

Periodo 31 de octubre al 13 de noviembre 2022

## RESUMEN DE LAS CONDICIONES DE LA QUINCENA DEL 17 DE OCTUBRE AL 30 DE OCTUBRE

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

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

En la figura 1 se puede observar, a partir de datos preliminares de 106 estaciones meteorológicas, el acumulado quincenal de lluvias sobre el territorio nacional.

Los promedios de lluvia acumulada a nivel diario varían según la región azucarera. Se tuvieron valores acumulados de lluvia diaria entre 3-31 mm, excepto los días sin lluvia (19 y 26-30) en la **Región Guanacaste Este**; por su parte **Guanacaste Oeste** registra entre 1-26 mm, excepto los días sin lluvia (27); al tiempo que **Región Norte** reporta entre 1-20 mm, excepto los días sin lluvia (18 y 25-29). La **Región Puntarenas** presento entre 1-26 mm, excepto los días sin lluvia (28-30). La **Región Sur** muestra lluvias entre 1-66 mm; en cambio la **Región Turrialba** acumula lluvias entre 3-17 mm, excepto los días sin lluvia (18, 19, 20, 23-24, 26-27 y 29-30); mientras la **Región Valle Central** evidencia entre 4-16 mm, excepto los días sin lluvia (26-27 y 29). Donde se asume un día con lluvia si iguala o supera 1 mm.

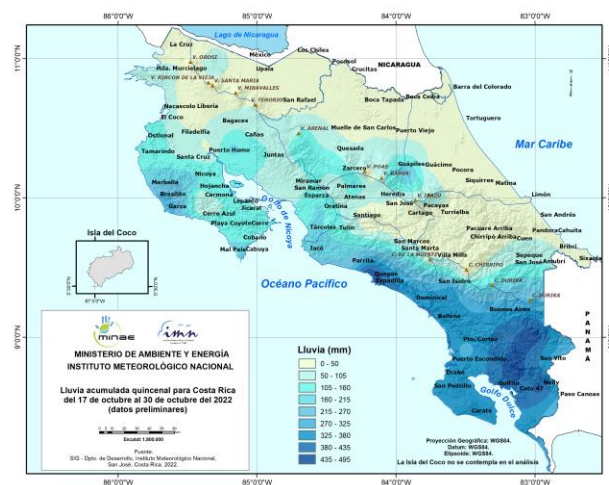


Figura 1. Valores acumulados de la precipitación (mm) durante la quincena 17 de octubre al 30 de octubre del 2022.

## PRONÓSTICO PARA LAS REGIONES CAÑERAS DEL 31 DE OCTUBRE AL 06 DE NOVIEMBRE

De la figura 2 a la figura 8, se muestran los valores diarios pronosticados de las variables lluvia (mm), velocidad del viento (km/h) y temperaturas extremas (°C) para las regiones azucareras. La **Región Norte** mantendrá humedad baja, excepto el fin de semana que será alta; así como viento del Este hasta el viernes, seguido de viento del Oeste; además de tardes más frescas sábado y domingo. La **Región Guanacaste (Este y Oeste)** mantendrá humedad hasta el viernes, seguido de humedad alta; viento del Este hasta el miércoles seguido de viento del Oeste; con tardes cada vez más frescas. En la **Región Sur** se espera contenido de humedad alta principalmente por las tardes hasta el jueves, seguido de humedad alta todo el día; además de viento del Oeste; así como tardes más frescas el fin de semana. El **Valle Central (Este y Oeste)** tendrá contenido de humedad alta principalmente por las tardes hasta el jueves, seguido de humedad alta todo el día; mostrando viento variable (Este-Oeste) hasta el jueves, seguido de viento del Oeste; con tardes más frescas el fin de semana.

## 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

Para la **Región Turrialba (Alta y Baja)** se prevé de humedad alta principalmente por las tardes hasta el jueves, seguido de humedad alta todo el día; además de viento variable (Este-Oeste; con las tardes más frescas fin de semana. La **Región Puntarenas** mantendrá humedad alta principalmente por las tardes hasta el jueves, seguida de humedad alta todo el día; con paulatino incremento de viento del Oeste; y madrugadas más cálidas entre lunes-jueves.

*“No se descarta el paso de la onda tropical #49 para el domingo.  
La Tormenta Tropical Lisa no tendrá efecto sobre el país  
Sin presencia significativa de polvo Sahariano en la semana.”*

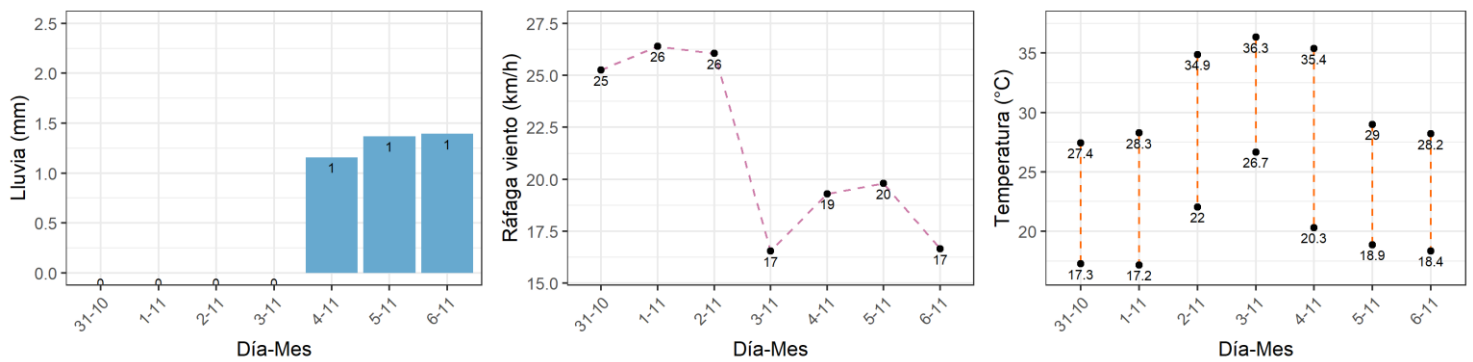


Figura 2. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 31 de octubre al 06 de noviembre en la región cañera Guanacaste Este.

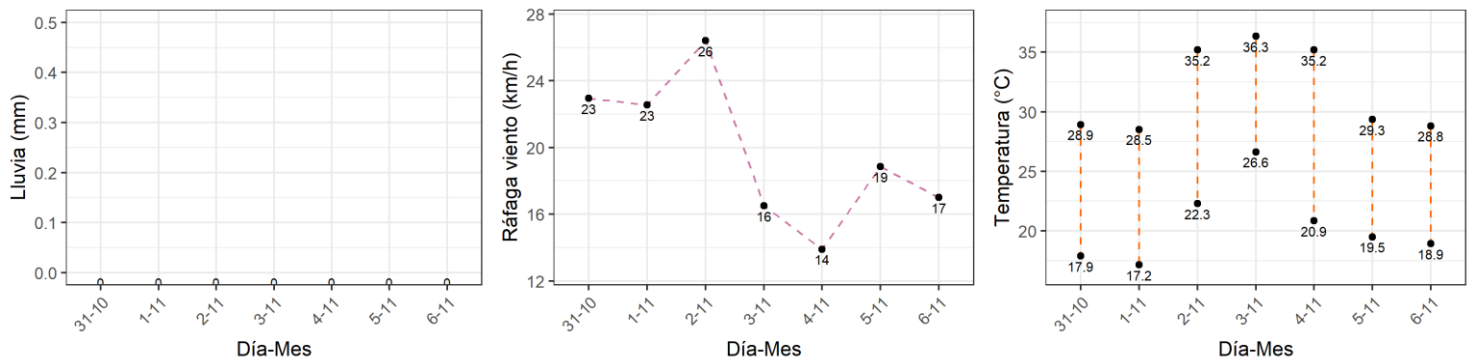


Figura 3. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 31 de octubre al 06 de noviembre en la región cañera Guanacaste Oeste.

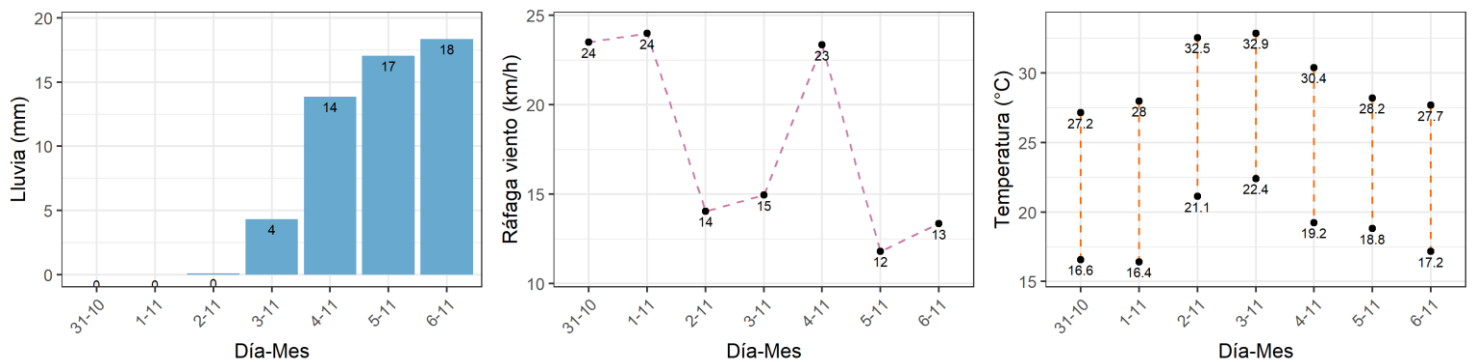


Figura 4. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 31 de octubre al 06 de noviembre en la región cañera Puntarenas.

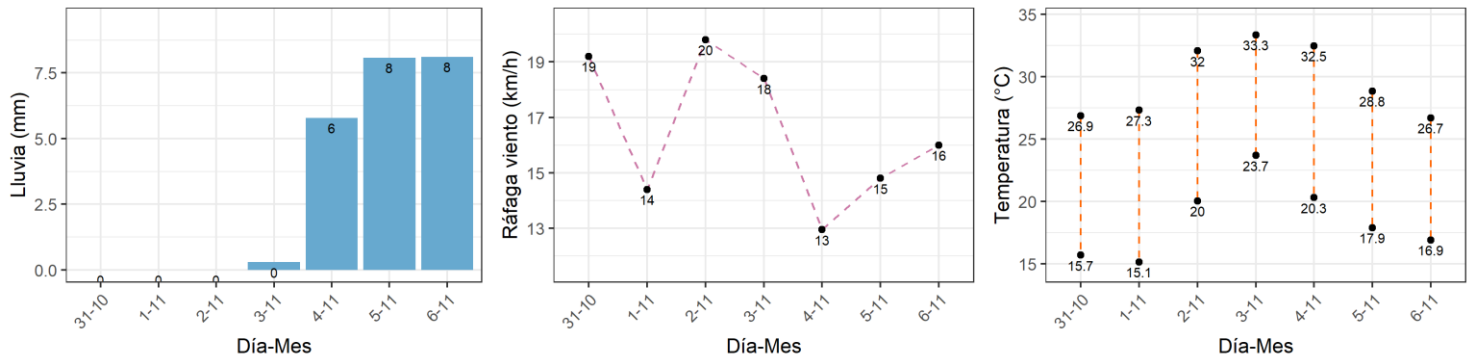


Figura 5. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 31 de octubre al 06 de noviembre en la región cañera Región Norte.

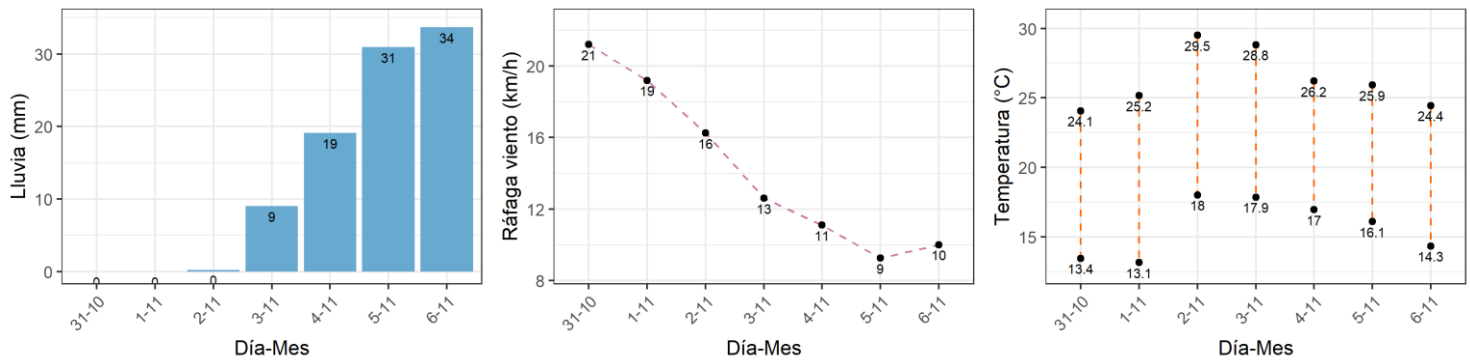


Figura 6. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 31 de octubre al 06 de noviembre en la región cañera Valle Central (Este y Oeste).

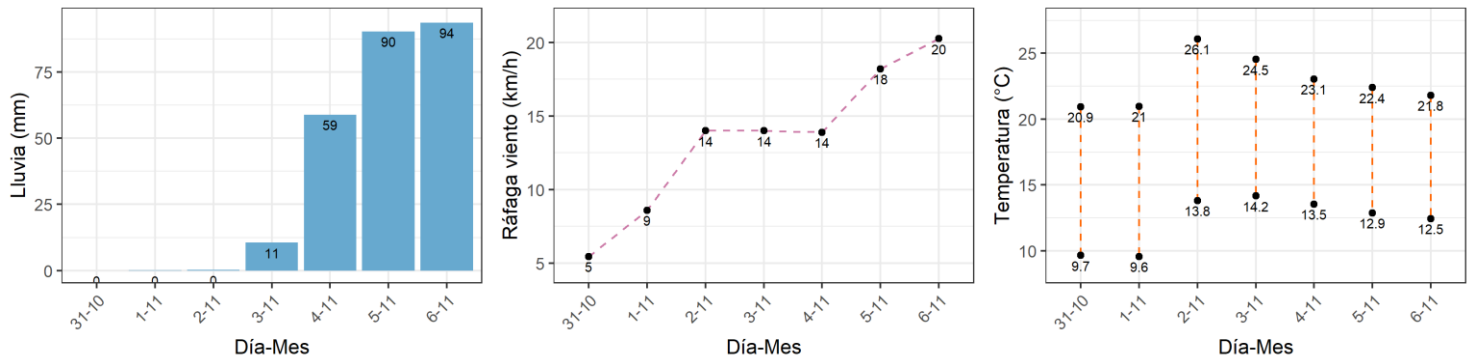


Figura 7. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 31 de octubre al 06 de noviembre en la región cañera Turrialba (Alta y Baja).

