

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

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

IMN

www.imn.ac.cr
2222-5616

Avenida 9 y Calle 17
Barrio Aranjuez,

Frente al costado Noroeste del Hospital Calderón Guardia.
San José, Costa Rica

LAICA

www.laica.co.cr
2284-6000

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

TENDENCIA SEMANAL PARA LAS REGIONES CAÑERAS EN AGOSTO 2024

Se prevé que las regiones productivas Guanacaste y Valle Central mantendrán la condición de canícula durante la primera semana de agosto. El siguiente cuadro detalla semana a semana lo esperado para el mes en curso en cada región cañera.

Región cañera	Semana: 5-11	Semana: 12-18	Semana: 19-25	Semana: 26 ago - 1 set
Guanacaste (Este y Oeste)	Lluvia normal Cálido Viento normal	Lluvia normal Temperatura normal Ventoso	Lluvia normal Temperatura normal Viento normal	Lluvia normal Cálido Viento normal
Puntarenas	Lluvia normal Cálido Viento normal	Lluvia normal Cálido Ventoso	Lluvia normal Cálido Viento normal	Lluvia normal Cálido Viento normal
Región Sur	Lluvia normal Cálido	Lluvia normal Cálido Ventoso	Lluvia normal Cálido	Lluvia normal Cálido
Región Norte	Lluvia normal Cálido Viento normal	Lluvia normal Cálido Ventoso	Seco Muy cálido Viento normal	Seco Muy cálido Viento normal
Valle Central (Este y Oeste)	Lluvia normal Cálido Viento normal	Lluvia normal Cálido Ventoso	Lluvia normal Cálido Viento normal	Lluvia normal Muy cálido Viento normal
Turrialba (Alta y Baja)	Lluvia normal Cálido Viento normal	Lluvia normal Cálido Ventoso	Lluvia normal Muy cálido Viento normal	Seco Muy cálido Viento normal

“Onda tropical #24 favoreciendo lluvias el 12-13 de agosto; mientras OT# 25 (Tormenta Tropical Ernesto) no se prevé que afecte el país. Con presencia de polvo Sahariano entre 15-16 y 18 de agosto.”

CONDICIONES DEL MES PREVIO: JULIO 2024

Durante el mes de julio la **Guanacaste (Este y Oeste)** evidenció la intermitencia de la canícula, con días lluviosos y días prácticamente secos; ráfagas 8-21 m/s; amplitud térmica 5-10 °C y radiación solar 13-22 Mj/m² y evapotranspiraciones 3-5 mm; acumulando 340-371 °C grados día. **Puntarenas** mostró cinco días con lluvia diaria superior a 25 mm; ráfagas 5-11 m/s, amplitud térmica 4-8 °C y radiación solar 14-20 Mj/m² y evapotranspiraciones 3-5 mm; acumulando 390 °C grados día. **Región Sur** presentó diecinueve días con lluvia inferior a 10 mm; ráfagas 6-11 m/s; amplitud térmica 5-9 °C y radiación solar 14-19 Mj/m² y evapotranspiraciones 3-4 mm; acumulando 247 °C grados día. **Región Norte** seis días con lluvia superior a 25 mm; ráfagas 6-15 m/s, amplitud térmica 3-9 °C y radiación solar 12-21 Mj/m² y evapotranspiraciones 3-5 mm; acumulando 337 °C grados día.

Valle Central mostró la intermitencia de la canícula, con días lluviosos y días prácticamente secos; ráfagas 8-18 m/s, amplitud térmica 5-10 °C y radiación solar 14-19 Mj/m² y evapotranspiraciones 3-4 mm; acumulando 238 °C grados día. **Región Turrialba** exhibió dieciséis días con lluvia diaria inferior a 10 mm; ráfagas 7-14 m/s, amplitud térmica 3-8 °C y radiación solar 11-19 Mj/m² y evapotranspiraciones 2-4 mm; acumulando 190 °C grados día.

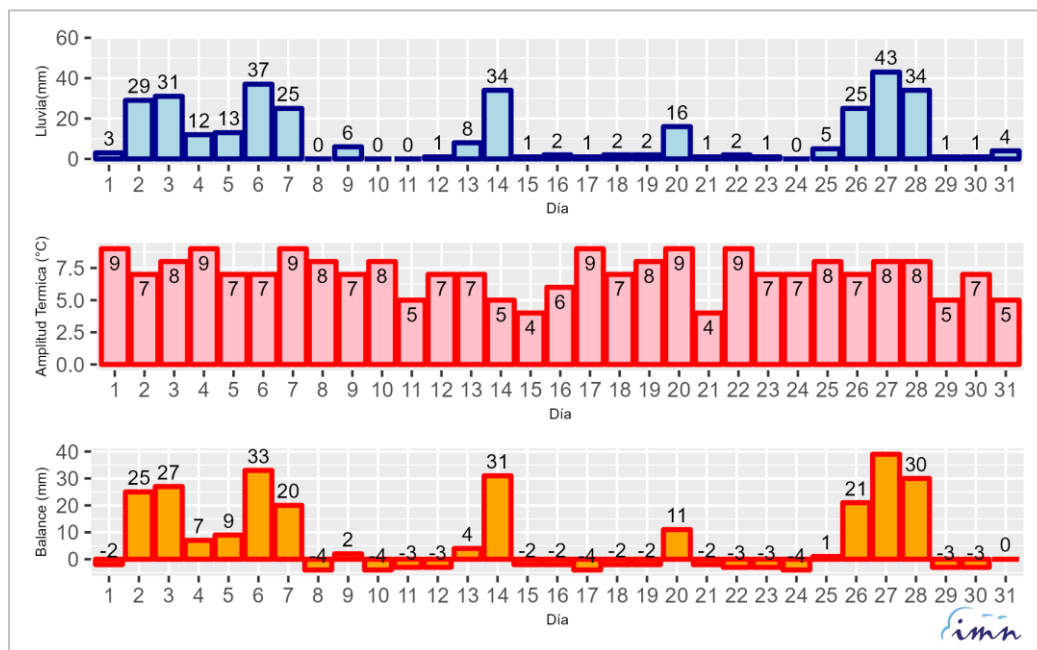


Figura 1.a. Promedio regional diario de precipitación (mm), amplitud térmica (°C), balance hídrico (mm) para julio 2024 en la región cañera **Guanacaste Este**.

