

Periodo 09 de agosto al 22 de agosto 2021

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.

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

RESUMEN DE LAS CONDICIONES DE LA QUINCENA DEL 26 DE JULIO AL 08 DE AGOSTO

En la figura 1 se puede observar, a partir de datos preliminares de 109 estaciones meteorológicas, el acumulado quincenal de lluvias sobre el territorio nacional.

Las regiones azucareras mantuvieron condiciones diarias poco lluviosas. Guanacaste Este mostró como su día más lluvioso el 2 de agosto; Guanacaste Oeste durante el 2, 7 y 8 de agosto; Norte el 1 y 3 de agosto; Puntarenas el 26 de julio; Valle Central para el 26-27 de julio y 7 de agosto; Sur durante 7-8 de agosto; Turrialba los días el 26 y 29 de julio además del 1 de agosto.



Figura 1. Valores acumulados de la precipitación (mm) durante la quincena del 26 de julio al 08 de agosto del 2021.

PRONÓSTICO PARA LAS REGIONES CAÑERAS PERIODO DEL 09 DE AGOSTO AL 15 DE AGOSTO

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. Durante la semana la Región Norte mantendrá viento dominante del Este; así como alto contenido de humedad y temperaturas más bajas a partir del miércoles. Guanacaste (Este y Oeste) presentará viento dominante del Este, mayor contenido de humedad y temperaturas más bajas a inicio de semana que a mediados de esta. Valle Central (Este y Oeste) mostrará vientos del Este a inicio de semana seguido de viento variable, con alto contenido de humedad a partir del miércoles y temperaturas más altas a inicios de semana respecto al resto de esta. Para Turrialba (Alta y Baja) se prevé viento dominante del Este desde mediados de semana, así como humedad y temperatura variable. En la región Sur se espera viento variable, condiciones de alta humedad principalmente después del miércoles y temperaturas más elevadas a inicios de semana que la restante semana.

*“La semana inicia bajo la influencia de la onda tropical #22 y presencia del polvo del Sahara. La onda tropical #23, con potencial de convertirse en tormenta tropical **no tendrá efecto directa ni indirecta sobre el país.**”*

BOLETÍN AGROCLIMÁTICO CAÑA DE AZÚCAR



Agosto 2021 - Volumen 3 – Número 17

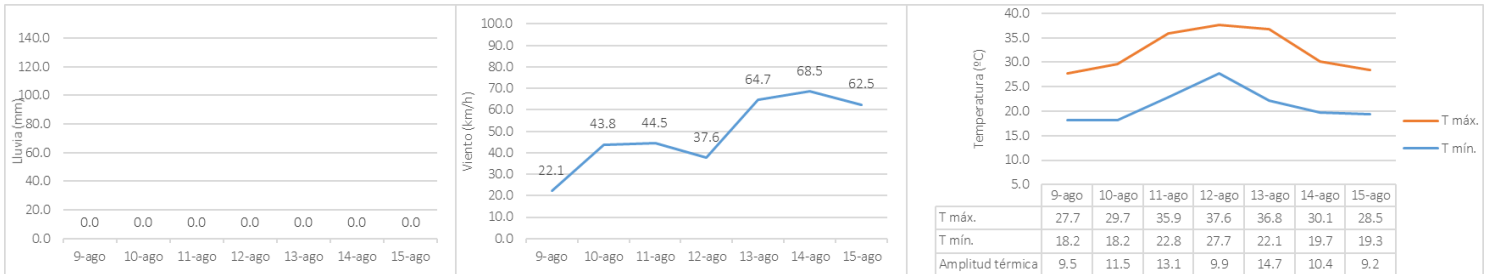


Figura 2. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 09 de agosto al 15 de agosto en la región cañera Guanacaste Este.

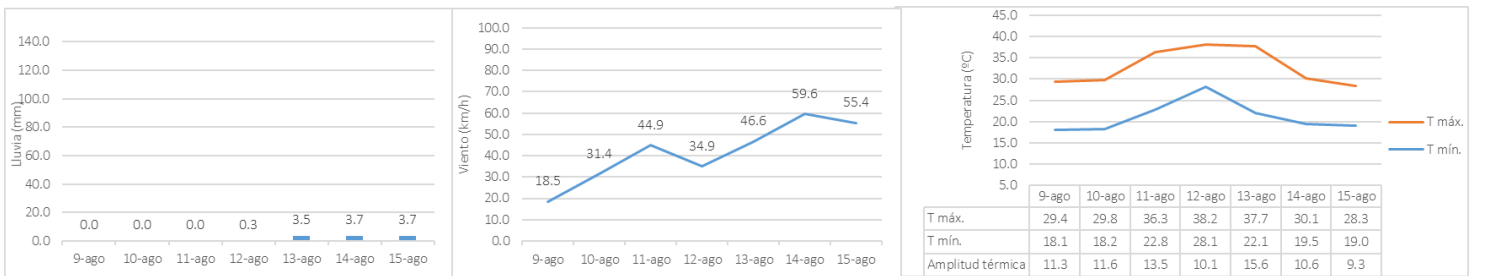


Figura 3 Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 09 de agosto al 15 de agosto en la región cañera Guanacaste Oeste.

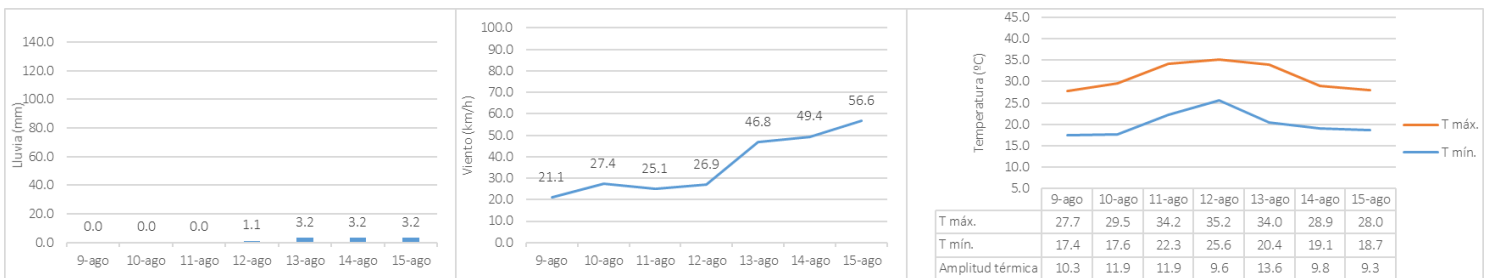


Figura 4. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 09 de agosto al 15 de agosto en la región cañera Puntarenas.

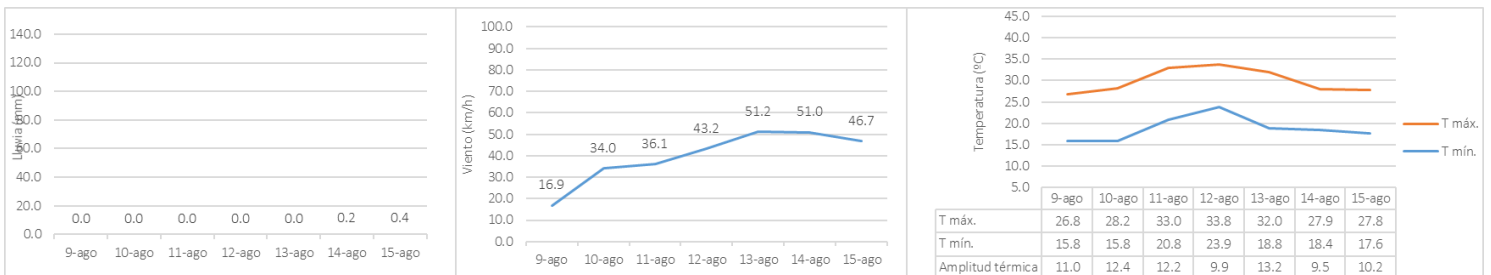


Figura 5. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 09 de agosto al 15 de agosto en la región cañera Zona Norte.

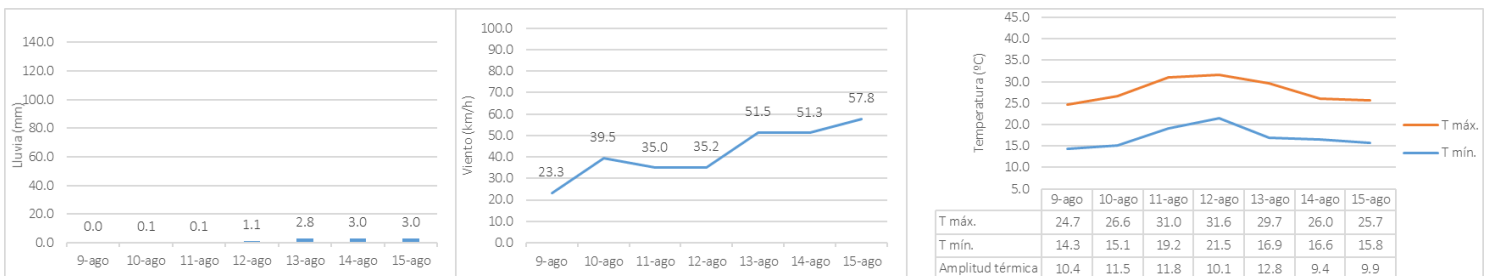


Figura 6. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 09 de agosto al 15 de agosto en la región cañera Valle Central Este.

Agosto 2021 - Volumen 3 – Número 17

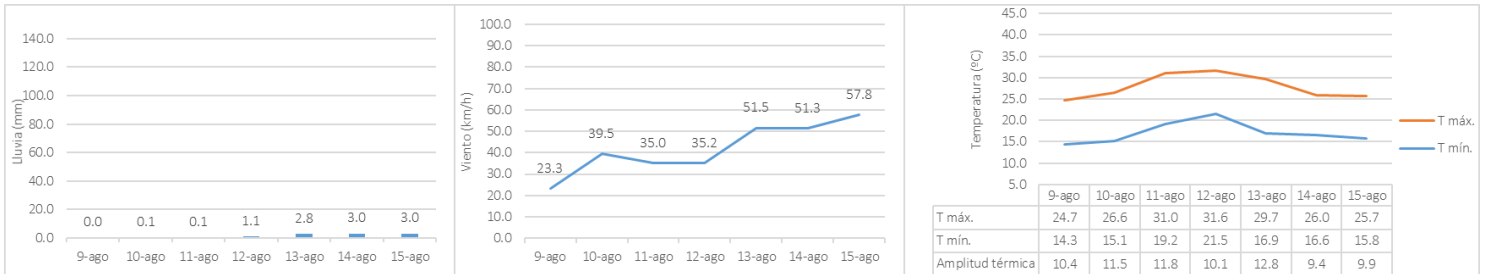


Figura 7. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 09 de agosto al 15 de agosto en la región cañera Valle Central Oeste.

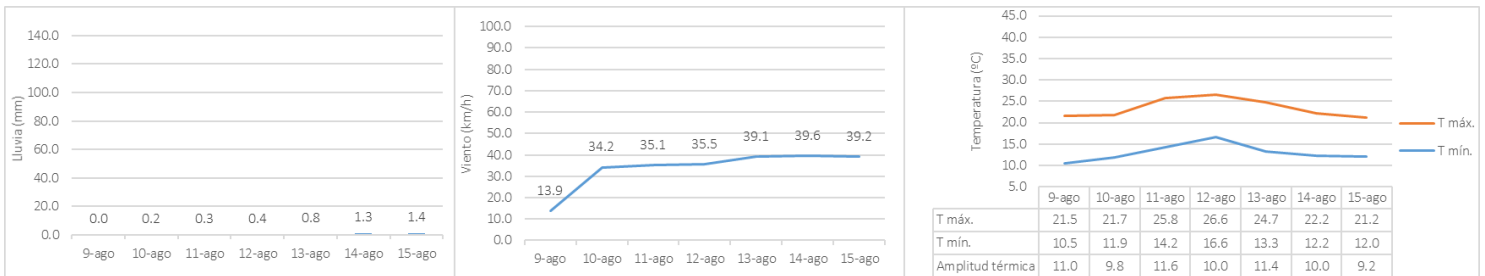


Figura 8. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 09 de agosto al 15 de agosto en la región cañera Turrialba.

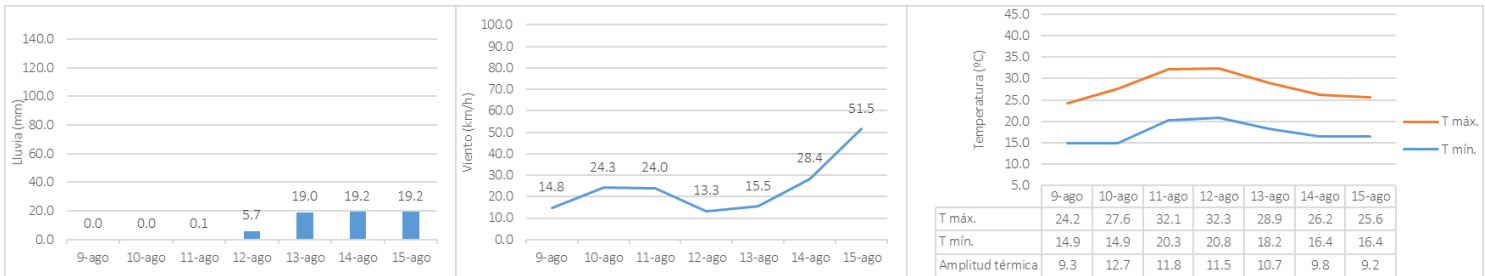


Figura 9. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 09 de agosto al 15 de agosto en la región cañera Zona Sur.

TENDENCIA PARA EL PERIODO DEL 16 DE AGOSTO AL 22 DE AGOSTO

Durante el inicio de semana la Región Norte mantendrá viento dominante del Oeste, contenido de humedad variable y temperaturas más bajas; en comparación con mediados de semana. Guanacaste (Este y Oeste) presentará viento dominante del Oeste, bajo contenido de humedad y temperaturas más altas entre lunes y miércoles; posteriormente se reduce la temperatura y aumenta la humedad. Valle Central (Este y Oeste) mostrará viento y humedad variable; así como temperaturas menores a inicio de semana que a mediados. Para Turrialba (Alta y Baja) se prevé viento, humedad y temperatura variable. En la Región Sur se espera viento dominante del Oeste, condiciones de humedad y temperatura variable.

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 02 al 08 de agosto de 2021 se presentó alta saturación en los suelos de la Región Norte, Región Sur y en las regiones de Turrialba Alta y Turrialba Baja, las demás regiones cañeras tuvieron menor porcentaje de humedad. A partir del sábado la saturación se incrementó en la Región Guanacaste Oeste.

Como se observa en la figura 10, las regiones de Guanacaste Oeste y Guanacaste Este tienen entre 30% y 75%. La Región Puntarenas está entre 30% y 60%; la Región Valle Central Oeste está entre 45% y 75% y la Región Valle Central Este presenta entre 45% y 60%.

El porcentaje de humedad de la Región Norte está entre 30% y 100%; 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 75%. La Región Sur varía entre 15% y 100% de humedad.

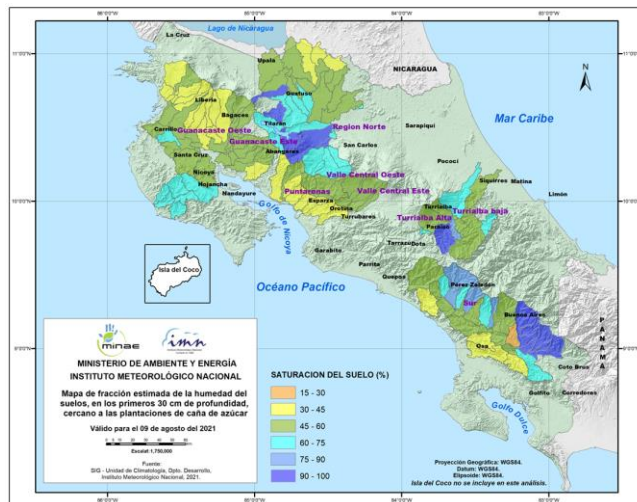


Figura 10. Mapa de fracción estimada de la humedad en porcentaje (%), en los primeros 30 cm de profundidad, cercana a las plantaciones de caña de azúcar, válido para el 09 de agosto del 2021.

