso de **recursos e insumos químicos** es la estrategia y medida de solución más común y tradicional empleada por los agricultores, la cual además de efectiva y de muy alta rentabilidad, resulta relativamente de bajo costo y facilidad de implementación en el campo, cuando es empleada correctamente.

Se sabe que los altos niveles de aluminio presentes en el suelo, influyen negativamente sobre la absorción de otros cationes esenciales, como también que los altos niveles de Ca pueden reducir y mitigar sus efectos dañinos (Figuras 2 y 3). Como se anotó oportunamente, son numerosos los productos y las fuentes entre carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos que existen en el comercio para neutralizar la acidez del suelo representada básicamente por su contenido de aluminio activo en el medio (Chaves 1988, 1993, 1999ab, 2002, 2017b, 2019c, 2020c). Como se ha indicado al respecto, el sulfato de calcio (yeso agrícola) no representa por naturaleza química (base débil) un corrector de acidez, aunque si un medio para promover el intercambio catiónico y movilización del aluminio presente y adsorbido en la micela del suelo a nivel sub superficial, transportándolo a puntos donde no causa daño (Chaves 1988, 1991).

Figura 2.
Efecto de la corrección de la acidez del suelo.

Figura 3.
Efecto corrección de la acidez sobre el sistema radicular.

En lo concerniente a causa-efecto inducidos por la fertilización comercial, se ha encontrado que el empleo de fuentes nitrogenadas genera efectos diferenciales sobre la solubilidad y toxicidad por aluminio de acuerdo con la fuente empleada, dándose en las fuentes amoniacales (NH^{4+}) y nítricas (NO^{3-}) la excreción del ión H+ vinculada con la disminución del pH a nivel de raíz (Chaves 2021cd). Se tiene por demostrado, que el efecto tóxico del Al sobre la disminución del crecimiento es considerablemente mayor cuando se emplean fuentes amoniacales en relación con las nítricas.

El uso de **materia orgánica** representa también una vía de manejo agronómico muy efectiva para procurar contrarrestar los efectos de la acidez, pues como es conocido, la misma forma complejos órgano-minerales muy fuertes con el metal inhibiendo sus efectos; motivo por el cual, suelos ricos en componentes orgánicos, sean naturales o mejorados mediante abonamiento, pueden tolerar contenidos de aluminio más elevados que otros de carácter mineral que no la tengan. La incorporación de materiales orgánicos viene a ser una buena medida para contrarrestar los problemas generados por el Al^{3+} lo que también involucra otros beneficios adicionales complementarios.

La identificación, selección, liberación y empleo comercial de **materiales genéticos tolerantes** aptos, dotados con algún grado de rusticidad y tolerancia a la acidez y particularmente a la toxicidad ejercida por las concentraciones de aluminio presentes en el suelo, resulta sin lugar a dudas una estrategia de mucho valor en las acciones viables por aplicar, para procurar acondicionar y adaptar las plantaciones a las condiciones adversas impuestas por ese factor mineral estresante (Chaves 2021a). Es definitivo que las especies y biotipos entre las mismas especies, difieren considerablemente en cuanto a su grado de tolerancia al exceso de Al soluble e intercambiable. Existe en el país suficiente evidencia pragmática de campo , que de-

muestra que esta propiedad es posible de alcanzar y aprovechar.

Las variedades de caña sembradas comercialmente con éxito por muchos años en las diferentes localidades que han mostrado tener problemas serios de acidez activa promovida por aluminio y acidez, son muestra fehaciente de que el recurso genético es una opción viable y muy efectiva de solución. El Cuadro 3 ubica con bastante detalle y certeza los lugares problemáticos por cantón y los cinco principales clones comerciales actualmente cultivados en los mismos (Chaves et al 2019), lo que permite visualizar con base en los progenitores que les dieron origen, las acciones técnicas a seguir en el campo de la hibridación y mejora direccionada de plantas promisorias a futuro.

Como se aprecia e infiere a partir de la información contenida en dicho cuadro, la diversidad prevaleciente en el país en materia genética es muy amplia, lo que demuestra y ratifica una vez más el gran trabajo técnico desarrollado por muchos años en esta importante y determinante área tecnológica, procurando encontrar variedades particulares que muestren adaptación a las heterogéneas condiciones prevalecientes en los diferentes entornos agro productivos existentes en el país, como lo demostrara Chaves (2018, 2019ab). No cabe la menor duda en reconocer que el campo genético ofrece importantes oportunidades de lograr superar la barrera del "estrés mineral", impuesta por la alta acidez intercambiable presente en muchos de los suelos sembrados con caña de azúcar en el país (Chaves 2021a). Parece sensato y razonable utilizar la base genética que se dispone, tanto la utilizada comercialmente en el campo, como también la disponible en el Banco de Germoplasma de caña de azúcar que DIECA mantiene instalado en la región de Cañas (10 msnm), Guanacaste, donde se cuenta con aproximadamente 1.049 progenies de diferente origen y características (Chaves 2018).

Cuadro 7.

Principales 5 variedades de caña y sus progenitores, sembradas en las diferentes regiones productoras de Costa Rica.

Región / cantón	Variedades sembradas	% Siembra	Progenitor	
			Femenino	Masculino
GUANACASTE				
Liberia	CP 72-2086	23,2	CP 62-374	CP 63-588
Carrillo	NA 85-1602	18,1	?	?
Cañas	SP 81-3250	11,5	CP 70-1547	SP 71-1279
Abangares	B 82-333	9,1	B 76-78	?
Bagaces	CC 01-1940	8,7	CCSP 89-1997	?
Santa Cruz				
Nicoya				
VALLE CENTRAL				
Alajuela	RB 86-7515	69,1	RB 72-454	?
Atenas	SP 78-4764	6,1	H 66-6254	?
Grecia	B 76-259	4,9	B 65-15	B 59-162
Naranjo	Mex 79-431	4,9	Co 421	Mex 57-473
Poas	LAICA 07-20	1,8	H 77-4643	B 76-259
Valverde Vega				
San Mateo				
Palmares				
San Ramón				
Santa Bárbara				
Puriscal				
ZONA NORTE				
San Carlos	PR 80-2038	28,4	ND	ND
Los Chiles	B 77-95	25,4	ND	ND
	Q 96	8,4	Q 63	Q 68
	LAICA 01-604	5,8	Q 96	SP 70-1143
	B76-385	4,4	B 62-165	B 61-60
TURRIALBA/JV				
Turrialba	B 76-259	35,1	B 65-15	B 59-162
Jiménez	H 77-4643	20,4	H 60-3862	?
Paraíso	LAICA 04-250	16,5	H 77-4643	?
Alvarado	B 77-95	12,0	ND	ND
Oreamuno	PINDAR	4,9	Co 270	MQ 33-157
PACIFICO CENTRAL				
Puntarenas	CP 14-1518 *	45,5	ND	ND
Esparza	CP 72-2086	31,0	CP 62-374	CP 63-588
Montes Oro	NA 85-1602	7,8	?	?
	RB 86-7515	6,1	RB 72-454	?
	B 82-333	3,3	B 76-78	?
ZONA SUR				
Pérez Zeledón	LAICA 04-825	19,0	?	?
Buenos Aires	LAICA 05-805	17,8	H 77-4643	?
	LAICA 04-809	11,1	RD 75-11	B 60-267
	RB 99-381	7,4	CR 64-215	RB 86-7515
	CP 87-1248	7,3	CP 78-1610	CP 72-1210

Fuente: Elaborado por el autor con información de Chaves *et al* (2020).
El área (%) sembrada fue descrita por Chaves *et al* (2020).
Nota: Progenitores obtenidos de Chaves (2020).
La relación entre cantones y variedades no es directa.
Descripción: ND= No Disponible; ?= Cruce Abierto, Policruza (varios padres).
* Sigla errónea, variedad desconocida.

Una valoración de las localidades nacionales con problemas de acidez y aluminio contenido en concentraciones preocupantes en el suelo, como son la Zona Sur, Turrialba y en algún grado el Valle Central y la Zona Norte, evidencia que aquellos clones provenientes de lugares similares y afines donde la condición edáfica es también de características ácidas, como es el caso particular de Brasil donde predominan suelos del Orden Ultisol (*Latossolos*), el grado de adaptación es muy satisfactorio. Puede por tanto esperarse a partir de esa deducción, tener posibles resultados satisfactorios cuando se introduzcan y valoren clones procedentes de esa nación sudamericana de las siglas RB y SP, o sus correspondientes híbridos. De igual manera, resulta evidente de lo expuesto por la misma fuente de información, que los materiales genéticos procedentes de República Dominicana, propiamente de las siglas CR y RD, muestran una interesante adaptabilidad a la acidez; tampoco pueden dejar de mencionarse los clones de origen Hawaiano, Barbados e Indio (Coimbatore) de las siglas H, B, BJ y Co, respectivamente.

Siendo así, con buen criterio y fundamento técnico sólido, se sugiere y recomienda incorporar en calidad de progenitores en los programas de cruzamiento e hibridación que DIECA realiza anualmente en el país por vía convencional, materiales genéticos de las siglas RB, SP, H, B, BJ, CR, RD y Co; en procura de buscar adaptación a suelos ácidos con altos contenidos de aluminio. El trabajo de hibridación debe ser direccionado y muy bien preconcebido en saber identificar y emplear la naturaleza de lo que se utiliza para resolver lo que se desea.

Conclusión

Sobre la importancia de la Acidez Activa Intercambiable promovida y favorecida por las concentraciones de aluminio presentes en algunos suelos, en cantidades comprometedoras y contraproducentes para el desarrollo normal y la productividad agroindustrial de las plantaciones comerciales de caña de azúcar; es mucho lo que puede decirse, pero aún más lo que debe hacerse.

La toxicidad por aluminio representa el factor más importante que limita la producción de caña de azúcar en los suelos ácidos tropicales, en consideración de que potencialmente buena parte del área con capacidad arable y mecanizable en el país es de características ácidas. No puede desconocerse ni obviarse que los problemas con este metal, están directamente asociados con el ambiente ácido donde se presentan, ligados a otros nutrientes que se pueden tornar adversos, como es el caso del hierro (Fe), manganeso (Mn) y cobre (Cu); lo cual dificulta poder aislar e independizar en la relación suelo-planta, el origen y la causa de sus efectos sobre el cultivo. Los problemas con aluminio están geográficamente bien localizados en el país, lo que facilita poder direccionar y concentrar esfuerzos de investigación, información, capacitación y asistencia técnica para implementar y orientar acciones destinadas a mitigar y, de ser viable, contrarrestar los efectos e impactos provocados por ese elemento.

Como quedó expresado y manifiesto a través del texto, la prevención, el análisis de los suelos, el uso oportuno y apropiado de correctivos de acidez convenientes por su calidad y pertinencia; y, sobre todo, el trabajo direccionado en el campo de la mejora genética, son las vías de solución más viables y accesibles para actuar con posibilidades reales de éxito en torno al tema aludido. La acidez del suelo y la presencia de aluminio deben obligadamente contrarrestarse para pretender aspirar a la obtención de niveles de productividad agroindustrial altos, satisfactorios, rentables y competitivos. De nada vale realizar una buena preparación de suelo, usar semilla de alta calidad y pureza, sembrar la mejor variedad, brindar el manejo agronómico correcto y apropiado, asegurar la maduración y cosechar en el momento oportuno la plantación, todo a un muy alto costo económico y humano, si las concentraciones y efectos del aluminio sobre el sistema radicular de las plantas no son atenuados y contrarrestados cuando procede, pues la pérdida de capacidad potencial se torna real y efectiva.

La práctica de encalamiento y la incorporación de fertilizantes con criterios técnicos y en proporciones racionales y justas a las necesidades del cultivo, conjuntamente con el empleo de genotipos adaptados a las condiciones particulares de los suelos ácidos; son sin lugar a dudas, las estrategias de manejo con claro potencial de éxito para el manejo racional de este tipo tan especial de suelos.

Los problemas radiculares generados por causa de la afección provocada por las altas concentraciones de aluminio, se tornan críticos en las regiones más secas o durante la época de verano, ante la incapacidad del sistema radical de satisfacer a cabalidad las necesidades hídricas de las plantaciones, como lo señalara Chaves (1988). Asegura Figueiredo (2018) al respecto, que *"...para que ocurra el máximo desarrollo vegetativo y con total aprovechamiento de sus condiciones fisiológicas, es necesario que el sistema radicular de las plantas sea bien formado a lo largo de los ciclos vegetativo y reproductivo. En el caso de la caña de azúcar, existe una correlación positiva entre la masa de raíces y la producción de tallos por hectárea."*

No cabe la menor duda en reconocer, que la posibilidad de habilitar y desarrollar una agricultura cañera sustentable desde una perspectiva productiva, económica y ambiental en áreas dominadas por suelos ácidos, degradados e infértiles, depende y dependerá ineludiblemente del uso intensivo que se haga de las tecnologías más modernas que mitiguen y minimicen el problema existente con la acidez y el aluminio tóxico. En este contexto, el empleo de plantas adaptables al estrés abiótico que muestren además tolerancia al aluminio, obtenidas vía mejoramiento genético clásico o por métodos biotecnológicos modernos de transformación genética, constituyen una de las soluciones potenciales y viables para enfrentar con posibilidades de éxito el problema. Resulta por esto, obligatorio e imperativo desarrollar en el país y el sector azucarero nacional, métodos y estrategias que permitan y favorezcan un mejor entendimiento y comprensión de los mecanismos morfofisiológicos, bioquímicos y genético-moleculares asociados con la tolerancia y/o susceptibilidad de las plantas al aluminio, como lo expresaran con buen criterio Conçado *et al* (1999).

Una revisión de literatura en torno al tema aludido demuestra con relativa facilidad, la limitada información específica existente y disponible en relación al aluminio y sus vínculos directos con la caña de azúcar, lo que se limita por lo general al abordaje de su presencia e interacción química a nivel de suelo, no así nutricional a nivel de planta; obligando con ello a generar investigación propia que permita ubicar el estado real de la situación nacional.

Queda en definitiva aún mucho por hacer en relación a este tópico tan importante para asegurar el futuro productivo de la agroindustria azucarera costarricense en un marco de alta competitividad; aplicado sobre todo en lo concerniente a la fabricación e identificación de variedades nacionales sigla LAICA que muestren tolerancia al aluminio y la acidez; como también procurar convencer a los agricultores sobre la importancia y necesidad de acondicionar y corregir los suelos ácidos por medio de su encalado. La investigación cañera debe ineludiblemente procurar a futuro en el presente caso, identificar genes con posible uso potencial para incorporar en los programas de cruzamiento e hibridación, orientados a la producción y liberación para uso comercial de genotipos tolerantes. La primera y más sensata y razonable opción es trabajar con progenitores de las variedades nacionales que han mostrado tener tolerancia al aluminio.

Literatura citada

Anderson, D.L.; Bowen, J.E. 1994. *Nutrición de la caña de Azúcar*. Quito, Ecuador. Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS). 40 p.

Angulo Marchena, A.; Rodríguez Rodríguez, M.; Chaves Solera, M.A. 2020. Guía Técnica. *Cultivo Caña de Azúcar. Región: Guanacaste*. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 78 p.

Azeredo, D.F. 1982. *Alumínio no crescimento e na concentração de nutrientes em diferentes cultivares de cana-de-açucar (Saccharum* spp). Têse de Mestrado. Piracicaba, ESALQ/USP. 55 p.

Barrantes Mora, J.C.; Chaves Solera, M.A. 2020. Guía Técnica. *Cultivo Caña de Azúcar. Región: Sur*. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 75 p.

Bertsch, F. 1998. *La Fertilidad de los Suelos y su Manejo*. 1ª ed. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). 157 p.

Calderón Araya, G.; Chaves Solera, M.A. 2020. Guía Técnica. *Cultivo Caña de Azúcar. Región: Turrialba*. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 95 p.

Carreño, A.; Chaparro-Giraldo, A. 2013. *Tolerancia al aluminio en especies vegetales: mecanismos y genes*. Universitas Scientárvm 18(3): 283-310.

Cançado, G.M.A.; Lopes, M.A.; Paiva, E. 1999. *Genética e bioquímica da tolerância de plantas ao alumínio*. Em: Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas. Lavras, Minas Gerais, Brasil. Universidade Federal de Lavras. Editores Jose Oswaldo Siquerira et al. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS): UFLA/DCS. p: 363-388.

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. Chaves Solera, M.A. 1990. Características de calidad de los correctivos de acidez del suelo. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, octubre. 12 p.

Chaves Solera, M.A. 1991. *Características y uso potencial del yeso en la agricultura costarricense*. Revista del Colegio de Ingenieros Agrónomos (Costa Rica) 4(7):18-20.

Chaves Solera, M.A. 1993. *Importancia de las características de calidad de los correctivos de acidez del suelo: desarrollo de un ejemplo práctico para su cálculo.* San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, junio. 41 p.

Chaves, M. 1999a. *La práctica del encalado de los suelos cañeros en Costa Rica.* En: Congreso de ATACORI "Randall E. Mora A.", 13, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 1999. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), setiembre. p: 216-223.

Chaves, M. 1999b. *Nutrición y fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica*. En: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: Recursos Naturales y Producción Animal. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED, julio. Volumen III. p: 193-214. También en: Participación de DIECA en el XI Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, julio 1999. p: 46-67.

Chaves Solera, M. 2001. *Fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica: experiencias de los Últimos 20 Años (Periodo 1980-2000)*. En: Congreso Latinoamericano, 15 y Congreso Cubano, 5, de la Ciencia del Suelo, Varadero, Cuba, 2001. Programas y Resúmenes. Varadero, Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. 2001. Nov. 11-16. Boletín Nº 4. p: 114. También en: En: Congreso de ATACORI "Ing. Agr. José Luis Corrales Rodríguez", 15, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 2003. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), setiembre. p: 49-54.