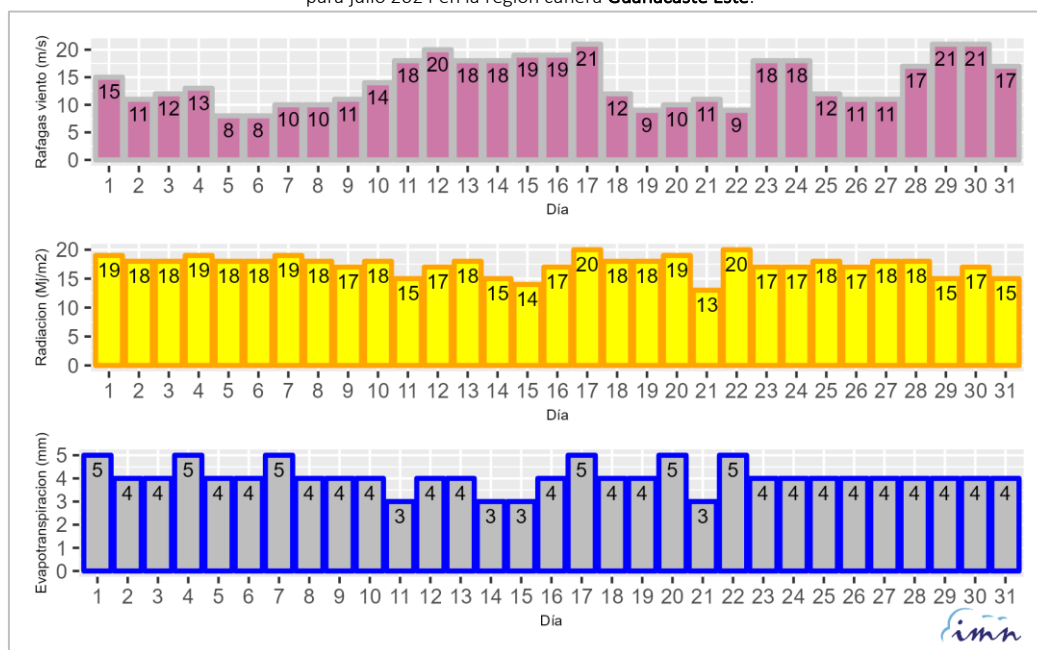


Figura 1.b. Promedio regional diario de viento máximo (m/s), radiación solar (MJ/m²) y evapotranspiración referencia (mm) para julio 2024 en la región cañera **Guanacaste Este**.

Agosto 2024 - Volumen 1 – Número 5

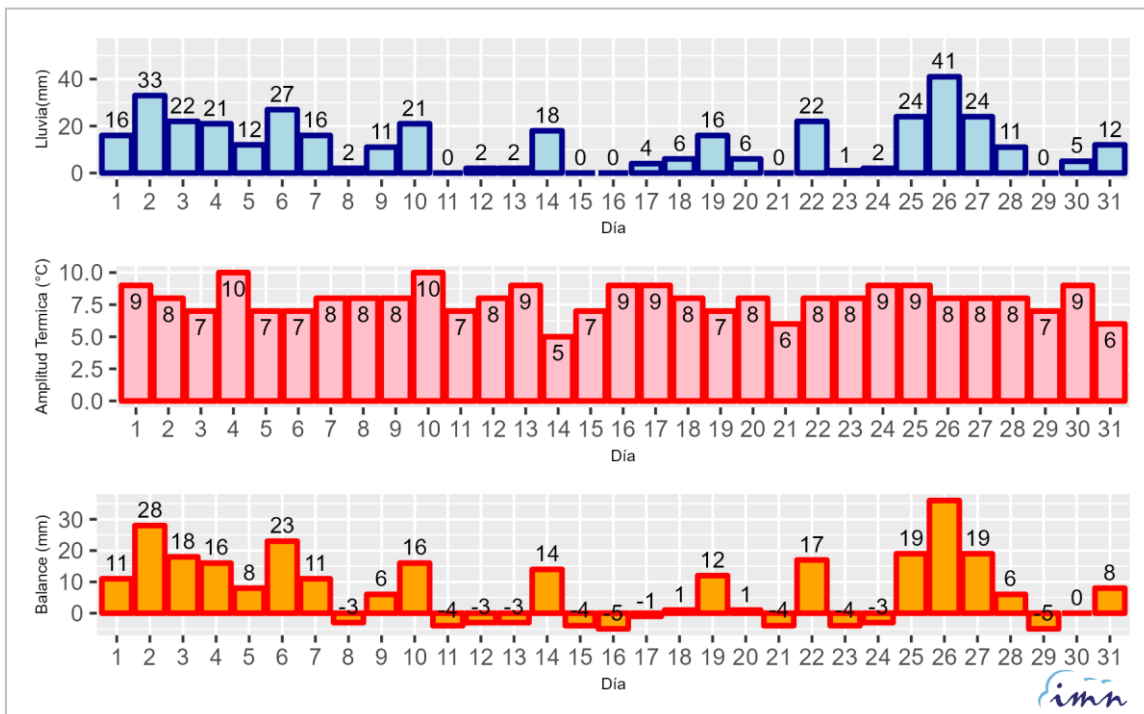


Figura 2.a. Promedio regional diario de precipitación (mm), amplitud térmica (°C), balance hídrico (mm) para julio 2024 en la región cañera Guanacaste Oeste.

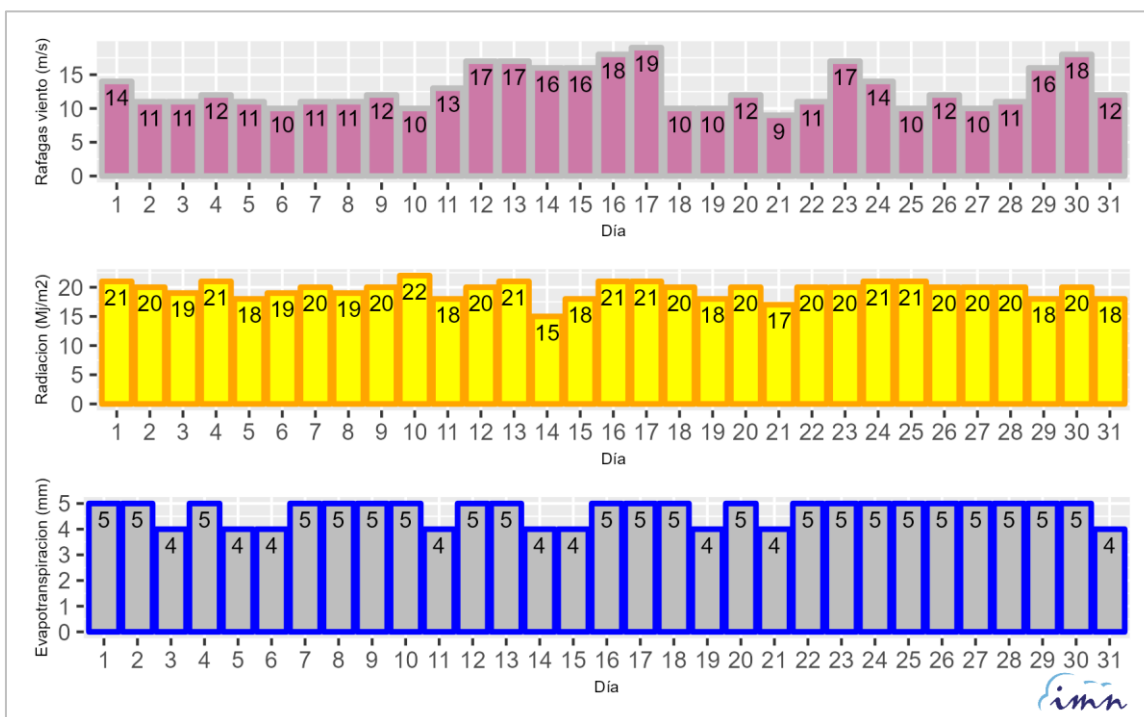


Figura 2.b. Promedio regional diario de viento máximo (m/s), radiación solar (MJ/m²) y evapotranspiración referencia (mm) para julio 2024 en la región cañera Guanacaste Oeste.