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

¿Cuánto Nitrógeno se aplica en las plantaciones comerciales de caña de azúcar en Costa Rica?

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

chavessolera@gmail.com

Especialista en Caña de Azúcar

El nitrógeno (N) es el nutrimento del suelo más absorbido por las plantas en condiciones normales de cultivo, el que más limita la producción agrícola a nivel mundial, y, en consecuencia, el que más se incorpora a las plantaciones por medio de la fertilización comercial. El uso de nitrógeno en la producción comercial de los cultivos agrícolas, entre ellos la caña de azúcar, se ha venido incrementando sistemática, progresiva y significativamente en relativamente poco tiempo como es fácil de comprobar, debido a varias circunstancias razonables y entendibles que participan del hecho, como son entre otras las siguientes:

- a. La existencia de una mayor demanda alimentaria nacional y mundial por causa, y para poder acompañar el significativo crecimiento poblacional.
- b. La insoslayable e imperativa necesidad de aumentar el área cultivable (hectáreas) para atender el aumento productivo requerido.
- c. Tener que mejorar la calidad proteínica de los alimentos.
- d. El aumento progresivo y sistemático del proceso de degradación, desertificación e infertilidad de los suelos de uso agrícola.
- e. Participar de una agricultura más competitiva que obliga insoslayablemente incrementar la productividad agroindustrial y disminuir el costo unitario, para elevar la rentabilidad y la competitividad comercial y empresarial.
- f. Motivado por el mayor conocimiento de los principios y procesos que participan e intermedian en la fertilidad, manejo y mejoramiento de los suelos agrícolas.
- g. Las dinámicas y profundas mejoras significativas observadas en materia tecnológica de los insumos, la cosecha y el manejo integral del cultivo.
- h. Las fuertes y constantes campañas publicitarias en favor del uso de agroquímicos.

Resulta esperable por todo ello, que la rápida expansión y demanda de alimentos de mejor calidad y precio accesible para atender una población creciente y cada vez más exigente, requerirá del necesario y obligado incremento en el uso de los fertilizantes, en particular el nitrógeno, en el futuro inmediato. En toda esta coyuntura mediática y

ulterior, el reto de hacer un uso más prudente, racional, técnico y ecoeficiente del nitrógeno como fertilizante, plantea en la actualidad un serio desafío por atender y resolver para investigadores, técnicos y productores agrícolas.

Consecuentes con esta inobjetable realidad, procura el presente artículo como objetivo principal, abordar y analizar el tema de la fertilización nitrogenada desde una perspectiva realista y pragmática, en la cual se busca estimar la cantidad del elemento incorporado en las plantaciones comerciales de caña de azúcar de Costa Rica, discriminando y ponderando las diferencias regionales, sectoriales (productores e ingenios), particularidades climáticas y variaciones agronómicas prevalecientes en el área cultivada. Se espera con ello, contar con una perspectiva más actualizada y ordenada del tema vinculado con el uso del nitrógeno en el país visualizando áreas, zonas, cantidades y ciclos vegetativos de manera que permitan formular planes, programas y estrategias técnicas que conduzcan a trabajar en su uso racional y óptimo para fines productivos y ambientales.

Uso del nitrógeno

Existen muchas y muy calificadas razones y motivos por los cuales la cantidad de nitrógeno (N) incorporado al suelo como insumo nutricional, debe ser controlada y regulada buscando su máxima eficiencia; las cuales sustentan y justifican el por qué deben adoptarse y seguirse imperativamente buenas prácticas de aplicación y manejo racional del fertilizante. Está demostrado que en términos generales el uso del N por parte de los cultivos, entre ellos la caña de azúcar, es muy deficiente e ineficiente, estimando la profusa investigación desarrollada en torno al tema, que la asimilación por las plantas se aproxima apenas al 50% del "N soluble o nitrógeno asimilable". Esta aseveración es válida e incluyente también para el N proveniente de los procesos naturales vinculados con la materia orgánica del suelo, la cual, hay que reconocer, no ha sido empleada con la eficacia deseada y requerida de manera que supere la tasa de eficiencia del fertilizante mineral.

El cuadro 1 expone un detalle que muestra los ámbitos de eficiencia de la fertilización, aplicado particularmente para N-P-K, expresados en

porcentaje y empleados en Costa Rica para calificar los cuatro grupos taxonómicos de suelos dominantes en la agricultura nacional, como señalara Bertsch (2003) para los órdenes: Vertisol, Andisol, Ultisol e Inceptisol, respectivamente. Como se infiere de esa información, la eficiencia de la fertilización aplicada al suelo es diferente y muy específica para cada nutrimento y tipo de substrato implicado, siendo en el caso del N muy baja con un rango de eficiencia de apenas entre 50 y 70% entre lo que se aplica y lo que la planta aprovecha. De todos, el P es el nutrimento más ineficiente en cuanto a este revelador indicador; mientras que el K en contraparte el más efectivo y consecuentemente de mayor absorción.

Cuadro 1. Ámbitos porcentuales de eficiencia nutricional del N-P-K según tipo de suelo.

Elemento	Vertisoles	Volcánicos	Rojos	Inceptisoles
N	50 - 65%	55 - 65%	50 - 55%	50 - 70%
P	45 - 50%	30 - 35%	35 - 40%	40 - 50%
K	60 - 65%	70 - 80%	60 - 70%	60 - 80%

Fuente: Bertsch (2003).

Nota: Ordenes Taxonómicos corresponden a Vertisoles, Andisoles, Ultisoles e Inceptisoles, respectivamente.

Al ubicar la eficiencia en el uso del N de acuerdo con los órdenes taxonómicos de suelo expuestos, se evidencia un menor porcentaje de absorción en el caso de los Ultisoles rojos, ácidos e infértiles, lo que es explicable por las características fisicoquímicas de los mismos y las limitaciones que por ello surgen en la actividad microbial que se da en los mismos. La más alta acontece por el contrario en los suelos del orden Inceptisol.

Cotejando y ubicando taxonómicamente el área sembrada con caña de azúcar en el país, se encuentra que el 79,1% de la misma corresponde a esos cuatro órdenes de suelo, predominando en lo específico los Inceptisoles con el 36,9% del área, seguido por Vertisoles y Ultisoles con un 17,6% c/u y luego el Andisol de origen volcánico con un 6,9%, como lo indicaran Chaves (2017a) y Chaves y Chavarría (2017). Queda claro que la eficiencia teórica en el uso del N no supera el 70%, lo que denota una pérdida importante del elemento superior al 30%.

No cabe la menor duda en reconocer que el empleo justo, racional, prudente y sensato del nitrógeno, mediante el uso y aplicación de las dosis requeridas (kg/ha) por el cultivo en sus condiciones y circunstancias particulares del entorno donde se produce, resulta en mejores rendimientos agroindustriales, menores costos unitarios de producción, menos afectación del ecosistema, mayor rentabilidad y posicionamiento competitivo de la agroempresa cañera. De cumplirse a cabalidad con estos preceptos que aseguran la aplicación de cantidades suficientes y no excesivas de N, el agricultor tendrá

mayores ganancias expresadas en una mayor tasa unitaria de retorno de la inversión realizada en el fertilizante.

Es bien conocido en esta materia, que los agricultores muchas veces hacen uso excesivo e indiscriminado del N bajo criterios y argumentos válidos algunos, pero errados y muy desacertados otros, entre los cuales el autor del presente artículo ha podido personalmente recabar los siguientes:

- 1) Entre más nitrógeno aplique a la plantación mayor producción de caña tendré.
- 2) Un poco más de nitrógeno no afecta al cultivo.
- 3) Las fuentes de N inorgánico disponibles en el mercado son relativamente baratas y no impactan los costos de producción.
- 4) Todo el fertilizante aplicado es absorbido por las plantas, por lo cual las pérdidas son mínimas.
- 5) Los suelos de baja fertilidad requieren de mucho fertilizante por lo que hay que adicionarle cada vez más.
- 6) Si aplico mucho fertilizante, abono y mejoro el suelo para el futuro, pues el mismo queda retenido y almacenado.
- 7) El nitrógeno ayuda a los "bichos" del suelo.
- 8) La caña de azúcar incorpora mucha materia orgánica durante su ciclo vegetativo y cosecha, que es suficiente como aporte para satisfacer las necesidades nutricionales del cultivo.

Cabe entonces preguntarse con objetividad pragmática ¿Es posible lograr un mayor aprovechamiento y eficiencia en el empleo del fertilizante nitrogenado? La respuesta es fácil y sencilla con un contundente Sí. La forma práctica de lograrlo se debe concentrar en la atención específica y puntual de cinco factores determinantes sobre los que inquestionablemente recae poder pragmatizar y materializar esa pretensión, como son:

- ❖ El clima
- ❖ El suelo
- ❖ La planta
- ❖ El producto fertilizante
- ❖ La aplicación en el campo

Los mismos están estrechamente vinculados entre sí y operan bajo principios sinérgicos, pero también antagónicos, motivo por el cual deben ser muy bien articulados y armonizados para alcanzar un efecto favorable.

Un exceso en la cantidad de fertilizante nitrogenado adicionado al cultivo puede tener múltiples e indeseables repercusiones en el ambiente; siendo algunas de las más relevantes la contaminación de los acuíferos, como también la generación y emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera. Como anotara Chaves (2021b) en torno al nitrógeno, "...las formas inorgánicas que son por actividad

las más absorbibles por las plantas, consideran amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-), como también las consideradas tóxicas para los vegetales, como es el caso del amoníaco (NH_3^+) y el nitrito (NO_2^-). El N en la solución del suelo está presente de manera predominante como NO_3^- -N, el cual es relativamente poco adsorbido y, por lo tanto, más propenso a sufrir pérdidas por lixiviación; así como el NH_4^+ -N, el cual, está unido en gran proporción a las partículas del suelo de carga negativa.”

Al ser algunas de las fuentes nitrogenadas comerciales formuladas a base de nitratos débilmente retenidos en el suelo por razones de carga (-), provoca que estos adquieran una alta movilidad a través del flujo de agua que se da por los procesos de percolación y lixiviación en el perfil del sustrato; lo que induce en consecuencia, que los NO_3^- se movilicen en profundidad con el agua de drenaje pudiendo alcanzar y contaminar los acuíferos. La cantidad de nitratos lixiviados hacia el subsuelo depende del régimen de lluvias, de la frecuencia y volumen de riego, de la textura y capacidad de drenaje del suelo, la estructura radicular y la capacidad de absorción del cultivo; también de la fuente, la dosis aplicada y el momento de fertilizar, entre otros factores asociados. Se ha comprobado, sin embargo, como expresaron Mengel y Kirkby (2001), que las plantas obtienen una mejora más significativa en su nivel de crecimiento cuando se suministra nitrógeno en forma de NO_3^- respecto a cuando se aprovisiona en forma de NH_4^+ . De acuerdo con Chaves (1999bc, 2021b) y coincidentes con la aseveración anterior, se ha encontrado que, en el caso particular de la caña de azúcar, la forma nítrica es más afín y resulta más apropiada para obtener una máxima producción de materia prima (caña) y azúcar.

El NH_4^+ como fuente fertilizante comercial alternativa tiene también por su parte, una gran influencia en el crecimiento de los cultivos pues la planta lo asimila directamente sin incurrir en un gasto energético elevado; lo cual, por el contrario, si solamente se adiciona a la planta N en forma de NO_3^- , este debe para ser asimilado, ser reducido por medio de la enzima reductasa del nitrato para obtener amonio, lo cual implica un gasto importante en energía. Se infiere entonces, que si se adiciona NH_4^+ a la planta, se podría aminorar el proceso implicado ahorrando valiosa energía metabólica.

Como se anotó, la aplicación de fertilizantes nitrogenados al suelo puede incrementar significativa e inconvenientemente la emisión de óxido nitroso (N_2O) a la atmósfera, gas de fuerte efecto invernadero (GEI) que posee una capacidad de calentamiento que es aproximadamente 300 veces más alta en relación con la provocada por el dióxido de carbono (CO_2). El óxido nitroso es producido por microorganismos del suelo durante el proceso anaeróbico conocido como desnitrificación, cuyo origen son los nitratos. La magnitud de este proceso aumenta en suelos que poseen una alta disponibilidad de nitratos y grados elevados de humedad. En su actividad el nitrógeno posee una dinámica muy activa y compleja en el suelo, concebida,

entendida y expresada como “Ciclo del Nitrógeno”, como lo describiera con detalle Chaves (2010).

Sin embargo, es importante dimensionar que, desde la perspectiva agronómica, la pérdida de nitrógeno atmosférico provocada por la desnitrificación no constituye ni representa una disminución significativa en la eficiencia general de la fertilización, ya que su magnitud suele ser en teoría inferior al 5% del total de nitrógeno aplicado. En consecuencia, este mecanismo de pérdida no pareciera afectar severamente los rendimientos agroindustriales del cultivo, por lo que el manejo agronómico debe enfocarse fundamentalmente en procurar disminuir y mitigar los efectos GEI, que, sí son en este particular importantes, provocados por causa de la emisión del N_2O a la atmósfera.

Dada la creciente y desproporcionada necesidad alimentaria que se tiene actualmente en el orbe, la gestión agroproductiva ha ido en consecuencia en franco incremento, convirtiendo el suelo en un recurso limitado y muy frágil en consideración de que es usado con una intensidad mayor que la que ofrece su capacidad natural de recuperación; lo cual se da a través del laboreo continuo, uso excesivo de fertilizantes y agroquímicos tóxicos, eliminación y quema de los residuos orgánicos de cosecha, alta erosión y pérdida del valioso recurso natural a que está permanentemente sometido el suelo, entre otros factores incidentes, todo lo cual conduce a su rápida y severa degradación.

De acuerdo con Chaves (2020b), “*La degradación del suelo puede concebirse y definirse como el proceso degenerativo natural o inducido por el hombre (antrópico), que afecta negativamente la biota y la físico-química interna del suelo para soportar vida en un ecosistema, en nuestro caso plantaciones de caña de azúcar, reduciendo la capacidad productiva actual o futura de los suelos, lo que incluye e involucra procesos vinculados con la captación, almacenamiento, transformación y reciclaje de agua, materia orgánica y nutrientes. El proceso ocurre cuando el suelo pierde importantes propiedades y recursos naturales como consecuencia de una inadecuada utilización y manejo. Algunos lo califican como un cambio severo en la salud del suelo.*”

Amplía y posiciona el concepto el mismo autor, manifestando que “*Se mencionan como procesos de degradación física la compactación, artificialización (designa la ocupación para vivienda, infraestructura y equipamiento, que implica la impermeabilización y “sellado del suelo”), y las de naturaleza química están asociadas con la acidificación, salinización, pérdida de materia orgánica y contaminación del suelo. Una rápida pero detallada contextualización de esas causas al área sembrada comercialmente con caña en el país permite de inmediato comprobar que todas, exceptuando y minimizando la salinización, están presentes en nuestros campos, como se ha ampliamente señalado para el caso de la compactación [], la acidificación [], la pérdida de materia orgánica [] y la contaminación.*” A partir de estos

elementos, concluye convencido el autor, que *“En la caña de azúcar es una realidad que en Costa Rica la pérdida de potencial productivo de los suelos viene sucediendo y afectando, aunque algunos no quieran reconocerlo, lo cual se visualiza en la pérdida sistemática de productividad agrícola y acortamiento de la vida comercial utilitaria de las plantaciones, principalmente, y el aumento complementario de los costos asociados vinculados a gastos que buscan restituirla por medio del uso de insumos e intensificación del laboreo. El problema es serio y muy real y no imaginario, mediático o coyuntural.”*

Algunas técnicas inconvenientes de manejo agronómico del suelo de uso habitual en algunos sistemas de producción de caña de azúcar en el país, contribuyen ostensiblemente en promover y dinamizar la degradación de los suelos, como es el uso extensivo y abusivo de la quema o la eliminación de la cubierta vegetal y capa fértil superior del suelo con el laboreo, con lo cual afectan la cantidad de nutrientes presentes en el suelo, especialmente del N. Asimismo, hay un aumento significativo en el grado de escurrimiento superficial, afectando la capacidad de retención de agua y la eficiencia en el uso de los fertilizantes destinados a mejorar la productividad agroindustrial del cultivo. No cabe la menor duda en reconocer que las pérdidas de fertilizante, particularmente nitrógeno, que puedan darse en un sistema de producción agrícola, descontando la exportación de N en el producto biomásico cosechado (caña), significa una baja sensible e inconveniente en el grado de eficiencia por uso de un recurso de alto costo, el cual, por otra parte, incide significativamente en la relación costo/beneficio de la agroempresa, contribuyendo adicionalmente a generar graves problemas por afectación ambiental ocasionado por los nitratos que llegan a contaminar las aguas subterráneas, o son en su caso, conducidos por escurrimiento superficial.