Chaves Solera, M. 2002. *Corrección de suelos ácidos para cultivar caña de azúcar*. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, julio. 8 p.

Chaves Solera, M.A.; Chavarría Soto, E. 2017a. *Tipos de suelo y producción de caña de azúcar en Costa Rica: Primera aproximación taxonómica*. En: Congreso Nacional de Suelos, 9, San José, Costa Rica, 2017. Memorias. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS), octubre 25 al 27, Hotel Crowne Plaza San José Corobici. 6 p.

Chaves Solera, M.A.; Chavarría Soto, E. 2017b. *Aproximación taxonómica y territorial de los suelos sembrados con caña de azúcar en Costa Rica*. I. ORDENES DE SUELO. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, mayo. 55 p.

Chaves Solera, M.A. 2017a. *Taxonomía de los suelos sembrados con caña de azúcar en Costa Rica: Ordenes y Subordenes presentes*. En: Congreso de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 21 y Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Honduras (ATAHON), 20, San Pedro Sula, Honduras, 2017. Memorias. San Pedro Sula, Honduras, ATACA/ATAHON, agosto 22 al 25, Centro de Convenciones Copantl. 14 p.

Chaves Solera, M.A. 2017b. *Suelos, nutrición y fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica*. En: Seminario Internacional Producción y Optimización de la Sacarosa en el Proceso Agroindustrial, 1, Puntarenas, Costa Rica, 2017. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), octubre 10 al 12, Hotel Double Tree Resort by Hilton. 38 p.

Chaves Solera, M.A. 2018. *Genética aplicada a la mejora de las plantaciones comerciales de caña de caña de azúcar*. En: Congreso Tecnológico DIECA 2018, 7, Colegio Agropecuario de Santa Clara, Florencia, San Carlos, Alajuela, Costa Rica. Memoria Digital. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), 29, 30 y 31 de agosto del 2018. 43 p.

Chaves Solera, MA. 2019a. *Entornos y condiciones edafoclimáticas potenciales para la producción de caña de azúcar orgánica en Costa Rica*. En: Seminario Internacional: Técnicas y normativas para producción, elaboración, certificación y comercialización de azúcar orgánica. Hotel Condovac La Costa, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 2019. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 15, 16 y 17 de octubre, 2019. 114 p.

Chaves Solera, M.A. 2019b. *Ambiente agro climático y producción de caña de azúcar en Costa Rica*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1(18): 5-10, noviembre-diciembre.

Chaves Solera, M.A. 2019c. *Lluvia: imperativo para corregir la acidez de los suelos para cultivar caña de azúcar*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(2): 4-5, mayo.

Chaves Solera, M.; Bolaños Porras, J.; Barrantes Mora, J.C.; Rodríguez Rodriguez, M.; Angulo Marchena, A.; Barquero Madrigal, E.; Calderón Araya, G. 2020. *Censo de variedades de caña de azúcar de Costa Rica año 2019*. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, abril. 166 p.

Chaves Solera, M.A. 2020a. *Clima, germinación, ahijamiento y retoñamiento de la caña de azúcar*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(14): 6-14, julio.

Chaves Solera, M.A. 2020b. *Atributos anatómicos, genético y eco fisiológicos favorables de la caña de azúcar para enfrentar el cambio climático*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(11): 5-14, mayo.

Chaves Solera, M.A. 2020c. *Clima, acidez del suelo y productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(18): 8-17, agosto.

Chaves Solera, M.A. 2020d. *Clima, degradación del suelo y productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(15): 5-13, julio.

Chaves Solera, M.A. 2020e. *Sistema radicular de la caña de azúcar y ambiente propicio para su desarrollo en el suelo*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(13): 6-18, junio. También en: Revista Entre Cañeros N° 17. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, setiembre. p: 51-71.

Chaves Solera, M.A.; Barquero Madrigal, E. 2020. Guía Técnica. *Cultivo Caña de Azúcar. Región: Norte*. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 135 p.

Chaves Solera, M.A. 2021a *Estrés mineral y caña de azúcar en Costa Rica*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(11): 5-21, mayo.

Chaves Solera, M.A. 2021b. *Fijación biológica de nitrógeno atmosférico (N_2) por la caña de azúcar: un importante potencial por aprovechar*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(15): 7-24, julio.

Chaves Solera, M.A. 2021c. *Óxido nitroso (N2O) y uso del nitrógeno en la caña de azúcar*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(19): 5-29, setiembre.

Chaves Solera, M.A. 2021d. *Nitrificación y pérdidas potenciales de nitrógeno en suelos cañeros*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(20): 6-24, setiembre.

Chaves Solera, M.A.; Chavarría Soto, E. 2021. *Distribución geográfica de las plantaciones comerciales de caña de azúcar en Costa Rica según altitud y localidad*. Revista Entre Cañeros N° 20. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, julio. p: 5-35.

Epstein, E.; Bloom, A. 2006. *Nutrição Mineral de Plantas: Principios e Perspectivas*. 2 edic. Trad. María Edna Tenório Nunes. Londrina, Brasil. Editora Planta. 403 p.

Fassbender, H.W.; Bornemisza, E. 1994. *Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Hans W. Fassbender y Elemer Bornemisza. 2ª. Ed. Rev. San Jose, CR: IICA. 420 p.

Figueiredo, P.A.M. 2018. *Fisiologia da Produçã0 Agrícola "O aluminio e seus efeitos na cana-de-açúcar"*. STAB-Açúcar, Alcool e subprodutos 36(3): 14-15, janeiro/fevereiro.

Foy, C.D. 1974. *Effects of aluminium on plant growth*. In: E.W. Carson (ed.): The Plant Root and its Environment, p: 601-642.

Foy, C.D.; Chaney, R.L.; White, M.C. 1978. *The physiology of metal toxicity in plants*. Ann. Rev. Plant Physiol., Palo Alto, 29: 511-566.

Foy, C.D. 1984. *Physiological effects of hydrogen, aluminum and manganese toxicThe Plantities in acid soil*. In: F. Adams. Ed. Soil Acidity and Liming. 2 ed. Madison, Agronomy, N° 12, Am. Soc. Agronomy, Inc. p: 57-97.

Hetherington, S.; Asher, C.J.; Blamey, F.P.C. 1986.*Tolerance of sugarcane to aluminum in soil and solution culture*. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, 8, 63-68.

Kochian, L.V. 1995. *Cellular mechanisms of aluminium resistance in plants*. Annual Review Plant Physiology 46:237-260.

Malavolta, E. 1976. *O calcio e a acidez do solo*. Em: Manual de Química Agrícola: nutrição de plantas e fertilidade do solo. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda. p: 327-374.

Malavolta, E. 1981. Manual de Química Agrícola: *Adubos e Adubação*. 3era edic. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda. p:205-265.

Malavolta, E. 1997. *Sacarinas-Cana-de-açúcar*. En: Manual de Calagem e Adubação das Principais Culturas. São Paulo, Brasil: Ed. Agronômica Ceres. p: 179-223.

McLean, E.O. 1976. *Chemistry of soil aluminum*. Comm. Soil Science Plant Analysis 7:619-636.
Marschner, H. 1986. Mineral nutrition of higher plants. London, Academic Press, Inc. 674 p.

Martin, J.P.; Evans, H. 1964. *Nutritional deficiencies and toxicities*. In: C.G. Hugher et al. Ed. Sugar-cane diseases of world. Amsterdam, ELSEVIER Publ. Co. V. 2. p: 199-236.

Méndez, J.C.; Bertsch, F. 2012. *Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica*. 1 ed. San José, C.R.: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 108 p.

Mengel, K.; Kirkby, E. A. 2001. *Aluminium. In: Principles of plant nutrition*. 5th ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 849 p.

Moore, D.P. 1974. *Physiological effects of pH on roots*. In: Carson, E.W., ed. The plant root and its environment. Charlottesville, University Press of Virginia. p: 135-151.

Ryan, P.R.; Ditomaso, J.M.; Kochian, L.V. 1993. *Aluminium toxicity in roots: an investigation of spatialsensitivity and the role of the root cap*. Journal of Experimental Botany 44(2): 437-446, february.

Salas, R. 1996. *El Aluminio en la Relación Suelo-Planta*. En: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, Congreso Nacional de Fitopatología, 3, Congreso Nacional de Suelos, 2, San José, Costa Rica, 1996. Memoria: Suelos. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Asociación Costarricense de Fitopatología y Asociación Costarricense de Suelos: EUNED, EUNA, julio. Volumen I. p: 109-113.

Wheeler, D.M.; Diening, A.; Hergenroder, A.; Horts, W.J.; Mixwagner, G. 1992. *Preliminary results from a microscopic examination on the effect of aluminium on the roots tips of of wheat*. Plant and Soil 146(1-2):67-75.

CARACTERIZACIÓN DE LAS RELACIONES HÍDRICAS EN CUATRO VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.) SOMETIDAS A ESTRÉS HÍDRICO EN CONDICIONES DE INVERNADERO EN COSTA RICA.[1]

Eduardo J. Cadet Piedra [2]

Resumen

La caña de azúcar ha presentado tolerancia media al déficit hídrico debido a sus características morfológicas y fisiológicas, se ha observado que no es igual para el componente varietal existente y que durante periodos de sequía se pueden alcanzar pérdidas agroindustriales desde 15% hasta 40% en tonelaje por hectárea. Una de las alternativas para mitigar el efecto por déficit hídrico es buscar variedades que utilicen el agua de manera más eficiente y con tolerancia a déficit hídrico. El objetivo de este trabajo fue caracterizar los parámetros de las relaciones hídricas y aspectos morfológicos de las plantas de caña de azúcar asociados a su tolerancia al estrés hídrico por medio de la implementación de las curvas presión/volumen, las mediciones de potencial hídrico (Ψw) y crecimiento. Para ello, cuatro variedades de caña de azúcar, NA 56-42, RB 86-7515, CP 72-2086 y LAICA 12-331 fueron evaluadas en invernadero en macetas bajo déficit y a capacidad de campo a lo largo de 22 semanas, antes, durante y después del déficit hídrico. Los resultados indican que la variedad NA 56-42 es la más susceptible a periodos cortos de déficit hídrico por obtener el potencial hídrico en el punto de pérdida de turgencia mayor (-1,08 MPa) y el mayor marchitamiento durante el estrés hídrico. La variedad CP 72-2086 se adaptó a periodos más prolongados de déficit hídrico manteniendo el mayor contenido relativo de agua durante el estrés, la LAICA 12-331 presentó un buen ajuste osmótico, pero con reducido crecimiento y la RB 86-7515 mostró las mejores características de tolerancia al déficit hídrico por los resultados que presentó en el crecimiento y los datos de los parámetros hídricos evaluados. Se clasifico según la tolerancia al déficit hídrico de mayor a menor en el siguiente orden: RB 86-7515, LAICA 12-331, CP 72-2086 y NA 56-42. El Ψw de -1,40 MPa es el valor máximo que la caña de azúcar puede alcanzar antes de mostrar efectos por la sequía el cual varía entre variedades donde la variedad RB 86-7515 alcanzó -1,51 MPa.

[1] Trabajo presentado en el XI Congreso ATALAC TECNICAÑA efectuado en Cali, Colombia del 24 al 28 de setiembre del 2018.

[2] Ingeniero Agrónomo, funcionario del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA). Correo – e: ecadet@laica.co.cr.

Introducción

La caña de azúcar es un cultivo de rápido crecimiento, con gran capacidad de adaptación y elevado potencial de producción debido a sus determinantes atributos anatómicos, estructurales, genéticos y fisiológicos (Chaves, 2015). El abastecimiento y disponibilidad de agua afecta directamente el crecimiento de la planta por ende, su concentración de azúcar.

La caña de azúcar a pesar de ser una planta C4 es demandante en el uso de agua para producir altos tonelajes, pero también se ha destacado como un cultivo tolerante a la sequía debido a su amplia capacidad de exploración radicular, a las diferencias en el comportamiento de la actividad estomática y el arrollamiento pasivo de las hojas. Es capaz de soportar intervalos de corto plazo sin riego sin afectar notablemente sus rendimientos (Basnayake *et al*, 2012).

Un factor ambiental, como la falta agua, puede generar pérdidas de un 15 % hasta un 40% de la caña cosechada (Inman-Bamber *et al*, 2012).

Todos los procesos de la planta de caña de azúcar como crecimiento, transporte y almacenaje de sacarosa, entre otros, son afectados directa o indirectamente por el suministro de agua (Johnsen y Major, 2004). En el caso de la caña de azúcar el rendimiento está determinado por el crecimiento vegetativo dado por la altura de los tallos, el número de tallos por área y el alargamiento de los entrenudos en los cuales se acumula la sacarosa. Por ende el déficit hídrico es extremadamente perjudicial en vista de que el proceso fisiológico más sensible al estrés hídrico es el crecimiento (Eksteen *et al*, 2015).

El estado de energía del agua en la planta se expresa como potencial hídrico (Ψw), y hace referencia al trabajo necesario para transportar el agua dentro de la planta de un lugar a otro. La transpiración, provoca gradientes de potencial hídrico en las plantas de caña de azúcar, necesarios para que el agua fluya desde las raíces hasta las hojas a través del xilema conductor. El agua dentro del xilema está bajo tensión durante la transpiración y debido a ello los valores que determinan el potencial se expresa en términos negativos (Lenz *et al*, 2006).

El crecimiento celular es uno de los procesos fisiológicos más sensibles al déficit hídrico, ya que una sequía severa reduce el área foliar, acelera la senectud de las hojas maduras, altera la fotosíntesis y la transpiración debido a la reducción de la turgencia, estimula el cierre estomático y el bloqueo a la difusión del CO2 hacia el mesófilo, por lo tanto, provoca el colapso de los tallos de caña de azúcar (Graca *et al*, 2010).

Se ha encontrado variabilidad genética en la arquitectura hidráulica y la susceptibilidad a la cavitación entre diversos cultivares de caña de azúcar bajo déficit hídrico.

El valor del potencial hídrico (Ψw) en la caña de azúcar al cual ocurre la pérdida del 50% de la capacidad de transportar agua (PLC 50) oscila entre -0,8 y -1,2 MPa. Por medio de la experimentación, mejoramiento y observación se ha dilucidado una marcada diversidad genética en la susceptibilidad a la cavitación y en la capacidad de respuesta al estrés hídrico de diversas variedades de caña de azúcar, diferencias que pueden deberse a la dimensión, abundancia y diámetro de los vasos conductores y la eficiencia en el transporte de savia (Gutiérrez, 2014). Además del gradiente necesario para ascender y mantener la savia en la parte alta de la caña de azúcar en contra de la fuerza de gravedad, los cultivares deben superar fricciones y resistencias encontradas en los tejidos y en el suelo. La mayor resistencia en la caña se encuentra en la lámina foliar y llega a alcanzar hasta -1,4 MPa, valores de -2 MPa se consideran perjudiciales para el crecimiento y productividad de la misma (Gutiérrez, 2014).

Los estudios con indicadores fisiológicos en las plantas de cultivos comerciales constituyen una herramienta importante para entender los mecanismos de adaptación a las condiciones de estrés hídrico, entre los cuales podemos mencionar el potencial osmótico en el punto de pérdida de turgencia o momento de marchitamiento (Ψw PPT) y al potencial osmótico a plena turgencia o capacidad de realizar ajuste osmótico (Ψπ PT) como los parámetros fisiológicos que se utilizan como indicadores de tolerancia a la sequía, no obstante el módulo de elasticidad o elasticidad de las paredes celulares (&) y el contenido relativo de agua o contenido hídrico que alcanzaría a plena turgencia (CRA) han demostrado ser indicadores de la capacidad de retención de agua en momentos de estrés hídrico en diferente magnitud entre especies y ambientes (Bartlett *et al*, 2012). Por lo tanto, es conveniente caracterizar las variedades de caña de azúcar en cuanto al grado de respuesta y adaptación a la sequía, conocer los límites de plasticidad, tolerancia y evaluar el comportamiento fisiológico determinado por la pérdida de turgencia, la capacidad de ajuste osmótico, el mantenimiento del volumen celular y la elasticidad de la pared celular (Parra, *et al*, 2002). Los parámetros hídricos se obtienen de las curvas presión/volumen y se complementan con estudios de morfología, anatomía y fisiología, lo que permite caracterizar las variedades de caña de azúcar por su grado de tolerancia para hacer frente al estrés hídrico.

Objetivos

Objetivo general

Caracterizar los parámetros fundamentales de las relaciones hídricas y aspectos morfológicos de las plantas de caña de azúcar sometidas a estrés hídrico en condiciones de invernadero.

Objetivos específicos

- Definir el umbral de potencial hídrico a partir del cual ocurre estrés hídrico en las variedades estudiadas de caña de azúcar
- Comparar cuatro variedades de caña de azúcar en su grado de respuesta al estrés hídrico utilizando parámetros derivados del análisis de las curvas presión volumen.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

El experimento se realizó en la Estación Experimental del Departamento de investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), en un ambiente de invernadero en condiciones homogéneas y controladas, localizado en Santa Gertrudis Sur, distrito San José, cantón de Grecia, provincia de Alajuela, Costa Rica, a una altitud de 1.005 msnm. La zona presenta una temperatura entre 16 ºC – 27 ºC, una precipitación anual total de 2500 a 3000 mm distribuida entre los meses de abril - noviembre con una humedad relativa promedio de 89%.