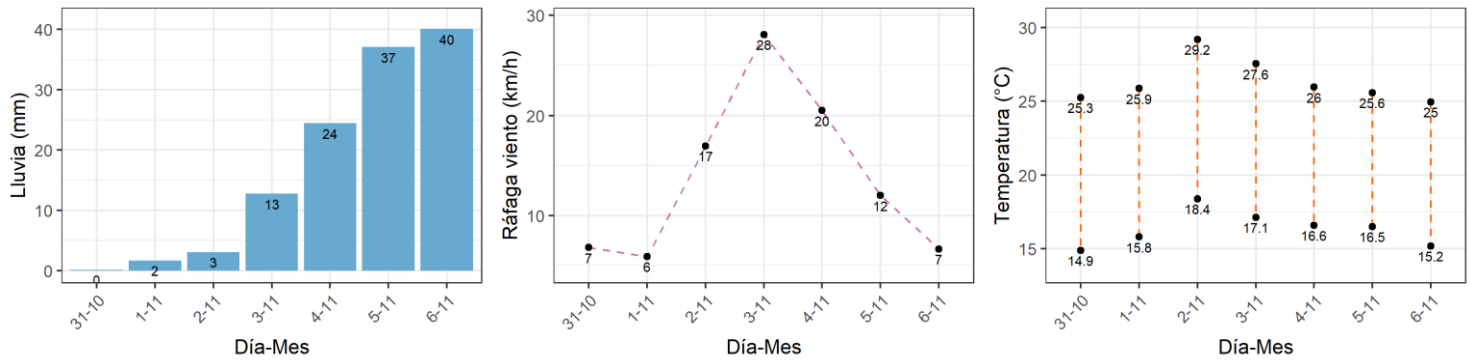


Figura 8. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 31 de octubre al 06 de noviembre en la región cañera Región Sur.



Octubre 2022 - Volumen 4 – Número 22

## TENDENCIA PARA EL PERIODO DEL 07 DE NOVIEMBRE AL 13 DE NOVIEMBRE

Existe la posibilidad de afectación de la #46 lo cuál va a depender de la evolución del sistema. Se incluye un pronóstico diario de lunes a miércoles y una perspectiva de la semana completa para cada región productiva cañera. La **Región Hueter Norte** tendrá humedad alta el lunes y baja entre martes y miércoles; con viento del Oeste; con tardes cada vez más cálidas entre lunes y miércoles; en tanto la semana completa condiciones lluviosas normales y viento del Oeste levemente más acelerado de lo normal. La **Región Chorotega (Este y Oeste)** mantendrá humedad alta el lunes seguida de humedad media entre martes y miércoles; y viento del Oeste; con madrugadas tan frescas que el fin de semana previo; en tanto la semana completa evidenciará lluvias normales y viento del Oeste levemente más acelerado de lo normal. En la **Región Sur** evidenciará condiciones de humedad alta hasta el martes y media el miércoles; con viento variable del Oeste; con madrugadas más frescas que la semana previa; en tanto la semana completa evidenciará más lluvia de lo normal y viento del Oeste levemente más acelerado de lo normal. La **Región Valle Central (Este y Oeste)** mostrará humedad alta hasta el martes y humedad media el miércoles; con viento variable del Oeste; con tardes cada vez más cálidas entre lunes-miércoles; en tanto la semana completa presentará condiciones lluviosas normales y viento del Oeste levemente más acelerado de lo normal. La **Región Turrialba (Alta y Baja)** presentará humedad media-baja, viento variable (Este-Oeste) con dominancia del Oeste y tarde más cálidas que el fin de semana previo; en tanto la semana completa mantendrá condiciones levemente menos lluvias y viento del Oeste levemente más acelerado de lo normal. La **Región Puntarenas** mostrará humedad alta hasta el martes y humedad media el miércoles; así como paulatina reducción del viento del Oeste y madrugadas cada vez más cálidas entre lunes-miércoles; en tanto la semana completa presentará más lluviosas de lo normal y viento del Oeste levemente más acelerado de lo normal.

## 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, a inicios del periodo del 24 al 30 de octubre se presentaron condiciones de alta saturación en la Región Guanacaste Oeste, Región Sur y Región Norte, en el resto de las zonas cañeras la humedad estuvo baja. A partir del jueves la saturación disminuyó en la Región de Guanacaste Oeste y en la Región Norte; solo la Región Sur mantuvo porcentajes altos de humedad durante todo el periodo.

Como se observa en la figura 09, la Región Guanacaste Oeste tiene entre 15% y 60%, la Región Guanacaste Este presenta entre 30% y 45%, la Región Puntarenas está entre 15% y 45%, tanto la Región Valle Central Oeste como la Región Valle Central Este están entre 30% y 45%.

La Región Norte presenta entre 15% y 45%, la Región Turrialba Alta (> 1000 m.s.n.m.) tiene entre 30% y 75%, la Región Turrialba Baja (600-900 m.s.n.m.) está entre 30% y 45%. La Región Sur varía entre 15% y 100% de humedad.

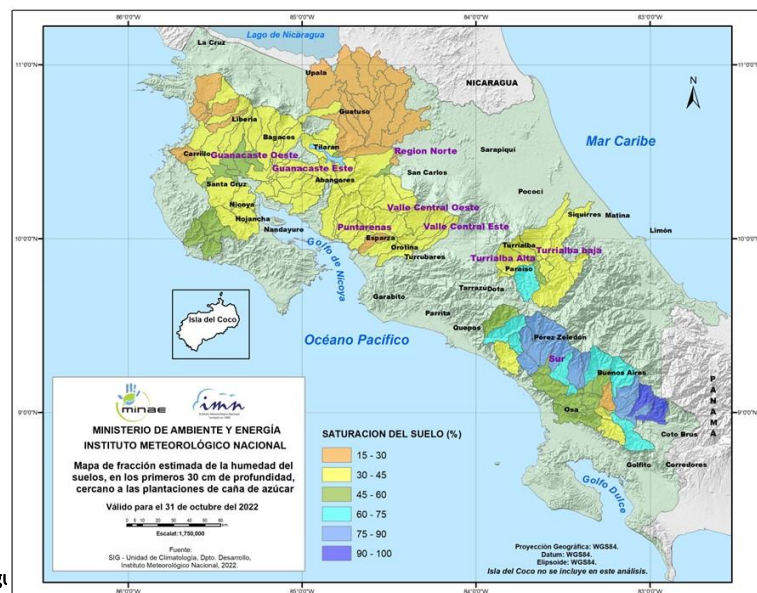


Fig. 09. Mapa de fracción estimada de la humedad del suelo, en los primeros 30 cm de profundidad, cercano a las plantaciones de caña de azúcar, válido para el 31 de octubre del 2022.

## LAICA Y EL IMN LE RECOMIENDAN

Mantenerse informado con los avisos emitidos por el IMN en:

- @IMNCR
- Instituto Meteorológico Nacional CR
- [www.imn.ac.cr](http://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

## Zonificación agroecológica del cultivo de la caña de azúcar: elementos básicos para su implementación en Costa Rica

Marco A. Chaves Solera<sup>1</sup>

La caña de azúcar constituye sin duda una de las actividades productivas importantes en varias regiones agrícolas de Costa Rica, virtud de participar activamente en la generación de trabajo y riqueza en la zona rural, lo cual requiere necesariamente para ser exitoso, diseñar, implementar y operar planes y programas de manejo técnico-administrativo en varias áreas específicas de la cadena agroindustrial, en procura de incrementar y optimizar los índices de productividad agroindustrial, reducir los costos asociados, elevar la rentabilidad y el grado de competitividad. Se busca con ello, atenuar en alguna medida la gran incertidumbre, duda e inseguridad que suscitan las múltiples y severas limitaciones ambientales existentes; así como también las dificultades y distorsiones que ofrece el dinámico, cambiante y volátil mercado azucarero como destino final del esfuerzo agroempresarial.

Para la estimación y el mejoramiento de los sistemas de producción operados en las fases de campo, cosecha, transporte y procesamiento de la materia prima producida, y en general, de todo el proceso agrícola e industrial involucrado; es imperativo e ineludible conocer y optimizar el uso de los recursos existentes y disponibles para lograr el aprovechamiento del potencial y aptitud que poseen las tierras

y localidades agrícolas para producir satisfactoriamente caña de azúcar de alta calidad. En esa orientación y con el objeto de determinar con certeza el potencial productivo que poseen las zonas cañeras del país, es habitual y esperable que se formulen estudios de regionalización, zonificación y hasta lotificación de las áreas de producción. Es sin embargo un hecho comprobado, que muchas veces dichos estudios se encuentran limitados en su alcance y certidumbre por la limitada e insuficiente disponibilidad de información de calidad existente, tanto de índole estadística, productiva, tecnológica como también cartográfica, con relación al medio físico involucrado y las potencialidades intrínsecas prevaecientes en las diversas regiones y entornos agroproductivos donde se siembra caña de azúcar. La información temporal y espacial ha sido en este sentido por tradición muy limitada y dispuesta con un grado de actualización muy irregular.

Las fuentes de información que proporcionen datos y documentación deben contar con la calidad, confiabilidad y representatividad necesarias para acompañar en forma cabal la toma correcta y oportuna de decisiones de planeación, operación y gestión de actividades productivas; lo cual se torna imperativamente obligado en el caso nacional, virtud de contar con una condición caracterizada por la alta variabilidad y heterogeneidad de los factores y elementos bióticos y abióticos involucrados, como acontece con la agroindustria cañero-

<sup>1</sup> Ingeniero agrónomo, Máster en Ciencias y Especialista cultivo de la Caña de Azúcar. Correo – e: [chavessolera@gmail.com](mailto:chavessolera@gmail.com)

azucarera costarricense, como ha sido demostrado y documentado por Chaves (2019d) y Chaves *et al* (2018). No cabe duda de que la importancia y trascendencia socioeconómica de la caña de azúcar justifica realizar todos los estudios sobre la variabilidad espacial prevaleciente que sean necesarios.

Los objetivos procurados alcanzar y satisfacer por la zonificación aplicada en el campo agrícola, siempre se relacionan por lo general con la clasificación y representación espacial de la aptitud y las limitaciones del lugar involucrado con respecto a un determinado potencial de uso, orientado a mejorar la situación existente; ya sea incrementando la producción, mejorando la productividad, elevando la rentabilidad, o en su caso, limitando y mitigando la degradación de los recursos naturales bióticos existentes y abióticos empleados. En este importante e interesante ejercicio logístico de proyección se trabaja con la recolección, disposición, articulación y sobreposición espacial de información estratégica valiosa y vinculante de factores y elementos determinantes como son el suelo, el clima, el relieve, el recurso hídrico, el cultivo, la fitosanidad, los recursos y servicios básicos existentes, disponibles y accesibles en el lugar; como también otras variables de valor para alcanzar el objetivo pretendido.

Conociendo que el sector azucarero costarricense dispone de información muy valiosa atinente a tópicos muy variados por su contenido, alguna de ella diseminada y no integrada formalmente a nivel regional de manera que facilite la caracterización y tipificación del entorno local, lo que le hace perder valor utilitario, se busca con el presente esfuerzo documental satisfacer los objetivos anotados seguidamente, por medio de los cuales será posible acceder a diseñar una primera aproximación zonificación agroecológica para la agroindustria cañero-azucarera nacional, Entre los tópicos más destacables están los siguientes:

- a) Identificar en primera instancia los factores y elementos necesarios disponer para establecer una zonificación de carácter y contenido agroecológico en la actividad azucarera costarricense.
- b) Proponer una estructura metodológica que permita y favorezca la jerarquización y clasificación de las áreas

zonificadas en función de su aptitud y potencial agroproductivo.

- c) Aportar elementos instrumentales y metodológicos que conduzcan a zonificar la actividad productiva de caña de azúcar desde una perspectiva agroecológica con proyección nacional, regional y local.
- d) Concientizar sobre la importancia de la zonificación como herramienta efectiva para la planeación y el trabajo bajo principios estratégicos que minimicen el riesgo, el sesgo y la incertidumbre en las decisiones adoptadas en las diversas y complejas materias involucradas.
- e) Potenciar, maximizar y optimizar el empleo de los recursos bióticos y abióticos existentes en una localidad con fines agroecológicos y productivos.
- f) Favorecer la asignación de recursos materiales y logísticos con base en principios de necesidad, potencial de uso y generación de valor agregado.

#### Productividad agrícola y ecofisiología

La productividad agrícola es una expresión de carácter fenotípico que opera y se materializa en función de varios determinantes como son el genotipo constitutivo de la planta (componente génico), el ambiente prevaleciente en el entorno de producción y las interacciones que surjan entre estos dos factores, con sus sinergismos y antagonismos correspondientes. El ambiente de producción agrícola puede ser definido en esta condición como el conjunto de los factores de un determinado sistema de producción que, incorporados e integrados a la genética constitutiva de la planta cultivada, determinan su desempeño en el campo, y, por tanto, su productividad. En principio parece simple y sencillo desagregar, independizar y hasta intervenir esos dos factores en procura de influenciar y potenciar la mejora productiva de un cultivo, en nuestro caso la caña de azúcar, lo cual en la práctica de campo no resulta nada fácil.

Representa una aspiración y meta válida y razonable de todo agricultor y empresario agrícola eficiente y competitivo, buscar optimizar mediante el correcto manejo agronómico de campo todos los factores ambientales que caracterizan su entorno productivo, para que un determinado genotipo (cultivo, variedad, clon) pueda expresar su potencial productivo



intrínseco; lo cual, sin embargo, se ve en la realidad limitado por razones físicas y económicas que impiden en las circunstancias naturales del campo alcanzar maximizar y satisfacer esa ansiada pretensión.

Conocer las características, contenidos y comportamientos de los factores ambientales y el modo como influyen e impactan la productividad de un cultivo, asociado a la posibilidad de intervenirlos, representa en la actualidad posiblemente el mayor desafío que enfrenta la agricultura moderna, ya que su control haría posible ubicar cada genotipo en la condición ambiental ideal que favorecería maximizar su potencial productivo; además de contrarrestar y mitigar los impactos detrimentales que de manera creciente viene provocando el Cambio Climático. Para eso, la primera medida razonable, juiciosa y lógica por adoptar es diseñar, validar e implementar el desarrollo de un sistema de clasificación ambiental donde se identifiquen, ordenen y contextualicen los diferentes ambientes de producción existentes en el país ligados con la producción de caña de azúcar. Esa medida permitiría a todas las instituciones, profesionales, empresarios y productores trabajar sobre patrones bien estructurados conceptualizados dentro de la zonificación productiva y agroecológica.

