

REVISTA



ENTRE CAÑEROS



NÚMERO 24 • SETIEMBRE 2022. 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).



PRESENTACIÓN

Es un placer presentar el número 24 de la Revista Entre Cañeros continuando con el esfuerzo de comunicar información de relevancia sobre el cultivo de la caña de azúcar y el quehacer del sector azucarero costarricense.

En este número les compartimos un artículo interesante acerca de la nutrición mineral del cultivo enfatizando en la función del azufre, un nutrimento importante para el metabolismo de las plantas para el que la caña de azúcar no es la excepción.

También les estamos brindando dos trabajos relativos a los resultados obtenidos por el Programa de Variedades de DIECA en el que se exponen el desempeño de las variedades evaluadas por el programa, tanto las introducidas al país como las producidas a nivel nacional. En esta ocasión se están publicando específicamente los resultados de las regiones azucareras de Turrialba y San Carlos.

Esperamos que la información contenida en este número les sea de interés y de utilidad. Seguiremos manteniendo este canal de información para lo que los invitamos a que nos hagan llegar sus comentarios a la dirección echavarria@laica.co.cr los cuales serán bienvenidos para la mejora de esta publicación.

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

CONTENIDO

02

Presentación

05

Azufre: elemento esencial relegado en la nutrición de la caña de azúcar en Costa Rica

73

Análisis Agroindustrial de 19 Variedades de Caña de Azúcar (*Saccharum* spp.) Para Suelos de Orden Ultisol en la Región Norte, San Carlos

89

Variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) cultivadas en la Región de Turrialba (Juan Viñas y Turrialba) y resultados del proceso de evaluación de nuevos materiales.

Revista Entre Cañeros
Número 24, Setiembre del 2022. 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

¡Yo te Cuido!

Campaña de Prevención del Trabajo Infantil en el Sector Azucarero Centroamericano.



Implementada por la Asociación de Azucareros del Istmo Centroamericano - AICA

Con la colaboración de



y el apoyo técnico de





“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.”

AZUFRE: ELEMENTO ESENCIAL RELEGADO EN LA NUTRICIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN COSTA RICA

Marco A. Chaves Solera¹

Introducción

El trasfondo, significado e implicaciones del título colocado al presente artículo posiblemente llamara mucho la atención de técnicos y productores vinculados con el cultivo de la caña de azúcar, y también para todas aquellas personas relacionadas con la fertilización de cultivos agrícolas; lo cual no es de ninguna manera un argumento capcioso, temerario, imprudente o tendencioso, sino más bien el resultado de un razonamiento serio y bien fundamentado que se espera demostrar a través del documento.

Las deficiencias nutricionales en la mayoría de las localidades productoras de alimentos están dadas en general por N, P y K; sin embargo, en los últimos años, el creciente y competitivo desarrollo agrícola ha sido acompañado con el uso de materiales genéticos de alto potencial de rendimiento y productividad agroindustrial, la implementación de sistemas intensivos en cuanto a laboreo y mecanización de suelos y, el empleo mayoritario de fertilizantes basados en N-P-K y por tanto no azufrados. Estas prácticas han generado un inconveniente estado creciente y sistemático de desbalance e insuficiencia para otros elementos como el S, encontrando por ello respuestas favorables a su adición en diversos cultivos entre ellos la caña de azúcar. El estrés nutricional forma parte importante de los problemas que padece el cultivo actualmente, como lo apuntara Chaves (2021b), limitante fomentada en alto grado por la inopia, el

desinterés y el desconocimiento técnico de sus orígenes y consecuencias.

Referirse a la importancia y relevancia que posee el S como nutrimento vital y esencial para la nutrición, fitosanidad y estabilidad de la planta de caña resulta en lo técnico tal vez redundante, reiterativo y hasta innecesario; sin embargo, cuando lo llevamos, vinculamos y aplicamos al desarrollo y la productividad agroindustrial potencial y real del cultivo y la



¹ Ingeniero Agrónomo, M. Sc., Especialista en el cultivo de la caña de azúcar. Correo – e: chavessolera@gmail.com.



competitividad de la agro empresa cañera, el tópico se torna realmente interesante y por demás necesario de abordar con la especificidad y profundidad requeridas. Los antecedentes y la experiencia de campo tienen por demostrado que la presencia del S en la fertilización redunda en importantes beneficios para las plantaciones, independientemente de la región, condición edafoclimática y agroproductiva vinculadas. A esto se suman algunos atributos y ventajas comerciales atribuibles al elemento que favorecen y justifican su adición en el campo.

El rendimiento agrícola del cultivo de la caña de azúcar está estrecha, ineludible y positivamente asociado con la cantidad de biomasa (tallos industrializables) acumulada durante el ciclo vegetativo y recolectada durante la cosecha, existiendo una relación lineal directa entre esta variable y la magnitud del recurso biótico o abiótico disponible, absorbido y asimilado (agua, radiación y nutrientes); lo que provoca que la presencia de desbalances en el aporte de nutrimentos esenciales genere como consecuencia una reducción de magnitud importante en el grado de eficiencia que se tenga en el uso de los mismos. Esta situación se torna preocupante en la medida en que se incrementa la oferta de N, principalmente, poniendo de manifiesto la interacción positiva que existe entre ambos nutrimentos (N-S). Es definitivo que una deficiencia nutricional –en este caso de azufre–

limitará la expresión del potencial genético intrínseco del cultivo.

El nutrimento ha sido reconocido y nombrado por Chaves (2001) por su condición como el **“elemento olvidado en la nutrición y la fertilización de la caña de azúcar”**, virtud de la gran respuesta productiva que la planta de caña muestra a su adición en prácticamente todas las zonas cañeras del país, y paradójicamente la relativa poca investigación, atención y hasta desinterés que por muchos años ha existido en torno a su uso y aplicación comercial.

¿Por qué se asevera entonces que el azufre es un elemento esencial relegado en la nutrición de la caña de azúcar? ¿Cuál es el fundamento de tal afirmación? En realidad, el tema puede y debe valorarse desde diferentes perspectivas para comprender de manera razonada el porqué del argumento esgrimido; lo cual, vale señalar y afirmar, aplica exclusivamente para el caso particular de la agroindustria cañero-azucarera costarricense, pues no pueden, responsablemente, hacerse aseveraciones ni proyecciones de este tipo más allá de lo que mejor conocemos que es nuestra propia agroindustria. Por tal motivo, se busca con el presente documento ubicar, contextualizar y revalidar la importancia y trascendencia nutricional del S como nutrimento esencial y confirmar la imperiosa necesidad de considerarlo como parte integral de todo programa de fertilización

comercial en plantaciones de caña de azúcar en el país.

El azufre como elemento

El azufre es un elemento químico muy conocido en varios campos del quehacer humano virtud de sus amplios usos y contenido, al cual se le consigna el número atómico 16 de la Tabla Periódica, conformada actualmente por 118 elementos, de los cuales 26 (22%) han sido conseguidos en el laboratorio. En dicho catálogo los elementos químicos se disponen y expresan en forma de tabla, ordenados de manera creciente de acuerdo con su número atómico (número de protones), lo que significa que cada átomo cuenta con 16 protones en su núcleo atómico. Internacionalmente se representa y expresa con el símbolo S y se ubica en el grupo 16 y el periodo 3 de la Tabla Periódica, por lo que pertenece al grupo de los **No Metales**.

El término *“azufre”* es imputado a varios posibles orígenes, siendo uno de los más aceptados el derivado de la voz latina Sulphur, que explica por qué su símbolo químico es representado por la letra S. Se sugiere que el término Sulphur derivó posteriormente en la palabra sufíre, a la que se le añadiría una a, y sustituyendo la s por una z para formar así el vocablo *“azufre”*.

Es posible encontrar el elemento en la naturaleza a temperatura y presión normal en estado sólido formando parte de numerosos minerales, pero también en forma pura, particularmente en regiones volcánicas cuya fórmula química es S_8 y recibe el nombre de octazufre u octatiocano, y en sus formas reducidas formando sulfuros (S^{2-}) y sulfosales; o bien en sus formas oxidadas como sulfatos (yeso). Con ello, el mineral de S se conforma de ocho moléculas del elemento que se entrelazan para formar un anillo octaédrico. El S forma parte de numerosos minerales de la corteza terrestre ubicando entre los más importantes la galena (PbS), la piritita (FeS_2), la anhidrita ($CaSO_4$), el

yeso ($CASO_4 \cdot 2H_2O$), la epsomita ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) o el cinabrio (HgS). Señalan Fassbender y Bornemisza (1994) que en cantidades menores se encuentran minerales poco solubles como los sulfuros: esfalerita (ZnS) y calcopirita ($CuFeS_2$).

En su forma elemental el S es un sólido blando, frágil, ligero, inodoro e insípido que puede presentar tonalidades amarillentas o anaranjadas. Al arder desprende una llama de color azul y desprende dióxido de azufre (SO_2). Es además un elemento muy activo que se combina con la mayoría de los elementos conocidos. Se trata de un elemento multivalente que posee varios estados de oxidación. En combinación, no obstante, el S presenta un característico y poco agradable olor a *“huevo podrido”*. Es insoluble en agua, pero se disuelve en disulfuro de carbono (CS_2) y benceno (C_6H_6). Existen hasta 25 isótopos estables del S. En el Cuadro 1 se presentan algunas de las principales características y propiedades que tipifican y determinan al S como elemento químico.



Cuadro 1.

Características fisicoquímicas del Azufre.

Propiedades	Azufre
Símbolo	S
Serie química	No metal
Apariencia	Amarillo limón
Valencia	-2, 2, 4, 6
Número atómico	16
Estado de oxidación	-2, 2, 4, 6
Estado de la materia	Sólido
Masa (peso) atómica	32,065 g/mol
Densidad	2.07 g/ml
Punto de ebullición	444,6 °C
Punto de fusión	119 °C
Presión de vapor	$2,65 \times 10^{-20}$ Pa a 388 K
Electronegatividad	2,58 (Pauling)
Conductividad eléctrica	$5,0 \times 10^{-22} 10^6 \text{ m}^{-1} \cdot \Omega^{-1}$
Descubridor	Conocido desde la Antigüedad. La esencialidad en plantas se atribuye a Von Sachs, Knop (1865).

Fuente: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Azufre.html>

Ciclo del azufre

Igual que acontece con otros elementos el S posee un ciclo que referencia que evidencia y explicalasdiferentesrelacionesquemantienecon respecto a los factores del entorno, considerando los procesos de carácter bioquímico vinculados donde el elemento se puede encontrar en la naturaleza en diferentes formas o estados de oxidación. Los procesos de dicho ciclo son como enunciaran Fassbender y Bornemisza (1994) complejos y muy dinámicos, similares a los del N; manifestando Bertsch (1998) al respecto, que el ciclo del nutrimento puede considerarse de características intermedias entre el N y el P, por cuanto el SO_4^{2-} es un anión más fuerte que el

NO_3^- pero más débil que el $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ razón por la cual sobrelleva las reacciones de fijación propias y tan acentuadas como el P y de lixiviación y lavado como el N aunque no de manera tan severa como éste.

Como se indicó, parte de los reservorios naturales de S se sitúan en rocas sulfurosas, depósito de elementos sulfurosos y también en los combustibles fósiles (carbón mineral y petróleo); movilizándose mayoritariamente en la atmósfera y los sedimentos y en menor grado en el aire. Al combinarse con el oxígeno del aire el S experimenta diferentes estados de oxidación

que, aunado a la participación y transformación promovida por diferentes microorganismos, convierte los procesos químicos vinculados en uno de los más complejos de la naturaleza como es reconocido por diferentes autores. Hay que mencionar que la mineralización del S-orgánico sigue un proceso muy similar al del N-orgánico.

En todo esto y como acontece también con otros nutrimentos es en la solución del suelo donde ocurren los eventos y a partir de donde las plantas absorben el S. En la Figura 1 se presenta un excelente detalle de los factores de emisión vinculados y relacionados con las interacciones generadas asociadas al S presentado por <https://www.todo-argentina.net>.

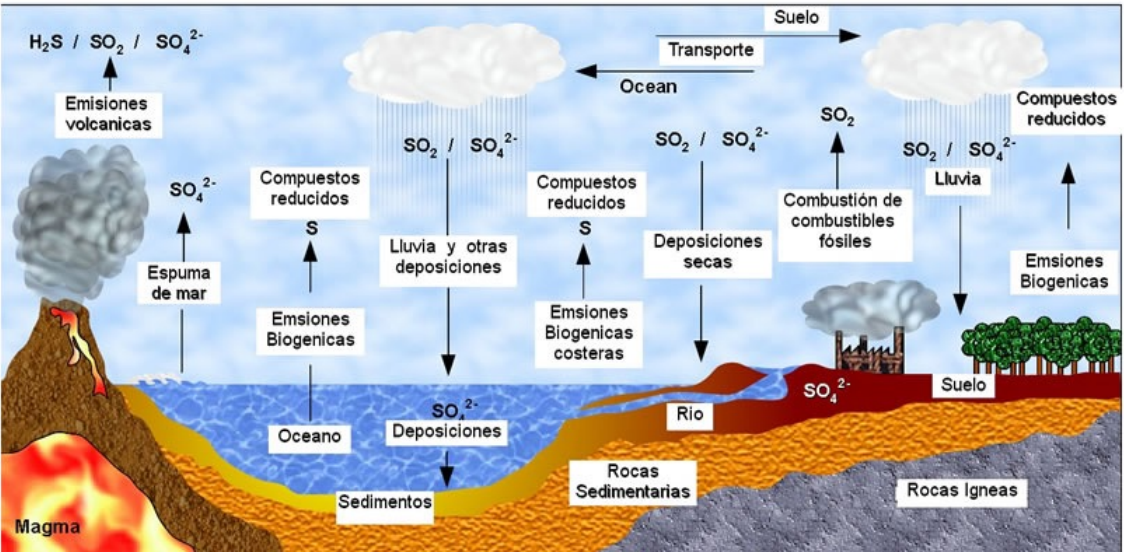


Figura 1.

Ciclo del Azufre. Fuente: https://www.todo-argentina.net/ecologia/dinamica/ciclo_azufre.php?idpagina=1863

Como es notorio y evidente el ciclo moviliza de manera activa y muy dinámica el S por diferentes fases, como son la atmósfera, la hidrósfera, la litósfera y también la biósfera; en las cuales participan diferentes compuestos formados como azufre atmosférico, orgánico, inorgánico, reducido y los sulfatos (SO_4^{2-}) que corresponde a la forma química absorbida y utilizada por las plantas y los animales

y que se moviliza por toda la cadena alimentaria.

Se asegura que el ciclo global del S depende en alto grado de las actividades promovidas por microorganismos metabólica y filogenéticamente diversos. Ese largo recorrido del elemento transcurre por cuatro etapas químicas trascendentales que son:

- **Mineralización:** el S orgánico se transforma por acción microbial similar a la del N a S inorgánico oxidado o reducido; también como sulfuro de hidrógeno (H_2S), azufre elemental (S) y minerales a base de sulfuro. El H_2S es rápidamente oxidado a ión sulfato (SO_4^{2-}).
- **Oxidación del sulfuro de hidrógeno (H_2S):** opera sobre el S elemental y otros minerales del suelo para formar dióxido de azufre (SO_2) a nivel atmosférico, gas incoloro, inflamable, maloliente y con efectos tóxicos. Una de las condiciones para que el S pueda oxidarse es la presencia de bacterias.
- **Reducción:** bacterias reductoras de S obtienen su energía reduciendo S-SO_4^{2-} a H_2S para ser asimilado por los organismos. Se han descrito más de 60 géneros y 220 especies de bacterias reductoras de sulfato.
- **Inmovilización:** ocurre cuando se adicionan al suelo materiales orgánicos ricos en carbono (C) pero pobres en S. Este mecanismo opera igual que para el N donde el material rico en energía estimula y promueve el crecimiento microbiano, y el sulfato inorgánico es asimilado en el tejido de los microorganismos.

Como se infiere de la Figura 1 muchas de las acciones asociadas con la actividad cíclica del S acontecen en el océano, lo que previene ante una eventual y potencial afectación, cuyos posibles impactos serían de consecuencias muy negativas para todo el sistema climático mundial; lo cual plantea la inquietante necesidad de actuar sobre los compuestos orgánicos azufrados que nutren el metabolismo microbiano en el agua, asegurando su presencia. Se estima que los cambios en la composición del fito y el bacterioplancton marino debido al potencial Cambio Climático global podría tener consecuencias dramáticas, aún poco

sensibilizadas y más aún comprendidas. El S se presenta en el suelo en formas orgánicas e inorgánicas. La mineralización y metabolismo del S llevado a cabo por los microorganismos cumple también funciones esenciales degradando y formando biomasa (carbono orgánico), como acontece con las actividades degradantes de las bacterias reductoras de sulfato.

El S elemental es convertido a SO_4^{2-} por oxidación biológica. Las bacterias autotróficas y heterotróficas, los hongos y los actinomicetos son capaces de oxidar el S elemental, aunque la más importante es la bacteria autotrófica del género *Thiobacillus*. Algunos factores que influyen la oxidación del S en los suelos son, entre otros, el tamaño de la partícula de S, el tipo de suelo, el valor de pH, la temperatura, el contenido de humedad del suelo y la influencia que pueda tener la aplicación de insecticidas al mismo.

Como se aprecia en dicho ciclo la oxidación del bióxido de azufre (SO_2) y su disolución en el agua de lluvia genera ácido sulfhídrico (H_2S) y sulfatos (SO_4^{2-}), formas químicas mediante las cuales el S retorna e incorpora nuevamente en el ecosistema terrestre. La combustión del carbón mineral y el petróleo libera también SO_2 a la atmósfera. En la actualidad, por efecto antrópico, el SO_2 es aportado mayoritariamente por la quema de combustibles fósiles e incendios y quema de biomasa. A partir de las concentraciones de SO_2 y SO_4^{2-} se forma la denominada “lluvia ácida” cuyas consecuencias son problemáticas como se comentará seguidamente.

Resulta necesario virtud de la complejidad e implicaciones de los procesos involucrados, pero sobre todo de la importancia de conocer los efectos y consecuencias productivas y ambientales derivadas de los mismos, mejorar significativamente las técnicas de medición, afinar la sensibilidad de los indicadores más representativos empleados e incrementar la magnitud de las

estimaciones cuantitativas de estos procesos; procurando siempre aprender más sobre sus relaciones e interacciones. Es por este motivo imperativo investigar en áreas tecnológicas fundamentales aún poco desarrolladas, como acontece con la identidad de los organismos biológicos participantes, el uso de sensores apropiados y el estudio de genomas con enfoque metagenómico y microbiológico, entre otros, facilitarán la comprensión y el avance en este sentido.

Azufre y lluvia ácida

El S se encuentra en el medio natural formando diversos compuestos, siendo uno de los más perniciosos el dióxido de azufre (SO_2), gas emitido tanto a partir de la combustión del carbón como de algunos derivados del petróleo que pueden permanecer en la atmósfera durante varios días y viajar a grandes distancias.

El elemento se encuentra también, aunque en pequeñas cantidades contenido en los combustibles de origen fósil (carbón y petróleo) cuya combustión produce dióxido de azufre (SO_2), que combinado con el agua forma ácido sulfúrico (H_2SO_4) que produce la conocida **lluvia ácida** de efectos destructivos y de muy alta contaminación atmosférica con afectación sobre la calidad del aire e

incidencia sobre la salud; motivo por el cual Chaves (1994) la calificó como un “*enemigo implacable*”.

El SO_2 puede, del mismo modo, originar partículas ácidas que afectan la vida vegetal y el suelo mediante deposición seca. Sobre los suelos y los ecosistemas acuáticos puede ocasionar daños a la vegetación, degradación de la clorofila y reducción de la actividad fotosintética. Este compuesto se forma cuando la humedad del aire se combina con óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2) o trióxido de azufre (SO_3) emitidos por fábricas, centrales eléctricas, calderas de calefacción y vehículos que queman carbón o productos derivados del petróleo que contengan S.

Su grado de acidez medido por su pH varía entre 3 y 5, muy inferior al de la lluvia normal, que es de aproximadamente 5,6. Esto se debe a la presencia de ácidos que se forman a partir del dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno. El óxido nítrico (NO) presente mayoritariamente en las emisiones, provoca que en presencia del oxígeno atmosférico (O_2) se transforme rápidamente en dióxido de nitrógeno o NO_2 .

Procurando evitar estos impactos indeseables y crecientes por el uso de combustibles fósiles, principalmente, muchas de las legislaciones de los países



industrializados y otros conscientes del problema como es el caso de Costa Rica, promueven y exigen la reducción del contenido de S de los combustibles, constituyendo este S, posteriormente refinado, un porcentaje importante del total producido en el mundo. La calidad de las gasolinas y el diésel en el país se ajustaron y adaptaron a las nuevas especificaciones técnicas requeridas para cumplir con los estándares de calidad de Euro IV (INTE 41-01-01-2016 e INTE 41-01-03-2016), los cuales entraron a regir a partir del 31 de agosto del 2017.

La concentración de azufre en la Gasolina en Costa Rica se redujo de 1.000 ppm a 50 ppm como máximo, tanto si se trata de la Plus 91 como de la Súper de 95 octanos; en el caso del Diesel se mantiene en 50 ppm máximo desde febrero del 2011 (<https://www.recope.go.cr/calidad-combustibles-evolucion-a-favor-la-salud-ambiente/>). La calidad y estado de conformidad de los combustibles nacionales se fiscaliza por medio de análisis fisicoquímicos que se realiza a todos los productos que comercializa la Refinadora Costarricense de Petróleo (Recope), con el fin de garantizar al usuario productos de alta calidad.

El S también se extrae del gas natural que contiene ácido sulfhídrico (H₂S) o sulfuro de hidrógeno, el cual una vez separado se quema para obtener azufre, como sigue:



El azufre como nutrimento esencial para la caña

Como fue ampliamente abordado y desarrollado oportunamente por Chaves (2022a), el azufre constituye uno de los 17 elementos declarados virtud de su actividad y funcionalidad en los vegetales como esencial para las plantas vasculares superiores, de acuerdo con los preceptos y principios establecidos y fijados por

Arnon y Stout en 1939 y luego ajustados y adecuados al resultado de las nuevas y más recientes investigaciones, como lo apuntaran Marschner (1986), Mengel y Kirkby (2000), Epstein y Bloom (2006) y Alcántar y Trejo (2013), entre otros. El elemento clasifica por la magnitud de sus contenidos en los tejidos entre los siete macronutrimentos esenciales, lo que justifica la necesidad de proveerlo y mantenerlo en la misma proporción si se pretende mantener la planta en una condición satisfactoria al menos con relación a este nutrimento.

El N y el S orgánico presente en los suelos experimentan cambios en sus estados de oxidación como consecuencia de la actividad metabólica promovida por diversos grupos de bacterias. En los suelos aireados se encuentran principalmente en sus formas más oxidadas, esto es, como nitrato (NO₃-) y como sulfato (SO₄²⁻); siendo absorbido por las plantas químicamente como ion sulfato (SO₄²⁻), aunque algunas bacterias utilizan el sulfuro de hidrógeno (H₂S) del agua como donante de electrones en un proceso similar a una fotosíntesis primitiva. Ubicando sus concentraciones en los tejidos con base en peso seco, los mismos se estiman entre 0,1 y 1,5% (1.000-15.000 mg kg⁻¹).

El mecanismo de transporte y movilización del elemento en el suelo hasta absorción radicular por la planta se da por Flujo de Masas; siendo el sentido de su movilidad en el interior de la planta muy dinámico (±) tanto acrópeto (se moviliza en sentido longitudinal de abajo hacia la porción apical) como también basípeto (el movimiento de sustancias se da desde el ápice y hacia la base), como lo apuntaran Marschner (1986), Mengel y Kirkby (2000), Epstein y Bloom (2006), Alcántar y Trejo (2013), Salisbury y Ross (1994), Maldonado (2008), Bertsch (1998) y Chaves (2022a).

En el mecanismo de Flujo de Masas como indicara Chaves (2022a) “el agua se encuentra en el suelo en continuo movimiento

conteniendo nutrimentos disueltos. Cuando la planta absorbe agua para reemplazar la que se ha perdido por causa de la transpiración, se generará consecuentemente un flujo continuo de nutrimentos hacia su interior. En dicho mecanismo los iones son transportados disueltos en el agua que se mueve desde la solución del suelo hacia la raíz y es absorbida por efecto de la transpiración de la planta; circunstancia por la cual la proporción de agua que circule por la raíz es influyente. La concentración del nutrimento presente en la solución del suelo y próxima a la raíz, puede reducirse, mantenerse o incrementarse dependiendo del balance que prevalezca entre la cantidad suplida a la raíz por flujo de masas y la cantidad que el vegetal absorba. La contribución del acceso de iones por flujo de masas se calcula a partir de la concentración del ión en la solución del suelo, el grado de solubilidad del nutrimento y el volumen de agua que es transpirado por la planta. En suelos salinos el Ca y el Cl pueden ser suplidos por esta vía. El mecanismo corresponde a un tipo de transporte pasivo por no incurrir en gasto de energía metabólica.”

En lo concerniente a la cantidad de S que la caña de azúcar extrae del suelo el valor es muy variable dependiendo de varios factores vinculados directamente con los elementos del clima, el tipo y

características fisicoquímicas del suelo, la variedad sembrada y el manejo agronómico que se le preste al cultivo. En torno a este tema, reporta Chaves (1986, 1999ab, 2001, 2017b, 2022ab) que el rango de valores de extracción encontrados y comunicados por 19 fuentes mundiales de información de muy diverso origen muestra de acuerdo con el Cuadro 2 y la Figura 2 que la amplitud de su forma molecular como S fluctúa entre 0,12 y 0,58 kg/tonelada para una amplitud de 0,46 kg (79,3%) y una media de 0,29 kg de S/t. La cantidad de S extraída del suelo es muy variable.

El elemento se refiere y anota también para mayor comprensión en su forma absorbible por la planta (SO₄²⁻), lo que equivale entonces a una absorción de 0,87 kg de S-SO₄/tonelada de caña; constituyéndose en el tercer macronutrimento más absorbido de los seis calificados, antecedido solo por N y K lo que reafirma y posiciona su importancia como nutrimento esencial para la planta de caña de azúcar. En términos generales el grado de variación individual de las concentraciones promedio se ubica expresadas molecularmente para los seis macronutrimentos como sigue: K > P > Ca > N > Mg > S; sin embargo, al llevarlo a formas químicas absorbibles la relación es: K > N > S > P > Ca > Mg.

Cuadro 2.

Extracción y requerimientos de la caña por macronutrimentos.

Nutrimento	No. Reportes	Rango	Amplitud	Promedio
S	19	0,12 - 0,58	0,46	0,29 (0,87)

Fuente: Chaves (1986, 1999, 2017).
Dado en kg/tonelada de caña; sólo incluye tallos, no sección foliar ni raíces.
El valor entre parentesis se refiere a la forma química absorbible.

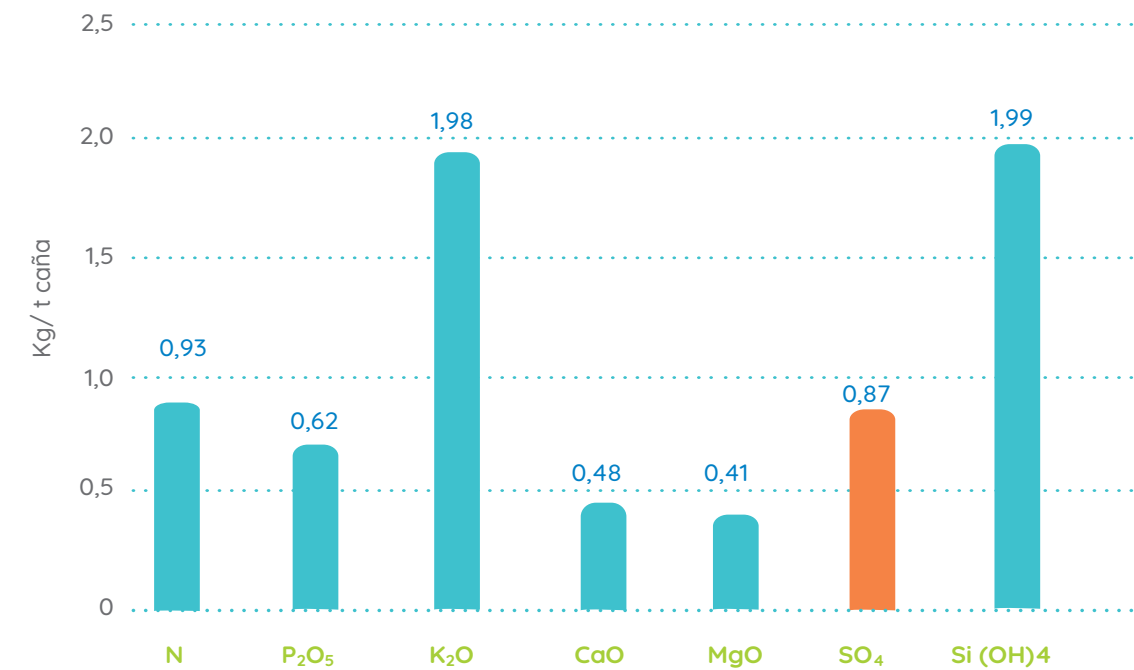


Figura 2.
Extracción promedio de macronutrientes por la caña.

Expresa Bornemisza (1990) al respecto, que “El azufre es uno de los seis “elementos mayores” en las plantas, las cuales ocupan desde unos décimos hasta un uno por ciento de este elemento. Esta cantidad pone al azufre a la par de los elementos fósforo y magnesio, de los cuales la planta requiere cantidades similares. En muchas plantas se ocupa el S en cantidades ligeramente inferiores al fósforo, mientras que, para otras de uso común, como por ejemplo la cebolla, se necesita más S que P.”

Función y funcionalidad en la planta de caña

Los dos conceptos son muy importantes de comprender y tener siempre presente como factores básicos de la nutrición, pero, sobre todo, de aplicar cuando se procura

interpretar correctamente la nutrición integral del cultivo y no apenas la fertilización como práctica rutinaria de campo para adicionar los elementos deseados al suelo. La función de un nutrimento se refiere básicamente a la forma de acción, función desarrollada en la planta y actividad metabólica o estructural donde éste actúa e interviene, estimula, produce o en su caso afecta algún proceso; establece en lo esencial cuál es su función o funciones que cumple dentro de la planta.