Como señalara Chaves (2015) en torno al tema *“Las limitantes a la producción de caña son múltiples y muy variables, provocadas en alto grado por factores de índole natural, regional y hasta local, lo cual obliga para procurar su eventual solución, a identificar por zonas o territorios los problemas más serios y frecuentes.”* Reconociendo a su vez, que *“Muchas de las referidas limitantes son debidas a factores naturales del entorno, otras a errores, omisiones, descuidos, impericias y hasta desinterés propio del agricultor, motivo por el cual son en alguna medida razonablemente solucionables.”*

La eficiencia de un fertilizante como indicara Chaves (2021b), se define como la proporción (%) de nutrimentos utilizada por el cultivo (t o kg/ha), en relación con la cantidad total (kg/ha) aplicada con la fertilización comercial. La eficiencia del uso de N se puede expresar de diferentes maneras: EI = Eficiencia Interna de utilización de N, que corresponde a los kg de producción de caña por kg de N absorbido; FPP = Factor Parcial de Productividad: kg de producto cosechado por kg de N aplicado. Este concepto no debe confundirse con la eficacia, que se define como *“la capacidad de lograr el efecto que se desea esperar o pretende alcanzar”*. La eficiencia es entendida entonces como

la capacidad de lograr el efecto pretendido empleando el mínimo de recursos posible o, en su caso, en el menor tiempo posible. Lo deseable en el campo es maximizar la producción de caña (t/ha) minimizando la cantidad (kg/ha) de N adicionada.

El tema de la eficiencia en el uso de los fertilizantes nitrogenados debe ineludiblemente optimizarse y asegurarse, aplicando los mejores productos nitrogenados durante los periodos vegetativos del cultivo con mayor demanda de nitrógeno de la planta (fases 1 y 2 del ciclo vegetativo), retrasar la aplicación temprana o previa a la siembra, o en su caso, evitar aplicaciones tardías (fase 3) de los compuestos nitrogenados (Chaves, 2019a). No cabe por tanto duda, que utilizar la mejor fuente y la dosis óptima de nitrógeno requerida en el momento fisiológicamente oportuno, ajustada a las condiciones particulares del entorno agroproductivo donde se ubica la plantación, aseguran poder alcanzar la mayor eficiencia y eficacia en el uso del fertilizante comercial; aunado a una ecoeficiencia superior, lo que provee sostenibilidad al sistema de productividad.

Uso del Nitrógeno en caña de azúcar en Costa Rica

Discernir con buen criterio técnico y correcta visión empresarial sobre el manejo óptimo, eficiente y eficaz del nitrógeno que se aplica en las plantaciones comerciales de caña de azúcar, constituye sin lugar a dudas, una obligación e imperiosa necesidad por satisfacer virtud de la difícil situación coyuntural en que se desarrolla la agricultura competitiva actualmente, donde no basta apenas con producir más, sino, que los costos proyectados a la tasa unitaria de retorno de los factores de la producción, entre ellos el N, resulta determinante de optimizar en mejora directa de la rentabilidad y sostenibilidad de la agroempresa.

Seguidamente se abordan y comentan algunos temas relevantes que permiten comprender de mejor manera lo relacionado con el uso del N en la caña de azúcar en Costa Rica, lo cual, como es comprensible entender, no opera de forma aislada e independiente sino por el contrario, integrada y articulada a un complejo y dinámico sistema de producción con presencia de elementos bióticos y abióticos que lo determinan. Cabe señalar, que definir la dosis óptima de N por aplicar en las plantaciones comerciales de caña de azúcar en el país es un tema no fácil y muy complejo, virtud de la enorme heterogeneidad y variabilidad prevaleciente en prácticamente todos los factores vinculados con la producción, sean climáticos, edáficos, topográficos, tecnológicos y genéticos, entre otros. Es por ello relevante reconocer y aceptar, que los antecedentes investigativos formales y la experiencia comercial adquirida con los años en cada localidad productora, cobran especial importancia virtud de las significativas diferencias geográficas prevalecientes, como lo anotara y demostrara Chaves (2019bc, 2020c).

A. Antecedentes:

El antecedente sobre las cantidades de nitrógeno que históricamente se han aplicado en el cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica no es muy extendido en términos de tiempo, considerando principalmente que antes del año 50 la práctica agrícola habitual en materia nutricional era el empleo de abonos orgánicos y el laboreo de los terrenos, pues la tecnología química era aún muy limitada, incipiente y se encontraba apenas en fase investigativa. La realidad coyuntural del momento tampoco obligaba complementar lo que el suelo podía naturalmente proporcionar, pues el enfoque productivo no era orientado a favorecer como meta primaria la productividad agroindustrial por unidad de área; sino que el interés era producir sin importar el concepto unitario, pues se disponía de mucho terreno cultivable y las necesidades alimentarias y la capacidad exportable eran menores, lo que promulgaba y habilitaba una agricultura más de carácter extensivo que intensivo. La orientación se fundamentaba en satisfacer en primera instancia las necesidades nacionales y generar algún excedente exportable. La sustitución de importaciones operaba antes de los años 50 como una estrategia de crecimiento basada en el reemplazo de oferta externa por producción nacional, con el fin de satisfacer la demanda interna. Sin embargo, con la llegada de la denominada “Revolución Verde” entre los años 1960 y 1980, inicialmente en los Estados Unidos y proyectada luego a muchos otros países, todo cambio de manera radical y los enfoques productivos incurrieron por otras rutas con metas muy distintas.

Dicho movimiento trajo como consecuencia una mejora significativa en buena parte de la producción mundial en relación con el abastecimiento de alimentos, enfatizando en la mejora genética de variedades mejoradas, principalmente en el caso de los granos básicos (cereales como arroz, trigo y maíz), así como otros cultivos de consumo humano. El cambio implicó un gran esfuerzo en promover el incremento y diversificación de los rendimientos agrícolas en los países más pobres, y un cambio profundo de paradigma en las prácticas agrícolas tradicionales, basado en modernos enfoques genéticos, uso de agroquímicos, semillas mejoradas y nuevas prácticas agrícolas. Este revolucionario movimiento coincidió en el caso particular de Costa Rica con la reasignación y crecimiento de la cuota azucarera asignada por la nación del Norte al país, acontecida a inicios de los años 60 por los problemas políticos surgidos entre Cuba y los EUA, lo que ameritaba indubitablemente para Costa Rica producir más caña y extraer más azúcar para satisfacer la asignación (Chaves y Bermúdez, 2020).

Los ingentes avances y logros alcanzados principalmente en la década de los años 50 en el campo genético de las variedades, manejo agronómico del cultivo, uso del riego, fitosanidad, mecanización de labores, maduración y cosecha de plantaciones y uso de nutrimentos minerales como el N, pasaron a ser de uso comercial habitual, lo que favoreció, promovió y produjo una mejora muy significativa valorada

en términos de productividad agroindustrial. Puede asegurarse basado en datos históricos, que la investigación sobre el uso de fertilizantes minerales sintéticos en la caña de azúcar adquirió relevancia investigativa a partir de los años 50 e importancia comercial luego de los 60; motivo por el cual, el antecedente nacional en materia nutricional no supera los 70 años.

Una revisión de antecedentes revela que las cantidades de fertilizante aplicadas antes del año 1990 eran altas, motivadas por circunstancias como: a) el impulso por producir mucha biomasa industrializable ya que el pago de la caña entregada se hacía por peso (tonelada) y no por su contenido de sacarosa (kg/t); b) la disponibilidad y el precio de los fertilizantes relativamente bajo; c) la rentabilidad de la actividad que permitía incurrir en más gastos; d) la falta de tantas exigencias de carácter ambiental que atender; y e) la tecnología y el enfoque comercial promocionaban el empleo del N como factor promotor del incremento productivo, entre otros.

En el cuadro 2 se coloca un resumen atribuido a varias fuentes nacionales, que revela las cantidades y variaciones que existían en la recomendación comercial de fertilizantes químicos aplicados al suelo antes del año 1991, en diferentes localidades productoras de caña y ordenes taxonómicos de suelo (Bertsch, 1998). Es fácil demostrar como con las dificultades surgidas luego del año 1990 en materia comercial (acuerdos, tratados), económica (costos, precios, inversión, rentabilidad), tecnológica (potenciales) y ambiental (legislación), la producción de caña en el campo adquirió un sentido muy competitivo que hizo notar y evidenció las grandes limitantes existentes entre regiones, zonas y localidades productoras, provocando que algunas de ellas mantengan aún hoy día, niveles de productividad y rentabilidad muy bajos que limitan pese al esfuerzo e interés del agricultor, poder invertir en tecnología productiva.

Cuadro 2. Dosis de N-P-K recomendadas en caña de azúcar en Costa Rica antes de 1991.

Indicador	kg/ha			Lugar o suelo	Referencia
	N	P2O5	K2O		
	143			Guanacaste	Subirós, 1988
		100		Volio, San Ramón	MAG, 1989
		200		Grecia, Alajuela	MAG, 1989
	100-200	80-200	100-200	Valle Central	DIECA, 1982-83
	100-180	100-280	100-150	San Carlos	DIECA, 1982-83
	100-200	50-200	80-200		MAG, 1991
	100-200	70-200	90-175		FERTICA
		100-500		Grecia	Chaves <i>et al.</i> , 1984
			60-420	Oxíc Dystrandep	Alpizar <i>et al.</i> , 1984
	125-250	200	125-200	Grecia	Arias, 1984
	50-200	30-400	75-300	San Carlos	Robles, 1984
	60-100	120-140	60-180	Ultisol	Chaves y Arrea, 1984
	150				Boddey, 1991
Ámbito	50-250	30-500	60-420		
Promedio	142	173,5	157		

Fuente: Bertsch (1998).

Con relación al tópico, reconocía Chaves (1983) hace ya bastante tiempo (38 años), que “Los suelos nacionales presentan gran variabilidad respecto a sus características químicas y físicas, lo cual se

acentúa aún más si analizamos la diversidad de climas y materiales genéticos que predominan en cada una de nuestras regiones cañeras.” A partir de lo cual se generaron por región productora las siguientes recomendaciones de dosis de N: Región Chorotega (Guanacaste y norte de Puntarenas) 75-100 kg; Valle Central 100-200 kg en la zona media; Turrialba 100-160 kg; San Carlos 100-150 kg en zona baja y 120-180 en la media-alta; Pacífico Sur 100-150 kg y dosis de 150-200 kg de N/ha en las zonas altas (>1.000 msnm) que sembraban caña lo que involucraba Juan Viñas, La Luisa, San Pedro de Poas y Santa Cruz de Turrialba. Como se nota el rango de aplicación de N para esa época era de 75 a 200 kg de N/ha, lo que marca una media de 137,5 kg.

Factores de variabilidad:

Son muchos y de características muy diferentes los factores y elementos que participan influyen e intervienen en la expresión y manifestación del potencial genético que una determinada variedad comercial de caña pueda tener en un entorno productivo particular. Entre esos factores, no cabe la menor duda que el factor nutricional y en lo específico el relacionado con el nitrógeno es determinante virtud de su influencia en la producción de biomasa y por ende de azúcar por unidad de área (t/ha). El potencial genético que una variedad mejorada de caña contenga en términos de productividad agroindustrial, está supeditado y dependiente principalmente de las características del clima, el suelo y el manejo agronómico que reciba.

La variabilidad que prevalece en los ambientes agroproductivos sembrados con caña de azúcar en el país es muy alta y muy desigual, como lo anotara y demostrara Chaves (2019c), al manifestar, que *“Sin tener que ir territorialmente lejos, pueden encontrarse y localizarse en Costa Rica condiciones muy disímiles y opuestas en prácticamente todos los elementos que participan directa o indirectamente en la producción de caña, donde destacan y marcan diferencias significativas los elementos clima, edáficos, relieve, fitosanidad, manejo agronómico de plantaciones, potencial mecanizable, ciclos vegetativos (12-24 meses), variedades cultivadas, estructura de tenencia de la tierra, potencial de riesgo climático (sequía, inundación, tormenta, huracán, etc.), ciclo de maduración, inversión tecnológica, capacidad y eficiencia fabril, entre muchos otros que pueden identificarse y nombrarse. Esas diferencias, expresa Chaves (2019b), introducen y favorecen variaciones determinantes y muy significativas en la calidad de la materia prima producida y procesada en el país. Puede asegurarse, sin temor a equivocarse ni faltar a la verdad que, Costa Rica posee pese a su pequeña área sembrada con caña de azúcar, una de las condiciones y ambientes de cultivo más heterogéneas de la región y del mundo; esto visto y valorado dentro de la relatividad y proporcionalidad debida y correcta en que debe ser juzgado e interpretado, lo cual incuestionablemente participa, explica y determina en alto grado la productividad y la producción agroindustrial del sector.”*

En torno al tema de las interacciones existentes entre factores bióticos y abióticos, señala Chaves (2020c) en relación específica con el clima, que *“La relación clima-cultivo es directa, pues los elementos que lo conforman y accionan intervienen diferentes procesos, mecanismos y actividades fisiológicas, metabólicas, enzimáticas, hormonales, entre otras. En la planta de caña el clima influye sobre: la fotosíntesis; la división celular; la respiración; la germinación de las yemas; el desarrollo, elongación y crecimiento radicular; el ahijamiento; el retoñamiento; la formación de cepa; el crecimiento y la elongación de los tallos; el engrosamiento de los tallos; inducción y emisión de la flor; absorción, transporte, acumulo y empleo de nutrimentos; apertura y cierre estomático; regulaciones y balance hídrico; acumulo y concentración de sacarosa (disacárido) en los tallos; inversión de sacarosa en azúcares simples (Glucosa y Fructuosa). Como se infiere la participación de los elementos del factor clima son amplios, específicos y variables según el estado fenológico de la planta y las condiciones del entorno agro productivo [].”*

Sumado a lo anterior, acontece de igual manera en lo concerniente al tema nutricional, no apenas el vinculado con la fertilización como práctica agrícola, que también hay elementos propios y particulares de los productos y la planta que determinan la eficiencia y eficacia en el uso de los abonos y productos minerales. Manifiesta Chaves (2021a) al respecto, que *“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 []. 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.”*

En una materia tan importante y sensible como es la nutricional, el principio de las proporciones, los balances y equilibrios, las sinergias y los antagonismos prevalecientes naturalmente entre nutrimentos y que afectan los factores y actividades por desarrollar en el manejo técnico-administrativo de un sistema agroproductivo, resultan ineludiblemente obligados de atender, satisfacer y respetar; todo en procura de aprovechar el enorme potencial intrínseco y lograr optimizar el comportamiento de la planta de caña en lo particular y la plantación en lo general (Chaves 2020d). Como fuera de igual manera manifestado por el mismo autor (Chaves 2021a) al valorar el factor nutricional, asociado con el tema del estrés mineral, *“Optimizar la eficiencia de uso de los nutrimentos incorporados mediante la fertilización conlleva imperativamente la aplicación correcta de productos comerciales, considerando: fuente apropiada, dosis justa, en el momento oportuno y en la forma de colocación (ubicación) correcta. Esos cuatro factores inevitablemente interactúan entre sí, como también con las condiciones edafoclimáticas y las prácticas de manejo del cultivo en el lugar.”*

Como se infiere e interpreta de todo lo anterior, conocer y determinar la dosis (kg/ha) necesaria y justa de nitrógeno requerida por la planta de caña se convierte en una obligación técnico-administrativa inapelable e insoslayable, particularmente considerando la gran variabilidad de condiciones de producción en que se ubican geográficamente las plantaciones comerciales del cultivo en el país, lo que es aplicable aun dentro de una misma unidad productiva.

