

Periodo 17 de mayo al 30 de mayo 2021

RESUMEN DE LAS CONDICIONES DE LA QUINCENA DEL 03 DE MAYO AL 16 DE MAYO

El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) con el apoyo del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar de LAICA (DIECA-LAICA), presenta el boletín agroclimático para caña de azúcar.

En este se incorpora el análisis del tiempo, pronósticos, notas técnicas y recomendaciones con el objetivo de guiar al productor cañero hacia una agricultura climáticamente inteligente.

En la figura 1 se puede observar, a partir de datos preliminares, el acumulado quincenal de lluvias sobre el territorio nacional.

Los distritos que sobrepasaron los 250 mm de lluvia acumulada en la quincena fueron Guápiles de Pococí, La Virgen de Sarapiquí, Río Nuevo de Pérez Zeledón y Savegre de Aguirre.

Los registros de lluvia de 128 estaciones meteorológicas consultadas muestran al martes 4 como el de mayor registro de lluvia acumulada. Por otra parte, el domingo 9 presentó los menores acumulados a nivel nacional, sin sobrepasar los 100 mm.

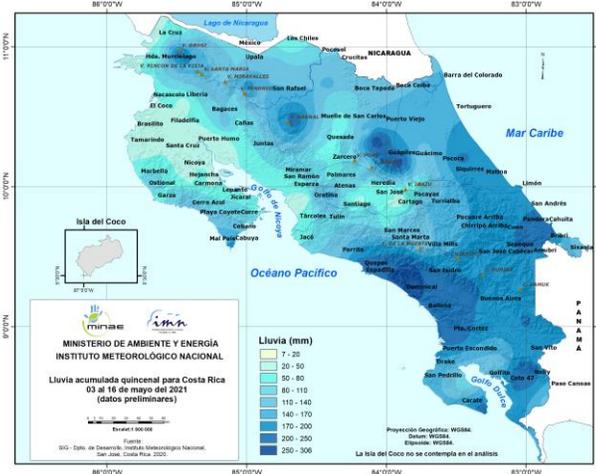


Figura 1. Valores acumulados de la precipitación (mm) durante la quincena del 03 de mayo al 16 de mayo del 2021.

PRONÓSTICO PARA LAS REGIONES CAÑERAS PERIODO DEL 17 DE MAYO AL 23 DE MAYO

De la figura 2 a la figura 9, se muestran los valores diarios pronosticados de las variables lluvia (mm), velocidad del viento (km/h) y temperaturas extremas (°C) para las regiones cañeras. Se prevé una semana con condiciones levemente menos lluviosas de lo normal en Sur, Turrialba, Valle Central Este y Valle Central Oeste; así como más cálidas en Chorotegea Este, Chorotegea Oeste y Puntarenas. De forma que las lluvias se esperan a mediados de mitad de semana.

La velocidad del viento se mantendrá sutilmente más ventosa de lo normal en el país; con mayor intensidad en Guanacaste Oeste, Guanacaste Este y Región Norte. Durante la semana predominará el viento del Este, a excepción del Sur donde no será tan marcado con incursión del Oeste. Mientras la temperatura media se mostrará ligeramente arriba de lo normal en las regiones cañeras.

IMN

www.imn.ac.cr
2222-5616

Avenida 9 y Calle 17
Barrio Aranjuez,
Frente al costado Noroeste del
Hospital Calderón Guardia.
San José, Costa Rica

LAICA

www.laica.co.cr
2284-6000

Avenida 15 y calle 3
Barrio Tournón
San Francisco, Goicoechea
San José, Costa Rica

“El país inicia y finaliza la semana con condiciones secas debido a la incursión del polvo del Sahara.”

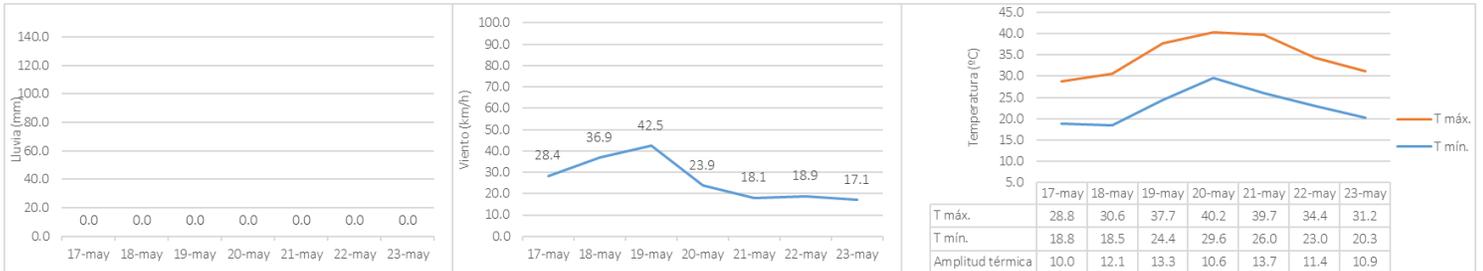


Figura 2. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 17 de mayo al 23 de mayo en la región cañera Guanacaste Este.

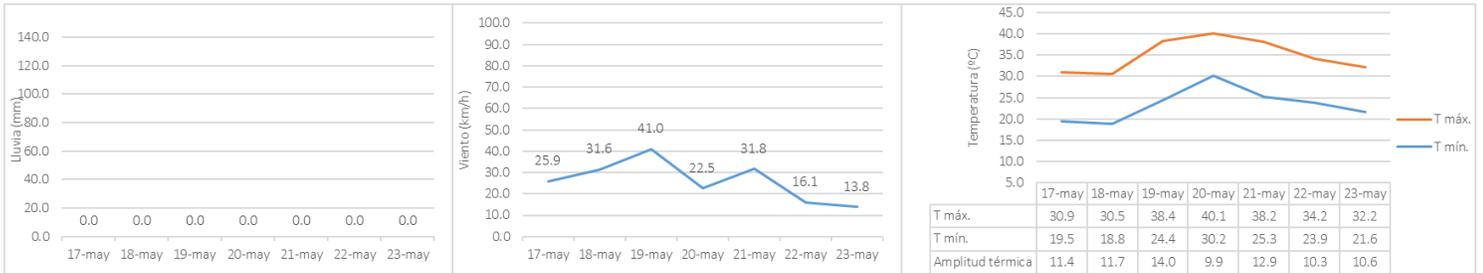


Figura 3. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 17 de mayo al 23 de mayo en la región cañera Guanacaste Oeste.

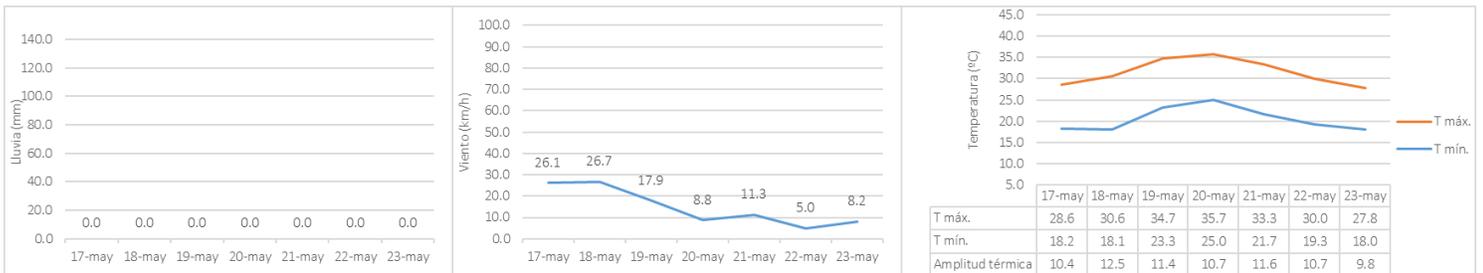


Figura 4. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 17 de mayo al 23 de mayo en la región cañera Puntarenas.

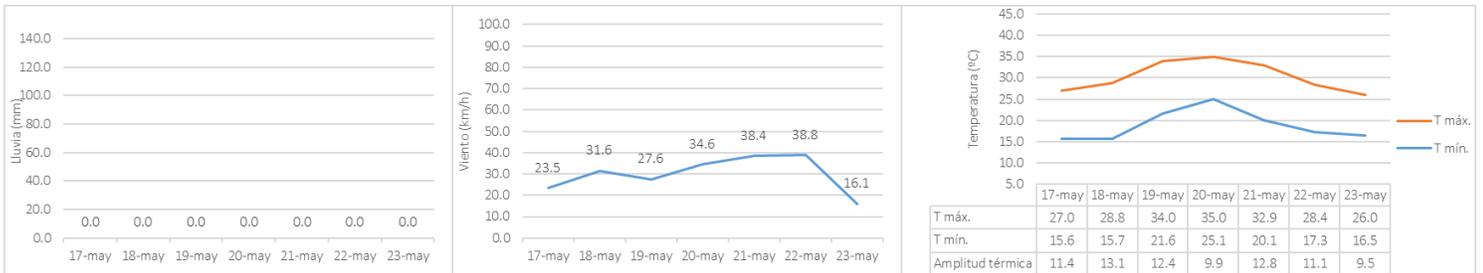


Figura 5. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 17 de mayo al 23 de mayo en la región cañera Zona Norte.

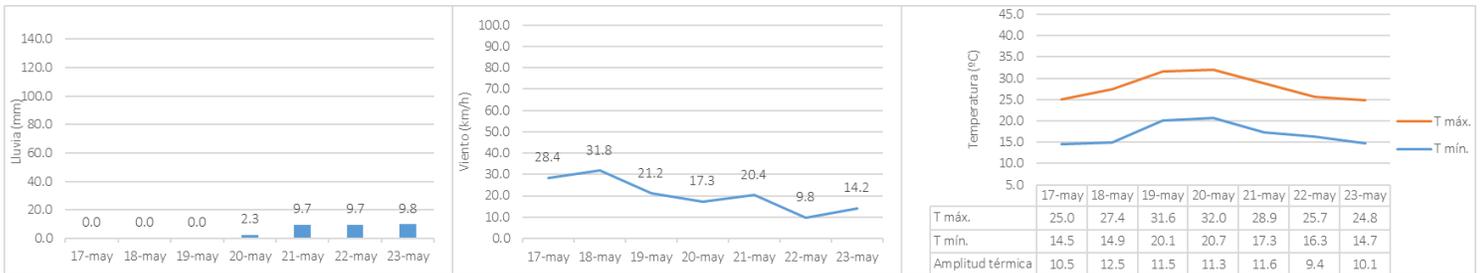


Figura 6. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 17 de mayo al 23 de mayo en la región cañera Valle Central Este.