Material vegetal

Se seleccionaron cuatro variedades de caña de azúcar, tres comerciales y una promisoria, las cuales fueron: CP 72-2086, RB 86-7515, LAICA 12- 331 (promisoria) y NA 56-42.

Siembra del material varietal

El material vegetal se sembró en maceteros de 40 cm de profundidad por 60 cm de diámetro equivalente a 0,11 m3. Se utilizó un sustrato que contenía 30% de abono orgánico, 60% de suelo Andisol y un 10% turba (peat moss), los recipientes se llenaron hasta el tope, se colocaron tres esquejes de caña con tres yemas en cada una de las macetas. Las plantas se fertilizaron según lo detalla el Cuadro 1.

Cuadro 1.

Cantidades en gramos de nutrimentos individuales aplicados por maceta.

Época	Fórmula de fertilizante	Cantidad de fertilizante aplicado (g)	Cantidad por nutrimento (g)		
			N	P_2O_5	K_2O
Siembra	10-30-10	75	7,5	22,5	75,
2º Fertilización	NH_4NO_3	30	10,05	0	0
3º Fertilización	20-3-20	35	7	1,05	7
Total (g)		**140**	**24,55**	**23,55**	**14,5**

Las 24 macetas se colocaron en el invernadero, el riego fue por aspersión, a las 6:00am y a las 3:00 pm por diez minutos cada uno, hasta el primer mes de ciclo vegetativo.

A partir del segundo mes se efectuó un cambio en la forma de riego. Se suministró ocho litros de agua a cada maceta, los riegos se efectuaron cada dos días hasta los seis meses de desarrollo vegetativo.

El diseño experimental fue un modelo irrestricto al azar con arreglo factorial, donde se evaluaron cuatro variedades de caña de azúcar y dos regímenes hídricos, capacidad de campo y de déficit hídrico aplicado a partir de cuándo las plantas cumplieron seis meses de edad. Se instalaron seis repeticiones de cada una de las variedades, para un total de veinticuatro unidades experimentales, siendo cada maceta la unidad experimental. Los datos de crecimiento y morfología se procesaron por medio de un análisis de MANOVA con 5 grados de libertad a un nivel de confianza del 95%, los resultados de las curvas y de potencial hídrico se analizaron por medio de la prueba de Tukey con un 95% de confianza.

Exposición de los tratamientos de régimen hídrico

Se sometió a dos regímenes hídricos: capacidad de campo y estrés hídrico. Todas las plantas se mantuvieron a capacidad de campo durante seis meses para permitir su crecimiento y desarrollo normal, de manera que en cada maceta se disponía de aproximadamente de 10 tallos. Luego de este periodo se procedió a suspender el suministro de agua a una hilera completa del ensayo, donde se obtuvo 3 macetas bajo déficit hídrico y 3 macetas bajo capacidad de campo de cada variedad.

El periodo de déficit hídrico fue de treinta y cinco días, posteriormente se continuó el riego a las seis macetas por igual alcanzando el régimen de capacidad de campo en cada una de ellas, el período de tiempo estipulados para la recuperación de la turgencia y la reiniciación del crecimiento consistió de veinte días.

Variables evaluadas

De cada maceta se escogió un tallo que se mantuvo intacto para realizar las mediciones consecutivas de crecimiento hasta finalizar el ensayo. Para el potencial hídrico se muestreó un tallo diferente cada semana, por ser las mediciones destructivas. Para la construcción de las curvas presión/volumen se tomaron hojas de diferentes tallos, utilizando la hoja+3 considerada como hoja la indicadora en el cultivo de la caña de azúcar (Clements y Ghotb, 1969).

Las mediciones de crecimiento se realizaron cada ocho días hasta el final del ensayo donde se midió longitud de la hoja, expansión de las hojas, el ancho de la hoja +3 (enrollamiento). El índice de verdor se calculó cada semana haciendo un promedio de 5 puntos por hoja con el medidor CCM-200. El Ψw se midió cada ocho días y durante los treinta y cinco días de estrés hídrico se aumentó a dos lecturas por semana, las curvas presión/volumen se construyeron en tres momentos: antes, durante y después de estrés hídrico.

Relaciones hídricas

Determinación del potencial hídrico (Ψw)

El Ψw se midió con la cámara de presión de Scholander (modelo PMS-100, PMS, Logan, UT, USA) a partir del tercer mes de edad de las plantas. La lectura de Ψw se ejecutó por medio de la adaptación del método descrito por Saliendra et *al, (1*990) el cual consistió en realizar las mediciones en segmentos terminales de las hojas, las cuales se enrollan y se embolsan, y no en hojas completas como se ilustra en la (Figura 2 B y C).

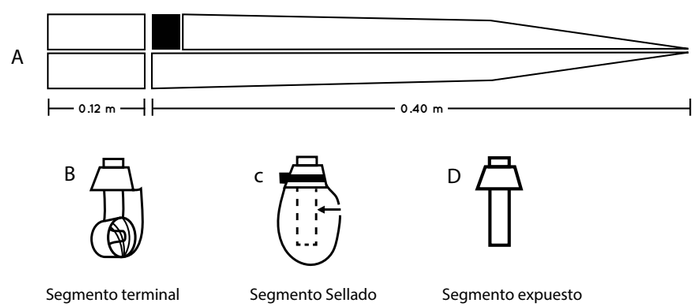


Figura 1.
Obtención de un segmento de la hoja de caña de azúcar utilizada para medir potencialeshídricos en la cámara de Scholander. Grecia, Alajuela. Marzo-noviembre 2017 adaptado de (Saliendra et *al, (1*, 1990).

Cada día de medición se seleccionó un tallo al azar de cada maceta, a los cuales se les removió la hoja +3 (Kuijper, 1915); a las hojas seleccionadas, y debido a que la cámara fue diseñada para hacer mediciones en hojas de plantas pecioladas de dicotiledóneas se debió ajustar para hojas de monocotiledóneas y por lo tanto se realizó un corte a los 0,52 m de longitud desde la parte distal hacia el centro de esta, los primeros 0,4 m de hoja se doblaron con el cuidado de no quebrarla y se sostuvo con un clip. Para evitar la deshidratación se cubrió la hoja con una bolsa plástica transparente de 25 cm por 8 cm y se selló con cinta adhesiva justo antes de removerla de la planta donante. Una vez removida se "fabricó un pecíolo" de 0,12 m de longitud con la nervadura central, la cual quedó por fuera de la cámara.

Curvas presión volumen

El procedimiento consistió en tomar la hoja +3 de cada maceta de la variedad correspondiente y se construyó una curva con cada hoja extraída con el método adaptado para medir Ψw descrito anteriormente (Saliendra et *al*, 1990); Por lo tanto, se elaboraron un total de 18 curvas por variedad. A diferencia del método de Ψw, la muestra de hoja debidamente embolsada se colocó en una hielera con agua destilada para su rehidratación total por 24 horas, con el debido cuidado de que solo el pecíolo fabricado tuviera contacto con el agua. Previo a la colocación en la cámara de presión se pesó la muestra en una balanza analítica para anotar su peso fresco al inicio; la bolsa plástica transparente se debió pesar con anterioridad para restarla al final de la curva y obtener el peso fresco real de la hoja. El clip y la cinta que se usaron para enrollar la hoja se pesaron al finalizar la curva presión/volumen para obtener el peso de la hoja por diferencia.

La muestra fresca se introdujo en la cámara de presión. El pecíolo se ajustó al tapón de la cámara y para evitar fugas de gas y savia se selló con plastilina alrededor de la sección que queda dentro de la cámara. El extremo del pecíolo afuera de la cámara se le colocó un tubo Eppendorf®. Inmediatamente se selló el tubo Eppendorf® contra el pecíolo utilizando Parafilm® sin dañar la vena central. Se colocó un rollo de papel toalla dentro del tubo Eppendorf® que se pesó previamente en balanza analítica para obtener la cantidad de savia extraída por diferencia de peso, se verificó que el papel toalla quedará en contacto con la vena central "pecíolo".

La presión se aplicó a intervalos de 10 minutos, la primera lectura a los 2,5 bares, aumentando la presión de la siguiente forma 4,5; 6,5; 8,5; 10,5; 12,5; 14,5; 18,5; 22,0 y hasta 24,0 bares, dado a que la caña de azúcar alcanza su punto de marchitez permanente a los 20 bares, el cual es la humedad mínima en la que no puede seguir extrayendo agua del suelo y no logra recuperarse de la pérdida hídrica, aunque la humedad ambiental sea saturada. Por lo tanto el procedimiento de colocar pedazo de papel toalla se realizó diez veces, con un papel de 0,1109 g que recolectó la savia en cada punto de presión y por diferencia de peso se anotaba la savia recolectada. Entre cada cambio de presión se pesó el papel toalla y se calculó el peso de la savia extraída por diferencia.

Concluido el procedimiento anterior y luego de alcanzar las ultimas lecturas de potencial hídrico, las muestras se colocaron en estufa a 80°C durante 48 horas para determinar el peso seco. La construcción de la curva presión/volumen tuvo una duración de dos horas para cada hoja.

Resultados y discusión

Cuadro 2.

Caracterización numérica de los parámetros hídricos encontrados en las cuatro variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en condiciones de invernadero en Costa Rica.

Variedades	Ψ π PT (-MPa)	Ψ w PPT (-MPa)	CRA (PPI) (%)	Elasticidad (E) (-MPa)	Volumen del simplasto (cm^3)
ANTES DEL ESTRÉS HÍDRICO					
CP 72-2086	1,32 (A a A)	1,43 (A a A)	36 (A a A)	40,85 (A a A)	1,33 (A a A)
RB 86-7515	1,29 (A a A)	1,43 (A a A)	48 (A b B)	13,64 (A b B)	1,30 (A a A)
LAICA 12-331	1,25 (A a A)	1,46 (A a A)	55,2 (A a A)	10,64 (A a A)	1,75 (A a A)
NA 56-42	1,02 (B a A)	1,13 (B a A)	31 (A a A)	15,74 (A a A)	0,75 (A a A)
DURANTE EL ESTRÉS HÍDRICO					
RB 86-7515	1,29 (A a)	1,51 (A a)	26,3 (A a)	11,69 (A a)	1,11 (A a)
LAICA 12-331	1,29 (A a)	1,54 (A a)	24 (A a)	8,44 (AB a)	1,77 (A a)
CP 72-2086	1,25 (A a)	1,53 (A a)	26,8 (A a)	6,93 (AB a)	1,15 (A a)
NA 56-42	1,08 (B a)	1,44 (A a)	23,5 (A a)	3,33 (B a)	0,93 (A a)
DESPUÉS DEL ESTRÉS HÍDRICO					
LAICA 12-331	1,31 (A A)	1,45 (A A)	22 (A A)	20,84 (A A)	1,90 (A A)
CP 72-2086	1,24 (AB A)	1,46 (A A)	39 (A A)	7,89 (A A)	1,85 (A A)
RB 86-7515	1,27 (AB A)	1,48 (A A)	25 (A A)	9,23 (A A)	1,22 (A A)
NA 56-42	1,16 (B A)	1,44 (A A)	31 (A A)	6,95 (A A)	1,10 (A A)

Potencial osmótico a plena turgencia

La variedad NA 56-42 al obtener el mayor valor de Ψπ PT, se caracterizó por ser la de menor capacidad para contrarrestar el efecto del déficit hídrico, debido a que la capacidad de realizar ajuste osmótico se vio más limitada que en las otras tres variedades (Cuadro 2 y Figura 2) (Bartlett *et al*, 2012).

Según Inman-Bamber *et al* (2005) los ajustes osmóticos ocurren por la acumulación de solutos dentro de las células y su respuesta a ciertos estímulos ambientales, concuerda con los valores del Ψπ PT en las variedades RB 86-7515 y CP 72-2086 siendo menor que en la NA 56-42, que se catalogó como la más susceptible al déficit hídrico, por lo tanto, fue la variedad con la mayor reducción en el crecimiento y el menor Ψw durante estrés (Cuadro 2 y Figura 2).

Estudios explican que entre menor sea el Ψπ PT permite a la planta reducir la transpiración sin perder turgencia (agua) por lo que retrasa el síntoma de marchitez de las hojas (Meinzer et al, 1990) lo que claramente se observó en la variedad NA 56-42 que experimentó la mayor caída en el índice de verdor, presentando síntomas de marchitamiento severos desde el inicio y enrollamiento de hojas mayor, a diferencia de las otras variedades (Cuadro 2 y Figura 2).

Potencial hídrico en el punto de pérdida de turgencia

Se observó que la variedad NA 56-42 fue la de menor tolerancia a situaciones de sequía.

En cuanto al parámetro del Ψw PPT, esta fue la que presentó el mayor valor en los tres regímenes hídricos, pero con significancia estadística antes del estrés (Cuadro 2 y Figura 2). Resultados que concuerdan con lo reportado por Wolpert (2012) que explica que las especies con los Ψw PPT menores tienden a presentar rasgos de tolerancia a la sequía, debido a que logran mantener el crecimiento, la conductancia estomática e hidráulica en condiciones de limitantes de agua en el suelo como lo mostro la variedad RB 86-7515.

De este modo, aunque no existan diferencias significativas ($p>0,05$) entre las otras tres variedades en el Ψw PPT, la variedad LAICA 12-331 presentó el menor Ψw PPT y por ende es el cultivar con la mayor capacidad de tolerar el déficit hídrico en términos fisiológicos enfatizando en la capacidad de ajuste osmótico (Cuadro 2 y Figura 2).

Las variedades RB 86-7515 y CP 72-2086 presentaron valores de Ψw PPT muy similares entre ellas al igual que un crecimiento mayor que en las otras variedades. Valores que aciertan con lo encontrado por Bartlett *et al* (2012) que explican que a un menor Ψw PPT se extienden el tiempo al cual las plantas comienzan a experimentar efectos negativos en el crecimiento por la sequía. Las variedades RB 86-7515 y CP 72-2086, superaron en aspectos de crecimiento a la LAICA 12-331 que presentó características favorables de ajuste osmótico. Se explica por qué a un menor Ψw PPT las plantas logran retrasar el marchitamiento de los tejidos Wolpert (2012) e (Inman-Bamber *et al*, (2005).

Módulo volumétrico de lasticidad

La variedad RB 86-7515 al obtener el menor valor de &, contribuyó a obtener el menor Ψw PPT, esto le permitió evitar la pérdida de volumen de agua celular, retrasar la marchitez y presentar niveles de CRA altos durante el estrés por déficit hídrico. Estas características concuerdan con Barker *et al* (1993) que explican que a menores módulos de elasticidad permite el mantenimiento del volumen celular y de la turgencia (Cuadro 2 y Figura 2).

Los valores obtenidos sugieren que la variedad RB 86-7515 presenta paredes celulares más elásticas lo que le permitió un mejor ajuste osmótico y mantener una presión constante la cual fue fundamental para sobrellevar diversos procesos fisiológicos (Welbaum y Meinzer, 1990). Por lo tanto, la variedad NA 56-42 presentó paredes celulares más rígidas al obtener el mayor valor de &, por lo cual no logró sobrellevar un adecuado ajuste osmótico y por ende no fue capaz de mantener una presión y turgencia constante, que perjudicó la tasa de división celular y múltiples procesos de funcionamiento en mayor grado que las otras tres variedades (Cuadro 2 y Figura 2).

Contenido hídrico relativo

Existe una relación fuerte entre la tolerancia al estrés hídrico y el mantenimiento del CRA a nivel celular (Miyashita *et al*, 2005). En este estudio, en la evaluación del CRA se demuestra como la variedad NA 56-42 es la de menor capacidad de retener agua en sus células ya que es la de menor CRA al compararla con las otras variedades (Cuadro 2 y Figura 2).

La variedad RB 86-7515 presentó la mejor capacidad de retener agua durante el estrés hídrico, pero Gutiérrez (2014) le atribuye estas características a la capacidad de la caña de lograr cambios fisiológicos y anatómicos a diferentes respuestas ambientales, por lo tanto, en la fase de recuperación la variedad NA 56-42 se ubicó como la segunda de mayor CRA y resalta el fenómeno de adaptación al poseer la capacidad de recuperarse (Cuadro 2 y Figura 2).

Volumen del simplasto

El alto volumen simplástico se asocia con alta conductancia estomática y altas tasas fotosintéticas, que son rasgos indirectamente relacionados con el rendimiento del cultivo (Moore y Botha, 2014). Esto sucede debido a que el agua del simplasto está en continuo intercambio y movimiento en el citoplasma que conecta con células adyacentes por medio de los plasmodesmos (Azcón-Bieto *et al*, 2000). Debido a estas características las cuatro variedades durante el estrés hídrico mantuvieron el volumen del simplasto, debido a que las plantas incrementan su actividad de transpiración para poder tomar agua del suelo la cual es limitante, debido a esto las cuatro variedades presentaron un menor potencial hídrico durante este período (Cuadro 2 y Figura 2).