La amplia experiencia mundial y nacional ha demostrado con creces y de manera contundente, que la mejora de los índices de productividad agroindustrial en el cultivo de la caña de azúcar está fundada y sustentada sobre la utilización de materiales genéticos promisorios de potencial comprobado, cultivados en condiciones edafoclimáticas apropiadas y manejados agronómicamente de manera satisfactoria en concordancia y apego a sus necesidades. Esto implica imperativa e insoslayablemente un manejo técnico oportuno y muy responsable del suelo, el agua, la energía lumínica, los nutrientes y la fitosanidad, entre otros factores y elementos del entorno agroproductivo. Dicho en otra forma, muy corta y limitada será la expectativa de pretender alcanzar rendimientos elevados y sostenibles en el tiempo, si las condiciones prevalecientes y las propias del lugar donde se cultiva la caña no satisfacen los requerimientos básicos que la planta requiere para expresar todo su potencial genético. Esta realidad lleva a

afirmar que localidades de muy alta humedad o sequía permanente que no cuenten con un sistema adecuado de manejo del agua (drenaje, riego), donde las temperaturas son extremas, la condición del suelo es de muy alta degradación, el material genético sembrado es de baja adaptación y alta sensibilidad o el manejo agronómico es inadecuado, la posibilidad real de producir altos tonelajes de materia prima de alta calidad industrial se tornan difíciles de lograr de manera sostenible cuando son proyectados en el tiempo.

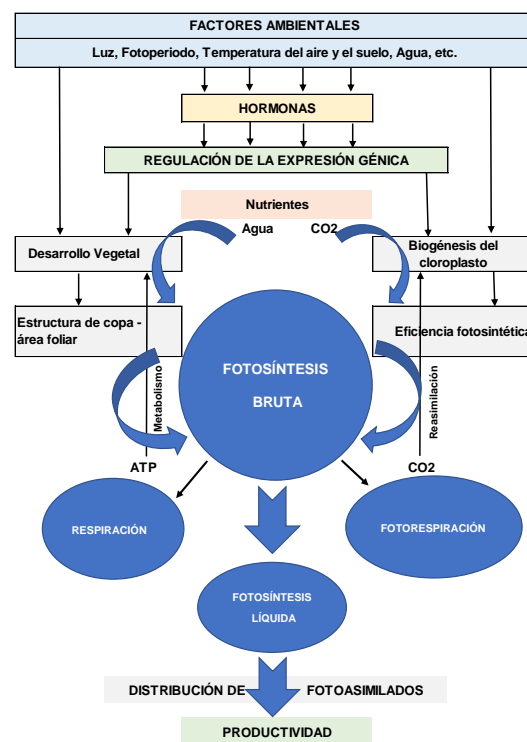


Figura 1. Esquema de expresión fenotípica de la productividad agrícola (Nasyrov, 1978)

En concordancia con la “Ley del Mínimo” principio desarrollado en las ciencias agrícolas por Carl Sprengel (1828) y popularizado posteriormente por Justus Von Liebig, señala “...que el rendimiento de los cultivos está regulado por el factor más limitante y que el rendimiento se puede incrementar únicamente con la corrección de ese factor limitante.”; a partir

de lo cual apenas un factor y no necesariamente todos podría constituirse en limitante, lo que infiere que el crecimiento no es controlado por el total de los recursos disponibles, sino por el recurso más escaso. Los factores de estrés de la planta y el cultivo se generan a partir de estas interacciones como lo apuntara Levitt (1972).

En la Figura 1 se muestra el modelo integral propuesto por Nasyrov (1978) que sugiere que la productividad de la planta es el resultado interactivo de procesos y relaciones complejas y diversas que ocurren en la ontogénesis (proceso de formación de cada uno de los seres vivos), bajo influencia directa de las condiciones externas.

No cabe duda de que el crecimiento, el desarrollo y la productividad de un cultivo como la caña de azúcar, está estrechamente vinculado y es dependiente en muy alto grado del clima, el suelo y las condiciones del ambiente en general donde se encuentre cultivada; lo que provoca que la zonificación agroecológica represente una de las principales herramientas disponibles para disminuir los riesgos y la incertidumbre a la que está sometida la agricultura.

Queda claro con el modelo propuesto (Figura 1) que la productividad final de un cultivo depende de:

- Cantidad de energía incidente.
- Cantidad de energía interceptada y absorbida (excitación electrónica).
- Cantidad de energía convertida (fijación de CO<sub>2</sub>).
- Cantidad de energía transportada para las secciones útiles de la planta (participación de fotoasimilados).
- Metabolismo en las secciones útiles de la planta (eficiencia en la utilización).

Como se infiere la condición de luminosidad resulta determinante en el accionar del sistema fotosintético del vegetal, como también lo hacen las características anatómicas, genéticas y fisiológicas de la planta, en lo cual hay que reconocer, la “caña de azúcar es una campeona”.

#### Factores fisiológicos

La caña de azúcar es una conocida y provechosa planta de origen tropical que se adapta y desenvuelve bastante bien en condiciones edáficas y climáticas adversas y disímiles, donde otras plantas por lo general no prosperan, lo que le provee una gran capacidad de resiliencia a las divergencias que puedan existir en elementos y condiciones naturales o inducidas de carácter biótico y abiótico. La planta se adapta a condiciones calientes y secas, como también frías y húmedas; zonas de alta y baja luminosidad, suelos ácidos y también alcalinos, topografías planas y quebradas, entre otras igualmente contrastantes. Por su importancia y complejidad constituye una de las plantas más estudiadas a nivel mundial en materias vinculadas con su anatomía y fisiología, como lo demuestran los clásicos documentados por Dillewijn (1952), Alexander (1973), Magalhães (1987), Castro (2016), Castro y Angelini (2017), SUGARCANE (2014), atribuyéndole características, condiciones y atributos especiales que la tipifican como “*excepcional*” entre las plantas con proyección y empleo comercial, como lo expresara de manera sucinta Chaves (1988, 2018), al señalar con gran detalle (Chaves 2020d), que:

*“...la caña es una planta excepcional entre las plantas de uso comercial en consideración de poseer varias ventajas y atributos de índole anatómico y fisiológico que la tipifican y caracterizan, entre las cuales pueden citarse como sobresalientes las siguientes:*

- 1) Dispone de un elevado Índice de Área Foliar (IAF  $\approx$  4-12 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) asimilador de luz que favorece y hace más eficiente la absorción de radiación solar (Barbieri 1993).*
- 2) Produce una gran cantidad de Materia Orgánica la cual reside en su alta Tasa de Fotosíntesis por unidad de superficie de terreno, que es influenciada a su vez por su alto IAF. Su producción máxima teórica de Materia Seca se reporta en 280 TM/ha/año.*
- 3) La disposición vertical de sus hojas durante gran parte de su periodo de crecimiento contribuye significativamente con los puntos anteriores.*
- 4) Fotosintéticamente es una planta altamente eficiente que pertenece al grupo privilegiado de las Ciclo C4 (Vía Ácido Dicarboxílico).*
- 5) Posee estructuralmente dos juegos de cloroplastos (Células del Mesófilo y Células de la Vaina Vascular) que promueven su alta eficiencia fotosintética en la captura y uso del CO<sub>2</sub>, la cual se da por dos vías: a) Vía Normal C3 de Calvin y, b) Vía alternativa C4.*



- 6) *Es capaz de incrementar su Tasa Fotosintética por aumento de la luminosidad, por lo que califica como una planta típicamente de sol y de luz.*
  - 7) *Posee un alto Punto de Saturación de Luz estimado en 6,5 a 150 Klux ( $\approx 65$  a  $1.500 \text{ Wm}^{-2}$ ).*
  - 8) *Posee un alto Punto de Compensación lo que le permite alcanzar altos valores de fijación de  $\text{CO}_2$ , lo que corresponde a eficiencias del 5-6% de conversión de energía solar.*
  - 9) *Su velocidad de Fotosíntesis es cerca de 2-3 veces superior a la de las gramíneas del tipo C3, presentando una capacidad fotosintética estimada en  $100 \text{ mg de } \text{CO}_2/\text{dm}^2/\text{hr}$ .*
  - 10) *Tolera condiciones extremas (altas y bajas) de temperatura. Se reporta alta tolerancia a temperaturas extremas de hasta  $47^\circ\text{C}$  y capacidad productiva, siempre que se utilice riego eficiente. Se estima que los  $27^\circ\text{C}$  constituyen la óptima para absorción de nutrimentos, por cuanto temperaturas debajo de  $21^\circ\text{C}$  retardan el crecimiento de las raíces, el cual se paraliza a los  $10^\circ\text{C}$ .*
  - 11) *Tolera como está demostrado una condición hídrica extrema por varios días consecutivos (sequía, inundación).*
  - 12) *Tiene capacidad y ventaja de poder fotosintetizar con los Estomas prácticamente cerrados, lo que duplica su eficiencia en el uso del agua y su transpiración relativa, en comparación con otras gramíneas del tipo C3.*
  - 13) *No posee Respiración Aparente por lo que no “desperdicia energía metabólica potencial”.*
  - 14) *Dispone de una enorme y reconocida capacidad para producir masa verde (Biomasa) compuesta fundamentalmente por almidones, azúcares (Reductores y No Reductores), compuestos lignocelulósicos y agua.*
  - 15) *Dispone de un poderoso sistema radicular compuesto de tres tipos de raíces diferentes: a) Superficiales-ramificadas y absorbentes, b) de Fijación más profundas y c) Cordones que profundizan hasta 6 m. que le dan una enorme capacidad de exploración (vertical, horizontal) en el suelo y con ello absorción nutricional y de agua.*
  - 16) *Posee una rusticidad y capacidad de adaptación (climática, edáfica y de manejo) a toda prueba, tal como está suficientemente demostrado a nivel de uso comercial.*
  - 17) *Sus elevados requerimientos nutricionales son satisfechos en alto grado virtud de sus ventajas (puntos N° 13 y 14) anotadas anteriormente. Este atributo resulta sin embargo contraproducente virtud de que “agota los suelos” cuando no son complementariamente convenientemente fertilizados.*
  - 18) *Posee la capacidad demostrada de Fijar Nitrógeno Atmosférico, con aportes importantes a su nutrición.*
  - 19) *Para uso pecuario la caña posee y mantiene en periodos secos valores nutritivos y energéticos importantes que le proveen un interesante potencial de uso forrajero.*
  - 20) *Su condición de planta Perenne le permite generar materia prima por retoñamiento luego de cada corte, por lo que no requiere inversiones y siembras sucesivas, sólo mantenimiento.*
  - 21) *Los parámetros ambientales que afectan de manera más marcada e incidente la Bioconversión de Energía en la caña de azúcar son: 1) Luz (intensidad y calidad); 2) Concentración de  $\text{CO}_2$ ; 3) Disponibilidad de agua; 4) Disponibilidad de nutrimentos y 5) Temperatura, entre otras.”*
- A lo anterior puede agregarse otro atributo muy importante y aplicado a nuestras condiciones, como es:*
- 22) *La caña posee la capacidad de formar aerenquima, tejido especializado que le permite el transporte de oxígeno atmosférico a las raíces y órganos sumergidos en condiciones de exceso de agua, lo que admite tolerar estrés provocado por hipoxia o falta de oxígeno y con ello la supervivencia de la planta en zonas de alta humedad. No se encuentran diferencias entre variedades (Unigarro et al 2013).”*
- Muchos otros elementos de diversa calidad y contenido asociados directa e indirectamente con la anatomía, la genética, la fisiología y la acción metabólica desarrollada por acción hormonal, hídrica y nutricional pueden asociarse a la planta de caña de azúcar, para demostrar y justificar su calidad de “excepcional”. Esa acción se ve intervenida, promovida o en su caso limitada y hasta impedida por actividades ecofisiológicas de acción sinérgica y antagónica, accionadas e inducidas por factores atinentes al clima, el suelo, la planta y su manejo agronómico, entre otras; como lo propusiera gráficamente Alvim (1962) y adaptaran Castro (2016) y Castro y Angelini (2017), como se expone en la Figura 2. Denota dicho mecanismo los estrechos vínculos existentes entre los factores asociados a la ubicación geográfica (latitud, altitud), el clima (lluvia, temperatura, radiación solar, fotoperiodo), relieve

(topografía), suelo (textura, composición fisicoquímica, aireación, elementos esenciales), agua (en el suelo, balance hídrico), planta (fotosíntesis, respiración, crecimiento, floración, nutrición). Entre mayor integración, articulación y optimización se tenga entre todos esos elementos mejor expresión se tendrá del potencial genético intrínseco de la planta de caña de azúcar.

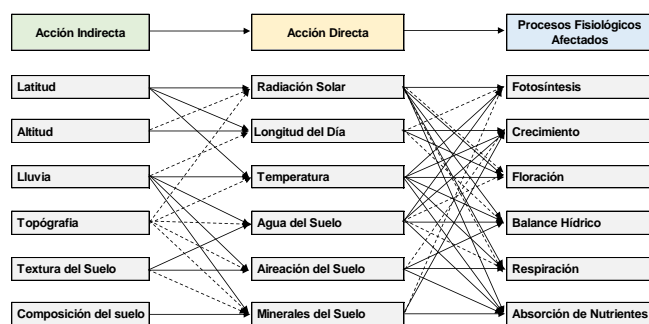


Figura 2. Factores de la producción que afectan directa e indirectamente los procesos fisiológicos de la caña de azúcar. (Adaptado de Alvim (1962) por Castro (2016).

Nota: Acción directa → Acción indirecta - - - - -

### Ambientes y sistemas de producción agrícola

La agricultura como práctica humana requiere y demanda organización, motivo y razón por la cual siempre el ser humano ha procurado a través de la historia generar orden, formal o no, a las cosas y acciones emprendidas en su bienestar; gestión en la cual la agricultura no ha sido la excepción, pues por su naturaleza extensiva, dinámica y heterogénea requiere necesariamente ubicar y contextualizar necesidades y labores, alinear tiempos y clasificar recursos y productos, llegando por ello a modelar y diseñar metodologías de manejo de plantaciones, estructurados bajo la figura de sistemas operativos.

Los ambientes de producción agrícola conceptualizados y aplicados en lo específico al cultivo de la caña de azúcar, procuran identificar, agrupar e integrar las tierras y recursos disponibles de acuerdo con la capacidad real actual y el potencial de producción existente, relacionando y proyectando para ello la productividad potencial esperable de un área con las condiciones edáficas y climáticas prevalecientes, mediante la incorporación de un determinado nivel de tecnología y

manejo agronómico. En materia de producción y productividad agrícola la relación se establece entre lo real actual y lo potencial viable, factible y esperable si se dan los cambios y ajustes convenientes en forma oportuna.