La funcionalidad nutricional puede concebirse por su parte como la forma en que el nutrimento actúa y ejerce sus funciones en la fisiología y el metabolismo general del vegetal (Chaves 2022ab). Es imperativo tener presente que la esencialidad nutricional como la que mantiene en este caso el elemento S, se asienta en un principio fundamental de la nutrición vegetal que asegura, que:



Todos los elementos esenciales son encontrados dentro de la planta, más no todos los elementos encontrados en la planta son esenciales.

La cantidad y complejidad de eventos involucrados con la actividad y participación del S en la fisiología de las plantas es elevada, lo que se da por medio de mecanismos

de estimulación, reacción, equilibrios, sinergismos y también antagonismos, entre otros, como lo señala Chaves (1999ab, 2012a). La participación del S opera en las áreas estructural, enzimática, hormonal y funcional de manera directa e indirecta. En el Cuadro 3 se presentan algunas de las funciones del S que se consideran más relevantes, aplicadas e interpretadas hasta donde es posible de manera muy particular al cultivo de la caña de azúcar.

Cuadro 3.

Propuesta de generaciones costarricenses

Generación	Función y requerimiento
Azufre (S)	Requerido como constituyente de aminoácidos formando parte de ellos, por lo tanto de proteínas, y para la producción de coenzimas. La producción de cistina, cisteína y metionina constituye una de las funciones más importantes del S. Constituyente de enzimas que participan en el metabolismo de azúcares, grasas y proteínas, las vitaminas biotina, tiamina y la coenzima A. Es componente importante de la Ferredoxina, molécula transferidora de electrones, vinculada con la fotosíntesis, la fijación de N2 atmosférico y en la reducción de compuestos oxidados tales como nitrato. Es crítico para la función y actividad de la enzima nitrato reductasa en la conversión de nitrato en amonio, antes de la incorporación a aminoácidos. Necesario para la formación de clorofila. Interviene en la fijación no fotosintética de CO2. Los grupos sulfidrilos (-SH) que aumentan la resistencia al frío y la sequía, son a menudo parte de los sitios activos en las moléculas de las enzimas. Estimula crecimiento de la raíz e incrementa crecimiento vegetativo de la planta. El S es un nutriente inmóvil dentro de la planta.

Fuente: Kingston (2014); Pennatti (2013); Calcino et al (2000); Bertsch (1998); Chaves (1999b, 2022a); Anderson y Bowen (1994).

El S es absorbido por la raíz y transportado por la xilema de la planta hasta las hojas, donde es reducido hasta sulfuro (S^{2-}), el cual es rápidamente asimilado como grupo sulfhidrilo o grupo tiol ($-SH$) de los aminoácidos cisteína y metionina. El sulfato de la disolución del suelo es transportado al interior de las células de la raíz mediante un mecanismo activo que requiere y emplea energía metabólica. Una vez absorbido, el sulfato es exportado en su mayoría a las hojas, donde puede ser almacenado en la vacuola, o bien ser transportado al interior de los cloroplastos donde tiene lugar el proceso de asimilación. Desde el punto de vista bioquímico, la asimilación reductiva del sulfato es muy similar a la del nitrato, donde ambos aniones son reducidos a sulfuro y amonio, respectivamente. Las plantas tienen la capacidad natural de regular la velocidad con que el sulfato es asimilado en respuesta a la disponibilidad y demanda que se tenga por S.

Está demostrado como reconociera Chaves (1999ab), que la eficiencia de absorción del N se ve incrementada con la presencia de S en el medio, y según sea la proporción, se potencializa la capacidad de absorción de las fuentes de N y S por la planta. Esta relación se explica ya que tanto el S como el N son los principales responsables y promotores de la síntesis de proteínas. La escasez de S reduce la utilización de N por los cultivos, aumentando la tasa de lixiviación de nitratos.

Resulta interesante mencionar que algunos compuestos péptidos estructuralmente relacionados con el S y propiamente con el glutatión (también llamado el “antioxidante maestro” poderoso antioxidante), compuestos denominados fitoquelatinas que son polímeros de diferentes tamaño. La síntesis del glutatión se da a partir de sus precursores aminoácidos glutamato, cisteína y glicina. El glutatión es sintetizado tanto en los cloroplastos como en el citosol celular. Su importancia para las plantas radica en la capacidad que tienen de formar complejos



con metales pesados, especialmente cadmio (Cd^{2+}), evitando su acumulación tóxica en los tejidos, razón por la cual operan como un mecanismo de detoxificación de metales pesados. Se ha comprobado que la función de las fitoquelatinas es ofrecer resistencia a los metales pesados. Como es bien sabido existen en el medio metales pesados que constituyen serios problemas ambientales con afectación a los ecosistemas, como acontece con el mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd) y talio (Tl); así como también con el cobre (Cu), zinc (Zn) y cromo (Cr).

Relaciones C: N: S

Como es ampliamente conocido, en el suelo como también a lo interno de las plantas surgen de manera natural y dentro de ciertos límites razonables, relaciones de interacción entre los elementos presentes en el medio, sean éstos esenciales o no, lo cual determina en alto grado su grado de disponibilidad para ser absorbidos y asimilados posteriormente por el vegetal. El grado de estabilidad y equilibrio prevaleciente en el suelo influye de manera determinante en la absorción de iones (cationes y aniones), ya que establece sinergias y también antagonismos entre los elementos presentes para la planta que los absorbe. Esta razón torna importante conocer las especies y las cantidades de iones contenidos y sus relaciones potenciales, cuando se hace un análisis de suelo para conocer el equilibrio del mismo con relación a la planta.

Amplia Chaves (2012b) al respecto, expresando que “Las relaciones que se establecen desde la perspectiva de quién los absorbe, pueden ser sinérgicas o antagónicas, lo que es muy importante para la nutrición de cualquier ser vivo. Una relación sinérgica resulta positiva, en virtud de que los nutrientes vinculados se complementan y potencian para tener un efecto integral de absorción favorable; por el contrario, una relación antagónica resulta, por lo

general, inconveniente pues uno o más de los elementos presentes en el medio se verán inhibidos y disminuidos por otro en su acción y capacidad de poder ser absorbidos por las plantas, en la cantidad y tiempo requeridos.”

Como está suficientemente demostrado y asegura Chaves (1988) en torno al tema de las relaciones de interacción surgida entre elementos nutricionales “Las relaciones y, no exclusivamente, las concentraciones absolutas de las especies iónicas del suelo influyen marcadamente en el equilibrio dinámico y en la interacción suelo-plantas, reflejándose en la absorción, composición mineral y producción de las plantas.”

Sobreviene a partir de lo anterior, que la tasa de absorción (atraer y retener en el interior) de iones por las raíces de la planta está directamente influenciada por el grado de concentración de nutrimentos que prevalezca en la solución del suelo, confirmando que el balance iónico, catiónico y aniónico, no se restringe ni limita apenas a los iones adsorbidos (retenidos en la superficie de la micela del suelo) en el complejo de intercambio del suelo; sino también, y principalmente, a los iones disueltos en la solución del suelo que están a su vez en estado de equilibrio dinámico con los iones intercambiables.

Es por estas razones imperativo y obligado a evaluar e interpretar la capacidad potencial de fertilidad de un suelo, considerar además de las cantidades de iones intercambiables y su grado de saturación en el complejo de intercambio, los tipos de coloides presentes, la naturaleza de los iones complementarios adsorbidos y las relaciones prevalecientes entre los iones del suelo. Es por esta razón que, por medio del estudio del balance o equilibrio iónico es posible entender mejor el comportamiento químico de un suelo, y, por tanto, poder adoptar un sistema de manejo más adecuado.

En lo pragmático es una realidad y hecho

muy conocido que, conforme los suelos son sistemática y sucesivamente corregidos y fertilizados, las razones de equilibrio natural existente entre los nutrimentos presentes se van modificando significativamente en detrimento de unos y beneficio de otros, debido a la prevalencia y preferencia de algunos nutrimentos virtud de las fórmulas fertilizantes empleadas y los elementos extraídos y absorbidos, o en su caso, perdidos en el sistema suelo-planta-atmósfera.

La adición constante y consistente de unos afecta por efecto de masas o acción (sinergismos, antagonismos) la presencia y disponibilidad de otros. Como se manifestó en ocasión anterior, acontece que la fertilización de cultivos agrícolas en Costa Rica, entre ellos la caña de azúcar, está basada por la adición preferencial y dominante de N-P-K y podría aseverarse con buen criterio que casi en N-K, lo que genera estados de insuficiencia hacia los otros 11 nutrimentos declarados esenciales y con ello mermas importantes en el nivel de productividad agroindustrial del cultivo.

En el caso del S se reporta al igual que acontece con todos los demás nutrimentos, esenciales o no, una interesante y a la vez importante relación iónica establecida entre C: N: S que debe ser en principio conocida y también considerada al evaluar el potencial nutricional de un suelo y diseñar un programa de fertilización apropiado para el cultivo. Esa relación se une a otras también importantes que ocurren naturalmente en el sustrato suelo, entre las que destacan asociadas con el azufre, la de N/S y P/S. Se reporta que una alta concentración de sulfato (SO_4^{2-}) reduce la captura y absorción del molibdeno (Mo), como lo apuntaron Chaves (1988, 2012b) y Chaves *et al* (1991). Las rutas metabólicas de asimilación del N y del S se regulan naturalmente entre ellas, así como también con la de asimilación del C; lo cual permite a la planta coordinar las velocidades de asimilación para así mantener un adecuado balance entre dichos elementos (Maldonado 2008).



Apunta Bertsch (1998) en torno al tema, que *“En la caracterización del S orgánico se utiliza la relación C/N/S. Las relaciones C/S oscilan, en forma comparable con las relaciones C/P, alrededor de valores de 100. En casos extremos pueden llegar a valores de 600-700.”*

Como señalara Swift (1985), la relación C/S es importante de estimar pues al derivarse de un proceso microbiano refleja el estado de mineralización o fijación biológica del elemento, igual que acontece con la relación C/N. En esto debe considerarse como aseguran Anderson (1975) y Swift (1985), que la velocidad de mineralización del S en el suelo es menor que la del C y el N.

El abordaje del tema de las relaciones iónicas entre nutrimentos esenciales no puede dejar de mencionar y referirse a la relación N/S como preferencial, virtud de su fortaleza e implicaciones, como lo manifestara Maldonado (2008) al señalar, que *“El nitrógeno y el azufre constituyen dos de los elementos químicos más abundantes en*

la materia viva. La razón N/S en la biomasa vegetal es de alrededor de 20, que es, aproximadamente, la proporción de ambos elementos en las moléculas de proteína. Todos los aminoácidos contienen nitrógeno, mientras que el azufre se encuentra en los aminoácidos cisteína y metionina. Ambos elementos se hallan presentes, además, en otras importantes biomoléculas. Los animales, a diferencia de las plantas, no son capaces de usar formas inorgánicas de nitrógeno o de azufre, por lo que necesitan ingerir formas orgánicas de dichos elementos, principalmente como proteínas.”

Para Bornemisza (1990) la interacción más importante es la de N/S, lo que sugiere fortalecer la relación sinérgica incorporando los dos elementos en la cantidad necesaria; aplica también lo contrario, caso se adicione uno en mayor proporción sobre el otro.

El N y el S se encuentran contenidos en los suelos principalmente en forma química de nitrato (NO_3^-) y de sulfato (SO_4^{2-}), respectivamente. Plantas como la caña de azúcar tienen la capacidad natural de reducir y asimilar dichas formas inorgánicas oxidadas, transformándolas en las correspondientes formas orgánicas reducidas: grupos amino o amido ($-\text{NH}_2$) y grupos tiólicos ($-\text{SH}$) de aminoácidos y otras moléculas nitrogenadas

y azufradas. La investigación científica y la experiencia de campo han demostrado en este caso, que la asimilación del S está directa y estrechamente asociada con la del N y también con la del C. En la práctica agrícola es conocido que, en situaciones limitantes y con deficiencia de nitrato, ocurre un descenso de la asimilación del sulfato, y viceversa; por lo cual, plantas limitadas de sulfato ven significativamente reducida su capacidad para asimilar los nitratos. Asimismo, formas disminuidas de N, tales como el amonio y los aminoácidos, estimulan la reducción del sulfato, lo que ratifica la interacción sinérgica existente entre ambos elementos.

La determinación de S total y la relación N/S en la sección aérea de las plantas, total y en partes seleccionadas, han sido empleadas con el objeto de estimar el estado y la eventual necesidad de S. Se ha encontrado que las exigencias de las leguminosas por S son mayores respecto a las de gramíneas, debido a su mayor contenido de proteína. A partir de la estrecha relación que existe entre N y S, es común utilizar como indicador de requerimientos la relación N/S. Según Pumphrey y Moore (1965), esa relación tiene la ventaja de permanecer relativamente estable en los diversos estadios de desarrollo de la planta, en este caso forrajes.



Sobre esa interacción Goh y Kee (1978) presentaron relaciones N/S total que variaron de 4,5 a 52 para forrajes. En relación con la producción de grano de trigo (*Triticum* spp), han sido halladas respuestas a la fertilización azufrada cuando la concentración de S en grano fue menor a 0,12% y/o mantenía una relación N/S total mayor a 17/1 (Randall *et al* 1981). Woodhouse (1969) verificó por su parte, que una relación N/S superior a 17/1 limitaba el crecimiento del césped bermuda (*Cynodon dactylon* L.). De igual manera, McNaught y Christoffels (1961) comprobaron que relaciones N/S de 17 a 18,5 para el trébol blanco (*Trifolium repens*), y de 11 a 12 para gramíneas, permitieron una máxima productividad en plantas forrajeras.

Dijkshoorn y Van Wijk (1967) demostraron que cuando la planta llegó a su madurez, la relación N/S tendió a estabilizarse en 14/1 en el caso de las gramíneas y de 17/1 en las leguminosas, siendo que para una relación N/S de 20/1 en gramíneas ocurría una severa deficiencia de S. Sobre esta importante interacción se habla de una relación N/S en proporción de 10/1 en tejido vegetal para que los cultivos logren mantener un estado de desarrollo normal. Para conservar esos niveles en los rangos recomendables, el productor de caña debe asegurarse mediante un análisis representativo de suelo-planta contar con el nivel de suficiencia necesario del S en el suelo y también contenido en los tejidos vegetales. En el cultivo del café (*Coffea* spp.) Malavolta (1986) reporta e interpreta a partir de datos experimentales que el cultivo está bien suplido de S cuando sus hojas presentaron en época de verano relaciones N/S de 18 y P/S de 0,7. Aseguran Cuellar y compañeros (2002), que la mayoría de las plantas contienen N y S en relación 15/1, pero que en el caso de la caña de azúcar la misma es de 4/1.

Para Colombia expresa Quintero (1995) en torno a la misma relación aplicada a la caña de azúcar, que “La relación nitrógeno/azufre

en las hojas difiere entre variedades. Por ejemplo, en la plantilla de la variedad CP 72-356 esta relación fue de 11 a 1, mientras que en las socas varió entre 15 a 1 y 16 a 1, valores éstos muy cercanos a la relación considerada adecuada para la síntesis de las proteínas (15 a 1) y que indican la escasa probabilidad que existe, en este caso, de alcanzar respuesta con la aplicación de azufre. De la misma manera, en las hojas de la plantilla de la variedad MZC 74-275, la relación nitrógeno/azufre fue, aproximadamente, de 14 a 1 y varió poco con la edad del cultivo.”

En el caso de la relación P/S no puede desconocerse ni ignorarse el efecto competitivo existente entre ambos elementos, con claro desplazamiento y lavado del SO_4^- promovido por el P, cuyas aplicaciones son por lo general cuantiosas. El P limita la absorción del S. Se presumen también interacciones positivas entre K/S.

No cabe duda como lo demuestra de manera consistente la literatura sobre nutrición de plantas, la manifiesta importancia, trascendencia y necesidad de balancear la fertilización con N y S a fin de asegurar la estabilidad metabólica y agroproductiva en los cultivos agrícolas, de lo cual la caña de azúcar no está en absoluto exenta de ser igualmente regulada y equilibrada. El tema reviste gran importancia requiriendo por ello de investigación.

Causas de deficiencia

Una revisión de información atinente a este tema demuestra que los problemas existentes con la deficiencia de S en suelos de uso agrícola son graves y territorialmente significativos, como lo indican Kanwar y Mudahar (1983) al identificarla en 46 países tropicales; como también lo referenciaran Vitti *et al* (1979), Bornemisza (1990) y Fassbender, Bornemisza (1994), Bertsch (1998) y FAO (2002). Son muchas las razones

y circunstancias que pueden indicarse y fundamentarse para explicar la limitante del elemento para la planta, entre las que pueden citarse como más relevantes, entre otras, las siguientes:

- 1) En los suelos tropicales, las cantidades de S contenidas en el perfil del suelo explorado por el sistema radical de las plantas es frecuentemente bajo.
- 2) Suelos de mineralogía oxidica caolinitica (Ultisoles, Oxisoles) con fuerte adsorción de sulfatos.
- 3) Contenidos altos de alofanas en suelos volcánicos (andisoles) favorecen la formación de organominerales que limitan la disponibilidad de S a la planta (Alvarado *et al* 2001, 2014).
- 4) Suelos de textura gruesa (arenosa) y con bajos contenidos de materia orgánica resultan limitantes.
- 5) En suelos ácidos con Capacidad de Intercambio Aniónico (CIA), los iones sulfato se encuentran fuertemente adheridos (adsorbidos) a los coloides del suelo, quedando escasamente disponibles para las plantas.
- 6) Cualquier factor biótico o abiótico que afecte la mineralización de materiales orgánicos (C/S, N/S).
- 7) Cualquier relación que torne la interacción C/S en suelo y N/S en tejido altas.
- 8) La impericia y las malas prácticas de manejo ejecutadas en el cultivo de la caña de azúcar han llegado entre otros efectos indeseables, como los señalados por Chaves (2015), a agotar el “humus” contenido y con ello el Carbono Orgánico del Suelo (COS); además de deteriorar la

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) generando como consecuencia la pérdida de fertilidad de los suelos.

- 9) La corrección de suelos ácidos es también afectiva en perder S por variación del pH o por arrastre del SO_4^- por cationes presentes en exceso.
- 10) El laboreo y labranza de los suelos promueve y dinamiza la oxidación por mineralización de la materia orgánica y, con ello, la disponibilidad de S.
- 11) Los desbalances manifiestos con respecto a otros elementos como N y P presentes en el medio, principalmente, son causa de insuficiencia y deficiencia.
- 12) El empleo de fórmulas fertilizantes comerciales simples y concentradas ausentes de S como acontece con la urea, el nitrato de amonio, nitrato de calcio y los fosfatos de amonio (MAP y DAP), entre otros.
- 13) Aplicación intensiva de fosfatos que afecta principalmente la capa superficial del suelo donde se acumula el P.
- 14) Pérdidas de sulfatos por causa de la lixiviación. La lluvia intensa arrastra cationes y con ello aniones de alta afinidad como el S, promoviendo su pérdida (permanente o periódica).
- 15) La calidad del agua de riego también afecta.
- 16) La descomposición microbiana de la materia orgánica puede dar origen a gases que contienen azufre (H_2S , CS_2 , COS , CH_3SH), los cuales escapan y pierden a la atmósfera por volatilización.

- 17) Las condiciones REDOX generan importantes transformaciones microbiológicas en el suelo, más sensibles que las ocurridas con el N. La forma SO_4^{2-} está presente en condiciones de buena aireación (oxidación); mientras que en los suelos inundados o reducidos el sulfuro (S^-) forma compuestos insolubles con el Fe conocido como pirita (FeS_2).
- 18) Cultivo de variedades mejoradas con mayor capacidad de extracción y alto grado potencial de productividad agotan las existencias del suelo. En cultivos desarrollados a la sombra la hojarasca contribuye con aumentar en algún grado los contenidos de S.
- 19) Pérdidas por volatilización causada por la práctica de la quema de plantaciones y rastros orgánicos en el campo.
- 20) En fases iniciales de crecimiento de la planta es común observar deficiencias por S, las cuales conforme el cultivo desarrolla su sistema radical, profundiza y explora en el perfil del suelo son resueltas.
- 21) Reducción en el empleo de S contenido en los agroquímicos y combustibles fósiles (S-SO_2) como fuente de energía, lo que disminuye las concentraciones en la atmósfera y su posterior deposición en el suelo.

Síntomas de deficiencia

Bajo condiciones deficitarias de S en el suelo, sus efectos se traducirán en un menor rendimiento en la producción de biomasa y falta de desarrollo general de la planta, con una menor capacidad de reacción fotosintética; asimismo, la producción de compuestos de tipo fitoalexinas relacionadas

con mecanismos de defensa y tolerancia al estrés se verá afectada (Malavolta 2006). Es sin embargo aceptado y reconocido por la comunidad científica, que el S rara vez se convierte en un nutriente limitante para las plantas.

En la planta el S se concentra en mayor cantidad en las hojas viejas y en menor cantidad en las hojas más jóvenes, lo es atribuido a su mayor madurez metabólica. En relación con el tema declara Bornemisza (1990) para el caso de la caña de azúcar, que *“Como en muchas otras plantas, los síntomas de deficiencia de azufre se presentan primeramente en las hojas jóvenes y se parecen a los de la deficiencia de N, con la diferencia de que esta última se presenta primero en las hojas viejas. En un estado más avanzado, las hojas viejas tienen un color púrpura claro, debido a la acumulación de antocianina. Las plantas deficientes en general presentan tallos delgados y una apariencia enfermiza.”*

Resulta interesante indicar que tanto el S inorgánico como el orgánico pueden estar presentes en el interior de la planta, manteniendo los tejidos más jóvenes mayores concentraciones de la forma orgánica, por lo que en los tejidos más maduros predomina la forma inorgánica (reserva). Cuando la planta forma tejido joven y demanda para ello S, las hojas maduras pueden disponer del elemento acumulado como reserva y transformarlo de nuevo en sulfatos.

El síntoma característico atribuible a la falta del S en la planta de caña de azúcar es la clorosis caracterizada por un amarillamiento verde-pálido general sobre todo en hojas jóvenes, con las venas con frecuencia de coloración más pálido que el tejido intervenal; las hojas son delgadas, tienden a ser más cortas, estrechas y la planta da un aspecto arbustivo; con crecimiento limitado. Al avanzar la insuficiencia se forman en las hojas manchas cloróticas irregulares dispuestas de forma paralela respecto a las

nervaduras. En estados avanzados las hojas se tornan color púrpura, especialmente en sus márgenes como evidencia de la acumulación de carbohidratos y formación de antocianinas. Las hojas viejas pueden mantenerse verdes (Figura 3). Los tallos son delgados y elongados. Es interesante aportar como dato curioso para dar explicación a la “clorosis” que tipifica esta deficiencia, que la molécula de clorofila no contiene S en su estructura (solo C, H, O, N y Mg); motivo por el cual la decoloración y estado de clorosis manifiesto causado por la deficiencia de S es de carácter indirecto inducido por una limitada síntesis de proteínas.



Figura 3.

Deficiencia de azufre en caña de azúcar. (Fuente: Anderson y Bowen 1994)

Aseguran Anderson y Bowen (1994) que la deficiencia se presenta en hojas jóvenes las que son más afectadas. Asimismo, los meristemas apicales permanecen vivos; las hojas inmaduras presentan varios grados de clorosis, pero no se marchitan.

Las hojas jóvenes se tornan uniformemente cloróticas; pudiendo desarrollarse un ligero color púrpura. Las hojas, mencionan, son

angostas y más pequeñas que lo normal, con tallos muy delgados.

La diferencia visual que existe entre las deficiencias de N y S a nivel foliar se da porque al faltar S las nervaduras pese al amarillamiento y decoloración prevaleciente permanecen oscuras, aunque no de manera tan evidente como ocurre en el caso de una deficiencia provocada por limitaciones de Fe. Señala Malavolta (1982) como efectos sintomáticos no visibles los de carácter citológico, manifestados por una meiosis anormal, posiblemente inducida por la falta de S en algunas proteínas específicas; así como efectos de carácter químico exteriorizados por el incremento en el contenido de carbohidratos, la disminución de los azúcares reductores y reducción ya apuntada en la síntesis de proteínas.

Las deficiencias de S pueden corregirse fácilmente mediante el uso de fertilizantes que contengan como complemento el elemento incorporado en su fórmula, o alternativamente con aplicaciones directas de un compuesto de azufrado. La elección entre uno y otro método depende de varios factores implicados como son los económicos, pero en la mayoría de los casos, resultan preferibles las aplicaciones directas. Hasta hace pocos años las necesidades de S se satisfacían exclusivamente a través de fertilizantes con contenido de sulfatos, por lo que ha sido necesario como apuntan Rodríguez et al (2006), ir a la búsqueda de nuevas fuentes de S que presenten una mayor concentración y sean a la vez también más ventajosas.

Asegura Bertsch (1998) en torno a la insuficiencia, que *“Las deficiencias de S están extendidas por todos los trópicos. Se les encuentra en Alfisoles, Ultisoles y Oxisoles altamente meteorizados, en suelos recientes desarrollados de ceniza volcánica. En suelos arenosos, en sabanas expuestas a quemaduras anuales y en áreas del interior de los continentes con poca contaminación ambiental.”*



En Costa Rica los problemas asociados con deficiencias de S se presentan en condiciones muy particulares como ocurre cuando las plantaciones comerciales reciben fuertes aplicaciones de fósforo, o en su caso, las fórmulas empleadas sean simples o compuestas, especialmente las nitrogenadas carecen del elemento. En el caso particular de la caña de azúcar las deficiencias no son tan evidentes y manifiestas, aunque la buena respuesta a la adición del nutrimento como se verá más adelante ratifica su estado de necesidad.

Contenidos en el suelo

Similar a lo que acontece con el N y el P, el S se presenta en el suelo en formas orgánicas (60-90%) e inorgánicas (40-10%), lo que prudencialmente limita y restringe las inferencias y conclusiones que sobre su estado de fertilidad se establezcan y que puedan derivarse a partir de contenidos totales; aunque en los suelos tropicales sin fertilizar la correlación entre S total y orgánico es alta. La fracción orgánica proviene de rastros y restos vegetales, animales y microbianos depositados, incorporados y mineralizados en el suelo. Asegura Bertsch (1998) que la contribución del S orgánico en Costa Rica es baja, no superando el 35%,

aunque en buena parte de los mismos no supera ni el 10%. Los suelos volcánicos con altos contenidos de alofana poseen por lo general contenidos también altos de S orgánico formando organominerales, que limitan su disponibilidad para las plantas, declarando inclusive estados de insuficiencia. La ejecución de prácticas de preparación y laboreo que oxigenan el suelo y promueven la mineralización de la materia orgánica, también limitan la disponibilidad de S.

El S inorgánico se distribuye en el suelo bajo diferentes fracciones, como son: S-soluble, S-adsorbido, S-adsorbido profundamente y S-insoluble. En los suelos bien oxigenados los SO_4^{2-} son la forma principal de S inorgánico disponible para las plantas; en tanto que, en los suelos inundados, poco aireados y bajo condiciones anaeróbicas, los sulfuros (S^{2-}) como forma reducida es la prevaleciente.

Ese compuesto puede precipitar como mineral pirita (bisulfito de hierro), con un efecto de reinversión muy dinámico caso de restablecerse de nuevo la condición aeróbica que transforma con rapidez esos sulfuros en sulfatos. Apunta Bertsch (1998), que *“En suelos aireados, solo 1% o menos del S inorgánico se presenta como sulfuro.”* De igual forma, el S puede ser inmovilizado por la materia orgánica contenida en el suelo,

perdiendo su disponibilidad para las plantas.

Las plantas tienden a mantener constante la relación entre N orgánico y S orgánico en sus tejidos vegetativos, aunque la relación N total y S total puede variar ampliamente en función del suministro que exista de cada uno de esos nutrientes en la solución del suelo. Al igual que acontece con el N, la fracción azufrada debe ser sometida al ataque microbiano para así quedar disponible en la solución del suelo.

Los factores que afectan las tasas de mineralización del S, son los mismos que intervienen el N: humedad, temperatura, aireación, pH y acción biológica. El movimiento del sulfato en el suelo es estimulado y promovido por el encalado y el uso de fosfatos; siendo retenido por el contrario cuando la cantidad de óxidos libres de Al y Fe es elevada.

Es importante antes de pensar en la adquisición y aplicación de fertilizantes de formulación y síntesis química, valorar con objetividad todas las fuentes potencialmente disponibles de nutrientes disponibles en el lugar y que podrían ser utilizadas comercialmente en el campo, considerando de manera muy especial las de origen y composición orgánica (ejemplo excrementos de vaca, cerdos, pollos, residuos vegetales, RAC, paja y otros materiales orgánicos). Sin embargo, no puede ignorarse que estos deben ser previamente tratados, “composteados” y convertidos en abono antes de ser aplicados en el suelo. Como se indicó, la fracción orgánica es la que predomina como proveedora de S y esta recomendación resulta muy atinente para satisfacer las necesidades del cultivo.

Como apunta FAO (2002) *“Aun cuando el contenido de nutriente del material orgánico sea bajo y variable, el abono orgánico es muy valioso porque mejora las condiciones del suelo en general. La materia orgánica mejora la estructura del suelo, reduce la erosión del mismo, tiene un efecto regulador*

en la temperatura del suelo y le ayuda a almacenar más humedad, mejorando significativamente de esta manera su fertilidad. Además, la materia orgánica es un alimento necesario para los organismos del suelo. El abono orgánico a menudo crea la base para el uso exitoso de los fertilizantes minerales.”

Consecuente con lo que reseña y expresa el título del presente artículo referente a que el azufre es un “elemento esencial relegado en la nutrición de la caña de azúcar en Costa Rica”, es difícil encontrar en primera instancia información básica referente a contenidos del elemento en los suelos de uso agrícola en el país y menos aún a nivel foliar, lo que también tiene alcance y aplicabilidad para la caña de azúcar. Esa deficiencia se extiende al establecimiento y disponibilidad de niveles críticos referenciales.

Esa primera particularidad diferencia al S del resto de elementos, pues su caracterización regional no puede establecerse con la información disponible, lo que puede deberse a la dificultad y particularidad que ofrece su determinación en el laboratorio por el método turbidimétrico.

En el Cuadro 4 se presenta el resultado de una valoración de contenidos de varias formas de S realizada en suelos de seis países, notando grandes variaciones entre ellos, que en el caso de los suelos más recientes de Centroamérica comparados con los más intemperizados de África Oriental muestran una menor contribución particularmente de la fracción orgánica de S, como lo apuntarán Fassbender y Bornemisza (1994). En el caso de Costa Rica esa contribución es bastante baja en los suelos nacionales.