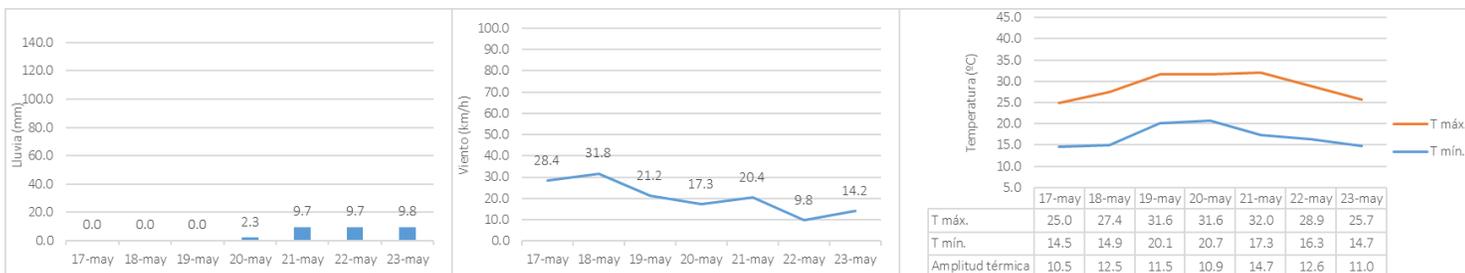


Figura 7. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 17 de mayo al 23 de mayo en la región cañera Valle Central Oeste.

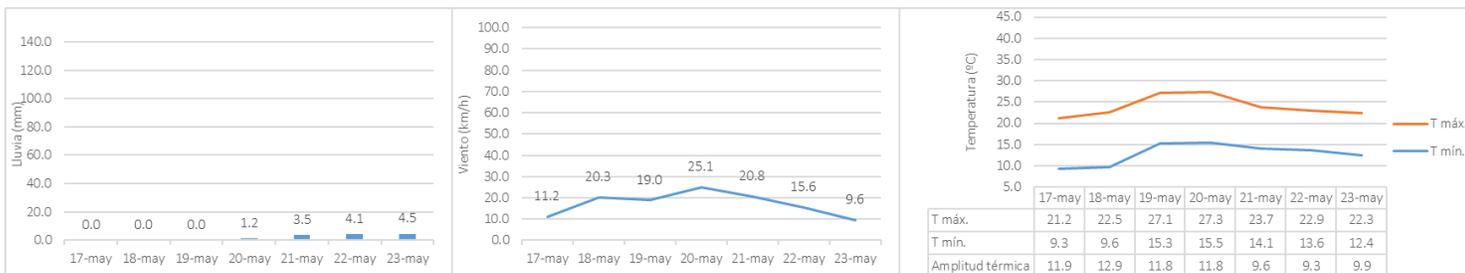


Figura 8. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 17 de mayo al 23 de mayo en la región cañera Turrialba.

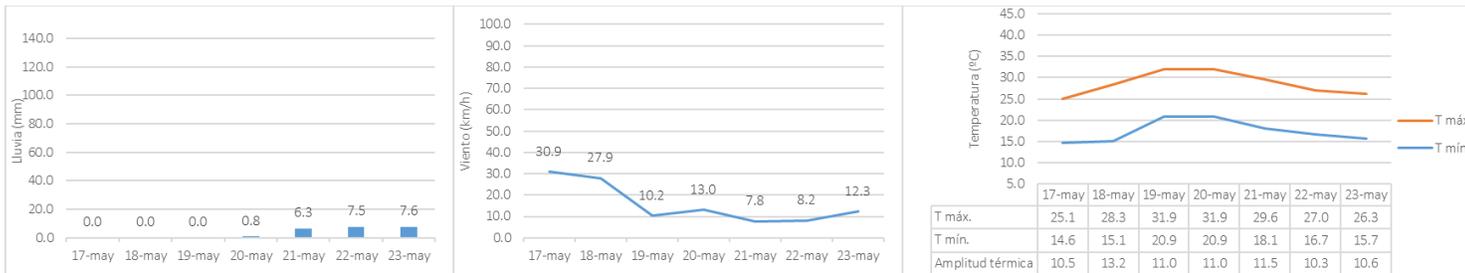


Figura 9. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 17 de mayo al 23 de mayo en la región cañera Zona Sur.

TENDENCIA PARA EL PERIODO DEL 24 DE MAYO AL 30 DE MAYO

Se prevé una semana levemente más lluviosa de lo normal, particularmente en la región Sur. Las condiciones ventosas se mantendrán sutilmente por arriba de lo normal en Guanacaste Este, Guanacaste Oeste, Valle Central Este, Valle Central Oeste y Turrialba; así como viento normal para la época en la región Sur. La temperatura promedio se mantendrá vagamente sobre lo normal en las regiones cañeras.

HUMEDAD DEL SUELO ACTUAL PARA REGIONES CAÑERAS

De acuerdo con Central America Flash Flood Guidance System (CAFFG), el cual estima la humedad en los primeros 30 cm de suelo, durante la semana del 10 al 16 de mayo de 2021 los suelos de la Región Caribe, Zona Norte, Valle Central y la Zona Sur presentaron porcentajes de humedad relativamente altos, a partir del miércoles se presentaron condiciones lluviosas en estas regiones, lo cual hizo que aumentara el contenido de agua en el suelo. Las regiones del Pacífico Central y Pacífico Norte presentaron porcentajes bajos de humedad durante la semana.

Como se observa en la figura 11, la Región de Guanacaste Oeste presenta entre 15% y 60% de saturación, mientras que la Región de Guanacaste Este tiene entre 15% y 75%. La Región Puntarenas está entre 15% y 45%, la Región Valle Central Oeste se encuentra entre 30% y 60% y la Región Valle Central Este presenta entre 30% y 45%.

El porcentaje de humedad de la Región Norte está entre 30% y 90%; la Región Turrialba Alta (> 1000 m.s.n.m.) tiene entre 45% y 100% y la Región Turrialba Baja (600-900 m.s.n.m.) presenta entre 45% y 90%. La Región Sur varía entre 0% y 100% de humedad.

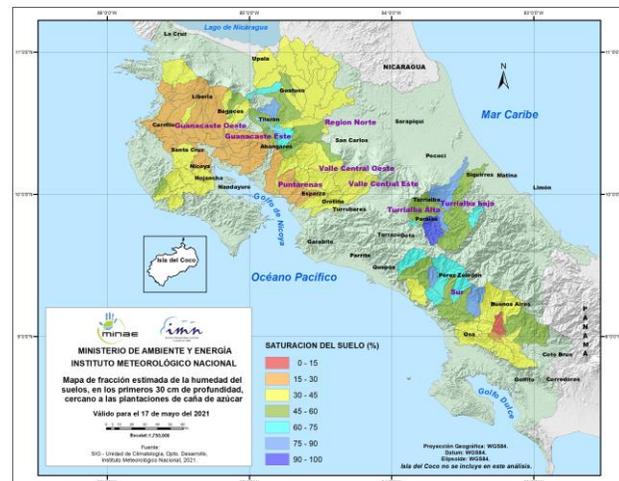


Figura 11. Mapa de fracción estimada de la humedad en porcentaje (%), en los primeros 30 cm de profundidad, cercana a las plantaciones de caña de azúcar, válido para el 17 de mayo del 2021.

DIECA Y EL IMN LE RECOMIENDAN

Mantenerse informado con los avisos emitidos por el IMN en:

- @IMNCR
- Instituto Meteorológico Nacional CR
- www.imn.ac.cr

CRÉDITOS BOLETÍN AGROCLIMÁTICO

Producción y edición del Departamento de Desarrollo
Meteoróloga Karina Hernández Espinoza
Ingeniera Agrónoma Katia Carvajal Tobar
Geógrafa Nury Sanabria Valverde
Geógrafa Marilyn Calvo Méndez

Modelos de tendencia del Departamento de
 Meteorología Sinóptica y Aeronáutica

INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL

NOTA TÉCNICA

Estrés mineral y caña de azúcar en Costa Rica

Ing. Agr. Marco A. Chaves Solera, M.Sc.

chavessolera@gmail.com

Especialista en el cultivo de la Caña de Azúcar

Mucho se habla y comenta habitualmente en torno a las condiciones, razones y circunstancias que afectan, impactan y provocan que las expectativas y planes previstos de producción no lleguen muchas veces a cumplirse a cabalidad en lo agrícola ni en lo industrial, con el resultado económico no deseado implícito. Esta situación genera por lo habitual desmotivación y dudas sobre la capacidad, realidad pragmática y utilitaria de la tecnología generada, disponible, recomendada e implementada en el campo. Los juzgamientos apuntan por lo general a que las nuevas variedades sembradas no sirven, no producen y son inferiores a las más antiguas; se aduce con gran convicción por parte de un segmento no despreciable de agricultores, que “las variedades viejas eran más agradecidas, producían más haciéndoles menos y echándoles poco”. También se acredita que “los productos agroquímicos actuales, tales como fertilizantes y herbicidas no funcionan igual, pues son más caros y menos efectivos en relación a los de antes”.

Ante esta realidad del campo, surge siempre la inquietante y razonable duda para todos, sean técnicos, productores y empresarios, sobre ¿Cuánta razón tiene y lleva el agricultor en esos juzgamientos? La verdad es que mucho podría aducirse y argumentarse al respecto para tratar de dar una respuesta objetiva, apegada a factores medibles y comprobables, y no apenas sentimentales, fantasiosos y hasta hepáticos, como en algunos casos lamentablemente sucede; pues también, hay que reconocer, están quienes siempre están en contra de todo lo moderno y actual.

Procurando encontrar respuestas convincentes a lo no explicable o en su defecto no entendible, y menos aún demostrable, las causas del deterioro, daño o afectación son en estos casos fácilmente atribuidas a los denominados “factores de estrés”; figuras un tanto abstractas y de uso tan común y

ordinario hoy en día para explicar la disfunción entre lo planificado, lo implementado y lo obtenido en el campo. Con el objetivo primordial de abordar y profundizar un poco en el tema vinculado con el estrés en las plantas, se desarrolla seguidamente lo concerniente al “estrés mineral o nutricional”, el cual es novedoso y tiene también vínculo potencial de estar directamente relacionado con el cultivo de la caña de azúcar; esto considerando que la planta de caña se cultiva en Costa Rica en condiciones muy heterogéneas y diferentes en todos los aspectos, incluyendo los nutricionales asociados a la físico-química de los suelos. Como se comprenderá, el tema por su naturaleza y contenido no es fácil de interpelar, pero se tratará de orientar al objetivo pretendido.