No cabe duda que recabar, organizar, integrar, ordenar, articular y saber juzgar e interpretar con buen criterio y fundamento la voluminosa y compleja información disponible hoy día sobre diferentes tópicos bajo el concepto de sistemas, resulta muy apropiado y pertinente para contar con los elementos fiables, representativos y precisos necesarios para estimar con base técnica la condición y/o requerimientos necesarios para procurar optimizar y maximizar el potencial intrínseco de la planta en esa condición particular. Cuando se habla de sistemas son muchas las categorías y prototipos que existen en el campo agrícola, como son por ejemplo los asociados con zonas de vida, la taxonomía de suelos, la geología, la hidrología, con el clima, la conservación de recursos naturales, los vinculados al riego, los nutrientes, los agroquímicos, a los equipos y maquinaria, de cosecha, de conservación de recursos y recursos socioeconómicos, entre otros, que integrados pueden alcanzar la categoría superior de sistemas de producción agrícola y sistemas agroecológicos, entre otros, aplicados a la agroindustria del azúcar.

Sucede sin embargo, que el interés mundial por generar cada vez mejores propuestas e instrumentos metodológicos presuntamente más fuertes en cuanto a su capacidad de predicción y estimación, ha llevado a generar una provocativa y voluminosa oferta temática con un efecto más bien contrario y contraproducente por el estado de indefinición que paradójicamente han provocado, como lo apuntan De Souza y Días (2017); quienes defienden la urgente e imperiosa necesidad de construir un sistema de clasificación de ambientes de producción en caña de azúcar que sea único y de libre acceso, de modo que los criterios empleados en la clasificación puedan ser de comprensión general para todos los interesados empleando el lenguaje común y genérico del sector.

En lo pragmático se considera que un buen sistema de clasificación de ambientes de producción de caña de azúcar debe dar soporte y respuesta satisfactoria a los técnicos cañeros, no necesariamente especializados en materias

edáficas, nutricionales o climáticas, para la recomendación de variedades de caña adaptables a condiciones ambientales específicas, constituyendo así un importante y sólido criterio para su recomendación. Asimismo, un sistema operativo bien concebido y fundamentado es necesario para la comparación prudente y eficiente de productividad y calidad de la materia prima producida entre plantaciones sometidas a condiciones ambientales similares ubicadas en unidades productivas diferentes, lo que facilita superar los sesgos, errores y arbitrariedades que por lo común se cometen al comparar producciones y productividades a nivel regional, de zona y local sin criterio bien cimentado.

De acuerdo con Chaves (2022g) un **Sistema de Producción Agrícola** *“...se refiere a los elementos existentes y disponibles debidamente identificados, organizados, ordenados, relacionados y que interactúan entre sí para buscar satisfacer un objetivo común; en este caso producir caña de azúcar. Un Sistema Agroproductivo involucra equipos mecánicos, personas, tecnologías, materiales e insumos, e incluso hasta elementos del entorno de índole edáfico, climático y biótico como son las variedades, plagas y patógenos. El sistema de producción contextualiza una estructura y forma particular de producir que facilita y agiliza la descripción, la ejecución y explicación del proceso de producción de caña en el campo. El sistema homogeniza los factores y elementos involucrados con la producción.”*

De forma complementaria un **Sistema de Zonificación Agroecológica** consiste en *“...la definición de zonas relativamente homogéneas en cuanto a productividad del cultivo, caracterizada por factores biofísicos de largo plazo generalmente estables. Procura la integración de información como instrumento necesario para alcanzar una planeación y programación eficiente y bien fundamentada, que se sustente en el conocimiento y aprovechamiento de la vocación productiva de las tierras y el potencial del cultivo.”*

De acuerdo con Carbonell et al (2011) una zona agroecológica es concebida, como *“una zona relativamente homogénea en cuando a la productividad del cultivo y caracterizada por factores biofísicos de largo plazo generalmente estables.”*

Para los efectos y objetivos pretendidos por el presente documento un **Sistema de Producción Agrícola** va orientado básicamente a contextualizar una forma o modelo de producción de caña de azúcar con fundamento en principios, prácticas, labores, recursos, destinos y objetivos previstos alcanzar; en tanto que un **Sistema de Zonificación Agroecológica** procura unificar y explicar la productividad del cultivo con base en potenciales, aptitudes y la homogeneidad que pueda existir entre los factores biofísicos del lugar. Como se infiere su empleo varía de acuerdo con el objetivo planteado pues el primero integra, ordena y contextualiza; el segundo articula, homogeniza, proyecta y explica.

El interesante sistema de zonas de vida propuesto y desarrollado por Holdridge (1983) vincula la vegetación de un determinado sitio con las variables climáticas de precipitación y biotemperatura, permitiendo definir a partir de ello la distribución natural de las especies. Dicho sistema predice que existe una estrecha relación entre el clima y la vegetación, para lo cual definió valores climáticos destinados a identificar grupos de ecosistemas. Este sistema ha sido utilizado en el país para el mismo objetivo ecológico, como lo demuestra Alpizar (2014) para el caso del café y el cacao.

### Sistemas de producción nacional

Relativamente pocos esfuerzos intelectuales se han realizado en el país en el campo cañero-azucarero buscando establecer algún tipo de organización y sistematización básica y de zonificación en materia de producción agrícola, con igual ponderación para los sistemas de zonificación agroecológica del cultivo, como lo refieren los estudios de García (1972), Rojas (1982), Rojas y Eldin (1983), SEPSA (1987), Weiss (2002) y Chaves (2022g).

Un agrosistema, apuntan Laird et al (1993), *“...es un terreno que incluye el suelo y el clima, en el cual el hombre, empleando prácticas, produce cultivos. Con fines prácticos el agrosistema se define como una parte del universo de producción de un cultivo, patrón de cultivos o sistema de cultivos, en el cual los factores inmodificables de la producción son relativamente constantes.”* Agregan los mismos autores, que *“...Un sistema es*



un arreglo de componentes físicos, o un conjunto de cosas, unidas o relacionadas de tal manera que forman y actúan como una unidad". Con relación a sistemas agrícolas, aseveran, que "El sistema agrícola es un sistema con, por lo menos, un componente agrícola. Sistemas agrícolas ocurren desde el nivel mundial con flujos de mercadería agrícola entre países, hasta el nivel de una planta y los procesos fisiológicos dentro de ella".

Apunta y ubica Chaves (2022g) en torno a este tema, al procurar identificar los posibles modelos de producción presentes en el país sin asignar magnitud ni importancia, que "En la agricultura cañera nacional existen varios sistemas de producción interactuando simultáneamente de manera diferencial en varias regiones y localidades productoras que pueden ser perfectamente identificados e inclusive caracterizados y hasta tipificados virtud de su frecuencia e importancia, como podría ser el caso de los siguientes 14 escenarios potenciales:

- 1) Sistema mecanizado (preparación de terreno, siembra, manejo y cosecha) de producción
- 2) Sistema de producción semi-mecanizado (preparación de terreno, siembra, manejo y cosecha)
- 3) Sistema agroproductivo de manejo manual y con uso de tracción animal
- 4) Sistema de producción con riego
- 5) Sistema de producción en seco (sin riego)
- 6) Sistema de producción desarrollado en condiciones de alta humedad
- 7) Sistema de producción operado en condiciones de pendiente (ladera)
- 8) Sistema de producción con cosecha de plantaciones en verde
- 9) Sistema de producción en plantaciones de ciclo bianual superiores a 1.000 msnm
- 10) Sistema productivo con uso intensivo de tecnología
- 11) Sistema productivo con uso de bajos insumos
- 12) Sistema de producción de caña orgánica
- 13) Sistema de producción con empleo de labranza mínima
- 14) Sistema de producción con incorporación de tecnología NAMA"

Cada uno de esos sistemas está constituido y estructurado con base en características, propiedades y particularidades propias y en principio algo similares que los identifican y tipifican, las cuales pueden presentar sin embargo modificaciones de magnitud, intensidad, presencia, cobertura y eficiencia entre regiones y localidades diferentes. Vale reconocer que los sistemas de producción agrícola de caña de azúcar por principio no son absolutos ni irrestrictos en su conformación, lo que da lugar a la posibilidad de encontrar variaciones en la presencia y manifestación de sus elementos estructurales.

#### Sistema de clasificación y gestión ambiental

Un sistema de clasificación ambiental puede concebirse e interpretarse en el caso agropecuario, como el conjunto de componentes físicos, químicos, biológicos, ambientales y sociales, con potencial de afectación de forma directa o indirecta, en un tiempo variable, sea en el corto plazo o en periodos prolongados, sobre los seres vivos y las actividades desarrolladas por el ser humano, en este caso de índole agropecuario. Su valor es importante por constituirse en un instrumento y una herramienta efectiva empleada para estudiar el impacto provocado por las actividades desarrolladas en el campo por el agricultor sobre el ambiente y el ecosistema, y de alguna manera opera también en sentido inverso. Un impacto ambiental hace referencia a una prueba reconocible, medible y documentada de los efectos ambientales reales y potenciales de las operaciones, en este caso consignadas a una agro empresa. Su implementación contribuye con el productor y la agro empresa para alcanzar sus metas y objetivos ambientales de manera sistemática, planificada y bien documentada. Sus ventajas son notorias, incuestionables y de muy alto valor agregado.

Su implementación implica el diseño y establecimiento de un programa con protocolos, metodologías e indicadores válidos, representativos, reveladores, medibles y verificables; así como el seguimiento y la comprobación continua y sistemática del grado de avance logrado para cumplir a cabalidad con los objetivos y metas propuestas y deseadas alcanzar. En empresas de dimensión importante e ingenios azucareros se conforman los Sistema de Gestión Ambiental (SGA) como mecanismos para confrontar y manejar los efectos, consecuencias e impactos

que supone la ejecución de algunas prácticas de una empresa o gestión productiva para la naturaleza y los ecosistemas; para lo cual operan los Gestores Ambientales como profesionales calificados encargados del manejo de estas materias. La gestión se orienta también a buscar cumplir con los requisitos y protocolos asociados con las Certificaciones de Calidad y la medición y trazabilidad de la Huella de Carbono (Montenegro y Chaves 2011). La revisión de los objetivos ambientales para analizar su impacto en el entorno y orientar la mejora continua del desempeño ambiental, es una característica de gran importancia que aporta valor agregado a las empresas ecoeficientes y eco-competitivas.

Un SGA puede contribuir de varias formas distintas, siendo los siguientes algunos de los beneficios más importantes que aporta el Sistema de Gestión Ambiental a la organización:

- ❖ Reduce y minimiza los impactos y consecuentes efectos ambientales.
- ❖ Maximiza el uso productivo de los activos disponibles generando valor agregado.
- ❖ Reduce la cantidad de derivados y residuos producidos.
- ❖ Favorece la imagen pública y evidencia documentalmente lo que la organización realiza y como lo hace.
- ❖ Promueve, impulsa y fortalece la conciencia y preocupación ambiental dentro de la organización.
- ❖ Alcanza un conocimiento superior de los efectos ambientales provocados por la labor productiva.
- ❖ Aumenta los beneficios del plan ambiental mediante la ejecución de operaciones más productivas y menos degradantes.

#### Zonificación agroecológica para la caña de azúcar

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO 1997), el propósito fundamental y primario de zonificar consiste en separar discrecionalmente áreas con similares potencialidades y limitaciones para el desarrollo. La zonificación agroecológica identifica y define zonas agrícolas a partir de la combinación de factores como son el suelo, la fisiografía y las características climáticas. Los parámetros particulares empleados en su definición se centran en los requerimientos climáticos y

edáficos de los cultivos y en los sistemas de manejo bajo los cuales operan y se desarrollan.

La necesidad y obligación de desarrollar una herramienta efectiva y sencilla que sirva y opere como instrumento para orientar y conducir la gestión de planificación y programación requerida por la agroindustria azucarera para la correcta y oportuna toma de decisiones, se torna decisiva en tiempos donde la eficiencia y la competitividad resultan insoslayablemente elementos determinantes para alcanzar el éxito empresarial; en este caso, la zonificación agroecológica viene a satisfacer y contribuir de manera importante con ese imperativo. Zonificar significa disminuir la incertidumbre y poder cuantificar el nivel de riesgo implícito que limitan y desestimulan la inversión en la agricultura; lo cual se logra por medio de la optimización, potenciamiento y mejor aprovechamiento de los recursos bióticos y abióticos existentes, disponibles y accesibles en el lugar.

Por medio de la zonificación en este caso basada en factores y elementos de carácter agroecológico se permite y favorece la identificación de áreas geográficas y territorios poseedores de condiciones agrícolas, tecnológicas y ecológicas óptimas, necesarias para promover con posibilidades de éxito la expansión del cultivo; como también trabajar con buen criterio técnico en el mejoramiento sostenible de los índices de productividad agroindustrial. La zonificación permite ubicar áreas y espacios geográficos, sembrados o no, con potencial y aptitud para maximizar el beneficio agroproductivo; como también identificar aquellas otras que por su grado de productividad y estructura de costos resultan de baja rentabilidad y deben por ello ser desincentivadas y hasta eliminadas. Por medio de la zonificación se puede dar respuesta con buena certeza a las inquietantes preguntas de ¿Qué producir? ¿Dónde producir? ¿Cómo producir? y la decisoria inquietud sobre ¿Cuál es mi expectativa real de obtener altas productividades?

La importancia y benevolencia de contar con una zonificación bien concebida, diseñada y fundamentada en el sector cañero-azucarero nacional, estriba en poder atender y ordenar con criterio técnico los factores y elementos tipificantes de las diferentes localidades donde se cultiva y/o podría

eventualmente sembrarse o dejar de cultivarse caña de azúcar. Para esa gestión deben superarse los añejos y ya superados métodos de ubicar un cultivo por simple referencia geográfica o distanciamiento respecto al lugar de procesamiento fabril, pues se incurre muchas veces (no siempre) en graves falencias que en vez de armonizar más bien confunden.

Como es sabido el cultivo está ampliamente extendido en el país considerando que el área sembrada (60.668 hectáreas) con caña destinada a la fabricación de azúcar y no a otros usos alternativos (dulce, pecuario, forrajero), comprende 6 provincias (85,7%), cerca de 27 cantones de 84 (32,1% nacional) existentes y 109 distritos de 489 (22,3% nacional) distribuidos por todo el territorio nacional, como lo señalan Chaves (2017ab, 2019de, 2021a, 2022g), Chaves y Bermúdez (2020) y Chaves y Chavarría (2021ab). La disposición y movilización territorial del cultivo es por antecedente muy dinámica, disímil y cambiante aun cuando valorada en el corto tiempo, lo que genera como consecuencia una alta heterogeneidad y diversidad de entornos agroproductivos, como lo demostraron Chaves *et al* (2018) y Chaves (2019de, 2020ij).