Agosto 2024 - Volumen 1 – Número 5

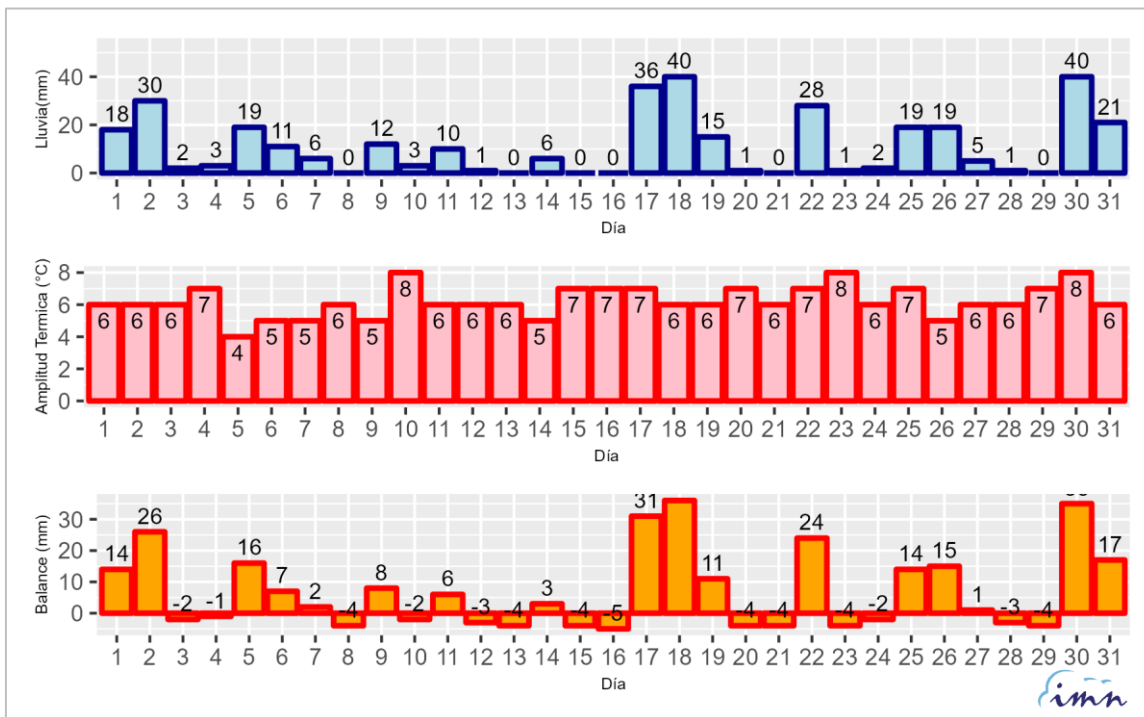


Figura 3.a. Promedio diario de precipitación (mm), amplitud térmica (°C), balance hídrico (mm) para julio 2024 en la región cañera Puntarenas.

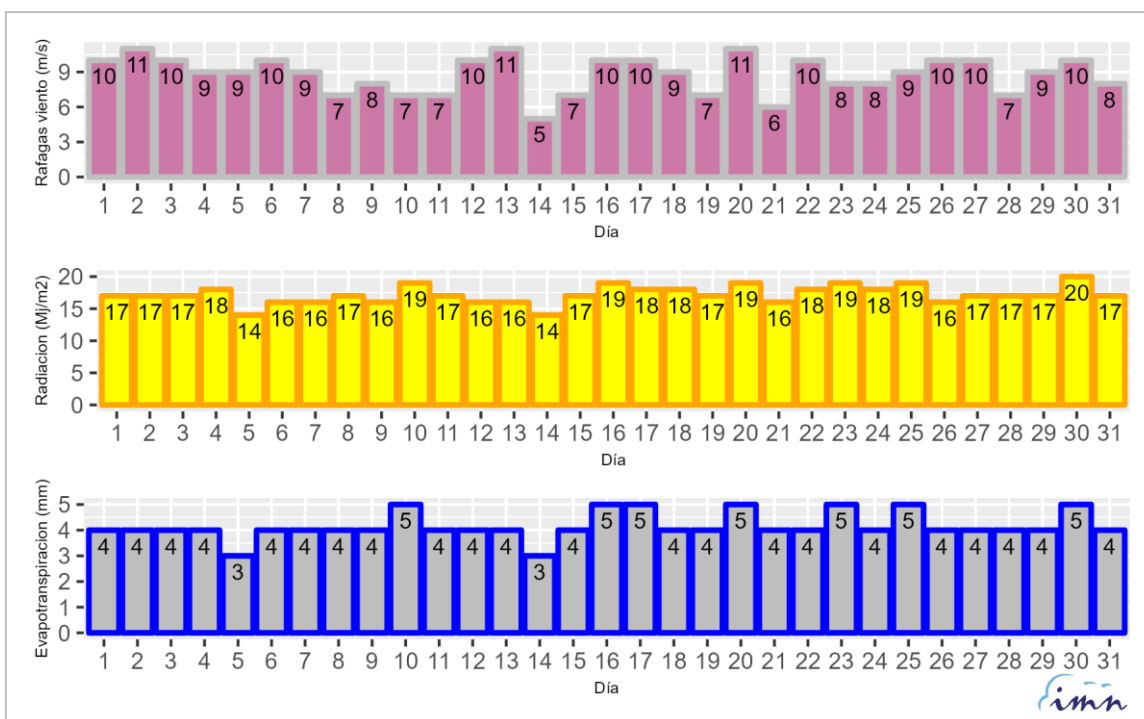


Figura 3.b. Promedio diario de viento máximo (m/s), radiación solar (MJ/m²) y evapotranspiración referencia (mm) para julio 2024 en la región cañera Puntarenas.