Concepto de estrés mineral

Hoy en día es muy común que cualquier actividad humana integre y vincule el “estrés” como un factor importante asociado al quehacer de todos los seres biológicos, independientemente de que sean plantas, animales o seres humanos; lo paradójico es que hasta en factores no bióticos el término es aplicado en la actualidad, al referirlo a la “fatiga de materiales”. Por lo general se atribuye el estrés más a condiciones adversas provocadas y favorecidas por el factor clima.

En los nuevos tiempos pareciera que la conocida y tradicional ecuación de la producción agrícola (Chaves 2020d), definida por los factores que se mencionan seguidamente, debiera incluir para ser consecuente con la realidad del campo el factor e correspondiente a “estrés”, quedando como sigue:

$$R = f(c, p, h, s, t, e)$$

Donde:

R = rendimiento; cl = clima; p = planta; h = hombre; s = suelo; t = tiempo y e = estrés

Se coloca esa sugestiva y cuestionable “adición” no por su validez, certeza y pertinencia, sino básicamente por conveniencia con el fin de dejar expuesta y planteada la duda y cuestionamiento de si el “estrés” es causa o por el contrario un efecto resultante de la incidencia de otro factor. El tema es profundo e interesante, pero sobre todo importante para poder atenderlo y procurar contornarlo, evadirlo o en su caso simplemente aceptarlo como fenómeno natural con sus limitantes e implicaciones. Lo cierto del caso es que muchas veces el concepto es utilizado hasta de manera irresponsable para justificar la inoperancia o ausencia de capacidad en cumplir las metas de producción establecidas. El hecho de ser una causa (¿o efecto?) difícil de medir, provoca que sea colocado como el motivo y razón de las desavenencias en productividad; pues resulta muy sencillo decir “el estrés fue la causa y motivo de que la plantación se viera afectada en su capacidad potencial de producción”.

En primera instancia para ubicarse en el contexto correcto, resulta obligado conocer y definir qué se entiende por estrés. En torno al tópico se encuentran definiciones variadas en su calidad, contenido y profundidad, como son entre otras las siguientes:

- ❖ “El estrés es el estado, en el cual, la planta no realiza sus funciones fisiológicas de manera normal lo cual detiene su crecimiento y desarrollo, limitando la productividad de los cultivos.” Wikipedia (2021).
- ❖ “Cualquier factor ambiental potencialmente desfavorable para los organismos vivos.” Levitt (1972).
- ❖ “El estrés es la exposición a condiciones extraordinarias desfavorables.” Larcher (1986).
- ❖ “El estrés es una situación que impide a las plantas expresar su máximo potencial de rendimiento.” INTAGRI (2021).
- ❖ “...el estrés de las plantas como cualquier tipo de situación ambiental adversa que les afectan tanto de modo fisiológico como bioquímico.” FERTILIZANTE.info (2021).
- ❖ “Reacción fisiológica del organismo en el que entran en juego diversos mecanismos de defensa para afrontar una situación que se percibe como amenazante o de demanda incrementada.”

- ❖ “El estrés ambiental se define como un factor externo que ejerce una influencia negativa sobre la planta.” Castro (2017).
- ❖ “Se debe a un factor externo que ejerce una influencia negativa sobre el crecimiento y el desarrollo de las plantas, ante el cual tienen que defenderse para poder adaptarse y sobrevivir.”
- ❖ “Condición capaz de producir una influencia desventajosa en los procesos fisiológicos de las plantas.”
- ❖ “...es la pérdida de homeostasis, que consiste en el máximo equilibrio entre los organelos celulares y el potencial de trabajo que una célula puede tener. Cualquier circunstancia que afecte el equilibrio celular es una situación de estrés que puede ser recuperable, reversible o totalmente irreversible y ocasionar la muerte del vegetal.” Navarro (2019) citado por García y Jiménez (2019).
- ❖ “El término estrés lleva implícito la idea de daño y aún la muerte de la planta o parte de ella, si se mantiene la perturbación.”
- ❖ “Estrés implica alejamiento de alguna norma en que un organismo está libre de estrés.”
- ❖ “conjunto de condiciones capaces de producir una influencia desventajosa en los procesos fisiológicos de las plantas.”
- ❖ “...cómo las plantas responden frente a condiciones ambientales desfavorables.”
- ❖ “Estrés es un estado de la planta bajo la condición de una fuerza aplicada (causa).”
- ❖

Como se infiere de todas esas acepciones, el concepto interpretado por diferentes autores gira básicamente sobre lo mismo, aunque expresado de diferente manera, donde destacan varias palabras claves que son de uso común y generalizado en las definiciones, como es el caso de: factor, desventaja, daño, influencia negativa, perturbación, fisiológica, ambiental, productividad, rendimiento, entre otras.

Siendo consecuente con lo anterior, el estrés puede interpretarse como, un “Estado en el cual un factor externo ocasiona un efecto desequilibrante con afectación en grado variable de las funciones fisiológicas y metabólicas, y un impacto negativo sobre el crecimiento y el desarrollo normal de las plantas, limitando con ello su productividad”.

Es interesante señalar que de la revisión de literatura sobre el tema se desprende, sin embargo, que algunos autores consideran que aún las pequeñas modificaciones y cambios acontecidos en las vías metabólicas, respuestas al crecimiento y patrones de desarrollo de la planta, son respuestas y efectos, no causas, inducidas por circunstancias y factores estresantes; aduciendo inclusive que todos los agentes pueden actuar como factores estresantes, produciendo estrés y una acción específica en el vegetal. En lo etimológico, se tiene que la palabra Estrés proviene del latín Stringere: apretar; como también Stress se refiere a: fatiga de material.

Categorías de estrés

En torno a este tema y basados en las propias interpretaciones, intereses y acepciones esgrimidas y adoptadas por diversos y muy calificados autores, se comprueba que la cantidad y calidad de factores y condiciones calificadas y categorizadas como estresantes o generadoras de estrés son muy disímiles, como se anota en el Cuadro 1, donde los hay de carácter ambiental, climático, biológico, químico, antrópicos, contextualizados y clasificados genéricamente en factores bióticos y abióticos. El estrés vinculado con causas asociadas con la temperatura el agua y el oxígeno son universales para todos los seres vivos inclusive el ser humano.

Factor	Condición						
	Bajo	Alto	Déficit	Exceso	Calidad	Presencia	Ausencia
Agua (hídrico)			X	X			
Temperatura (térmico)	X	X					
Viento (eólico)	X	X					
Luz (lumínico)	X	X			X		
Minerales			X	X			
Sales			X	X			
Elementos Pesados			X	X			
Radiación					X		
Plagas						X	X
Patógenos						X	X
Herbicidas	X	X					
Contenido O2	X	X					
Contenido CO2	X	X					
Presión	X	X					
Magnético	X	X					
Eléctrico	X	X					
Químico						X	X

Fuente: el autor.

El efecto del estrés visualizado, percibido y manifestado como impacto, adquiere dimensiones diferentes expresadas de forma variable, pero de manera sencilla y comprensible, como: intensidad (alta-baja), presencia-ausencia, magnitud (alta-

baja), cantidad (déficit-exceso), calidad; lo cual da connotaciones variables de acuerdo con la percepción que pueda tenerse de los mismos, las cuales son muchas veces hasta subjetivas si no se cuenta con un marco referencial conveniente visualizado en escalas de medición. Por ejemplo, una temperatura alta o baja es relativa de acuerdo a lo que cada quien estime según su parecer particular, motivo por el cual lo prudente y razonable es contar siempre con una escala referencial conveniente bien calibrada y validada.

En el caso específico de la caña de azúcar en Costa Rica el tema del estrés ha sido abordado y desarrollado con alguna especificidad en lo concerniente a los factores hídrico (Cadet 2019; Chaves 2019d, 2020b), térmico (Chaves 2020a), eólico (Chaves 2020c), edáfico (Chaves 1999, 2017b, 2019c, 2020fhij) y nutricional (Montes de Oca, Mata y Chaves 1996; Chaves 1999, 2017a); aunque es claro que debe enfatizarse más virtud de su importancia y actualidad ante el inminente cambio climático en desarrollo. El estrés por déficit hídrico es la principal adversidad a la que tienen que hacer frente la mayoría de las especies vegetales, y la caña de azúcar no es la excepción. El estrés ambiental es muy importante ya que limitará la distribución de las especies vegetales pues, un mismo factor no es igual de estresante para todas ellas.

Resistencia al estrés

En torno a este tema hay mucho que señalar, sin embargo, Levitt (1972) expresa al respecto, que:

“...el grado de resistencia que se puede desarrollar variará, por supuesto, con el organismo, pero el tipo de resistencia también puede variar. Dos tipos básicos son teóricamente posibles:

- La evitación del estrés es la resistencia al estrés al evitar el equilibrio termodinámico con el estrés. La planta con evitación es capaz de excluir el estrés, parcial o totalmente, ya sea mediante una barrera física que aisle a sus células vivas del estrés, o mediante una exclusión en estado estable del estrés (una barrera química o metabólica). Al evitar el estrés, también evita la tensión.
- La tolerancia al estrés es la resistencia al estrés mediante la capacidad de llegar al equilibrio termodinámico con el estrés sin sufrir lesiones. La planta con tolerancia al estrés es capaz de prevenir, disminuir o reparar la tensión inducida por el estrés.

Aunque tolera el estrés, puede evitarlo o tolerarlo. La resistencia al estrés, por lo tanto, incluye los siguientes componentes ilustrados en el Cuadro 2.”

Cuadro 2. Doble naturaleza de la resistencia al estrés.			
N°	Estrés	Condición de resistencia de las células vegetales expuestas al estrés y que sobreviven debido a:	
		Evitación	Tolerancia
1	Temperaturas bajas (frías)	Cálido	Frío
2	Temperaturas bajas (congelación)	Descongelamiento	Congelamiento
3	Altas temperaturas	Frío	Caliente
4	Sequía	Alto potencial agua	Bajo potencial agua
5	Radiación	Baja absorción	Alta absorción
6	Sales (alta concentración)	Baja concentración	Alta concentración
7	Inundación (deficiencia O ₂)	Alto contenido O ₂	Bajo contenido O ₂

Fuente: Levitt (1980).

El tópico vinculado con la resistencia al estrés se vuelve claro cuando en el análisis se incluyen, vinculan y consideran todos los elementos relacionados con tensiones específicas, lo cual será, sin embargo, materia para otro artículo donde se amplíen todos los aspectos que participan en ese comportamiento.