Potencial hídrico y su relación en el crecimiento vegetativo

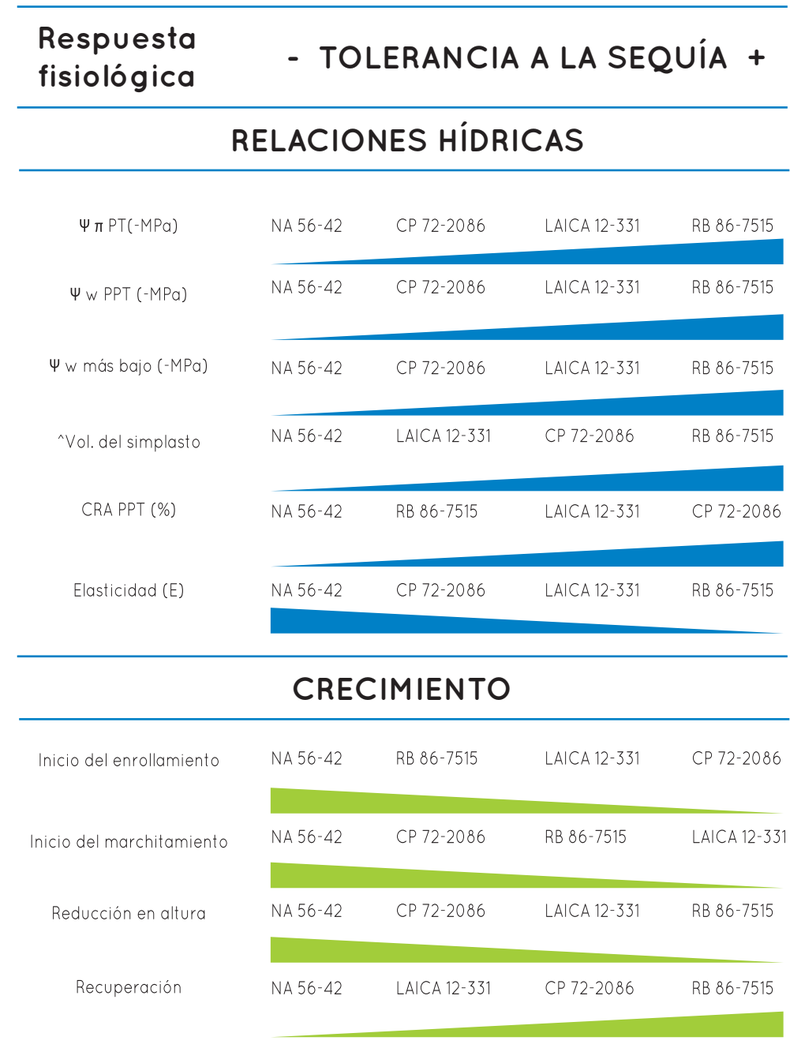


FIGURA 2.

Respuesta en el comportamiento del crecimiento de cuatro variedades comerciales de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) ante situaciones de estrés por falta de agua en condiciones de invernadero en Costa Rica.

Los resultados de este ensayo concuerdan con lo reportado por Amaya *et al* (1995), quienes observaron en plantaciones de caña de azúcar de Colombia una disminución de la altura de los tallos en los periodos de déficit hídrico. Por ende, las variedades que mostraron el menor Ψw en condiciones de estrés, presentaron el menor crecimiento, por lo tanto, fueron las más susceptibles al estrés. Los resultados concuerdan con lo reportado por Silva et al (2008) que en condiciones de estrés hídrico las variedades tolerantes presentaron las mejores características en altura, largo de hoja y un índice de verdor mayor que las variedades susceptibles (Cuadro 2 y Figura 2).

La elongación celular y el crecimiento disminuye a valores que van de -0,5 a -1,4 MPa (Moore y Botha, 2014) y por consiguiente en la situación de estrés hídrico todas las variedades, pero en especial la NA 56-42 se vio perjudicada en su crecimiento por alcanzar los menores Ψw durante el estrés (Cuadro 2 y Figura 2).

El marchitamiento de las hojas de caña de azúcar ocurre entre -1 a -2,2 MPa (Inman Bamber et al, 1986); la variedad NA 56-42 experimentó el menor índice de verdor durante estrés hídrico y la RB 86-7515 el mayor, datos que concuerdan con la relación al potencial hídrico en momentos de estrés y con los valores de Ψw PPT que al ser el mayor en la NA 56-42 los síntomas de marchitamiento aparecieron de primero que en variedades con Ψw PPT menores como la RB 86-7515 (Cuadro 2 y Figura 2).

La inhibición de la fotosíntesis y por ende los procesos fisiológicos más importantes de la caña de azúcar empiezan a sufrir reducciones a partir de -1,2 MPa (Du et al, 1998). Así, de este modo, se comprueba que la variedad NA 56-42 presentó la menor tolerancia ya que alcanzó el valor de -1,2 MPa más rápido que las otras variedades (Cuadro 2 y Figura 2).

En conjunto las variables de crecimiento y relaciones hídricas examinadas en este estudio permite concluir que las reducciones en el potencial osmótico, en el módulo de elasticidad, en valor del potencial hídrico al cual ocurre el marchitamiento y el mantenimiento del volumen del simplasto, son determinantes en el mantenimiento de la turgencia y el crecimiento a menor contenido de agua y potencial hídrico en las hojas, lo que permite clasificar las 4 variedades evaluadas, según la tolerancia al déficit hídrico, de mayor a menor en el siguiente orden: RB 86-7515, LAICA 12-331, CP 72-2086 y NA 56-42.

Conclusiones y Recomendaciones

La planta de caña de azúcar presenta diferentes grados de adaptación entre variedades para enfrentar niveles distintos de déficit hídrico, Con lo cual se concluye que:

- La planta de caña de azúcar toleró niveles de déficit hídrico hasta -1,399 MPa. Valores menores de potencial hídrico indujeron en la caña cambios significativos en el metabolismo y diferenciación de los tejidos y órganos.

- Los resultados de este estudio mostraron que la variedad NA 56-42 fue la más susceptible al déficit hídrico en condiciones de invernadero, debido a que presentó los mayores valores en los parámetros inherentes a las relaciones hídricas como: Ψw PPT, Ψπ PT, CRAPPT, Ψ w y el volumen simplástico. Fue la variedad en presentar un marchitamiento más rápido y severo, mostrando un mayor y más rápido enrollamiento de la hoja y un cese de crecimiento mayor que en las otras variedades evaluadas (Cuadro 2 y Figura 2).

- El Ψw PPT es un parámetro importante para discernir tolerancia al estrés hídrico, entre menor sea el valor, mayor tolerancia al estrés hídrico demuestra; en caña de azúcar se estipula un valor de -1,50 MPa como el máximo nivel que puede alcanzar antes de presentar un grado de marchitez irreversible en variedades tolerantes. En este estudio los valores de menor magnitud los presentaron las variedades RB 86-7515 y LAICA 12-331 (Figura 2).

- Es posible establecer el potencial hídrico, por variedad de caña de azúcar, donde la planta está a punto de sufrir efectos irreversibles en su crecimiento, valores que en promedio rondan los -1,40 MPa como inicio de síntomas de marchitamiento, siendo este diferente entre variedades. De este modo se puede incluir al Ψw como una medición temprana e *in situ* para reducir las bajas en rendimiento agrícola por efecto del déficit hídrico.

- La técnica de curvas presión/volumen resultó ser una herramienta en la detección de variedades tolerantes a la sequía, y es recomendable incorporarlo en los procesos de mejoramiento genético y en la identificación de materiales con rasgos de tolerancia a estrés por déficit hídrico para las regiones con períodos de sequía prolongados.

Literatura citada

Amaya, A; Cock, J., Hernández, A. y J. Irvine. 1995. *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia*. Cenicaña. Cali: Cenicaña.

Azcón, J. y Talón, M. 2000. *Fundamentos de Fisiología Vegetal.* Barcelona España: Ed Mggraw-Hill. 1-51 pp.

Barker, D; Sullivan, C. y Moser, L. 1993. *Water deficit effects on osmotic potential, cell wall elasticity, and proline in five forage grasses*. Agronomy Journal 85: 270-275.

Bartlett, M; Scoffoni, C. y Sack, L. 2012. *The determinants of leaf turgor loss point and prediction of drought tolerance of species and biomes: A global meta-analysis.* Ecology Letters 15(5): 393-405.

Basnayake, J; Jackson, P; Inman-Bamber, N. y Lakshmanan. P. 2012. *Sugarcane for water-limited environments*. Genetic variation in cane yield and sugar content in response to water stress. Journal of Experimental Botany 63(16): 6023–6033.

Chaves, M. 2015. *Principales variedades de caña cultivadas comercialmente en algunos países de tradición azucarera del Continente Americano.* San Jose. CR. Disponible en: https://www.laica.co.cr/biblioteca/servlet/DownloadServlet?c=443

Eksteen, A; Singels, A. y S. Ngxaliwe. 2015. *Water relations of two contrasting sugarcane genotypes.* Field Crops Research 168: 86-100.

Graca, J; Rodrigues, F; Farias, F; Oliveira, C; Hoffmann, C. y S. Zingaretti. 2010. *Physiological parameters in sugarcane cultivars submitted to water deficit*. Brazilian Society of Plant Physiology.

Gutiérrez, M. 2014. *Las relaciones hídricas y la tolerancia a la sequía en la caña de azúcar*. IX Congreso de ATALAC. San José, Costa Rica.

Inman-Bamber, N. y de Jager, J. 1986. *The reaction of two varieties of sugarcane to water stress.* Field Crops Rearch 15:15-28.

Inman-Bamber, N. y D. Smith. 2005. *Water relations in sugarcane and response to water deficits.* Field Crops Research 92(2–3): 185–202.

Inman-Bamber, N; Lakshmanan, P. y S. Park. 2012. *Sugarcane for water-limited environments: theoretical assessment of suitable traits.* Field Crops Research 15:15-28

Johnsen, K. y J. Major. 2004. *Técnicas ecofisiológicas en la evaluación de germoplasma.* Manejo de Recursos genéticos forestales. Documentos presentados en el segundo Seminario Taller sobre Manejo de Recursos Genéticos Forestales realizado los días 11 y 12 de abril de 1995 en la Universidad Autónoma de Chapingo. Segunda Edición. Comisión Nacional Forestal. 159 p.

Lenz, T; Wright, I. y M. Westdy. 2006. *Interrelations among pressure-volume curve traits across species and water availability gradients.* Physiologia Plantarum. 127(3): 423– 433.

Meinzer, F. 2002. *Co-ordination of vapour and liquid phase water transport properties in plants.* Plant Cell and Environment 25(2), 265-274.

Meinzer, F; Station, D. y H. Association. 1990. *Stomatal and hydraulic conductance in growing sugarcane: stomatal adjustment to water transport capacity.* Plant Cell and Environment 13(4), 383-388.

Miyashita, K; Tanakamaru. S; Maitani, T. y K. Kimura. 2005. *Recovery responses of photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance in kidney bean following drought stress*. Environ. Exp. Bot. 53(2): 205-215.

Moore, P. y F. Botha. 2014. *Sugarcane Physiology, Biochemistry & Functional Biology*. New York: Ed John Wiley & Sons, Inc. Iowa USA.

Polanía, J; Tafur, M. y L. Rodríguez. 2003. *Curva Presión/Volumen de la caña de azúcar variedad CC 8592 en condiciones del Valle del Cauca*. Acta Agronómica 52(1): 71-76.

Saliendra, N; Meinzer, C. y D. Grantz. 1990. *Water potential in sugarcane measured from leaf segments in a pressure chamber.* Agronomy journal 82(2), 358-361.

Welbaum, G; y F. Meinzer. 1990. *Compartamentation of solutes and water in developing sugarcane stalk tissue*. Plant Physiology 93(3): 1157–1153.

Wolpert, S. (2012). *Which plants will survive droughts, climate change.* Disponible en: http://newsroom.ucla.edu/releases/which-plants-will-survive-droughts-231567

NUEVAS PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO BIOTECNOLÓGICO CON MICROORGANISMOS BENÉFICOS PARA LA CAÑA DE AZÚCAR

Alejandro Rodríguez Morales[1]

Resumen

Para mantener su competitividad y rentabilidad, y a la vez, corresponder con las demandas de los consumidores por productos libres de agroquímicos y producidos con mínimo impacto ambiental y social, la agricultura moderna debe de enfocarse en el desarrollo de alternativas biotecnológicas con microorganismos benéficos. Los microorganismos benéficos protegen a las plantas del ataque de plagas, enfermedades y del efecto de eventos abióticos que las estresan; además, estimulan su crecimiento mediante la producción de reguladores de crecimiento (fitohormonas), la fijación y la solubilización de elementos esenciales como el Nitrógeno, el Fósforo y el Potasio, y mediante la eliminación de sustancias tóxicas acumuladas en el suelo (biorremediación). Los dos grupos de microorganismos benéficos que han mostrado mayor potencial para uso comercial en la agricultura, son los Agentes de Control Biológico (ACB), también conocidos como "Bioplaguicidas", y más recientemente, el grupo de las Bacterias Promotoras de crecimiento Vegetal (BPCV), tradicionalmente conocidos como "Biofertilizantes" o "Bioinoculantes". Se explica a continuación las características principales y el modo de acción de estos insumos biológicos, y con base en una amplia revisión sobre los avances científicos alcanzados en su producción y utilización, se propone varias líneas de investigación y desarrollo (I+D) para el cultivo de la caña de azúcar.

Introducción

Si bien la Revolución Verde permitió incrementar la producción agrícola significativamente mediante el desarrollo de semillas mejoradas, plaguicidas y fertilizantes químicos (agroquímicos en general), a lo largo de las décadas, esto ha tenido un impacto negativo en la sostenibilidad de la agricultura, así como en la salud humana y en el ambiente (Pindi y Satyanarayana 2012; Damalas y Koutroubas 2018).

Los efectos negativos derivados del uso de plaguicidas, están ampliamente documentados, pero paradójicamente, si no se les utiliza, se podrían experimentar pérdidas de entre el 31 y el 42% de la producción de alimentos (Peláez y Mizukawa 2017).

Actualmente la población mundial ronda los 7,0 billones de personas, pero se espera que para el año 2050 se incremente a 9,1 billones, lo que supondrá un incremento del 70% en la producción de alimentos (Singh *et al* 2018), por lo que, de no adoptar sistemas de producción más sostenibles, supondrá también un incremento en el uso de

[1] Ingeniero Agrónomo, M. Sc. Gerente del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA-LAICA), Costa Rica. E-mail: arodriguez@laica.co.cr.

plaguicidas, tal como ha venido sucediendo. A un menor plazo, para el año 2030 se estima que la producción de alimentos deberá ser al menos un 60% mayor que la actual, donde el 85% provendrá de países en desarrollo (Pindi y Satyanarayana 2012). Datos puntuales que demuestran el incremento en el consumo de plaguicidas que se viene presentando en los últimos años, señalan por ejemplo, que entre el 2000 y el 2013, su consumo a nivel mundial aumentó en 140%, estableciéndose en un valor de mercado de USD 61,0 billones/año (Peláez y Mizukawa 2017); asimismo, para el año 2013, el consumo de plaguicidas se estableció en 45,39 t (Singh *et al* 2018)

Está ampliamente documentado que el uso indiscriminado de plaguicidas, debido a procesos de presión de selección, resulta en la adquisición de resistencia por parte de las plagas meta, sean estas insectos, patógenos, nematodos o de cualquier otra naturaleza (Singh *et al* 2018). La situación se agudiza al comprobarse que algunos plaguicidas como los neonicotinoides, afectan a las abejas polinizadoras y con esto, la polinización de decenas de cultivos, reduciendo su productividad de forma significativa.

Es por esta razón que a partir del año 2016, 5 ingredientes activos (IA) con esta sustancia, fueron prohibidos en la Unión Europea (Peláez y Mizukawa 2017). Este tipo de casos ha resultado en la instauración de nuevas y más estrictas regulaciones para el uso de plaguicidas a nivel internacional, y a la vez, ha obligado a las empresas químicas a invertir más fondos en el desarrollo de nuevas moléculas con concentraciones reducidas de IA y con mayor selectividad; por supuesto, los mayores costos de desarrollo han provocado un incremento en el precio final de estos productos, haciéndolos prohibitivos para la agricultura de baja escala o de subsistencia (Peláez y Mizukawa 2017; Damalas y Koutroubas, 2018).

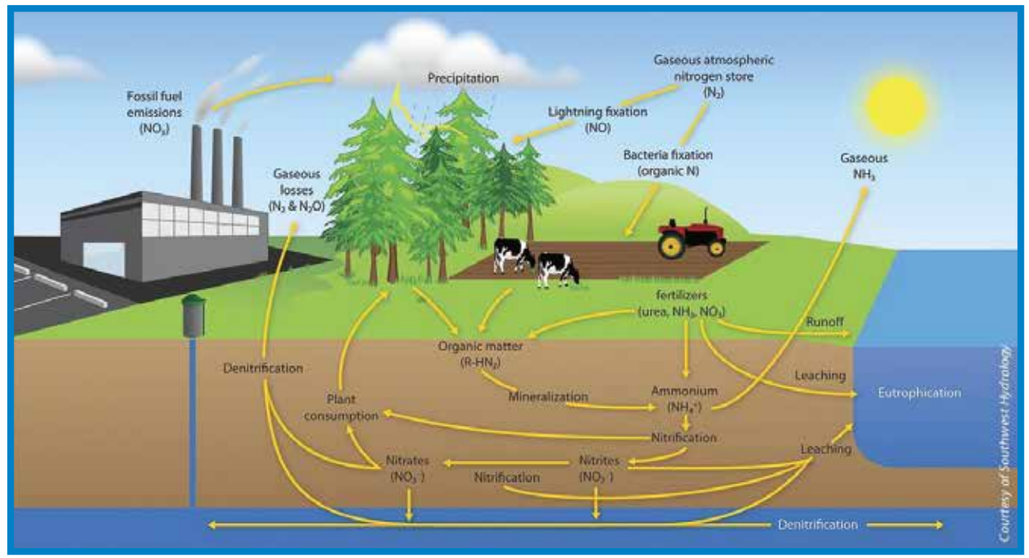
La situación con el uso de fertilizantes es también crítica, pues en su consumo, media la noción de que estas sustancias no son igual de tóxicas y contaminantes que los plaguicidas; no obstante, en su producción y utilización, se producen enormes cantidades de gases con efecto invernadero (GEI). El caso más representativo de contaminación derivada de la aplicación de fertilizantes, se presenta con las fuentes nitrogenadas, cuya producción requiere altas cantidades de energía proveniente de fuentes fósiles (bunker, gas, nafta y carbón, entre otros), por lo que se producen grandes emisiones de dióxido de Carbono (CO_2) a la atmósfera.