En torno a este tópico tan trascendente, expresa Chaves (2022e), que *“...las condiciones prevalecientes en el entorno agroproductivo nacional vinculado con la caña de azúcar son como lo han demostrado fehacientemente Chaves et al (2018) y Chaves (2019de), muy disímiles, heterogéneos y variables, lo que favorece la inestabilidad y los cambios constantes no planificados e inesperados que puedan suceder en todos los sentidos, lo que debe tenerse presente al momento de implementar planes y programas de mejora tecnológica. En este particular, factores de contenido y trasfondo edáfico, climático, hídrico, de relieve, genéticos, fitosanitarios, de manejo de plantaciones, financieros, tecnológicos, administrativos y de estructura de tenencia de la tierra, crean ambientes de producción particulares no siempre convenientes a nivel de región, zona, localidad y hasta de unidad productiva. La variación biótica y abiótica es una condición prevaleciente en la agroindustria azucarera costarricense que debe tenerse y tomarse en cuenta. Esta realidad provoca que las tecnologías generadas y recomendadas deban ser imperativamente ajustadas y apegadas estrictamente a condiciones específicas y*

*particulares de cultivo y también geográfico, lo que desvirtúa y descarta operar bajo la pésima práctica de generalizar y popularizar las técnicas de producir caña en el campo. Esta barrera obliga necesariamente a considerar cada condición y unidad productiva como especial y particular, evitando las inconvenientes recomendaciones de “paquete” fundadas en supuestos teóricos y equivocados de homogeneidad.”*

Esa condición de inestabilidad y alta variabilidad en las condiciones ecológicas y agroproductivas de cultivo prevalecientes en el país, obligan a buscar mecanismos y herramientas válidas y efectivas para integrar, estratificar y diferenciar los ambientes de producción existentes, buscando su caracterización y tipificación con base en potenciales, aptitudes, propiedades, peculiaridades y condiciones actuales.

#### ¿Qué información es necesaria para zonificar?

Como se indicó anteriormente las experiencias existentes y documentadas a nivel mundial y nacional sobre zonificación agroecológica en el cultivo de la caña de azúcar son relativamente escasas, limitadas e insuficientes, manteniendo por excelencia Colombia la pauta y liderazgo al respecto, como lo denotan Carbonell *et al* (2011) al superar ya la cuarta aproximación y avance en el Valle del Río Cauca. En el caso nacional hubo un importante esfuerzo desarrollado en el año 1982 por Rojas (1982), Rojas y Eldin (1983) formulado como **“Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en Costa Rica”**; secundado posteriormente por García (1972), SEPSA (1987) y Weiss (2002). El criterio ha sido aplicado y aprovechado también por otras actividades agrícolas (Alpizar 2014).

La información básica y principal requerida en la definición de la zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar, consiste en la integración de factores edáficos y climáticos vinculados y articulados en secuencia metodológica para proceder con su análisis e interpretación, como se presenta en la Figuras 3 y 4. Para ello se debe contar con información de:

- a) Balance Hídrico con proyección regional.



Octubre 2022 - Volumen 4 – Número 22

- b) Estudio semidetallado de suelos y capacidad de uso de las tierras cultivadas con caña de azúcar en cada una de las localidades de interés.
- c) Grupos de Humedad debidamente comprobados y validados en campo.
- d) Agrupación homogénea de suelos.
- e) Datos detallados, ponderados y representativos de productividad agrícola (t caña/ha), industrial (kg azúcar/t caña) y agroindustrial (t azúcar/ha) ubicados por lote, región y variedad.
- f) Identificación de Variedades cultivadas comercialmente.
- g) Información variada sobre manejo agronómico de plantaciones.

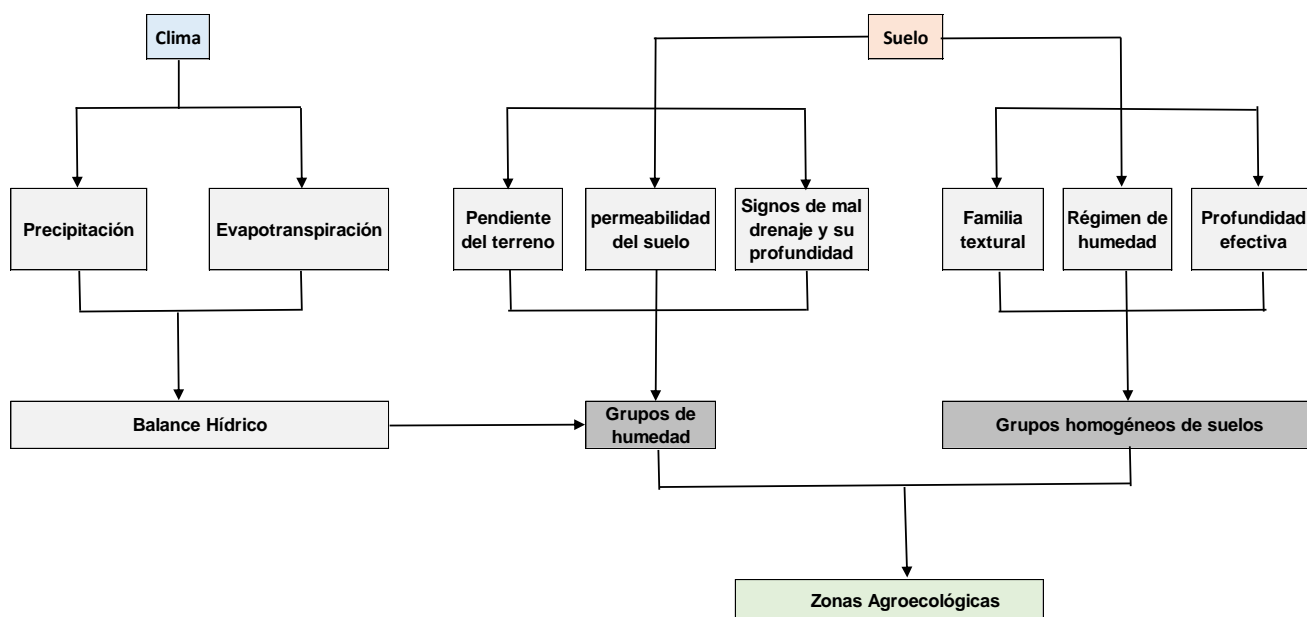


Figura 3. Diagrama metodológico de la secuencia de análisis de los factores considerados para la zonificación agroecológica del cultivo de la caña de azúcar en Colombia, según Carbonell *et al* (2011).



Figura 4. Cambio climático y diferencias ecológicas afectan el cultivo.

Como es comprensible y necesario entender, toda la información empleada y aplicada anteriormente es el producto consumado y final de importantes y complejos esfuerzos técnicos desarrollados en su diseño y formulación, obtenidos a partir de series de datos e indagación precisa de contenido representativo de muy alta confiabilidad y calidad.

Los componentes de los tópicos por desarrollar están en términos genéricos conformados y constituidos al desagregarlos por la siguiente información:

A.) **Balance Hídrico (mm/año)**: corresponde al balance integrado establecido entre la precipitación caída y la evaporación generada que es reemplazada en este caso por la evapotranspiración cuando aplicada al cultivo; con lo cual se identifican los periodos secos con déficit de humedad y los húmedos con excesos establecidos por zonas y localidades productoras. Su estimación permite ubicar con buen criterio necesidades sean de riego y/o drenaje, posibilitando asignar los recursos hídricos requeridos en el sitio particular, para compensar el déficit o en su caso evacuar los excesos de agua presentes.

- ❖ **Datos de precipitación (mm)**: deben disponerse y ubicarse estratégicamente estaciones pluviométricas (Tanques Clase A) en el lugar y emplear para la estimación, series representativas de datos probabilísticamente determinados (75%) con al menos 10 años de vigencia.
- ❖ **Datos de evaporación (mm)**: representada por la movilización del agua desde el suelo y las plantas hasta

la atmósfera. Valora el vapor de agua que sale del suelo y la transpiración surgida de la vegetación y movilizada hacia la atmósfera.

- ❖ **Coefficiente de cultivo**: el estimador Kc se proyecta en un valor de 0,7.
- ❖ **Estimación de la evapotranspiración**: se estima que cerca del 70% del agua total caída por precipitación en una zona es devuelta a la atmósfera por este proceso.
- ❖ **Cálculo**: se sugiere emplear por simple y efectiva en la estimación del Balance Hídrico la siguiente fórmula:

$$BH = P - 0,7 * Ev$$

Donde: BH = Balance Hídrico, P = Precipitación, Ev = Evaporación y Kc = Coeficiente de cultivo.

- ❖ **Interpretación**: es necesario establecer rangos de BH medidos en mm/año que ubiquen y categoricen probabilísticamente al nivel del 75% las condiciones de Déficit o en su caso de Exceso.

B.) **Estudio de suelos**: esta variable resulta determinante en las inferencias que puedan generarse pues permite caracterizar, clasificar, ubicar y representar en mapas cartográficos los diferentes tipos de suelos presentes y dominantes en una determinada región y localidad cañera. A partir de este conocimiento es posible interpretar con muy buena aproximación la aptitud y disposición que puedan tener los suelos para un uso determinado (agrícola, forestal, pecuario) y con ello predecir con buen suceso la viabilidad, factibilidad y conveniencia de emplearlos en la actividad productiva comercial y competitiva de la caña de azúcar.

Permiten proyectar comportamientos y potenciales de productividad agrícola y hasta industrial medidos por las toneladas de caña cosechadas por hectárea (t/ha), la sacarosa concentrada en esa materia prima, medida por los kilogramos de sacarosa por tonelada de caña (kg/t) y la conjunción de ambos valuada por las toneladas de azúcar producida por hectárea (t/ha); todo aplicado a los diferentes sistemas de manejo predominantes, como apuntara Chaves (2022g). El trabajo técnico especializado de levantamiento consiste en describir y cuantificar en el campo (mediante perfiles) y en el laboratorio las características, rasgos y particularidades medibles del suelo, e inferir a partir de ello, sus

cualidades y potenciales considerando interacciones, sinergismos y antagonismos. La labor opera sobre muestras representativas de suelo sometidas al análisis físico, químico y mineralógico, y muy deseable si fuera factible, microbiológico.

El levantamiento está basado en un reconocimiento cualitativo y cuantitativo del grosor de los horizontes diagnóstico o capas internas del perfil del suelo (corte vertical de dos dimensiones), valorando indicadores como color, estructura, consistencia, textura, etc.; por medio de los cuales es posible conocer y diferenciar los procesos morfológicos (cualidades del suelo en varios horizontes) de formación, génesis y desarrollo de este. Dicha información contribuye con la posterior clasificación taxonómica de los suelos. La calidad y grado de detalle implícitos definen a su vez la calidad del levantamiento y veracidad de las inferencias y conclusiones derivadas, pues hay de hecho una marcada correspondencia entre el grado de detalle y las escalas empleadas en el levantamiento con el trabajo de clasificación; logrando como resultado definir unidades cartográficas muy homogéneas casi a nivel de sitio. Es obvio señalar que entre más preciso y prolijo sea el levantamiento (exploratorio, semidetallado, detallado) más intenso será el trabajo y más recursos (humanos, técnicos, económicos, tiempo, etc.) serán requeridos. En este campo es determinante el trabajo asociado con la toma de muestras de suelo, como apuntara Chaves (2022h).

Esta variable se compone y estructura de manera genérica de los siguientes componentes básicos:

- ❖ Cartografía básica: consiste en reunir, integrar, articular y analizar medidas y datos de regiones, zonas y localidades productoras de caña, para representarlas gráficamente con diferentes dimensiones lineales en escala reducida. Para ello debe buscarse, integrarse y emplearse la importante información disponible en el país en torno a este tópico, la cual sin embargo no es homogénea ni balanceada geográficamente. Su empleo es de gran utilidad pues permite observar e interpretar espacialmente los indicadores y variables evaluadas de una forma simple y muy comprensible mediante el uso de sistemas de proyección,
- conteniendo la escala, la simbología y otros elementos propios del mapa.
- ❖ Familias texturales: la información recabada en este acápite permite el ordenamiento y agrupamiento de los suelos con base en su textura: arena (gruesa), limo (fina), arcilla (muy fina) y sus interacciones.
- ❖ Clasificación: aplica el Sistema Categórico de Clasificación. En Costa Rica se utiliza para ese fin el Sistema Taxonómico Norteamericano (USDA 2014) que incluye seis categorías cada una integrada por clases: Orden, Suborden, Gran Grupo, Subgrupo, Familia y Serie. Actualmente se cuenta con alguna información básica al respecto como apuntan Chaves (2017bc) y Chaves y Chavarría (2017ab).
- ❖ Regímenes de humedad del suelo: se conoce como “clima edáfico” y refiere a la presencia de agua aprovechable en el suelo dispuesta entre el punto de marchitez y el punto de saturación, medidas en la sección control del perfil durante momentos específicos del año. Se vincula con el drenaje natural del suelo y algunas de sus propiedades como son el grado de acidez (pH) y la Saturación por Bases. Expone y evidencia el efecto, impacto y repercusión que tiene el clima externo sobre el perfil del suelo en cuanto a características, propiedades y aptitudes. En Costa Rica hay tres regímenes importantes: Ústico (parcial o totalmente seco durante 90 días acumulativos, seco por más de 180 días acumulativos en alguna parte del año o por 90 días consecutivos), Údico (sin sequía durante 90 días acumulativos) y Ácuico (saturación con agua freática o en zona capilar por varios días, hay ausencia de O<sub>2</sub>), entre otros regímenes identificados, todos determinados en años calificados como normales.
- ❖ Elaboración de fases cartográficas: deberán ser diseñados a nivel de textura de la capa arable (0-25 cm); así como también mediciones sobre salinidad, sodicidad, potencial de inundación y secamiento, drenajes artificiales, pedregosidad, grado de pendiente y profundidad efectiva, entre otros, las cuales aportan información muy relevante.
- ❖ Grado de detalle: en estudios detallados se recomienda emplear una escala de 1:10.000 siendo incrementada de acuerdo con el grado de precisión deseado.



- ❖ **Interpretación:** la generación de inferencias y conclusiones implica realizar un trabajo de muy alto nivel técnico desarrollado por especialistas en las materias vinculadas que organicen, integren, conjunten e interpreten la información originada en el campo.

C.) **Grupos de humedad:** consiste en el agrupamiento discrecional de los campos sembrados con caña, identificando aquellos donde se presentan condiciones categorizadas como normales de humedad y aquellos donde prevalecen por el contrario condiciones adversas y difíciles para desarrollar una plantación por causa del exceso de agua presente.