Nutrientes esenciales y estrés nutricional

El estrés denominado nutricional o mineral resulta de características muy particulares y especiales, tal vez poco comentado como factor de tensión para las plantas, debido a la tendencia de concentrar y centralizar la condición de estrés casi exclusivamente en factores ambientales y sobre todo asociados al clima. El “estrés nutricional” viene en lo específico orientado a tratar de comprender la tensión que genera sobre las plantas, en este caso de caña de azúcar, el contenido mineral existente en un suelo; lo cual se vincula con ambientes de déficit o exceso de las concentraciones y contenidos presentes, donde la naturaleza y actividad físico-química y biológica del nutriente es determinante en los efectos provocados.

Como acontece con cualquier ser vivo, la planta de caña tiene la imperiosa y natural necesidad de satisfacer a plenitud sus necesidades biológicas elementales básicas, concebidas, manifestadas y expresadas en actividades fisiológicas y metabólicas determinadas en alto grado por su componente genético y favorecidas por el ambiente donde se encuentren ubicadas las plantaciones comerciales (Figura 1). Lo anterior pese a ser la caña un vegetal rústico de características anatómicas, fisiológicas y genéticas únicas y excepcionales que

le proveen un potencial muy elevado de adaptación, como lo mencionara Chaves (2020g).



Figura 1. Nutrición balanceada resulta esencial para contrarrestar impacto por “estrés mineral”.

En este sentido debe admitirse que las condiciones y características del ecosistema en las cuales se desarrolla la actividad productiva y comercial vinculada con la agroindustria azucarera en Costa Rica, son muy diferentes y heterogéneas en casi cualquier factor sobre el que se establezcan indicadores y relaciones comparativas. Esta realidad restringe ostensiblemente poder conciliar, armonizar y generalizar sistemas de manejo y recomendaciones tecnológicas entre localidades productoras. Dicho de otra manera, es inválido y de muy limitado alcance procurar extrapolar resultados y recomendaciones técnicas entre regiones y localidades cañeras.

En el ámbito nutricional la situación prevaleciente no es nada diferente, pues las características físico-químicas y biológicas de los suelos sembrados de caña de azúcar son muy disímiles entre regiones, zonas y localidades productoras, como lo evidencia y demuestra el Cuadro 3 y Figura 2. Existen contenidos y concentraciones de algunos nutrientes que, vistos e interpretados como promedio regional, marcan muy bien las amplias diferencias prevalecientes entre ellos, lo cual cuando la información se desagrega en sitios geográficos más específicos, las variaciones se maximizan, extreman y hacen notar la significativa heterogeneidad prevaleciente, como lo demuestran Méndez y Bertsch (2012), Chaves (2019ab), Angulo, Rodríguez y Chaves (2020), Calderón y Chaves (2020), Barrantes y Chaves (2020) y Chaves y Barquero (2020).

Cuadro N° 3.

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

Región	N°	pH	cmol (+) / l				µg / ml						%	Sat (%)
	Muestras		Acidez	Ca	Mg	K	P	S	Zn	Cu	Mn	Fe	MO	Acidez
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 (1999)

Méndez y Bertsch (2012)



Figura 2. Suelo rojo del orden Ultisol con serios problemas de acidez.

Los indicadores asociados con la acidez del suelo son definitivamente los más incidentes y determinantes sobre la incubación y favorecimiento de condiciones de estrés mineral, lo cual es debido entre otras a las siguientes situaciones:

- Incremento en la condición de acidificación (pH bajo).

- Aumento de la Acidez Intercambiable (Al³⁺ + H⁺).
- Solubilidad y aumento en la actividad del Aluminio (Al³⁺).
- Elevación de la Saturación (%) por Acidez.
- Incremento en la Fijación de Fósforo (P).
- Incremento de la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Acidez Intercambiable).
- Solubilidad y aumento en la actividad del Hierro (Fe³⁺).
- Insolubilidad e indisponibilidad de nutrientes catiónicos esenciales (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺).
- Disminución de la Suma de Bases Intercambiables (Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺).
- Desequilibrios Catiónicos manifiestos (Ca/Mg, Ca/K, Mg/K, Ca+Mg/K).
- Insolubilidad e indisponibilidad de algunos Micronutrientes por variación de la acidez (pH).
- Aumento en la actividad de metales pesados.
- Afectación de la actividad microbial.

Cuadro 4. Caracterización química de los suelos (13.338 muestras) de 30 cantones cañeros de Costa Rica respecto a su condición de acidez.

Provincia / Cantón	N° Muestras	pH			Acidez ($Al^{3+} + H^+$)			Suma Cationes			CICE			Saturación Acidez		
		Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
		< 5,5	5,5 - 6,5	> 6,5	≤ 0,5	0,5 - 1,5	> 1,5	≤ 5	5 - 25	> 25	≤ 5	5 - 25	> 25	≤ 10	10 - 50	> 50
		Unidades			cmol(+)/l			cmol(+)/l			cmol(+)/l			%		
GUANACASTE	3.363															
Liberia	277	48	50	2	79	16	4	11	75	14	6	80	14	89	9	2
Carrillo	1.087	2	70	28	99	1	0	0	40	60	0	40	60	100	0	0
Cañas	1.216	2	59	39	98	1	0	0	40	60	0	39	60	100	0	0
Abangares	52	6	63	31	88	8	4	0	54	46	0	54	46	96	4	0
Bagaces	532	9	75	16	98	2	0	1	63	36	1	63	36	100	0	0
Santa Cruz	74	4	45	51	96	4	0	3	34	64	3	34	64	100	0	0
Nicoya	125	15	54	31	96	2	2	0	15	85	0	15	85	99	1	0
ALAJUELA	4.869															
Alajuela	714	34	56	10	73	20	7	18	80	1	12	86	1	79	18	3
San Carlos	1.690	74	24	1	52	29	19	33	65	2	22	76	2	61	31	8
Los Chiles	1.004	74	26	0	76	21	3	20	80	0	11	89	0	83	17	1
Atenas	41	85	12	2	37	27	37	10	68	22	2	76	22	59	34	7
Grecia	367	89	9	2	19	31	50	70	26	4	47	49	4	22	45	33
Naranjo	256	86	14	1	29	45	26	42	57	1	22	77	1	38	54	7
Poas	302	75	23	2	51	37	12	42	58	0	30	70	0	55	39	6
Valverde Vega	77	71	29	0	53	47	0	16	84	0	12	88	0	73	27	0
San Mateo	48	73	25	2	46	40	15	15	79	6	8	85	6	71	27	2
Palmares	97	78	20	2	42	15	42	15	73	11	2	86	12	53	38	9
San Ramón	273	81	19	0	53	32	15	30	69	1	21	78	1	58	35	7
CARTAGO	3.744															
Turrialba	879	72	25	2	41	36	23	29	68	3	20	77	3	54	39	7
Jiménez	963	75	25	0	41	39	20	35	65	0	22	78	0	53	44	3
Paraíso	759	60	27	13	50	17	33	14	83	3	4	93	3	60	32	8
Alvarado	487	46	53	2	73	25	2	36	64	0	30	69	0	74	26	0
Oreamuno	656	42	54	4	77	22	2	24	75	1	20	79	1	80	20	0
PUNTARENAS	628															
Puntarenas	359	22	50	28	90	10	0	3	29	67	2	30	68	97	3	0
Esparza	30	23	67	10	83	10	7	17	23	60	17	23	60	87	13	0
Montes Oro	53	42	58	0	81	17	2	23	60	17	23	60	17	77	23	0
Buenos Aires	186	60	36	4	57	29	14	13	63	23	7	69	24	78	15	6
SAN JOSÉ	630															
Pérez Zeledón	561	72	26	1	38	39	23	50	33	17	38	43	19	46	37	17
Puriscal	69	86	13	1	41	25	35	9	59	32	4	59	36	59	38	3
HEREDIA	104															
Santa Bárbara	104	42	46	12	73	22	5	22	76	2	16	82	2	74	25	1

Fuente: Elaborado por el autor con información de Méndez y Bertsch (2012)
CICE = Capacidad Intercambio Catiónico Efectiva.

El Cuadro 4 presenta un detalle particularizado de la caracterización química aplicada a 13.338 muestras de suelo analizadas procedentes de 30 cantones cañeros del país, indicando el porcentaje de incidencia de cuatro indicadores muy reveladores del estado de fertilidad de los mismos, como son: pH, Acidez Intercambiable, Suma de Bases Catiónicas, Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) y % de Saturación de Acidez (Méndez y Bertsch 2012). Previo a

cualquier interpretación o juzgamiento que se haga sobre dicha información, es necesario y pertinente indicar y tener presente lo siguiente:

- Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Suelos y Foliar del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica (CIA), sobre muestras recibidas en el periodo 2006-2010. Se utilizaron como soluciones extractoras KCl y Olsen

Modificado (NaHCO₃ 0,5 N, EDTA disódica 0,01 M y Superfloc 127, pH 8,5).

- Algunas muestras no provienen de puntos georreferenciados precisos, sino que están simplemente ubicadas geográficamente por cantón.
- La cantidad de muestras no es similar entre localidades, lo que resta representatividad.
- La toma de las muestras no fue homogénea, uniforme ni tomada bajo criterios protocolarios similares.
- Las muestras provienen de localidades y unidades productivas que desarrollan actividades agropecuarias diferentes en cuanto a manejo de plantaciones (ej. fertilización) y cultivos sembrados; por lo que no necesariamente corresponden a caña de azúcar.
- Las muestras proceden de extracciones del horizonte superior del suelo, correspondiente a los primeros 20 centímetros (0-20 cm).
- Los sesgos que puedan darse se “compensan” en alguna medida con la cantidad de muestras analizada.
- Los datos se organizan y presentan geográficamente por provincia y no por región cañera.
- Los valores dados en porcentaje, representan la cantidad relativa (%) de muestras analizadas que se ubican en cada una de las categorías planteadas según indicador evaluado.

Como se infiere de esa información, hay localidades cuya condición de Acidez Intercambiable es considerada alta y por tanto preocupante para los intereses y el potencial productivo agroindustrial de las empresas cañero-azucareras ubicadas en las mismas, como acontece en las localidades de Grecia (50%), Palmares (42%), Atenas (37%), Puriscal (35%) y Paraíso (33%) en relación a esa variable.

Aplicando el mismo criterio, se concluye que las plantaciones comerciales de caña sembradas en los siguientes cantones poseen problemas con pH bajos, entre los que están: Grecia (89%), Naranjo (86), Puriscal (86), Atenas (85), San Ramón (81), Palmares (78), Poas (75), Jiménez (75), San Carlos (74), Los Chiles (74), San Mateo (73), Perez Zeledón (72), Turrialba (72) y Valverde Vega (71%). Todos los valores son altos y limitantes.