Por otra parte, a nivel de suelo, los nitratos solubles provenientes de los fertilizantes nitrogenados son transformados a óxido nitroso (N_2O), que es un GEI con un potencial de calentamiento 300 veces mayor que el propio CO_2 (Vejan *et al* 2016). Un dato alarmante es que en los Estados Unidos de América (EE.UU), el 74% de las emisiones de N_2O son derivadas de la agricultura (Rakshit *et al* 2015). Otro efecto detrimental a nivel del suelo, se da porque estas sustancias favorecen la pérdida gradual de la materia orgánica y de algunos microelementos que son básicos para el crecimiento y producción de los cultivos; asimismo, algunas fuentes como la Urea ($CO(NH_2)_2$), tienden a acidificar el suelo, afectando su microbiología y reduciendo la disponibilidad de macroelementos como el Fósforo y el Calcio, pero aumentando la disponibilidad de microelementos como el hierro y el aluminio, los cuales al sobrepasar las necesidades de las plantas, producen intoxicaciones y problemas de crecimiento y desarrollo de la raíz y la parte aérea.

Estos efectos finalmente derivan en una menor respuesta de las plantas a la fertilización, lo que unido a la ya reconocida

baja eficiencia de las fuentes nitrogenadas, la cual fluctúa entre el 25 y 50% (Pindi y Satyanarayana 2012; Pindy y Satyanarayana 2012; Rivera-Urbalejo et al 2017), conduce a incrementar las tasas de aplicación de fertilizantes y con esto, a agravar la situación.

Adicionalmente, otros efectos negativos a nivel ambiental y de la salud, se presentan cuando por escorrentía superficial, las fuentes con Nitrógeno arriban a cuerpos de agua superficiales provocando su eutrofización (incremento desmedido de algas) y consiguiente disminución en la concentración de oxígeno en el agua, lo que produce finalmente la muerte de muchas especies acuáticas (Rivera-Urbalejo *et al* 2017). A nivel subterráneo, debido a procesos de lixiviación, los nitratos pueden alcanzar mantos acuíferos utilizados para el consumo humano, lo cual es un riesgo, pues se ha comprobado que la ingesta de agua contaminada con nitratos, está asociada a ciertos tipos de cáncer como el cáncer colo-rectal y el cáncer de mama (Espejo[1] *et al* 2016; Espejo[2] *et al* 2016). La figura 1 resume las consecuencias ambientales derivadas de la producción y aplicación de los fertilizantes nitrogenados.



Fuente: Rosenstock *et al* 2012.

Figura 1.

Ciclo del Nitrógeno y efectos derivados de la producción y utilización de fertilizantes nitrogenados.

La caña de azúcar es un cultivo ampliamente distribuido a nivel mundial en al menos 130 países, estimándose un área de siembra de entre 25 y 40 millones de hectáreas, con una productividad promedio entre las 60 y 80 t/ha (Sumana y Singh 2012, Velasco-Velasco 2014). Ocupa el noveno lugar en importancia produciendo anualmente USD 56,0 billones (Velasco-Velasco 2014). Es además un cultivo altamente extractor de nutrientes del suelo y por ello, requiere altos niveles de fertilización que van desde 130-39-280 (Nitrógeno, Fósforo y Potasio); sin embargo, considerando únicamente la fertilización nitrogenada, las tasas de aplicación pueden sobrepasar los 300 kg/ha/año (México, Venezuela, Cuba), e incluso, los 400 kg/ha/año (Hawaii, EE.UU) (Rivera-Urbalejo *et al* 2017). Por el contrario, en Brasil, la fertilización con Nitrógeno necesaria para obtener rendimientos agrícolas elevados (cercanos a las 100 t/ha/año), por décadas se ha establecido entre los 50 y 60 kg/ha/año, sin encontrar evidencia de disminución en las reservas de este elemento en el suelo. Esto, al menos en un 70%, ha sido atribuido al aporte de las bacterias fijadoras de Nitrógeno (BFN) (Velasco-Velasco 2014; Rivera-Urbalejo *et al* 2017).

Ante este panorama, y considerando los efectos del cambio climático que cada año se presentan con mayor severidad, la agricultura moderna debe de adoptar una visión sostenible y adaptable, aprovechando el gran potencial de los microorganismos benéficos (hongos, bacterias, algas, etc.), para estimular el crecimiento de las plantas y defenderlas del ataque de insectos y patógenos, así como de condiciones de estrés. Los dos grupos más exitosos de microorganismos benéficos que podrían aportar estos beneficios son los Agentes de Control Biológico (ACB) y las Bacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal (BPCV), ingredientes principales para la preparación de los Bioplaguicidas y los Biofertilizantes. Se describe a continuación las principales características, beneficios y aplicaciones biotecnológicas que aportan estos aliados biológicos. Asimismo, con base en los avances científicos alcanzados, se proponen varias líneas de investigación y desarrollo (I+D) con potencial, para complementar los esfuerzos en *pro* de la sostenibilidad, productividad y rentabilidad del cultivo de la caña de azúcar.

Objetivo Principal

Proponer líneas de I +D con insumos biotecnológicos a base de microorganismos benéficos, con potencial para complementar la nutrición y sanidad del cultivo de la caña de azúcar, y contribuir con la sostenibilidad y rentabilidad de la actividad cañera.

Objetivos Específicos

- Estudiar los avances en el desarrollo y utilización de Biofertilizantes y Bioplaguicidas, su mercado e impacto en la producción de cultivos a nivel mundial.
- Identificar líneas de I + D con alto potencial de implementación en el cultivo de la caña de azúcar.
- Proponer proyectos específicos enfocados en la atención de las principales necesidades nutricionales y fitosanitarias del cultivo de la caña de azúcar.

Bioplaguicidas, biofertilizantes y su mercado global

Los bioplaguicidas son materiales naturales derivados de animales, plantas, hongos, virus y bacterias, así como ciertos minerales, que se utilizan para el control de plagas. La Agencia Noteamericana para la Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), divide los bioplaguicidas en tres clases: a) Plaguicidas Microbianos, cuyo IA son microorganismos con efecto supresor de plagas y enfermedades, como por ejemplo: hongos y bacterias entomopatógenos (*Metarhizium anisopliae, Beauveria bassiana, Bacillus thuringiensis*), y hongos y bacterias que controlan patógenos (*Trichoderma* spp, *Bacillus subtilis*); b) Plaguicidas Bioquímicos, cuyo IA son sustancias naturales extraídas de microorganismos y plantas, que actúan mediante mecanismos que no son tóxicos; se incluye dentro de este grupo a las feromonas y otros atrayentes; c) Agentes Incorporados a las Plantas (PIP, por sus siglas en inglés), como por ejemplo, plantas modificadas genéticamente que producen sustancias con efecto plaguicida (Olson 2015; Peláez y Mizukawa 2017).

En las últimas 2 décadas los bioplaguicidas han adquirido mayor popularidad al ser considerados más seguros que los plaguicidas convencionales. Esto se debe a: que son más selectivos y específicos sobre determinada plaga de interés: son efectivos en pequeñas cantidades; no generan resistencia; se descomponen rápidamente en el ambiente sin dejar residuos peligrosos; no requieren de períodos de reingreso o de carencia; y porque pueden combinarse con otras prácticas agrícolas, incluso, con la aplicación de plaguicidas.

Por estas razones los bioplaguicidas forman parte importante dentro del Manejo Integrado de Plagas (MIP) y generan año a año, mayor interés en los productores más interesados en el manejo ecológico y sostenible de las enfermedades (Patel *et al* 2014; Olson 2015; Peláez y Mizukawa 2017; Damalas y Koutroubas 2018).

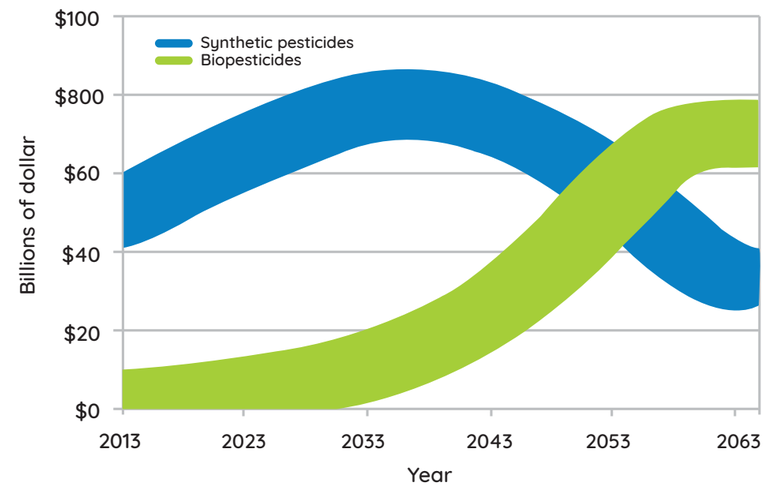
El uso de bioplaguicidas comenzó a finales del siglo 18 con la aplicación de hongos para el control de insectos. Uno de los casos más documentados fue reportado por Agostino Bassi (Italia), quien en 1835 demostró que las esporas del hongo "muscardina blanca" (actualmente *B. bassiana*), eran las responsables de la muerte del gusano de la seda; como reconocimiento, la especie del hongo *B. bassiana*, deriva de su apellido. A pesar que los primeros descubrimientos y avances ocurrieron con hongos, el prototipo de un bioplaguicida proviene de una bacteria: *B. thuringiensis* (Bt), la cual produce cristales tóxicos que al ser ingeridos por el insecto, a nivel de tracto digestivo produce agujeros y provoca la contaminación de la hemolinfa con bacterias, lo que finalmente deriva en una septicemia masiva y en la muerte del insecto.

Entre el 2014 y 2015, el 75% a 90% del mercado mundial de bioplaguicidas, perteneció a productos derivados de Bt (Olson 2015; Damalas y Koutroubas 2018).

El mercado actual de los bioplaguicidas tiene un valor de poco más de USD 3,0 billones al año, lo que representa apenas el 5% del mercado mundial de los plaguicidas. No obstante, este segmento de la industria está teniendo un crecimiento compuesto anual (CCA) del 8,64% y se espera que se mantenga esta tendencia al menos hasta el año 2023, cuando alcanzaría un valor de mercado cercano a los USD 4,5 billones, representando el 7% del mercado global.

De continuar esta tendencia, se esperaría que para el 2050, ambos mercados equiparen sus ventas en cerca de USD 60 billones al año (Figura 2); sin embargo, el plazo podría reducirse de manera importante, si recrudecen y se expanden las regulaciones internacionales sobre el uso de plaguicidas convencionales, y si su costo de desarrollo continúa aumentando como hasta la fecha (Olson 2015; Damalas y Koutroubas 2018). Grandes compañías tradicionalmente ligadas al desarrollo de plaguicidas (BASF, Bayer, Syngenta y Monsanto, entre otras), han visualizado esta tendencia y desde el 2012 vienen en un proceso de adquisición de medianas y pequeñas compañías de bioplaguicidas, buscando ampliar su portafolio de Bioplaguicidas (Peláez y Mizukawa 2017).

Al igual que sucede con los Bioplaguicidas, el uso de los Biofertilizantes viene creciendo en importancia a nivel mundial, principalmente asociado a las constantes críticas y presiones ante el uso de los ferti-



Fuente: Olson, 2015.

Figura 2.

Tendencias presentes y futuras en el mercado y ventas de los plaguicidas sintéticos y los bioplaguicidas.

fertilizantes químicos sintéticos y al efecto negativo que estos producen en el suelo, el agua y la atmósfera.

En un sentido amplio, los biofertilizantes son preparaciones microbianas (sólidas o líquidas) que contienen células vivas de diferentes microorganismos que tienen la habilidad de movilizar nutrientes del suelo, haciéndolos fácilmente asimilables por las plantas. Otra definición más amplia señala que son sustancias que contienen microorganismos vivos que colonizan la rizósfera (parte del suelo íntimamente ligada a la raíz) y en relación con la planta, le facilitan la absorción de nutrientes, estimulan el crecimiento y las defienden tanto de factores bióticos, como abióticos (Vejan et al 2016; Velasco-Velasco 2014). Los biofertilizantes son utilizados en formulaciones vivas que al aplicarse a las semillas, raíces o directamente al suelo, movilizan sus nutrientes, degradan sustancias tóxicas, aceleran la descomposición de la materia orgánica y en general, coadyuvan en la restitución de microflora y la salud del suelo (Subirós 2011; Bhattacharjee y Dey 2014; Vejan *et al* 2016;). Es por estas razones que han mostrado gran potencial como fuente renovable y ambientalmente adecuada para la nutrición de las plantas.

Es importante diferenciar los Biofertilizantes de los comúnmente denominados "Bio-

fermentos" o "bioles". Como se indicó, los Biofertilizantes son productos en estado sólido o líquido, diseñados exclusivamente para que contengan microorganismos específicos, con modos de acción bien conocidos (por ejemplo, producción de reguladores, fijación de Nitrógeno, solubilización de Fósforo, promoción de crecimiento). Por el contrario, los Biofermentos son sustratos líquidos altamente colonizados por microorganismos descomponedores (no identificados), que se producen al fermentar, bajo condiciones anaerobias, un sustrato altamente colonizado (mantillo de bosque), junto con una fuente de Carbono (melaza); estos pueden contener microorganismos con funciones similares a las de los Biofertilizantes, pero no son diseñados exclusivamente para ese fin.

Las bacterias colectivamente denominadas como Bacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal (BPCV), son el grupo más estudiado y utilizado para la producción de Biofertilizantes, dada su capacidad de fijar Nitrógeno (N_2), solubilizar fosfatos y generar fitohormonas (auxinas, giberelinas y citoquininas) que estimulan el crecimiento vegetal (Bhattacharjee y Dey 2014; da Silva *et al* 2015; da Silva *et al* 2017).

Precisamente, dadas las consideraciones ambientales derivadas del uso de los fertilizantes nitrogenados que anteriormente fueron señaladas, la biofertilización con bacterias fijadoras de Nitrógeno (BFN), sobre todo aquellas no simbióticas (de vida libre), ha adquirido gran preponderancia frente a otros tipos de biofertilizantes (Velasco-Velasco 2014). Estos productos pueden incrementar en al menos un 20% el

Cuadro 1.

Principales Bacterias Promotores de Crecimiento Vegetal
y su Modo de Acción.

Especies de bacterias aiasladas en caña de azúcar	Efectos beneficiosos principales en la planta	Principales estudios realizados
Azospirillum brasilense	Fijación de nitrógeno Producción de fitohormonas de crecimiento vegetal	Aislamientos, identificación y validación en campo Medios de cultivo
Azotobacter sp.	Fijación de nitrógeno Producción de fitohormonas de crecimiento vegetal	Aislamiento, identificación y caracterización, validación de campo.
Acetobacter diazotrophicus (Gluconacetobacter diazotrophicus)	Fijación de nitrógeno Producción de fitohormonas de crecimiento Estimulador de crecimiento	Aislamiento, identificación y caracterización, validación de campo.
Burkholdenia cepacia (Pseudomonas)	Efectos antagónicos ante los hongos patógenos	Mecanismos de acción de la bacteria
Pantoea sp.	Macanismo de acción como bacteria endófita	Aislamientos

Fuente: Torriente 2010, citado por Velazco-Velazco 2014).

crecimiento de las raíces, parte aérea y en general de la planta (da Silva *et al* 2017).

Los géneros y especies de BFN más ampliamente estudiados son: *Azospirillum* sp, *Herbaspirillum* sp, *Bacillus* spp y *Gluconacetobacter diazotrophicus* (da Silva *et al* 2015; Bhattacharjee y Dey 2014; Becerra-de Armas *et al* 2014; da Silva *et al* 2017). Azospirillum brasilense, A. lipoferum y A. amazonense, pueden fijar entre 20 y 40 kg de Nitrógeno/ha/año en cultivos como cereales, oleaginosas y algodón; por su parte, *G. diazotrophicus* asociada a la caña de azúcar, sorgo y café, tiene el potencial de fijar hasta 30 kg/ha/año de Nitrógeno. Algunos reportes han informado que *G. diazotrophicus* puede fijar hasta 100 kg/ha/año. El cuadro 1 resume las principales BPCV y sus modos de acción.

Las formulaciones de Biofertilizantes pueden ser en polvos, gránulos, pellets, cápsulas o en suspensiones aceitosas o acuosas, dependiendo del material que será inoculado y del equipo de aplicación. La formulación más tradicional y antigua de Biofertilizantes o Bioinoculantes, es el caso de

la bacteria *Rhyzobium* sp, que fija Nitrógeno de forma simbiótica en plantas de la familia Fabaceae (leguminosas). La bacteria se mezcla con acarreador o "carrier", generalmente turba, y este producto se usa para crear una cobertura sobre la semilla, la cual al germinar, se infecta con la bacteria.