Entre las variables e indicadores más importantes a considerar en este acápite pueden mencionarse entre otros los siguientes:

- ❖ **Drenaje natural:** deben evaluarse y ponderarse *in situ* elementos reveladores asociados con el estado de esta variable, sean de acción directa o indirecta, como son: profundidad, pendiente topográfica, presencia y profundidad de nivel freático, infraestructura de drenaje, signos de mal drenaje (colores moteados y gleysados en el suelo).
- ❖ **Permeabilidad:** se considera equivalente a drenaje natural.
- ❖ **Contenido de sales:** se considera un buen indicador de posibles problemas de drenaje particularmente en zonas húmedas.
- ❖ **Vegetación presente:** igual al punto anterior.
- ❖ **Niveles de Humedad:** con base en lo anotado en el punto siguiente, los Grupos de Humedad se pueden ordenar e interpretar con base en el siguiente criterio: a) Muy Alto ( $>600$  mm/año), b) Alto (400-600 mm), c) Medio (200-400), d) Bajo (0-200) y Déficit ( $<0$ ).
- ❖ **Categorización:** deben crearse y formalizarse grupos de humedad basados en características y atributos particulares tomando como base el nivel de exceso de humedad (mm/año) presente y la condición de permeabilidad del suelo, como: baja, media, alta. En Colombia Carbonell *et al* (2011) formularon y adaptaron a partir de lo propuesto por Torres *et al* (2000), seis grupos de acuerdo con el exceso de humedad existente medida en mm/año: 1) Déficit ( $<0$ ), 2) Humedad normal (0-200,  $<0$ ), 3) Humedad baja (200-400, 0-200), 4) Humedad media (400-600, 200-400), 5) Humedad alta ( $>600$ , 400-600) y 6) Humedad muy alta ( $>600$  mm/año). Otros criterios y escalas pueden ser generadas y empleadas.

D.) **Grupos homogéneos de suelos:** el criterio se formula y establece con base en el resultado alcanzado por el estudio detallado o semidetallado de los suelos y el de capacidad de uso de las tierras sembradas con caña de azúcar, ordenándolos y agrupándolos de acuerdo con criterios válidos y aceptados, como podría ser con base en: a) distribución textural por tamaño de partículas empleando el concepto de familia textural, b) los regímenes de humedad identificados y c) la profundidad (cm) disponible para el desarrollo normal del sistema de raíces. La medida procura mejorar la interpretación unificada y favorecer la extrapolación de resultados para fines tecnológicos, aportando elementos para informar sobre el estado de fertilidad de los suelos, considerando las ventajas, potenciales y limitaciones que intervienen y definen las estrategias de manejo a seguir.

Seguidamente se anotan algunos de los indicadores que participan de este importante componente decisorio, citando algunas limitantes y limitaciones generales que pueden afectar un determinado grupo de suelos o también operando a nivel intragrupal, como son:

- ❖ **Familia textural de suelos:** ya comentado con anterioridad.
- ❖ **Capacidad de uso de las tierras:** se corresponde con el grado óptimo de aprovechamiento que posee un área de terreno determinada, con base en la calificación de su aptitud, su capacidad y sus limitantes para producir caña de azúcar de manera forma sostenida y por períodos de tiempo prolongados. Consiste en un ordenamiento sistemático de carácter práctico e interpretativo, fundamentado en la aptitud natural que presenta el suelo para producir de manera variable, pues puede ser o no competitiva virtud de su condición.
- ❖ **Nivel freático:** factor determinante virtud del daño e impacto que provoca, pese al alto grado de tolerancia que posee el cultivo de la caña a la presencia de humedad en el suelo, como lo aseveran Unigarro *et al*

(2013), Cadet (2019), Montero *et al* (2020) y Chaves (2011, 2019c, 2020b). Es denominado y conocido también como tabla de agua, capa y manto freático. Se define como el nivel superior del agua existente en un acuífero o más correctamente como el lugar donde la presión del agua es igual a la de la presión atmosférica. Su determinación es fácil de operar mediante puntos de perforación.

- ❖ **Agrietamientos en profundidad:** vinculados con la existencia de propiedades vérticas asociados a la presencia de arcillas expandibles (Vertisoles), las cuales ocasionan rompimiento de raíces y pérdidas apreciables de agua de riego y nutrimentos.
- ❖ **Horizontes subsuperficiales argílicos y arcillosos:** por su superficialidad llegan a limitar la profundidad efectiva del suelo, la oxigenación, el desarrollo y expansión del sistema radical, impidiendo y/o retardando el desarrollo del cultivo. Se manifiestan por medio de la compactación de la capa arable y horizontes subsuperficiales del suelo, como lo ha señalado Chaves (2017bcd, 2019a, 2020gh), con muy fuerte afectación para el cultivo.
- ❖ **Encharcamientos en periodo de lluvias:** razones texturales asociadas con el alto contenido de arcillas, altos niveles de precipitación y condiciones de baja permeabilidad conducen y se traducen en altas saturaciones de humedad en el medio que limitan la oxigenación y la asimilación de N-K, restringiendo el crecimiento y desarrollo normal del cultivo con afectación directa del tonelaje.
- ❖ **Limitaciones químicas asociadas con estados de alta acidez y baja fertilidad:** condiciones propias, características y tipificantes de suelos degradados e improductivos (Chaves 2020e). La ubicación espacial de la plantación en el terreno es en definitiva muy importante y determinante para el éxito productivo.
- ❖ **Manejo del cultivo:** va ligado a factores como son la variedad cultivada, sistema de riego empleado (lámina, caudal, frecuencia), sistema de drenaje operado, sistema de preparación del suelo, subsolado, labranza y manejo en ciclo de retoños, forma de siembra y colocación de la semilla (fondo del surco, lomo, escalera), programas específicos de fertilización (fuente, dosis, época, forma), uso de enmiendas, abonos orgánicos y biofertilizantes, control de malas hierbas, entre otras prácticas y labores.

- E.) **Variables climáticas:** para la estimación correcta, representativa, válida y aceptada de las variables e indicadores mencionados anteriormente, es necesario contar con información básica que la genere, entre la cual la citada abajo resulta para el caso nacional fundamental virtud de las significativas diferencias que existen entre las diferentes regiones y entornos de producción nacional (Figura 5) generadoras de estrés, como lo demostraran Rojas (1982), Levitt (1972), Chaves *et al* (2018), Chaves y Chavarría (2021ab), Chaves (2011, 2017ac, 2018, 2019bde, 2020abcij, 2021ab, 2022fg), Chaves y Barquero (2020), Calderón y Chaves (2020), Barrantes y Chaves (2020) y Angulo *et al* (2020), entre muchos otros.



Figura 5. Condiciones agroecológicas y de cultivo de la caña en Costa Rica son muy heterogéneas.

Para la obtención y disponibilidad de esa información de manera confiable, representativa y con aseguramiento de su calidad, es necesario contar inexcusablemente con Estaciones Meteorológicas Clase A ubicadas estratégicamente en puntos geográficos donde representen con veracidad las condiciones de clima del lugar. En el caso nacional este condicionamiento y requisito es incuestionable e inaceptable de satisfacer, considerando la enorme heterogeneidad y significativa variabilidad presente en los lugares donde se produce comercialmente caña para fabricar azúcar. Cada variable y elemento del clima debe tener y contar con una serie de datos suficientemente desagregada (no apenas promedio mensual) no menor a 10 años.

Los indicadores del clima necesarios recabar como insumos de trabajo son los siguientes:

- ❖ Lluvia (mm): volumen total, frecuencia, máxima y promedio diario y mensual. Eventos extremos.
- ❖ Temperaturas (°C): máxima, media, mínima y amplitud entre máxima y mínima diarias y mensual.
- ❖ Radiación (MJ/m<sup>2</sup>) y brillo solar (Horas y décimos): como exponentes de la luz son funcionales para estimar actividad fotosintética.
- ❖ Evaporación (mm): necesaria en la estimación de evapotranspiración y Balance Hídrico.
- ❖ Viento (km/hr): dirección, velocidad máxima y promedio diario y mensual es importante como inductor de estrés (Levitt 1972, Chaves 2020c).

F.) **Variables agronómicas**: no puede por razones obvias prescindirse de la información productiva de campo, razón por la cual los antecedentes de entregas por lote, unidad productiva y variedad resultan muy valiosos y utilitarios. Por este motivo es valioso contar con datos confiables sobre:

- ❖ Limitantes a la producción: identificar las principales limitantes y problemas naturales o inducidos que aquejan la unidad productiva y se considera intervienen o pueden en su caso incidir sobre los rendimientos agroindustriales y la producción (Chaves 2015, 2022a-def).
- ❖ Índice de madurez: virtud de la sensibilidad y relevancia que posee la sacarosa contenida en los tallos de la planta (kg/t caña) y como determinante del rendimiento agroindustrial, valorado por las toneladas métricas de azúcar fabricadas por hectárea (t/ha), es conveniente y necesario contar con valores del Índice de Madurez por variedad y unidad productiva.
- ❖ Rendimientos agrícolas e industriales por zona y localidad: es igualmente importante contar con datos confiables de rendimientos agrícolas referidos al lugar, finca y lote específico de producción, lo que facilitara al cotejarlo con el resto de la información generar, proyectar y predecir una posible productividad potencial; pudiendo asimismo en contrario, fundamentar las posibles razones que los limitan.
- ❖ Índice de producción potencial: basado en potenciales de productividad y conociendo la dimensión del área (ha) involucrada, pueden proyectarse con probabilidad y base técnica confiable, posibles producciones futuras de caña y azúcar.

Si la información anterior no se encuentra dispuesta y disponible debe entonces necesariamente generarse y elaborarse para poder proceder con la adaptación del modelo de zonificación agroecológica deseado.

### Esfuerzo nacional

En una interesante y valiosa publicación operada y desarrollada de manera específica para la caña de azúcar, Rojas (1982) y Rojas y Eldin (1983) exponen el progreso y resultados de una propuesta de zonificación exclusiva para Costa Rica, empleando un esquema metodológico y marco teórico propuesto por el IICA, desagregado secuencialmente en las siguientes siete etapas:

- **Primera Etapa: Definición de los requerimientos agroecológicos del cultivo**: se determinan en esta fase en forma un tanto teórica los requerimientos ecológicos y biológicos de la caña de azúcar, proyectados y evaluados según la información disponible a la región de origen de la especie (*Saccharum* en este caso), las regiones agrícolas de proyección mundial, las regiones donde la experiencia con el cultivo ha fracasado, se procede asimismo con la evaluación de índices generados a partir de trabajos experimentales sobre requerimientos agroclimáticos. Se busca determinar entre valores extremos el agroclima conveniente de la especie cultivada, lo que permite clasificar y establecer, expresan, diferencias y analogías.
- **Segunda Etapa: Estimación de elementos meteorológicos para el área de estudio**: busca conocer e inventariar la cantidad, densidad, distribución y calidad de los recursos meteorológicos disponibles en el lugar, manifestado con la existencia de Estaciones de medición y registro. Permite la toma oportuna de decisiones sobre la disponibilidad de información para el análisis esperado.
- **Tercera Etapa: Utilización del análisis frecuencial de lluvias para la determinación de los periodos de cultivo**: propone una nueva metodología de estimación que sustituye la técnica del tradicional balance mensual de agua en el suelo, empleando en este caso probabilidades de ocurrencia en vez de promedios para la estimación del balance en relación con la evapotranspiración (ETP) del periodo considerado. Permite identificar las épocas con mayor probabilidad de ocurrencia de lluvia, como también los de sequía.
- **Cuarta Etapa: Definición del Índice Potencial de Producción y del Índice Climático de Madurez**: procura



integrar y relacionar discrecionalmente las diferencias lógicas y naturales presentes en el ciclo biológico natural del cultivo, referentes a las fases de crecimiento y producción de caña medida en toneladas (t/ha) y la fase final de maduración y concentración de sacarosa en los tallos medida en kilogramos (kg/t), para lo cual se emplean dos indicadores diferentes para su estimación. Uno conocido como “**Índice de Producción Potencial (IPP)**” que relaciona mediante una ecuación las variables de clima (radiación solar y temperatura del aire) con los procesos biológicos determinantes de la producción neta de biomasa (fotosíntesis y respiración), manteniendo un presunto buen abastecimiento de agua y nutrientes. El “**Índice Climático de Madurez**” explica por su parte mediante el empleo de una ecuación de cálculo, los rendimientos de fábrica, considerando las temperaturas máxima-mínima y su variación diurna las cuales provocan un efecto positivo sobre los rendimientos industriales; en tanto que las lluvias registradas en el lapso de los dos meses previos a la cosecha tienden a reducir los rendimientos.

- **Quinta Etapa: Análisis de variables fisioedáficas:** a partir del conocimiento previo de los requerimientos edáficos dictaminadas en la Primera Etapa y las mejores prácticas de cultivo (riego, drenaje, fertilización, mecanización, etc.) por implementar, se analiza mediante criterio de jerarquización de aptitud la información disponible sobre asuntos topográficos y edáficos del territorio y unidad productiva a zonificar. Los documentos más usados son los cartográficos, los mapas de capacidad de uso de la tierra o de uso potencial de la misma.
- **Sexta Etapa: Síntesis cartográfica:** corresponde a la superposición y síntesis sucesiva de los mapas elaborados en la etapa anterior; discriminando aquellas áreas del territorio a zonificar que estén consideradas y consignadas por el Índice Potencial de Producción y/o por el mapa de variables fisioedáficas. En esta fase se identifican las zonas y áreas aptas y con aptitud y capacidad para producir, o no, caña en condiciones competitivas.
- **Séptima Etapa: Presentación de resultados:** corresponde a la elaboración y confección final de los mapas con sus correspondientes interpretaciones, inferencias y conclusiones; incluyendo el material cartográfico, complementado con los textos y leyendas correspondientes que fundamentan todo el estudio.

Mediante dicho trabajo, los autores lograron identificar, analizar, interpretar y proponer cinco regiones productoras de caña en el país, compuestas por zonas climáticas bien definidas, declaradas como sigue:

**Región 1: Valle Central:** presenta dos zonas climáticas: a) al noreste de la región y b) al suroeste de la región caracterizadas por contar con un buen potencial agroclimático la primera y un clima poco favorable para el cultivo de caña, la segunda.

**Región 2: Pacífico Norte:** presenta condiciones de clima muy favorables para la concentración de sacarosa, pudiendo prolongar la zafra sin afectación de los azúcares recuperables. La producción de caña se ve limitada y afectada por el clima (canícula), lo que torna indispensable el riego suplementario para completar las etapas de crecimiento y formación de materia seca. Actualmente se corresponde con las regiones de Guanacaste y Pacífico Central.

**Región 3: Pacífico Sur:** identifica unidades agroproductivas con muy buenas condiciones para el desarrollo del cultivo.

**Región 4: Atlántica:** la zona costera no es recomendable para sembrar caña por ausencia de un periodo seco necesario para inducir la acumulación de sacarosa en la planta. En la parte alta de la región el cultivo puede desarrollarse y producir caña, aunque la concentración de sacarosa se ve limitada por contar con un periodo seco muy corto que afecta la maduración, lo que obligaría limitar el periodo de zafra a 2-3 meses. Las concentraciones, presume el estudio, serán en esta zona inferiores a la observada en otras zonas. La denominada región baja va referida a localidades de la provincia de Limón y la zona alta a Turrialba y Juan Viñas, entre otras.