No cabe la menor duda que tanto la insuficiencia como el exceso existente en las concentraciones de cada uno de los nutrientes que normalmente interactúan en la interface suelo-planta, provoca en principio en lo individual, un efecto directo por su presencia y actividad; como también indirecto al

actuar e intervenir de diferente forma (sinérgica-antagónica) sobre otros nutrientes, provocando un desbalance metabólico en la planta que es a su vez causa de tensión. Esa interacción se da mediante la activación o inactivación de mecanismos de solubilidad, insolubilidad, absorción, inhibición, acomplejamiento, fijación, entre otros, acontecidos tanto en el suelo como en el interior de la planta; los cuales, sumados a los factores ambientales, tornan compleja y de consecuencias muchas veces imprevisibles los efectos provocados sobre los cultivos.

Toxicidad

Es bien conocido por parte de los agricultores que, durante la práctica de la fertilización, pueden provocarse problemas por descuido, impericia o desconocimiento al incorporar más o menos nutrientes de los requeridos, favoreciendo la formación de un inconveniente estado de tensión y desbalance metabólico de la planta. En el caso particular de la caña de azúcar lo más común es la presencia de estados de tensión provocados por insuficiencia, déficit y desbalances nutricionales, que, por exceso y toxicidad, como si ocurre en otros cultivos.

En relación a las toxicidades en agricultura resulta válido y cierto aceptar que las mismas difícilmente se presentan en forma natural en el sistema agroproductivo, pues la mayoría son inducidas y provocadas durante el manejo de las plantaciones mediante el uso de agroquímicos, entre ellos principalmente los fertilizantes foliares que incorporan elementos menores, oligoelementos o micronutrientes como también se les llama. El origen es por esto antropogénico. El uso en demasía es la causa y su efecto se da a nivel de interacciones con otros nutrientes. La toxicidad nutricional puede por ello concebirse como un exceso de nutrientes presentes en la planta, la cual expresa características anormales visibles conocidas como síntomas. Es muy poco probable que los macro nutrientes (primarios y secundarios) aplicados al suelo, aún empleados en dosis superiores a las recomendadas, provoquen toxicidades; aunque todo tiene un límite permisible de tolerancia, pues no debe desconocerse que en su mayoría los fertilizantes son sales.

El Cuadro 5 expone de manera resumida los principales factores edáficos del suelo que favorecen la formación de estados de estrés a las plantas que no se encuentran adaptadas a los mismos, y que deben por ello enfrentar.

Cuadro 5. Condiciones principales del suelo que generan estrés mineral en las plantas.

Estres Mineral	Observaciones
Salinidad	Altas concentraciones de sales, mas frecuentemente Sodio.
Sodicidad	Una alta proporción (más del 10%)de Sodio adsorvido en los sitios de intercambio catiónico del suelo.
Toxicidades por metales pesados y aluminio	Prevalciente en suelos ácidos, en que esos metales van para la solución; también es común en suelos serpentínicos.
Deficiencias de metales micronutrimientos	Suelos calcarios, en que esos elementos son precipitados y su disponibilidad para las plantas es baja.
Bajas proporciones Ca ²⁺ / Mg ²⁺	Suelos serpentínicos con proporciones Ca ²⁺ / Mg ²⁺ en el orden de 1:1 o menor, en vez de las más comunes 2:1 a 3:1.
Baja fertilidad	Bajos niveles de nutrientes disponibles, especialmente Nitrógeno y Fósforo, más otros nutrientes.
Fuente: Epstein y Bloom (2006).	

Los efectos tóxicos se manifiestan a través de síntomas característicos que aparecen luego que el impacto sobre el desarrollo y la producción ya ha sido provocado, motivo por el cual lo prudente y razonable es actuar con previsión y diligencia. Algunos nutrimentos son en lo específico virtud de su naturaleza, actividad química y fisiológica desarrollada y efectos negativos provocados sobre los organismos vivos, de características muy especiales, como es el caso de las sales minerales, el sodio (Na⁺), aluminio (Al³⁺), hierro (Fe²⁺), manganeso (Mn²⁺), cobre (Cu²⁺) y en general los elementos conocidos como metales pesados, motivo por el cual se tratarán de manera específica a continuación.

Salinidad

La salinización de los suelos constituye un fenómeno de carácter natural que se da porque la evaporación excede el nivel de precipitación caída en un lugar, sumado a la actividad humana vinculada con la irrigación de plantaciones, la cual contribuye de manera ostensible en favorecer el proceso de salinización al contener sales disueltas que llegan a elevar el nivel del medio. Esto se puede ver además favorecido y agudizado por la presencia de condiciones inadecuadas de drenaje. En el país la salinidad no es un problema grave que este ocasionando problemas a las plantaciones de caña, pues, por el contrario, la mayor dificultad se tiene con la presencia de suelos ácidos; sin embargo, localidades bajas (<80 msnm) del Pacífico Central y Guanacaste con alta evapotranspiración e influencia

marina, podrían tener eventualmente algún grado de afectación por esta causa que no debe por ninguna razón desestimarse y descuidarse, pues bien podría ser creada.

En torno a este punto, aseguran Montes de Oca, Mata y Chaves (1996), que “Los suelos afectados por sales se desarrollan preferentemente en regiones similares a las de Guanacaste en donde las características climáticas, baja precipitación y temperatura alta, sumadas a las condiciones deficientes de avenamiento del suelo arcilloso promueve, la formación de suelos salinos en algunos Vertisoles.”

Esos investigadores encontraron con carácter estadístico altamente significativo para todas las variables biométricas evaluadas, al estudiar en condición de invernadero durante 7 meses consecutivos la respuesta de tres variedades comerciales de caña: NCo 310, PR 61-632 y SP 71-6180, en un suelo del orden Vertisol proveniente de Cañas, Guanacaste, al ambiente salino. Se incorporó en el estudio contenidos salinos provenientes de extractos saturados de suelo de 0,96, 8,4 y 16,2 dS/m. La conductividad eléctrica determinada en pasta saturada constituye el mejor indicador para medir el potencial osmótico del suelo, pues genera altos potenciales osmóticos con la consecuente menor disponibilidad de agua para la caña. El contenido salino de 16,2 dS/m ocasionó la muerte de todas las plantas en las tres variedades evaluadas, no logrando ninguna sobrevivir. En el valor de conductividad de 16,2 dS/m, se encontró un porcentaje de sodio intercambiable de 4,98% y

una relación Ca/Mg invertida, en la que el contenido de magnesio fue superior al contenido de calcio, 31, 11 y 23,85 cmol(+)/kg, respectivamente. Encontraron además que el contenido de sodio intercambiable aumentó al incrementarse los niveles de salinidad, lo que también ocurrió con los contenidos de sulfato, cloruro, magnesio y sodio. La variedad PR 61-632 se mostró como el clon con menor sensibilidad a las sales y, por tanto, mayor tolerancia a las mismas. Aseguran los autores a partir de los resultados obtenidos, que “En el caso del estrés hídrico, lo primero que se ve afectado son los procesos relacionados con el crecimiento y el metabolismo.”

Moreno (1991) citado por Montes de Oca y compañeros (1996), agrega al respecto, que “Los deterioros se presentan fundamentalmente por una desorganización en la estructura de las membranas y organelas por pérdida de la presión de turgencia.” Algunos autores afirman en torno al tema de la incidencia y el impacto, que con valores de conductividad por encima del nivel crítico de 4 dS/m, el crecimiento de la caña se reduce drásticamente. Se ha encontrado, asimismo, que valores de conductividad eléctrica menores de 2 dS/m no afectaron el crecimiento de la caña; entre 2 y 4 dS/m si se afectó el crecimiento en valores importantes.

La recuperación de suelos con problemas de salinidad se concentra en varias acciones, como son entre otras:

- Lixiviación de las sales por debajo de la zona radicular empleando agua de buena calidad sin sales.
- Usar técnicas de irrigación avanzadas que permitan reducir y minimizar el acúmulo de sales en el medio.
- Adicionar correctivos apropiados como el sulfato de calcio (yeso) para desplazar sodio y otras sales adsorbidas en el complejo de intercambio.
- Identificar especies o variedades tolerantes según sea el grado de salinización presente.

Concentraciones internas altas de sales en la planta, presentan el riesgo de exponer y afectar el citoplasma. La presencia de calcio en altas concentraciones en el citoplasma resulta inconveniente para la planta, porque: 1) pueden provocar la precipitación de los fosfatos y alterar el metabolismo energético y 2) interrumpen la compleja homeóstasis química esencial para el metabolismo celular, lo que en bajas concentraciones no ocurre. La homeóstasis es definida como la capacidad del organismo para presentar una situación físico-química característica y constante dentro de ciertos límites,

incluso frente a alteraciones o cambios impuestos por el entorno o el medio ambiente. La mayoría de las plantas, aún las sensibles a sales, como el frijol, son mucho más tolerantes a las altas concentraciones de calcio; donde el potasio ejerce y cumple un rol vital.

Sodio

La presencia de este elemento de carácter salino tan particular es importante en las regiones áridas y semi-áridas del mundo, no representando sin embargo un problema agrícola grave en Costa Rica y, por ende, tampoco en caña de azúcar. La dificultad con sus concentraciones se manifiesta debido a que no es fácilmente lixiviado por las aguas de lluvia, acumulándose lentamente lo que eleva desproporcionadamente su contenido, llegando a grados que perjudican el crecimiento y desarrollo de las plantas. Las aguas provenientes de sistemas de irrigación pueden agravar el problema, debido a que el agua utilizada en tales ambientes puede contribuir con la incorporación de más sales al medio. Un suelo calificado como “sódico” posee altas proporciones de sodio adsorbido en el complejo de intercambio catiónico, el cual se encuentra en condición de disponible para su potencial absorción por las plantas; esto sin presentar necesariamente altas concentraciones del elemento en la solución del suelo. El impacto sobre el índice de pH es obvio y con ello la distorsión sobre balances y equilibrios iónicos manifiesta.

La presencia de Na⁺ en la planta provoca afectación por toxicidad de los tejidos al actuar sobre la membrana celular. Buena parte del transporte de iones, incluyendo sodio y cloro están regulados genéticamente, lo que representa por ello, uno de los mecanismos de solución al problema. Las concentraciones citoplasmáticas de sodio y calcio deben mantenerse bajas para evitar alcanzar grados tóxicos, sobre todo que afecten el aparato fotosintético. Las concentraciones de potasio requeridas son por su parte altas por ser un soluto catiónico muy compatible y cuantitativamente el de mayor presencia en el citoplasma. El K⁺ es un gran contribuyente para conservar un bajo potencial hídrico, lo que resulta determinante para mantener las células convenientemente hidratadas y con la turgencia adecuada. Este elemento constituye el principal catión inorgánico que participa en el balance de cargas negativas de metabolitos celulares como proteínas, ácidos nucleicos y ácidos orgánicos; además de que activa el componente enzimático, lo que ningún otro elemento,

incluyendo sodio, puede realizar. El problema del sodio es que desplaza al potasio de los sitios donde este activa enzimas y administra la conformación de proteínas, en una acción más competitiva que sinérgica.