B. Costos implicados:

No hay duda en reconocer que el costo económico y esfuerzo administrativo implicado en atender la fertilización comercial de las plantaciones tiene repercusiones financieras importantes para la empresa, que se deben procurar optimizar en todos los sentidos, con el objeto de maximizar la tasa unitaria de retorno por el nutrimento aplicado y reflejarlo en el margen final de rentabilidad del emprendimiento agroindustrial cañero-azucarero.

De acuerdo con los costos de producción agrícola que anualmente DIECA¹ fórmula para fines sectoriales y que son utilizados por el Sistema Bancario Nacional (SBN) para fines crediticios, se tiene que, para febrero del año 2021, la fertilización es integralmente un rubro que tiene como se aprecia en el cuadro 3, repercusiones importantes en la estructura general de los costos implicados en la siembra, establecimiento y mantenimiento de las plantaciones comerciales en los ciclos de caña planta y soca.

Como se infiere de dicho cuadro, en el caso del ciclo vegetativo de caña planta el costo económico asociado con la nutrición incluye la corrección de acidez y el acondicionamiento del suelo, la aplicación de fósforo a la siembra y complementariamente la adición de nitrógeno y potasio como parte del mantenimiento de la plantación, entre otros nutrimentos complementarios. Importante tener presente que la variación en las cantidades aplicadas y montos económicos implicados entre regiones es como se demostrara muy amplia, por lo cual se muestra en el presente caso apenas el resultado del promedio nacional.

Cuadro 3. Costo de la fertilización según ciclo vegetativo. Promedio nacional, febrero 2021.

Ciclo Vegetativo	Costo (¢), porcentaje y momento de aplicación			Total
	Corrección	Siembra	Mantenimiento	
Planta	169 328	169 541	199 604	538 473
	6,05%	6,06%	7,14%	19,25%
Soca			201 150	201 150
			13,00%	13,00%

Fuente: Costos de producción agrícola DIECA (febrero 2021). 1 us\$= ¢628.

Nota: valores corresponden a un promedio nacional. Incluye costos de siembra, establecimiento, mantenimiento y cosecha de la plantación.

Corrección con CaCO₃ y uso de fórmulas fertilizantes varias según región.

La nutrición promedio de las plantaciones comerciales, incluyendo la corrección y el acondicionamiento de los suelos ácidos, implica en el país en el caso de la caña planta un gasto equivalente al 19,25% del costo total del cultivo (siembra, establecimiento, mantenimiento y cosecha), correspondiente a ¢538.473, suma muy significativa; que en caso de no considerar la corrección y limitarse estrictamente al fertilizante, significa un 13,20% (¢369.145). En el caso del ciclo soca (mantenimiento y cosecha), la aplicación del fertilizante representa un 13,0% (¢201.150), lo que es también muy significativo. Es importante señalar que la nutrición se ubica en ambos ciclos vegetativos como el segundo rubro en importancia en materia de costos implicados, luego de la cosecha, lo que dimensiona su indiscutible importancia.

En lo particular y específico para el caso del nitrógeno, se tiene según costos de la Cámara de Productores de Caña Zona Sur (7 de julio 2021), que el costo unitario del nutrimento es proporcionalmente de ¢330 (us\$0,52) y ¢413 (us\$0,65) por kilogramo para la urea (45% N) y el nitrato de amonio (33,5% N), respectivamente, para un promedio de 367,5/kg de N (us\$0,58); lo que denota una implicación financiera importante al proyectarlo a las dosis comerciales aplicadas. Por ejemplo, el impacto de un incremento o una disminución de 10 y 20 kg de N en una aplicación aumenta o reduce el costo en aproximadamente ¢3.675 (us\$5,85) y ¢7.350 (us\$11,70) por hectárea, respectivamente, solo considerando el insumo y no su transporte y aplicación en el campo. Cuando esos valores se proyectan a unidades productivas por ejemplo de 5, 10 y 20 hectáreas el monto se torna significativo, pues pasa a ser entonces de ¢36.750 (us\$58,51), ¢73.500 (us\$117,03) y ¢147.000 (us\$234,07) para el caso teórico de los 20 kg; esto sin considerar la grave afectación que sufre la plantación en términos de productividad a causa del “estrés mineral”, sea por exceso o déficit del nutriente (Chaves 2021ab). El impacto financiero sobre la agroempresa no puede ser ignorado en materia de fertilización.

¹ Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar de la Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA).

¿Cuánto Nitrógeno se aplica en las plantaciones de caña de azúcar del país?

Existen aún muchos tópicos que conocer y cuestionamientos que responder en torno al tema de la nutrición nitrogenada empleada actualmente en el país, los cuales pese a contar con abordajes parciales y aproximaciones importantes sobre el mismo, no existe un estudio actualizado que de manera integral dé respuesta fidedigna y calificada a las mismas. En el año 2012 se realizó una exhaustiva evaluación del tema que sirve de referencia comparativa (Chaves 2012). Con el objeto de conocer específicamente y contestar la válida inquietud sobre ¿Cuánta es la cantidad de nitrógeno que se aplica en las plantaciones de caña de azúcar de Costa Rica? ¿Cómo se distribuye geográficamente la misma en el ámbito nacional según sector involucrado? ¿Varían las dosis aplicadas con respecto al ciclo vegetativo? Se realizó el presente estudio, cuyos alcances permiten ahondar y tener una mayor certeza de lo que acontece en los cañaverales costarricenses en la actualidad.

C. Metodología de trabajo:

Para recabar la información básica empleada en el estudio se contó con el calificado apoyo de los especialistas del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), quienes recaudaron mediante consulta experta la información de campo para otro fin, como era servir de material de trabajo para la formulación de una Nota Conceptual y perfilamiento de un NAMA (Acción de Mitigación Nacionalmente Apropiada, siglas en inglés) sectorial sobre caña de azúcar. La información fue recolectada en el mes de diciembre 2020, organizada, ajustada, tabulada y analizada por el autor del presente documento para el objeto aquí expuesto. La cantidad de consultas por región fue variable, aunque suficiente y muy representativa para dar consistencia y confiabilidad a las conclusiones derivadas. No se aborda el tema de las fórmulas empleadas, la forma y el momento de aplicación.

Para lograr una mejor inferencia y aprovechamiento de la valiosa información recolectada sobre las dosis de N aplicadas, la misma fue estratégicamente desagregada y analizada por el autor de la siguiente forma:

- ❖ Por sector involucrado, esto es Productores Independientes e Ingenios (11).
- ❖ Por región productora, para lo cual aplicaron las seis regiones cañeras oficiales: Guanacaste, Pacífico Central, Zona Norte, Zona Sur, Valle Central y Turrialba-Juan Viñas.
- ❖ Se discriminó a su vez las Zonas Altas donde las plantaciones se ubican en altitudes mayores a 1.000 msnm.
- ❖ Por Ciclo Vegetativo fuera Planta o Soca sin identificar el número de cosechas en el caso de los retoños.
- ❖ De acuerdo con las interacciones entre los indicadores anteriores.

Importante señalar y reiterar que el presente estudio constituye apenas una calificada y confiable aproximación, que debería luego ser complementada con un estudio formal y amplio sobre el mismo tópico, que aporte consistencia estadística a los resultados obtenidos y conclusiones derivadas.

D. Nitrógeno aplicado por:

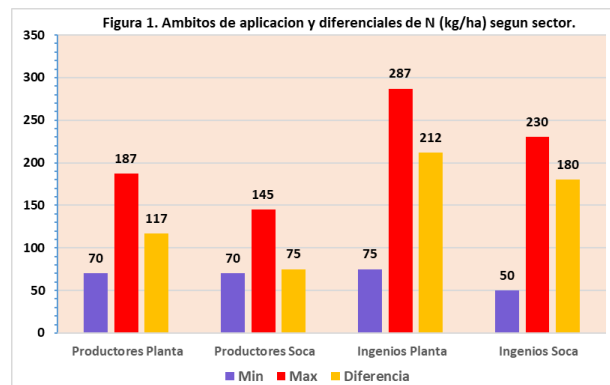
Seguidamente se anotan las cantidades de N (kg/ha) aplicadas según sector de la agroindustria evaluado, localidad geográfica involucrada y la relación generada entre ambas (sector por región):

a. Sector Agroindustrial:

En el cuadro 4 y la figura 1 se exponen los valores promedio general estimados correspondientes a los dos grandes sectores involucrados en relación con la: a) producción primaria de materia prima (caña) y b) procesamiento y fabricación de azúcar; incorporando y ubicando además el ciclo vegetativo, los rangos (mínimo-máximo) de aplicación, el valor diferencial (ámbitos) correspondiente entre ambos indicadores y una estimación del promedio aritmético del rango.

Cuadro 4. Promedio de N aplicado (kg/ha) según sector y ciclo.

Sector	Planta	Soca	Ámbito	Promedio
Productores	128,5	107,5	70 - 187	118,0
Ingenios	140,0	140,0	50 - 287	140,0
Nacional	134,3	123,8	50 - 287	129,0



- Productores Independientes: como se infiere de dicho cuadro y figura, las cantidades de N adicionadas por parte de los Productores Independientes son en promedio significativamente menores respecto a las agregadas por los Ingenios en ambos ciclos vegetativos (planta-soca), revelando un ámbito de aplicación bastante amplio en ambos casos como muestra de las grandes diferencias que se dan en las dosis incorporadas y el efecto diferencial entre localidades productoras. No existe, por tanto, consistencia

en las aplicaciones de N realizadas en el país, lo que limita poder fijar estándares fijos como acontece en otras agroindustrias de la región, lo cual es debido fundamentalmente a varios factores: a) las grandes y significativas diferencias edafoclimáticas prevaecientes a nivel regional, b) tamaño variable de las unidades productivas, c) grado de rentabilidad y capacidad financiera desigual, d) expectativa productiva y e) visión comercial y empresarial divergente, entre otras.

- **Ingenios:** es definitivo que en este caso la visión productiva y la expectativa comercial del emprendimiento agroempresarial desarrollado se expresan en una mayor preocupación gerencial por producir más caña (t/ha) con mayor contenido de sacarosa (kg/t) y con ello más azúcar por unidad de área (t/ha); lo que conlleva operativamente implementar más inversión y un manejo diferenciado de la fertilización y en particular del N incorporado, el cual, es en lo particular, aplicado en promedio en una mayor cantidad (kg/ha). La diferencia promedio de cantidades entre sectores es de 11,5 kg/ha (8,9%) en el caso de la caña planta y de 32,5 kg/ha en soca para un significativo y concluyente 30,2%. Es claro que la diferencia entre sectores en torno a este indicador se marca principalmente en el manejo de los retoños.

b. Región productora:

El cuadro 5 sitúa con gran detalle los promedios de fertilización nitrogenada organizados y expuestos por rango de aplicación, ubicados por región productora para los ciclos vegetativos de caña planta y soca o retoño; lo que permite y favorece tener una perspectiva holística de lo actuado por el sector azucarero costarricense en este particular.

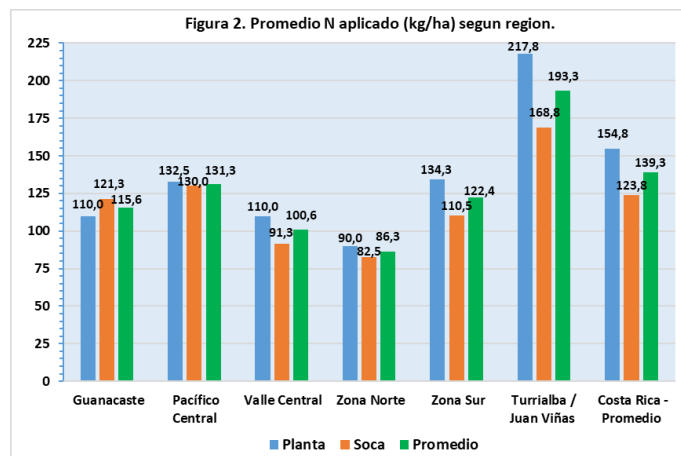
Es definitivo que la variabilidad y heterogeneidad es la norma predominante pues las diferencias que se dan entre regiones son mayúsculas, lo que se vislumbra y distingue aún mejor en el cuadro 6 y la figura 2, en los cuales se colocan los valores promedio del rango del N aplicado (kg/ha) en cada una de las seis regiones que producen oficialmente caña en Costa Rica destinada a la fabricación de azúcar. La información se desagrega por ciclo vegetativo y expone también de manera integral.

Región Productora	kg N/ ha *			
	Productores		Ingenios	
	Caña planta	Caña soca	Caña planta	Caña soca
Guanacaste	120 - 130*	120 - 140	90 - 100	90 - 135
Pacífico Central	105 - 115	120 - 130	150 - 160	130 - 140
Valle Central	90 - 130	90 - 110	75 - 145	50 - 115
Zona Norte	70 - 90	70 - 80	90 - 110	80 - 100
Zona Sur	105 - 125	90 - 100	147 - 160	122 - 130
Turrialba / Juan Vías**	130 - 187	90 - 145	267 - 287	210 - 230
Costa Rica - Ámbito	70 - 187	70 - 145	75 - 287	50 - 230
Costa Rica - Promedio	128,5	107,5	181	140

Fuente: Consulta experta funcionarios regionalizados de DIECA (diciembre 2020).
 * Establecidos a partir de consulta experta hecha a técnicos y productores.
 ** Algunas plantaciones corresponden a ciclos vegetativos de 18 a 24 meses.
 Nota: Los ámbitos se dan entre valores mínimo-máximo.

Región Productora	Productores		Ingenios		Promedio Sectorial	Sector **	
	Planta	Soca	Planta	Soca		Productor	Industrial
Guanacaste	125	130	95	112,5	115,6	127,5	103,7
Pacífico Central	110	125	155	135	131,3	117,5	145
Valle Central	110	100	110	82,5	100,6	105	96,2
Zona Norte	80	75	100	90	86,3	77,5	95
Zona Sur	115	95	153,5	126	122,4	105	139,7
Turrialba / Juan Vías*	158,5	117,5	277	220	193,3	138	248,5
Costa Rica - Promedio Arit.	116,4	107,1	148,4	127,7	124,9	111,8	138,0
Costa Rica - Promedio Amb.	128,5	107,5	181	140	139,3	118	160,5

* Algunas plantaciones corresponden a ciclos vegetativos de 18 a 24 meses.
 ** Promedio de los ciclos vegetativos.
 Promedios correspondientes a: Media Aritmética y Media de valores del ámbito (mínimo-máximo).



Por su parte, el cuadro 7 marca las diferencias (ámbitos), expresadas en kg/ha, que se dan entre los rangos de fertilización reportados y presentados en el cuadro 5 para cada una de las seis regiones

agrícolas, sectores productivos y ciclos vegetativos evaluados; lo que permite cuantificar y dimensionar el grado de variación prevaleciente en las cantidades de N incorporado a lo interno y entre localidades productoras de caña en torno a esas variables. Dicho indicador mide la cantidad de N que hay entre los valores menor y mayor reportados por los productores e ingenios consultados; evidenciando que un índice alto significa una alta variación y lo contrario una diferencia baja expresiva de una mayor coincidencia en las cantidades adicionadas.

Cuadro 7. Diferencias (amplitud) entre rangos de aplicación de Nitrógeno según región y ciclo vegetativo.

Región productora	Productores		Ingenios		Sector **	
	Planta	Soca	Planta	Soca	Productor	Industrial
Guanacaste	10	20	10	45	15	27,5
Pacífico Central	20	10	10	10	15	10
Valle Central	40	20	70	65	30	67,5
Zona Norte	20	10	20	20	15	20
Zona Sur	20	10	13	8	15	10,5
Turrialba / Juan Viñas*	57	55	20	20	56	20
Costa Rica - Promedio	117	75	212	180	96	196
* Algunas plantaciones (>1.000 msnm) corresponden a ciclos vegetativos de 18 a 24 meses.						
** Promedio (kg N/ha) de los ciclos vegetativos.						
Nota: Cada valor es la diferencia entre los índices extremos del ámbito (mínimo-máximo).						