Agosto 2024 - Volumen 1 – Número 5

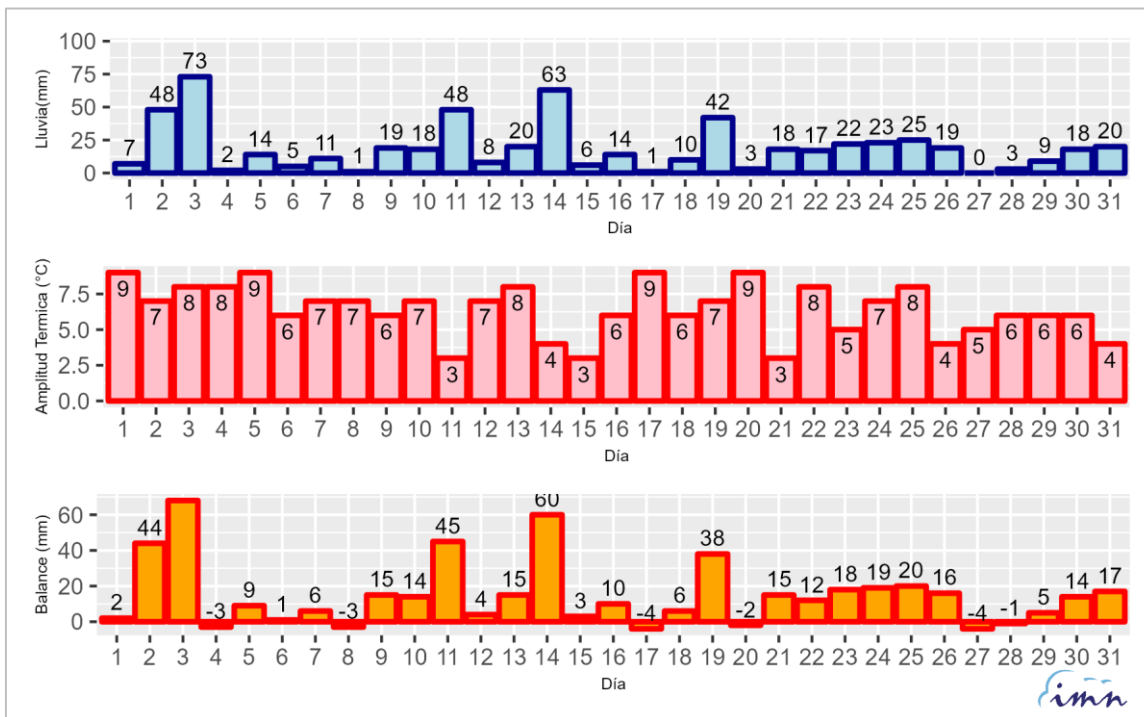


Figura 4.a. Promedio diario de precipitación (mm), amplitud térmica (°C), balance hídrico (mm) para julio 2024 en la región cañera **Región Norte**.

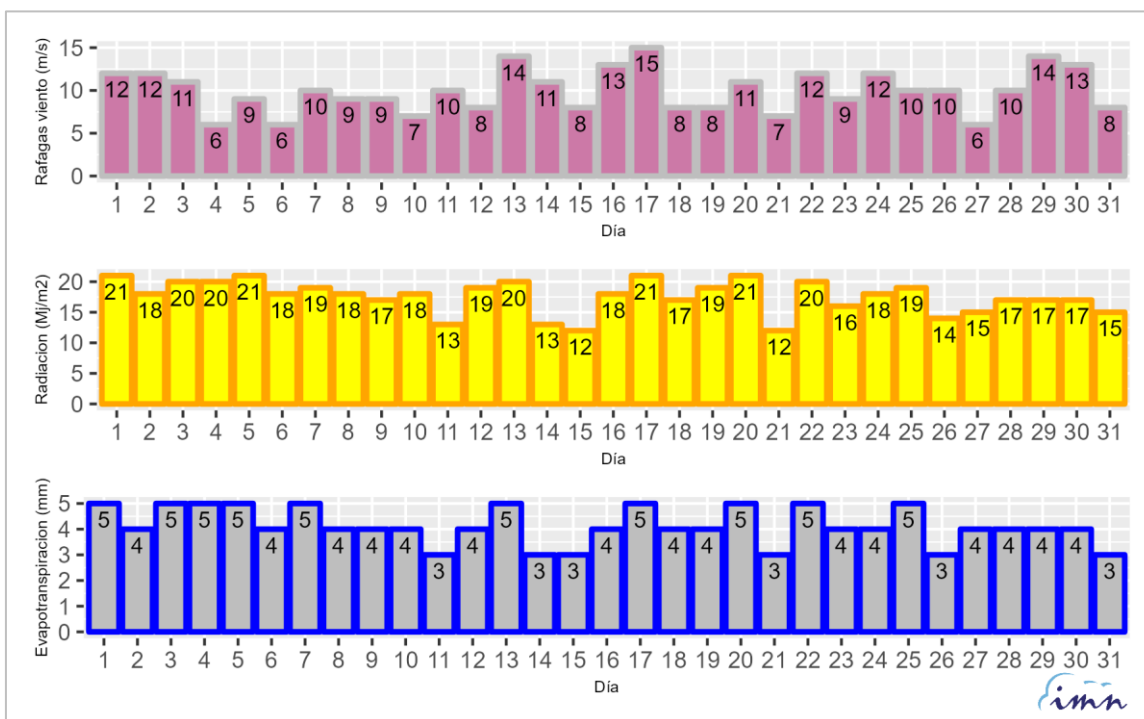


Figura 4.b. Promedio diario de viento máximo (m/s), radiación solar (MJ/m²) y evapotranspiración referencia (mm) para julio 2024 en la región cañera **Región Norte**.

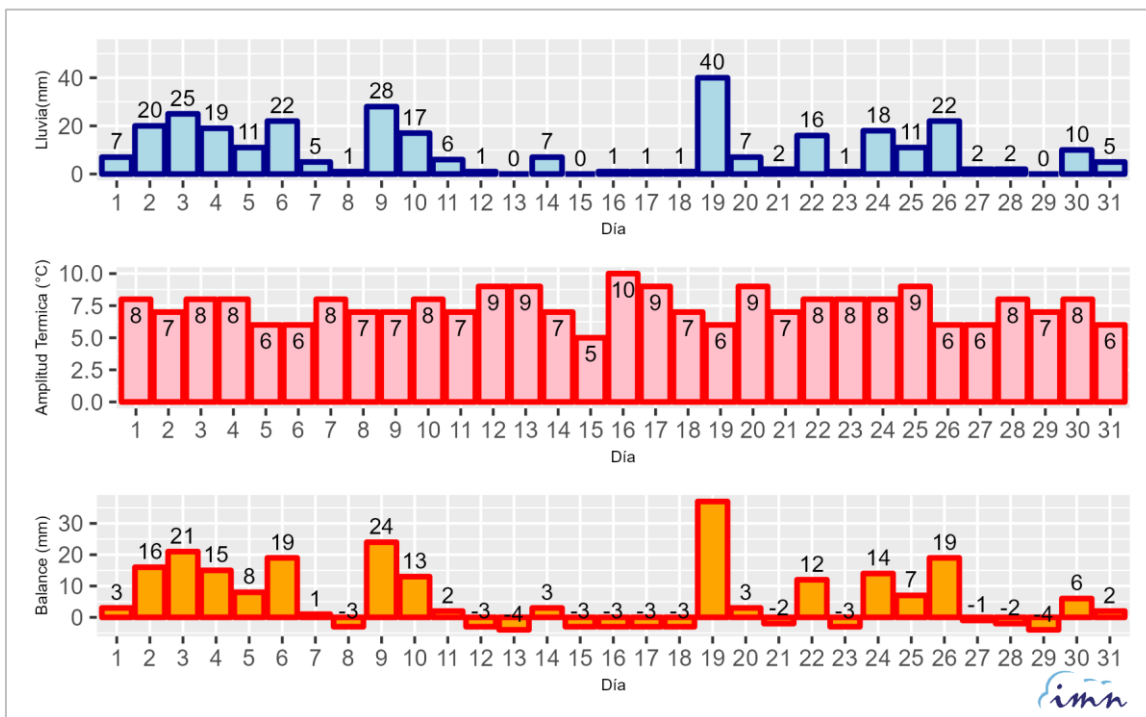


Figura 5.a. Promedio diario de precipitación (mm), amplitud térmica (°C), balance hídrico (mm) para julio 2024 en la región cañera Valle Central (Este y Oeste).