Al procurar ubicar contenidos de S en los suelos cañeros costarricenses, se constata lo aseverado respecto a una carencia importante y muy preocupante de información referente

al elemento, como lo evidencia el Cuadro 5; lo que permite sin embargo dimensionar en algún grado y con muy baja representatividad algunos contenidos, los cuales son mayores en la región de Guanacaste y muy bajos en las Zonas Norte y Sur. Puede concluirse virtud de su relevancia y trascendencia, la imperiosa, insoslayable e inexcusable necesidad y obligación de realizar un

esfuerzo institucional por procurar contar con información representativa de contenidos de S y materia orgánica (carbono orgánico) en los suelos cultivados con caña de azúcar en el país. El problema de interpretar el estado de situación nacional en torno al S, nace por la carencia de datos de contenido, el resto surge por simple derivación.

Cuadro 4.

Contenido de azufre total y orgánico, y relaciones C/S en algunos suelos de Centroamérica y África Oriental.

Suelos	País	S (mg. kg ⁻¹)		% de S Total	C/S Orgánico
		Total	Orgánico		
Heredia	Costa Rica	1.980	690	34,6	148
Escazú	Costa Rica	630	115	18,2	160
Paraíso	Costa Rica	2.150	298	13,8	90
Cauque	Guatemala	539	277	51,4	206
Texpán	Guatemala	781	312	39,9	71
Quetzaltenango	Guatemala	1.976	897	45,4	23
Palín	Guatemala	688	482	70,1	89
Santa Ana	El Salvador	1.669	780	49,7	32
Soyapango	El Salvador	1.015	539	53,1	24
Corinto	Nicaragua	872	490	56,2	61
Tipitapa	Nicaragua	1.235	685	55,5	29
Kikuyo	África Oriental	355	355	100,0	183
Kinakop	África Oriental	750	750	100,0	53
Usambara	África Oriental	390	388	99,0	89
Cerrado	Brasil	166	154	93,0	

Fuente: Fassbender y Bornemisza (1994).

Cuadro 5.

Aproximación de la condición química de los suelos cultivados con caña de azúcar en Costa Rica según región productora.

Región	No. Muestras	pH	cmol (+) / l				µg / ml						%	Sat (%) Acidez
			Acidez	Ca	Mg	K	P	S	Zn	Cu	Mn	Fe	M0	
Guanacaste	159	6,4	0,16	19,6	6,05	0,52	17	15	2	9	17	64	4,6	0,61
Pacífico Central	51	6	0,19	9,85	3,64	0,38	15	--	2	8	19	59	2,8	3,46
Valle Central	118	5,3	0,59	3,88	1,29	0,52	8	--	4	16	29	100	--	9,39
Zona Norte	317	5,4	0,46	6,04	2,71	0,83	4	1	5	13	55	91	6,6	4,58
Turrialba	145	5,1	0,91	4,77	1,36	0,21	6	--	4	17	25	100	--	12,55
Zona Sur	104	4,9	1,7	1,75	0,96	0,23	5	5	1	9	12	100	--	36,34
Total/Promedio	894	5,5	0,67	7,65	2,67	0,45	9	7	3	12	26	100	4,7	6,54
NC		< 5,5	< 0,50	< 4	< 1	< 0,2	< 10		< 2	< 2	< 5	< 10		< 10

Fuente: Chaves (1999ab); Méndez y Bertsch (2012)
NC= Nivel Crítico.



Azufre y tipo de suelo

Al igual que acontece con todos los elementos químicos esenciales, útiles o de cualquier otra categorización que se les asigne (Chaves 2022a), la presencia del S en los suelos nacionales es muy circunstancial, particular y dependiente de varias condiciones que lo regulan y disponen para poder ser absorbido y asimilado por las plantas, lo cual provoca como supuesto válido que sus contenidos sean presuntamente muy variables entre regiones, zonas, localidades y aún a nivel de fincas productoras de caña destinada a la fabricación de azúcar.

Como expresara Chaves (2022b) en torno al tema, *“...la planta de caña de azúcar posee una reconocida y extraordinaria capacidad de extracción de nutrimentos del suelo, que va en relación directa con su elevada y significativa capacidad de producción de biomasa (raíces, tallos, hojas). Un suelo con demostrada condición de fertilidad natural es capaz de proveer los elementos necesarios requeridos para generar y sostener por algún tiempo (ciclo comercial) un nivel productivo elevado; otro de condición infértil, obliga proveer los nutrientes vía fertilización con un costo posiblemente elevado. La diferencia que ejerce la condición de fertilidad del suelo como proveedor de nutrimentos esenciales y otros considerados útiles, es determinante en términos de rendimientos, producción y rentabilidad final.”*

La literatura reporta que el S inorgánico puede acumularse en suelos con taxonomía (USDA 2014) de los órdenes Ultisol, Oxisol y Andisol de mineralogía oxídico caolinítico, debido básicamente a la alta Capacidad de Intercambio Aniónico (CIA) que presentan, y con ello, la fuerte adsorción de sulfatos presente (Alvarado et al 2014; Bertsch 1998).

Se ha encontrado que para Mesoamérica los niveles totales de S son muy variables dependiendo fuertemente de las condiciones climáticas; siendo mayoritariamente bajos en condiciones húmedas debido al arrastre por lavado de cationes acompañados de aniones que provocan las lluvias intensas, predominando entre ellos el sulfato, como lo señalaran Pearson et al (1961).

La presencia de S es dependiente en muy alto grado de los contenidos superficiales de materia orgánica, asegurando que en zonas tropicales de América Latina la relación C/S es más crítica que el nivel absoluto del elemento; lo que resulta comprensible visto desde la perspectiva de la mineralización microbiana.

Esa relación determina si habrá fijación o en su caso fijación biológica del elemento, como lo apuntara Swift (1985); pues se estima que la velocidad de mineralización del S es menor respecto a la del N o el C (Anderson 1975). Es definitivo que la acumulación de S orgánico depende de los factores formadores de suelo que intervienen y actúan sobre la materia orgánica. Se reporta asimismo un fuerte asocio entre el anión sulfato con otros cationes presentes en la fracción sólida, principalmente los óxidos de hierro (Fe) comunes en suelos conteniendo minerales de goethita, hematita y lepidocrocita.

En un estudio realizado por Alvarado et al (2014), con el objeto de identificar arcillas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado, determinaron, que *“En general, aparte de las arcillas formadas en Andisoles y suelos con características ándicas discutidas por Alvarado et ál. (2014a), las esmectitas y kanditas asociadas a óxidos e hidróxidos de Fe y Al representan los productos finales de la formación de arcillas en los suelos*

del país, las primeras en los ecosistemas ústicos estacionalmente secos y las últimas en los ecosistemas údico-perúxico de pisos altitudinales isotérmicos e isohipertérmicos.” Como conclusión, aseguran los mismos autores, que *“La génesis de los suelos de Costa Rica se ve afectada por varios procesos, según la elevación a la que se estén formando. En las partes altas de las cordilleras dominan la andosolización y la podsolización, mientras que en las laderas intermedias a bajas tienden a dominar los procesos de laterización y en las partes bajas, la acumulación de materiales erosionados de las laderas.”*

Se acepta que los Andisoles son suelos de origen más reciente y por ende con un grado menor de meteorización respecto a los Inceptisoles. Concluyeron que como miembros terminales del proceso de meteorización desarrollado en climas tropicales estacionalmente secos se forman los Vertisoles y en los de clima tropical lluvioso los Alfisoles, Ultisoles y Oxisoles.

A esos ordenes debe sumarse los Andisoles formados en su gran mayoría a partir de materiales volcánicos (ceniza, piedra pómez, lava, etc.), caracterizados por poseer elevados contenidos de materia orgánica, que imprime grados de densidad aparente baja, alta retención de humedad, color negro oscuro, quelatización de cationes (*proceso químico donde un micronutriente metálico (Fe, Mn, Zn y Cu) se enlaza con un quelato para evitar la formación de productos insolubles y en donde el ion quelatizado (Fe, Mn, Zn, Cu) permanece disponible para ser tomado por las raíces y las hojas*), altos contenidos de S total y gran facilidad para su manejo y laboreo agrícola.

Como puede comprobarse la variabilidad

edáfica vista desde la perspectiva taxonómica del área cultivada con caña de azúcar en el país es muy alta, como lo expone el Cuadro 6, donde se anota a nivel de orden y suborden los principales tipos de suelo predominantes por región cañera (Chaves 2017a; Chaves y Chavarría 2017ab).



Cuadro 6.

Caracterización edáfica y territorial de las regiones y zonas productoras de caña destinada a la fabricación de azúcar en Costa Rica.

Indicador	Regiones y Zonas Productoras					
	Guanacaste		Pacífico Central	Valle Central	Zona Norte	
	Este	Oeste			San Carlos	Los Chiles
Ordenes Taxonómicos de Suelos Dominantes	Inceptisol (35,0%) Vertisol (31,2%) Mollisol (23,4%) Entisol (8,8%) Ultisol (1,3%) Alfisol (0,3%)		Inceptisol (79,1%) Entisol (15,8%) Ultisol (5,1%)	Andisol (38,8%) Ultisol (29,1%) Inceptisol (24,2%) Entisol (4,4%) Vertisol (3,5%)	Ultisol (47,3%) Inceptisol (44,6%) Entisol (5,5%) Andisol (2,3%) Histosol (0,3%)	
Porcentaje	100%		100%	100%	100%	
Sub ordenes Taxonómicos de Suelos Dominantes	Ustepts (34,6%) Usterts (31,2%) Ustolls (23,4%) Orthents (7,9%) Ustults (1,3%)		Usterts (79,1%) Orthents (12,1%) Ustults (4,2%) Aquents (3,7%) Humults (0,9%)	Ustands (34,6%) Ustepts (23,7%) Humults (19,4%) Ustults (9,2%) Orthents (4,4%)	Udults (44,7%) Udepts (34,2%) Aqupts (10,3%) Orthents (5,1%) Humults (2,6%)	
Porcentaje	98,40%		100%	91,30%	96,90%	
Relieve	Plano / Casi Plano	Plano / Casi Plano	Plano / Casi Plano	Ondulación Moderada	Ligeramente Ondulado	Ligeramente Ondulado
Grado de Pendiente (%)	0,3 - 3%	1 - 5%	1 - 6%	3 - 25%	2 - 15%	3 - 5%
Drenaje	Moderadamente Lento	Moderadamente Lento	Moderadamente Lento	Bueno	Bueno	Moderadamente Excesivo
Riesgo de Inundación	Moderado	Moderado	Severo	Nulo	Moderado	Leve
Riesgo Sequía	Alto	Alto	Alto	Medio - Bajo	Medio - Alto	Medio - Alto
Riego	Si	Si	Si	Si	No	No

Indicador	Regiones y Zonas Productoras			
	Turrialba		Zona Sur	Nacional
	Zona Media	Juan Viñas		
Ordenes Taxonómicos de Suelos Dominantes	Andisol (53,7%) Inceptisol (31,1%) Ultisol (15,2%)		Ultisol (95,3%) Entisol (2,8%) Inceptisol (1,9%)	Inceptisol (36,9%) Vertisol (17,6%) Ultisol (17,6%) Mollisol (13,1%) Entisol (7,6%) Andisol (6,9%)
Porcentaje	100%		100%	99,70%
Sub ordenes Taxonómicos de Suelos Dominantes	Udands (53,7%) Udepts (31,1%) Humults (15,2%)		Humults (95,3%) Fluvents (2,8%) Ustepts (1,9%)	Ustepts (27,8%) Usterts (17,6%) Ustolls (13,1%) Humults (9,4%) Udults (6,6%)
Porcentaje	100%		100%	74,50%
Relieve	Ondulación Ligera a Moderada		Ondulación Moderada a Fuerte	Moderadamente ondulado
Grado de Pendiente (%)	3 - 30%		5 - 35%	5 - 20%
Drenaje	Bueno		Moderadamente Excesivo	Moderadamente Excesivo
Riesgo de Inundación	Leve		Nulo	Severo - Nulo
Riesgo Sequía	Bajo		Bajo	Alto - Bajo
Riego	No		Poco	Si

Fuente: Chaves (2017ab, 2019); Chaves y Chavarría (2017ab).

A nivel de orden las taxonomías de suelo dominantes encontradas en las zonas productoras de caña de azúcar de Costa Rica distribuidas en un área de 65.900,2 hectáreas, son de acuerdo con Chaves (2017ab) y Chaves y Chavarría (2017ab), las siguientes: Inceptisol (36,9%), Vertisol (17,6%), Ultisol (17,6%), Mollisol (13,1%), Entisol (7,6%), Andisol (6,9%), Alfisol (0,2%) e Histosol (0,04%) y un área pequeña de Oxisoles encontrado en la Zona Sur del país. En el caso de los subórdenes la distribución de los mismos es como sigue: Ustepts (27,8%), Usterts (17,6%), Ustolls (13,1%), Humults (9,4%), Udults (6,6%), Udands (4,63%), Ustands (2,28%), Aqupts (1,75%), Ustults (1,67%), Aquents (0,88%), Fluvents (0,19%), Ustalfs (0,17%), Saprists (0,04%) y Ustoxs que no fue cuantificado.

Como se infiere, se ha identificado caña sembrada comercialmente en el país en un total de 9 órdenes de los 12 que estructuran y conforman el Sistema de Clasificación del Soil Survey Staff del United States Department of Agriculture (USDA 2014), lo que representó un 75%, ratificando la alta dispersión del cultivo y variabilidad de los suelos cañeros nacionales. En el caso de los subórdenes se identificó un total de 16 lo que representa un 23,5% de los 68 subórdenes clasificatorios que contiene el sistema, que es en definitiva muy significativo como expresión de variabilidad edáfica.

Esa información de carácter tipificante es muy relevante para juzgar e interpretar la condición química de los suelos en cuanto a su contenido y disponibilidad de S total. De acuerdo con Bornemisza (1994) los suelos altamente meteorizados como acontece con los **Oxisoles y los Ultisoles**, son con frecuencia naturalmente deficientes en este elemento, poseen una baja CIC y una elevada adsorción de SO4⁻ en los horizontes B, lo que habilita su absorción en el caso de plantas con sistemas radicales que lleguen a esa profundidad; lo cual como es conocido tiene el problema de la alta acidez y presencia de elementos tóxicos (Al, Fe, Mn, Cu). La alta infertilidad

de estos suelos limita satisfacer la nutrición aún proporcionando S por la insuficiencia de otros nutrientes.

En el caso de los **Inceptisoles y Entisoles** de poco o ningún desarrollo de horizontes acontece que los mismos poseen algo de materia orgánica y no todos son bajos en S, lo cual depende mucho del nivel de lavado y uso productivo comercial a que están sometidos; debiendo por esto conocer el grado de extracción y reposición que presentan para estimar la condición del elemento y determinar si se requiere adicionarlo o no. Son suelos productivos, aunque igual que acontece con los otros órdenes, no pueden esperarse respuestas productivas satisfactorias al S si no se corrigen previamente posibles deficiencias de N, P y K.

Con los **Vertisoles** arcillosos típicos de climas secos y humedad alterna como Guanacaste, de topografía plana poco accidentada y de manejo físico difícil, son como se anotó en el Cuadro 6 importantes en caña de azúcar virtud del área sembrada que ocupan y también por el grado de fertilidad elevado que presentan. Sus requerimientos por S pueden ser altos dependiendo del uso y manejo, pese a sus contenidos de materia orgánica.

Los suelos del orden **Andisol** corrientes en el país caracterizados por su origen volcánico, presentan alta fijación y retención de P y humedad, densidad aparente muy baja y que por su ubicación geográfica estratégica son intensamente utilizados en la agricultura, entre ellos la caña de azúcar. Los contenidos de S total en estos suelos se estiman altos pero la presencia de Alofana (material sólido amorfo, o con una cristalización apenas incipiente, compuesto esencialmente de una mezcla de sílice y alúmina hidratadas) limita la mineralización de la materia orgánica contenida, por lo que se atribuye el S presente mayoritariamente procedente del S inorgánico poco disponible.

Algunos investigadores manifiestan que las deficiencias de S son bajas en este tipo de suelos. Reporta Bornemisza (1994) citando a Fitts (1970) y Fox (1980) y basado en estudios propios, que pese a las altas cantidades de S total presentes se encontró niveles bajos de S extraíble en Andisoles de la Meseta Central de Costa Rica; asegurando que “...no son raras las deficiencias de azufre en este tipo de suelos en Centroamérica y otras regiones. En algunos casos, la deficiencia de azufre en Andisoles se presenta después de corregir problemas de P y B...”

Como hecho destacable se menciona una propiedad especial compartida entre suelos de los órdenes Oxisol, Ultisol y Andisol (*Dystrandepts*), cuales la de absorber grandes cantidades de sulfato en el subsuelo, aunque de manera más lenta que la vinculada con los fosfatos. Según Gebhardt y Coleman (1974) dicha capacidad es dependiente del pH y se incrementa cuando el valor de ese indicador decrece. El nivel de adsorción de sulfatos estima esos autores es alto y común en suelos de México y Centroamérica, llegando en la superficie a 10-20 cmol·kg⁻¹ y en el subsuelo a 15-60 cmol·kg⁻¹. Dicha adsorción se estima muy fuerte siendo estimada en por lo menos diez veces superior al observado con la retención de los aniones NO₃ y Cl, cuya adsorción es no específica.

Los **Alfisoles** se consideran suelos viejos, bastante desarrollados y muy meteorizados que pueden poseer contenidos importantes de materia orgánica en su horizonte, buena cantidad de arcillas y un bajo nivel de saturación de bases; lo que dependiendo de su contenido de humedad puede favorecer el desarrollo de algunos cultivos. La diferencia con los Ultisoles es de corte químico y se da principalmente en los horizontes internos del perfil del suelo, siendo los problemas principalmente de acidez más acentuados en estos últimos (más ácidos). Es posible encontrar limitaciones de S en este tipo de suelos. En su capa superficial arable ambos ordenes taxonómicos son muy similares, pese

a lo cual es común encontrar los Alfisoles en condiciones más secas como Guanacaste, como revela el Cuadro 6.

La retención y/o disponibilidad del S en el suelo se da a través de mecanismos de intercambio caracterizados por reacciones de adsorción y desadsorción aniónica, más que reacciones de precipitación.

Adsorción en el suelo

La adsorción es un proceso abiótico importante presente en suelos de características ácidas, especialmente en sistemas coloidales oxídicos, particularmente los de estructura caolinítica ricos en arcillas 1:1 y en sesquióxidos y también los alofánicos; ocurriendo la adsorción del SO₄²⁻ en sitios de carga positiva. Hay por esto una estrecha correlación positiva entre la adsorción de S y los contenidos de materia orgánica y la presencia de óxidos de Fe y Al; al igual que correlaciones negativas con relación a la presencia de cationes intercambiables. La dependencia de la naturaleza del sistema coloidal presente es muy alta. La adsorción del S puede darse por dos mecanismos:

- a) Intercambio de iones SO₄²⁻ por iones OH en sitios de intercambio aniónico en el suelo.
- b) Formación de complejos con hidroxialuminio en la siguiente forma:



Los condicionantes de esa reacción y su intensidad son la mineralogía del suelo, la presencia de fosfatos y el valor de pH; siendo que a mayor acidez (pH bajos) la adsorción de S se incrementa por existir más carga positiva. A su vez, al haber más P en el medio la adsorción disminuye por fijación de este por desplazamiento y sustitución de los iones sulfato y otros aniones. Es importante señalar que en caso de fijación de S y P, el

primero es retenido con menor fuerza por los coloides del suelo, lo que favorece una mayor disponibilidad una vez liberados a la solución. En este sentido el P adsorbido es más problemático.

Respuesta de la caña de azúcar al azufre

La práctica de corregir y fertilizar los suelos y nutrir los cultivos para proveer los elementos requeridos por las plantas para solventar sus necesidades fisiológicas básicas, sea como complemento o como reconstitutivo compensatorio a lo que naturalmente contiene el substrato, es universal; pues independientemente de las características, propiedades y atributos que éstos tengan, siempre será necesario disponer de ellos si se desea mantener condiciones de fertilidad que satisfagan los requerimientos de productividad, calidad y ecocompetitividad demandados. Vale tener presente lo apuntado por Rice *et al* (2010) al manifestar, que “La mayoría, si no todos los suelos requieren algún nivel de fertilizante o aplicación de enmienda para producir altos rendimientos en las cosecha de cultivos”. Agregan los mismos autores en referencia al mismo tópico, que “Aplicar la cantidad adecuada de nutrientes al suelo ahorraría dinero al productor, protege el medio

ambiente, maximiza rendimientos del cultivo, ayuda a preservar recursos valiosos y previene desbalances nutricionales. Más específico, un buen programa de fertilización manejado adecuadamente promueve un crecimiento saludable y rápido del follaje, aumenta la resistencia del cultivo a enfermedades e insectos, y reduce los requerimientos de riego. El desarrollo rápido del follaje, también ayuda al control de malezas.”

Como se ha demostrado y comprobado suficiente y fehacientemente en el campo, las características y atributos intrínsecos que posea la variedad sembrada en el caso particular de la caña de azúcar son determinantes en la respuesta diferencial que muestren los cultivares de uso comercial al ambiente (i.e. interacción genotipo x ambiente), lo que sugiere que la respuesta de los genotipos específicamente a la fertilización con S puede ser diferente; esto en consonancia y de acuerdo con la capacidad de cada genotipo para acompañar el rendimiento esperado. Es entonces biológicamente viable y factible aceptar y reconocer que existe una importante respuesta diferencial a la fertilización con N y S entre cultivares de caña con diferentes estructuras operadas bajo sistemas de cultivo variables. Se torna esperable que los mayores incrementos potenciales que puedan lograrse en la producción de biomasa



caña, la concentración de sacarosa y en el rendimiento agroindustrial en general, van en respuesta directa con la adición suficiente y equilibrada de S cuando el N no es limitante; lo que aplica también en contrario virtud de la interacción positiva y sinérgica que existe entre ambos nutrimentos.

El S es un elemento de uso fundamental en suelos con características salino-sódicos y básicas o próximos a ellas ($\text{pH} > 6,5$), siendo los materiales más comúnmente usados para inducir la acidificación del suelo el H_2SO_4 , S, FeSO_2 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y FeS_2 ; aunque el S elemental y el H_2SO_4 son los acidificantes más empleados, como lo señalara Aburto (1987). El yeso agrícola o fosfoyeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) como se comentará más adelante, es una fuente de muy amplio uso para contrarrestar los efectos negativos provocados por la acidez intercambiable (Al^{+3}) que tanto perjuicio provoca a los tejidos de las plantas, como lo apuntara con amplitud Chaves (2021d).

Entre los materiales que contienen S disponible en forma de polvo o granular y que serían adecuados para la aplicación directa o mezclado a granel, figuran los siguientes: Superfosfato simple y enriquecido, sulfato amónico, sulfonitrato amónico, yeso, sulfato potásico-magnésico, sulfato de calcio, urea-sulfato amónica, urea azufre, azufre elemental y el sulfato elemental. El Tiosulfato de amonio (TSA, 12-0-0-26) es un líquido claro adecuado para formular fertilizantes líquidos o para utilización directa en el agua de riego. El polisulfato de amonio (PSA) es un líquido rojo con un fuerte olor a amonio, comúnmente empleado en el agua de irrigación (Rodríguez et al 2006).

Expresan (Torres et al sf), que “En los últimos años se observa mayor oferta de fertilizantes compuestos (e.g. mezclas químicas con N, P y S) que incluyen S^0 micronizado y S-SO_4^{2-} . Si bien la utilización de S^0 en fertilización de cultivos no es una práctica nueva, se progresó considerablemente en las innovaciones utilizadas en los procesos de granulación

de fuentes convencionales como el MAP que permiten incorporar partículas muy finas de S^0 en la matriz de los gránulos (e.g. $< 40\mu\text{m}$ y aún más pequeñas). Desde el punto de vista de la industria de fertilizantes, la principales ventajas de estos productos son la mayor seguridad en el uso de S^0 durante la etapa de producción del fertilizante. Desde el punto de vista agronómico, una ventaja interesante de estas fuentes es la de ofrecer una relación P/S más equilibrada...”

La importancia y trascendencia de asegurar un adecuado suministro de S a los cultivos esta debida y suficientemente comprobada, por cuanto la asimilación y eficiencia en el uso del N depende en alto grado de la presencia en suficiencia y balance que mantenga con el S, pues caso de existir desequilibrios la afectación metabólica es significativa. Como se ha indicado y fundamentado a través del texto, por lo general las necesidades de S son cubiertas en el cultivo de la caña de azúcar a partir de las reservas naturales existentes en el suelo, principalmente originadas por la mineralización de la materia orgánica, como también la proveída por el agua de lluvia y el riego.

En un menor grado participa la dosis aportada por la fertilización comercial tradicional, la cual opera más incorporando el S como complemento y acompañamiento de un nutriente principal, que como suplemento específico del elemento. En este caso fuentes como el sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), el sulfato de potasio (K_2SO_4), la urea azufrada o los superfosfatos simple y triple obtenidos tratando la roca fosfórica con ácido sulfúrico que provee un elevado contenido de S han sido de uso tradicional.

Los resultados experimentales y la experiencia de campo asociada con la adición de S-SO_4^{2-} al suelo han sido en el país muy satisfactorias en su gran mayoría, redundando en incrementos importantes de productividad agrícola y también industrial expresada en la mayor cantidad de sacarosa concentrada y recuperada en la materia

prima producida y azúcar fabricada en el ingenio, lo que vinculado a su relativo bajo costo han redundado en una alta rentabilidad y relación beneficio/costo por su adición. Seguidamente se presentan selectivamente algunos resultados experimentales importantes logrados en algunas de las regiones tradicionales donde se produce caña destinada a fabricar azúcar comercial en el país, lo cual involucra inevitablemente tipos y características fisicoquímicas de suelo, variedades, condiciones de clima, programas de fertilización y de manejo agronómico muy diferentes como será expuesto. Buscando un mejor entendimiento se presenta un detalle por fuentes y dosis.

A) Fuentes

Inevitablemente en la búsqueda de la mejor opción química para realizar la aplicación nitrogenada surge la posibilidad de emplear como ión acompañante el sulfato, lo cual ha posibilitado investigar el efecto asociado de ambos nutrimentos, que como se expresó anteriormente mantienen una estrecha relación sinérgica cuando se encuentran presentes en cantidades suficientes y equilibradas; aunque también antagónica cuando sucede lo contrario con alguno de ellos.

Son numerosos y muy variados los estudios nacionales que sobre el tema de las fuentes conteniendo S se han realizado en el país, como lo ratifican las investigaciones efectuadas por Vega et al (1986), Chaves y Alvarado (1994), Chaves y Salazar (1986), DIECA (1991, 1992, 1994, 1995, 1997, 2015, 2016), Angulo et al (19993b, 1996ac), Barrantes y Chaves (1999b, 2003), Barrantes et al (2004), Calderón y Chaves (2006), Angulo et al (2006), Chaves (1999ab, 2001, 2012b, 2016abc, 2017b, 2021e), Chaves y Barrantes (2003, 2007), entre otros. Los mismos involucran no apenas diferentes fuentes y fórmulas químicas, ión acompañante, ordenes de suelo, dosis, formas de colocación, fraccionamiento, interacción

entre elementos, variedades cultivadas y condiciones edafoclimáticas diferentes. Seguidamente se presentan y comentan de manera resumida algunos resultados muy reveladores de investigación sobre el tema.

En la localidad de Florencia de Turrialba (788 msnm) se evaluó en un suelo del orden Ultisol 7 fuentes nitrogenadas aplicadas a la variedad B 77-95 (Calderón y Chaves 2006). El Cuadro 7 presenta el resultado promedio de dos cosechas, no existiendo diferencias estadísticas según Tuckey 5% para ningún tratamiento. Productivamente las mejores fuentes fueron Urea + S y Nitrato de K, superando al Testigo sin N en un 5,2 y 5,1% (0,60 y 0,59 t azúcar/ha), respectivamente; el Sulfato de amonio superó al testigo en un 2,3% (0,27 t/ha) pero no a otras fuentes. Las mayores diferencias entre tratamientos se observaron en el Rendimiento Industrial (kg sacarosa/t caña). Concluyeron los autores que la incorporación de Mg y S favorecieron ese indicador.



Cuadro 7.

Respuesta a la adición de 7 Fuentes de N en un suelo Ultisol de Florencia, Turrialba. Promedio de 2 cosechas.

Fuente de N	Composición (%)			Porcentaje				Rendimiento Industrial (kg/tmc)	Productividad (tm/ha)		PRT %	Relac Caña/ Azúcar
	N	S-SO ₄	Otro	Brix	Pol	Pureza	Fibra		Caña	Azúcar		
Testigo (-N)	0			18,82	16,69	88,37	12,52	118,45	96,46	11,74	100	8,6
Urea Granular	46			18,11	15,79	86,75	12,38	111,38	98,34	11,34	97	9,2
Sulfato Amonio	21	23,7 (S)		18,42	16,23	87,77	11,73	117,31	99,55	12,01	102	8,7
Nitrato Calcio	15,5		19 CaO	18,47	16,30	87,92	12,20	116,36	99,82	12,02	102	8,8
Nitrato Amonio	33,5			18,25	15,95	87,02	12,10	113,78	101,81	12,05	103	9,0
Magnesamón	22		7 MgO, 11 CaO	18,60	16,47	88,23	11,95	118,47	100,60	12,30	105	8,6
Nitrato Potasio	13,5		44 K ₂ O	18,46	16,28	87,79	12,21	116,32	102,36	12,33	105	8,8
Urea + Azufre	40	5,6 (S-SO ₄)		18,49	16,27	87,53	11,80	117,62	101,54	12,34	105	8,7
Promedio				18,45	16,25	87,67	12,11	116,21	100,06	12,02	102	8,8
CV (%)				1,89	2,89	1,40	4,04	4,14	4,40	6,43		

Fuente: Calderón y Chaves (2006). Variedad B 77-95. Promedio de 4 repeticiones. Edad promedio de cosecha: 12 meses. Fertilización base: Planta 150 kg N, 120 P₂O₅ y 150 kg K₂O. Soca 130 kg N y K₂O.