Los datos mostrados en dichos cuadros permiten en términos generales inferir elementos como los siguientes:

- La variación y dispersión en las dosis de N aplicadas en el campo cañero están determinadas por razones edáficas, climáticas, productivas, financieras, de ciclo vegetativo, varietales y expectativas del agricultor.
- Las cantidades de N aplicadas en Costa Rica varían significativamente entre regiones, lo que responde a diferencias físico-químicas y microbiológicas de los suelos, clima prevaleciente e inversión en tecnología, entre otras, como se anotó anteriormente.
- La Zona Norte es la región agrícola que en promedio menores cantidades de N (86,3 kg/ha) incorpora, seguida por el Valle Central (100,6 kg). En contrapartida, Turrialba-Juan Viñas por su parte, es significativamente la más alta (193,3 kg), seguida por el Pacífico Central (131,3 kg).
- Las dosis más altas de N (210-287 kg/ha) corresponden a plantaciones de ciclo bianual (18-24 meses) ubicadas en la zona alta (>1.000 msnm) de los cantones de Turrialba, Jiménez (Juan Viñas), Alvarado y Paraíso.
- Es evidente como se aprecia en el cuadro 4 y la figura 1, que las dosis de N incorporadas son mayores en el caso de los Ingenios respecto a los Productores Independientes, al mostrar promedios de 181,0 y 128,5 kg/ha para caña planta y de 140 y 107,5 kg para el ciclo de soca o retoño, respectivamente. Uno de los motivos justificantes es la capacidad financiera disponible y disposición para invertir en tecnología.

- La caña planta de primer ciclo incorpora en promedio de acuerdo con las estimaciones nacionales más N (136,4 kg) que la de soca o retoño (120,9 kg). La media nacional fue estimada en 134,7 kg de N/ha. De igual manera, se encontró que los Ingenios adicionan en promedio significativamente más N (138 kg) respecto a los Productores Independientes (111,7 kg), como se indica en el cuadro 8.
- Turrialba-Juan Viñas es la localidad cañera donde más se polariza el rango (mínimo-máximo) cuyas dosis de N incorporadas en el caso de los productores alcanzan una amplitud de 57 kg en caña planta y 55 kg en soca; lo cual se da también en los Ingenios del Valle Central con índices significativos de 70 y 65 kg/ha, respectivamente, como expresión de las diferencias que existen en los programas de fertilización.

Al aplicar una valoración por región agrícola se identifican los siguientes comportamientos:

- Guanacaste:** por corresponder a la zona agrícola con más área sembrada (55,8%) y donde más caña (57,6%) y azúcar (59,0%) se produjo en Costa Rica en la Zafra 2019-20, lo actuado en la materia estudiada resulta incuestionablemente muy revelador, pues es por ello la condición dominante en el país. Es notorio como las cantidades de N incorporadas (kg/ha) en ambos sectores es muy similar, con una tendencia a ser menor en el caso de los Ingenios, lo que revela una posible mayor optimización de la cantidad de N aplicada al contar con un mayor control de los factores naturales y tecnológicos vinculados con la producción, traducidos en uso de riego, manejo de drenajes, mecanización, mejor preparación y acondicionamiento de los suelos (Angulo *et al* 2020). El margen de variación del rango es sin embargo superior en 27,5 kg en los tres Ingenios del lugar (Taboga, CATSA, El Viejo) en relación a los agricultores (15 kg). No puede desconocerse adicionalmente, que buena parte de los suelos poseen un grado de fertilidad natural medio-alto, que favorece una buena nutrición con menos exigencia y dependencia de los fertilizantes sintéticos minerales. La condición del clima del lugar es relativamente muy apropiada desde la perspectiva fisiológica y metabólica para producir caña, como lo expresara Chaves (2019bc, 2020cd). De igual manera, la presencia de suelos del orden Inceptisol (35,0%), complementados con los Vertisoles (31,2%) y Mollisoles (23,4%) de alta fertilidad, que conjuntamente representan el 89,6% de toda la región, aseguran esas condiciones desde la perspectiva química y no necesariamente por sus condiciones físicas limitantes como acontece con los segundos, como lo señalaran Chaves (2017a) y Chaves y Chavarría (2017). La cantidad promedio de N

correspondiente a 127,5 y 103,7 kg/ha para productores e ingenios, respectivamente, revela lo anotado; diferencia debida a que la cantidad mínima adicionada es muy superior (120 kg) en el caso de los primeros en relación con los segundos (90 kg), como se aprecia en el cuadro 5. El promedio general unificado es de 115,6 kg N/ha. Obviando la zona alta de Juan Viñas (ciclo de 18-24 meses), la cantidad de N aplicada en Guanacaste supera al resto de localidades en el caso de los productores, no así en los Ingenios donde ocupa el tercer lugar.

- Pacífico Central:** zona baja relativamente similar en términos de clima respecto a la anterior que se unifican bajo el concepto de Pacífico Seco, mantiene actualmente el 9,5% del área cultivada a partir de la cual procesó el 9,3% de la caña con la cual fabricó el 8,6% de toda el azúcar nacional. En esta localidad sucede lo contrario a la anterior, pues los escasos entregadores (45) de caña reportados, utilizan significativamente menos cantidad de N respecto al ingenio del lugar (El Palmar), pese a mostrar una mayor variación en las mismas lo que se visualiza en su rango; y que en promedio general se ubica en 117,5 y 145,0 kg N/ha para ambos sectores. Los órdenes de suelo en la región están polarizados en Inceptisoles (79,1%) de fertilidad aceptable, Entisoles (15,8%) y Ultisoles (5,1%) con presencia de reconocidas limitantes químicas por causa de su acidez e infertilidad. Destaca el hecho de que la dosis mayor incorporada por los productores (130 kg) apenas iguala la mínima del ingenio, el cual emplea dosis consideradas como muy elevadas en un rango de 130 a 160 kg N/ha. El promedio general de aplicación de la región es de 131,3 kg N/ha incorporado en un rango amplio de 115-160 kg/ha, como se anota en el cuadro 5 para una amplitud entre ambos de 45 kg.
- Zona Norte:** segunda zona productora en importancia del país que sembró el 14,8% del área, procesó en el 2020 el 13,4% de la materia prima con la que fabricó el 11,9% de toda el azúcar costarricense. Es la que menos N incorpora en sus plantaciones comerciales, como lo demuestra el rango general de 70-110 kg que reporta el sector, lo que denota un límite inferior muy bajo de apenas 70 kg (cuadro 5). Las dosis mayores son aplicadas en este caso por los dos ingenios (Cutris, Quebrada Azul) que operan en la zona; cuya dosis mínima supera las dosis máximas de los productores, vislumbrando las grandes diferencias prevalecientes en el lugar. Una dosis de 70 kg de N/ha pareciera ser baja para las características edafoclimáticas, las condiciones y las expectativas productivas potenciales de la región, como lo

demonstraran con buen criterio Chaves (2019bc) y Chaves y Barquero (2020). Como señalaran Chaves y Chavarría (2017) los suelos de esta región son predominantemente (47,3%) de naturaleza ácida e infértil (Ultisoles); también hay Inceptisoles (44,6%) y Entisoles (5,5%) sin estructuración y los suelos de origen volcánico Andisoles (2,3%), entre otros. El promedio general de N aplicado en toda la región es de 86,3 kg/ha, desagregado en sus dos sectores agrícola con 77,5 kg e industrial con 95 kg/ha, confirmando lo que podría ser eventualmente insuficiente para satisfacer las necesidades y exigencias nutricionales diferenciales de la región; considerando, como se indicó, su heterogéneo y disímil entorno agroproductivo. Esos índices de N son los más bajos aplicados en el país. La variación dentro del rango con amplitudes de 15 y 20 kg/ha para los sectores agrícola e industrial, respectivamente, es buena en el sentido de que se observa consistencia en la tendencia, aunque la cantidad, como se indicó, es considerada baja.

- Zona Sur:** pese a ser la región productora más nueva y con presencia de condiciones edáficas y topográficas difíciles, en el año 2020 se sembró un área equivalente al 6,7% que produjo el 6,8% de toda la caña y fabricó el 7,5% del azúcar nacional. El 95,3% de los suelos cañeros del lugar pertenecen al orden taxonómico Ultisol, caracterizado por poseer serias limitaciones químicas con presencia de altas concentraciones de acidez intercambiable ($H^+ + Al^{3+}$), bajos contenidos en bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), afectación por bajo pH y consecuentemente problemas con la actividad microbiológica, lo que se traduce en una condición de infertilidad manifiesta que debe ser necesariamente corregida con el aporte de nutrientes vía fertilización, como lo señalaran Barrantes y Chaves (2020). Complementariamente el 2,8% de los suelos corresponde a Entisoles e Inceptisoles (1,9%) y algo de Oxisoles. En lo específico, el rango de aplicación general de N varía entre 90 y 160 kg/ha, con dosis superiores en las plantaciones del Ingenio Coopeagri El General R.L., respecto a la incorporada por los productores de la localidad. En promedio se estima la adición de 122,4 kg de N/ha desagregado en 105,0 kg por los productores y 139,7 kg/ha por el ingenio; cuya variación interna (amplitud) para los rangos fue de 15 kg y 10,5 kg, respectivamente (cuadros 6 y 7). Pareciera en principio que la cantidad de N aplicada por los agricultores, sobre todo en el ciclo de soca o retoño es algo limitada para las condiciones y características de los suelos de la región, lo que podría estar incidiendo en las bajas productividades.

- Valle Central:** esta es la región cañera por antecedente más tradicional del país, la cual ha venido sin embargo a menos con el tiempo, representando actualmente apenas el 6% de toda el área sembrada, produciendo el 8% de la materia prima molida con la que se fabricó el 8% del azúcar costarricense. La tendencia en dosis de N aplicadas revela de acuerdo con el cuadro 5, que los agricultores incorporan en promedio más N que los tres Ingenios que operaron en la zona (Coopevictoria R.L., Providencia y Porvenir). El rango de N incorporado al suelo en toda la zona se ubicó en general entre 50 y 145 kg/ha; siendo sin embargo en promedio similar para productores (105 kg) e ingenios (96,2 kg/ha), para una media regional de 100,6 kg de N/ha. Las plantaciones comerciales en ciclo de soca son en las que menos N se incorpora, lo que es técnicamente cuestionable (cuadro 6). Digno de resaltar es la gran magnitud de variación que muestran los rangos de aplicación identificados, los cuales marcaron márgenes de 30 kg para los productores y de 67,5 kg/ha para los Ingenios, lo que es muy alto y evidencia las diferencias en las cantidades de N incorporadas, donde unos aplicaron mucho y otros poco N (cuadro 7). En esta región el factor edáfico es favorable, pues los suelos presentan una condición dominante de fertilidad alta y satisfactoria, con las excepciones del caso en algunas localidades. El orden taxonómico principal de los suelos de la región es amplio y está bien distribuido, siendo el siguiente: Andisol (38,8%), Ultisoles (29,1%), Inceptisoles (24,1%), Entisol (4,4%) y Vertisol (3,5%). La región puede calificarse (opinión del autor) como la que mejor potencial agroindustrial posee para producir caña de azúcar en Costa Rica, con presencia de algunas limitantes de relieve y áreas mecanizables para siembra que obligan a desarrollar un sistema de “agricultura de ladera”.
- Turrialba-Juan Viñas:** al igual que la anterior, esta es una zona tradicional de producción que con el tiempo ha venido perdiendo relevancia. En la actualidad representa el 7,2% del área sembrada con caña en el país, a partir de la cual se produjo el 4,9% de la materia prima procesada con la que se fabricó el 4,9% de toda el azúcar nacional (Calderón y Chaves 2020). Los suelos de la región clasifican en los órdenes taxonómicos de volcánicos o Andisoles (53,7%), Inceptisoles (31,1%) y rojos o Ultisoles (15,2%). En materia de fertilización esta es la región que posee el rango más amplio en cuanto a dosis aplicadas, establecido en el ámbito 90-287 kg de N/ha, lo cual surge en consideración de que sus plantaciones comerciales se distribuyen en un amplio piso altitudinal que va de 480 a 1.653 msnm, de las cuales un 36,5% de la misma se ubica sobre los 1.000 msnm, lo que implica plantaciones con ciclos vegetativos prolongados que van de 18 a 24 meses hasta cosecha. Por esta razón, se tomó la decisión de segregar la información y analizar lo concerniente a esa condición por aparte como “Zonas Altas”. En relación con las localidades cañeras que se ubican por debajo de los 999 msnm como zona medio-baja, las dosis aplicadas están en el rango 90-187 kg/ha, siendo las más altas acordes con la altitud del lugar (cuadro 5). Es notorio y evidente comprobar como las mayores cantidades de N se adicionan durante el establecimiento de la plantación en ciclo planta, lo cual se expresa en los promedios de 158,5 kg en planta y de 117,5 kg en el caso de los retoños, para un promedio general para la zona de 138,0 kg de N/ha para esa condición de altitud (cuadro 6). En ese particular la amplitud del rango para esos ciclos fue de 57 y 55 kg/ha, respectivamente (cuadro 7).
- Zonas altas (>1.000 msnm):** la altitud está demostrado induce cambios fisiológicos y metabólicos importantes y profundos en el comportamiento de la planta, situación que provoca que su producción de caña se llegue a duplicar, lo que obliga consecuentemente tener que incorporar más fertilizante para acompañar y sustentar fisiológicamente la gran cantidad (t/ha) de biomasa generada. Por ubicación geográfica, el único ingenio activo actualmente en la región (Juan Viñas) opera en esa condición tan particular al estar situado a una altitud de 1.200 msnm. Las plantaciones situadas sobre los 1.000 msnm en esta zona representan un 2,6% de toda el área cañera nacional, lo que no deja de ser importante; estando ubicadas geográficamente en los distritos de Cachí (1.049 msnm), Santiago (1.084 m), Juan Viñas (1.165 m), Llanos de Santa Lucía (1.347 m), Santa Cruz (1.475 m) y Capellades como la localidad con la plantación de caña más elevada del país con 1.653 msnm. Los suelos de esta zona son por origen volcánico pertenecientes al orden Andisol. La adición de N en esta condición se establece en el rango de 210 a 287 kg/ha, para una media de 277 kg/ha en ciclo planta y 220 kg en soca y un margen de 20 kg, destacando nuevamente la mayor adición durante la etapa de establecimiento de la plantación. El promedio de la zona es de aproximadamente 248,5 kg de N/ha, valor muy superior al verificado en el resto de las regiones productoras del país (cuadros 5, 6 y 7). Expresa como sustento Chaves (2001) al respecto, que *“La respuesta de la caña de azúcar a la adición de N es consistentemente alta tanto en ciclo planta como retoño, y mayor en zonas altas con ciclo vegetativo prolongado (18-24 meses) y siembra de variedades Hawaianas”*.

c. Sector, ciclo vegetativo y región:

Con el objeto de contar con una mejor visión y perspectiva integral de las cantidades de N aplicado en las plantaciones comerciales de caña de azúcar de Costa Rica, se formuló el cuadro 8, en el cual se presentan los promedios aritméticos regionales generados a partir de los rangos según sector agroindustrial y ciclo vegetativo.

Cuadro 8. Promedios generales de Nitrógeno (kg/ha) aplicado según región cañera, sector agroindustrial y ciclo vegetativo.

Región Productora	Ciclo Vegetativo		Promedio General	Sector	
	Planta	Soca		Productor	Industrial
Guanacaste	110,0	121,2	115,6	127,5	103,7
Pacífico Central	132,5	130,0	131,3	117,5	145,0
Valle Central	110,0	91,2	100,6	105,0	96,2
Zona Norte	90,0	82,5	86,3	77,5	95,0
Zona Sur	134,2	110,5	122,4	105,0	139,7
Turrialba	158,5	117,5	138,0	138,0	---
Zona Alta	220,0	193,3	248,5	---	248,5
Costa Rica - Promedio	136,4	120,9	134,7	111,7	138,0

* Los valores corresponden al promedio aritmético de cada ítem citado en el Cuadro 6.