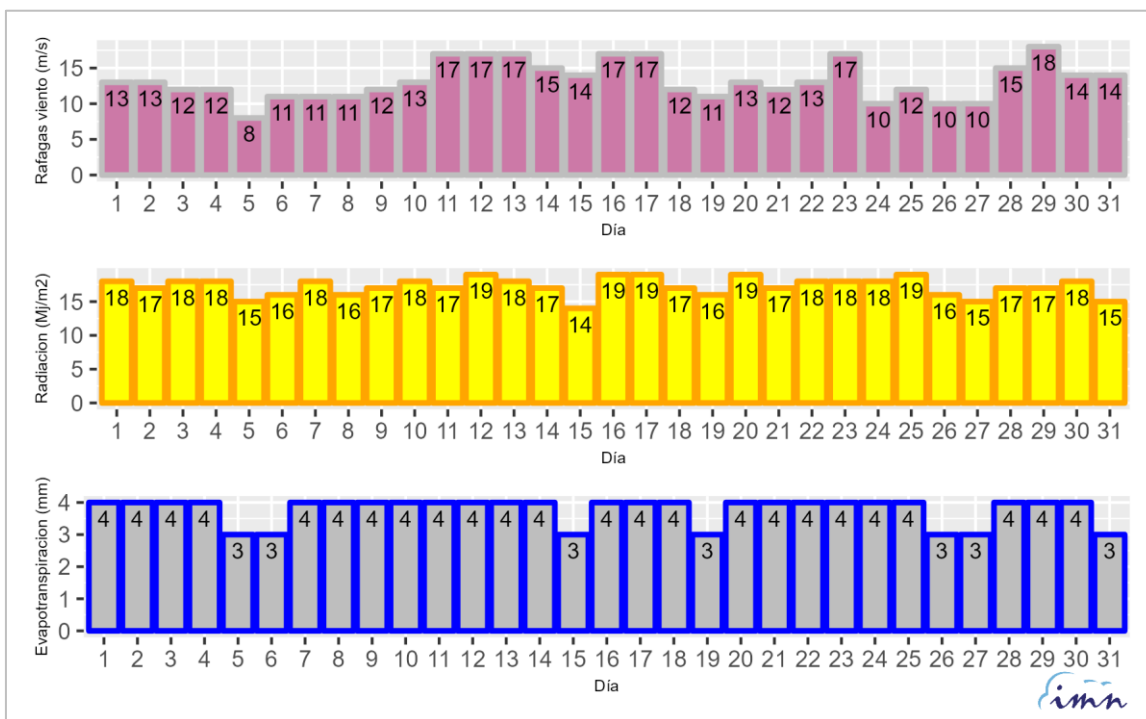


Figura 5.b. Promedio diario de viento máximo (m/s), radiación solar (MJ/m²) y evapotranspiración referencia (mm) para julio 2024 en la región cañera Valle Central (Este y Oeste).

Agosto 2024 - Volumen 1 – Número 5

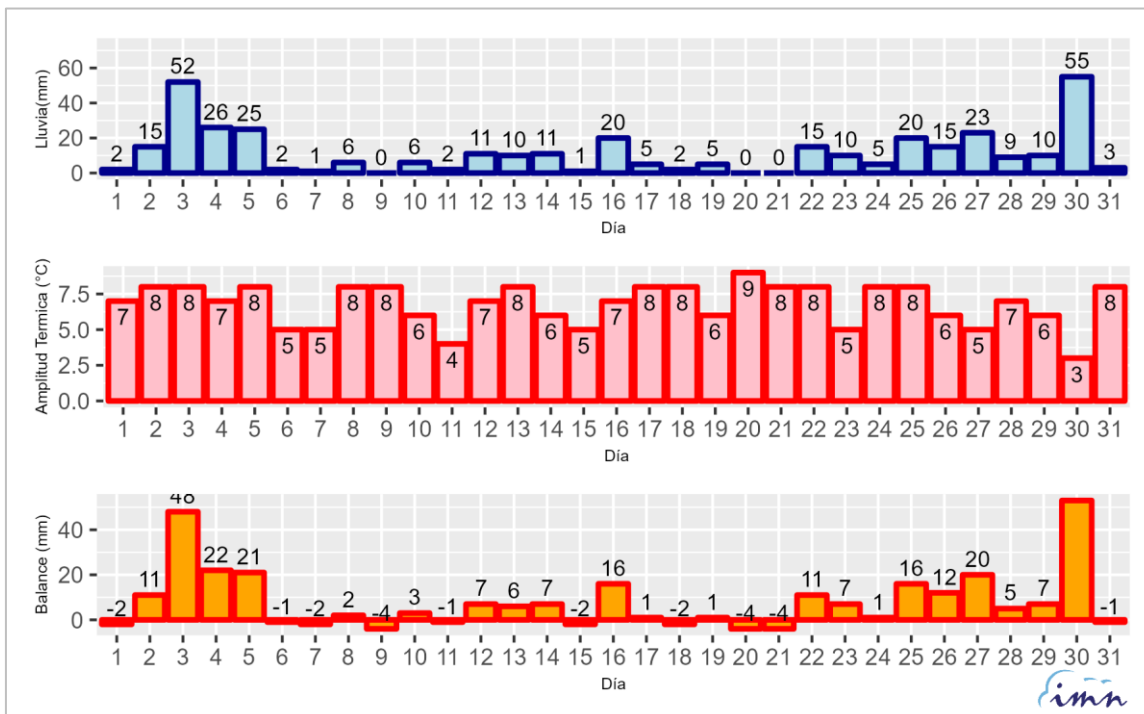


Figura 6. Promedio diario de precipitación (mm), amplitud térmica (°C), balance hídrico (mm) para julio 2024 en la región cañera Turrialba (Alta y Baja).