En otra prueba similar realizada en la zona alta productora de caña de Juan Viñas (1.000 msnm), Jiménez, Cartago, se evaluaron 7 fuentes nitrogenadas empleando la variedad hawaiana H 61-1721 con ciclo vegetativo promedio de 23 meses a cosecha, cuyos resultados agroindustriales promedio de 3 cortas se presentan en el Cuadro 8 y comentan en DIECA (1997).

No se encontraron diferencias estadísticas según Tuckey 5% para ningún tratamiento,

pese a lo cual los resultados absolutos son favorables para la adición de N y S.

Se ratifica nuevamente la importancia y necesidad de incorporar S y Mg, los cuales reportaron un retorno económico muy favorable, particularmente del Sulfato de amonio que aumento el azúcar en un 5,3% correspondiente a 4,7 t/ha. La urea + S también resultó positiva al incrementar el azúcar fabricado en un 8,7% (2,7 t/ha) respecto al Testigo sin N.

Cuadro 8.

Respuesta a la adición de 7 Fuentes de N en un suelo Inceptisol de Juan Viñas, Jiménez. Promedio 3 cosechas.

Fuente de N	Composición (%)			Porcentaje			Rendimiento Industrial (kg/tmc)	Productividad (tm/ha)		PRT %	Relación Caña/ Azúcar
	N	S-SO ₄	Otro	Pol	Pureza	Fibra		Caña	Azúcar		
Testigo (-N)	0			17,77	89,78	14,12	128,64	237,86	30,63	100	7,8
Urea Granular	46			18,17	88,79	14,26	130,04	275,76	35,92	117	7,7
Sulfato Amonio	21	23,7 (S)		17,76	88,82	14,32	127,33	277,58	35,33	115	7,9
Magnesamón	22		7 MgO, 11 CaO	18,23	89,21	14,27	131,09	266,56	34,73	113	7,7
Nitrato Calcio	15,5		19,4 CaO	18,21	88,82	13,97	131,55	259,44	34,05	111	7,6
Nitrato Amonio	33,5			17,64	89,71	14,02	127,98	265,36	33,98	111	7,8
Urea + Azufre	40	5 (S-SO ₄)		18,31	89,58	14,71	130,78	256,84	33,29	109	7,7
Urea + Boro	44,5		2 B ₂ O ₃	19,76	89,21	14,43	136,39	233,42	31,82	104	7,3
Promedio				18,23	89,24	14,26	130,48	259,10	33,72	110	7,7

Fuente: DIECA (1997). Variedad H 61-1721 Promedio de 3 repeticiones. Edad promedio de cosecha: 23 meses. Fertilización base: Planta 184 kg N, 162 kg P₂O₅ y 180 kg K₂O. Soca 184 kg N y 180 kg K₂O.

Pensando en el futuro y buscando evaluar fuentes nitrogenadas modernas que permitan mitigar Gases de Efecto Invernadero (GEI) como el óxido nitroso (N₂O) emitido por las fuentes fertilizantes nitrogenadas, se establecieron estratégicamente pruebas de campo donde se evaluaron 9 fuentes diferentes con cobertura nacional (Cuadro 9), las cuales fueron replicadas en 6 regiones agrícolas: Cañas (Porozal) y Liberia (Liberia) en Guanacaste, Grecia (Puente de Piedra) Valle Central, San Carlos (Cutris) en Zona Norte, San Isidro de El General (San Pedro) en Pérez Zeledón y la región cañera de Turrialba (La Suiza), las cuales contaron

con las adaptaciones pertinentes propias y obligadas de cada lugar en materia de clima, suelo, variedad sembrada, fertilización base, número de cosechas, etc., como lo apuntan Chaves (2016a, 2021e) y DIECA (2015, 2016). En los 6 estudios se evaluaron comparativamente fertilizantes tradicionales, pero también de liberación controlada, lenta y estabilizados con potencial de uso en la caña de azúcar La fuente de N de mayor consistencia regional y mejor resultado fue la Urea + S al ocupar el primer lugar en cuanto a productividad de caña y azúcar (t/ha); seguida por el Nitro Xtend™ (segundo en azúcar) y Nutrán™ (tercero en azúcar).

En estabilidad y consistencia según la prueba de frecuencia posicional realizada entre fuentes de N, se tiene que la mejor posición (suma + baja) la alcanzó el Nitro Xtend™, seguida por la urea + S, el sulfato de amonio y el Nutrán™. Las más bajas fueron por el contrario en su orden el Testigo y el Last-N virtud de la inestabilidad y

variabilidad mostrada en su comportamiento agroindustrial entre regiones. Queda demostrada nuevamente la importancia del S como ión acompañante y su buena respuesta en el cultivo de la caña de azúcar, particularmente en las nuevas fuentes ambientalmente recomendadas.

Cuadro 9.

Producción de Azúcar (t/ha) según Fuente Nitrogenada y región productora de caña.

No.	Fuente	Producción Azúcar (t/ha)							Promedio	Diferencia % Testigo
		Cañas	Liberia	Grecia	San Carlos	Pérez Zeledón	Turrialba			
	Altitud (msnm)	12	80	875	91	560	740			
	Orden Suelo	Inceptisol	Inceptisol	Andisol	Ultisol	Ultisol	Ultisol			
	No Cosechas*	4	2	1	4	3	3			
	Variedad sembrada	NA 85-1602	CP 72-2086	RB 86-7515	LAICA 01-604	LAICA 04-825	B 77-95			
1	NUTRÁN	13,81	17,28 ab	14,39	11,54	13,02 a	20,23	15,04	112	
2	UREA	12,38	15,54 ab	14,80	11,91	12,17 ab	19,86	14,44	108	
3	SULFATO AMONIO	13,99	16,87 ab	15,46	12,43	12,22 ab	18,32	14,88	111	
4	NITRO XTEND	14,19	17,45 a	15,34	11,81	12,00 ab	19,79	15,10	113	
5	UREA + S	13,73	17,25 ab	15,87	11,57	12,85 ab	19,82	15,18	113	
6	PERLKA	13,48	16,80 ab	14,73	12,67	11,47 b	19,15	14,72	110	
7	AGROCOTE	12,77	17,27 ab	15,16	11,64	13,01 a	18,53	14,73	110	
8	N-FORCE	13,17	16,43 ab	15,29	12,20	13,06 a	19,51	14,94	112	
9	LAST-N	13,03	16,56 ab	13,91	11,63	11,64 b	18,60	14,23	106	
10	TESTIGO	10,47	14,98 b	15,09	11,87	12,13 ab	15,87	13,40	100	
PROMEDIO		13,10	16,62	15,00	11,93	12,36	18,97	14,67		
CV (%)		9,77	6,01	9,02	4,11	3,45	10,52			

Fuente: Chaves (2016a, 2021e), DIECA (2015, 2016).
Nota: Tratamientos seguidos por la misma letra no difieren estadísticamente entre sí, según Tuckey 5%. Donde no hay letra anotada implica que no hubo diferencias estadísticas probabilísticamente significativas.
Los resultados corresponden al promedio de cuatro repeticiones en cada localidad/cosecha/año.
* Fue diferente y variable entre regiones por diversas razones.

En la zona de Cañas (9 msnm), Guanacaste se realizó un estudio empleando parcelas de observación replicadas donde se valoró la interacción S-Zn, con la variedad Q 96. El resultado promedio de 4 cosechas revela (Cuadro 10) un efecto sinérgico al adicionar 30 kg de S-SO₄ complementado con 40 kg de Zn tanto en la producción de caña y azúcar (t/ha), la cual se aumentó en un 13,8% (2,08

t), no así en la concentración de sacarosa; lo que si se favoreció cuando el S se aplicó sin el Zn como complemento. Todas las interacciones superaron productivamente al testigo. Concluyen los autores del estudio (DIECA 1995, 1997), que “Las bondades del azufre en la caña de azúcar son ya conocidas al ser un nutrimento determinante en el ciclo vegetativo del cultivo.”

Cuadro 10.

Respuesta a la adición de 6 dosis de Zn-S en un suelo Inceptisol de Cañas, Guanacaste. Promedio 4 cosechas.

Tratamientos	Composición (%)			Rendimiento Industrial (kg/tmc)	Productividad (tm/ha)		PRT %	Relación Caña/ Azúcar
	Sacarosa	Pureza	Fibra		Caña	Azúcar		
Fertilización Base (FB)	17,10	89,10	16,80	128,92	127,39	15,03	100	8,5
FB + 30 kg S-SO ₄	17,20	88,90	16,80	131,29	125,16	14,73	98	8,5
FB + S + 20 kg Zn	16,30	87,70	17,00	124,40	139,07	15,76	105	8,8
FB + S + 40 kg Zn	16,70	89,20	16,00	127,79	145,90	17,11	114	8,5
FB + S + 60 kg Zn	17,00	90,50	17,30	129,65	130,43	15,53	103	8,4
Promedio	16,80	89,10	16,80	128,41	133,59	15,68	104	8,5

Fuente: DIECA (1995, 1997). Variedad Q 96. Parcelas de observación.
Fertilización base: Planta 150 kg N, 120 kg P₂O₅ y 100 kg K₂O. Soca 150 kg N y 100 kg K₂O.





Evaluando el impacto que puede tener la forma de colocación del N en el suelo buscando minimizar las posibles pérdidas que pudieran darse por volatilización y lixiviación, se estudiaron en un Inceptisol de Cañas (9 msnm), Guanacaste, tres fuentes nitrogenadas; nitrato de amonio (33,5% N), urea (46% n) y sulfato de amonio (21% n), colocadas en dos modalidades: **superficial e incorporado** mediante desaporca (Angulo et al 1996a). Luego de 4 cosechas de la variedad Q 96 se encontró significancia estadística (1%) para la producción de caña y azúcar (t/ha), no así para las fuentes nitrogenadas ni la interacción modalidad-fuente.

En promedio la aplicación superficial evidenció menor eficiencia y productividad, aunque resultó más económica por no requerir el empleo de equipos mecánicos. El Sulfato de amonio mostró una mayor eficiencia al ser incorporado al suelo, siendo sin embargo el Nutrán™ la mejor fuente de N en ambas modalidades. Es definitivo que incorporar el fertilizante en el suelo constituye una buena práctica que redundo en mejoras de su eficiencia y efectividad, como lo apuntara Chaves (2021acf).

B) Dosis

Ladosisesasimismounfactor determinante al evaluar la eficiencia de un nutriente, no solo por el costo involucrado con su empleo, sino también por los equilibrios, deficiencias o eventualmente toxicidades que pudiera eventualmente inducir.

El tema ha sido abordado con amplitud y especificidad como lo ratifican los estudios de Chaves et al (1985, 1986), Chaves y Salazar (1986), Arias y Chaves (1986), DIECA (1991, 1992, 1994, 1995, 1997, 2015, 2016), Angulo et al (1993a, 1996b), Chaves y Alvarado (1994), Chaves (1999ab, 2001, 2012b, 2016abc, 2017b, 2021e), Barrantes et al (1996), Barrantes y Chaves (1999a), Chaves y Barrantes (2007), entre otros.

En un amplio estudio de campo realizado en CATSA, Liberia (17 msnm), Guanacaste, donde se aplicaron 5 dosis crecientes de S-SO4 en suelo del orden Vertisol (*Typic pelluster*) empleando la variedad Co 421; se encontró en promedio luego de 4 cosechas un efecto creciente de las dosis de S hasta los 90 kg/ha, dosis en la cual se obtuvo el

mejor índice de productividad en caña (105,4 t/ha) y azúcar (9,5 t/ha) lo que significó incrementos del 11,9% (11,2 t) en caña y 7,0% (0,62 t) en azúcar, como se aprecia en el Cuadro 11.

Todas las dosis de S superaron al testigo en producción de caña y azúcar. Hubo diferencias estadísticas significativas (1%) para los jugos y la fibra% caña evidenciando una mejora por la adición de S al suelo y la interacción cosechas por dosis; las tres variables de producción mostraron también diferencia al 1%, revelando la influencia positiva de las dosis de S.

El estudio económico de los resultados indica que la dosis más rentable fue la adición al suelo de 30 kg de S-SO4/ha. Finiquitan los autores (DIECA 1991, 1992, 1994) expresando, que *“En forma concluyente, el azufre constituye un macronutriente esencial que debe ser incorporado a la plantación a través de la fertilización comercial, y si se utiliza como fuente el sulfato de amonio, no se incurriría en costos extras significativos que reduzcan la utilidad final en virtud de aprovechar su complemento nitrogenado como criterio principal de empleo.”*

Cuadro 11.

Respuesta a 5 dosis de Azufre en un suelo Vertisol de Liberia, Guanacaste. Promedio 4 cosechas.

Dosis S-SO ₄ (kg/ha)	Porcentaje				Rendimiento Industrial (kg/tmc)	Productividad (tm/ha)		PRT %	Relación Caña/Azúcar
	Brix	Pol	Pureza	Fibra		Caña	Azúcar		
0	19,81	16,10	81,22	14,77	95,86	94,16	8,92	100	10,6
30	19,93	16,20	81,36	14,84	96,26	99,40	9,40	105	10,6
60	19,84	16,29	82,17	15,15	96,73	97,34	9,38	105	10,4
90	19,41	15,58	80,27	14,53	92,51	105,36	9,54	107	11,0
120	19,74	15,89	80,48	14,73	94,18	100,33	9,22	103	10,9
Promedio	19,93	16,01	81,10	14,80	95,11	99,32	9,29	104	10,7
CV (%)	4,75	6,44	3,98	7,16	8,47	12,33	13,70		

Fuente: DIECA (1991, 1992, 1994). Variedad Co 421 Promedio de 5 repeticiones.
Fertilización base: Planta 155 kg N, 150 kg P₂O₅ y 50 kg K₂O. Soca 150 kg N y 50 kg K₂O.



Evaluando el efecto de 7 dosis crecientes de S-SO₄ aplicadas al suelo empleando como fuente sulfato de amonio, se comprobó en un estudio exploratorio realizado en un Inceptisol de Cañas (9 msnm), Guanacaste, luego de 4 cosechas de la variedad Q 96, que no hubo diferencias estadísticas pese a lo cual todas las dosis superaron al testigo sin S en producción de caña y azúcar, como lo apuntan Angulo et al (1996b) y DIECA (1995, 1996). La dosis promedio de 40 kg de S-SO₄/ha resultó ser la mejor en producción de azúcar, pese a que la adición de 100 kg mostró la mayor productividad, al superar al testigo

en un significativo 13,9% correspondiente a 1,92 t/ha y contar con la mayor viabilidad desde la perspectiva económica al mostrar una mayor tasa de retorno marginal, como lo indica el Cuadro 12. El hecho de incorporar mucho azufre al suelo no asegura necesariamente lograr respuestas positivas al elemento. Expresan los autores, que “*Los resultados evidencian la factibilidad de incorporar el azufre conjuntamente con el nitrógeno, mediante el uso de urea azufrada, lo que reduce significativamente los costos por concepto de aplicación.*”

Cuadro 12.

Respuesta a la adición de 7 dosis de Azufre en un suelo Inceptisol de Cañas, Guanacaste. Promedio 4 cosechas.

Dosis S-SO ₄ (kg/ha)	Porcentaje			Rendimiento Industrial (kg/tmc)	Productividad (tm/ha)		PRT %	Relación Caña/Azúcar
	Sacarosa	Pureza	Fibra		Caña	Azúcar		
0	16,52	87,46	16,30	124,22	110,84	13,85	100	8,0
40	15,50	86,97	16,29	123,48	127,81	15,77	114	8,1
60	15,83	88,34	16,40	123,24	117,97	14,57	105	8,1
80	16,38	87,90	15,79	124,46	118,29	14,72	106	8,0
100	15,82	87,92	16,42	123,81	131,44	15,99	115	8,2
200	16,24	87,19	15,85	124,70	109,96	15,06	108	7,3
500	15,84	88,10	17,15	125,26	128,44	15,92	114	8,1
Promedio	16,01	87,69	16,31	124,16	120,67	15,12	109	8,0
CV(%)	5,37	2,19	4,91	6,47	12,02	13,43		

Fuente: Angulo et al (1996), DIECA (1995, 1996). Variedad Q 96. Promedio de 3 repeticiones. Fertilización base: Planta 150 kg N, 120 kg P₂O₅ y 50 kg K₂O. Soca 150 kg N y 100 kg K₂O.

Buscando conocer respuestas en condiciones diferentes se estudió en un suelo Inceptisol (*Dystropept*) de la zona lluviosa de Cutris (65 msnm) de San Carlos, el efecto de 5 dosis crecientes de S-SO₄/ha empleando sulfato de amonio como fuente suplidora sobre los rendimientos agroindustriales (DIECA 1991, 1992). Luego de cosechar en dos ocasiones la variedad CP 57-603 se encontraron diferencias estadísticas para la producción de caña y azúcar (t/ha), no así para la concentración de sacarosa (kg/t) las cuales trascendieron tanto para

el primer como segundo corte. El promedio de ambas cosechas revela de acuerdo con el Cuadro 13, que todas las dosis superaron en productividad agroindustrial al testigo sin S; en cuyo caso la dosis de 50 kg de SO₄/ha se mantuvo como la más eficiente desde la perspectiva agroindustrial y también más rentable al valorar los resultados económicamente. El incremento verificado por esa dosis respecto al Testigo sin S fue del 17,1% correspondiente a 22,8 toneladas de caña y del 14,8% (2,78 t) en azúcar/ha, respectivamente.

Cuadro 13.

Respuesta a la adición de 5 dosis de Azufre en un suelo Inceptisol de Cutris, San Carlos.

Dosis S-SO ₄ (kg/ha)	Pureza (%)	Caña (%)		Rendimiento Industrial (kg/tmc)	Productividad (tm/ha)		PRT %	Relación Caña/Azúcar
		Pol	Fibra		Caña	Azúcar		
0	90,93	16,57	14,03	143,05	133,71	18,81	100	7,1
50	90,78	16,28	14,55	139,92	156,55	21,59	115	7,2
100	91,21	16,60	13,77	144,86	151,07	21,59	115	7,0
150	90,09	16,22	14,20	139,21	153,48	21,00	112	7,3
200	92,45	16,20	14,36	140,55	155,40	21,62	115	7,2
Promedio	91,08	16,37	14,18	141,52	150,04	20,92	111	7,2

Fuente: DIECA (1991, 1992). Variedad CP 57-603. Promedio de 4 repeticiones. Fertilización base: Planta 150 kg N, 200 kg P₂O₅ y 150 kg K₂O. Soca 150 kg N y 150 kg K₂O.

En condiciones de producción en la zona pacífica baja, se evaluó en el Ingenio El Palmar (30 msnm) ubicado en Montes de Oro de Puntarenas, 5 dosis crecientes de azufre aplicadas en un suelo categorizado perteneciente al orden taxonómico Mollisol (DIECA 1991).

El Cuadro 14 presenta el resultado promedio de la segunda cosecha de la variedad Q 96. En torno a los resultados expresan los responsables, que “...indican que el comportamiento en este segundo corte fue similar al del primero, no encontrándose diferencias estadísticas significativas entre los

tratamientos; sin embargo, si se observa que en las dos variables principales toneladas de caña y azúcar por hectárea hay diferencias importantes en productividad.

Los tratamientos con sulfato siempre fueron superiores al testigo, siendo mejor desde el punto de vista técnico-económico en ambos casos la dosis de 90 kg por hectárea. Deberán valorarse por más tiempo los efectos residuales que generen los tratamientos aplicados. De acuerdo con el estudio económico, la aplicación de esa dosis reviste viabilidad económica, por lo que es recomendable su empleo.”

Cuadro 14.

Respuesta a la adición de 5 dosis de Azufre en un suelo Mollisol de Puntarenas. Promedio segundo corte.

Dosis S-SO ₄ (kg/ha)	Porcentaje				Rendimiento Industrial (kg/tmc)	Productividad (tm/ha)		PRT %	Relación Caña/Azúcar
	Brix	Pol	Pureza	Fibra		Caña	Azúcar		
0	19,69	13,34	85,70	14,66	112,63	105,20	11,20	100	9,4
30	20,83	14,84	86,90	14,67	121,60	107,50	13,40	120	8,0
60	21,02	14,79	86,70	15,35	120,50	113,20	13,60	121	8,3
90	21,07	14,69	86,30	15,58	119,18	118,20	14,10	126	8,4
120	19,82	13,50	82,60	14,44	108,08	128,70	13,90	124	9,2
Promedio	20,49	14,33	85,63	14,90	11,64	114,60	13,40	120	8,5
CV (%)	3,57	3,93	1,87	4,66	4,54	9,40	8,80		

Fuente: DIECA (1991). Variedad Q 96. Promedio de 5 repeticiones. Fertilización base: Planta 150 kg N y 100 kg P₂O₅. Soca 150 kg N.

Buscando encontrar la dosis óptima de S para incorporar en los suelos meteorizados e infértiles del orden Ultisol, se realizaron en la zona productora de caña del sur del país varios experimentos en esa orientación. En el Cuadro 15 se presentan los resultados promedio agroindustriales del estudio efectuado en La Fortuna de San Pedro (560 msnm), Pérez Zeledón, luego de cosechar en tres ocasiones la variedad SP 71-5574. El S se aplicó mediante azufre elemental (98% S). No se observaron efectos estadísticamente significativos entre variables, aunque si diferencias productivas muy importantes y determinantes económicamente que influyen en la toma de decisiones. El S no afectó la concentración de sacarosa (kg/t) en los tallos, pese a lo cual la dosis de 160 kg mejoró

la variable en 2,3 kg (1,6%). La producción de caña si se vio muy favorecida con la adición de S, superando todas las dosis al tratamiento Testigo en un ámbito entre 10,3 (2,6%) y 6,9 t/ha (7,3%) en las dosis de 120 y 200 kg/ha, respectivamente; igual sucedió con el azúcar producido, excepto la dosis de 120 kg que no superó al testigo. Expresan los investigadores Barrantes y Chaves (1999a) que “De acuerdo con estos resultados, resulta viable desde la perspectiva técnico-económica el empleo de una dosis de 40 kg, la cual podría aplicarse mediante el empleo de fuentes nitrogenadas como la urea azufrada o el sulfato de amonio. Los presentes resultados ratifican una vez más la excelente respuesta que ha mostrado la caña de azúcar a la adición de azufre al suelo.”

Cuadro 15.

Respuesta a la adición de 6 dosis de Azufre en un suelo Ultisol de La Fortuna de San Pedro de Pérez Zeledón. Promedio 3 cosechas.

Dosis S-SO ₄ (kg/ha)	Fibra (%) Caña	Rendimiento Industrial (kg/tmc)	Productividad (tm/ha)		PRT %	Relación Caña/Azúcar
			Caña	Azúcar		
0	15,18	142,52	94,79	13,51	100	7,0
40	15,16	140,85	100,21	14,11	104	7,1
80	15,60	142,07	99,18	14,09	104	7,0
120	15,83	136,54	97,28	13,28	98	7,3
160	15,28	144,84	99,61	14,43	107	6,9
200	15,34	141,35	101,67	14,37	106	7,1
Promedio	15,40	141,36	98,79	13,97	103	7,1
CV (%)	3,64	4,66	9,06	8,91	120	

Fuente: Barrantes y Chaves (1999a). Variedad SP 71-5574. Promedio de 4 repeticiones. Fertilización base: Planta 150 kg N, P₂O₅ y K₂O. Soca 150 kg N y kg K₂O. Se aplicó 1 tonelada de CaCO₃ 20 días antes de sembrar.

En otra prueba similar realizada en la misma localidad se encontró que los promedios de cosecha de la investigación donde se evaluaron 6 dosis crecientes de S realizada en un suelo del orden Ultisol (Barrantes y Chaves 2000; Chaves y Barrantes 2007), no presentaron diferencias estadísticas significativas, aunque sí diferencias productivas y económicas importantes, donde todas las dosis superaron al testigo sin S en toneladas de caña y azúcar producidas (t/ha). De acuerdo con los resultados obtenidos se encontró recomendable la adición incorporar al menos 40 kg de S-SO₄/ha.

Procurando identificar y afinar aún más la dosis técnico-económica más viable y factible para aplicar comercialmente el S, se estableció otro estudio de campo donde se evaluaron 7 dosis crecientes de S en un Ultisol de Cajón de Pérez Zeledón (650 msnm), por medio del cual se ratifica el resultado anterior luego de 3 cosechas de la variedad Pindar, en el sentido de que la adición de aproximadamente 50 kg de

S-SO₄/ha pareciera resultar suficiente y rentable, como se infiere del contenido del Cuadro 16 (DIECA 1991, 1992).

En el caso del Rendimiento Industrial (kg de azúcar/ha) el aumento en la dosis de S mejoró en promedio el mismo hasta en un 4,1% (5,64 kg) al utilizar la dosis de 100 kg de S-SO₄/ha. Todas las dosis de S superaron en producción de caña, de azúcar (t/ha) y la concentración de sacarosa (kg/t) al Testigo sin S; lo que no aconteció en el caso particular de la dosis de 75 kg de S-SO₄/ha, pues fue inferior en esas variables, como se aprecia en dicho cuadro.

En general las diferencias observadas en productividad son muy tenues, pues fueron apenas del 2,3% (2,2 t) de caña en la dosis de 125 kg y del 4,6% (0,60 t) de azúcar/ha en la dosis de 50 kg de S, lo que anuló cualquier efecto con alcance estadístico. El criterio económico pasa a ser en este caso el definidor de la dosis recomendable, al establecer la mejor tasa de retorno marginal de la inversión.



Cuadro 16.

Respuesta a la adición de 7 dosis de Azufre en un suelo Ultisol de Cajón, Pérez Zeledón. Promedio 3 cosechas.

Dosis S-SO ₄ (kg/ha)	Pureza (%)	Rendimiento Industrial (kg/tmc)	Productividad (tm/ha)		PRT %	Relación Caña/ Azúcar
			Caña	Azúcar		
0	85,28	136,47	96,37	13,17	100	7,3
25	86,92	140,37	96,58	13,58	103	7,1
50	86,02	140,50	97,71	13,77	105	7,1
75	85,33	135,44	93,64	12,66	96	7,4
100	85,79	142,11	94,93	13,50	102	7,0
125	86,22	139,47	98,59	13,75	104	7,2
150	85,99	140,92	94,22	13,27	101	7,1
Promedio	85,94	139,33	96,01	13,39	102	7,2
CV (%)	0,65	1,76	1,90	2,92		

Fuente: DIECA (1991, 1992); Chaves y Barrantes (2007). Variedad PINDAR. Promedio de 4 repeticiones. Fertilización base: Planta 150 kg N, P₂O₅ y K₂O. Soca 150 kg N y kg K₂O. Se aplicó 1 tonelada de CaCO₃ 20 días antes de sembrar.

Se realizó en una finca de Hacienda Atirro (670 msnm) situada en Turrialba una investigación para evaluar la respuesta productiva de la variedad Q 96 a 4 dosis crecientes de N en interacción con dos dosis de S: 0 y 60 kg S-SO₄/ha, respectivamente. Se anotan en el Cuadro 17 los resultados agroindustriales promedio obtenidos luego de realizar 3 cosechas, en las cuales hubo diferencias estadísticas para la producción de caña y azúcar (t/ha).

Se nota una respuesta favorable cuando se elevan las dosis de N y complementa con S, particularmente en la dosis 200-60 kg de N-S/ha la cual elevó la concentración de sacarosa en un 4,1% correspondiente a 4,9 kg/t y 27,4% (31,3 t) en producción de caña; como también un 23,2% (3,38 t) en azúcar cuando comparado con el tratamiento testigo (100 kg de N y 0 de S).

La relación sacarosa demostró que la adición de 100 kg de N/ha sin S logró

la mejor tasa de retorno marginal, al requerir menos materia prima que procesar en el ingenio para fabricar la misma cantidad de azúcar (1 tonelada). Concluyen los responsables del estudio (DIECA 1995, 1997) luego de realizadas tres cosechas consecutivas, que “En resumen, la presente investigación permite concluir que la aplicación del azufre complementariamente con el nitrógeno,

produce un mejor efecto que cuando se usa apenas nitrógeno.

Es probable que al practicar una cuarta y quinta cosecha el comportamiento del cultivo sea más contundente hacia la interacción, en cuanto a producción agroindustrial se refiere, en virtud a la experiencia positiva reflejada en el tercer corte.”

Cuadro 17.

Respuesta a la interacción N-S en un suelo Inceptisol de Atirro, Turrialba. Promedio 3 cosechas.

Dosis (kg/ha)		Porcentaje			Rendimiento Industrial (kg/tmc)	Productividad (tm/ha)		PRT %	Relación Caña/ Azúcar
N	S-SO ₄	Sacarosa	Pureza	Fibra		Caña	Azúcar		
50	0	19,45	89,97	15,07	113,73	106,08	12,10	83	8,8
100	0 *	19,28	89,01	14,69	118,53	114,15	14,58	100	7,8
150	0	19,68	89,83	15,52	121,15	138,25	16,00	110	8,6
200	0	19,66	89,32	14,84	122,70	141,19	17,40	119	8,1
50	60	19,15	87,90	15,65	116,84	125,54	14,66	101	8,6
100	60	19,72	90,21	15,20	119,88	126,00	15,03	103	8,4
150	60	19,66	89,50	14,61	120,28	122,65	14,80	102	8,3
200	60	19,92	90,80	15,69	123,41	145,48	17,96	123	8,1
Promedio		19,57	89,57	15,16	119,57	127,42	15,32	105	8,3

Fuente: DIECA (1995, 1997). Variedad Q 96. Promedio de 3 repeticiones.
Fertilización base: Planta 130 kg P₂O₅ y 150 kg K₂O. Soca 130 kg P₂O₅ y 150 kg K₂O.
* Testigo comercial.

Con el objeto de evaluar la posible respuesta expresada en términos de productividad agroindustrial al adicionar en interacción Magnesio y Azufre, se realizó un estudio en un suelo del orden Inceptisol deficiente en esos elementos, situado en Hacienda La Luisa (1.300 msnm), Sarchí de Valverde Vega (DIECA 1991).

El resultado promedio de dos cosechas de la variedad H 44-3098 cosechada a 13 meses, muestra según el Cuadro 18, que no hubo diferencias estadísticas significativas. Se concluye que la mayoría

de los tratamientos no superó al Testigo en producción de caña y azúcar, excepto el tratamiento N° 5 donde se adicionó media fertilización complementada con 40 kg de MgO y 30 kg de S-SO₄/ha, lo que vislumbra un efecto positivo de esa interacción.