Una valoración detallada del contenido de los cuadros 4, 5 y 8 revela las significativas diferencias que existen entre sectores, ciclos vegetativos y regiones, concluyendo de manera general que regionalmente el promedio de adición de N expresado en kilogramos por hectárea se da en el siguiente orden de mayor a menor:

Promedio	248,5 (ZA)	138 (Turr)	131,3 (PC)	122,4 (ZS)	115,6 (Gte)	100,6 (VC)	86,3 (ZN)	134,7 (CR)
Planta	220 (ZA)	158,5 (Turr)	134,2 (ZS)	132,5 (PC)	110 (Gte)	110 (VC)	90 (ZN)	136,4 (CR)
Soca	193,3 (ZA)	130 (PC)	121,2 (Gte)	117,5 (Turr)	110,5 (ZS)	91,2 (VC)	82,5 (ZN)	120,9 (CR)
Agrícola	138 (Turr)	127,5 (Gte)	117,5 (PC)	105 (ZS)	105 (VC)	77,5 (ZN)	111,7 (CR)	
Industrial	248,5 (ZA)	145 (PC)	139,7 (ZS)	103,7 (Gte)	96,2 (VC)	95 (ZN)	138 (CR)	

Como se infiere de ese ordenamiento:

- 1) Es en definitiva la Zona Alta (ZA) de Turrialba la que más N aplica debido a lo prolongado de su ciclo vegetativo y la cantidad de biomasa producida y cosechada.
- 2) Le sigue la región de Turrialba en consideración que por su amplio piso altitudinal comparte parte de las características de la ZA en cuanto a clima y variedades cultivadas.
- 3) Llama mucho la atención lo elevado de las dosis de N presuntamente incorporadas en el Pacífico Central (PC).
- 4) En contraparte, la Zona Norte (ZN) es la que menos N incorpora en todos los indicadores evaluados antecedida por el Valle Central; lo que pareciera responde a principios de

rentabilidad, fertilidad de los suelos del lugar y manejo de plantaciones.

- 5) La condición de infertilidad de los suelos en la Zona Sur (ZS) amerita incorporar adicionalmente dosis de N relativamente altas, al menos superiores a la agregada en otras regiones productoras de caña para poder satisfacer las necesidades del cultivo.
- 6) La región de Guanacaste (Gte) mantiene un nivel de N calificado como bastante razonable y aceptable.
- 7) A excepción de Guanacaste (Gte) y el Valle Central (VC), los Productores Independientes agregaron en promedio menos N en comparación a la cantidad incorporada por los Ingenios, la cual es en ese caso, significativamente más alta.
- 8) La caña planta recibe en promedio más cantidad de N al establecer la plantación, siendo por ello muy superior en relación con la adicionada a los retoños; a excepción de Guanacaste donde es muy superior. Este resultado es diferente al reportado con anterioridad por Chaves (2012) como se comentará seguidamente.

Por su relevancia y aplicabilidad al presente caso, cabe referirse al resultado obtenido por Chaves (2012) al evaluar “la fertilización aplicada a las plantaciones comerciales de caña de azúcar en Costa Rica”; interesante estudio en el cual profundizó en el tema, encontrando significativas diferencias entre regiones, sectores y ciclos vegetativos. En lo particular determinó para el caso del N hace nueve años, un rango de aplicación de 30 a 240 kg de N/ha en ciclo planta y de 42 a 240 kg en soca; que, al desagregarlo, reveló para el sector de Productores Independientes un rango de 30-160 kg/ha en ciclo planta y 42-160 kg en soca para un ámbito general de 30 a 160 kg N/ha. Los Ingenios por su parte reportaron en esa oportunidad un rango de aplicación de 55-240 kg en planta y 46-240 kg en soca para un rango general de 46 a 240 kg N/ha. Como se infiere, los Ingenios adicionaron significativamente más N y el ciclo de soca o retoño recibió una cantidad ligeramente superior de N.

Al proyectar el resultado a las regiones agrícolas productoras de caña se encontró en esa ocasión que los rangos de fertilización nitrogenada y su promedio fueron los siguientes: Guanacaste 80-215 (147,5 kg/ha), Pacífico Central 60-190 kg (125 kg), Valle Central 80-167 (123,5 kg), Zona Norte 30-126 (78 kg), Turrialba-Juan Viñas 42-240 (141 kg), Zona Sur 90-149 (119,5 kg) y, para el caso nacional, se ubicó un amplio rango con límites extremos de 30 a 240 kg de N/ha, para una significativa amplitud de 210 kg y un promedio país de 135 kg de N/ha. Como se puede comprobar existe un paralelismo geográfico en la tendencia observada con respecto a los resultados actuales, donde la zona de Turrialba-Juan Viñas verificó el valor más alto y la Zona Norte el más bajo, lo que sugiere una tendencia regional y no apenas un simple resultado aislado.

¿Se aplica lo justo y necesario?

Para responder esta inquietante y difícil pregunta es necesario atender y revisar varios criterios técnicos que resultan en primera instancia imperativos de considerar en la búsqueda de una respuesta apropiada, certera y consistente, virtud de la elevada y significativa heterogeneidad prevaleciente en las condiciones de producción del país, donde las diferencias bióticas y abióticas que muestran las diferentes regiones agrícolas son extremas y por tanto determinantes en el resultado final de las necesidades nutricionales del cultivo, como lo demostrara fehacientemente Chaves (1983, 1999bc, 2001, 2012, 2016b, 2017a, 2019bc, 2020c, 2021b).

d. Superficies de respuesta:

Por su validez y perfecta aplicación al asunto pretendido aquí desarrollado, resulta apropiado reiterar lo aseverado por Chaves y Barquero (2020), al manifestar, que *“La planta de caña de azúcar, al igual que acontece con cualquier ser vivo, tiene necesidades y exigencias nutricionales propias y muy particulares que requiere necesariamente satisfacer, para poder expresar todo su excepcional potencial genético de producción agroindustrial (Chaves 2020d). Sucede que, si por acaso dichas necesidades no son satisfechas en cantidad, calidad y oportunidad, las expectativas de pretender alcanzar altos índices de productividad de caña y azúcar no pueden ser satisfechas en niveles comerciales rentables, sostenibles y competitivos. Cuando el suelo por su condición de fertilidad natural no puede satisfacerlos a cabalidad, es necesario entonces proveerlos por medio de los fertilizantes. Como es conocido y ha sido demostrado, la planta de caña dispone de una enorme capacidad extractora de nutrimentos del suelo, como lo evidencia Chaves (1999bc), lo que conduce a su rápida infertilidad y necesidad de reincorporarlos mediante la fertilización comercial. Cabe reiterar en este asunto lo expresado por Barrantes y Chaves (2020) al respecto, al manifestar, que “La caña de azúcar demanda por sus características y alta producción de biomasa, una gran cantidad y diversidad de nutrientes que deben ser incorporados, reintegrados y suplidos al sistema suelo por medio de fertilizantes orgánicos y/o químicos.”*

Con el objeto de abordar correctamente el tema de las necesidades nutricionales del cultivo se presenta el cuadro 9 con el detalle experimental y pragmático, organizado de acuerdo con el ciclo vegetativo implicado y el nutrimento particular de interés, en el presente caso el nitrógeno, con las cantidades (superficies de respuesta) de nutrimentos esenciales requeridos dado en kilogramos por hectárea o toneladas en el caso del encalado (CaCO_3) y utilizados de manera genérica por la planta de caña de azúcar en cada región productora. Los valores anotados fueron recabados y estimados a partir de los antecedentes históricos de investigación realizados, complementados con las experiencias productivas desarrolladas empresarialmente en el país durante muchos años. En dichos rangos se anotan el valor mínimo y máximo de las dosis recomendadas y

empleadas, con base en antecedentes, por los programas de nutrición y fertilización implementados en plantaciones comerciales de caña de azúcar en Costa Rica, la cual está ajustada a cada condición agroproductiva particular. Es en ese ámbito donde deben en principio, ubicarse las dosis más convenientes por emplear para cada situación y unidad productiva particular independientemente de su nivel tecnológico, basados en el análisis químico de los suelos y los antecedentes y experiencias productivas desarrolladas en cada localidad. Las dosis pueden perfectamente movilizarse a cantidades superiores o inferiores del rango, dependiendo de la cantidad, calidad e intensidad de los factores y elementos interventores.

Cuadro 9. Respuesta de la caña de azúcar a la adición de nutrimentos esenciales aplicados al suelo en Costa Rica, según región productora.

Región	Ciclo Vegetativo	Superficie de Respuesta (kg/ha)					t/ha
		N	P2O5	K2O	MgO	S = SO4	
Guanacaste	P	80 - 150	60 - 100	80 - 100	0	80	0
	S	100 - 150	50 - 100	80 - 140	0	80	0
Pacífico Central	P	80 - 150	60 - 100	80 - 140	0	80	0 - 1
	S	100 - 150	50 - 100	80 - 140	0	80	0 - 1
Zona Norte	P	110 - 150	120 - 200	130 - 180	40	40	0 - 1,5
	S	120 - 150	100 - 150	130 - 160	40	40	0 - 1,5
Valle Central	P	120 - 180	130 - 160	120 - 160	40	40	0 - 1,5
	S	130 - 180	130 - 160	150 - 200	40	40	0 - 1,5
Turrialba-J. Viñas	P	120 - 180	120 - 200	120 - 200	40	40	0 - 1,5
	S	130 - 180	100 - 150	150 - 200	40	40	0 - 1,5
Zona Sur	P	120 - 150	150 - 200	130 - 180	40	40	1 - 2
	S	120 - 150	180 - 200	150 - 180	40	40	1 - 2
Zonas Altas (>1.000 msnm)	P	140 - 300	160 - 200	160 - 200	60	60	0,5 - 2
	S	140 - 300	130 - 150	160 - 250	60	60	0,5 - 2
Total / Promedio	P	80 - 300	60 - 200	80 - 200	0 - 60	40 - 80	0 - 2
	S	100 - 300	50 - 200	80 - 250	0 - 60	40 - 80	0 - 2

Fuente: Chaves (1999bc; 2017a; 2019b).
P = Ciclo Caña Planta S = Ciclo Caña Soca o Retoño

Como se infiere del contenido general del cuadro 9 y aplicable en lo específico al nitrógeno:

- 1) La respuesta esperada a la aplicación de un fertilizante según criterio experto se califica como preferencial o circunstancial en función de la consistencia de los resultados y antecedentes conocidos.
- 2) La cantidad de nutrimentos requerida por el cultivo es diferente y muy particular de cada región y ambiente productivo, elemento nutritivo vinculado, ciclo vegetativo de la planta y variedad sembrada.
- 3) En algunos casos el ámbito de los rangos es amplio o por el contrario estrecho, lo que refleja el grado de variabilidad interna de cada condición productiva; a más amplitud mayor variabilidad.
- 4) La explicación a las amplias y significativas diferencias observadas en la respuesta de la planta de caña a la adición de nutrimentos esenciales, se sustenta en las grandes variaciones que se dan entre los factores bióticos y abióticos

que predominan en cada localidad y ambiente agroproductivo, entre los cuales destacan por su influencia e impacto el clima, el relieve, la condición edáfica, fitosanitaria, genética, el tamaño de la unidad productiva, el manejo e inversión tecnológica incorporada en las plantaciones y el sistema de producción implementado, entre otros.

- 5) Es definitivo que la respuesta a la adición de un determinado nutrimento es un asunto de proporciones, balances y equilibrios entre factores, donde el concepto de integralidad es fundamental de operar, pues de poco vale adicionar y optimizar N si el resto de los nutrimentos es limitado y deficiente; o en su caso excesivo (Chaves 2021a). Se recuerda que fertilizar y nutrir una plantación son principios biológicos y pragmáticos muy diferentes. La relación sinérgica que existe entre nutrimentos y está demostrada para el caso N-K es un buen ejemplo de esas interacciones, como lo anotara Chaves (2017b).
- 6) En el caso particular del N el ámbito de respuesta verificado en el país es bastante alto, ubicándose entre 80 y 300 kg/ha, lo cual refleja la fuerte dinámica y movilidad que mantiene el nutrimento en las disímiles condiciones nacionales de producción.
- 7) Las mayores necesidades y respuestas a la adición de N se han logrado en la Zona Alta superior a los 1.000 msnm en el ámbito de 140 a 300 kg/ha.
- 8) Las dosis más bajas se reportan por el contrario en la Zona Baja conocida y nombrada Pacífico Seco (Guanacaste + Puntarenas) con respuestas en el ámbito de 80 a 150 kg/ha.
- 9) De acuerdo con el ciclo vegetativo y estado fenológico de la plantación, pareciera que las necesidades mayores y por tanto las mejores respuestas a la adición de N al suelo, se dan en las socas o retoños, no así en el ciclo planta, exceptuando en la Zona Sur y las Zonas Altas donde pareciera no haber diferencia al ser los requerimientos iguales en ambos ciclos.
- 10) El ámbito de respuesta promedio nacional para caña planta es de 80 a 300 kg de N/ha y en el caso de las socas o retoños de 100 a 300 kg/ha, lo que es muy sugestivo y revelador de una mayor respuesta en los segundos. En la práctica habitual de campo, por lo general, entre más cosechas tenga una plantación más N se adiciona buscando como recurso final lograr más biomasa y tonelaje de caña. Luego de la cuarta cosecha (tercera soca) es común encontrar, como preámbulo a la posible renovación de la plantación, una reducción en la adición de otros nutrimentos y fortalecimiento del N.
- 11) No puede omitirse señalar que, en el caso de las plantaciones destinadas a producir semilla, las dosis de N incorporadas se recomiendan sean muy superiores respecto

a las comerciales, buscando con ello obtener la mayor cantidad de biomasa posible (no interesa la sacarosa) en el corto ciclo vegetativo implicado (7-9 meses).

- 12) Queda demostrado una vez más, que técnicamente no caben ni es válido basar las recomendaciones de fertilización comercial de la caña de azúcar en generalizaciones y experiencias ajenas a la localidad de interés, pues el margen de riesgo y el factor de variabilidad y error son muy elevados. En esto las características del clima, el tipo de suelo y variedades sembradas es determinante.
- 13) La cantidad de fertilizante necesario aplicar interpretada a partir del ámbito (mínimo-máximo) de respuesta que presenta el rango, dependerá necesariamente de una valoración objetiva muy específica de los factores interventores, como son además de los citados en el punto #3, la expectativa productiva pretendida alcanzar (t de caña/ha), el ciclo vegetativo implicada sobre todo la cantidad de cosechas que mantiene la plantación, el grado de productividad agroindustrial potencial existente en la localidad (no se puede lograr lo que la condición limita), el nivel de integralidad, articulación y satisfacción de factores, entre otros. La productividad es un asunto de conciliación y optimización de factores.
- 14) Las Superficies de Respuesta Nutricional deben interpretarse apenas como una valiosa guía orientadora, que con criterio sólido y confiable ubican la posible respuesta potencial para cada entorno y condición productiva particular. Son apenas aproximaciones basadas en observaciones reales y sustentables que contribuyen a conocer el antecedente de respuesta a la adición de un determinado nutriente al suelo.

e. Situación de las aplicaciones:

Como se comprenderá, el tema del uso de los fertilizantes como factor incuestionable y determinante de la producción corre no solo por el lado técnico-productivo, sino también por el económico, lo que provoca una dinámica muy alta que se expresa en el uso de formulaciones comerciales diferentes, al igual que la aplicación de dosis variadas, siendo altas y suficientes cuando los precios pagados por el azúcar son satisfactorios y rentables y bajas en el caso contrario. Esta realidad comercial de la agroindustria provoca inestabilidad y resultados variables en los índices técnicos, lo que debe ser considerado al momento de establecer conclusiones vinculadas al tópico.

La práctica de fertilizar plantaciones resulta por tanto muy mediática y coyuntural respecto a la situación comercial y económica que esté atravesando la agroindustria en un determinado momento y circunstancia, como lo expresara Chaves (2016b) al señalar, que

“Estudios recientes han demostrado en relación a la práctica agrícola de la fertilización como acto final del concepto nutricional, un uso excesivo de fórmulas comerciales disponibles y accesibles en el mercado nacional, lo cual fue ratificado por Chaves (2012) al señalar que “Se encontró e identificó una gran cantidad (42) y diversidad de fórmulas disponibles en el comercio y empleadas por el sector cañero para fertilizar las plantaciones, lo cual se considera y califica como excesiva. Muchas de ellas son formuladas “a la carta” para satisfacer 12 necesidades muy particulares de las empresas interesadas; otras son muy regionales y por tanto de alcance limitado y restringido”. El tema es realmente preocupante y va directamente ligado al empleo del N como nutrimento principal, donde la cantidad de fórmulas comerciales existente en el país es calificada como excesiva.”