Aluminio

El aluminio califica como el metal de mayor abundancia presente en la superficie terrestre, logrando su mayor solubilidad a pH inferiores a 5. Al igual que acontece con la mayoría de cationes trivalentes, el aluminio es tóxico a las plantas; lo que se comprueba en los suelos ácidos de pH bajo al inhibirse y perjudicarse el crecimiento y expansión de las raíces, perjudicando el anclaje y la absorción de agua y nutrimentos (Chaves 2020k). El aluminio tiene la particularidad de ligarse fuertemente a sustancias donadoras de oxígeno, como acontece con los grupos carboxilatos, fosfatos y sulfato, interactuando con las paredes celulares, membranas plasmáticas y componentes celulares vitales como proteínas y nucleótidos, entre otros. Ante su presencia se ha observado un engrosamiento y rigidez de la membrana celular de las células expuestas, lo que constituye un efecto, no la causa que impide el alargamiento de las raíces.

La experiencia agrícola ha demostrado que algunas especies y frecuentemente cultivares de una misma especie difieren en cuanto a su grado de tolerancia al estrés provocado por el aluminio, como lo reportaron Montes de Oca y compañeros (1996) en su estudio con caña de azúcar. La exudación radicular de ácidos orgánicos como malato, citrato y oxalato, dependiendo de la especie vegetal, constituye un mecanismo efectivo de control y tolerancia al aluminio. Otras especies vegetales pueden acumular altas concentraciones del elemento sin que ocurran efectos desfavorables, y las hay, que se desarrollan mejor en un medio donde el Al es dominante. Por medio de acumuladores del elemento y empleando ácidos orgánicos, se procede al secuestro del aluminio en el interior de la planta, impidiendo que llegue a formar parte de componentes vitales, como es el caso del ATP.

El aluminio representa en los suelos ácidos un fuerte impedimento y barrera química al desarrollo normal de las plantas, entre ellas la caña de azúcar como está suficientemente demostrado, al impedir que las raíces puedan crecer y desarrollarse y movilizarse especialmente en el perfil del suelo en sentido vertical y horizontal (Figura 3), en busca de agua, anclaje y nutrientes, provocando raquitismo,

volcamiento, deshidratación, lo que afecta la germinación, el ahijamiento y el retoñamiento de las plantas, como lo señalara Chaves (2020ek).



Figura 3. Afectación del sistema radical por altos contenidos de Acidez Intercambiable.

Metales pesados

Esta calidad de elementos puede ser considerada como una excepcionalidad en el ambiente de la producción agrícola, que no debe sin embargo desconocerse virtud de sus implicaciones y graves consecuencias que genera para los seres vivos, casi sin objeción. Los metales pesados se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. Se conoce y nombra como metales pesados, aquellos elementos químicos que poseen una alta densidad, superior a 5 g/cm³, que, por su actividad iónica y efectos, resultan tóxicos para las plantas; entre los cuales pueden mencionarse arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb), mercurio (Hg), níquel (Ni), selenio (Se), talio (Tl) y zinc (Zn). Como se infiere, algunos de ellos son muy conocidos y auspiciados en alto grado por la actividad humana; otros son más de origen y presencia natural.

Los metales pesados están presentes en el suelo como componentes naturales del mismo o surgen como consecuencia de las actividades antropogénicas. Los sistemas de producción agrícola representan sin lugar a dudas una fuente importante de contaminantes como acontece en este caso con los metales pesados, lo que facilita a su vez la acumulación de los mismos en el suelo y/o la transferencia a

través de la cadena agroalimentaria, representada por los vínculos suelo-planta-consumidor; principalmente en regiones donde estos procesos se realizan de manera intensiva y sin periodos de descanso ni rotación de cultivos. En la práctica se ha comprobado que algunos metales pesados están directamente relacionados con fuentes específicas como: fertilizantes (Cd, Cr, Mo, Pb, Zn), plaguicidas (Cu, As, Hg, Pb, Mn, Zn), compost derivados de residuos sólidos convencionales (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) y también del estiércol (Cu, As, Zn). Como se infiere, muchos de los insumos y coadyuvantes empleados en la producción agropecuaria, aún orgánicos, son fuente potencial de contaminación; debe sin embargo considerarse en el caso de la caña de azúcar, que él no emplear fertilización foliar, ni cultivarse en zonas de toxicidad reconocida, excepto las de suelos ácidos, el riesgo se minimiza en algún grado, sin dejar de ser por ello preocupante para los casos del Al, Fe, Mn y Cu.

El riesgo y problema fundamental con los metales pesados estriba en que los mismos son peligrosos porque en algunos cultivos tienden a bioacumularse; lo que implica observar un incremento en la concentración de un determinado producto (elemento) químico en un organismo vivo, en un periodo de tiempo determinado, comparada en relación con la concentración del mismo producto químico en el ambiente. Acontece que una vez superado cierto umbral, dichos elementos se vuelven tóxicos, como es el caso del B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Fe, Se y Zn y el As.

La reacción y respuesta de las plantas a la presencia de esos elementos es muy diferente, pues las hay sensibles y tolerantes; otras requieren disponer de concentraciones bajas para participar de las reacciones metabólicas catalizadas por enzimas, como acontece con el Cu, Zn, Fe y Ni. Reporta la literatura que resulta en lo práctico más importante encontrar similitudes en la respuesta entre plantas a la presencia de elementos pesados, que ubicar diferencias. En el caso particular de las gramíneas como la caña de azúcar, se indica que las raíces obtienen hierro por la secreción de fito-sideróforos (del griego “cargadores vegetales de hierro”), que son pequeños compuestos orgánicos que forman componentes altamente estables con el Fe³⁺ en la membrana plasmática. Con las leguminosas el mecanismo es diferente, pues se da por acidificación de la rizosfera. Se tiene por comprobado que cuando la concentración de metales pesados en el suelo rebasa los límites máximos permisibles y permitidos, aparecen efectos

inmediatos como es la inhibición del crecimiento normal y desarrollo de las plantas; como también la distorsión funcional en otros componentes del ambiente, complementada con una severa reducción de las poblaciones microbianas y su actividad en el suelo.

Cuando los metales pesados se acumulan en los tejidos vegetales sus efectos se traducen en toxicidad expresada en:

- ❖ Transformación en la conformación de las proteínas, formando complejos con grupos sideróforos.
- ❖ Desplazamiento de otros elementos esenciales (Ej. Se por S).
- ❖ Ocasionan deficiencias nutricionales importantes.
- ❖ Generan “estrés oxidativo” por liberación de radicales libres y especies de oxígeno reactivo (Ej. Cu).

El daño provocado por elementos como es el caso del aluminio son más difíciles de ubicar en consideración de que el mismo es muy amplio y complejo, con interacciones y vínculos de diferente especie y naturaleza.

La tolerancia se ha ubicado en la capacidad de las plantas de compartimentar los metales en orgánulos celulares conocidos como vacuolos; también en formar quelatos metálicos en el citosol (hialoplasma o matriz citoplasmática, es el líquido que se localiza dentro de las células) con péptidos ricos en cisteína. Como hecho interesante, se ha observado pragmáticamente que cuando una planta muestra algún grado de tolerancia a los metales pesados, por lo general, su nivel de crecimiento es bajo, tornando cualquier plantación sembrada con estas progenies en no competitiva al cultivarse en suelos no contaminados; esto demuestra que los mecanismos fisiológicos que confieren tolerancia van en detrimento directo del crecimiento vegetal.

Es común encontrar referencias en el comercio de los agroquímicos, que se mencione y califique al silicio como un “protector contra la toxicidad por metales”; lo cual, sin embargo, ha sido cuestionado por la mayoría de la investigación que sobre estrés por iones metálicos y algunos otros estreses abióticos se viene desarrollando actualmente a nivel mundial. El tema debe ser investigado aún más para reconocer o desestimar con propiedad esos atributos potenciales.

Se aduce que los metales pesados no pueden por su naturaleza, características y propiedades ser degradados o destruidos fácilmente de manera natural o biológica, ya que por lo general

algunos de ellos no mantienen funciones metabólicas específicas importantes para los seres vivos.

Situación nacional

No cabe la menor duda que por la condición mayoritariamente ácida que presentan muchos de los suelos sembrados con caña de azúcar en el país, caracterizados por la presencia en altas concentraciones de aluminio y otros elementos pesados como hierro, manganeso y en menor grado zinc y cobre, la situación reviste y adquiere una connotación agrícola a la que se le debe prestar especial atención. Sobre todo, y en lo particular, se deben procurar implementar medidas que permitan eliminar o al menos atenuar los posibles efectos estresantes provocados sobre el metabolismo y que repercuten muy negativamente sobre la productividad agroindustrial del cultivo. No hay duda en reconocer que el principal problema lo presentan el aluminio y el hierro y en menor grado el manganeso y el cobre; pues el zinc es por el contrario deficitario en la mayoría de localidades productoras de caña en el país.

El Cuadro 6 permite observar el resultado del juzgamiento de la condición química con potencial de generar e inducir estados variables de “estrés mineral”, que presentan los suelos de uso agrícola pertenecientes a 30 cantones de tradición cañera de Costa Rica, cuyo referenciación se aplicó sobre 13 indicadores representativos muy importantes y apropiados para esa labor. Los datos proceden de 13.338 muestras, cuyo detalle geográfico se anotó en el Cuadro 4. En lo específico es importante, previo a cualquier inferencia o juzgamiento, reiterar, tener presente y dejar patente los asuntos anotados en ese punto vinculados con el origen y naturaleza de la información empleada. Pueden por ello identificarse, inferirse y concluirse a partir de esa valiosa información, aspectos relevantes como los siguientes:

- 1) Existe una variabilidad importante y de alcances significativos entre regiones en materia de química y fertilidad de los suelos, que marca en buena parte la condición de los mismos en cada región productora sembrada con caña de azúcar. Es evidente que regiones de Guanacaste y Pacífico Central (Pacífico Seco) se distancian bastante del resto de localidades, particularmente por su condición de acidez, sea esta alta o baja.
- 2) Desde la perspectiva de “estrés mineral” inducido por la presencia de tensiones favorecidas y promovidas

por los contenidos nutricionales, cabe señalar que los mismos aplican en dos sentidos: por insuficiencia o por exceso de sus concentraciones. Lo que exime pensar que solo las toxicidades son negativas y generadoras de estados graves de estrés.