Podrían presumirse por la ubicación del lugar próxima al Volcán Poás posibles contenidos altos de S, pese a lo cual la respuesta de la plantación muestra alguna respuesta a su adición, lo que sugiere investigar más.

Cuadro 18.

Evaluación del efecto del Mg y S aplicados a un Inceptisol sobre los rendimientos agroindustriales en Hacienda La Luisa, Sarchí, Valverde Vega. Promedio de 2 cosechas.

Tratamientos	Porcentaje				Rendimiento Industrial (kg/tmc)	Productividad (tm/ha)		PRT %	Relación Caña/ Azúcar
	Brix	Sacarosa	Pureza	Fibra		Caña	Azúcar		
1	17,60	13,28	82,83	13,25	97,73	133,8	13,0	100	10,3
2	17,82	13,15	82,85	13,03	99,96	124,9	12,8	99	9,8
3	16,94	12,75	82,39	13,12	93,17	134,5	12,6	97	10,7
4	17,07	12,72	81,86	13,43	92,86	119,0	11,0	85	10,8
5	17,38	13,11	83,14	12,85	97,03	134,7	13,1	101	10,3
CV (%)	6,44	8,28	2,68	4,48	9,53	15,16	18,17		

Fuente: DIECA (1991). Variedad H 44-3098. Promedio de 4 repeticiones. Edad de cosecha 13 meses.
Fertilización base: Planta 50 kg N y 150 kg P₂O₅ y 50 kg de K₂O. Soca 130 kg N y 10 kg P₂O₅ y 100 kg de K₂O.
Tratamientos Evaluados: 1) Testigo; 2) 30 kg SO₄/ha; 3) 40 kg MgO/ha, 4) 30 kg SO₄ + 40 kg MgO/ha y 5) 40 kg MgO + 30 kg SO₄ + 1/2 Fertilización.



Los estudios de investigación con azufre realizados por Arias y Chaves (1986) en la zona cañera de Grecia (875 msnm), Alajuela y de Chaves y Salazar (1986) en la zona alta de Juan Viñas (1.000 msnm), Jiménez de Cartago, empleando la variedad Pindar, ratifican la ventaja de incorporar S al suelo; con lo cual se aportan más razones para demostrar el buen negocio que implica su incorporación en los programas de fertilización comercial de plantaciones.

C) Fertilización foliar

El tema fue virtud de su incuestionable trascendencia y renovada actualidad debidamente abordado con bastante amplitud y profundidad por Chaves (2021g), demostrando con su presentación que el empleo de esta modalidad de aplicación habilita y posibilita la adición de N, S y multiminerales, que caso sean incorporados vía suelo resultan de eficiencia limitada, sobre todo los micronutrientes. El S es calificado como un nutriente móvil a nivel de tejidos foliares lo que facilita su acceso y distribución por la planta, a diferencia de otros elementos que ofrecen dificultad, como acontece con el Ca, Mg, B, Sr y Ba calificados por Alexander (1986) como inmóviles; o el caso del Zn, Fe, Mn, Cu y Mo declarados como parcialmente móviles.

En torno al tema manifiesta Chaves (2021g), que *“Es importante investigar también la respuesta individual y combinada de nutrientes, buscando encontrar para cada condición el sinergismo apropiado. En esta materia, debe tenerse presente que el azufre (S) como ión acompañante es muy efectivo y de muy alta respuesta en la caña como ha sido ampliamente demostrado, lo que debe separarse para no confundir efectos y dar créditos a elementos que no los tienen.”*

El abordaje de este tópico es definitivamente polémico y controvertible virtud de la poca consistencia obtenida en los resultados investigativos y el interés manifiesto de las fuerzas comerciales por imponerlos como opciones tecnológicas viables y factibles para mejorar la nutrición de los cultivos.

A manera de conclusión y basado en criterios y argumentos técnicos bien fundamentados, asegura Chaves (2021g) específicamente para el cultivo de la caña de azúcar, que *“...puede constatar, que los grandes centros mundiales de investigación y tecnología asociados con el cultivo de la caña de azúcar poco investigan y menos recomiendan sobre esta modalidad nutricional, lo cual por consulta expresa realizada en su oportunidad, atribuyen debido a la baja respuesta obtenida con la práctica. Sin embargo y pese a todo, las pruebas*

científicas indican que la fertilización foliar es un método potencialmente viable y útil para mejorar la productividad en algunas circunstancias especiales, motivo por el cual debe revisarse profunda y ampliamente. Es conveniente, sin embargo, tener una actitud recelosa, prudente y juiciosa caso se pretenda incursionar en la modalidad foliar, pues los resultados experimentales revelan mucha inconsistencia que deja un espacio válido a la desconfianza, la duda y el escepticismo.”

D) Recomendación

Procurando generar y aportar material técnico importante para ser responsable y juiciosamente validado y confirmado o en su caso ajustado y moderado por los programas de investigación nacional, y, sobre todo, por la experiencia de campo que la actividad productiva comercial forje, se presenta en

el Cuadro 19 una propuesta de fertilización para azufre basada en las superficies de respuesta obtenidas por muchos años en Costa Rica.

La misma se expone por región agrícola productora de caña considerando ciclo vegetativo. Debe en su interpretación tomarse inexcusablemente en cuenta en la decisión de cuanto elemento (kg/ha) incorporar las condiciones de clima, el orden taxonómico de suelo, la variedad sembrada, el ciclo vegetativo (edad y N° de corte), fuente empleada, forma de adición, el manejo agronómico incorporado particularmente en lo concerniente a corrección y fertilización de suelos, y otras variables que de manera decidida intervienen en la demanda requerida y la respuesta de la plantación a la cambiante, heterogénea e inestable condición prevaleciente, como lo demostrara Chaves (2019, 2020) con suficiencia.

Cuadro 19.

Respuesta de la caña de azúcar a la adición de Azufre aplicado al suelo en Costa Rica, según región productora.

Región	Ciclo vegetativo	Respuesta potencial (kg S-SO ₄ /ha)
Guanacaste	P - S	30 - 90
Pacífico Central	P - S	60 - 90
Zona Norte	P - S	40 - 60
Valle Central	P - S	30 - 60
Turrialba - J. Viñas	P - S	40 - 60
Zona Sur	P - S	40 - 60
Zonas Altas (>1.000 msnm)	P - S	60 - 80
Total / Promedio	P - S	30 - 80

Fuente: Ajustado de Chaves (1999ab; 2017b; 2019)
P = Ciclo Caña Planta
S = Ciclo Caña Soca o Retoño



Como se infiere de dicho cuadro, la respuesta potencial esperable en términos de productividad agroindustrial y rentabilidad económica a la adición de azufre al suelo es muy variable entre localidades productoras de caña, lo cual amerita investigar y experimentar más al respecto para lograr certeza en la recomendación que se genere. El ámbito de 30 a 90 kg de $S-SO_4$ /ha es técnicamente amplia debiendo contextualizar y ubicar la mejor dosis de acuerdo con las condiciones particulares del entorno agroproductivo.

Quema y azufre

La quema es una polémica y cuestionada práctica agrícola de muy amplio uso mundial que busca básicamente eliminar parte de la biomasa foliar adherida a los tallos industrializables de la planta de caña, previa corta durante la etapa de cosecha de la materia prima que ira a molienda en el ingenio para extraer y fabricar azúcar comercial. Con la quema se busca facilitar, agilizar y dinamizar la cosecha en sus fases de corta, carga y transporte y abaratar adicionalmente los costos asociados con la cosecha de las plantaciones comerciales de caña, elevando con ello la rentabilidad de la actividad productiva, como lo han señalado con gran detalle Chaves y Bermúdez (2006), Chaves (2021h), Montenegro y Chaves (2021) y Hernández y López (2002).

Por medio de esta práctica se procura eliminar las hojas secas y verdes adheridas a los tallos que dificultan su corta, también los cogollos; lo cual, se ha encontrado sin embargo que liberan a la atmósfera moléculas precursoras de partículas ácidas que se pueden permanecer en suspensión en la atmósfera durante días y ser transportadas por el viento hacia localidades muy distantes, al margen de provocar problemas respiratorios. Se ha encontrado que la quema tiene vínculos y repercusiones directas con respecto al azufre y también con el nitrógeno; por cuanto la incineración (parcial o completa) del tejido vegetal provoca la pérdida por gasificación de cantidades importantes de esos dos elementos, principalmente.

En un estudio realizado por casi dos años por investigadores de la Universidad Estadual Paulista (Unesp) de Brasil, se encontró que, en Araraquara, municipio del Estado de São Paulo hubo cambios atmosféricos provocados por la quema en la composición del aire entre zafra y entrefra. Concluyeron los investigadores que la quema de la caña elevó hasta en un 40% la concentración de partículas muy finas en el aire, ricas en N, K y S, contenidas en los tejidos que antes nutrían a las plantas pero que con la quema se convierten en pérdidas netas. Paradójicamente, esos elementos llevados por el viento nutren campos vecinos favoreciendo y acelerando el crecimiento de las plantas (Alves 2005).

McClung *et al* (1959) encontraron que, en condiciones de quema simulada el 75% del S contenido en la materia seca de las gramíneas se perdió por volatilización y que el S remanente en las cenizas era fácilmente lixiviado y llevado a horizontes inferiores del perfil del suelo.

Flores *et al* (2016) estudiaron en México la relación entre el área cultivada y la producción de caña de azúcar, buscando explicar su comportamiento al interpretar las contribuciones del N y C liberados a la atmósfera por la quema de cañaverales asociados a eventos y parámetros meteorológicos involucrados en el flujo de agua entre el suelo y la atmósfera como sequía, evapotranspiración y lluvia.

Al finalizar la investigación expresaron, que “Los resultados muestran el incremento en las hectáreas cosechadas y la pérdida de agua del suelo por el aumento de los periodos de sequía y la evapotranspiración. Los nutrientes del suelo volatilizados, varían de $1,32 \times 10^5$ t a $2,17 \times 10^5$ t para C y $1,32 \times 10^3$ t a $2,17 \times 10^3$ t para N durante la quema de caña de azúcar, lo que afecta sus niveles de producción con valores que fluctúan entre 38 t/ha y 77 t/ha durante el periodo 1990-2010.” el efecto de las tecnologías de cosecha verde y cosecha quemada.”

Evaluando comparativamente dos sistemas de manejo de plantaciones de caña de la variedad CC 85-92 en Ecuador, propiamente el efecto de las tecnologías de cosecha manual en verde y quemada, García *et al* (2018) encontraron que los contenidos de Mg, S, Zn y Cu evidenciaron un incremento en los primeros meses en la caña quemada, el cual fue sin embargo disminuyendo a medida que transcurrió el tiempo.

En la caña cortada en verde los mismos se mantuvieron estables o incrementaron establemente; el Ca y el B presentaron cantidades homogéneas en ambos sistemas.

No encontraron diferencias significativa entre ambas modalidades de cosecha con respecto a la fertilidad química del suelo; habiendo sido afectados el contenido de K, el pH y el contenido de materia orgánica. En el sistema de cosecha verde se evidenció un aumento de la actividad biológica del suelo.

Expresa Chaves (1999b) en torno al tema, que “La quema es una práctica ecológicamente indeseable pero necesaria en el esquema de manejo actual de plantaciones comerciales de caña de azúcar, que induce pérdidas importantes de N y Azufre (S) por volatilización, producto de la incineración del material orgánico. Las pérdidas ocurren tanto sobre las plantaciones que se queman en pie como sobre la hojarasca residual (mulch) que permanece en el campo luego de efectuada la cosecha.

A diferencia de otros nutrimentos el N y el S no son depositados y reciclados al sistema en forma de sales, sino que se gasifican y volatilizan a la atmósfera. Esa situación obliga



a revisar y de ser necesario incrementar las dosis de N, en aquellas plantaciones donde se practica la quema durante la cosecha ya que es de esperar un mayor desequilibrio hacia el elemento."

A lo anterior debe virtud de lo comentado con anterioridad en relación al ciclo del azufre, las relaciones y los balances iónicos C: N: S prevalecientes en los sistemas agrícolas y sobre la pérdida neta de S provocada e inducida por la quema de biomasa, la imperiosa y casi obligada necesidad de incorporar S como medida correctiva y preventiva en los sistemas de manejo de caña de azúcar que mantienen vigente la quema como práctica habitual para realizar la cosecha de sus plantaciones comerciales. El tema debe ser abordado con mayor especificidad.

Ventajas comerciales

El S como nutrimento tiene a diferencia de otros elementos esenciales por su naturaleza, características y propiedades, la importante y determinante ventaja de que:

- a) El elemento puede ser adicionado tanto al suelo en forma granular y líquida, como también por la vía foliar.
- b) Puede ser agregado de forma directa al cultivo empleando formulaciones específicas de base azufrada.
- c) Puede incorporarse como elemento secundario complementado con otros nutrimentos importantes, tanto macro como nutrimentos, lo que no implica un aumento en los costos asociados.
- d) La adición como enmienda al suelo está comprobada y avalada virtud de



sus ventajas en suelos de condiciones especiales (Chaves 1988).

- e) No presenta problemas serios por toxicidad aun cuando adicionado en cantidades importantes.
- f) La planta de caña puede tolerar grandes cantidades de azufre, siempre y cuando no se encuentre como sulfuro de hidrógeno (H_2S), sulfato de hierro ($Fe_2(SO_4)_3$) y aluminio ($Al_2(SO_4)_3$), ya que puede inducir toxicidad en la planta.

Si se ponderan con justicia y equidad comercial esos incuestionables atributos técnicos, no hay duda en reconocer que el azufre es un elemento muy especial que demanda más atención y preferencia en su empleo en la fertilización de cultivos, en particular la caña de azúcar, pues los efectos agroindustriales son altamente satisfactorios como experimentalmente se ha demostrado.

Uso de yeso agrícola

En zonas tropicales como Costa Rica los suelos son de modo general, como apuntaran Chaves et al (1991), muy intemperizados favoreciendo bajos contenidos de Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ y Si, condiciones de alta acidez y la presencia de Al intercambiable; además de bajos contenidos de materia orgánica. Esta condición obliga si se pretende superar condiciones indeseables de estrés mineral y mantener índices de alta productividad agroindustrial y competitividad empresarial, la imperiosa e imprescindible necesidad de corregirlos, fertilizarlos y adecuarlos convenientemente (Chaves 2021b).

La evidencia pragmática ha demostrado con suficiencia, sin embargo, que los beneficios correctivos mediante el encalado y la fertilización de los suelos ácidos

alcanzan y se limitan a la camada superficial de incorporación (0-20 cm), la cual como señalara Chaves (1988), pareciera suficiente para satisfacer cultivos cuyo sistema radical es superficial; sin embargo, plantas como la caña de azúcar dotadas con un sistema de amplia exploración espacial tanto vertical como horizontal sufren consecuencias negativas en su crecimiento y desarrollo al mantener prácticamente inalteradas las camadas subsuperficiales del suelo. Esta situación se torna grave en los periodos secos cuando la planta requiere agua, y aún en los lluviosos, pues las raíces no pueden llegar a los horizontes no corregidos por los impedimentos y barrera química impuesta por el exceso de Al^{+3} y las deficiencias de Ca^{+2} , Mg^{+2} y K^+ , principalmente.

Ante esta realidad técnica de no poder atender y corregir con la capacidad y calidad necesarias las camadas internas ácidas del suelo, varias opciones tecnológicas de manejo han sido sugeridas, entre las que están: a) uso de variedades tolerantes a la acidez, b) aplicación de dosis elevadas de calcários, c) incorporación de los calcários en las camadas profundas y d) empleo de sales de calcio de reacción neutra como acontece con el yeso agrícola ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). El último método (d) ha tenido mucho auge y aplicabilidad virtud de su eficacia y bajo costo asociado, siendo una opción técnico-económica accesible para manejar y corregir la acidez del suelo en profundidad en el caso de la caña de azúcar.

Queda por tanto evidenciado que el S puede ser empleado como fertilizante y acondicionador de acidez. Importante dejar constancia que el yeso no constituye un corrector de acidez propiamente dicho por no poseer una base química fuerte; actuando más por movilización del Ca hacia el interior del suelo, favorecer el intercambio iónico y luego la neutralización del Al^{+3} en la solución del suelo, como lo detallaran Chaves (1988, 1991) y Chaves et al (1991).

Si bien conceptualmente se distingue y hasta marca diferencia teórico-pragmática entre la práctica habitual de fertilizar las plantaciones comerciales con S, respecto de la corrección química de los suelos orientada a mejorar la condición fisicoquímica del mismo; acontece que en casos especiales y particulares pudiera ser necesario tener que atender y cubrir ambas limitantes de fertilidad. La utilización de yeso agrícola en suelos cumple varios objetivos diferentes: proveer Ca y S a los cultivos; incrementar la concentración de Ca en profundidad en el perfil; reducir la actividad de Al^{3+} en las capas sub-superficiales y aumentar la eficiencia de uso de los nutrimentos.

En algunos sistemas agroproductivos de caña de azúcar, se utiliza la aplicación conjunta de yeso agrícola y carbonatos, como lo revelan numerosos investigadores mencionados por Chaves (1988). En Brasil el uso del denominado fosfoyeso derivado como subproducto de la producción de fertilizantes fosfatados es muy importante. Dicho producto se obtiene a partir del ácido fosfórico utilizado en la fabricación de Superfosfato triple y Fosfatos de amonio (DAP, MAP), que tienen en su composición 26-28% de óxido de calcio (CaO) y 15-16% de azufre (S), razón por la cual se emplea en la agricultura como proveedor de Ca y S.

El yeso agrícola ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) además de constituir una fuente azufrada muy utilizada en el acondicionamiento y mejoramiento de suelos y en la fertilización de cultivos, se le considera la principal enmienda de efectos positivos y efectivos en corrección química de suelos sódicos; esto pese a no ser un corrector de acidez. De igual manera, en sistemas de producción donde se realiza aplicación sistemática y constante de carbonatos (prácticamente insolubles en agua), la aplicación de yeso agrícola mejora la eficiencia de la enmienda calcárea, debido al efecto provocado en la solubilización del calcio (Ca) y la mayor movilidad que poseen

los sulfatos en el perfil del suelo. El yeso agrícola además de proveer S, aporta Ca soluble que mejora la condición físico química de los suelos sódicos o con alto contenido salino; como así también suelos ácidos y/o acidificados por el manejo agrícola. En el caso particular de Costa Rica el cultivo de caña de azúcar en suelos de condiciones sódicas es prácticamente inexistente, y los de influencia salina son muy escasos, lo cual no exime algún efecto detrimental de esa condición sobre los índices de productividad agroindustrial, lo cual está muy ligado a las características de los materiales genéticos empleados, como lo demostraron Montes de Oca et al (1996ab).

Debido a su carga negativa, el SO_4^{2-} no es atraído ni retenido (adsorbido) por las arcillas del suelo y los coloides orgánicos, excepto en ciertas condiciones; motivo por el cual el anión se mantiene disuelto en la solución del suelo y moviliza con el flujo del agua en el perfil, por lo cual se puede fácilmente lixiviar, lo cual constituye una gran desventaja en el uso de sulfatos durante la fertilización en zonas con altos niveles de precipitación. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que las lluvias depositan en el suelo gran parte del S que se encuentra en la atmósfera como dióxido de azufre (SO_2) procedente de la combustión de combustibles fósiles, agroquímicos y quema de materiales biomásicos, lo que permite que las plantas lo asimilen y satisfagan parcialmente sus necesidades. Esa particularidad de no ser retenido en el suelo por su carga negativa, facilita su movilización arrastrando al Ca a los horizontes interiores del perfil donde ejerce su función de intercambio y neutralización.

Parte de la explicación que justifica la acción tan especial y particular del yeso agrícola de profundizar a capas internas y ejercer su acción, fue fundamentada por Chaves et al (1991) y Chaves (1988, 1991) en circunstancias asociadas con su grado de solubilidad. Aseguran esos autores al respecto

al comparar productos, que *“El $CaCO_3$ (calcita natural) tiene una solubilidad de 0,14 mM y el $MgCO_3$ (magnesita natural), de 1,26 mM, por lo tanto, nueve veces mayor; de todas formas, ambas formas químicas son muy poco solubles. El yeso natural ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) tiene una solubilidad de 14,01 mM, por lo tanto 11,1 veces mayor que la magnesita y 100 veces mayor que la calcita natural, aspectos que influyen, significativamente, en la magnitud de la disolución de esos compuestos, la cual será menor cuanto más concentrada en calcio estuviera la solución del suelo, ...”*

Se infiere de lo anterior que el movimiento del Ca en el suelo cuando aplicado como $CaCO_3$ o $Ca(OH)_2$ es muy lento, requiriendo plazos de reacción relativamente largos, adición de dosis elevadas, incorporación profunda del correctivo, existencia de regímenes pluviométricos o de irrigación altos, presencia de texturas gruesas o suelos bien estructurados para que eso suceda con mayor velocidad. La baja movilidad del ión Ca hace necesaria y obligada su presencia en la zona radicular para lograr su rápida y efectiva absorción.

El yeso favorece y promueve la reducción del grado de saturación y toxicidad del Al^{3+} provocada por la polimerización del Al en el suelo, inducida por el sulfato, a una reacción

de intercambio iónico con grupos OH^- de la superficie de los óxidos; o a la posible formación del complejo soluble $AlSO_4^+$ con lo cual la acción o actividad del ión Al^{3+} en la solución del suelo es disminuida. Una vez en solución, el Al^{3+} sufre hidrólisis y precipitación en forma de $Al(OH)_3$. Asimismo, como reportaran y concluyeran Chaves (1988) y Chaves et al (1991) en su estudio “Las plantas parecieron regular la absorción y acumulo de S, independientemente de las concentraciones de ese nutrimento presentes en el suelo.” Esa aseveración explica por qué aun incorporando cantidades importantes de S al suelo, no se dan problemas de toxicidad como si ocurre con otros elementos.

Conclusión

El enorme reto e ineludible desafío tecnológico, empresarial e institucional de procurar incrementar y optimizar el rendimiento agrícola de las plantaciones de caña de azúcar y maximizar adicionalmente el contenido de azúcar concentrado en los tallos industrializables de la planta, requiere necesariamente entender en primera instancia la importancia que tiene conocer la demanda nutricional del cultivo por los nutrimentos esenciales, para así poder



establecer con criterio técnico sustentable un programa razonable y justo de suministro equilibrado y rentable de nutrientes a las plantaciones comerciales.

Históricamente la comprensión de la nutrición de la caña de azúcar interpretada en forma integral y holística y no apenas parcial y aislada, ha sido estratégica para el diseño, desarrollo e implementación de planes y programas nutricionales visionarios, realistas y sustentables en el tiempo; entendiendo en este caso la sustentabilidad como la optimización de la productividad agrícola e industrial y la rentabilidad para el productor-empresario, sin perder de perspectiva los aspectos vinculados con la calidad de la materia prima, el mantenimiento y/o mejora de la fertilidad del suelo, minimizando y mitigando los efectos e impactos detrimentales que puedan eventualmente sufrir el ambiente y el ecosistema, todo en un entorno de ecoeficiencia y ecocompetitividad plena.

Puede a partir de esto concluirse, que la fertilización bien concebida, planificada y ejecutada constituye una práctica cultural de gran importancia y trascendencia para maximizar la productividad agroindustrial de un cañaveral, lo cual debe imperativa e insoslayablemente compatibilizar los criterios técnico, productivo, económico, ambiental y de sustentabilidad que asegure la rentabilidad del cultivo en el largo plazo.

La fertilización azufrada es una práctica nutricional que podría considerarse aún poco reconocida y menos utilizada en los sistemas de producción tradicional de caña de azúcar en Costa Rica, no así en los modernos bien estructurados, constituyendo por ello el S un nutriente relegado y limitante para procurar optimizar la nutrición integral y balanceada, y con ello, pretender optimizar y maximizar el rendimiento agroindustrial del cultivo. Su adición esta postergada y condicionada a satisfacer en primera instancia los requerimientos por N, fósforo

(P) y el potasio (K), estando más asociada a lo que la fórmula comercial empleada (simple o compleja) incorpore del elemento de manera complementaria; y muy pocas veces a una adición asociada con necesidades validadas por muestreo (suelo, foliar) y demanda particular de la planta. Dicho de otra manera, el S se aplica de acuerdo con las cantidades (kg/ha) y fórmulas empleadas para incorporar N-P-K, principalmente; muy pocas veces de manera particular.

La abundante información expuesta y comentada anteriormente en torno a la importancia y benevolencia agroproductiva del S como nutriente esencial para la caña de azúcar, demuestra que la corrección combinada y balanceada del mismo respecto a otros nutrientes también esenciales, permite mejorar ostensiblemente la eficiencia de los fertilizantes comerciales, optimizando su empleo técnico y rentabilidad económica; logrando además que los cultivares de caña seleccionados y recomendados maximicen y expresen todo su potencial de productividad agroindustrial.

Es definitivo e inexcusable comprender y reconocer que para pretender maximizar la productividad agrícola e industrial del cultivo de la caña, es necesario diseñar y operar programas nutricionales integrales, que consideren las demandas del cultivo y los aportes suficientes y balanceados de los 14 macro y micronutrientes involucrados (exceptúan C, H y O) en su ciclo vegetativo de desarrollo, sus vínculos e interacciones con el clima y la química y la física del suelo; como también con la representatividad y eficiencia de las prácticas agronómicas empleadas en su implementación. La visión debe ser holística y completa y no fragmentada y parcializada apenas hacia algunos nutrientes preferenciales, como lamentablemente ocurre en la práctica de campo.

Como se ha comprobado, la deficiencia de S en los suelos cañeros nacionales se

está convirtiendo en un factor que limita los aumentos en la producción, motivo por el cual debe estimularse la demanda por parte de los agricultores de fertilizantes azufrados, incitando a la industria de los fertilizantes a desarrollar nuevas tecnologías innovadoras para asegurar un uso más eficiente de estos y otros nuevos productos para este interesante mercado potencial. Los fertilizantes comerciales con contenido sulfatado más populares por su uso son sulfato de amonio, superfosfato simple (SSP), sulfato de potasio, sulfato de potasio y magnesio y la urea azufrada por nombrar algunos; existiendo la posibilidad de incorporarlo también como enmienda al suelo. Este tipo de fertilizante se diferencia de los que contienen S en su forma elemental, en que estos proporcionan sulfato inmediatamente para la absorción por la planta, en cambio los otros necesitan superar un proceso oxidativo para quedar biodisponibles.

El correcto y tecnificado manejo nutricional de las plantaciones comerciales representa sin lugar a duda uno de los factores controlables y manipulables fundamentales para optimizar y consolidar la operación y el resultado de un sistema eficiente, rentable, sostenible y eco-competitivo de producción comercial de caña de azúcar. Sin embargo, a nivel técnico-administrativo y empresarial, la fertilización representa en muchos casos apenas un factor tecnológico más entre otros, que debe ser incorporada casi por tradición y sin criterio técnico dentro del proceso habitual de manejo del cultivo.

Esta circunstancia poco deseable obliga para que la utilización apropiada de esta valiosa e incuestionable herramienta tecnológica impacte favorablemente en los resultados técnico-económicos del productor-empresario, diseñar, establecer, formalizar y consolidar un proceso serio y bien formulado de planificación y programación de la producción, dentro del cual se deberá definir un plan de fertilización acorde con las necesidades, los potenciales y también

con las expectativas planteadas como meta empresarial.

Es definitivo que el uso prudente y racional del azufre incorporado e integrado en un programa nutricional completo, bien planificado e implementado con todas las herramientas de ayuda necesarias para la toma de decisiones correcta y oportuna, contribuye ostensiblemente a elevar y optimizar los rendimientos agrícolas e industriales y la rentabilidad en el cultivo de la caña de azúcar. La adopción y ejecución de las mejores prácticas de manejo agronómico en este proceso de toma de decisiones, proporciona la base para el desarrollo de una agricultura responsable, ecoeficiente y apegada a criterios alineados con la agricultura de precisión. El cultivo de caña de azúcar posee altos requerimientos y demanda por nutrientes esenciales y el S es incuestionablemente uno de los elementos secundarios que requieren mucha atención y cuidado como factor importante y determinante para pretender aspirar a mejorar los rendimientos agroindustriales (Chaves 1986, 2022a). El valor y la importancia incuestionable del azufre como elemento esencial debe ser restituida, reconocida, posicionada y priorizada en su dimensión nutricional, considerándolo e incluyéndolo en los programas de fertilización comercial de las plantaciones de caña de azúcar.

Como corolario para cerrar el tema cabe rescatar y reiterar lo anotado por FAO (2002) al señalar, que *“Los fertilizantes son una de las más importantes herramientas para el desarrollo de la agricultura tendiente a fomentar la seguridad alimentaria y mantener la productividad del suelo. Mediante sus esfuerzos, su interés y entusiasmo, usted puede realizar un verdadero cambio mediante la introducción y expansión del uso de fertilizantes. Es su responsabilidad y un desafío para usted ayudar a mejorar las condiciones de vida en su región, y ayudar a mantener una agricultura sostenible.”*



Literatura citada

- Aburto, J.J. 1987. *Oxidation of agricultural sulphur by two species of Thiobacillus*. Thesis of Master of Science in Agronomy. New Mexico State University. Las Cruces, New Mexico. 71 p.
- Alcántar González, G.; Trejo Téllez, L.I. 2013. Capítulo 2. *Elementos esenciales*. En: Nutrición de Cultivos. 1ª edición. Coordinadores Gabriel Alcántar González y Libia I. Trejo-Téllez. México. Universidad Autónoma de Chapingo. Editorial Colegio de Postgraduados. p: 8-47.
- Alexander, A. 1986. *Optimum timing of foliar nutrient sprays*. In: Foliar fertilization. Editor A. Alexander. Developments in Plant and Soil Sciences. Martinus Nijhoff Publishers. The Netherlands. p: 44-60.
- Alvarado H., A.; Bertsch H., F.; Bornemisza S., E.; Cabalceta A., G.; Forsythe H., W.; Henríquez H., C.; Mata Ch., R.; Molina R., E.; Salas C., R. 2001. *Manejo de Azufre y Acidez*. En: Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. 1ª ed. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). 112 p.
- Alvarado, A.; Mata, R.; Chinchilla, M. 2014. *Arcillas identificadas en suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el período 1931-2014: II. Mineralogía de arcillas en suelos con características vérticas y oxídico caoliniticas*. Agronomía Costarricense 38(1): 107-131.
- Alves Cardoso, A. 2005. *Ganhos e perdas da queima da cana*. Pesquisa FAPESP N° 118, dezembro. p: 33. <https://revistapesquisa.fapesp.br/es/ganancias-y-pérdidas-ocasionadas-por-la-quema-de-la-caña-de-azúcar/>
- Anderson, G. 1975. *Sulfur in soil organic substances*. In: Soil Components. Vol. I. Organic components J.E. Gieseking (ed.), Springer, N.Y., USA. p: 333-341.
- 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 M., A.; Chaves S., M. A.; Guzmán S., G. 1993a. *Evaluación del efecto de siete dosis crecientes de Azufre sobre los rendimientos agroindustriales de la caña de azúcar, ciclo planta, en un Inceptisol de Cañas, Guanacaste*. En: Participación de DIECA en el IX Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, octubre. p: 147. También en: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 9, San José, Costa Rica, 1993. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, octubre. Volumen II (1):29.