Con el objeto de contar con una perspectiva amplia y completa que permita establecer relaciones e interacciones entre factores, se formuló y presenta el cuadro 10, en el cual se anotan y vinculan a nivel regional elementos diversos como: productividad agrícola (t caña/ha), superficie histórica de respuesta, aplicación actual de N (kg/ha), rango sectorial de las dosis incorporadas, diferencia entre lo establecido por la Superficie de Respuesta Nutricional y lo realmente adicionado en el campo y la relación unitaria (kg de N/t) que se establece entre el N aplicado y la caña producida (t/ha).

Cuadro 10. Respuesta de la caña de azúcar a la adición de nutrimentos esenciales aplicados (kg/ha) al suelo en Costa Rica, según región productora.

Región	Productividad Agrícola (t/ha) *	Ciclo Vegetativo	Superficie Respuesta a Nitrógeno (kg/ha) **	Aplicación por Sector **		Diferencia ***		Ámbito Sectorial (kg/ha)	Equivalente Extraído (kg N/t)
				Productores	Ingenios	Productores	Ingenios		
Guanacaste	74,6	P	80 - 150	120 - 130*	90 - 100	A	A	90 - 130	1,2 - 1,7
		S	100 - 150	120 - 140	90 - 135	A	- Inf	90 - 140	1,2 - 1,8
Pacífico Central	65,6	P	80 - 150	105 - 115	150 - 160	A	+ Sup	105 - 160	1,6 - 2,4
		S	100 - 150	120 - 130	130 - 140	A	A	120 - 140	1,8 - 2,1
Zona Norte	70,0	P	110 - 150	70 - 90	90 - 110	- Inf - Sup	A	70 - 110	1,0 - 1,5
		S	120 - 150	70 - 80	80 - 100	- Inf - Sup	- Inf	70 - 100	1,0 - 1,4
Valle Central ****	74,5	P	120 - 180	90 - 130	75 - 145	- Inf	- Inf	75 - 145	1,0 - 1,9
		S	130 - 180	90 - 110	50 - 115	- Inf	- Inf	50 - 115	0,6 - 1,5
Turrialba-J. Viñas	67,5	P	120 - 180	130 - 187	267 - 287	+ Sup	+ Sup	130 - 287	1,9 - 2,6
		S	130 - 180	90 - 145	210 - 230	- Inf	+ Sup	90 - 230	1,3 - 3,4
Zona Sur	68,7	P	120 - 150	105 - 125	147 - 160	- Inf	+ Sup	105 - 160	1,5 - 2,3
		S	120 - 150	90 - 100	122 - 130	- Inf	A	90 - 130	1,3 - 1,8
Zonas Altas (>1.000 msnm)	139,3	P	140 - 300	120 - 150	267 - 287	- Inf	A	120 - 287	0,8 - 2,0
		S	140 - 300	100 - 150	210 - 230	- Inf	A	100 - 230	0,7 - 1,6
Costa Rica / Promedio	72,2	P	80 - 300	70 - 187	75 - 287	- Inf	- Inf	70 - 287	0,9 - 2,6
		S	100 - 300	70 - 145	50 - 230	- Inf	- Inf	50 - 230	0,6 - 3,4

Fuente: Chaves (1999ab; 2017b; 2019b); Calderón y Chaves (2020); Barrantes y Chaves (2020); Chaves y Barquero (2020); Angulo et al (2020).

P = Ciclo Caña Planta S = Ciclo Caña Soca o Retoño.

* Productividad agrícola estimada para la Zafra 2019-2020.

** Corresponde a la diferencia entre la Superficie de Respuesta (teórica) y lo realmente aplicado (2020) según sector.

*** Categorización entre lo Aplicado Vs lo recabado por la Superficie de Respuesta: A= dentro del ámbito; - Inf= menor que el valor menor; + Sup= mayor al máximo.

**** La cantidad de caña molida (Zafra 2019-20) fue ajustada restando la producida procedente de la Zona Norte correspondiente a 63.368 TM.

En las zonas altas el ciclo vegetativo hasta cosecha es de 18-24 meses.

El Equivalente Extraído corresponde a la cantidad de Nitrógeno (kg) utilizado para producir una tonelada de caña (kg/t/ha).

En primera instancia puede inferirse como relevante a partir de la información de dicho cuadro, lo siguiente:

- 1) Al visualizar lo concerniente a los índices de productividad agrícola dados en toneladas de caña por hectárea (t/ha), los cuales fueron estimados y reportados específicamente para cada región productora, se aprecian grandes diferencias que se establecen en un amplio rango de 65,6 t/ha obtenido en

el Pacífico Central y 139,3 t/ha en la Zona Alta superior a 1.000 msnm y con ciclo vegetativo de 18 a 24 meses; lo cual al ser anualizado sería equivalente a 92,8 y 69,6 t/ha, respectivamente, para esas edades.

- 2) La respuesta alcanzada en relación con la aplicación de N y ubicada en la Superficie de Respuesta es muy variable en lo geográfico, la dosis incorporada y el ciclo vegetativo involucrado como ya fue ampliamente comentado con anterioridad.
- 3) Las dosis de N incorporadas actualmente (kg/ha) por cada sector (agrícola-industrial) son muy variables y dispersas en todos los indicadores evaluados, lo que denota una alta variabilidad del entorno agroproductivo que impide e inhibe las generalizaciones.
- 4) Al cotejar la cantidad de N aplicado (kg/ha) en la actualidad respecto a la respuesta histórica que por antecedente ha generado el cultivo, se aprecian básicamente cuatro condiciones: a) las dosis ahora aplicadas se ubican dentro del ámbito referente (A); b) son menores en relación con el valor menor del rango histórico (- Inf); c) son superiores en relación al máximo establecido por el rango (+ Sup) y d) la adición es menor que la anotada en límite superior (- Sup).
- 5) Solo en el caso de los Productores Independientes en Guanacaste y el Pacífico Central y el Ingenio ubicado en la Zona Alta, están incorporando el N dentro del ámbito conocido (A) en ambos ciclos vegetativos, lo que es muy positivo pues se ajusta a lo conocido.
- 6) Es notorio como en los Ingenios la condición de adecuación (A) se da de manera parcial en el ciclo planta en Guanacaste y la Zona Norte y en soca en la Zona Sur y el Pacífico Central, lo que parece correcto.
- 7) En el resto de las regiones y sectores las dosis aplicadas son menores en relación con el valor inferior del rango (- Inf); así como también superiores respecto al máximo del rango (+ Sup) y menor que el límite superior (- Sup) del mismo. Las aplicaciones menores a lo establecido por el rango inferior de la Superficie de Respuesta es lo más común, lo que sugiere que en esas localidades se está presuntamente aplicando menos N del recomendado y necesario.
- 8) El productor en ciclo planta en Turrialba y los Ingenios en ciclo planta en la Zona Sur y el Pacífico Central adicionan más N del necesario, al contextualizarlo con relación a la evidencia y los antecedentes históricos; lo que también acontece en ambos ciclos en el caso de la Zona Alta.
- 9) Se ratifica con los resultados alcanzados lo obtenido y concluido por Chaves (2016b) en su estudio, al aseverar que “No existe un patrón básico de fertilización a nivel nacional que pudiera establecerse como dominante, si no que los criterios locales puntuales resultan ser comunes y habituales. Esto hace que los programas regionales y hasta locales de

fertilización predominan virtud de la alta variabilidad prevalente en nuestros heterogéneos ambientes productivos.”

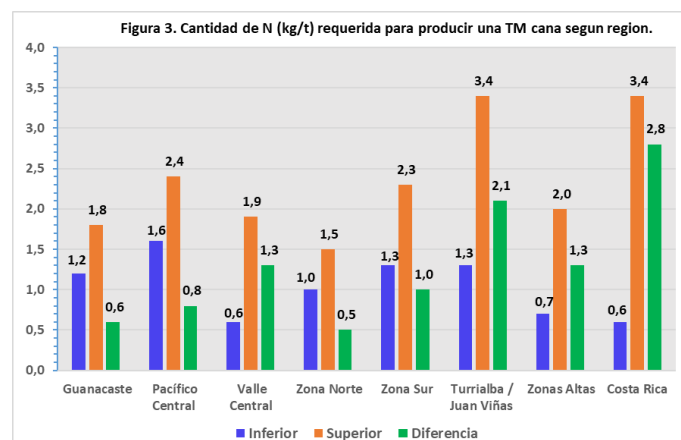
- 10) Al proyectar y contextualizar los resultados del cuadro 10 a nivel nacional, se encuentra que la condición general es limitante pues en todos los casos se está incorporando menos N que el definido en la base de referencia histórica; lo cual podría explicar al menos dentro de la perspectiva nutricional, los bajos rendimientos agrícolas reportados en algunas regiones, lo cual, queda claro que no es genérico como se anotó al inicio.
- 11) La baja rentabilidad que por muchos años ha mantenido la agroindustria cañero-azucarera costarricense, podría ser presumiblemente una de las causas y motivos principales que explican la menor aplicación de N, sobre todo en el caso de los Productores Independientes y los Ingenios del Valle Central.
- 12) La insuficiencia percibida en la adición de N se agudiza y torna más problemática en regiones donde la condición de fertilidad natural de los suelos no es la mejor, como acontece en la Zona Sur y algunas localidades de la región Norte y Turrialba con presencia de suelos del orden Ultisol y Entisol con serias necesidades de corrección y adecuación. Por el contrario, la excelencia nutricional de buena parte de los suelos del Valle Central atenúa y contrarresta de alguna manera esa insuficiencia por N.
- 13) No hay duda de que lo indicado y evidenciado en el caso particular del N también es válido y aplicable para el resto de los nutrimentos; lo cual, sin incurrir en error de apreciación, puede asegurarse que es aún mucho más grave al generar estados de severo “estrés mineral” como oportunamente lo señalara Chaves (2021a).
- 14) Puede concluirse que la relación entre el insumo que se aplica y el producto que se recibe no está para nada equilibrada y menos optimizada, pues pese a aplicar cantidades importantes de N la producción de biomasa (t/ha) no es la esperable, lo cual es preocupante y sugiere que existen otros factores que están limitando la expresión del potencial genético contenido intrínsecamente en las variedades de caña sembradas comercialmente.
- 15) Resulta entendible que datos tan genéricos como los valorados en esta oportunidad solo permiten establecer aproximaciones y tendencias sobre el tema aludido, lo cual para tener mayor certeza y confiabilidad debe valorarse a nivel de localidad de manera más profunda y específica, utilizando una muestra representativa que aporte significancia estadística. Esa tarea queda pendiente de realizar a futuro.

f. Remoción, asimilación y respuesta unitaria:

Pese a las incuestionables características, atributos y elementos favorables que posee la planta de caña de azúcar, como lo señalara Chaves (2020d) resulta también cierto, que “La planta de caña de azúcar está demostrado posee como atributo una condición natural de alta rusticidad que viene directamente asociada a su reconocida capacidad de extracción de nutrimentos del suelo, potenciada por su excepcional sistema radicular, con los cuales satisface en buena parte y por algún tiempo sus requerimientos nutricionales básicos; sin embargo, con las cosechas sucesivas (5 o más) llega a agotar los suelos, reduciendo su capacidad productiva y volviendo obligada la restitución de los nutrientes básicos requeridos mediante la fertilización (Chaves 2016c).”

En el cuadro 10 se estima por región productora y ciclo vegetativo un indicador de eficiencia muy revelador e importante que establece la relación aritmética simple que surge entre la cantidad de N aplicado (kg/ha) en relación al tonelaje de caña industrializable cosechado (t/ha), lo que se presume refleja el N removido, absorbido y asimilado por la planta; obviamente sin discriminar ni discernir si el mismo procede de la reserva natural del suelo o corresponde al N adicionado por la fertilización comercial, lo cual implicaría realizar un estudio más complejo con factores controlables. El índice unitario se expresa en los kilogramos de N requeridos y removidos para producir una tonelada de caña.

Los índices unitarios estimados al establecer esa relación se muestran en el cuadro 10 y la figura 3 desagregados por región productora y estimados para los límites inferior y superior del rango, anotando además el valor de la amplitud o diferencia entre ambos.



Con el objeto de contar con un valor referencial de calidad que permita ubicar los índices obtenidos en el presente estudio, se presenta el cuadro 11, en el cual se expone el resultado de una amplia y profusa revisión de literatura realizada por Chaves (1986, 1999b), en la cual ubicó las cantidades y estableció los rangos de respuesta por

nutrimento, estimando adicionalmente el margen de amplitud y el valor promedio. Como se aprecia en el caso particular del N se encontró un total de 54 reportes internacionales que establecieron sus valores en el rango de 0,44 a 2,24 kg de N para producir una tonelada métrica de caña (solo tallos molibles sin sección foliar ni raíces), lo que implica una amplitud de 1,80 kg y un promedio aritmético de 0,93 kg por tonelada. Dicho en otra forma, la media estimada a nivel mundial para producir una tonelada métrica de caña industrializable es de 0,93 kilogramos de nitrógeno.

De acuerdo con esa información, el autor estableció por su importancia en cantidad requerida el siguiente orden de absorción: $K > N = Si > Ca > S > P > Mg$. Como se infiere el N y el Si corresponden a los segundos nutrimentos de mayor absorción, antecedentes por el K cuya remoción es muy alta, en este caso estimada en 1,65 kg de K/t., lo que establece una relación N-K de 0,9 y 1,6 kg, insinuando un requerimiento cercano a 1,0 y 2,0 kg de N y K_2O , respectivamente, para producir una tonelada de caña en el campo.

Cuadro 11. Rango y promedio mundial de remoción y extracción de macronutrientes necesarios para producir una TM de caña de azúcar.

Nutrimento	N° Reportes	Rango	Amplitud	Promedio
N *	54	0,44 – 2,24	1,80	0,93 -
P	53	0,06 – 0,70	0,64	0,27 (0,62)
K	54	0,27 – 4,10	3,83	1,65 (1,98)
Ca	26	0,12 – 1,10	0,98	0,34 (0,48)
Mg	28	0,10 – 0,50	0,40	0,25 (0,41)
S	19	0,12 – 0,58	0,46	0,29 (0,87)
Si	1	-	-	0,93 (1,99)

Fuente: Chaves (1986, 1999b).

* Dado en kg/t de caña. Sólo incluye tallos, no sección foliar y raíces.

El valor entre paréntesis corresponde a la forma química absorbible.