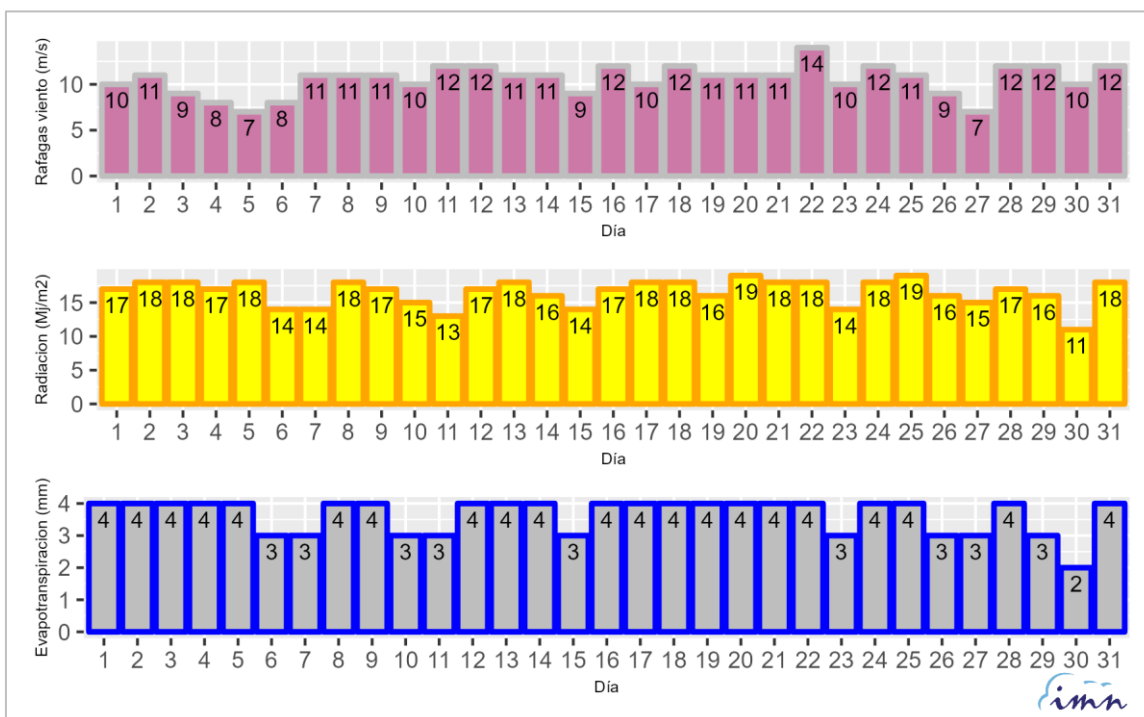


Figura 6. Promedio diario de viento máximo (m/s), radiación solar (MJ/m²) y evapotranspiración referencia (mm) para julio 2024 en la región cañera Turrialba (Alta y Baja).

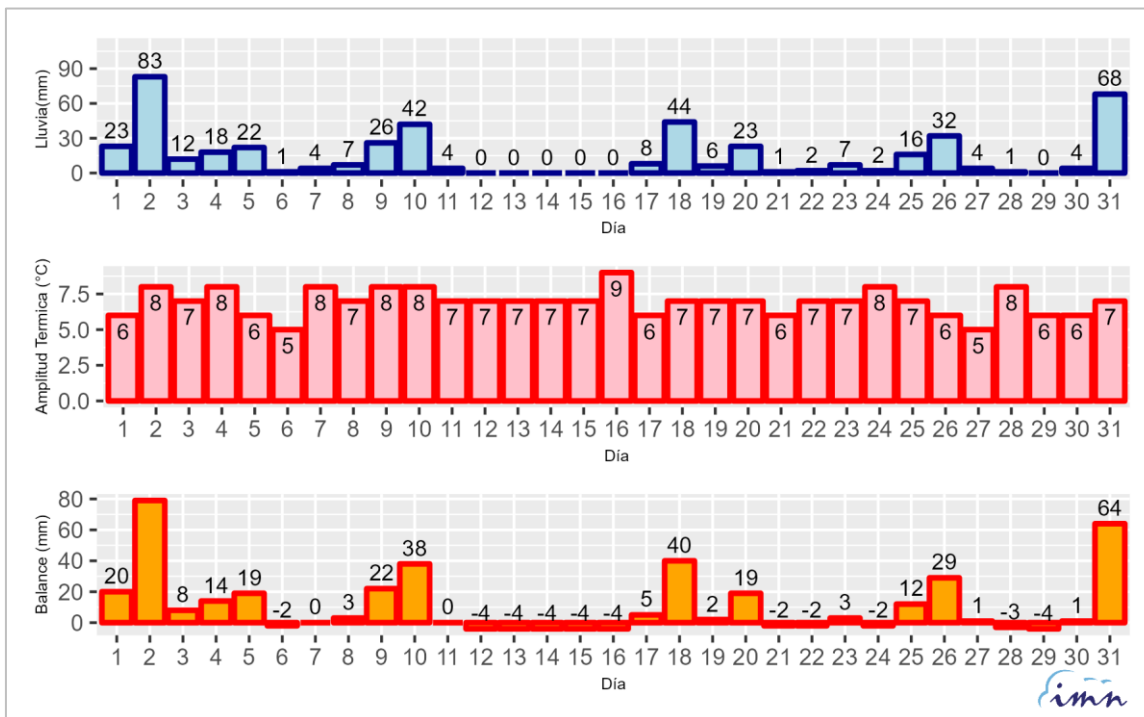


Figura 7.a. Promedio diario de precipitación (mm), amplitud térmica (°C), balance hídrico (mm) para julio 2024 en la región cañera **Región Sur**.

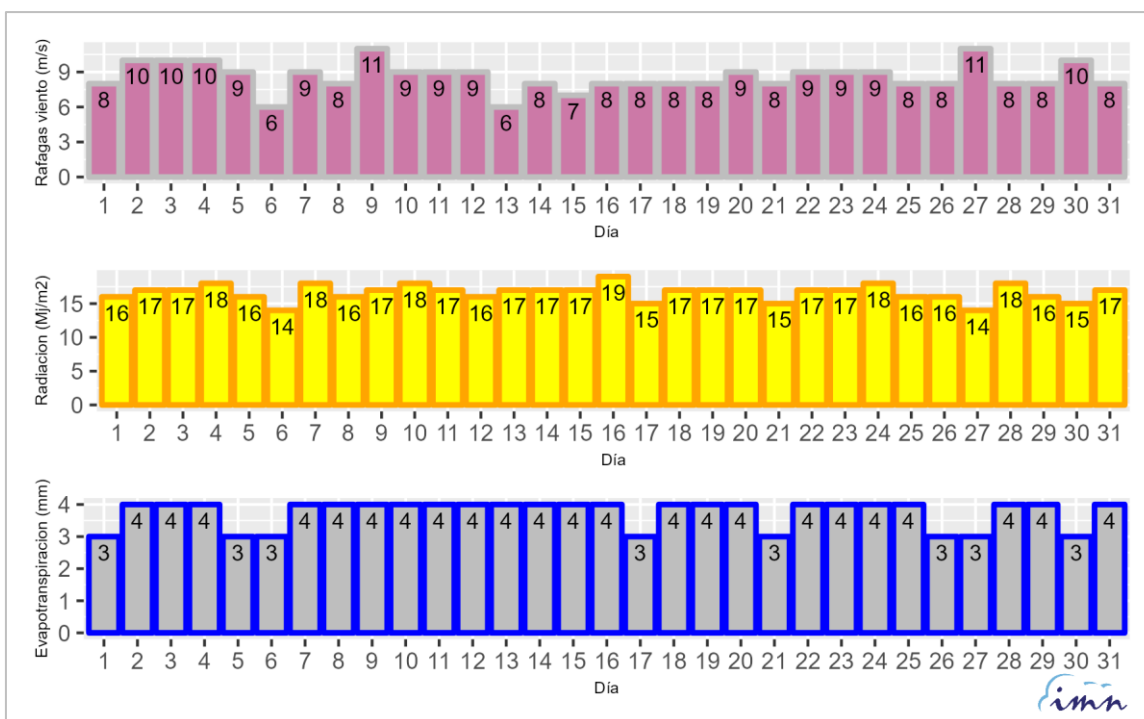


Figura 7.b. Promedio diario de viento máximo (m/s), radiación solar (MJ/m²) y evapotranspiración referencia (mm) para julio 2024 en la región cañera **Región Sur**.