- 3) Es definitivo e innegable que la interacción entre nutrientes manifestada por los efectos sinérgicos y antagónicos directos y secundarios que se establecen en el medio, son las que gestan y provocan los estados de tensión fisiológica en las plantas.
- 4) Evidencia la información contenida en dicho cuadro, que la heterogeneidad de condiciones es amplia en todo el entorno nacional, y no se restringe exclusivamente a regiones, pues también persiste a nivel de cantón, distrito y unidad productiva, como está debidamente comprobado por otros estudios.
- 5) Las variables ligadas a la acidez del suelo son las más recurrentes y frecuentes como generadoras potenciales de estrés; como lo demuestran el índice de pH, la Acidez Intercambiable y la CICE, sea por su condición alta o baja.
- 6) Destaca que, pese a la condición limitante prevaleciente con la acidez, ningún cantón evidenció tener problemas con Alta Saturación de Acidez (> 50%) de sus suelos.
- 7) Las condiciones más extremas se dan por: pH ácido (solo en el cantón de Santa Cruz fue alto); acidez baja dominante y alta en Grecia y Palmares; Suma de Cationes alta en todos los cantones Guanacaste (excepto Bagaces y Liberia) y Puntarenas (Esparza y Puntarenas); CICE alto menos en Grecia.
- 8) Las concentraciones de calcio y magnesio son altas en el Pacífico Seco. El potasio presenta una alta inestabilidad con altibajos en sus contenidos que pareciera no estar condicionada y depender tanto de la región agrícola.
- 9) Contra lo en principio esperado, el fósforo reporta altas concentraciones en varios cantones del Valle Central y la Zona Atlántica de Cartago; manteniéndose bajo en Guanacaste y Puntarenas.
- 10) No existen evidencias de altas concentraciones de zinc en el suelo, lo que elimina la posibilidad de posibles toxicidades naturales por este elemento, excepto las que puedan ser provocadas por aplicaciones foliares desproporcionadas y en exceso. Su condición es mayoritariamente de deficiencia.

AGROCLIMÁTICO CAÑA DE AZÚCAR

Mayo 2021 - Volumen 3 – Número 11

- 11) El hierro resulta problemático por su exceso en todo el país, a excepción del Pacífico Seco.
- 12) Solo los cantones de San Carlos y Grecia reportan poseer altas concentraciones por manganeso en sus suelos; siendo más común su insuficiencia, como sucede en Bagaces, Esparza y Pérez Zeledón.

- 13) El cobre mantiene una condición de normalidad, a excepción de Naranjo, Santa Bárbara y Palmareas donde sus concentraciones en el suelo son catalogadas como altas.

Cuadro 6. Indicadores de Tensión Nutricional Potencial de los suelos de 30 cantones cañeros de Costa Rica respecto a su condición química.

Provincia / Cantón	pH		Acidez (Al ³⁺ + H ⁺)		Suma Cationes		CICE		Saturac. Acidez	Ca		Mg		K		P		Zn		Fe		Mn		Cu		
	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	
	< 5,5	> 6,5	≤ 0,5	> 1,5	≤ 5	> 25	≤ 5	> 25	> 50	≤ 4	> 20	≤ 1	> 5	≤ 0,2	> 0,6	≤ 10	> 20	≤ 2	> 10	≤ 10	> 100	≤ 5	> 50	≤ 2	> 20	
	Unidades		cmol(+)/l		cmol(+)/l		cmol(+)/l		%	cmol(+)/l		cmol(+)/l		cmol(+)/l		mg/l		mg/l		mg/l		mg/l		mg/l		
GUANACASTE																										
Liberia	A		B														A									
Carrillo			C		A		A			A		A					A		A							
Cañas			C		A		A										A									
Abangares			C		A		A							A		C		A								
Bagaces			C										A		C							A				
Santa Cruz		A	C		B		B			A		A				A		A								
Nicoya			C		C		C			A		A				A		A								
ALAJUELA																										
Alajuela			B												A		A					A				
San Carlos	B		A							A					A		C					A		A		
Los Chiles	B		B											B			C		A			A				
Atenas	C															A		A				A				
Grecia	C			A	B		A			B		B					A					C		A		
Naranjo	C				A					A		A				A	A					C				A
Poas	B		A		A					A		A						A				A				
Valverde Vega	B		A													A		C				A				
San Mateo	B		A												A			C	A			A				
Palmareas	B		A	A												A		A				C				A
San Ramón	C		A														A					A				
CARTAGO																										
Turrialba	B		A														A					C				
Jiménez	B		A									A					A					A				
Paraíso	A		A													A		A				A				
Alvarado	A		B									A					A					A				
Oreamuno	A		B													A		A				A				
PUNTARENAS																										
Puntarenas			C		B		B				A		A				A		A							
Esparza			C		A		A				A		A	A			C		A				A			
Montes Oro	A		C														A		A			A				
Buenos Aires	A		A									A					C		A			A				
SAN JOSÉ																										
Pérez Zeledón	B				A					A		A		A			C		A			A	A			
Puriscal	C		A									A				A	A					A				
HEREDIA																										
Santa Bárbara	A		B															A				A				A

Fuente: Elaborado por el autor con información de Méndez y Bertsch (2012).
 CICE = Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva.
 Descripción de Estados = A) Rosado-preocupante (40-60%), B) Naranja-problemática (61-80%), C) Rojo-crítica (> 81%).

Resulta destacable mencionar que, como resultado de esa amplia y detallada valoración química integral de nutrientes potenciales de generar estrés, ninguno de los 30 cantones

cañeros evaluados estuvo libre de tener presente alguno de los 13 indicadores evaluados en condición adversa (sea por una situación de alta o baja intensidad); siendo sin embargo los

calificados como relativamente más equilibrados, los siguientes: Liberia, Bagaces, Alajuela, Atenas, San Ramón y Turrialba. Esta mención no interpreta necesariamente la frecuencia y magnitud del impacto y la calidad del efecto nutricional estresante provocado por la variable deficiente, sino apenas la cantidad de menciones de disconformidad con respecto al estado de normalidad deseado.

En sentido contrario Grecia, Pérez Zeledón y Esparza fueron los cantones que mayor cantidad de limitantes evidenciaron; seguidos por Naranjo y Santa Cruz. Un poco más distante pero sumando estados negativos se ubican Carrillo, Abangares, Nicoya, San Carlos, Poas, Puntarenas y Palmares.

¿Qué hacer?

No hay duda que el estrés abiótico ocasionado por factores de índole climático es hoy en día una de las causas de afección que más incidencia presenta en los sistemas de producción agrícola y agropecuaria, con el agravante, que es posiblemente el problema que menos soluciones dispone para procurar mitigarlas con efectividad. Esta situación sucede a pesar de que cada vez surgen y se dispone de más y mejores herramientas para satisfacer ese objetivo, como son entre otras la medición de los elementos del clima, la aplicación de productos bioestimulantes, la gestión más sostenible del riego, el empleo de sistemas vegetales de protección y mitigación, el cultivo de especies y variedades adaptables, etc. Por ello, la amenaza permanente del dinámico y creciente cambio climático, que pareciera va a dar lugar a generar una mayor cantidad de fenómenos de estrés y tensión de fuerte impacto y graves consecuencias productivas, hace que este factor, sumado a otros, pueda convertirse en muy poco tiempo en la mayor amenaza para el futuro de muchos cultivos, entre ellos la caña de azúcar.

De igual manera y en forma aditiva, el estrés abiótico inducido por el manejo inconveniente de los cultivos y las plantaciones comerciales, es sin embargo el factor que más se ha minimizado y descuidado con los años, pese a disponer de un mayor conocimiento y precisión en el manejo de los mismos; esto por cuanto cada vez se dispone de mejor maquinaria, mejores materiales genéticos, productos e insumos más seguros y una mayor precisión en el uso de los mismos. Los esfuerzos constantes en investigación y desarrollo en el campo agrícola y en materia de transferencia del conocimiento, garantizan que se siga en esta línea continua y sistemática de incorporar

mejoras a los sistemas agroproductivos. La actividad cañero-azucarera costarricense debe continuar y fortalecer esa importante gestión institucional-sectorial. Es imperativo contrarrestar con niveles de éxito los embates de la naturaleza, lo cual solo se logrará con acciones impactantes en la misma dirección, que más que correctivas deben concentrarse en medidas preventivas de evitación.

Las plantas son esencialmente seres inmóviles, cuya estructura y funcionamiento ha evolucionado para poder responder a condiciones ambientales heterogéneas, dinámicas y en casos como el nacional, muy inestables, como acontece con variables como: régimen de precipitaciones, de temperaturas, horas e intensidad de luz, viento, evapotranspiración, fitosanidad y presencia de otros organismos en el sistema agroproductivo, etc., que son muy variables y volátiles en el corto y el mediano plazo. A ellos se suma la condición físico-química y microbiológica de nuestros suelos cañeros, caracterizados por poseer un alto grado de degradación e infertilidad, como lo ha reiteradamente señalado Chaves (2020i) con gran preocupación. Esa condición tan particular viene generando una alarmante situación y estado de “estrés mineral” que se suma al resto de condiciones de tensión biótica y abiótica, en una resultante contraproducente e inconveniente para fomentar el incremento y sostenibilidad de la productividad, la rentabilidad y la competitividad de los emprendimientos empresariales desarrollados.

Las acciones más prudentes, sensatas y razonables por adoptar son simples y perfectamente viables de implementar y ejecutar, como son entre otras las siguientes:

- 1) Planificar, planificar y planificar.
- 2) Establecer un plan de trabajo e inversión basado en acciones técnicas, comerciales e institucionales debida y convenientemente integradas y articuladas.
- 3) Definir un cronograma basado en tiempos y acciones que sea la guía de las acciones y actividades operativas por desarrollar.
- 4) Ubicar el factor climático como un determinante prioritario de las actividades programadas. Debe contarse con planes alternativos opcionales ante el surgimiento de posibles eventualidades (sequía, temporales, inundaciones, por ejemplo).
- 5) Considerar el “estrés mineral” como un factor de tensión real que también contribuye a la pérdida de productividad agroindustrial.