Angulo M., A.; Chaves S., M. A.; Guzmán S., G. 1993b. *Estudio preliminar sobre el efecto de la adición al suelo de Azufre y Zinc, sobre los rendimientos agroindustriales de la caña de azúcar, ciclo planta, en un Inceptisol de Guanacaste*. En: Participación de DIECA en el IX Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, octubre. p: 149.

Angulo, A.; Chaves, M.; Guzmán, G. 1996a. *Efecto de la forma de colocación de tres fuentes de fertilizante nitrogenado sobre los rendimientos agroindustriales de la caña de azúcar, promedio de cuatro cosechas, en un Inceptisol de Cañas, Guanacaste*. 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 III. p: 154. También en: Congreso de ATACORI "Cámara de Productores de Caña del Pacífico", 10, Hotel Sol Playa Hermosa, Guanacaste, Costa Rica, 1996. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica, setiembre. p: 30.

Angulo, A.; Chaves, M.; Guzmán, G. 1996b. *Efecto de siete dosis de Azufre sobre los rendimientos agroindustriales de la caña de azúcar, promedio de cuatro cortes, en un Inceptisol de Cañas, Guanacaste*. 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 III. p: 157. También en: Congreso de ATACORI "Cámara de Productores de Caña del Pacífico", 10, Hotel Sol Playa Hermosa, Guanacaste, Costa Rica, 1996. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica, setiembre. p: 28-29.

Angulo, A.; Chaves, M.; Guzmán, G. 1996c. *Estudio preliminar del efecto de la adición al suelo de Azufre y Zinc, sobre los rendimientos agroindustriales de la caña de azúcar, promedio de cuatro cosechas, en un Inceptisol de Cañas, Guanacaste*. 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 III. p: 158. También en: Congreso de ATACORI "Cámara de Productores de Caña del Pacífico", 10, Hotel Sol Playa Hermosa, Guanacaste, Costa Rica, 1996. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica, setiembre. p: 28.

Angulo Marchena, A.; Chaves S., M.; Guzmán S., G. 2006. *Fertilización foliar con Boro y Zinc en caña de azúcar, efecto sobre los rendimientos agroindustriales*. Promedio de tres cosechas. Cañas, Guanacaste. En: Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 16, Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 16. Heredia, Costa Rica, 2006. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), agosto. Tomo II. p: 819-825.

Arias, E.; Chaves, M. 1986. *Efecto de cuatro dosis de Azufre sobre los rendimientos agroindustriales de la caña de azúcar en Grecia, Alajuela, promedio de 2 cortes*. En: Congreso Agronómico Nacional, 7 y Congreso de Horticultura ASHS-Región Tropical, 33, Heredia, Costa Rica, 1986. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Sociedad Americana de Ciencias Hortícolas Región Tropical-ASHS, CATIE y W.K. Kellogg, Julio-agosto. Volumen I. p: 104-105.

Barrantes, J.C.; Mesén, R.; Chaves, M. 1996. *Respuesta de la caña de azúcar a la aplicación de seis dosis de azufre en un Ultisol de Pérez Zeledón, promedio de dos cosechas*. 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 III. p: 160. También en: Congreso de ATACORI "Cámara de Productores de Caña del Pacífico", 10, Hotel Sol Playa Hermosa, Guanacaste, Costa Rica, 1996. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica, setiembre. p: 38-39.

Barrantes, J.C.; Chaves, M. 1999a. *Respuesta de la caña de azúcar a la aplicación de seis dosis crecientes de Azufre en un Ultisol de Pérez Zeledón, promedio de 3 cosechas*. 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: 348. También en: Participación de DIECA en el XI Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, julio 1999. p: 169. También en: Congreso de ATACORI "Randall E. Mora A.", 13, Guanacaste, Costa Rica, 1999. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica, setiembre. p: 97-98.

Barrantes, J.C.; Chaves, M. 1999b. *Efecto del Zinc aplicado al suelo y foliar, sobre la producción agroindustrial de la variedad de caña azúcar SP 71-5574 en un Ultisol de Pérez Zeledón*. Promedio de dos cosechas. 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: 350. También en: Participación de DIECA en el XI Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, julio 1999. p: 171. También en: Congreso de ATACORI "Randall E. Mora A.", 13, Guanacaste, Costa Rica, 1999. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica, setiembre. p: 99-100.

Barrantes, J.C.; Chaves, M. 2000. *Respuesta de la Caña de Azúcar a la Aplicación de Seis Dosis Crecientes de Azufre en un Ultisol de Pérez Zeledón, Promedio de Tres Cosechas*. En: Congreso de ATALAC, 5, Congreso ATACA, 13 y Congreso ATACORI, 14, Heredia, Costa Rica, setiembre del 2000. Poster. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica. Volumen 2. p: 97-98.

Barrantes, J.C.; Chaves S., M. 2003. *Efecto de seis fuentes nitrogenadas sobre la producción agroindustrial de caña de azúcar (Saccharum spp), en un Ultisol de Pérez Zeledón, Costa Rica*. Promedio de 4 cosechas. 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: 299-304.

Barrantes Mora, J.C.; Chaves Solera, M.A.; Fallas Fernández, E. 2004. *Justificación técnica para la recomendación de la fórmula 17-0-25-5-0-1,4 (Zn)-6,8 (SO4) en los programas de fertilización de la caña de azúcar, Región Sur. Pérez Zeledón, Costa Rica*. LAICA-DIECA, febrero. Presentación Electrónica en Power Point. 30 Láminas.

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.

Bornemisza Steiner, E. 1990. *Problemas del azufre en suelos y cultivos de Mesoamérica*. San José, Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. 104 p.

Calcino, D.; Kingston, G.; Haysom, M. 2000. *Nutrition of the Plant*. Chapter 9. In: Manual of Canegrowing. Edited by Hogarth and Peter Allsopp. Brisbane, Australia. Bureau of Sugar Experiment Stations. p: 153-193.

Calderón Araya, G.; Chaves S., M. 2006. *Evaluación de siete fuentes de Nitrógeno sobre la producción agroindustrial de la caña de azúcar, variedad B 77-95, en un Ultisol de Florencia, Turrialba*. Promedio de dos cosechas. En: Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 16, Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 16. Heredia, Costa Rica, 2006. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), agosto. Tomo II. p: 782-785.

Chaves Solera, M.A.; Salazar Q., J.; Arrea S., M. 1985. *Respuesta de la caña de azúcar a dosis crecientes de Magnesio - Azufre en Juan Viñas, Costa Rica*. Caña planta. En: Congreso de Tecnología Azucarera de Centroamérica y Panamá, 6 y Simposio Nacional de Caña de Azúcar, 3, Ciudad Guatemala, Guatemala, 1985. Memorias. Guatemala, Asociación de Técnicos Azucareros de Guatemala, setiembre. Volumen Campo. p: 601-623. También en: Revista Guatemala 85'. VI Congreso de Tecnología Azucarera de Centro América y Panamá. Guatemala, setiembre, 1985. p: 35.

Chaves, M.; Salazar, J.; Arrea, M. 1986. *Respuesta de la caña de azúcar a dosis crecientes de Magnesio - Azufre en Juan Viñas, Costa Rica, caña planta*. En: Congreso Agronómico Nacional, 7 y Congreso de Horticultura ASHS-Región Tropical, 33, Heredia, Costa Rica, 1986. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Sociedad Americana de Ciencias Hortícolas Región Tropical-ASHS, CATIE y W.K. Kellogg, julio-agosto. p: 112-113.

Chaves, M.; Salazar, J. 1986. *Respuesta de la caña de azúcar en primer retoño, cultivar "Pindar", a la incorporación de Azufre en Juan Viñas, Cartago*. En: Congreso Agronómico Nacional, 7 y Congreso de Horticultura ASHS-Región Tropical, 33, Heredia, Costa Rica, 1986. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Sociedad Americana de Ciencias Hortícolas Región Tropical-ASHS, CATIE y W.K. Kellogg, julio-agosto. p: 122-123.

- Chaves Solera, M.A. 1986. *Requerimientos, extracción y remoción de nutrimentos por la caña de azúcar*. Boletín Informativo DIECA (Costa Rica) Año 4, Nº 29, San José. p: 1-2.
- 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.; Ribeiro, A.C.; Álvarez V., V.H.; De Felipo, B.V.; Novais De, R.F. 1991. *Efecto de relaciones Ca:Mg, utilizando Carbonatos y Sulfatos, sobre el crecimiento y la nutrición mineral de la caña de azúcar*. En: Congreso Tecnológico de la Caña de Azúcar, 3, San José, Costa Rica, 1989. Memorias. San José, LAICA-DIECA. p: 159-200.
- 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.; Alvarado H., A. 1994. *Manejo de la fertilización en plantaciones de caña de azúcar (Saccharum spp) en Andisoles de ladera de Costa Rica*. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, julio. 41 p. También en: Memorias. 15th World Congress of Soil Science. International Society of Soil Science (ISSS). Acapulco, México, del 11 al 15 de julio de 1994. Volumen 7a. p: 353-372.
- Chaves Solera, M.A. 1994. *Lluvia ácida: un enemigo implacable*. Revista del Colegio de Ingenieros Agrónomos (Costa Rica) Nº 17. p: 5-6.
- Chaves, M. 1999a. *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. 1999b. *El Nitrógeno, Fósforo y Potasio en la caña de azúcar*. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, setiembre. 130 p.
- 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: 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 S., M.; Barrantes M., J.C. 2003. *Efecto del Zinc aplicado al suelo y foliar, sobre la producción agroindustrial de la variedad de caña de azúcar SP 71-5574 en un Ultisol de Pérez Zeledón*. Promedio de cuatro cosechas. 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: 289-294.

- Chaves Solera, M.; Bermúdez Loría, A.Z. 2006. *Motivos y razones para quemar las plantaciones de caña de azúcar en Costa Rica*. En: Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 16, Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 16. Heredia, Costa Rica, 2006. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), agosto. Tomo I. p: 248-253. También en: Revista PROCAÑA, Asociación de Productores de Caña de Azúcar de El Salvador. 2016. Edición Especial Año 5, Volumen 13, páginas 34-36.
- Chaves Solera, M.; Barrantes Mora, J.C. 2007. *Nutrición de la caña de azúcar en la zona sur de Costa Rica: experiencias continuadas durante el periodo 1986-2006*. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, setiembre. 30 p.
- Chaves Solera, M. 2012a. *Relaciones catiónicas y su importancia para la agricultura*. Revista Especializada Ventana Lechera, Dos Pinos. Fertilización: Práctica para mejorar la calidad y producción de forraje. San José, Costa Rica. Edición Nº 18, Año 6, febrero 2012. p: 10-20.
- Chaves Solera, M. 2012b. *Comparativo de la fertilización aplicada a las plantaciones comerciales de caña de azúcar en Costa Rica*. En: Congreso Tecnológico DIECA 2012, 5, Coopevictoria, Grecia, Alajuela, Costa Rica. Memoria. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), 5, 6 y 7 de setiembre del 2012. 30 p.
- Chaves Solera, M.A. 2015. *Errores y omisiones técnico-administrativas que sacrifican productividad y cuestan dinero en la agroindustria azucarera*. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, febrero. 16 p.
- Chaves Solera, M.A. 2016a. *Estudio de 9 fuentes de Nitrógeno realizados en 6 regiones productoras de caña de azúcar de Costa Rica: compendio de resultados*. Liberia, Guanacaste, Costa Rica, abril. Presentación Electrónica en Power Point. 107 Láminas.
- Chaves Solera, M.A. 2016b. *Resultados de investigación con el uso del Nitrógeno en la caña de azúcar en Costa Rica*. En: Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Latinoamérica y El Caribe (ATALAC), 10, y Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de México (ATAM), 38. Memoria Digital y Resúmenes. Setiembre 2016, Veracruz, México. 26 p.
- Chaves Solera, M.A. 2016c. *El Nitrógeno como factor de productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica*. En: Congreso Nacional Agropecuario, Forestal y ambiental, 14, Centro de Conferencias del Hotel Wyndham Herradura, Heredia, Costa Rica, 2016. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Colegio de Ingenieros Agrónomos de Costa Rica, octubre 27 al 29. 9 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, MA. 2019. *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. 2020. *Ambientes climáticos y producción competitiva de la caña de azúcar en Costa Rica*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(26): 5-12, diciembre-enero.

Chaves Solera, M.A. 2021a. *Principios generales de la nutrición y fertilización de cultivos*. San José, Costa Rica. Presentada en evento organizado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de la Región de Desarrollo Brunca, San Isidro de El General, con motivo de celebrar la “Jornada Agropecuaria Virtual”, mayo. Presentación Electrónica en Power Point. 80 láminas.

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

Chaves Solera, M.A. 2021c. *Factores que intervienen y modifican la eficiencia y efectividad de la fertilización y los fertilizantes nitrogenados en la caña de azúcar*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(13): 5-20, junio.

Chaves Solera, M.A. 2021d. *Aluminio: un elemento contraproducente para la productividad y rentabilidad de la caña de azúcar*. Revista Entre Cañeros N° 21. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, septiembre. p: 5-45.

Chaves Solera, M.A. 2021e. *Fertilizantes de liberación controlada, lenta y estabilizados para uso en la caña de azúcar*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(25): 6-23, noviembre-diciembre.

Chaves Solera, M.A. 2021f. *Sugerencias y recomendaciones para el uso óptimo de fertilizantes en la caña de azúcar*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(26): 8- 23, diciembre.

Chaves Solera, M.A. 2021g. *Fertilización foliar en caña de azúcar: concepto, principios y práctica*. Revista Entre Cañeros N° 22. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, diciembre. p: 65-125.

Chaves Solera, M.A. 2021h. *Cuidados y prevenciones con la quema de plantaciones de caña de azúcar*. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(3): 5-14, febrero.

Chaves Solera, M.A. 2022a. *Esencialidad nutricional y fertilización de los cultivos agrícolas*. Revista Entre Cañeros N° 23. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, marzo. p: 5-41.

Chaves Solera, M.A. 2022b. *Función y funcionalidad nutricional: orientado a la caña de azúcar*. Revista Entre Cañeros N° 24. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, setiembre.

Cuellar Ayala, I.A.; Villegas delgado, R.; León Ortiz de, M.E.; Pérez Iglesias, H. 2002. *Manual de Fertilización de la Caña de Azúcar en Cuba*. La Habana, Cuba. Editorial PUBLINICA. 127 p.

DIECA. 1991. *Nutrición, Fertilización y Enmiendas*. En: INFORME ANUAL DE LABORES 1990. San José, Costa Rica, LAICA-DIECA. p: 85-120.

DIECA. 1992. *Nutrición, Fertilización y Enmiendas*. En: INFORME ANUAL DE LABORES 1991. San José, Costa Rica, LAICA-DIECA. p: 113-147.

DIECA. 1994. *Nutrición, Fertilización y Enmiendas*. En: INFORME ANUAL DE LABORES 1993. San José, Costa Rica, LAICA-DIECA. p: 119-148.



- DIECA. 1995. *Nutrición, Fertilización y Enmiendas*. En: INFORME ANUAL DE LABORES 1994. San José, Costa Rica, LAICA-DIECA. p: 106-165.
- DIECA. 1997. *Nutrición, Fertilización y Enmiendas*. En: INFORME ANUAL DE LABORES 1996. San José, Costa Rica, LAICA-DIECA. p: 120-182.
- DIECA. 2015. *Resultado de las investigaciones ejecutadas por el programa de agronomía en el cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica durante el año 2014*. Grecia, Costa Rica. DIECA-LAICA. Mayo. 90 p.
- DIECA. 2016. *Resultado de las investigaciones ejecutadas por el programa de agronomía en el cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica durante el año 2015*. Grecia, Costa Rica. DIECA-LAICA. Marzo. 90 p.
- Dijkshoorn, W., Van Winjk, A.L. 1967. *The sulphur requirements of plants as evidenced by the sulphur-nitrogen ratio in the organic matter*. Plant and Soil, 26 (1): 129-157.
- 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.
- FAO. Land and Water Division. 2002. *Los fertilizantes y su uso. Asociación Internacional de la Industria de los fertilizantes (IFA)*. 86 p. <https://www.fao.org/documents/card/es>
- Fassbender, H.W.; Bornemisza, E. 1994. Capítulo 9. *Azufre*. En: Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina. Hans W. Fassbender y Elemer Bornemisza. 2ª. Ed. Rev. San José, CR: IICA. p: 313-325.
- Flores Jiménez, D.E.; Algara Siller, M.; Aguilar Rivera, N.; Carbajal, N.; Aldama Aguilera, C.; Ávila Galarza, A.; Álvarez-Fuentes, G. 2016. *Influence of sugarcane burning on soil carbon and nitrogen release under drought and evapotranspiration conditions in a Mexican sugarcane supply zone*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 32 (2) 177-189.
- García, Y.; Vega, A.; Castro, R. 2018. *Efecto de dos sistemas de cosecha de la caña de azúcar sobre la calidad del suelo en Cantón Milagro, Ecuador*. Acta Agrícola y Pecuaria 4 (2): 60-68 mayo-agosto.
- Gebhardt, H.; Coleman, N.T. 1974. *Anion adsorption by allophanic soils*. II. Sulfate adsorption. Soil Science Society of America, Proceedings 38: 259-262.
- Goh, K.M.; Kee, K.K. 1978. *Effects of nitrogen and sulphur fertilization on the digestibility and chemical composition of perennial ryegrass (Lolium perenne L.)*. Plant and Soil, 50: 161-177.
- Hernández Valencia I.; López Hernández D. 2002. *Pérdida de nutrimentos por la quema de vegetación en una sabana de Trachypogon*. Rev. Biol. Trop. 50, 3-4.

- Kanwar, J.S.; Mudahar, M.S. 1983. *Fertilizer sulfur and food production-research and policy implications of tropical countries*. Muscle Shoals, International Fertilizer Development Center. Technical Bulletin IFDC-T, 27. 19 p.
- Kingston, G. 2014. *Mineral Nutrition of Sugarcane*. In: Chapter 5. SUGARCANE: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology. Edited by Paul H. Moore, Frederick C. Botha. New York: Ed John Wiley & Sons, Inc. Iowa USA. p: 85-120.
- Malavolta, E. 1982. *Potássio, Magnésio e Enxofre nos Solos e Culturas Brasileiras*. 3ª edição. Piracicaba, São Paulo. Instituto da Potassa & Fosfato (EUA), Instituto International da Potassa (Suíça). Boletim Técnico 4, setembro. 91 p.
- Malavolta, E. 1986. *Efeitos de doses e fontes de enxofre em culturas de interesse econômico*. IV. Café. São Paulo: SN Centro de Pesquisa e Promoção de Sulfato de Amônio. Boletim Técnico N° 4, agosto. 41 p.
- Malavolta, E. 2006. *Manual de Nutrição Mineral de Plantas*. São Paulo. Editora Agronômica Ceres Ltda. 631 p.
- Maldonado, J.M. 2008. Capítulo 15. *Asimilación del nitrógeno y del azufre*. En: Fundamentos de Fisiología Vegetal. 2ed. Madrid, España, McGraw-Hill. p: 287-303.
- Marschner, H. 1986. *Mineral nutrition of higher plants*. London, Academic Press, Inc. 674 p.
- Mengel, K.; Kirkby, E. A. 2000. *Los Nutrientes de las Plantas*. En: Principios de Nutrición Vegetal. Traducción de 4a edición (1987). Basel, Switzerland, International Potash Institute. p: 11-24.
- Mc Clung, A.C.; Freitas, M.M; Lott, W.L. 1959. *Analyses of several Brazilian soils in relation to plant responses to sulfur*. Proceedings Soil Science Society of America 23: 221-224.
- McNaught, K.N.; Christoffels, P.J.E. 1961. *Effect of sulphur deficiency on sulphur and nitrogen levels in pastures and lucerne*. New Zealand Journal of Agricultural Research, Wellington 4: 177-185.
- 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.
- Montes De Oca, P.; Mata, R.; Chaves, M.A. 1996a. *Estudios de salinidad, en la provincia de Guanacaste (Costa Rica) y caracterización de algunos suelos con Influencia salina*. Agronomía Mesoamericana 7(2):77-83.
- Montes De Oca, P.; Mata, R.; Chaves, M.A. 1996b. *Respuesta de tres variedades de caña de azúcar (Saccharum spp) a tres contenidos de sal en un Vertisol de Guanacaste*. En:

- Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 10, San José, Costa Rica, 1996. Memoria: Suelos. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Asociación Costarricense de Fitopatología y Asociación Costarricense de Suelos: EUNED, EUNA. Volumen III. p: 240. También en: Agronomía Costarricense 20(2): 135-140.
- Montenegro Ballesteros, J.; Chaves Solera, M. 2021. *Efecto de la quema en caña de azúcar sobre el Carbono de un Andisol*. Revista Alcances Tecnológicos INTA (Costa Rica) 14(1):31-48.
- Pearson, R.W.; Abruña, F.; Chandler, V.J. 1961. *Effect of lime and nitrogen applications on downward movement of calcium and magnesium in two humid tropical soils of Puerto Rico*. Soil Science 93: 77-82.
- Penatti, C.P. 2013. *Adubação da Cana de Açúcar*. 30 anos de experiência. 1ª edição. São Paulo, Brasil. Ottoni Editora. 347 p.
- Pumphrey, F.V.; Moore, D.P. 1965. *Diagnosing sulfur deficiency of alfalfa from plants analysis*. Agronomy Journal, Madison 57:364-366.
- Quintero Durán, R. 1995. *Fertilización y nutrición*. En: CENICAÑA. El cultivo de la caña de azúcar en la zona azucarera de Colombia. Editores Clímaco Cassalet Dávila, Jorge Torres Aguas y Camilo Isaacs Echeverri. Cali, CENICAÑA. p: 153-177.
- Randall, P.J.; Spencer, K.; Freney, J.R. 1981. *Sulfur and nitrogen fertilizer effects on wheat*. I concentrations of sulfur and nitrogen and the nitrogen -67-to sulfur ratio in grain, in relation to the yield response. Australian Journal of Agricultural Research, 32 (2): 203-212.
- Rice, R.W.; Gilbert, A.; McCray, J.M. 2010. *Nutritional Requirements for Florida Sugarcane*. Series (SS-AGR-228) of the Agronomy Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. 8 p.
- Rodríguez Acosta, C.; Cambeiro Novo, I.; Fernández Rodríguez, R.; Gil Olavarrieta, R.; Corredera González, Ma. del P.; Sardiñas González, C. 2006. *Incorporación de azufre a los fertilizantes*. Situación actual y perspectivas. Revista Cubana de Química, vol. XVIII, núm. 1. p: 52-59.
- Salisbury, F.B.; Ross, C.W. 1994. *Fisiología Vegetal*. México. Grupo Editorial Iberoamericano S.A. 759 p.
- Swift, R.S. 1985. *Mineralization and immobilization of sulphur in soils*. Sulphur in Agriculture 9: 8-12.

Torres Duggan, M.; Rodríguez, M.B.; Lamelas, J.A. sf. *El azufre en los agro-ecosistemas: corrección de suelos y fertilización de cultivos*. Buenos Aires, Argentina. Tecnoagro S.R.L. 9 p. <http://tecnoagro.com.ar/>

USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). 2014. *Claves para la taxonomía de suelos (en línea)*. 12 ed. Washington, D. C., Estados Unidos, NRCS. Consultado 15 jul. 2017. Disponible en: http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf

Vega, G.; Chaves, M.; Corrales, J. 1986. *Estudio comparativo de fórmulas y dosis fertilizantes con un complemento de Nitrógeno sobre los rendimientos agroindustriales de la caña de azúcar*. En: Congreso Agronómico Nacional, 7 y Congreso de Horticultura ASHS-Región Tropical, 33, Heredia, Costa Rica, 1986. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, Sociedad Americana de Ciencias Hortícolas Región Tropical-ASHS, CATIE y W.K. Kellogg, julio-agosto. p: 127-128.

Vitti, G.C.; Suzuki, J.; Fornasieri Filho, D.; Coutinho, E.L.M.; Sacchi, E. 1979. *O enxofre na agricultura*. Em: Seminário apresentado à disciplina "Problemas de Fertilidade do Solo", C.P.G. em Solos e Nutrição de Plantas. Piracicaba, Escola superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". 58 p.

Woodhouse Junior, W.W. 1969. *Long-term fertility requirements of coastal Bermuda grass*. III. Sulphur. Agronomy Journal, Madison 61: 705-708.





ANÁLISIS AGROINDUSTRIAL DE 19 VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.) PARA SUELOS DE ORDEN ULTISOL EN LA REGIÓN NORTE, SAN CARLOS

José Eduardo Vargas Miranda¹, Juan Pablo Carvajal Quesada², Fabian Álvarez Rodríguez³, Luis Alejandro Jiménez Lobo.

Resumen

En la región norte en el distrito Cutris de Boca Arenal en el cantón de San Carlos, se estableció un ensayo de variedades en fase VI durante un periodo de 5 años, con un diseño estadístico de bloques completos al azar, cuyo fin fue determinar cuáles híbridos presentan una mejor adaptación a las condiciones edafoclimáticas y de manejo agronómico.

La región se caracteriza por suelos altamente meteorizados del orden Ultisol y una media de precipitación mensual de 250 mm.

Bajo estas condiciones se logró obtener dos variedades nuevas para siembra comercial, LAICA 08-390 la cual cuenta con una relación sacarosa de 9,07 más baja que los testigos, es la variedad con mayor concentración de sacarosa en un promedio de cinco cosechas, generando 110,32 kg sacarosa/t caña anuales, es la cuarta variedad con mejor rendimiento agrícola 130 t caña/ha y un muy buen comportamiento agrícola.

La variedad LAICA12-340, tiene como principal

característica productiva un rendimiento agrícola de 138 t caña/ha, el rendimiento industrial es de 103,33 kg sacarosa/t caña, colocándose como la tercera variedad más productiva con 14,2 t azúcar/ha.



¹ Programa de Variedades, Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA). Correo – e: jvargas@laica.co.cr.
² Coordinador Programa de Variedades, Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA). Correo – e: pcarvajal@laica.co.cr.
³ Coordinador Región Norte, Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA). Correo – e: falvarez@laica.co.cr.

Introducción

El sector azucarero de Costa Rica, busca de manera permanente nuevos materiales genéticos que mejoren los niveles productivos actuales y sean capaces de adaptarse a las condiciones edafoclimáticas y de manejo propias de cada región (Durán Alfaro y Oviedo Alfaro 2014).

Para determinar el nivel productivo de los híbridos, se realiza un análisis industrial sobre la concentración de sacarosa, basándose en los principios del reglamento nacional para el pago de caña de azúcar establecido por LAICA (Angulo *et al* 2020). Dicha capacidad de concentración se relaciona con el peso de los tallos para conocer el rendimiento agroindustrial en toneladas de azúcar por hectárea.

Respecto a la capacidad de adaptación a las condiciones edafoclimáticas y de manejo, se realizan evaluaciones sobre el comportamiento de cada variedad, según las características más relevantes como sanidad, floración, encepamiento, entre otros, así como la consistencia de estas cualidades en el tiempo.

El ambiente bajo el cual se desarrolla el cultivo en Boca Arenal, se caracteriza principalmente por una predominancia de los suelos del orden Ultisol y un alto nivel de precipitación pluvial (Vargas Miranda *et al* 2020).

Bajo este contexto se establece un ensayo de fase VI, del cual se pretende obtener variedades con alto potencial para ser comerciales en la región y superar los resultados que hasta la fecha se han obtenido con PR 80-2038 y B 77-95.



Objetivos

Determinar mediante parámetros agroindustriales y de comportamiento agronómico cuáles son las variedades con mejor adaptación en Boca Arenal de San Carlos

Objetivos específicos

- Analizar las principales condiciones edafoclimáticas en las que se ha desarrollado el ensayo y sus posibles implicaciones en los resultados productivos.
- Analizar cuáles variedades han obtenido el mejor rendimiento, mediante variables de productividad agrícola (t caña/ha), rendimiento industrial (kg sacarosa/t caña) y productividad (t azúcar/ha).
- Determinar la capacidad de adaptación de las variedades más productivas de acuerdo con el comportamiento agronómico.

Materiales y Métodos

Para la descripción de las condiciones ambientales se consideró el factor suelo mediante análisis químicos, así como precipitación pluvial y temperatura mediante datos que fueron solicitados a Finca Scana, quienes cuentan con estaciones meteorológicas y llevan registros de clima cerca del lugar donde está ubicado el experimento, se usó la información mensual de temperaturas máximas y mínimas (°C) y la precipitación pluvial, medida en mm.

En junio del 2016 el programa de mejoramiento genético de DIECA estableció un ensayo de competición de variedades en fase VI, ubicado en finca Agroclisa, Boca Arenal, distrito Cutris, cantón de San Carlos.

El diseño utilizado fue de Bloques Completos al Azar, con cuatro repeticiones. El factor de variación corresponde a las variedades que fueron comparadas con los testigos B 77-95 y PR 80-2038. Cada parcela fue constituida por 5 surcos de 10 m de

longitud, espaciados 1,5 m entre sí, siendo el área total de la parcela de 75 m².

Posterior a los 9 meses los clones contaban con un desarrollo destacable, obteniéndose así información valiosa sobre vigor, grosor, altura, capacidad de encepamiento y floración.

Al momento de la cosecha se procedió con la corta manual de las parcelas, las cuales fueron pesadas en una balanza mecánica y se tomaron igualmente 5 tallos al azar de cada una para el análisis industrial. Con esta información se determinaron los datos de tonelaje de caña y azúcar por hectárea de las variedades en estudio y las variedades usadas como testigo.