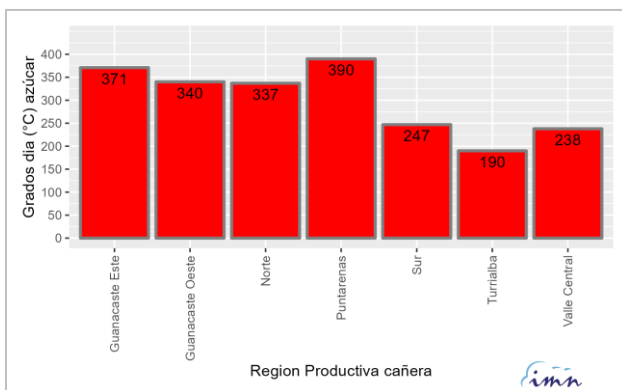


Figura 8. Grados día (°C) por región cañera para julio 2024 en la región cañeras.

HUMEDAD DEL SUELO ACTUAL PARA REGIONES CAÑERAS

De acuerdo con Central America Flash Flood Guidance System (CAFFG), el cual estima la humedad en los primeros 30 cm de suelo, durante la semana del 01 al 07 de julio, se presentaron condiciones de alta humedad en la mayoría de los suelos de todas las regiones productoras (entre 65% a 100%); solamente las regiones Puntarenas y Turrialba presentaron condiciones de más baja humedad, entre 30-65%.

Del 08 al 14 de julio, las regiones Guanacaste, Región Norte y Turrialba presentaron condiciones de alta humedad (65%-100%); la Región Puntarenas tuvo entre 30%-65%.

En el periodo del 15 al 21 de julio se mantuvieron las mismas condiciones que la semana anterior. Sin embargo, hacia mitad de semana la humedad en los suelos en la Región Guanacaste disminuyó.

Para la semana del 22 al 31 de julio, solamente la Región Puntarenas se mantuvo con bajo contenido de humedad (30%-65%), las demás regiones productivas tuvieron una mayor saturación.

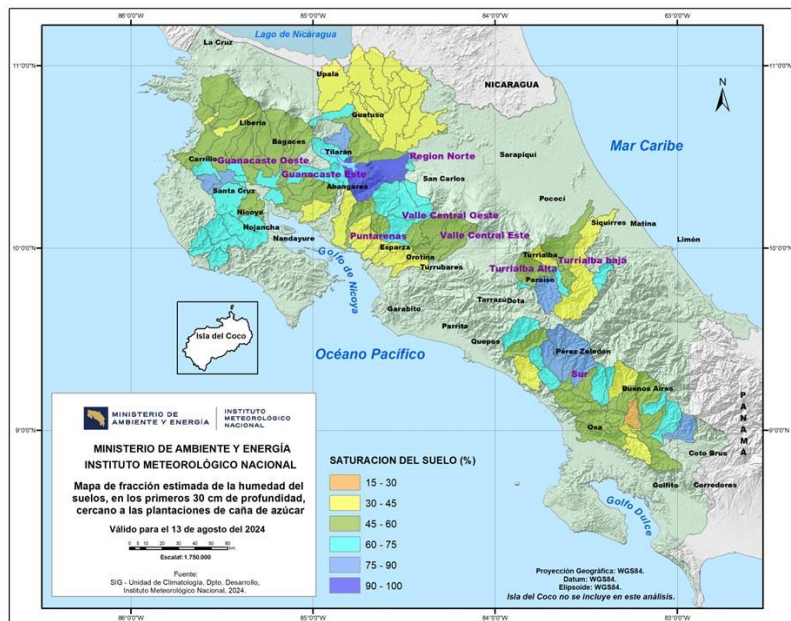


Figura 7. Mapa de fracción estimada de la humedad en porcentaje (%), en los primeros 30 cm de profundidad, cercana a las plantaciones de caña de azúcar, válido para el 13 de agosto de 2024.

Como se observa en la figura 7, la Región Guanacaste Oeste está entre 30% y 90% de saturación mientras que la Región Guanacaste Este tiene entre 45% y 75%. La Región Puntarenas presenta entre 30% y 60% de humedad, la Región Norte está entre 30% y 100%, la Región Valle Central Oeste tiene entre 60% y 75%, mientras que la Región Valle Central Este presenta entre 45% y 60%. La Región Turrialba Alta (> 1000 m.s.n.m.) tiene entre 30% y 90% y la región Turrialba Baja (600-900 m.s.n.m.) está entre 30% y 75%. La Región Sur varía entre 15% y 90% de humedad.

IMN LE RECOMIENDA

Mantenerse informado con los avisos emitidos por el IMN en:



@IMNCR

Instituto Meteorológico Nacional CR



@InstitutoMeteorologicoNacional

www.imn.ac.cr

LAICA LE RECOMIENDA

Con el aumento en la intensidad de las lluvias le recomendamos mantener una actividad vigilante del comportamiento de las plantaciones de caña de azúcar en relación a la aparición de o aumento de la intensidad de algunas enfermedades. Le presentamos una lista de las principales enfermedades que con mayor frecuencia aumentan en presencia y daño con las lluvias. Para mayor información pueden consultar la página de asistencia técnica en nuestro portal de Internet <https://servicios.laica.co.cr/laica-asistencia/>.

Nombre común de la enfermedad	Nombre científico del patógeno	Síntomas y daños	Manejo
Pokkah boeng o cogollo retorcido	<i>Fusarium moniliforme</i>	Zonas decoloradas (cloróticas) en las hojas, con o sin necrosis; deformaciones de las hojas; deformaciones o muerte del verticilo caulinar (cogollo); deformaciones en los tallos; pudrición de los tallos. Sobre el tejido afectado con frecuencia se puede observar el crecimiento del hongo como un micelio claro levemente rosado. Síntomas similares se le atribuyen a deficiencias de boro (B), con la diferencia fundamental de que la deficiencia de B produce deformaciones pero no necrosis de los tejidos, además de que los análisis químicos de suelos y foliares ayudarán en la diferenciación en el diagnóstico.	Por las características y hábitos del patógeno es una enfermedad de difícil manejo. No se tiene claro si se puede transmitir eficientemente por semilla y no se puede descartar esta opción, aunque sí es evidente que puede deteriorar la calidad del material reproductivo. Se recomienda un manejo racional de la fertilización y evitar la excesiva fertilización nitrogenada.
Raya Roja	<i>Acidovorax avenae</i> subsp. <i>avenae</i>	Lesiones foliares iniciales de forma alargada y de coloración rojiza. También se observan pudriciones húmedas de las hojas y muerte del cogollo, acompañado de exudados bacteriales de olor fétido en los tejidos afectados.	Limitar el acceso de maquinaria agrícola en lotes con alta infestación. Desinfectar la maquinaria luego de transitar por lotes infectados.