**Región 5: Subvertiente Norte:** las condiciones prevalecientes son muy similares a las de la zona alta del Atlántico; anotando que sin embargo posee zonas mejores localizadas en la parte noreste de la subvertiente donde se podrán obtener mejores rendimientos. Asociada con la zona media y alta de San Carlos.

Queda demostrado con todo lo anterior que el levantamiento de un Sistema de Zonificación Agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar no es una labor sencilla, pues está por el contrario constituida, intervenida y estructurada a partir de mucha información muy técnica y especializada que se integra en otra más compleja.

**Productividad agroindustrial**

Este tópico ha sido, es y será por circunstancias de prioridad, trascendencia y razones estratégicas, siempre uno de los asuntos y tópicos que concentran la atención y mayoría de los esfuerzos técnicos y administrativos de cualquier iniciativa, emprendedurismo y/o esfuerzo empresarial desarrollado; sin importar la magnitud y naturaleza de este, virtud de las implicaciones y alcances que tiene para la satisfacción y cumplimiento cabal de las metas y objetivos planteados y esperados obtener. Es en los rendimientos de campo y fábrica donde convergen, concentran y visualizan la razón y motivo de las mejoras incorporadas por el productor-empresario a un determinado sistema de producción en lo comercial, productivo, económico, laboral y ambiental.

Con toda la información recabada disponible y también la generada por medio del ejercicio técnico desarrollado, el conocimiento que se llega a tener de un determinado sitio de producción resulta ser muy amplio y detallado, lo que favorece poder establecer y proyectar con buen criterio y certeza, posibles niveles de productividad adecuados a cada sistema de manejo y ambiente agroproductivo. Esta importante ventaja debe ser institucionalmente aprovechada y capitalizada realizando investigación particularizada, direccionada y acondicionada a esas circunstancias específicas, de manera que genere “paquetes tecnológicos” delimitados. Por ejemplo, en materia de variedades se deben realizar investigaciones en sitios de selección bajo la metodología de **Agricultura Específica de Sitio o Precisión (AEPS)**, que logren diseñar “**curvas de isoproductividad**” aplicables para cada zona agroecológica.

### Zonas Agroecológicas: producto final

Como producto de toda la gestión y esfuerzo técnico-administrativo y financiero desarrollado por un determinado sector, se llega a contar al final de la gestión con la identificación particularizada de diferentes zonas agroecológicas, cuyo número va en función directa del grado de heterogeneidad que prevalezca en los ambientes de producción existentes en el país (Figura 6), y también, del nivel de especificidad fijado y previsto por el estudio. Por ejemplo, en el caso de Colombia (Carbonell *et al* 2011), se identificaron en su cuarta aproximación realizada en el 2010 al desarrollar la zonificación agroecológica para las 212.200 hectáreas de caña de azúcar cultivada en el Valle del Río Cauca, un total de 156 zonas agroecológicas, lo que magnifica por un lado el grado de

detalle alcanzado, y por otro, la variabilidad ambiental presente en el lugar. Dichas zonas obedecen a la combinación de las coberturas temáticas expuestas por el ordenamiento de las tierras en Grupos de Humedad y Grupos Homogéneos de Suelos.



La notación de la distribución de resultados en clases, rangos y grupos generados en cada etapa de estudio y desarrollo de la zonificación se presenta en una nomenclatura expresada en forma de letras, abreviaturas e índices numéricos que permiten concentrar y colocar una amplia cantidad de información referente en una forma simple, comprensible y relativamente fácil de comprobar y verificar en documentos anexos. Esa nomenclatura se anota y expresa por ejemplo como 12H4 y 3H0, donde H indica la condición presente referida al Grupo de Humedad, y los numerales 12 y 3 describen el Grupo Homogéneo de Suelos asociado; en tanto que, H4 y H0 corresponden a los Grupos de Humedad identificados, respectivamente.

Cada unidad productiva es posible ubicarla territorialmente de manera particular mediante el uso de coordenadas geográficas por medio de un Sistema de Información Geográfica (SIG) apropiado, conteniendo toda la información complementaria generada en la amplia documentación temática y cartográfica creada, correspondiente a limitaciones y potenciales edafoclimáticas, recomendaciones de manejo agronómico, entre otras. Por medio del SIG es posible automatizar los procesos de captura de datos, almacenamiento, análisis, actualización, manejo de información, publicación y consulta de los mismos. Como es comprensible entender, para la realización de los análisis de información implicados se utilizan

técnicas y herramientas de tecnología informática, bases de datos geográficos y datos de contenido estadístico y probabilístico.

### ¿Por qué es importante implementar la zonificación en el cultivo de caña?

Son muchas y muy diversas las ventajas atribuidas a la zonificación agroecológica aplicada al cultivo de la caña de azúcar, como son entre otras las siguientes:

- 1) La zonificación agroecológica es considerada una herramienta multifuncional que contribuye científicamente en la gestión de proyectos de desarrollo de tierras a escala predial, local y regional (Carbonell *et al* 2011).
- 2) Reduce el grado de incertidumbre, además de cuantificar y minimizar el nivel de riesgo implícito en la toma de decisiones.
- 3) Sus resultados son básicos y muy utilizados por la Agricultura Específica por Sitio (AEPS) o Precisión.
- 4) Permite identificar, recabar, ordenar y ponderar en grado importante los indicadores bióticos y abióticos que inciden en la actividad productiva del cultivo a nivel geográfico.
- 5) El sistema hace un aprovechamiento pleno de la información geográfica, geoestadística, cartográfica y bases de datos disponibles, si existieran; caso contrario hay que generarlos.
- 6) Posibilita clasificar las zonas cañeras nacionales con base en sus características edáficas, geológicas, climáticas, hidrológicas, biológicas, varietales y fitosanitarias categorizándolas en: satisfactorias, regulares y marginales.
- 7) La metodología empleada contribuye ostensiblemente con la gestión de innovación tecnológica, al aportar selectivamente una visión predial y grupal indispensable para lograr una aproximación más congruente de las zonas identificadas y las condiciones reales que enfrentan los productores de caña de azúcar en el campo.
- 8) La zonificación agroecológica favorece la toma correcta y oportuna de decisiones estratégicas.
- 9) Favorece, promueve e induce un uso óptimo de los recursos disponibles reduciendo los costos asociados, elevando adicionalmente el grado de rentabilidad y competitividad de la gestión empresarial desarrollada.
- 10) Permite concluir con base técnica bien fundada dónde es ideal producir y dónde no es recomendable sembrar caña.
- 11) Ofrece una perspectiva confiable y con muy buena aproximación y grado de detalle de las áreas y localidades geográficas con alto, medio y bajo potencial de productividad agrícola e industrial.
- 12) Permite inferir discrecionalmente sobre la influencia que poseen determinados factores bióticos y abióticos sobre el desarrollo y los rendimientos agroindustriales del cultivo.
- 13) Viabiliza decidir con base técnica sobre: a) meses más apropiados para preparar suelos, sembrar y cosechar plantaciones, b) duración del ciclo vegetativo y sus fases, c) la elección de las variedades más apropiadas y resilientes por su capacidad de adaptación y potencial productivo y d) favorecer la producción de biomasa, la captación de radiación solar y la eficiencia fotosintética de la planta como inductores de la productividad.
- 14) Identifica factores de estrés para el cultivo.
- 15) Favorece poder diseñar e implementar programas fitosanitarios preventivos mediante acciones de “alerta temprana”.
- 16) Facilita el diseño y la implementación de programas orientados a promover la conservación de los recursos naturales (hídricos, edáficos, biodiversidad) en el campo (Chaves 2020f).
- 17) La información generada es de gran valor para operar y direccionar programas de crédito como también de aseguramiento de plantaciones y cosecha.
- 18) Aporta elementos para alcanzar la ecoeficiencia y la eco-competitividad de la empresa cañera.
- 19) Contribuye de forma significativa la gestión de planes y programas de desarrollo socioeconómico, tecnología y asignación de crédito.

### Aplicaciones de la zonificación agroecológica

Como se anotó en el punto anterior son muchas y muy variadas las ventajas, contribuciones y aportes que ofrece la acertada decisión sectorial de diseñar, formular e implementar una iniciativa tecnológica basada en la zonificación agroecológica; entre las cuales indudablemente la más importante es llegar a conocer la realidad actual, y adicionalmente, proyectar el potencial y aptitud que posee una determinada región, zona, localidad o sección territorial para producir o no caña de azúcar en grados rentables y competitivos.



Contar con este valioso y efectivo instrumento tecnológico favorece y habilita la posibilidad de implementar y operar con buen suceso y amplia expectativa de éxito una estrategia de Agricultura Específica de Sitio o Precisión (AEPS), como es también conocida. La zonificación agroecológica constituye y representa sin duda un elemento fundamental para la formulación de planes, programas y proyectos de investigación, desarrollo productivo y mejora tecnológica, validación y transferencia de tecnología.

La feliz y oportuna iniciativa del sector cañero-azucarero nacional de implementar y desarrollar próximamente una NAMA en el cultivo de la caña de azúcar en el país (Chaves 2021c, 2022bcd; LAICA 2022ab), exige, compromete e impone la imperiosa necesidad de formular y contar con una plataforma de zonificación agroecológica que habilite y permita desarrollar una AEPS como estrategia efectiva para optimizar recursos, potenciar capacidades y eficientizar los factores vinculados con la productividad agroindustrial operada en las unidades agroproductivas vinculadas, todo dentro de un marco de ecoeficiencia, eco-competividad y sostenibilidad.

### Conclusión

La zonificación agroecológica es incuestionablemente una importante, interesante, moderna y muy necesaria herramienta tecnológica que permite planificar el mejor uso de la tierra y sus recursos, en función de la aptitud, capacidad, potencial y nivel productividad de los cultivos. Constituye un instrumento necesario para avanzar con las acciones institucionales que procuran incorporar el desarrollo sostenible a nivel regional y local, por cuanto ofrece un marco de referencia ordenado para el empleo óptimo y justo de los factores y elementos biofísicos de largo plazo que caracterizan la capacidad de uso, la aptitud productiva y vocación agrícola de las tierras dedicadas o con potencial para ser empleadas en la producción de caña para fabricar azúcar. Por medio de la zonificación agroecológica es posible reducir en grado importante la incertidumbre climática que aqueja muchas regiones y zonas productoras; además de favorecer la cuantificación del nivel de riesgo implícito en la gestión empresarial desarrollada minimizando sus impactos mediante la toma correcta y oportuna de decisiones.

En la actualidad son muy pocos y limitados los estudios desarrollados en el país sobre esta materia, quedando apenas en la teoría la mayoría de las propuestas formuladas en esa

dirección. En el caso particular de la caña de azúcar el sector nacional solo cuenta con un esfuerzo real de formular una iniciativa con proyección pragmática, como es la diseñada por Rojas (1982) y Rojas y Eldin (1983); la cual es sin embargo insuficiente para satisfacer las necesidades actuales del cultivo en esta materia. El sector azucarero costarricense no cuenta en la actualidad con un mapa de zonas agroecológicas que recoja y discrecionalmente ordene, homologue las profundas diferencias ecológicas que como está demostrado existen entre las mismas y convenientemente las clasifique.

El país y el sector cuentan sin embargo en algunas localidades, no en todas, con importante información sobre suelos, clima, fisiografía, variedades y manejo agronómico de plantaciones, entre otros, que permiten poder hacer una primera aproximación a este sistema, la cual puede y debe con el tiempo mejorarse y perfeccionarse hasta lograr un producto final satisfactorio; ese debe ser insoslayablemente el desafío institucional y la meta técnica por desarrollar y procurar satisfacer en el corto-mediano plazo. Es posible, mediante la utilización de un sistema de información geográfica (SIG), generar un mapa de zonas agroecológicas, con el fin de conocer si existe concordancia entre estas asociaciones y las zonas de mayor productividad de los cultivos.

Referirse y tratar de justificar las importantes e incuestionables ventajas que ofrece poder contar con una zonificación agroecológica en el sector cañero-azucarero costarricense, resulta innecesario y la verdad vano y hasta trivial, pues las diferencias geográficas y biofísicas prevalecientes son evidentes e incuestionables razonadas y sustentadas en la enorme variabilidad, heterogeneidad y disonancia que prevalece y domina las seis regiones e innumerables ambientes donde se produce actualmente caña de azúcar en Costa Rica.

En lo inmediato, las organizaciones que componen y orientan los destinos del sector azucarero costarricense, como son LAICA, FEDECAÑA, Ingenios Azucareros y DIECA como instancia líder en materia técnica, deben buscar con el valioso apoyo de la academia, MAG, MINAE, INTA, CENICAÑA de Colombia y CENGICAÑA de Guatemala a nivel externo, formular un programa visionario de trabajo destinado a generar una primera aproximación de lo que constituye una zonificación agroecológica.

En lo inmediato es imperativo iniciar con la valoración de posibilidades de actuar y accionar, en: 1) ubicar, instalar

estratégicamente y articular la operación de una Red Meteorológica Clase A en toda el área cañera nacional, 2) organizar y realizar un estudio representativo y semidetallado (o detallado) de suelos, 3) recolectar, ordenar y analizar toda la información de calidad existente en materias edáfica, climática, geológica, hidrológica y edafológica, 4) conformar unidades relativamente homogéneas de suelos, familias texturales, ambientes climáticos y capacidad de uso de las tierras cultivadas con caña de azúcar, 5) desarrollar estudios de Balance Hídrico con proyección regional, 6) conformar Grupos de Humedad en el suelo, 7) recabar y ordenar datos detallados, ponderados y representativos de productividad agrícola (t de caña/ha), industrial (kg de azúcar/t caña) y agroindustrial (t de azúcar/ha) ubicados por lote, región y variedad, 8) identificar las variedades de caña cultivadas comercialmente en el lugar y 9) recolectar antecedentes e información variada sobre manejo agronómico de plantaciones comerciales. Esas son apenas algunas de las acciones que deben operarse para alcanzar en una primera aproximación el objetivo pretendido y deseado.

En una verdad incuestionable e insoslayable, si la agroindustria azucarera nacional pretende, como es un hecho real y conocido, aspirar a lograr grados elevados y sustentables de competitividad en los ámbitos nacional e internacional; debe imperativa y obligadamente acceder a crear y operar una estructura productiva y tecnológica en esa dirección, caso contrario, cualquier esfuerzo será aislado, efímero, insuficiente, de bajo impacto y poco sostenible en el tiempo. El diseño, elaboración e implementación de una zonificación agroecológica de factores y recursos operados a nivel regional y local resulta estratégica para satisfacer ese objetivo, caso contrario la gestión mantendrá un alto, indeseable e inconveniente grado de improvisación, incertidumbre y riesgo. No acceder al ordenamiento y trabajo por sistemas agroproductivos es mantenerse en la tradicional y poco eficiente agricultura convencional que pocos espacios de crecimiento ofrece.