En años más recientes se ha descubierto que los biofertilizantes, sobre todo aquellos a base de BPCV, sean éstas rizosféricas (que viven en la rizósfera) o endófitas (que viven dentro del tejidos vegetales), son más efectivos cuando se aplican a nivel de vivero, o incluso durante el proceso de aclimatación de clones provenientes de cultivo de tejidos, ya que esta práctica asegura una máxima colonización debido a que el material vegetal está prácticamente desprovisto de bacterias que podrían antagonizar. A este proceso se le denomina en inglés "bio-priming" o "bio-hardening", algo similar a "bio-endurecimiento" (Jisha *et al* 2013; Rakshit *et al* 2015; Rivera-Urbalejo *et al* 2017). Este tema será ampliado posteriormente.

El uso de los Biofertilizantes (también llamados Bioestimulantes o Bioinoculantes) en la agricultura, ha tenido un crecimiento sostenido del 10% anual en la última década. En países como la India en donde esta tecnología está bien posicionada, el consumo anual promedio se establece en 45.000 t, pero la producción apenas llena el 50% de la demanda. Los esfuerzos institucionales y privados en ese país, procuran alcanzar una producción de al menos 60.000 t para el año 2020 (Pindi y Satyanarayana 2012). Se ha calculado que el mercado mundial de Biofertilizantes podría rondar los USD 3,0 billones (Rakshit *et al* 2015).

Avances en el uso de Biofertilizantes en la caña de azúcar

En Costa Rica hay muy pocas referencias sobre el potencial de los Biofertilizantes en el cultivo de la caña de azúcar. Una de las pocas pero más promisorias experiencias se llevó a cabo en la provincia de Guanacaste, cantón de Carrillo, en el ingenio El Viejo, en donde se reportó que la aplicación de un Biofertilizante a base de *Azotobacter chroococcum*, tres cepas de *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas cepacea* y *P. fluorescens*, en combinación con el 50% de la dosis normal de Nitrógeno (130 kg/ha de urea), produjo los mismos rendimientos agrícolas e industriales que caña producida con la dosis total de Nitrógeno (Subirós 2011).

En Cuba aplicación de Biofertilizantes a base de BPCV inició en los años 90 y los avances más importantes se ha obtenido con *A. brasilense, G. diazotrophicus, Burkholderia cepacia* y *Pantoea* sp, aplicadas utilizando la cachaza como vehículo o "carrier". Los resultados más positivos se han logrado utilizando cachaza y no biofertilizantes líquidos; bajo este sistema se han conseguido obtener hasta 13,62 t/ha más de caña, que los controles 100% fertilizados con fuentes químicas. En resumen, el 76% de las experiencias en campo en Cuba, han sido positivas logrando rendimientos entre 25 y 35% superiores con biofertilizantes (Velasco-Velasco 2014). Se ha identificado además, un efecto varietal muy marcado, por lo que la tecnología debe evaluarse también a ese nivel (da Silva *et al* 2017). Utilizando *B. cepacia* los resultados más promisorios revelan incrementos agroindustriales de hasta el 25%. Se demostró además que esta bacteria es una eficaz solubilizadora de fosfatos. Por el contrario, aunque *Pantoea dispersa* fue catalogada como una eficaz fijadora de Nitrógeno, los resultados en campo no han sido concluyentes (da Silva *et al* 2017). Otros resultados positivos en campo se lograron aplicando un biofertilizante a base de *Azospirillum* sp y la variedad C86-12, bajo dos modalidades: aspersión con posterior arrope de paja de caña y mediante incorporación al suelo. Los resultados indicaron nuevamente una buena respuesta a la inoculación de *A brasilense* (75 L/ha) y el 40% de la fertilización normal con Nitrógeno, bajo la modalidad asperjado con arrope de paja de caña, con lo que se alcanzó una producción de 101,08 t/ha, mientras que el testigo alcanzó las 60 t/ha (Becerra-De Armas *et al* 2014).

En Colombia utilizando plantas de la variedad CC 934418 sembradas en macetas con un sustrato rico en nutrientes, se evaluó la eficacia individual de una cepa de *A. brasiliense, A chroococcum* y el hongo *Trichoderma lignorum*, sobre las principales variables de crecimiento de la caña de azúcar (longitud del tallo y raíz, número de raíces y hojas y diámetro del tallo), en tres períodos después de la inoculación: 15, 30 y 45 días. Los resultados mostraron para todas las variables y cepas evaluadas, un mayor crecimiento vegetativo, en comparación al control no inoculado. Entre los aislamientos se destacó *A. brasilense* (Serna-Cock *et al* 2011).

Brasil, país pionero en la investigación y desarrollo de biofertilizantes a base de BPCV, ha mostrado los avances más significativos y el uso comercial más extendido. Ejemplos de resultados positivos indican que la mezcla de *H. seropedicae, H. rubrisubalbicans* y *G. diazotrophicus* aplicadas 60 días después del rebrote de la variedad Rb 96 7515, bajo un régimen de aplicación de Nitrógeno de 15 kg/ha (lo que corresponde a 1/3 de la aplicación comercial en ese país), permitió en un lapso de 3 cosechas, incrementar en 37% el número de tallos respecto al control. Asimismo, la productividad en la primera y segunda cosecha aumentó en 5 y 24%, respectivamente. La primera cosecha estuvo influenciada por un período fuerte de sequía.

En un segundo experimento utilizando parcelas de mayor tamaño, se obtuvieron rendimientos superiores en un 19 y 18% en cosechas consecutivas, respecto al control, lo que representó 11 y 13 t/ha. No se determinaron diferencias en el contenido de sólidos solubles ni en el de azúcares polarizables en el jugo en ambos experimentos (da Silva *et al* 2017)

La utilización de biofertilizantes a base de *A. brasilense*, ha sido exitosa también en México, en donde bajo un sistema de fertilización reducido en Nitrógeno (50 kg/ha), los rendimientos fueron muy similares a los alcanzados bajo un sistema con 300 kg/ha de Nitrógeno (Velasco-Velasco 2014). Estos insumos han mostrado también potencial en la solubilización de fosfatos, principalmente con las bacterias *Enterobacter agglomerans, Bacillus megaterium, Bacillus* sp y *Acidithiobacillus* spp (Velasco-Velasco 2014).

Avances en el uso de Bioplaguicidas en caña de azúcar

Además de los ya conocidos y exitosos programas nacionales de producción de los hongos entomopatógenos (*Metarhizium anisopliae* y *Beauveria bassiana*), para el combate de diferentes plagas que aquejan al cultivo como: el salivazo o baba de culebra (*Aeneolamia* spp, *Prosapia* spp y *Zulia vilior*), el picudo rayado (*Metamasius hemipterus*), la chinche de encaje (*Leptodictya tabida*) y la cigarrita antillana (*Saccharosydne saccharivora*), entre otros, existe gran potencial para el combate de otras plagas de importancia económica muy bien establecidas y extendidas, como es el caso del joboto (*Phyllophaga* spp), así como para otras plagas emergentes, pero sumamente agresivas como el áfido amarillo (*Sipha flava*) y la cochinilla harinosa (*Saccharicoccus sacchari*).

En el ámbito del control biológico de patógenos, el hongo *Trichoderma* spp presenta gran potencial para el control de la pudrición roja, causada por *Colletotrichum falcatum* y el combate del cogollo retorcido, causada por *Fusarium moniliforme*. Asimismo, se reporta potencial de control biológico de enfermedades bacterianas que ocasionan marchitez de la planta, mediante diferentes tipos de antagonistas, como se expondrá posteriormente.

En el desarrollo de ACB y de cualquier insumo biológico, debe de considerarse dos aspectos fundamentales: El uso de cepas nativas, locales o regionales, y la implementación de protocolos eficaces para seleccionar a aquellos candidatos con mayor potencial. Está ampliamente demostrado que el uso de cepas locales aumenta las probabilidades de éxito, puesto que éstas están adaptadas a las condiciones edáficas agroecológicas y climatológicas del sitio, en comparación con cepas foráneas (Mehnaz 2011). Asimismo, es de gran importancia poseer una robusta y amplia colección de cepas de los diferentes ACB provenientes de las diferentes regiones en donde se presentan las plagas, pues según las estadísticas, luego del proceso de evaluación, solamente una de cada 100 cepas evaluadas tiene el potencial de constituirse en un producto eficaz y rentable a escala comercial (Kohl *et al* 2011).

Con respecto al control del joboto (*Phyllophaga* spp), y en general, de plagas de insectos taxonómicamente cercanos, con una biología y generación de daños similar a éste, existe mucho potencial con bacterias esporuladas del género *Bacillus*, como *B. popillae* y más recientemente con *B. thuringiensis*. Nuevas investigaciones reportan que aislamientos de *Bt* que poseen en su genoma al gen de la familia *cry* 8, reportado como codificador de toxinas específicas para escarábidos como *Holotrichia serrata*., resultan ser letales para el insecto. Se establece además en estos estudios, que la rápida acción de estas bacterias, aunado a su facilidad para reproducirlas a gran escala, incrementan el potencial de control frente a hongos como *Beauveria brongniartii*, *B. bassiana* y *Metarhizium anisopliae*, así como las probabilidades de adoptar la tecnología (Singaravelu *et al* 2013). Aquellos aislamientos con el gen cry8 se incluyen dentro del serovar *B. thuringiensis 0 ponensis*. La biotecnología ha permitido formular productos a base de esta toxina, mediante la cual se reporta buen control de diferentes especies de jobotos (white grubs) como *Anomala orientalis*, *Popillia japónica*, *Maladera castanea* y *Rhizotrogus majalis*, afectando césped de canchas de golf, a dosis de hasta 100g/ha (Bixby *et al* 2014; Srikanth *et al* 2016).

Adicionalmente en el ámbito de las bacterias entomopatógenas, se reporta el potencial de aislamientos de la bacteria *Serratia marcescens* a nivel experimental en laboratorio, sobre *Phyllophaga blanchardi*. Los estudios sugieren que el efecto tóxico se debe a la acción de proteínas. En el mismo experimento larvas de *Spodoptera frugiperda* no mostraron sensibilidad a la bacteria, indicando esto algún nivel de especificidad (Chelvi *et al* 2011).

Si bien está ampliamente documentado que las bacterias muestran un enorme potencial, algunas investigaciones a nivel experimental en vivero y campo, reportan también altos niveles de control por parte de hongos como *M. anisopliae*; por ejemplo, en México, se ha informado mayor potencial por parte de *M. anisopliae*, sobre *B. bassiana*, ofreciendo el primero hasta un 80% de con-

trol en vivero (Nájera-Rincón *et al* 2005). Adicionalmente en la India, la aplicación experimental en campo de un aislamiento de *M. anisopliae* bajo 3 tipos de formulación (talco, turba comprimida o lignita y formulación líquida) reportó altos niveles de control de *H. serrata* en niveles de 78,58%, 76,87% y 81,0%, respectivamente (Chelvi *et al* 2011). Lo anterior hace pensar que las fallas con estos y otros agentes biológicos, podrían estar asociadas a la ausencia de una formulación adecuada, que permita la sobrevivencia del microoganismo en el tiempo, y a la carencia de cepas nativas altamente patogénicas, que tengan la capacidad de establecerse en el suelo y generar epizootias. Adicionalmente, se reporta un excelente control de *H. serrata* mediante el hongo *B. brongniartii* del cual se tiene un producto a escala comercial en la India (Srikanth *et al* 2016).

Complementariamente, en la literatura se encuentra gran cantidad de reportes que señalan el alto potencial y afinidad de los nematodos entomopatógenos (NEPs), también llamados entomofílicos, principalmente por los géneros *Heterorhabditis* y *Steinernema*, para el control de plagas que atacan la raíz. Estudios a nivel de campo en canchas de golf han demostrado que Popilia japónica y *Cyclocephala borealis* son más susceptibles a los NEPs cuando están en su segundo y tercer estadío larval. Al evaluar a *H. zealandica* y *H. bacteriophaga* en un período de 2 años, se encontró un nivel de control de entre el 73-98% y del 34-97%, respectivamente para *P. japónica*, y del 72-96% y del 47-83% para *C. borealis*, respectivamente. En el experimento se evaluó también cepas de *S. kraussei* y *S. glaseri*, pero mostraron menores niveles de control (Grewal *et al* 2004).

Se sabe que la respuesta del insecto a los NEps está muy asociada a su especie. Por ejemplo, a nivel de vivero, se encontró que *H. bacteriophaga* y *H. zealandica* ofrecen una virulencia moderada sobre *P. japónica*, *Anomala orientalis, C. borealis* y sobre *Maladera castanea*; por el contrario, *S. scarabaei* mostró alta virulencia sobre *R. majalis, P. japónica, A. orientales* y *M. castanea* (Kloppenhöfer *et al* 2006). Estudios complementarios han demostrado que la virulencia también está asociada a la concentración del nematodo (Girón-Pablo *et al* 2015). Otros estudios han determinado sinergia al aplicar combinaciones de NEPs y bacterias entomopatógenas como B. thuriengiensis sbs japonensis (*Btj*) (Koppenhö *et al* 1999) y combinanciones de NEPs con hongos como *Beauveria pseudobassiana* y *Metarhizium pingshaense* (Martínez-Hernández *et al* 2015).

El gran potencial de control biológico del áfido amarillo mediante el hongo entomopatógeno *Lecanicillium lecanii*, ha sido documentado en la literatura (Pardey AEB 2011) y además, observado frecuente en epizootias (infecciones masivas de insecto) en la zona del Valle Central del país, específicamente en la zona de influencia del ingenio La Argentina, en el cantón de Grecia, provincia de Alajuela (Figura 3), en los meses de julio y agosto, sobre la variedad LAICA 12 340. La virulencia y agresividad observadas por *L. lecanii* sobre el áfido amarillo, ilustra al entomopatógeno, como un agente con alto potencial para uso comercial. Similarmente en la misma zona mencionada, se han observado epizootias importantes provocadas por el hongo *Aspergillus parasiticus* sobre la cochinilla *Saccharicoccus sacchari* (Figura 3), lo cual ha sido también documentado en la literatura (Drummond *et al* 1991). Por tanto, este microorganismo podría ofrecer una alternativa en el control del insecto. Si bien la producción de aflatoxinas por parte del género Aspergillus ha sido ampliamente documentada sobre todo para *A. flavus*, este no es el caso para *A. parasiticus* en donde la producción de estas toxinas no es frecuente (Drummond y Pinnock 1990). Este resultado es alentador hacia en uso del patógeno a nivel comercial, pero no asegura que otras cepas vaya a tener el mismo comportamiento. Por lo tanto, este microorganismo debe de ser estudiado a mayor profundidad en este aspecto, con el objeto de asegurar su inocuidad y eficacia.

Fuente: A. Rodríguez M.

Figura 3.

Áfido amarillo de la caña (*Sipha flava*) infectado naturalmente por *Lecanicillium lecanii* (izquierda); cochinilla harinosa (*Saccharicoccus sacchari*), infectada naturalmente por *Aspergillus parasiticus*.

Trichoderma spp es un hongo presente en el suelo, la rizósfera de las plantas y además, puede crecer de forma endófita en las raíces y otros órganos de las plantas. Ejerce control de hongos patógenos de forma indirecta, a través de la competencia por espacio y nutrientes, modificando las condiciones en la zona de la rizósfera (pH), y mediante la promoción de crecimiento vegetal y del mecanismo de defensa de las plantas. De forma directa ejerce control a través del micoparasitismo y la antibiosis, en donde intervienen enzimas que degradan quitina y glucanos (componentes principales de la pared celular de los hongos) y diferentes sustancias de carácter antibiótico, respectivamente (Romao-Dumaresq *et al* 2012).

La aplicación de *Trichoderma* spp en el cultivo de la caña de azúcar, ofrece muchas alternativas para el control de patógenos de naturaleza fúngica. Por ejemplo, *T. viridae*, pero sobre todo *T. harzianum*, han mostrado potencial de control del hongo *Colletotrichum falcatum*, agente causal de la enfermedad de la pudrición roja del tallo, tanto a nivel de laboratorio como en campo, controlando la enfermedad en el 48% de los tallos muestreados, y reduciendo la severidad de la enfermedad en el 53% de los tallos evaluados. *T. viride* permitió el control total de la enfermedad en el 28% de los tallos y redujo la severidad en el 76%. La aplicación de *T. harzianum* y *T. viride* también permitió incrementar la productividad en hasta 10 y 9 t/ha, respectivamente. Se concluye que esta estrategia puede ser utilizada extensivamente con variedades susceptibles y/o moderadamente resistentes a la enfermedad, para prolongar su vida útil en el campo (Singh *et al* 2008).

Por otra parte, en estudios llevados a cabo en laboratorio y vivero, se demostró el buen potencial de *T. viride, T. harzianum* y *T. pseudockei*, como agentes de control biológico de *Phytophthora infestans* y *Fusarium moniliforme*, causantes de la marchitez de la caña de azúcar. Los estudios realizados en macetas con suelo estéril previamente inoculado con los patógenos y posteriormente inoculados con los antagonistas, reflejaron un control total por parte de *T. Viride* y del 95% por parte de *T. harzianum* y *T. pseodokei*. En estos dos experimentos se menciona que el micoparasitismo (parasitismo sobre un hongo), a través de la producción de enzimas líticas (quitinasas y glucanasas), fue el mecanismo de acción utilizado por los hongos antagonistas evaluados (Jena y Panigrahi 2017).