Señala Chaves (1986) con relación al tópico, que *“La caña al igual que todos los organismos, elabora sus tejidos a partir de varios constituyentes: Carbohidratos, Grasas, Proteínas y Nucleoproteínas. De aquí que la planta requiere cantidades elevadas de nutrimentos, especialmente Carbono (C), Oxígeno (O), Hidrógeno (H), Fósforo (P), Potasio (K), y Azufre (S) para construir sus tejidos; además de pequeñas cantidades de Hierro (Fe), Magnesio (Mg), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Boro (B), y frecuentemente Molibdeno (Mb), para la elaboración de sus enzimas; algunas veces Sodio (Na), Calcio (Ca) y a menudo otros nutrimentos para estos y otros fines; otros elementos, tales como el Silíce (Si), Aluminio (Al) y Cloro (Cl), puede ser necesarios y están presentes en los tejidos de la planta, no obstante sus efectos específicos son aún poco claros. La planta de caña de azúcar mantiene una elevada demanda de elementos nutritivos para satisfacer sus requerimientos de producción; esta demanda es mayor en aquellos casos donde el ciclo vegetativo es largo, debido a que los niveles de producción se incrementan significativamente. Esto deber ser satisfecho con una mayor extracción y asimilación.”*

Amplia asimismo el mismo autor (Chaves 1999b) al pretender juzgar algunas de las posibles causas que justifican las grandes diferencias encontradas, que *“La cantidad de N removida por las cosechas es muy variable, pues depende en el caso particular de la caña de azúcar de la variedad cultivada, la edad de cosecha aplicada, el rendimiento de materia prima (tm/ha) alcanzado, la composición química propia de la planta, la humedad y concentración de N asimilable existente en el suelo, la capacidad de despaje del clon, ejecución o no de la práctica de quemar la planta o los rastrojos durante la cosecha, entre otros.”*

En una valoración más puntual y exhaustiva sobre el estimado de remoción de N por parte de la planta de caña, mostrado en el cuadro 10, se infiere lo siguiente:

- 1) El rango de remoción de N del suelo observado en Costa Rica fluctúa entre 0,6 y 3,4 kg/t para una amplitud de 2,8 kg, valor bastante alto en su límite superior (3,4 kg), el cual por provenir de la Zona Medio-Alta de Turrialba se explica parcialmente por la duración más prolongada de su ciclo vegetativo, la mayor producción de biomasa y el requerimiento más elevado de N que se tiene para su sustento.
- 2) El orden promedio de remoción estimado según región cañera es: Turrialba (2,2 kg/t), Pacífico Central (2,0), Zona Sur (1,7), Guanacaste (1,5), Zona Alta (1,2), Valle Central (1,2) y Zona Norte (1,2), para un promedio nacional de 1,8 kg de N/t caña industrializable cosechada; el cual está bastante distante (0,87 kg= 93,5%) de los 0,93 kg reportados a nivel internacional.
- 3) La amplitud entre los límites del rango más alta se observó en Turrialba con 2,1 kg/t, la Zona Alta y Valle Central (1,3), Zona Sur (1,0), Pacífico Central (0,8), Guanacaste (0,6) y la Zona Norte (0,5 kg). El índice nacional fue en este caso de 2,8 kg en consideración de la alta variabilidad observada.
- 4) Al establecer la relación por ciclo vegetativo el rango definido en caña planta fue de 0,8 - 2,6 kg y en retoños de 0,6 - 3,4 kg para amplitudes de 1,8 y 2,8 kg/t, para una media de 1,7 y 1,5 kg de N/ha respectivamente. Como país, el rango se estableció entre 0,6 - 3,4 kg para una amplitud de 2,8 kg. Es definitivo que la mayor variación se observa con las adiciones de N en plantaciones de retoño, lo que es esperable virtud de las grandes diferencias que se dan no solo en las condiciones de producción sino también en las intrínsecas al estado fisiológico de las plantas en sus diferentes estados fenológicos.
- 5) Al cotejar la información recabada con los índices internacionales anotados en el cuadro 11, correspondientes al rango de 0,44 - 2,24 kg de N/t, para una amplitud de 1,80 kg y una media estimada en 0,93 kg de N/t de caña cosechada; se comprueba que a nivel geográfico regional y por estado vegetativo, la mayoría de los valores obtenidos

en el caso nacional se ubican dentro del rango mundial, excepto la región media de Turrialba que es ligeramente superior. Se debe reconocer que la caña producida en regiones altas (>1.000 msnm) son una excepción agroindustrial que en muy pocos lugares del orbe existe.

- 6) En ningún caso los índices medios del país fueron inferiores respecto al promedio mundial (0,93 kg N/t), siendo relativamente próximos en los casos del Valle Central y la Zona Norte con una remoción de 1,3 kg de N para producir una tonelada métrica de caña; aunque si hubo valores puntuales en el rango menores a ese referente.
- 7) Caso se proyecten en una relación estrictamente teórica los valores promedio de extracción obtenidos en el estudio de 1,7 y 1,5 kg para los ciclos planta y soca, respectivamente, en relación a la media mundial de extracción (0,93 kg); el resultado supone que en teoría se está aplicando y utilizando en el país en la actualidad 0,8 y 0,6 kg de N de más por tonelada producida; lo cual para una productividad media nacional de 72,2 t/ha significa adicionar 57,8 y 43,3 kg de nitrógeno/ha a un muy alto costo económico que no se reintegra en producción de caña. A nivel nacional con la extracción promedio de 1,6 kg/t se están aplicando 0,7 kg más de N/t de lo necesario para 50,5 kg de N/ha. Esos valores proyectados en áreas extensas resultan muy significativos y financieramente onerosos.
- 8) Una proyección basada en el índice promedio internacional de extracción de 0,93 kg de N/ha sugiere que, para obtener el promedio de productividad nacional de 72,2 toneladas métricas de caña por hectárea, sería necesario aplicar solo 77,6 kg de N y no los 136,4, 120,9 y 134,7 kg reportados en los ciclos planta, soca y promedio nacional; lo que demuestra la poca eficiencia alcanzada.
- 9) De acuerdo a apreciaciones teóricas basadas en el promedio mundial (0,93 kg N/t) se considera que, con los índices de extracción estimados en el país de 1,7, 1,5 y 1,6 kg de N/t (planta, soca, nacional) se están alcanzando eficiencias muy bajas de 1,83, 1,61 y 1,72 toneladas de caña/kg de acuerdo con las cantidades unitarias de N incorporado y extraído; lo que implica adicionar más N para obtener la misma tonelada de caña/ha.
- 10) Siendo así, para obtener una producción promedio de caña industrializable de 100 t/ha, deberían aplicarse en los ciclos planta y soca un total de 183 y 161 kg de N/ha, respectivamente; así como un 172 kg a nivel de país, lo que es a todas luces muy elevado. Aplicando el índice mundial (0,93 kg N/ha) sólo sería necesario incorporar 93 kg de N. Nótese las enormes diferencias implicadas que llegan a ser en magnitud porcentual del 96,8%, 73,1% y 84,9%, respectivamente, para las mismas variables.

- 11) Se ratifica nuevamente la gran variabilidad que prevalece entre regiones productoras y ciclos vegetativos, lo que impide realizar generalizaciones pues tienen un alto sesgo.
- 12) Queda demostrado nuevamente con los resultados obtenidos, que: a) las aplicaciones de N para producir caña de azúcar son en Costa Rica muy altas, b) la cantidad de N que se adiciona no retorna la inversión realizada en términos de productividad agrícola (t/ha) o c) por alguna causa, razón o circunstancia, la fertilización nitrogenada comercial no está siendo optimizada en el país, lo que se convierte en un gasto perdido y una carga innecesaria a los costos que merma la rentabilidad.
- 13) El tema no es en realidad nuevo y menos sorprendente, pues como expresara Chaves (2016b) hace algún tiempo “*Se considera que en el caso particular de Costa Rica el uso del N es deficiente y mayoritariamente alto, aunque no excesivo en proporcionalidad a las productividades obtenidas, lo que amerita y justifica revisar criterios de uso comercial basados en productividad y rentabilidad.*”
Esta circunstancia obliga insoslayablemente revisar, discernir y resolver el asunto con la prioridad que el caso amerita para lograr optimizar las dosis, maximizar la productividad y la rentabilidad.

Conclusión

En materia de producción e incremento de los rendimientos agroindustriales de la caña de azúcar, la importancia, relevancia y trascendencia del factor nutricional resulta incuestionable, motivo por el cual todo lo que favorezca y conduzca a su optimización es de acatamiento y ejecución obligatoria. El nitrógeno es en este acápite de particular preeminencia y distinción no solo por su reconocido efecto favorable en los procesos fisiológicos y metabólicos de la planta; sino también, por la ineficiencia que el nutrimento mantiene y que generan importantes pérdidas de significativo impacto económico. Más recientemente, el N ha cobrado una inusitada importancia virtud del impacto negativo que genera sobre los ecosistemas al contaminar fuentes hídricas y participar activamente en el calentamiento atmosférico global, mediante la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a través de la emisión de óxido nitroso (N₂O), principalmente. El factor ambiental es en la actualidad y en el futuro próximo un factor a tener presente y tomar muy en cuenta, como lo expresaran Chaves y Bermúdez (1999a).

Esta realidad productiva y comercial actual condiciona inevitablemente la viabilidad y factibilidad para poder acceder y participar con éxito en mercados sofisticados y ser competitivos, satisfacer insoslayablemente tres elementos estrecha y directamente relacionados y vinculados, como son: productividad, calidad y ecoeficiencia. En todo esto como se indicó, la eficiencia integral en el uso y manejo del N es determinante, pues caso contrario, los tres

elementos anteriormente citados se verían impactados en afectación y detrimento directo de la gestión productiva y empresarial desarrollada. La estrategia correcta a seguir en este caso, se debe fundamentar en la adopción, implementación y ejecución de medidas que conduzcan a favorecer la alta productividad agroindustrial con calidad y complementariamente la eliminación o mitigación de los posibles impactos ambientales generados por el N por medio del uso de buenas prácticas de manejo de plantaciones (BPM), la operación de prácticas y tecnologías apegadas a la agricultura de precisión y el empleo de fuentes modernas apropiadas que minimicen las pérdidas y maximicen la eficiencia (Chaves 2016a). Como indicara Chaves (2021c) recientemente, aprovechar y estimular el potencial de fijación de N que la planta de caña posee, viene a contribuir también con la reducción y optimización en el buen uso del N en una estrategia de producción sostenible y ecológicamente correcta.

Como se expresó al inicio, persiste aún y está arraigado en sectores importantes de agricultores, también de técnicos, vale reconocerlo, la falsa creencia de que si se realizan aplicaciones elevadas de nitrógeno se obtendrá inequívocamente mayor productividad; lo cual como está suficientemente demostrado, no es cierto la mayoría de las veces, pese a que las mismas pueden compensar temporalmente alguna de las deficiencias prevalecientes en otros factores de la producción. Es definitivo que el uso excesivo e incorrecto de los fertilizantes, en particular el N, genera efectos muy nocivos al ecosistema y a los sistemas de producción agrícola que van en detrimento del mismo productor.

Es oportuno sobre este punto, rescatar y reiterar lo que Chaves (2020a) manifestara en ocasión anterior, al expresar, que *“Para muchos persiste la creencia y hasta convencimiento de que el suelo es infinito y con la aplicación de fertilizantes y el uso de sofisticada maquinaria todo se resuelve y pronto recupera y habilita de nuevo. Que como factores naturales el clima no lo perjudica. Que el suelo es un factor que permanentemente se rejuvenece y rehabilita solo. Que los suelos son entes estáticos que no cambian. En fin, son muchos los prejuicios, preconceptos y errores conceptuales que existen en torno al factor edáfico, que lamentablemente conducen a su rápido deterioro y degradación. Desconocen sin embargo esos detractores y conspiradores del suelo, que este es un ente vivo y muy sensible con presencia de una inmensa actividad biológica y microbiológica que lo enriquece y mantiene fértil y activo, que caso no mantenerse y estimularse lo vuelve estéril, infértil, improductivo e inviable para la actividad agrícola. De igual manera, se debe tener presente que como entes vivos los suelos pasan por etapas juveniles, maduras y seniles donde pierden muchas de sus capacidades básicas primarias y potenciales.”*

La determinación y aplicación de la dosis necesaria y correcta de N (kg/ha) es una acción técnico-administrativa muy importante para el éxito de cualquier emprendimiento comercial vinculado con la

producción de caña de azúcar. Mucho puede proponerse y comentarse en todo este punto, sin embargo, está demostrado que uno de los criterios y formas más sencillas y efectivas de conocer las necesidades y la eficiencia del N potencialmente disponible para el cultivo, puede ser evaluada de manera real y efectiva por medio de la investigación y experimentación de campo; esto pese a existir muchos procedimientos opcionales, algunos muy sofisticados.

Es imperativo en la obligada y necesaria determinación de la dosis óptima y deseable de N por aplicar en las plantaciones, concebir que los promedios de extracción por tonelada de 1,7, 1,5 y 1,6 kg estimados como media nacional de N/tonelada en los ciclos planta, soca y nacional, respectivamente, son índices muy desproporcionados en referencia al valor internacional estimado en 0,93 kg/tonelada; lo que conduce a gastar más fertilizante comercial incurriendo en un costo muy elevado para producir proporcionalmente menos caña (t/ha). Queda demostrado que la rentabilidad no está concentrada solo en lograr mejores precios, sino también en producir más caña y azúcar a menor costo, ecuación en la cual la fertilización tiene un rol preponderante.

No cabe la menor duda en aceptar y reconocer que el manejo correcto del N en lo concerniente a seleccionar la fuente más acorde con las características y necesidades del lugar, incorporar la dosis requerida, minimizar las pérdidas, aplicar en la forma y momento fenológicamente más oportuno, redundan en menos costos, mayor productividad y menor contaminación, lo cual es consecuente con los principios que rigen la agricultura moderna.

Cabe como corolario, recordar como buen consejo lo expresado por Chaves (2015), al manifestar que *“El productor debe actuar como el “doctor de su propia plantación” y participar del diagnóstico, prevención y curación de los problemas existentes, independientemente de su naturaleza, lo cual le obliga a estar presente en el campo en el manejo de su plantación. Se debe evitar contratar servicios y olvidarse de su obligación y responsabilidad de agricultor.”*

Literatura citada

- 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.
- Barrantes Mora, J.C.; Chaves Solera, M.A. 2020. **Guía Técnica. Cultivo Caña de Azúcar. Región: Sur.** San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 75 p.
- Bertsch, F. 1998. **La Fertilidad de los Suelos y su Manejo.** 1ª ed. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). 157 p.

- Bertsch Hernández, F. 2003. **Absorción de nutrimentos por los cultivos**. 1ª ed. San José, C.R.: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). 307 p.
- Calderón Araya, G.; Chaves Solera, M.A. 2020. **Guía Técnica. Cultivo Caña de Azúcar. Región: Turrialba**. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 95 p.
- Chaves Solera, M.A. 1983. **Nuevas recomendaciones para la fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica**. Boletín Informativo DIECA (Costa Rica) Año 1, Nº 4, San José, diciembre. p: 1-3.
- 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, M.; Bermúdez, A. 1999a. **Por una mayor conciencia ambiental en el sector azucarero**. En: Congreso de ATACORI "Randall E. Mora A.", 13, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 1999. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), setiembre. p: 274-278.
- Chaves, M. 1999b. **Nutrición y fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica**. En: Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales, 11, San José, Costa Rica, 1999. Memoria: *Recursos Naturales y Producción Animal*. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos: EUNED, julio. Volumen III. p: 193-214. *También en:* Participación de DIECA en el XI Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, julio 1999. p: 46-67.
- Chaves Solera, M. 1999c. **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:* En: Congreso de ATACORI "Ing. Agr. José Luis Corrales Rodríguez", 15, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 2003. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), setiembre. p: 49-54.
- Chaves Solera, M. 2010. **Dinámica del Nitrógeno en el suelo y la planta de caña de azúcar**. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, noviembre. Presentación Electrónica en Power Point. 57 láminas.
- Chaves Solera, M. 2012. **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. 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, 2017a. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), octubre 10 al 12, Hotel Double Tree Resort by Hilton. 38 p.
- Chaves Solera, M.A. 2017b. **Sinergismo N-K y productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica**. 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. 7 p.
- Chaves Solera, M.A.; Chavarría Soto, E. 2017. **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. 2019a. **Clima y ciclo vegetativo de la caña de azúcar**. Boletín Agroclimático 1(7): 5-6, julio.
- Chaves Solera, M.A. 2019b. **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. 2019c. **Ambiente agroclimático y producción de caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1(18): 5-10, noviembre-diciembre.

Chaves Solera, M.A. 2020a. **Participación del clima en la degradación y mineralización de la materia orgánica: aplicación a la caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(12): 6-17, junio.

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

Chaves Solera, M.A. 2020c. **Agroclimatología y producción competitiva de caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(24): 5-13, noviembre.

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

Chaves Solera, M.A.; Bermúdez Loría, A.Z. 2020. **80 Años de Vida Institucional del Sector Cañero-Azucarero Costarricense: Breve Recorrido por su Historia.** Revista Entre Cañeros N° 16. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, agosto. 37 p.

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

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

Chaves Solera, M.A. 2021b. **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. 2021c. **Fijación biológica de nitrógeno atmosférico (N₂) por la caña de azúcar: un importante potencial por aprovechar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(15): 7-24, julio.

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

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