#### Literatura citada

Alexander, AG. 1973. **Sugarcane Physiology**. Amsterdam: Elsevier. Scientific Publishing Company 752 p.

Alpizar Vaglio, E. 2014. **Zonificación agroecológica del café (*Coffea arabica*) y el cacao (*Theobroma cacao*, Lin) en Costa Rica, mediante el sistema de zonas de vida**. Cartago, Costa Rica. Trabajo Final de Graduación. Área Académica

Agroforestal, Programa de Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 98 p.

Alvim, P. de T. 1962. **Los Factores de la productividad agrícola**. Boletín IICA, Lima, Perú. 20 p.

Angulo Marchena, A.; 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.

Cadet Piedra, E. 2019. **Caracterización, sintomatología y respuesta de la caña de azúcar al estrés por déficit hídrico**. Boletín. Agroclimático (Costa Rica) 1(14): 5-7, octubre.

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.

Carbonell González, J.A.; Quintero Durán, R.; Torres Aguas, J.S.; Osorio Murillo, C.A.; Isaacs Echeverri, C.H., Victoria Kafure, J.I. 2011. **Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el Valle del Río Cauca (cuarta aproximación). Principios metodológicos y aplicaciones**. Cali, Colombia, CENICAÑA, Serie Técnica N° 38. 119 p.

Castro, RCP. 2016. **STAB - Fisiología Aplicada a Cana-de-Açúcar**. Piracicaba, São Paulo. STAB – Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil. Regional Sul. 208 p.

Castro, P.R.C.; Angelini, B.G. 2017. **Fatores Ecológicos**. STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos, Janeiro/fevereiro Vol. 35 N° 3. p: 16-17.

Chaves Solera, M.A. 1988. **Efeito de Relações Ca:Mg, utilizando Carbonatos e Sulfatos, sobre o crescimento e a nutrição mineral da cana-de-açúcar**. Tesis Magister Scientiae. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 186 p.

Chaves Solera, M. 2011. **Impacto de las lluvias y las inundaciones sobre la caña de azúcar en Costa Rica**. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, setiembre. 14 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.; Chavarría Soto, E. 2017a. **Aproximación taxonómica y territorial de los suelos sembrados con caña de azúcar en Costa Rica. I. ORDENES DE SUELO.** San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, mayo. 55 p.
- Chaves Solera, M.A.; Chavarría Soto, E. 2017b. **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. 2017a. **¿Dónde se produce territorialmente la caña con que se fabrica el azúcar en Costa Rica?** Revista Entre Cañeros N° 8. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, marzo. p: 6-26.
- Chaves Solera, M.A. 2017b. **Taxonomía de los suelos sembrados con caña de azúcar en Costa Rica: Ordenes y Subordenes presentes.** En: Congreso de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 21 y Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Honduras (ATAHON), 20, San Pedro Sula, Honduras, 2017. Memorias. San Pedro Sula, Honduras, ATACA/ATAHON, agosto 22 al 25, Centro de Convenciones Copantl. 14 p.
- Chaves Solera, M.A. 2017c. **Suelos, nutrición y fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica.** En: Seminario Internacional Producción y Optimización de la Sacarosa en el Proceso Agroindustrial, 1, Puntarenas, Costa Rica, 2017. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), octubre 10 al 12, Hotel Double Tree Resort by Hilton. 38 p.
- Chaves Solera, M.A. 2017d. **La compactación de suelos en la caña de azúcar.** Revista Entre Cañeros N° 9. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, diciembre. p: 33-48.
- Chaves Solera, M.A.; Bermúdez Acuña, L.; Méndez Pérez, D.; Bolaños De Ford, F. 2018. **Medición de los indicadores de calidad de la materia prima procesada por los Ingenios azucareros de Costa Rica durante el Periodo 2004-2016 (13 zafras).** En: Seminario Internacional Producción y Optimización de la Sacarosa en el Proceso Agroindustrial, 2, Puntarenas, Costa Rica, 2018. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), junio 5 al 7, Hotel Double Tree Resort by Hilton. 75 p. *También en:* Congreso Tecnológico DIECA 2018, 7, Colegio Agropecuario de Santa Clara, Florencia, San Carlos, Alajuela, Costa Rica. Memoria. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), 29, 30 y 31 de agosto del 2018. 75 p.
- Chaves Solera, M.A. 2018. **Genética aplicada a la mejora de las plantaciones comerciales de caña de azúcar.** En: Congreso Tecnológico DIECA 2018, 7, Colegio Agropecuario de Santa Clara, Florencia, San Carlos, Alajuela, Costa Rica. Memoria Digital. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), 29, 30 y 31 de agosto del 2018. 43 p.
- Chaves Solera, M.A. 2019a. **Humedad y compactación de suelos en la caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1(6): 4-6, junio-julio.
- Chaves Solera, M.A. 2019b. **Clima y ciclo vegetativo de la caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1(7): 5-6, julio.
- Chaves Solera, M.A. 2019c. **Relación agua-suelo en la caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1(10): 5-7, agosto-setiembre.
- Chaves Solera, MA. 2019d. **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. 2019e. **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. **Estrés por calor en la caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(5): 5-12, marzo.



- Chaves Solera, M.A. 2020b. **Estrés hídrico en la caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(8): 5-16, abril.
- Chaves Solera, M.A. 2020c. **Estrés por viento en la caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(9): 4-15, abril.
- Chaves Solera, M.A. 2020d. **Atributos anatómicos, genético y eco fisiológicos favorables de la caña de azúcar para enfrenar el cambio climático.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(11): 5-14, mayo.
- Chaves Solera, M.A. 2020e. **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. 2020f. **Clima y erosión de suelos en caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(16): 7-16, agosto.
- Chaves Solera, M.A. 2020g. **Clima, suelo y manejo: factores determinantes en la compactación de los suelos.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(20): 5-15, setiembre.
- Chaves Solera, M.A. 2020h. **Sistema radicular de la caña de azúcar y ambiente propicio para su desarrollo en el suelo.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(13): 6-18, junio. *También en:* Revista Entre Cañeros N° 17. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, setiembre. p: 51-71.
- Chaves Solera, M.A. 2020i. **Agroclimatología y producción competitiva de caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(24): 5-13, noviembre.
- Chaves Solera, M.A. 2020j. **Ambientes climáticos y producción competitiva de la caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(26): 5-12, diciembre-enero.
- Chaves Solera, M.A.; 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: Norte.** San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, diciembre. 135 p.
- Chaves Solera, M.A.; Chavarría Soto, E. 2021a. **Distribución geográfica de las plantaciones comerciales de caña de azúcar en Costa Rica según altitud y localidad.** Revista Entre Cañeros N° 20. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, julio. p: 5-35.
- Chaves Solera, M.A.; Chavarría Soto, E. 2021b. **Estimación del área sembrada con caña de azúcar en Costa Rica según región productora. Periodo 1985 - 2020 (36 Zafras).** Revista Entre Cañeros N° 22. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, diciembre. p: 5-39.
- Chaves Solera, M.A. 2021a. **Indicadores históricos de producción y productividad de la agroindustria azucarera costarricense: análisis del periodo 1969-2019 (51 zafras).** Revista Entre Cañeros N° 19. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, marzo. p: 9-67.
- Chaves Solera, M.A. 2021b. **Estrés mineral y caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(11): 5-21, mayo.
- Chaves Solera, M.A. 2021c. **Condiciones del sector cañero-azucarero costarricense para implementar una NAMA: caracterización sectorial.** En: Seminarios de inducción y capacitación para el diseño y la formulación de la NAMA-Caña de azúcar. Organizados por la Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA), 26 noviembre. San José, Costa Rica. Presentación Electrónica en Power Point 97 láminas.
- Chaves Solera, M.A. 2022a. **Productividad agrícola de la caña de azúcar en Costa Rica según región productora. Periodo 2012 - 2020 (9 zafras).** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(4): 5-31, febrero-marzo.
- Chaves Solera, M.A. 2022b. **Acciones estratégicas para mitigar Gases con Efecto Invernadero (GEI) en la fase de producción primaria de la caña de azúcar en Costa Rica: recomendaciones y sugerencias pragmáticas.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(6): 5-27, marzo.

- Chaves Solera, M.A. 2022c. **NAMA como instrumento ambiental para mitigar Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la agricultura: el caso de la caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(10): 5-15, mayo.
- Chaves Solera, M.A. 2022d. **Retos tecnológicos de la agroindustria azucarera costarricense en procura de lograr la ecoeficiencia y la eco-competitividad comercial.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(12): 5-21, junio.
- Chaves Solera, M.A. 2022e. **Razones y circunstancias que motivan, determinan, potencian y condicionan el desarrollo y la adopción de tecnología en el cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(16): 11-36, agosto.
- Chaves Solera, M.A. 2022f. **Problemas y limitantes que condicionan y obstaculizan la gestión del productor independiente de caña de azúcar en Costa Rica: valoración e interpretación en el tiempo.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(18): 5-25, setiembre.
- Chaves Solera, M.A. 2022g. **Sistemas agrícolas de producción de caña de azúcar en Costa Rica: primera aproximación.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(20): 5-26, octubre.
- Chaves Solera, M.A. 2022h. **Muestreo de suelos agrícolas: aplicación a la caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(14): 5-22, julio.
- De Souza Días, H.; Días Kanthack, R.A. 2017. **Sugestões para um sistema aberto para classificação de ambientes de produção de cana-de-açúcar.** STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos, Março/abril Vol. 35 N° 4. p: 32-33.
- Dillewijn, C. Van. 1952. **Botany of Sugarcane.** Chronica Botánica Co. Waltham, Mass. Trad. Español Instituto del Libro. La Habana, Cuba. 460 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 1997. **Zonificación agro - ecológica: Guía general.** Boletín de suelos de la FAO N° 73. Roma, IT, FAO. 86 p. Consultado 28 octubre, 2022. *Disponible en:* <https://zdocs.mx/doc/zonas-agroecologicas-doc-de-la-fao-07p4n3n5526j>
- García, J. 1972. **Una contribución a la metodología de la zonificación ecológica de cultivos anuales.** Tesis, CATIE. Turrialba, Costa Rica. 155 p.
- Holdridge, L. 1982. **Ecología basada en zona de vida.** Trad. del inglés por Jiménez, H. Segunda reimpresión. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica. 216 p.
- LAICA. 2022a. **NAMA Caña de Azúcar Costa Rica.** Coordinado por Marco A. Chaves Solera y Zaida Solano Valverde. San José, Costa Rica. Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar-LAICA. 225 p.
- LAICA. 2022b. **NAMA Caña de Azúcar Costa Rica. Manual Descriptivo y Operativo del Piloto Nacional.** Coordinado por Marco A. Chaves Solera y Zaida Solano Valverde. San José, Costa Rica. Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar-LAICA. 104 p.
- Laird, R.J.; Turrent, A.; Volke H., V.; Cortés F., J.I. 1993. **La investigación en productividad de agrosistemas.** Cuaderno de Edafología 18. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México. 42 p.
- Levitt, j. 1972. **Responses of plants to environmental stresses.** 2<sup>nd</sup> ed. New York, San Francisco, London. Academic Press, Inc. 497 p.
- Magalhães, A.C.N. 1987. **Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta.** Em: Ecofisiologia da Produção Agrícola. Editado por Paulo Roberto C. Castro, Suzana Oellers Ferreira e Tsuioshi Yamada - Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p: 113-118.
- Montenegro Ballester, J.; Chaves Solera, M. 2011. **Contribución del sector cañero a la mitigación del cambio climático.** En: Congreso Azucarero Nacional ATACORI "M.Sc. Teresita Rodríguez Salas (+)", 18, Colegio de Ingenieros Agrónomos, San José, Costa Rica, 2011. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 8 y 9 de setiembre del 2011. 14 p. Conferencia Electrónica en Power Point. 54 láminas.
- Montero Marín, F.A.; Cadet Piedra, E.; Chaves Solera, M.; Gutiérrez Soto, M.V. 2020. **Análisis y graficación de los resultados sobre las respuestas fisiológicas de tres variedades de caña de azúcar sometidas a estrés por suelo**

- anegado.** Santa Gertrudis Sur, Grecia, Alajuela, Costa Rica. Informe Final de Pasantía. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). 14 p.
- Nasyrov, Y.S. 1978. **Genetic control of photosynthesis and improving of crop productivity.** Annual Review of Plant Physiology, palo alto, 29: 215-237.
- Rojas Mora, O. 1982. **Una contribución a la metodología de la Zonificación Ecológica de cultivos: Estudio agroclimático de la caña de azúcar en Costa Rica.** Tesis de Grado, Facultad de Agronomía, Escuela de Economía Agrícola, Universidad de Costa Rica. 130 p.
- Rojas, OE.; Eldin, M. 1983. **Zonificación Agroecológica para el Cultivo de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*) en Costa Rica.** San José, Costa Rica. IICA/LAICA. Serie Publicaciones Misceláneas N° 398. 112 p.
- SEPSA. 1987. **Metodología para la zonificación agroecológica y su aplicación al cultivo de la caña de azúcar.** San José, costa Rica: SEPSA. 72 p.
- SUGARCANE: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology.** 2014. edited by Paul H. Moore, Frederick C. Botha. New York: Ed John Wiley & Sons, Inc. Iowa USA. 693 p.
- Torres Aguas, J.S.; Carbonell González, J.A.; Ortiz Uribe, B.V.; Daza, O.H.; Cruz Valderrama, R.; Villegas Tascón, F. 2000. **Grupos de humedad para el manejo del cultivo en condiciones difíciles.** Cali, Colombia, CENICAÑA. Documento de trabajo N° 441. 16 p. (Presentado en Congreso colombiano de la Asociación de Técnicos de la Caña de Azúcar 5, cali, 4-6 oct., 2000).
- Unigarro Muñoz, C.A.; Victoria Kafure, J.I.; Checa Coral, O.E. 2013. **Evaluación del área de aerénquima radical en caña de azúcar (*Saccharum spp.*) como característica de tolerancia a hipoxia.** Acta agronómica 62(3): 223-231.
- USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). 2014. **Claves para la taxonomía de suelos (en línea).** 12 ed. Washington, D. C., Estados Unidos, NRCS. Consultado 15 jul. 2017. Disponible en: [http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs142p2\\_051546.pdf](http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf)
- Weiss Díaz, J. 2002. **Caña de Azúcar.** En. Zonificación agroecológica de diferentes tipos de uso de la tierra. San José, Costa Rica. INTA-MAG, mayo. p: 20-24.

Recuerde que puede acceder los boletines en  
[www.imn.ac.cr/boletin-agroclima](http://www.imn.ac.cr/boletin-agroclima) y en  
[www.laica.co.cr](http://www.laica.co.cr)