La técnica de aplicación de *Trichoderma* que ha sido más efectiva, es mediante la inoculación de plántulas provenientes de cultivo de tejido, utilizando en concepto de "bioendurecimiento" (también llamado biohardening o biopriming, en inglés) El éxito bajo este sistema se debe a que las plántulas saliendo del laboratorio de cultivo de tejidos, están prácticamente desprovistas de microorganismos a nivel de su rizósfera, por lo que aquellos que son inoculados durante la etapa de aclimatación, rápidamente se apropian del nicho y ejercen las funciones biológicas por las que fueron seleccionados (Bernal *et al* 2008; Mehnaz 2011; Jisha *et al* 2013). Está comprobado que a través de sus raíces, las plantas liberan gran cantidad de exudados que son aprovechados por los microorganismos benéficos en el suelo para colonizarlas y defenderlas de patógenos; esta estrategia de las plantas le consume entre el 10 y el 20% de los productos generados en la fotosíntesis (Patel *et al* 2014).

Por otra parte, aunque los Biofertilizantes como tales no se catalogan como Bioplaguicidas en un sentido estricto, como se explicó, muchos de los microorganismos presentes en éstos tienen también la capacidad de antagonizar con patógenos de muchos cultivos, y la caña de azúcar no es la excepción.

Por ejemplo, diferentes bacterias y actinomicetes epifíticos (que crecen en la superficie de los órganos de las plantas, sea en la parte aérea o subterránea), como *Serratia marscens, Lactobacillus sp, Bacillus spp, Pseudomonas fluorescens, Glucanacetobacter diazotrophicus* y *Streptomyces* sp, demostraron en experimentos de laboratorio y vivero, ejercer un excelente control de la pudrición roja, permitiendo el 92% de germinación, frente al 12% de germinación en plantas no tratadas con los microorganismos benéficos (Sumana y Singh 2012). Otro reporte interesante a nivel de campo, indicó que la inoculación de plantas de caña con las bacterias *Stenotrophomonas maltophilia* y *Ochrobacterium intermedium*, suprimieron el desarrollo de la pudrición roja (*C. falcatum*) en porcentajes del 52 y 44% (Hassan *et al* 2014).

Selección de microorganismos con mayor potencial.

Con base en la información revisada sobre el potencial de diferentes microorganismos benéficos y las necesidades más urgentes en la producción de la caña de azúcar en el país, se seleccionaron 19 microorganismos benéficos con alto potencial de uso en el cultivo, los cuales suman 33 efectos benéficos aprovechables. De éstos, a *Bacillus* spp, *Trichoderma* spp y *Pseudomonas* spp, son los que aportan más tipos de efectos biológicos benéficos a las plantas, con 5 (15,2%), 4 (12,1%) y 3 (9,1%), respectivamente. No obstante, otros microorganismos con gran potencial en un aspecto específico como *Azospirillum* sp, *Glucanocetobacter diazotrophicus* (FBN), así como algunos hongos y bacterias entomopatógenos, podrían ofrecer también gran potencial. Además, los entomopatógenos podrían ampliar las posibilidades de control de otras plagas insectiles de gran importancia económica no consideradas en esta propuesta, como por ejemplo: el salivazo, el barrenador gigante y algunos defoliadores

En otro ámbito, de acuerdo al tipo de efecto biológico mayormente asociado a los microorganismos preseleccionados, la Biofertilización se destaca con 14 microorganismos asociados a este efecto (42,4%); en segundo lugar, el Control Biológico de Insectos con 10 microorganismos asociados (30,3%); y en tercer lugar, el Control Biológico de Enfermedades y Estrés con 9 (27,3%).

De acuerdo al modo de acción específico o línea de I + D, la FBN y el Control Biológico de Jobotos integran a 7 microorganismos cada uno (21,2%); mientras que el Control Biológico de Enfermedades a través del parasitismo, la antibiosis y la competencia por espacio y nutrientes, integra a 5 microorganismos (15,1%). El cuadro 2 muestra las especies seleccionadas, su efecto biológico y el modo de acción en que actúan.

Cuadro 2.

Microorganismos benéficos preliminarmente considerados a evaluar su potencial en el cultivo de la caña de azúcar.

EFECTO BIOLÓGICO	BIOFERTILIZACIÓN			C. BIOLÓGICO DE ENFERMEDADES Y ESTRÉS			CONTROL BIOLÓGICO DE INSECTOS			Efectos Biológicos / micro.
Microorganismo / modo de acción	Regulares crecimiento	FBN	Solub. P y K	Parasitismo antibiosis, competencia	Resistencia Sistémica Inducida (IRS	Efecto antiestrés (sequía, salinidad)	Jobotos	Áfido amarillo	Cochinilla harinosa	
Aspergillus parasiticus									X	1
Azospirillum sp	X	X								2
Azotobacter sp	X	X								2
Bacillus spp	X	X	X	X	X					5 (15,2%)
Bacillus popilliae							X			1
B. thuringiensis							X			1
Beauveria bassiana							X	X		2
Beauveria brongniarti							X			1
Beijerinckia sp		X								1
Glucanocetobacter sp		X	X							2
Herbaspirillum sp		X								1
Lecanicillium lecanii								X		1
Metarhizium anisopliae							X			1
Pseudomonas sp			X	X		X				3 (9,1%)
Heterorhabditis sp							X			1
Stenotrophomonas		X		X						2
Steinernema sp							X			1
Serratia sp				X						1
Trichoderma spp			X	X	X	X				4 (12,1%)
TOTAL/ MODO ACCIÓN	3	7	4	5	2	2	7	2	1	33
%	9,1	21,2	12,1	15,1	6,1	6,1	21,2	6,1	3	100,0
TOTAL / EF. BIOLÓG.		14			9			10		33
%		42,4			27,3			30,3		100,0

Propuesta de proyectos de I + D en insumos biotecnológicos con efecto biofertilizante y bioplaguicida

Los proyectos específicos, su objetivo principal y duración, se detallan en el cuadro 3.

Cuadro 3.

Principales Bacterias Promotores de Crecimiento Vegetal
y su Modo de Acción.

PROYECTO	OBJETIVO	AGENTES BIOLÓGICOS
Bio-endurecimiento de material de siembra (vitro-plantas y yemas).	Establecer viveros primarios con material de siembra de alto vigor y resistencia al ataque de plagas y enfermedades.	Bacterias promotoras de crecimiento vegetal (BPCV) y de resistencia sistémica inducida (RSI), hongos antagonistas a patógenos (*Trichoderma* spp),
Biofertilización de la caña de azúcar.	Reducir la necesidad de aplicar fuentes químicas de NPK, mejorando la rentabilidad y sostenibilidad de la operación agrícola.	Bacterias fijadoras de Nitrógeno y solubilizadoras de Fósforo y Potasio.
Control biológico del áfido amarillo (*Sipha flava*)	Poner a disposición un agente biológico de alta eficacia para el combate del insecto.	*Lecaniccillium lecanii, Beauveria bassiana.*
Control biológico del joboto (*Phyllophaga* spp)	Desarrollar un producto biológico altamente eficaz contra el insecto en su fase larval, contribuyendo al Manejo Integrado de la plaga (MIP).	*Bacillus popillae, B. thuringiensis, Beauveria brongniarti, B. bassiana, Metarhizium anisopliae.*
Control biológico de la cochinilla harinosa (*Saccharicoccus sacchari*)	Identificar el potencial de *Aspergillus parasiticus* y su potencial para producir aflatoxinas.	*Aspergillus parasiticus*

Mecanismo para el aislamiento y conservación de los microorganismos de interés

Tipo de muestra

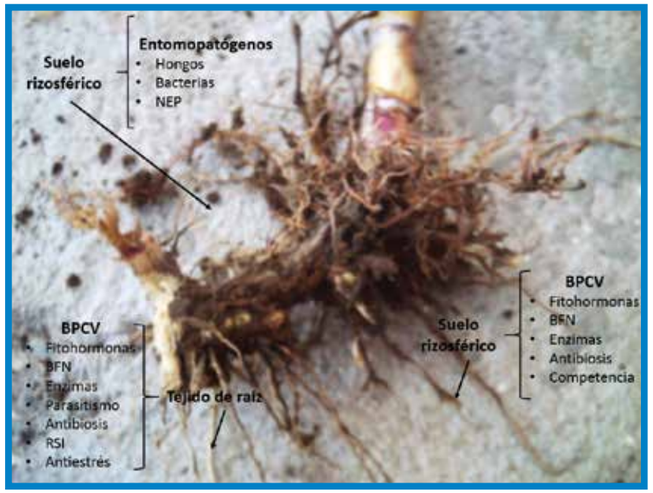
Las muestras a tomar para el aislamiento de los diferentes microorganismos de interés, provienen de tres fuentes: tejido interno de la raíz, tallo u hojas (microorganismos endófitos), suelo rizosférico (microorganismos rizosféricos) y suelo extra rizosférico. La figura 4 muestra los tipos de muestra y los grupos de microorganismos esperados a encontrar en cada uno de ellos.

Una vez tomadas las muestras, éstas son trasladadas al laboratorio (dentro de hieleras), en donde una sección representativa de cada una, será suspendida en solución salina estéril y diluida repetidamente.

Medios de cultivo y técnicas para el aislamiento

Para obtener BFN aerobias y aérobias facultativas (*Bacillus spp, G. diazotrophicus*) y bacterias anaeróbias o microaerofílicas (*Azospirillum* sp, *Herbaspirullum* sp, *Serratia* sp), se utilizan medios de cultivo agarizados (Burk´s, LG y agar nutriente) y semisólidos (Azospirillum broth, NFB y JNFB), respectivamente. La característica común de estos medios de cultivo, es que no deben contener Nitrógeno en su composición, de tal forma que su aprovisionamiento, provenga de la atmosfera interna de las placas Petri, o del Nitrógeno disuelto en la columna de los tubos de ensayo, para el caso de las bacterias microaerofílicas (Figura 5).

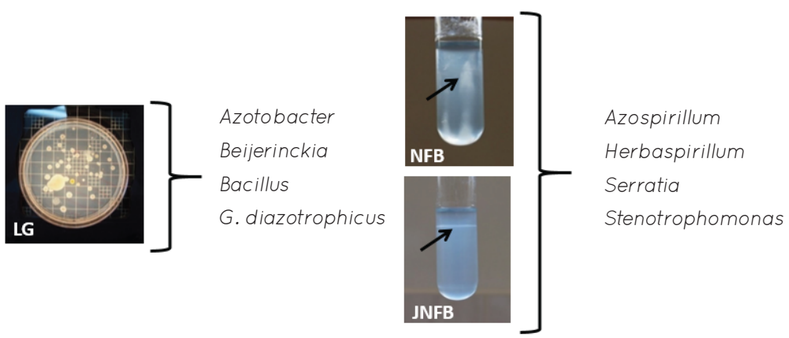
Una vez formadas las colonias en agar, o bien, los agregados o velos en los tubos de ensayo, se seleccionan los diferentes morfotipos y se reaislan en los mismos medios de cultivo. Una vez puras las colonias, son sometidas a estudios básicos para caracterizar su morfología y algunos atributos fisiológicos, y así determinar preliminarmente, si cumplen con las características típicas de los microorganismos de interés. La conservación de los aislamientos se realizará utilizando la técnica de crio-preservación dentro de viales a -80°C, lo que asegura la viabilidad de hongos y bacterias a largo plazo (hasta 10 años).



Fuente: http://pastosyforrajesieavm.blogspot.com/2009/11/cana-de-azucar.html.
Adaptada por A. Rodríguez M.

Figura 4.

Tipos de muestra a recolectar para el aislamiento de diferentes microorganismos benéficos.



Fuente: A. Rodríguez M.

Figura 5.

Tipos de medios de cultivo agarizados (izquierda) y semisólidos (derecha) utilizados en el aislamiento de bacterias fijadoras de Nitrógeno (BFN). Nótese

El aislamiento de hongos y nematodos entomopatógeno se realizará a partir de suelo extrarizosférico, utilizando la técnica del insecto cebo (Bedding y Akhurst 1975, adaptada por el autor) con larvas de Galeria mellonella (LEP: pyralidae), las cuales son fácilmente infectables con este tipo de microorganismos. Las larvas de 1,5 a 2 cm de longitud son previamente tratadas con agua a 56°C y luego de un período de recuperación, son colocadas sobre la muestra de suelo a partir de la cual se pretende aislar a los hongos y nematodos entomofílicos. El procedimiento se muestra en la figura 6. Para el aislamiento de *Bacillus* spp, se aplicará la pasteurización de las muestras (30 minutos a 65°C y 30 minutos a 0°C) y posterior siembra de una alícuota diluida en medio agar nutriente. La pasteurización elimina las bacterias que no producen estructuras de resistencia como las endosesporas típicas de *Bacillus* spp (Rodríguez 2014).

La obtención de *Trichoderma* spp se realiza de igual forma utilizando un cebo o sustrato muy fácilmente colonizable por el hongo, el cual se introduce dentro de una bolsita o "sachet", y se entierra en el sitio de donde se pretende obtener el aislamiento, por espacio de 8 a 15 días. Transcurrido ese tiempo, el material colonizado es suspendido en solución salina estéril y posteriormente se inocula en un medio específico para hongos (PDA + pH 5,3). Luego de un período de incubación de 4 a 5 días, se reaislan las colonias fúngicas de color verde - musgo, verde - azulado o verde amarillento típicas de las diferentes especies del hongo (Figura 7).

Fuente: A. Rodriguez M.

Figura 6.

Técnica del insecto cebo con *Galleria mellonella* (LEP: pyralidae). Larva parasitada por *Metarhizium anisopliae* (izquierda), larva parasitada por *Heterorhabditis bacteriophaga* (centro), larva sana y parasitada por *Steinernema carpocapsae* (derecha).

Fuente: A. Rodríguez M.

Figura 7.

Cebo enriquecido para la colonización y aislamiento del hongo *Trichoderma* spp (izquierda) y colonia típica del hongo (derecha).

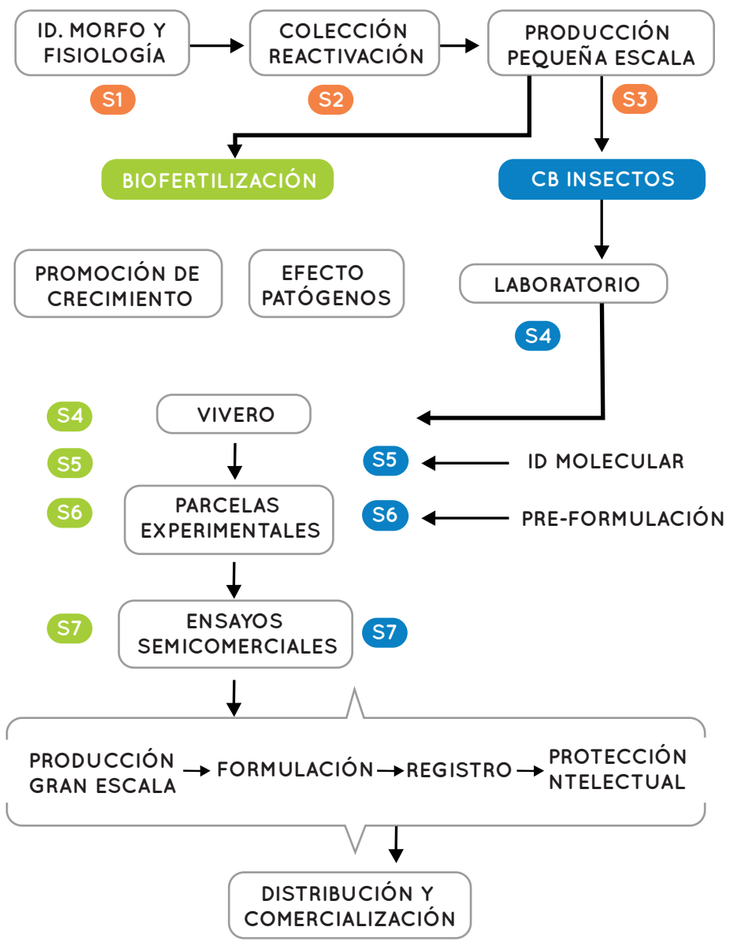
Proceso de selección de candidatos

El proceso de selección de los microorganismos deberá realizarse mediante la implementación de protocolos específicos para cada línea de investigación. Para el caso de las BPCV, las pruebas involucran: a) El diseño de medios de cultivo para escalarlas (reproducirlas) sin que pierdan sus facultades; b) La selección a nivel de vivero con vitroplantas o yemas, en donde se evalúa el efecto de los microorganismos sobre las principales variables de respuesta (altura de la planta y largo de la raíz, peso fresco y seco de los órganos de la planta, número de hojas, etc.); c) El diseño de una formulación con un acarreador o vehículo que proteja al microorganismo de los factores bióticos y abióticos mientras coloniza la rizósfera o infecta la raíz); y d) Experimentos en campo en parcelas experimentales, semi-comerciales y a nivel comercial, en donde se valora la respuesta hacia las principales variables de agroindustriales del cultivo. Como se indicó oportunamente, esta investigación debe de realizarse sobre las principales variedades a nivel comercial y debe de incluir un estricto monitoreo de la incidencia y severidad de los principales patógenos que afectan al cultivo (cogollo retorcido, marchitez, pudrición roja, roya, etc.).

En el caso del Control Biológico de Insectos, la investigación debe de iniciar en el laboratorio, siempre y cuando sea posible acondicionar al insecto en esa condición, sin que sufra estrés y muera por otras causas que no sea el efecto del patógeno que se está evaluando. El laboratorio ofrece condiciones controladas que permiten visualizar de forma precisa, las variables de respuesta: Virulencia y Agresividad, principalmente. Los estudios iniciales deben complementarse con la evaluación de la eficacia del sistema de escalamiento, pues nonecesariamente este se adapta a los requerimientos de todos los microorganismos, existiendo la posibilidad de necesitar condiciones especiales.