- 6) Para atender el tema del estrés mineral, resulta imperativo contar con un necesario y conveniente muestreo de suelos que evidencie y muestre la condición de fertilidad actual y potencial de los mismos. El juzgamiento de estrés y posible tensión metabólica debe ser ubicado puntualmente en sus elementos componentes, con el objeto de direccionar correctamente las acciones por ejecutar.
- 7) En materia de “estrés mineral” no hay duda que los indicadores vinculados con la acidez del suelo y sus implicaciones, son por su impacto, los más importantes, sin descuidar los otros.
- 8) El principio de los balances y equilibrios, las sinergias y los antagonismos nutricionales en los factores y actividades por desarrollar, resultan obligados de atender, cumplir y respetar.
- 9) Siempre debe desarrollarse una amplia y decidida labor continua y sistemática de investigación en el campo genético, procurando identificar cultivares que muestren algún grado de tolerancia al estrés mineral. El país mantiene gestión en esa dirección, la cual debe fortalecerse.

Conclusión

No cabe la menor duda que los estados de estrés forman parte ineludible del ciclo biológico de las plantas, pues la tensión que se genera y ciere sobre las mismas proviene de diferentes orígenes y tiene diferentes causas, entre las cuales están las de carácter biótico y también abiótico. Por lo general y casi de manera generalizada, se atribuyen las causas de estrés a razones estrictamente naturales, vinculadas con factores climáticos como la lluvia, las temperaturas, el viento, la luz y la evapotranspiración. Sin embargo, un estado de estrés se traduce en una condición de tensión que, de acuerdo con su severidad y magnitud, puede provocar distorsiones fisiológicas y metabólicas que se manifiestan en pérdidas variables de productividad agroindustrial y hasta muerte de las plantas. Cabe señalar que el estrés puede ser natural, o también creado e inducido por el mismo agricultor, a través de la omisión o ejecución de prácticas indebidas, o en su caso, la no atención de otras importantes de estricta ejecución (Chaves 2015).

Es un hecho real, tangible y perfectamente medible, que la presencia de una condición desequilibrada y/o desproporcionada en las condiciones físico-químicas del suelo, pueden crear estados de tensión inconvenientes que afectan

las plantaciones comerciales de caña de azúcar; entre las cuales el contenido nutricional resulta determinante, motivo por el cual, la presencia de estados de “estrés mineral” en la interfase suelo-planta son una realidad que no puede desconocerse, ignorarse y menos aún desatenderse. Ese tipo de estrés se da en el caso nacional por presencia de condiciones de acidez extremas con índices de pH bajos, Acidez Intercambiable (Al³⁺ + H⁺) elevada, alta saturación (%) por acidez, suma de bases y Capacidad de Intercambio Catiónico (CICE) desbalanceada; así como también, debido a la presencia de calcio, magnesio, potasio, fósforo y metales pesados (zinc, hierro, manganeso, cobre) en concentraciones desproporcionadas, sean bajas o altas.

La condición físico-química de las regiones agrícolas donde se cultiva comercialmente caña de azúcar en Costa Rica son muy heterogéneas entre sí en todos los sentidos, sea climático, edáfico, de manejo de plantaciones, lo que llega hasta su interior a nivel de unidad productiva básica (finca). Esta situación obliga imperativamente considerar y tratar de manera específica y particular cada una de ellas; motivo por el cual, no caben ni son de recibo las generalizaciones que puedan darse en materia de interpretación y manejo de plantaciones entre diferentes localidades productoras.

El manejo del estrés requiere en primera instancia para poder operar con éxito alguna medida de mitigación o atenuación, conocer con mucha certeza cuáles son las posibles causas y el origen de las tensiones que sufre una planta o una plantación; así como también, saber cuáles son las posibles respuestas del vegetal a un determinado tipo de tensión estresante. Resulta imperativo contrarrestar la tensión generada por el estrés, mediante la implementación de acciones externas que permitan y favorezcan minimizar sus efectos e impactos sobre la capacidad productiva; asegurando con ello la calidad de su cosecha, posiblemente una determinada cantidad de la misma, o según como sea la intensidad del estrés, la propia supervivencia de las plantas.

Entre todas las acciones viables por desarrollar para confrontar los problemas de tensión provocados por estrés, las de índole tecnológico resultan factibles y muy efectivas, acción traducida en el ajuste biológico del cultivo mediante la siembra de variedades genéticamente adaptadas a condiciones salinas, ácidas, eutróficas o en su caso distróficas, infértiles o de cualquier otra condición extrema (seca, húmeda, compactada,

etc.) que pueda surgir y existir en el entorno productivo donde se desarrolla la plantación. En el caso de la caña de azúcar el recurso genético resulta obligado de recurrir, lo cual implica desarrollar programas de mejora debidamente planificados y operados en la orientación deseada, como lo ha señalado Chaves (2018).

Literatura citada

- 1) Angulo Marchena, A.; Rodríguez Rodríguez, M.; Chaves Solera, M.A. 2020. Guía Técnica. Cultivo Caña de Azúcar. Región: Guanacaste. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 78 p.
- 2) Barrantes Mora, J.C.; Chaves Solera, M.A. 2020. Guía Técnica. Cultivo Caña de Azúcar. Región: Sur. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 75 p.
- 3) Cadet Piedra, E. 2019. Caracterización, sintomatología y respuesta de la caña de azúcar al estrés por déficit hídrico. Boletín. Agroclimático (Costa Rica) 1(14): 5-7, octubre.
- 4) Calderón Araya, G.; Chaves Solera, M.A. 2020. Guía Técnica. Cultivo Caña de Azúcar. Región: Turrialba. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 95 p.
- 5) Castro Sánchez, J. 2017. Respuesta al estrés hídrico en plantas mediterráneas. Perspectiva frente al cambio climático. Trabajo Fin de Grado. Madrid, España. Facultad de Farmacia, Universidad Complutense.
- 6) Chaves, M. 1999. 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.
- 7) 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.
- 8) Chaves Solera, M.A. 2017a. 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.
- 9) Chaves Solera, M.A. 2017b. La compactación de suelos en la caña de azúcar. Revista Entre Cañeros N° 9. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, diciembre. p: 33-48.
- 10) Chaves Solera, M.A. 2018. Genética aplicada a la mejora de las plantaciones comerciales de caña de azúcar. En: Congreso Tecnológico DIECA 2018, 7, Colegio Agropecuario de Santa Clara, Florencia, San Carlos, Alajuela, Costa Rica. Memoria Digital. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), 29, 30 y 31 de agosto del 2018. 43 p.
- 11) Chaves Solera, M.A. 2019a. Entornos y condiciones edafoclimáticas potenciales para la producción de caña de azúcar orgánica en Costa Rica. En: Seminario Internacional: Técnicas y normativas para producción, elaboración, certificación y comercialización de azúcar orgánica. Hotel Condovac La Costa, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 2019. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 15, 16 y 17 de octubre, 2019. 114 p.
- 12) Chaves Solera, M.A. 2019b. Ambiente agro climático y producción de caña de azúcar en Costa Rica. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1(18): 5-10, noviembre-diciembre.
- 13) Chaves Solera, M.A. 2019c. Humedad y compactación de suelos en la caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1(6): 4-6, junio-julio.
- 14) Chaves Solera, M.A. 2019d. Relación agua-suelo en la caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1(10): 5-7, agosto-setiembre.
- 15) Chaves Solera, M.A. 2020a. Estrés por calor en la caña de azúcar en Costa Rica. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(5): 5-12, marzo.
- 16) Chaves Solera, M.A. 2020b. Estrés hídrico en la caña de azúcar en Costa Rica. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(8): 5-16, abril.
- 17) Chaves Solera, M.A. 2020c. Estrés por viento en la caña de azúcar en Costa Rica. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(9): 4-15, abril.
- 18) Chaves Solera, M.A. 2020d. Agroclimatología y producción competitiva de caña de azúcar en Costa

- Rica. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(24): 5-13, noviembre.
- 19) Chaves Solera, M.A. 2020e. Clima, germinación, ahijamiento y retoñamiento de la caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(14): 6-14, julio.
- 20) Chaves Solera, M.A. 2020f. Clima y erosión de suelos en caña de azúcar en Costa Rica. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(16): 7-16, agosto.
- 21) Chaves Solera, M.A. 2020g. Atributos anatómicos, genético y eco fisiológicos favorables de la caña de azúcar para enfrentar el cambio climático. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(11): 5-14, mayo.
- 22) Chaves Solera, M.A. 2020h. Clima, acidez del suelo y productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(18): 8-17, agosto.
- 23) Chaves Solera, M.A. 2020i. Clima, degradación del suelo y productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(15): 5-13, julio.
- 24) Chaves Solera, M.A. 2020j. Clima, suelo y manejo: factores determinantes en la compactación de los suelos. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(20): 5-15, setiembre.
- 25) Chaves Solera, M.A. 2020k. Sistema radicular de la caña de azúcar y ambiente propicio para su desarrollo en el suelo. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(13): 6-18, junio. También en: Revista Entre Cañeros N° 17. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, setiembre. p: 51-71.
- 26) Chaves Solera, M.A.; Barquero Madrigal, E. 2020. Guía Técnica. Cultivo Caña de Azúcar. Región: Norte. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 135 p.
- 27) Epstein, E.; Bloom, A. 2006. Nutrição Mineral de Plantas: Principios e Perspectivas. 2 ed. Trad. María Edna Tenório Nunes. Londrina, Brasil. Editora Planta. 403 p.
- 28) FERTILIZANTE. Info. 2021. Consultado en mayo 2021. Disponible en: <http://www.fertilizante.info/el-estres-de-las-plantas/>
- 29) García, J.A.; Jiménez, A.E. 2019. El estrés en las plantas. Consultado en mayo 2021. Disponible en: <https://www.metroflorcolombia.com/el-estres-en-las-plantas/>
- 30) INTAGRI S.C. 2021. Consultado en mayo 2021. Disponible en: <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/estres-vegetal-parte-1-estres-por-altas-temperaturas-INTAGRI-S.C.>
- 31) Larcher, W. 1986. Ecofisiología Vegetal. 4ª ed. São Paulo, Brasil: EPU. 319 p.
- 32) Levitt, j. 1972. Responses of plants to environmental stresses. 2nd ed. New York, San Francisco, London. Academic Press, Inc. 497 p.
- 33) 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.
- 34) Montes De Oca, P.; Mata, R.; Chaves, M.A. 1996. 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.
- 35) Wikipedia. 2021. Consultado en mayo 2021. Disponible en: <https://www.google.com/search?q=estres+vegetal&oq=estres+vegetal&aqs=chrome..69i57j0j0i22i30l7.6295j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

Recuerde que puede acceder los boletines en
www.imn.ac.cr/boletin-agroclima y en
www.laica.co.cr