Se realizó un análisis estadístico de los resultados obtenidos en cada una de las variables estudiadas mediante una prueba de varianza con el programa InfoStat™, utilizando la comparación de medias de Tuckey, se determinó la significancia al nivel de 5% de probabilidad, confianza del 95%.



Resultados

Cuadro 1.

Análisis químico de suelos para la parcela de fase VI en la finca Agroclisa, Boca Arenal, 2018-2019

Elementos	Finca Agroclisa		Niveles Óptimos	Unidad
	2018	2019		
pH	5,3	5,38	5,5-6,5	
Ca	5,39	4,66	4-20	cmol(+)/L
Mg	2,25	1,86	1-10	cmol(+)/L
K	0,24	0,21	0,2-1,5	cmol(+)/L
Acidez	0,23	0,1		cmol(+)/L
P	3,6	8,84	10-40	ppm
Fe	158	150	10-50	ppm
Mn	165	22	5-50	ppm
Zn	8,6	1,4	3-15	ppm
Cu	11,2	6,8	1-20	ppm
Ca/Mg	2,40	2,50	2-5	
Mg/K	9,38	8,86	2,5-15	
Ca+Mg/K	31,83	31,04	10-40	
Ca/K	22,46	22,19	5-25	

En general, las cantidades de las bases cambiables Ca, Mg y K se encuentran levemente superiores a los niveles críticos, los valores de fósforo se muestran inferiores a las 10 ppm. Las relaciones catiónicas no

muestran algún tipo de desbalance. El pH no se encuentra en un nivel crítico, pero si por debajo de los niveles óptimo, los niveles de hierro y manganeso se encuentran comúnmente en exceso (Cuadro 1).

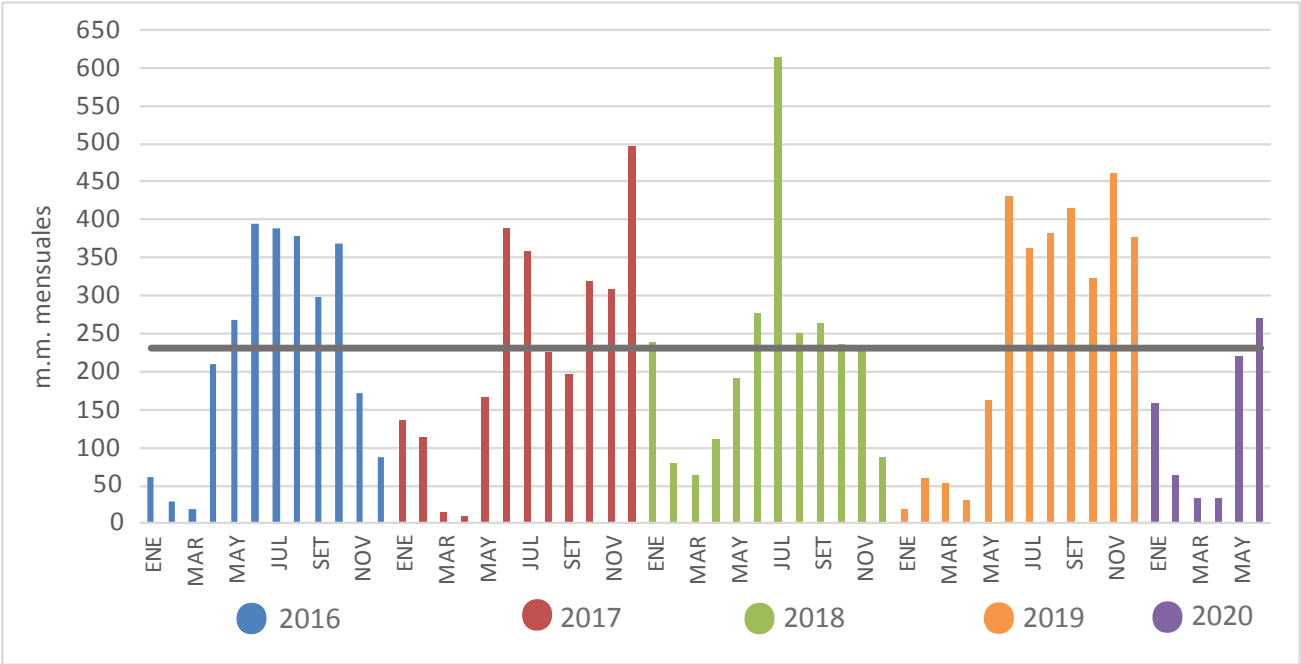


Figura 1.

Variación de la precipitación pluvial (mm), Boca Arenal, Cutris. 2016-2020



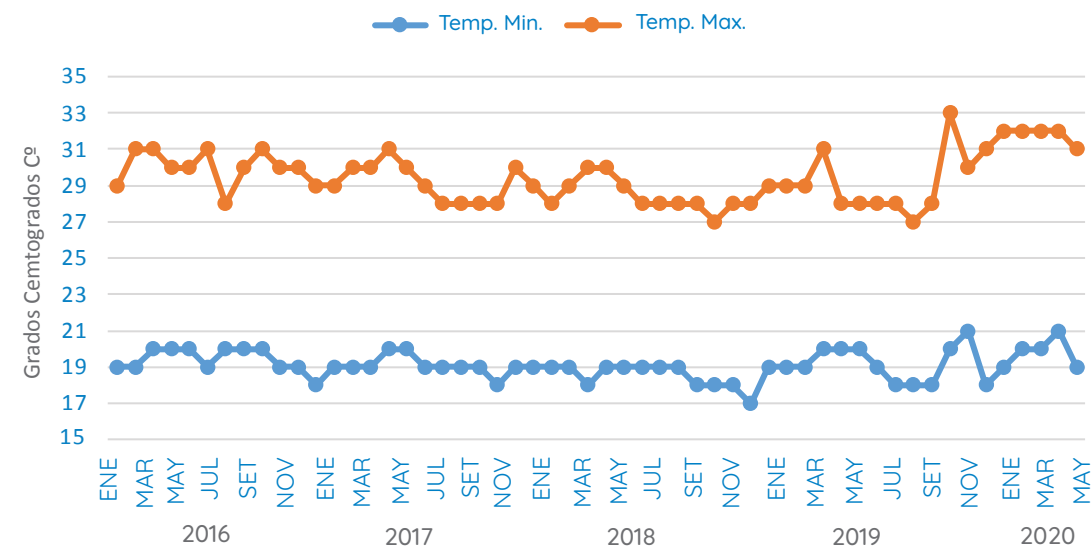


Figura 2.
Comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas en Boca Arenal, Cutris. 2016-2020

Los meses de junio a diciembre, los valores de precipitación oscilan entre 200 mm a 400 mm mensuales comúnmente. De enero a mayo se registran los valores más bajos de precipitación, sin embargo, es común que en alguno de estos meses exista aún lluvias abundantes superando incluso los 100 mm mensuales (Figura 1).

En estos meses de enero a mayo el aumento de temperaturas ocurre tanto para las máximas como las mínimas, mostrando ocasionalmente una curva de comportamiento normal, donde enero es el mes con menor temperatura y marzo el de mayor temperatura. Dichas variaciones entre máximas y mínimas se mantienen entre 10°C a 11°C de amplitud térmica (Figura 2)

Cuadro 2.

Resultados agroindustriales de 19 variedades de caña de azúcar Fase VI, promedio cinco cosechas, Boca Arenal, San Carlos, 2017-2020

Variedad	Kg sacarosa /t		t caña/ha		t azúcar/ha		PRT	Relación sacarosa	
LAICA 08-390	110,32	a	129,73	ab	14,31	a	118,26	9,07	
LAICA 04-809	95,86	abc	149,47	a	14,28	a	118,02	10,47	
LAICA 12-340	103,33	abc	137,73	ab	14,21	ab	117,44	9,69	
LAICA 07-26	96,46	abc	133,01	ab	12,83	abc	106,03	10,37	
B 77-95	107,81	abc	113,25	ab	12,1	abc	100,00	9,36	
RB 98-710	93,88	bc	128,57	ab	12,01	abc	99,26	10,71	
LAICA 10-664	95,57	abc	124,7	ab	11,88	abc	98,18	10,50	
LAICA 10-804	109,43	ab	108,43	ab	11,88	abc	98,18	9,13	
LAICA 07-09	102,95	abc	115,67	ab	11,86	abc	98,02	9,75	
LAICA 08-22	95,43	abc	124,27	ab	11,7	abc	96,69	10,62	
LAICA 12-339	103,28	abc	113,39	ab	11,68	abc	96,53	9,71	
LAICA 12-344	101,33	abc	113,69	ab	11,44	abc	94,55	9,94	
LAICA 12-341	101,06	abc	111,57	ab	11,21	abc	92,64	9,95	
PR 80-2038	103,04	abc	109,17	ab	11,16	abc	92,23	9,78	
SP 81-3250	102,1	abc	110,42	ab	11,11	abc	91,82	9,94	
NA 85-1602	103,34	abc	104,69	b	10,83	abc	89,50	9,67	
LAICA 05-805	92,91	c	113,42	ab	10,47	bc	86,53	10,83	
LAICA 04-825	102,92	abc	101,21	b	10,27	c	84,88	9,85	
MEX 79-431	101,97	abc	100,73	b	10,26	c	84,79	9,82	
Promedio	101,21		118,06		11,87				
% CV	7,00		15,70		13,61				



Entre las 19 variedades evaluadas en un periodo de 5 cosechas, no se llegó a registrar una diferencia estadísticamente significativa en los rendimientos comparativos con el mejor testigo B 77-95 (Cuadro 2).

En lo que respecta a rendimiento industrial (kg sacarosa /t), existe una menor dispersión de los datos respecto a la media, con un % CV de 7,00 en comparación al rendimiento agrícola con un % CV de 15,70 (Cuadro 2).

LAICA 08-390, LAICA 04-809 y LAICA 12-340 son las variedades más sobresalientes

desde un punto de vista productivo, generando un aumento en los rendimientos entre un 17% al 18% sobre el testigo B 77-95 (Cuadro 2).

Entre las variedades que han logrado mantener un rendimiento promedio superior a B 77-95 es la LAICA 08-390 la que cuenta con un menor índice de relación sacarosa 9,07. Por el contrario, la variedad LAICA 04-809 cuenta con el mayor índice de relación sacarosa 10,47 y requiere una mayor cantidad de caña para extraer una tonelada de azúcar (Cuadro 2).

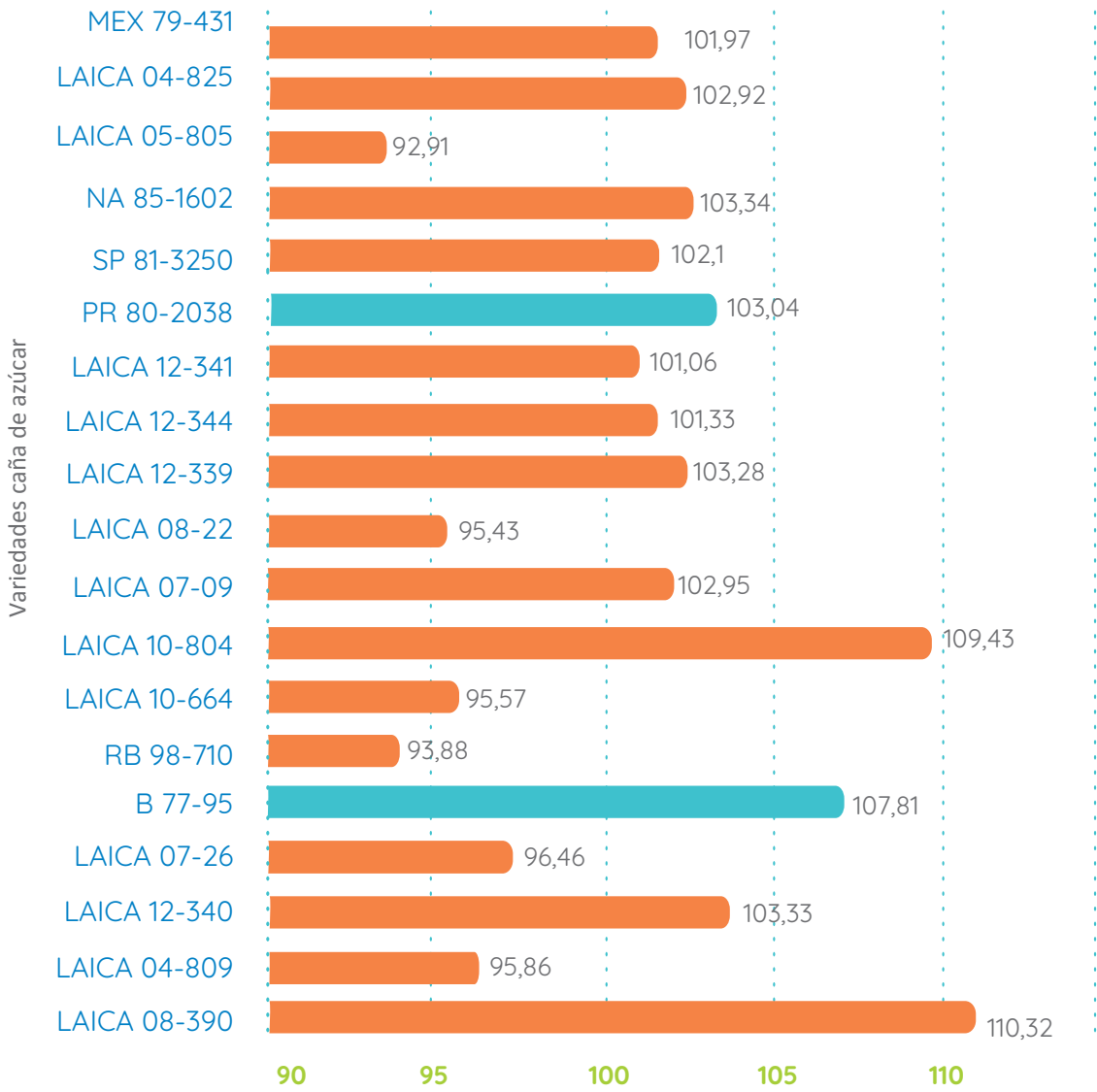
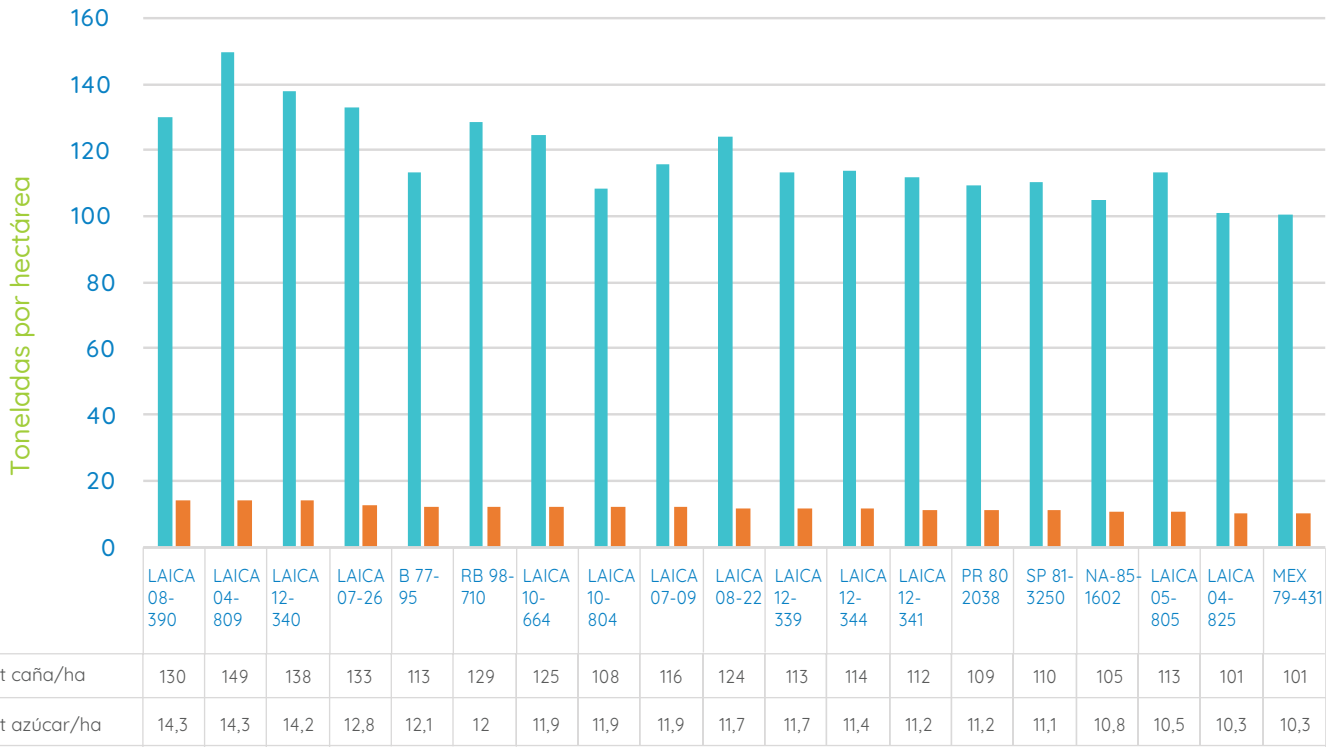


Figura 3
Kilogramos de sacarosa por tonelada de 19 variedades de caña de azúcar en fase VI, promedio de cinco cosechas, Finca Agroclisa, Ingenio Cutris, San Carlos 2017-2021



Variedades de caña de azúcar

Figura 4.

Rendimientos agroindustriales de 19 variedades de caña de azúcar en fase VI, promedio de cinco cosechas, Finca Agroclisa, Ingenio Cutris, San Carlos 2017-2021

Las variedades que mostraron una mayor concentración de azúcar en el promedio de 5 cosechas fueron LAICA 08-390 (110,32 kg), LAICA 10-804 (109,42 kg) y el testigo B 77-95 (107,81) kg (Figura 3).

Las de mayor rendimiento agrícola fueron LAICA 04-809 (149 t caña/ha), LAICA 12-340 (138 t caña/ha) y LAICA 07-26 (133 t caña/ha). Seguidos por LAICA 08-390 (130 t caña/ha) que es la variedad con mayor concentración de azúcar promedio (Figura 4).

En un balance entre caña y azúcar, expresado en Toneladas de azúcar por hectárea (t azúcar/ha), fueron las variedades LAICA 08-390, LAICA 04-809 y LAICA 12-340 las más sobresalientes del grupo con rendimientos de 14,3 14,3 y 14,2 t azúcar/ha respectivamente (Figura 4).

Cuadro 3.

Características agronómicas de las principales variedades, Boca Arenal, San Carlos

Boca Arenal, Ingenio Cutris, San Carlos

LAICA 12-340

Cuenta con 15 tallos/m², en el 2018 la floración fue de un 2%, de porte erecto, excelente altura 2,9 m, buen despaje y corcho bajo en el tercio superior, buen nivel de sanidad. Excelente concentración de azúcar y tonelaje, para una producción de 14,2 t azúcar/ha .

LAICA 04-809

En promedio cuenta con 10 tallos/m², en el 2018 expresó un 40% de floración, con corcho medio en todo el tallo, acamada con excepción del cuarto año donde se mantuvo semi-erecta, se muestra vulnerable a la roya café. Es la variedad con el mejor rendimiento promedio 14,3 t azúcar/ha.

LAICA 08-390

Cuenta con 14 tallos/m² en promedio, sin floración ni corcho, ha mostrado comportamiento erecto o semi-erecto, con despaje regular a difícil, excelente desarrollo. Muy buena concentración de azúcar y tonelaje, para una producción estimada de 14,3 t azúcar/ha.

LAICA 07-26

En promedio cuenta con 11 tallos/m² , para el 2018 la floración fue de un 47% con corcho alto en el tercio superior, acamada, los tallos no cuentan con un diametro uniforme, formación de lalas. Mantiene un buen nivel productivo 12,8 t azúcar/ha .

B 77-95

Cunta con 12 tallos/m², mantuvo una floración inferior al 20%, el corcho puede ser de bajo a medio en todo el tallo, la variedad es muy erecta con buen despaje. Logró una producción de 12,1 t azúcar/ha en promedio durante cinco cosechas

Discusión

Condiciones edafoclimáticas

El suelo bajo el cual se desarrolló la investigación corresponde al orden Ultisol, “son suelos muy meteorizados, de gran desarrollo, viejos, rojos, de baja fertilidad (...) Predominan las arcillas 1:1 Caoliniticas y los Óxidos de Fe y Al (...). Poseen pocas bases, sufren pérdida de Si, Ca, Mg, K y micronutrientes por lavado. Con baja retención iónica y muy baja CICE, alta fijación de P, responden al encalado” (Chaves Solera y Chavarria Soto 2017:11).

En los análisis de suelo se observa que los niveles de fósforo son relativamente bajos, con niveles de 3,6 ppm y 8,4 ppm, lo cual es muy significativo en caña de azúcar, donde se buscan materiales genéticos cada vez más productivos y por lo tanto demandantes nutricionalmente, lo cual muestra a su vez la importancia de reforzar las labores de investigación en temas nutricionales (Cuadro 1).

Otro aspecto importante de considerar en este tipo de suelos es la práctica de encalado, debido a la alta fijación de fosforo y las pérdidas que sufre en los bases cambiables Ca, Mg, K. En los análisis de suelo se observa que se encuentran cercanas al nivel crítico, por este motivo el encalado es una excelente alternativa para adecuar las condiciones al cultivo (Cuadro 1).

Al ser también suelos viejos, muy meteorizados e incluso compactados, las prácticas de conservación cobran un papel vital para que el cultivo pueda seguir desarrollándose de manera sustentable. Actualmente el Ingenio Cutris, donde se ha desarrollado la investigación, se encuentra trabajando arduamente en mejorar la cantidad y calidad de prácticas de conservación.

Respecto a las condiciones de precipitación, el distrito de Boca Arenal se caracteriza por tener una media cercana a los 250 mm mensuales, siendo generalmente de mayo a noviembre los meses de mayor precipitación, llegando a superar en total los 3.000 mm anuales (Figura 1); prácticamente el doble de los 1.500 mm anuales sugerido para el cultivo. (MAG 1991; Chaves 2011).

No existe en si un año que se pueda definir como seco o de baja precipitación, si es normal que en la época de zafra (febrero a mayo) se cuente con uno o máximo dos meses de baja precipitación, menos de 30mm mensuales y finalice con niveles entre 150 mm a 200 en el mes de mayo.

En lo referente al comportamiento de las temperaturas, especialmente en la época de zafra, se mantiene una amplitud térmica entre 10°C a 11°C, con temperaturas mínimas entre los 18 °C a 22°C y máximas de 28° a 31° C aproximadamente (Figura 2). Es bien conocido que en la época de maduración y cosecha lo ideal es contar con noches frías y días calientes, lo cual permite una mayor concentración de azúcares (MAG 1991).

Las condiciones de temperatura y precipitación podrían sugerir algunas dificultades para el cultivo, principalmente en la época de maduración y cosecha, al no existir una época seca definida y valores de temperatura mínima relativamente altos. Es un gran reto para los ingenios, quienes desarrollan la mayor parte de las labores de cosecha y preparación de forma mecanizada y lo es también para el mejoramiento genético en la región al buscar variedades con una mayor concentración de sacarosa.

Rendimientos Agroindustriales

Bajo las condiciones edafoclimáticas de Boca Arenal, se evaluaron 19 variedades de

caña de azúcar en una fase VI de investigación durante un periodo de 5 cosechas.

Respecto a la variable de rendimiento industrial (kg sacarosa/t caña), resultó que las variedades LAICA 08-390 con 110,32 kg y LAICA 10-804 con 109,43 kg, fueron las únicas que sobrepasaron los rendimientos que ofrece actualmente el testigo B 77-95 con 107,81 kg en el promedio de cinco cosechas (Figura 3).

Mejorar la concentración de sacarosa del cultivo en las condiciones propias de Boca Arenal es una de las tareas más complejas y esto se refleja en las pocas variedades que lograron mantenerse igual o mejor que el testigo comercial B 77-95 ya que es un material sumamente azucarero adaptado a condiciones presentes en la región.

En la variable de rendimiento agrícola (toneladas de caña por hectárea), 11 variedades lograron mejorar al testigo B 77-95, siendo sobresalientes LAICA 04-809 con 149,47 t caña/ha, LAICA 12-340 con 137,73 t caña/ha, LAICA 07-26 con 133,01 t caña/ha y LAICA 08-390 con 129,73 t caña/ha (Figura 4).

Boca Arenal cuenta con una alta precipitación pluvial principalmente en el tiempo de desarrollo vegetativo, esta

condición llega a favorecer el desarrollo de las variedades e incide directamente en los resultados observados en campo.

Es importante por esta razón realizar un balance entre la capacidad de concentración de sacarosa y producción de caña en la región, siendo así como se obtiene que las variedades LAICA 08-390 con 14, 31 t azúcar/ha LAICA 04-809 con 14,28 t azúcar/ha, LAICA 12-340 con 14,21 t azúcar/ha y LAICA 07-26 con 12,83 t azúcar/ha, fueron los híbridos capaces de lograr mejorar la productividad total del testigo B 77-95 durante un promedio de cinco cosechas (Figura 4).

Características Agronómicas

De las variedades más productivas es fundamental conocer también el comportamiento agronómico, como parte importante de la expresión fenotípica que determina la capacidad de adaptación a las condiciones locales (Cuadro 3).

La variedad LAICA 08-390, logró sobrepasar los rendimientos del testigo, debido a sus características de excelente encepamiento manteniendo un porte semierecto, sin floración y una excelente concentración de sacarosa, una de las desventajas considerables en la variedad es



el despaje de regular a difícil, principalmente para una cosecha mecanizada en verde.

La variedad LAICA 04-809 tiene como fortaleza su gran desarrollo traducido en un excelente tonelaje en campo, sin embargo, ha expresado porcentajes altos de floración con corcho hasta la mitad del tallo, afectando así la concentración de sacarosa. El manejo puede resultar un poco difícil en las condiciones de Boca Arenal donde existe una tendencia al volcamiento.

La variedad LAICA 12-340 se caracteriza por una muy buena concentración de azúcar, es posible visualizar un comportamiento irregular en el grosor, sin embargo, es compensado por el excelente encepamiento, tallos muy compactos, corcho bajo en el tercio superior y una baja floración.

LAICA 07-26 es una variedad que en promedio se mantuvo muy similar al testigo B 77-95 en toneladas de azúcar por hectárea, sin embargo, es exigente en la fertilidad física y química de los suelos, lo que ha generado mucho volcamiento, floración muy alta y laqueo de los tallos. Además, no muestra un alto nivel de concentración de sacarosa.

Conclusiones

La precipitación pluvial en Boca Arenal puede favorecer el desarrollo vegetativo, sin embargo, dificulta la concentración de sacarosa en la época de zafra.

Los suelos deben ser atendidos integralmente en cuanto a técnicas de conservación, manejo y mejoramiento nutricional, debido al desgaste característico del Ultisol, para que así las variedades puedan expresar su mayor potencial.

La variedad LAICA 08-390 ha mostrado un alto potencial productivo y buen comportamiento agronómico en la región por lo cual debe ser evaluada en pruebas semicomerciales de manejo en fincas.

La variedad LAICA 12-340 supera los niveles productivos del testigo comercial, manteniendo un buen comportamiento en las condiciones de Boca Arenal, por lo tanto, debe ser evaluada de forma semicomercial.



Bibliografía

- Angulo Marchena, A; Rodríguez Rodríguez, M; Chaves Solera, M. 2020. *Guía Técnica Cultivo Caña de Azúcar Región: Guanacaste (en línea)*. LAICA-DIECA, Guanacaste, Costa Rica. Consultado 22 Oct. 2021. Disponible en <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/jieyzwRDmVvUeWJGLRfYLzXbibjLZNW>
- Chaves Solera, M. 2011. *Impacto de las lluvias y las inundaciones sobre la caña de azúcar en Costa Rica (en línea)*. LAICA-DIECA, San José, Costa Rica. Consultado 24 abr. 2020. Disponible en <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/article/6181>
- Chaves Solera, M; Chavarría Soto; E, 2017. *Aproximación taxonómica y territorial de los suelos sembrados con caña de azúcar en Costa Rica*. I. Ordenes de suelo (en línea). LAICA-DIECA, San José, Costa Rica. Consultado 5 Nov. 2021. Disponible en <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/bKkHwijyPFKqGFyANxJqzHxCWDaLMdMq>
- Durán Alfaro, J; Oviedo Alfaro, M. 2014. *Importancia y resultados del programa de producción de variedades nacionales (Sigla LAICA) en Costa Rica (en línea)*. LAICA-DIECA, San José, Costa Rica. Consultado 15 Oct. 2021. Disponible en <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/IBqtkQkmkauSZeVViLzbZHATLcdkRIyy>
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, Costa Rica). 1991. *Aspectos técnicos sobre cuarentena y cinco cultivos agrícolas de Costa Rica: Caña de azúcar (en línea, poster)*. Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola, MAG, San José, Costa Rica. Consultado 08 ene. 2020. Disponible en <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-0658cana.pdf>
- Vargas Miranda, J; Durán Alfaro, J; Barquero Madrigal, E; Alfaro Portuguese, R; Carvajal Alfaro, J. 2020. *Condiciones que caracterizan los sistemas productivos de caña de azúcar en la zona norte del país (San Carlos y Los Chiles) e inciden en el desarrollo de nuevas variedades (en línea)*. LAICA-DIECA, Grecia, Costa Rica. Consultado 1 Nov. 2021. Disponible en <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/article/B48C4051D7D646EEE053E8E1A9C03DBD>



VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp.) CULTIVADAS EN LA REGIÓN DE TURRIALBA (JUAN VIÑAS Y TURRIALBA) Y RESULTADOS DEL PROCESO DE EVALUACIÓN DE NUEVOS MATERIALES.

Juan Pablo Carvajal Quesada¹, José Eduardo Vargas Miranda², Gilberto Calderón Araya, José Roberto Durán Alfaro.

Resumen

En este trabajo se ofrece el detalle de las variedades de caña de azúcar que se han venido cultivando comercialmente en la región de Turrialba (Turrialba y Juan Viñas) del año 2000 hasta la actualidad.

En la localidad de Juan Viñas que se encuentra a una altitud entre 1.000 y 1.550 msnm, las variedades que mejor adaptación han mostrado son las de origen hawaiano, siendo la H 77-4643 la más cultivada durante este periodo y actualmente sigue siendo la principal, junto con una nueva variedad seleccionada en esa misma localidad que es LAICA 04-250.