La primera selección se hace con base en los resultados de escalamiento y patogenicidad en el laboratorio. Posteriormente, se realizan estudios a nivel de vivero que ofrecen información sobre el efecto de las condiciones bióticas y abióticas, y sobre el desempeño de los patógenos. Los estudios finales se concentran en mejorar la formulación (granulada, polvo mojable, emulsión concentrada, etc.), pensando en incrementar la viabilidad, permanencia y colonización del agente a nivel de campo. Esta evaluaciones junto con el potencial de control en campo, deben hacerse en parcelas homogéneas, pero adecuadamente aisladas para evitar el traslape de los tratamientos. Una vez identificado el potencial de algún aislamiento, los estudios se concentran en evaluar su desempeño a escala semicomercial y comercial, así como en determinar la rentabilidad del programa.

En todos los casos, una vez identificado el potencial de determinado producto biotecnológico a escala comercial, debe de implementarse un sistema que proteja la invención y la inversión realizadas (secreto industrial, patente, marca comercial, u otro); paralelamente, debe de plantearse los costos y eventuales socios para diseñar un producto con las características para ser comercializable a gran escala comercial y además, el producto debe de registrase según el reglamento que aplique. La figura 8 esquematiza el proceso de selección de los microorganismos benéficos. Nótese en la figura 8 que cada pequeño cuadrito con la letra "S" y un número, significa que en esa etapa se aplica una selección o tamizaje, que va reduciendo el número de agentes biológicos, seleccionando a los de mayor potencial.



Fuente: A. Rodríguez M.

Figura 8.
Proceso de I + D para el diseño de productos biotecnológicos con efecto biofertilizante y supresor de plagas y enfermedades para la producción sostenible de caña de azúcar.

Otras estrategias a implementar

Otras estrategias a seguir para aumentar las probabilidades de encontrar microorganismos benéficos de alto potencial y para desarrollar insumos biotecnológicos efectivos, son:

10.1. Realizar la bioprospección (búsqueda) a nivel regional, considerando: pisos altitudinales, condiciones agroecológicas (áreas de siembra, descanso, bosques), variedades, tipos de suelo, tipos de muestra (suelo, tejido).

10.2. Implementar protocolos para el aislamiento con medios de cultivo selectivos y semiselectivos.

10.3. Aplicar técnicas microbiológicas como tinciones diferenciadas y pruebas bioquímicas (actividad enzimática, fijación, solubilización, colorimetría, postulados de Koch) para determinar la cercanía de los aislamientos obtenidos, con las características típicas de los microorganismos aislados.

10.4. Asegurar la calidad del inóculo producido para realizar los bioensayos a nivel de laboratorio, vivero y campo.

10.5. A nivel de vivero, implementar técnicas que favorezcan la colonización inicial de los agentes biológicos aplicados como el biopriming o biendurecimiento.

10.6. Realizar la identificación molecular de los candidatos de mayor potencial luego de haber sido estudiados en laboratorio y vivero. Utilizar la información para descartar microorganismos reportados como perjudiciales para la salud.

10.7. Utilizar el diseño estadístico ideal, con el número de repeticiones adecuado, y aplicar las pruebas estadísticas necesarias para comprobar y medir las variables de respuesta más robustas. Todo esto permitirá comprobar o refutar la hipótesis planteada, con un alto nivel de seguridad.

10.8. Desarrollar formulaciones y estrategias de aplicación que permitan asegurar la viabilidad prolongada de los agentes biológicos inoculados a nivel de campo. Implementar un sistema de monitoreo que permita corroborarlo.

Conclusión

La naturaleza ofrece soluciones para los múltiples problemas fitosanitarios del cultivo de la caña de azúcar, por lo que aprovechando el conocimiento adquirido sobre las propiedades de los microorganismos benéficos y los avances biotecnológicos que permiten reproducirlos y formularlos, se presentan oportunidades para desarrollar insumos biológicos para complementar y reducir la dependencia hacia el uso de agroquímicos, y a la vez, brindarle al cultivo una mayor sostenibilidad técnica y ambiental, satisfaciendo así las cada vez más exigentes demandas de los consumidores y los mercados alrededor del mundo.

Literatura citada

Becerra de Armas, E.; Lugo-Ruiz, I.; Más-Martínez, R.; Pineda-Ruíz, E.; Viñas-Quintero, Y. 2014. *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar* 48(3): 49-53.

Bedding, RA.; Akhurst, RJ. *Short communications: A simple technique for the detection of insect parasitic rhabditid nematodes in soil*. Nematologica 21: 109-116.

Bernal, A.; Machado, P.; Carmona, ER.; Rivero, O.; Cortegaza, L.; Cabrera, M.; Zayas, CM.; Nodarse, O.; Santana, I.; Arencibia, AD. 2008. *Priming and biopriming integrated into the sugarcane micropropagation technology by temporary immersion bioreactors (Tibs)*. Sugar Tech 10(1): 42-47.

Bhattacharjee, R.; Dey, U. 2014. *Biofertilizer, a way towards organic agriculture: A review*. African Journal of Microbiology Research 8(24): 2332-2342.

Bixby, A.; Alm, SR.; Power, K.; Grewal, P.; Swier, SR. 2014. *Susceptibility of four species of turfgrass-infesting Scarabs (Coleoptera: Scarabaeidae) to Bacillus thuringiensis Serovar japonensis Strain Buibui*. Journal of Economic Entomology 100(5): 1604-1610.

Chelvi, CT.; Thilagaraj, WR.; Nalini, R. 2011. *Field efficacy of formulations of microbial insecticide Metarhizium anisopliae (Hypocreales: Clavicipitaceae) for the control of sugarcane white grub Holotrichia serrata F (Coleoptera: Scarabaeidae)*. Journal of Biopesticides 4(2): 186-189.

Damalas, C.; Koutroubas, SD. 2018. *Current status and recent developments in biopesticide use*. Agriculture. P 8-13.

Da Silva, JM.; Carvalho dos Santos, TM.; Santos de Albuquerque, L.; Coentro-Montaldo, Y.; Lima de Oliveira, JU.; Mesquita da Silva, SG.; Silva-Nascimento, M.; Oliveira-Texeira, RR. 2015. *Potential of endophytic bacteria (Herbaspirillum spp and Bacillus spp) to promote sugarcane growth*. Australian Journal of Crop Science 9(8): 754-760.

Drummond, J.; Pinnock, DE. 1990. *Aflatoxin production by entomopathogenic isolates of Aspergillus parasiticus y Aspergillus flavus*. Journal of Invertebrate Pathology 55(3): 332-336.

Drummond, J.; De Barro, PJ.; Pinnock, DE. 1991. *Field and laboratory studies on the fungus Aspergillus parasiticus, a pathogen of the pink sugar cane mealybug Saccharococcus sacchari*. Biological control 1(4): 288-292.

Espejo-Herrera, N1.; Gracia-Lavedan, E.; Boldo, E.; Aragonés, N.; Pérez-Gómez, B.; Pollán, M.; Molina, AJ.; Fernández, T.; Martín, V.; La Veccia, C.; Bosetti, C.; Tavani, A.; Polesel, J.; Serraino, D.; Gómez-Acebo, I.; Ardanaz, E.; Pisa, F.; Fernández-Tardón, G.; Tardón, A.; Peiró, R.; Navarro, C.; Castaño-Vinyals, G.; Moreno, V.; Aggazzotti, G.; Basagaño, X.; Nieuwenhuijsen, M.; Kogevinas, M.; Villanueva, CM.2016. *Colorectal cancer risk and nitrate exposure through drinking water and diet*. Environ Heath Perspect 139(2): 334-346.

Espejo-Herrera, N2.; Gracia-Lavedan; E.; Pollan, M.; Aragonés, N.; Boldo, E.; Pérez-Gómez, B.; Altzibar, JM.; Amiano, P.; Zabala, AJ.; Ardanaz, E.; Guevara, M.; Molina, AJ.; Barrio, JP.; Gómez-Acebo, I.; Tardón, A.; Peiró, R.; Chirlaque, MD.; Palau, M. Muñoz, M.; Font-Ribera, L.; Castaño-Vinyals, G.; Kogevinas, M.; Villanueva, CM. *Ingested Nitrate and Breast Cancer in the Spanish Multicase-Control Study on Cancer (MCC-Spain)*. Environ Health Perspect.124(7):1042-9.

Ferreira da Silva, S.; Lopes-Olivares, F.; Pasqualotto-Canellas, L. 2017. *The bioestimulant manufactured using diazotrophic endophytic bacteria and humates is effective to increase sugarcane yield*. Chemical and Biological Technologies in Agriculture 4(24): 1-6.

Girón-Pablo, S.; Ruiz-Vega, J.; Pérez-Pacheco, R.; Ortíz-Hernández, YD.; Aquino-Bolaños, T. 2015. *Biological control of Phyllophaga vetula (Horn), and lethal concentrations and times of entomopathogenic nematodes*. Southwestern Entomologist 40(2): 292-296.

Grewal, PS.; Power, KT.; Grewal, SK.; Suggars, A.; Haupricht, S. 2004. *Enhanced consistency in biological control of white grubs (Coleoptera: Scarabaeidae) with strains of entomopathogenic nematodes*. Biological Control 30(1): 73-82.

Hassan, MN.; Aghan, S.; Hassan, Z.; Hafeez, FY. 2014. *Biopesticide activity of sugarcane associated rhizobacteria: strain NH-5 and Stenotrophomonas maltophilia strain NH-300 against red rot under field conditions*. Phytopathología Mediterranea 53(2): 229-239.

Jisha, KC; Vijayakumari. K; Puthur, JT. 2013. *Seed priming for abiotic stress tolerance: an overview*. Acta Physiol Plant 35: 1381-1396.

Köhl, J.; Postma, J.; Nicot, P.; Ruocco, M.; Blum, B. 2011. *Stepwise screening of microorganisms for commercial use in biological control of plant-pathogenic fungi and bacteria*. Biological Control 57(1): 1-12.

Koppenhöfer, AM.; Choo, HY.; Kaya, HK.; Lee, DW.; Gelernter, WD. 1999. *Increased field and greenhouse efficacy against scarab grubs with a combination of an entomopathogenic nematode and Bacillus thuringiensis*. Biological Control 14(1): 37-44.

Koppenhöfer, AM.; Grewal, PS.; Fuzy, EM. 2006. *Virulence of entomopathogenic nematodes Heterorhabditis bacteriophora, Heterorhabditis zealandica, and Steinernema scarabaei against five white grubs species (Coleoptera: Scarabaeidae) of economic importance in turfgrass in North America*. Biological Control 38(3): 397-404.

Kunar-Pindi, P.; Satyanarayana, SDV. 2012. *Liquid microbial consortium- A potential tool for sustainable soil health*. Journal of Biofetilizers & Biopesticides 3(4): 1-9.

Martínez-Hernández, A.; Alatorre-Rosas, R.; Guzmán-Franco, AW.; Rodríguez-Leyva, E. 2015. *Effect of dual inoculation with nematodes and fungal pathogens on the survival of Phyllophaga polyphylla larvae (Coleoptera: Scarabaeidae)*. Biocontrol Science and Technology 25(11): 1221-1232.

Mehnaz, S. 2011. *Plant Growth-Promoting Bacteria Associated with Sugarcane*. IN Bacteria in Agrobiology: crop systems. Maheshwari, DK. (ed). Departament of Microbiology and Molecular Genetics, University of the Punjab, Quaid-i-Azam Campus, Lahore, Pakistan.

Nájera-Rincón, MB.; García-Martínez, M.; Crocker, RL.; Hernández-Velázquez, V.; Rodríguez del Bosque, LA. 2005. *Virulencia de Beauveria bassiana y Metarhizium anisopliae, nativos del occidente de México, contra larvas de tercer estadío de Phyllophaga crinita (Coleoptera: Melolonthidae), bajo condiciones de laboratorio*. Fitosanidad 9(1): 33-36.

Nandita, J.; Panigrahi, MR. 2017. *Rhizobacteria and Trichoderma spp – The potential Bio-control Agentes against sugarcane wilt pathogens.* International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences (IJREAS) 7(10): 1-9.

Olson, S. 2015. *An Analysis of the Biopesticide Market: Now and Where it is Going*. Outlook on Pest Management 26(5): 203-206.

Pardey, AEB. 2011. *Parasitoides, Predadores y entomopatógenos que afectan las plagas de la caña de azúcar en Colombia*. Documento de trabajo N°719. Programa de Variedades, Área de Entomología. Centro de Investigaciones en Caña de Azúcar (CENGICAÑA), Cali, Colombia. Disponible en línea: http://www.cenicana.org/pdf_privado/no_clasificacion/6481.pdf

Patel, M.; Seth, U.; Haleja, P.; Joshi, B.; Animasaun, DA. 2014. *Isolation and diversity analysis of rhizobacteria from sugarcane and ints biocontrol potential against Rhizoctonia solani – A common plant pathogen*. International of Current Microbiology and Applied Sciences 3(12): 69-76.

Pelaez, V.; Mizukawa, G. 2017. *Diversification strategies in pesticide industry: from seed to biopesticides*. Ciencia Rural 47(2): 1-6.

Pineda-Castellanos, ML.; Rodríguez-Segura, Z.; Villalobos, JF.; Hernández, L.; Lina, L.; Núñez-Valdez, ME. 2015. *Pathogenicity of isolates of Serratia marcescens towards larvae of the scarab Phyllophaga blanchardi (Coleoptera)*. Pathogens 4(2): 210-228.

Rakshit, A.; Sunita, K.; Pal, S.; Singh, A.; Bahadur-Singh, H. 2015. *Bio-priming mediated nutrient use efficiency of crop species. In Rakshit et al (eds.)*. Nutrient use efficiency: from basis to advances. Varanasi, India. Department of Microbiology and Plant Pathology, Institute of Agricultural Science. P. 181-191.

Rivera-Urbalejo, AP.; Rodríguez-Andrade, O.; Morales-García, YE.; Quintero-Hernández, V.; Muñoz-Morales, Carbajal-Armenta, A.; Romero-Navarro, E.; Ramos AJ.; Muñoz-Rojas, J. 2017. *Inoculación de Plántulas micropropagadas de caña de azúcar con bacterias benéficas para potenciar su producción*. Alianzas y Tendencias 2(7): 15-26.

Rodríguez-Morales, A. 2014. *Evaluación del efecto de cepas nativas de Bacillus sp, aisladas de un suelo supresivo a nemátodos, sobre el nematodo barrenador banano, Radopholus similis (Thorne), y el crecimiento de plantas de banano (Musa AAA) bajo condiciones de vivero"* Tesis para optar por el título de Máster en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción. Instituto Tecnológico de Costa RICA. Cartago, Costa Rica. 204 p.

Romao-Dumaresq, AS.; de Araujo, LW.; Talbot, NJ.; Thronton, CR. 2012. *RNA interference of endochitinases in sugrcane endophyte Trichoderma virens 223 reduces its fitness as a biocontrol agent of pineapple disease*. PLOS ONE 7(10).

Rosenstock, TS.; Lipzin, D.; Six, J.; Tomich, TP. 2013. *Nitrogen fertilizer use in California: Assesing the data, trends and a way forward*. California Agriculture 67(1): 68-79.

Serna-Cock, L.; Arias-García, C.; Valencia-Hernández, LJ. 2011. *Biofertilización: Una alternativa al uso de fertilizantes químicos en caña de azúcar (Saccharum officinarum)*. Alimentos Hoy 20(24): 69-82.

Singaravelu, B. Crickmore, N.; Srikanth, J.; Hari, K.; Sankaranarayanan, C.; Nirmala, R.; Radesh-Krishnan, SR.; Meghna, M. 2013. *Prospecting for scarabid specific Bacillus thuringiensis crystal toxin cry8 gene in sugarcane ecosystem of Tamil Nadu, India*. Journal of Sugarcane Research 3(2): 141-144.

Singh, A.; Shukla, N.; Kabadwal, BC.; Tewari, AK.; Kumar, J. 2018. *Review on plant - Trichoderma -pathogen interaction*. International Journal of Current Microbiology and Applied Science 7(2): 2382-2397.

Singh, V.; Srivastava, SN.; Ji-Lal, R.; Awashthi, SK.; Joshi, BB. 2008. *Biological control of red rot disease of sugarcane through Trichoderma harzianum and Trichoderma viride*. Indian Phytopath 61(4): 486-491.

Srikanth, J.; Easwarammoorthy, S.; Jalali, SK. 2016. *A 100 years of biological control of sugarcane pests in India: review and perspective*. CAB Reviews 11(13): 1-17.

Subirós-Ruiz, JF. 2011. *Experiencias con fertilización biológica en caña de azúcar, Azucarera El Viejo, Guanacaste, Costa Rica*. In Memoria XVIII Congreso Azucarero Nacional ATACORI "Lic. Teresita Rodríguez Salas (+). Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI). San José, Costa Rica.

Sumana, A.; Singh, P. 2012. *Evaluation of epiphytic microflora and antagonists of red rot pathogen, Colletotrichum falcatum in sugacane under subtropical conditions*. Journal of Biological Control 26(4): 351-360.

Vejan, P.; Abdullah, R.; Khadiran, T.; Ismail, S.; Nasrulhaq-Boyce, A. 2016. *Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability – A review*. Molecules 21(573): -17.

Velasco-Velasco, J. *Los biofertilizantes y la producción de caña de azúcar (Saccharum spp)*. 2014. AGRO Productividad. P. 60-64.

Sabe a lo que nunca has probado

Nuevas bebidas instantáneas

Bajo en calorías

Con extracto de Stevia

Descubrí tu sabor