En la parte baja de esta región que corresponde a la localidad de Turrialba, cuya altitud oscila entre 450 y 900 msnm, las variedades más sobresalientes en este periodo han sido las de origen Barbados y dentro de ellas la más importante esta la B 76-259, seguida por la B 77-95 y Pindar.

Producto del trabajo de investigación en variedades que se ha venido realizando por

parte de LAICA en esta región, actualmente se tiene un grupo de variedades con muy buen potencial para llegar a convertirse en variedades comerciales, siendo estas LAICA 07-203, LAICA 05-805, LAICA 12-340 y LAICA 10-207.



¹ Coordinador Programa de Variedades, Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA). Correo – e: pcarvajal@laica.co.cr.
² Programa de Variedades, Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA). Correo – e: jvargasm@laica.co.cr.



Introducción

La región cañera de Turrialba (Juan Viñas-Turrialba) se ubica a una altitud entre 480 a 1.550 msnm, con condiciones muy variables y heterogéneas en todos los sentidos, con diferencias marcadas en la taxonomía de los suelos (Andisol, Inceptisol, Ultisol); con precipitaciones entre 2.000-3.400 mm anuales, temperaturas medias entre 18 a 23 °C y mínimas de 14 a 19 °C. Hay presencia de suelos fértiles (volcánicos), como también ácidos y con fertilidad baja-media (viejos), relieve ondulado-plano, con áreas quebradas no mecanizables y pendientes de hasta un 30%.

Las plantaciones requieren forzosamente disponer sistemas efectivos de drenaje y conservación de suelos. La cosecha se realiza desde los 12 a 24 meses de edad, donde en la zona baja es predominante el corte manual con alce mecánico, y en la zona alta la cosecha es mecánica y manual, según la pendiente del terreno. Existe una cantidad considerable de pequeños agricultores de caña distribuidos por toda la región, que mantienen explotaciones por lo general con áreas inferiores a 4 ha de terreno (Chaves 2018).

El programa de variedades de caña de azúcar de LAICA, ha mantenido un proceso constante y sistemático de introducción, evaluación y

selección de nuevos híbridos, con la finalidad de buscar variedades más productivas y adaptadas a las distintas condiciones que se presenta esta región.

Este trabajo se realiza en forma coordinada con ingenios y productores, en donde se evalúan variedades que provienen de dos vías; la primera es la importación de clones procedentes de diversas estaciones experimentales del mundo, aprovechando convenios conjuntos que LAICA posee y cuyos materiales introducidos al país pasan por los controles fitosanitarios que establece nuestra legislación. La segunda vía es a través del proceso de hibridación que se realiza acá en el país, mediante cruzamientos biparentales y múltiples, donde las plántulas procedentes de semilla sexual, son llevadas a esta región para observar la adaptación a las condiciones prevalecientes y de ahí se obtienen las variedades de sigla LAICA.

El presente trabajo tiene como objetivo comentar sobre el comportamiento de las variedades de caña de azúcar sembradas comercialmente en la región Turrialba (Juan Viñas, Turrialba) de Costa Rica, durante el periodo 2000-2019, así como brindar información de las principales investigaciones que se vienen realizando para tratar de encontrar nuevas variedades.

Variedades de caña de azúcar sembradas en la región Turrialba en el periodo 2000 - 2019

Con base en la información obtenida en los censos realizados por LAICA entre los años 2000 al 2019; se confeccionó el cuadro 1 y la figura 1, en donde se muestran las variedades sembradas en la región de Turrialba, así como el porcentaje de área que ocupa cada una de ellas en cada periodo.

Como ha sido descrito por Chaves (2018), la región de Turrialba (Turrialba-Juan Viñas) se ha caracterizado por presentar una buena adaptación de materiales de origen Hawaiano (H) y de Barbados (B), por lo que en este periodo se han cultivado comercialmente 3 variedades Barbados y 7 hawaianas.

A través de estos 19 años, se puede observar cómo las variedades B 76-259, H 77-4643, B 77-95, PINDAR y Q 96, se han mantenido de forma constante en la región, teniendo una distribución porcentual muy equilibrada, llegando a ocupar un máximo de 39,56% de área en el caso de la variedad H 77-4643 (2010); que como indica Chaves (2018), lo deseable en una plantación comercial de caña de azúcar es que ninguna variedad supere el 40% del área sembrada; y lo ideal, que esta área no sea mayor del 20%, lo que permite adoptar medidas efectivas ante la ocurrencia de cualquier eventualidad o problema emergente que puede surgir y que requiera de una sustitución rápida del clon.

Las variedades de mayor siembra de la región Turrialba según el censo del 2019, son B 76-259 (34,46%), H 77-4643 (19,97%), LAICA 04-250 (16,17%), B 77-95 (11,74%), PINDAR (4,85%), B 76-385 (2,05%), RB 86-7515 (1,34%), H 74-1715 (1,12%), H 61-1721 (1,10%), LAICA 07-203 (1,10%) y H 68-1158 (1,03%), las cuales superan el 1% del área cultivada, además, son de gran importancia.

Con respecto al grupo de las variedades hawaianas (H), la gran mayoría han disminuido

su área, siendo reemplazadas por nuevos s cultivares como LAICA 04-250 y LAICA 07-203, que han mostrado resultados muy favorables, con excepción de H 77-4643, la cual se mantiene como una variedad de suma importancia, encontrándose entre las dos primeras opciones de siembra en la zona alta de la región. En el caso de las variedades de Barbados (B), la B 76-259 sigue siendo la más importante en la zona baja (600-1100 msnm), la B 77-95 viene disminuyendo en área y B 76-385 ha mostrado un leve incremento, además están apareciendo otras variedades que se encuentran en fases semicomerciales, con muy buenos resultados, como es el caso de LAICA 05-805, LAICA 07-203, LAICA 12-340, LAICA 08-390, LAICA 07-26 y LAICA 10-207.

La variedad Q 96, fue importante en la zona baja, sin embargo ya casi desaparece, debido a que los productores la han venido cambiando por variedades de la sigla Barbados, las cuales ofrecen buenos rendimientos tanto de caña como de azúcar y además son de crecimiento más erecto y de mejor despaje (Calderón *et al* 2018).



Cuadro 1.

Distribución porcentual de las variedades de caña de azúcar en la Región Turrialba de Costa Rica, periodo 2000-2019.

VARIEDAD	2000	2003	2007	2010	2013	2016	2019
B 76-256	12,43	14,26	21,00	23,96	31,02	35,66	34,46
H 77-4643	12,19	23,38	30,10	39,56	33,42	26,69	19,97
LAICA 04-250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77	7,22	16,17
B 77-95	6,77	15,82	21,69	21,63	16,89	15,30	11,74
PINDAR	8,99	7,13	12,30	6,37	6,27	4,79	4,85
B 76-385	0,00	0,00	0,00	0,11	0,47	0,60	2,05
RB 86-7515	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	1,34
H 74-1715	0,33	1,34	1,19	0,89	0,97	1,30	1,12
H 61-1721	10,71	11,72	2,03	1,29	1,56	1,47	1,10
LAICA 07-203	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,10
H 68-1158	0,00	0,00	0,00	0,00	1,29	1,12	1,03
H 77-2545	1,10	3,52	3,59	1,99	1,17	1,05	0,76
H 60-8521	6,17	1,29	0,10	0,09	0,00	0,00	0,00
Q 96	17,59	8,43	3,88	1,25	1,22	1,09	0,71
H 62-4671	11,47	4,54	0,74	0,61	0,17	0,00	0,00
TOTAL	87,75	91,44	96,63	97,75	95,22	96,79	96,42

Las variedades B 76-259 y H 77-4643 son los dos materiales más importantes de la región, sin embargo, se ha venido dando una disminución del área de ambas variedades. Esta disminución obedece a la aparición de nuevas variedades de buenos rendimientos, así como a la presencia de problemas fitosanitarios, ya que la variedad H 77-4643 ha mostrado susceptibilidad a la roya naranja (*Puccinia kuehnii*) y la B76-259 presenta carbón (*Sporisorium scitamineum*), además, esta última es muy susceptible a la principal

mezcla de herbicidas utilizada actualmente en la región (diurón + hexazinona + 2,4-D), por lo cual lo más recomendable es mantener un porcentaje menor de área, para evitar futuros problemas, por si estas enfermedades continúan aumentando; aunque cabe aclarar que los daños provocados por estas enfermedades se mantienen controlados y las pérdidas no superan el umbral económico, lo cual permite la siembra comercial de ambas variedades.

Cuadro 2.

Lista de variedades de caña de azúcar comerciales y semicomerciales en la región Turrialba de Costa Rica

Variedad	Área	Zona de producción	Variedad	Área	Zona de producción
B 76-256	1.169,58	Comercial zona baja	H 68-1158	34,94	Comercial zona alta
H 77-4643	677,81	Comercial zona alta	LAICA 05-805	11,57	Semicomercial zona baja
LAICA 04-250	548,78	Comercial zona alta	LAICA 07-26	6,6	Semicomercial zona baja
B 77-95	398,48	Comercial zona baja	LAICA 10-207	4,73	Semicomercial zona baja
B 76-385	69,55	Comercial zona baja	LAICA 08-390	3,13	Semicomercial zona baja
LAICA 07-203	37,27	Comercial zona alta y semicomercial zona baja	LAICA 12-340	2,66	Semicomercial zona baja
TOTAL has		3.393,61			

Actualmente la región Turrialba posee 7 variedades de caña de azúcar que se cultivan de forma comercial, o se clasifican como los materiales principales a elegir para una renovación, las cuales son H77-4643, H68-1158, LAICA 04-250 y LAICA 07-203 para la zona alta, principalmente por encima de los 900 msnm y B76-259, B77-95 y B76-385 como materiales para la zona baja que comprende

la zona de Turrialba y Jiménez, entre 600-900 msnm.

Además, se encuentra un grupo de cinco variedades LAICA, las cuales se siembran de forma semicomercial (Cuadro 2), debido a que han pasado por todo el proceso de selección y ahora se encuentran en las manos de los productores valorando sus mejores condiciones.

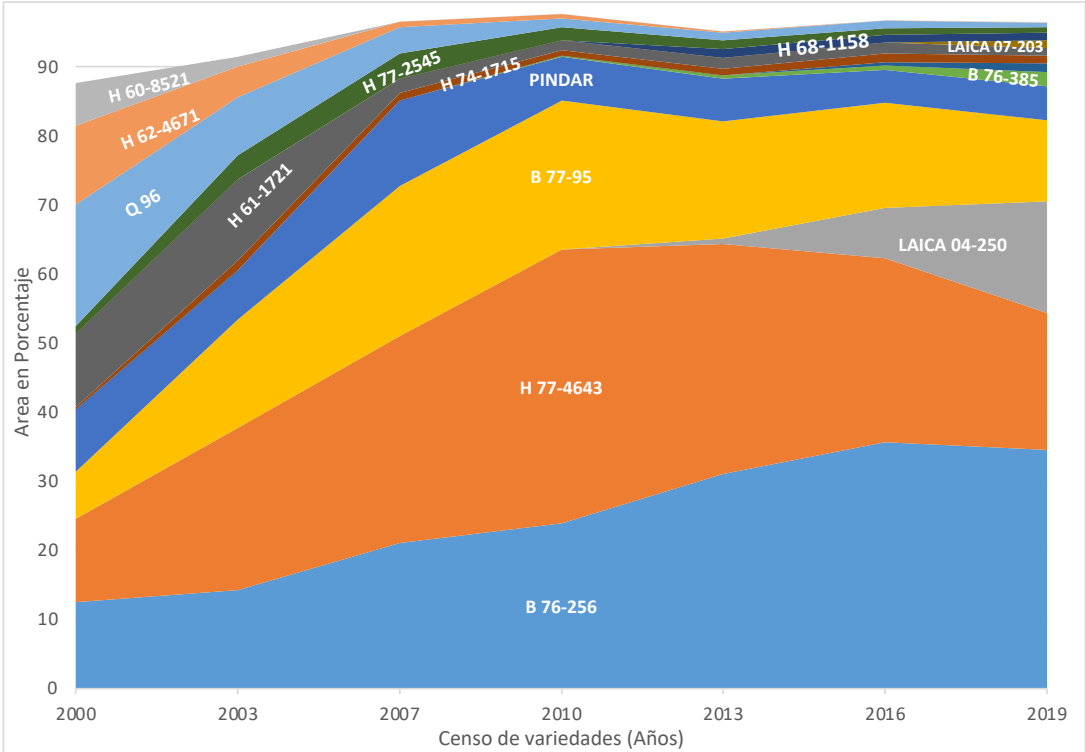


Figura 1.
Evolución de las variedades de caña de azúcar en la región Turrialba de Costa Rica, periodo 2000-2019.

Proceso de evaluación de variedades

El programa de variedades de LAICA, como lo detalla Duran *et al* (2018), opera mediante un proceso sistemático y continuo de diferentes fases de evaluación y selección de variedades, el cual se desarrolla en cada una de las regiones cañeras del país, con la finalidad de liberar comercialmente una nueva variedad, proceso que tarda de 8 a 12 años. En la región de Turrialba (Turrialba-Juan Viñas) desde la creación de DIECA se viene empleando este proceso de investigación, el cual cuenta actualmente con 17 ensayos de variedades,

tanto nacionales como extranjeras. En el cuadro 3 se ofrece el detalle de la cantidad de ensayos según fase y la localidad donde están ubicados. Por diferencias climáticas, de suelo y principalmente altitud, que se tienen en esta región, la investigación se desarrolla en dos localidades, en la zona baja (Atirro, Turrialba) y en la zona alta (Juan Viñas) en las fincas cercanas al ingenio.

En la zona alta, este proceso de evaluación y selección se hace más lento, debido a que la cosecha de cada una de las fases se realiza cada 18 a 24 meses, mientras que en la parte baja de Turrialba, el ciclo es de 12 meses.

Cuadro 3.

Ensayos de variedades establecidos actualmente en la región de Turrialba.

Fase de selección	Año	No. variedades	Zona establecida	Cantidad total
Vivero primario	2018	3.003 plántulas	Juan Viñas	
	2019	2.228 plántulas	Juan Viñas	
	2019	3.655 plántulas	Turrialba	
	2020	4.990 plántulas	Turrialba	
Fase III	LAICA serie 2018	25	Turrialba	205
	LAICA serie 2019	35	Turrialba	
	LAICA serie 2015	16	Juan Viñas	
	LAICA serie 2020	26	Turrialba	
	Extranjeras 2018	65	Turrialba	
	Extranjeras 2019	38	Turrialba	
Fase IV	Nacionales y extranjeras 2019	17	Turrialba	23
	LAICA serie 2020	6	Turrialba	
Fase V	LAICA serie 2018	2	Turrialba	19
	Nacionales y extranjeras 2018	13	Juan Viñas	
	Nacionales y extranjeras 2020	4	Turrialba	
Fase VI	Nacionales y extranjeras 2018	11	Turrialba	11

Resultados de las últimas pruebas comparativas de variedades establecidas en la Región Turrialba, Cartago

Entre las fases de investigación que maneja el programa de variedades de caña de azúcar de LAICA-DIECA, está una etapa final la cual se llama fase VI, dicha fase consta de una prueba comparativa de variedades, la cual se establece con un diseño estadístico adecuado, que permita evaluar de la mejor manera estas variedades.

Se emplean parcelas de un tamaño entre 60 a 75 m², con tres a cuatro repeticiones y se deben efectuar al menos tres cosechas, para contar con información lo más confiable posible, para recomendar o no una variedad.

En estos ensayos la determinación del rendimiento de azúcar en kilogramos por tonelada, se obtiene enviando una muestra de 6 tallos por cada parcela, al laboratorio de pago de caña por calidad que tienen los ingenios.

La estimación de las toneladas de caña por hectárea, se obtiene pesando la totalidad de la caña que sale de cada parcela y para esto se emplea una balanza móvil. Los resultados se analizan mediante el programa INFOSTAT, con una comparación de tratamientos y empleando un alfa de 0,05%, con la prueba de Tukey.

Es así como a continuación se presentan los resultados de dos ensayos de investigación o pruebas comparativas de variedades ubicadas en fase VI, en estos momentos en esta región.

Evaluación de 14 variedades de caña de azúcar en finca Canadá, Atirro, Turrialba, Costa Rica

Este ensayo se estableció el 14 de agosto del año 2015 en finca Canadá, propiedad del Ingenio Agroatirro, situada en el distrito de La Suiza, cantón de Turrialba, provincia de Cartago, ubicada a 620 msnm, con una precipitación anual promedio durante los últimos 74 años de 2.696,9 mm (1942-2016) y con temperaturas promedio máximas de 27,5°C y mínimas de 15,5°C, referentes al mismo período.

Los meses más secos o de mínima precipitación son marzo y abril y los de mayor precipitación son junio, julio, noviembre y diciembre. La primera cosecha (caña planta) se efectuó a una edad de 9 meses y las otras tres a los 12 meses. La unidad experimental la constituye una parcela de 75 m (5 surcos de 10 m), con un distanciamiento de 1,5 m entre surcos y 2 m entre parcelas, con un diseño experimental de Bloques Completos al Azar, con tres repeticiones.

Se evaluaron 12 variedades nacionales y dos extranjeras, dentro de las cuales se encuentran la B 76-259 y B 77-95, utilizadas como testigos. El suelo del lugar clasifica como Inceptisol, y la fertilización empleada fue de 135,1; 146,3; 179,8; 14,1 y 17,3 kg/ha de N, P₂O₅, K₂O, MgO y SO₄ por hectárea, respectivamente.

Análisis de resultados

En el cuadro 4 se ofrecen los rendimientos promedio de cuatro cosechas, para las distintas variables agroindustriales evaluadas en esta prueba. Respecto al

rendimiento en kg de azúcar por tonelada métrica (kg azúcar/t), se observan resultados bastante satisfactorios, debido a que la región presenta buenas características para que la caña madure. Esta variable es una de las más importantes en este proceso de selección, junto con los rendimientos agrícolas.

En esta variable la variedad que mostro el mejor rendimiento fue LAICA 07-26, donde el promedio obtenido durante las cuatro cosechas fue de 132,14 kg de azúcar/t, superando en un 4,3% más de azúcar al mejor testigo y caña comercial de la región B 76-259. Cabe destacar que el testigo B 76-259 es un material sumamente azucarero, con características excelentes, y por este motivo se ha venido utilizando en el programa de hibridación como progenitor.

Otras variedades que sobresalen con buenos rendimientos de azúcar son LAICA

10-207 con 131,75 kg azúcar/ ton, y LAICA 12-340 con 125,17 kg, lo cual muestra una excelente maduración, sin embargo es importante determinar el momento preciso de maduración de cada una de ellas, para cosecharlas en el punto más alto de la curva de maduración.

Con respecto a la variable toneladas de caña por hectárea, en el cuadro cuatro se observa que las variedades más sobresalientes fueron LAICA 07-26, LAICA 12-340, LAICA 05-805 y LAICA 08-22, las cuales superaron entre un 6,91 % y un 17,27 %, al testigo comercial B 76-259.

Este es un aspecto vital, ya que la región es conocida por tener buenos rendimientos industriales, pero bajo el tonelaje (región baja de Turrialba), y por ende la búsqueda de variedades para esta región está orientada en materiales de alto tonelaje.



Cuadro 4.

Rendimientos agroindustriales en la evaluación de 14 variedades de caña de azúcar en finca Canadá, Atirro, Turrialba, promedio cuatro cosechas (2016-2019)

Variedad	Kg azúcar /t*		t caña/ha*		t azúcar/ha*		PRT	Relación sacarosa**
LAICA 07-26	132,17	a	109,71	a	14,5	a	122,47	7,57
LAICA 12-340	125,17	ab	109,48	a	13,7	ab	115,46	8,01
LAICA 05-805	120,78	ab	105,6	ab	12,7	abc	107,01	8,33
LAICA 08-22	120,31	ab	100,02	abc	11,9	abcd	100,51	8,41
B 76-259	126,65	ab	93,55	abcde	11,8	abcd	100,00	7,90
LAICA 12-344	122,7	ab	95,44	abcd	11,7	bcd	98,65	8,17
LAICA 10-664	118,37	ab	97,67	abcd	11,6	bcde	97,97	8,42
LAICA 10-207	131,75	ab	87,76	abcde	11,5	bcde	97,38	7,61
LAICA 12-337	117,21	b	92,07	abcde	10,8	cdef	91,05	8,54
LAICA 12-339	122,02	ab	81,61	bcde	9,97	cdef	84,21	8,19
LAICA 07-309	121,38	ab	80,47	cde	9,71	def	82,01	8,29
B 77-95	122,58	ab	76,76	cde	9,44	def	79,73	8,13
LAICA 09-278	120,02	ab	70,62	de	8,95	ef	75,59	7,89
LAICA 03-805	122,22	ab	70,62	e	8,67	f	73,23	8,15
Promedio	123,10		90,81		11,21			
% CV	4,76		10,45		9,64			

*Promedios con la misma letra no se diferencian estadísticamente; ^{ns} significa que no hay diferencias estadísticas significativas.
** Relación sacarosa se refiere a la cantidad de caña en toneladas, necesaria para producir 1 tonelada de azúcar.

En el promedio de las cuatro cosechas, las variedades más sobresalientes de esta prueba fueron LAICA 07-26 y LAICA 12-340, las cuales superaron en un 22,47% y un 15,46% respectivamente en producción de toneladas de azúcar por hectárea, al mejor testigo comercial que fue la B 76-259. Estas dos variedades es importante establecerlas semicomercialmente, para ir conociendo mejor su comportamiento y el manejo más adecuado en esta región, así como los ambientes más idóneos respecto a altitud, orden de suelo, edad a cosecha y floración, el cual es un punto vital debido a que ambas variedades florecen entre un 20 y 30%.

Con relación a la variedad LAICA 07-26, la experiencia obtenida en diferentes pruebas regionales en condiciones diversas de ambiente, es que la misma requiere suelos de fertilidad alta.

Las variedades LAICA 05-805 y LAICA 08-22 mostraron rendimientos de azúcar por hectárea superiores a la B76-259; sin embargo, este aumento obedece principalmente a que producen un poco más de caña por hectárea, pero su rendimiento en kilogramos de azúcar por tonelada es más bajo, por lo tanto, hay que valorar un poco más, que tan conveniente sería multiplicarlas a nivel de productor. Es oportuno destacar, que la variedad LAICA 05-805 se ha comportado bien en diferentes localidades de la región cuya altitud varía entre 600 – 1.000 msnm, además, al productor le gusta esta variedad por su buen despaje, sanidad y buena cepa.

Por otra parte, cabe mencionar que las variedades LAICA 12-340, LAICA 05-805, LAICA 10-207 y LAICA 07-26, así como otras variedades sigla LAICA que no fueron establecidas en esta prueba, están

en proceso de evaluación en una finca de Hacienda Juan Viñas a 1.300 msnm y en condiciones de suelo y clima diferentes a Turrialba.

Prueba comparativa de 11 variedades de caña de azúcar en el CATIE Turrialba, Cartago

Este ensayo se estableció el 15 de junio del año 2018 en una finca propiedad del CATIE, distrito Turrialba, cantón Turrialba, provincia de Cartago. El área experimental se ubica a una altitud de 648 msnm (9°53´ latitud norte y 83°40´ longitud norte), con una precipitación anual promedio de 2.430,03 mm, con temperaturas promedio máximas de 32,0 °C y mínimas de 15,7 °C. El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar, con cuatro repeticiones, donde la parcela está constituida por 7 surcos de 6 m de largo, con una separación entre surcos de 1,7 m, para un área total por parcela de 71,4 m , la cual se cosechó y se pesó en su totalidad.

El suelo se clasifica como un Inceptisol, la fertilización empleada fue la siguiente: 135,1, 146,3, 179,8, 14,1 y 17,3 kg/ha de N, P₂O₅, K₂O, MgO y SO₄ por hectárea, respectivamente. En el estudio se están evaluando 7 variedades nacionales y 3 variedades extranjeras, además del testigo regional B76-259. La cosecha (caña planta) se realizó a los 9 meses de edad, y la primera soca se realizó a los 12 meses.

Análisis de resultados

En el promedio de dos cosechas (cuadro 5), se observa como 8 de las variedades en este estudio están superando al testigo

comercial B 76-259, siendo materiales azucareros y con excelente tonelaje.

En la variable kg de azúcar por tonelada, 7 variedades superaron al testigo comercial B 76-259, a pesar de que este es un material muy azucarero. En la variable t caña/Ha, solo LAICA 07-26 no supero al testigo, lo cual nos indica que los materiales seleccionados en el ensayo, son de muy buena cepa, con alto tonelaje; y que LAICA 07-26 es un material para suelos de alta fertilidad, tal como se indicó anteriormente.

La variedad LAICA 04-250, fue superior estadísticamente al testigo en la variable toneladas de caña por hectárea, obteniendo un resultado de 172,64 toneladas, respecto a 117.08 toneladas que produjo la B 76-259. Otras variedades que destacaron en producción de caña por hectárea son RB 98-710, LAICA 12-340, RB 96-1003 y LAICA 10-207.

En la variable de rendimiento en kilogramos de azúcar por tonelada, las mejores variedades son LAICA 10-207, LAICA 08-390, LAICA 07-203, LAICA 12-340 y RB 98-710, sin embargo la diferencia respecto al testigo no fue estadísticamente significativa.

La variedad LAICA 12-340 ha ofrecido resultados muy buenos, donde por la época de cosecha no ha presentado floración, y por ende se mantiene con rendimientos en toneladas de azúcar por hectárea superiores en un 29,13%, al obtenido con el testigo regional, lo que la coloca como una opción en pruebas semicomerciales, teniendo en cuenta la época adecuada de cosecha y siembra para evitar la floración.

Respecto a las variedades LAICA 10-207, LAICA 08-390, LAICA 07-203 y RB 98-710, estas han mostrado tener buenas características para la región baja de Turrialba, son materiales azucareros y con buenos rendimientos de campo, una cantidad considerable de productores las tienen en sus fincas y han encontrado muy buenos resultados. De manera especial se destaca la variedad LAICA 07-203, por poseer tallos gruesos, tolerancia a suelos de fertilidad baja, con buen rendimiento agrícola e industrial, así como una amplia capacidad de adaptación a diferentes pisos altitudinales, desde los 600 - 1.300 msnm.

Por su parte, LAICA 05-805 y RB 96-1003 son variedades muy interesantes que tienen un rendimiento industrial un poco bajo, pero de cepa excelente, y se tiene que ubicar en otra época de cosecha, para aprovechar el máximo de la variedad.



Cuadro 5.

Rendimiento Agroindustrial en la prueba comparativa de 11 variedades de caña de azúcar en el CATIE Turrialba, promedio dos cosechas (2019-2020)

Variedad	Kg azúcar /t*		t caña/ha*		t azúcar/ha*		PRT	Relación sacarosa**
RB 98-710	116,91	ns	159,62	ab	18,72	ns	149,40	8,53
LAICA 04-250	103,38	ns	172,64	a	17,87	ns	142,62	9,66
LAICA 12-340	115,98	ns	138,63	abc	16,18	ns	129,13	8,57
RB 96-1003	103	ns	153,23	abc	16,09	ns	128,41	9,52
LAICA 07-203	119,2	ns	128,03	abc	15,27	ns	121,87	8,38
LAICA 10-207	120,63	ns	124,48	abc	15,11	ns	120,59	8,24
LAICA 08-390	119,84	ns	122,9	abc	14,96	ns	119,39	8,22
LAICA 05-805	112,23	ns	118,53	bc	13,42	ns	107,10	8,83
B 76-259 (T)	106,81	ns	117,08	bc	12,53	ns	100,00	9,34
B 76-385	103,96	ns	117,98	bc	12,33	ns	98,40	9,57
LAICA 07-26	116,32	ns	104,95	c	12,19	ns	97,29	8,61
Promedio	112,57		132,55		14,97			
% CV	4,53		9,46		11,73			

*Promedios con la misma letra no se diferencian estadísticamente; ns significa que no hay diferencias estadísticas significativas.
** Relación sacarosa se refiere a la cantidad de caña en toneladas, necesaria para producir 1 tonelada de azúcar.

Conclusiones

Las variedades B 76-259, B 77-95 y H 77-4643 han sido los materiales más valiosos en la región en los últimos 19 años, y para este último periodo del censo estos tres materiales componen el 66,17% del área cañera de la región Turrialba.

La región de Turrialba cuenta actualmente con siete materiales clasificados como comerciales B 76-259, H 77-4643, LAICA 04-250, B 77-95, B 76-385, LAICA 07-203 y H 68-1158, las cuales componen el 86,5% del área cañera.

En estos momentos existen en esta región 17 ensayos de diferentes fases, en donde se están evaluando variedades nacionales y

extranjeras, lo cual demuestra que existe una investigación dinámica y permanente en el tiempo, con respecto a la búsqueda de nuevas variedades.

Los resultados obtenidos con la investigación de nuevas variedades para la región de Turrialba son satisfactorios, lo que ha permitido generar materiales comerciales como LAICA 04-250 y LAICA 07-203 para la zona alta y para la zona baja se tienen las variedades LAICA 07-203, LAICA 05-805, LAICA 12-340, LAICA 10-207 y LAICA 07-26, los cuales están en proceso de crecimiento en cobertura de área cultivada en las fincas de los productores e ingenio.

Bibliografía

Calderón, G. Durán, J.R. Carvajal, P. 2018. *Estudio de competición de 14 variedades nacionales y extranjeras de caña de azúcar (Saccharum spp.)*. Promedio de tres cosechas. Canadá de la Suiza, Turrialba. En: VII Congreso Tecnológico del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar. Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar. Del 29 al 31 de agosto del 2018. Colegio Agropecuario de San Carlos, Santa Clara Florencia, Alajuela Costa Rica.

Chaves, M. 2018. *Variedades de caña de azúcar sembradas comercialmente en la Zona Turrialba (Turrialba – Juan Viñas), Costa Rica, durante el periodo 1986-2016 (30 años)*. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA-LAICA), San José, Costa Rica. Diciembre 2018.

Durán, J. Carvajal, JP. Villalobos, C. 2018. *Proceso de selección y mejoramiento genético de variedades de la caña de azúcar en Costa Rica*. Brochure marzo 2018. LAICA-DIECA. Grecia, Costa Rica.



**Sabe a lo
que nunca
has probado**
Nuevas bebidas instantáneas



Bajo en calorías

Con extracto de
Stevia

Descubrí tu sabor