Agosto 2024 - Volumen 1 – Número 5

Nombre común de la enfermedad	Nombre científico del patógeno	Síntomas y daños	Manejo
Carbón	<i>Sporisorium scitamineum</i>	Inicialmente se pueden observar cepas con alta proliferación de tallos cloróticos y muy delgados. El síntoma clásico es la emisión de un verticilo delgado y de color negro a partir del cogollo de la caña que popularmente se le conoce con el nombre de látigo. El látigo es de color negro y de aspecto polvoso debido a que está recubierto con las esporas del hongo.	El elemento principal para el manejo de esta enfermedad es la selección de variedades resistentes, o en caso que no haya disponibilidad de estos materiales, lo más indicado es manejar la calidad de la semilla. Se recomienda el tratamiento de la semilla por inmersión en agua caliente a 52° C por una hora (hidrotermoterapia), y el tratamiento químico en frío por inmersión en una mezcla fungicida de carboxín + thiram (1,3 g i.a. ² /L) para el establecimiento de semilleros. En zonas de alta presión de inóculo se puede recurrir a aplicaciones de la misma mezcla fungicida a una dosis de 300 g i.a./ha en forma dirigida al surco antes de tapar la semilla.
Mal de la piña	<i>Ceratocystis paradoxa</i> / <i>Thielaviopsis paradoxa</i>	Pudrición húmeda del tallo, muerte del verticilo caulinar (cogollo), brote de yemas laterales y fuerte olor a fermentación. En ocasiones se puede observar el crecimiento del hongo en forma de micelio blanco sobre el tejido afectado.	La mejor forma de manejar esta enfermedad es la prevención. No se transmite por semilla, pero sí deteriora el material de reproducción y la calidad postcosecha de la semilla ya que puede infectar los esquejes afectando seriamente la germinación de las yemas. Los lotes con antecedentes requieren de una adecuada preparación del terreno para favorecer el drenaje natural de los excesos de agua, y de ser posible aplicaciones con mezcla fungicida de folpet (300 g i.a./ha). El tratamiento de la semilla por hidrotermoterapia resulta muy útil para evitar ataques de esta enfermedad previos a la germinación de los brotes de los esquejes.
Quema de la hoja	<i>Curvularia lunata</i>	Se caracteriza por producir unas manchas redondeadas de gran tamaño en la hoja, el tejido necrosado es color paja y bordeadas por un halo o anillo de color café oscuro que le da origen a su nombre. Los efectos negativos pueden ser mayores en caña ciclo planta que en soca. Se puede confundir con la enfermedad llamada mancha de anillo (<i>Leptosphaeria sacchari</i>).	De importancia económica especialmente en plantaciones de renovación durante los primeros tres meses de edad del cultivo.

Agosto 2024 - Volumen 1 – Número 5

Nombre común de la enfermedad	Nombre científico del patógeno	Síntomas y daños	Manejo
Pudrición Roja del Tallo	<i>Colletotrichum falcatum</i>	Pudrición húmeda del tallo con coloraciones rojizas. Aparece con más frecuencia en plantas con daños mecánicos o causados por insectos; y también en estados postcosecha de la semilla. Es un claro síntoma de deterioro de la misma, por efecto del tiempo transcurrido desde la corta de los tallos.	No dejar mucho tiempo la semilla expuesta a los elementos para evitar el deterioro por efecto de este hongo. Evitar al máximo posible la selección o escogencia de variedades de caña que presenten la característica de presentar rajaduras en los entrenudos para evitar el ingreso del hongo. Se estima que el manejo de la nutrición con calcio tiene un efecto benéfico en la reducción del desarrollo de estas rajaduras. Se aconseja seguir las recomendaciones para el combate del carbón y del mal de la piña.
Mancha ojival	<i>Bipolaris sacchari</i>	Lesiones foliares alargadas y que se pueden extender a lo largo de la lámina de la hoja. Desarrollan un borde clorótico (amarillo) alrededor de las lesiones. Esta enfermedad con frecuencia es confundida con los síntomas de las royas, se diferencia en que las lesiones son de tonos más claros tendientes al color paja, menos corchosas y rugosas que las de las royas. Las lesiones tienden a ser más alargadas que las de las royas. Las esporas carecen de la pigmentación que poseen las royas.	La medida de combate más efectiva es la de la selección y escogencia de variedades resistentes o tolerantes.
Peca amarilla	<i>Mycovellosiella koepkei</i>	Esta enfermedad se caracteriza por la manifestación de manchas amarillas en la hoja, tal y como su nombre lo indica. Las lesiones se pueden fusionar entre sí y en algunos casos presentar leve acorchamiento del tejido foliar con coloraciones rojizas. Puede llegar a confundirse con síntomas por el ataque de insectos chupadores, especialmente el chinche de encaje (<i>Leptodictya tabida</i>). Si las condiciones son propicias, se puede observar el crecimiento del hongo sobre las lesiones en forma de un micelio blanco.	No se considera de importancia económica.

NOTA TÉCNICA

Carbono orgánico en el suelo y producción eco-competitiva de caña de azúcar

Ing. Agr. Marco A. Chaves Solera, MSc.

chavessolera@gmail.com

Especialista en el cultivo de la Caña de Azúcar

Introducción

La evolución mantenida por una sociedad cada vez más exigente, consciente y persuadida de la imperiosa, obligada e insoslayable necesidad de ajustar, modificar, cambiar y reorientar la forma de producir, convivir y relacionarse con el entorno; invoca y exige reflexionar, pero sobre todo actuar sobre las formas en que se hacen y como debieran hacerse las cosas, lo cual trasciende a todos los ámbitos del quehacer humano. La convivencia con el entorno representa e implica una ineludible confrontación natural del hombre con el ambiente como un todo, y consigo mismo como actor directo del ecosistema, donde la meta procurada satisfacer es clara y transparente: *mejorar la calidad de vida y asegurar la existencia futura de la humanidad.*

El cometido de la meta planteada alcanzar pareciera lejano, complejo y hasta exagerado virtud de sus alcances, implicaciones y consecuencias; pero hay que reconocer que resulta realista y sensata ante las amenazantes perspectivas y proyecciones establecidas en el mediano plazo, caso de no inducir y provocar los cambios necesarios requeridos implementar con carácter urgente. Las evidencias del dinámico y significativo cambio, lamentablemente negativo, que se viene observando en materia ambiental, climática, deterioro de los ecosistemas, pérdida de biodiversidad, incremento de la desertificación, contaminación, degradación y deterioro de los recursos hídrico y edáfico es contundente e incuestionable.

Cabe en este punto rescatar la valoración que oportunamente realizara Chaves (2020i) en torno al tema, al manifestar, que *“Proyectando de manera atrevida y osada los tiempos actuales a un futuro lejano e indubitablemente incierto, aun asumiendo los inmensos riesgos que intrínsecamente acarrea el hecho de pretender imaginar posibles nuevos escenarios, vislumbran sin embargo con bastante certeza un entorno de producción agropecuaria dominado por profundos cambios en todos los órdenes, particularmente en los enfoques y sistemas empleados para obtener los alimentos que la población requiere y demanda. Dichos cambios se perfilan, irán posiblemente vinculados en estrecha coherencia y articulación con los cambiantes y exigentes gustos y preferencias que vienen de forma acelerada definiendo y requiriendo los diversos tipos de consumidores*

y segmentos sociales en todo el mundo. Estas nuevas orientaciones apuntan posiblemente a provocar cambios significativos en materias relevantes como son: a) la calidad nutricional del producto final que se irá a consumir, b) el sistema que lo produce, cómo y con que lo produce, c) quién o quiénes lo producen, d) cadena de valor y distribución del beneficio final y e) grado de sostenibilidad ambiental y ecológica del sistema agro productivo implicado.

El modelo agrícola vigente hasta hace algunos años y que fuera fomentado en el mundo y en el país, se fundamentó en principio como bien lo apuntara Chaves (2020h), en la expansión de los monocultivos y las actividades pecuarias y consecuentemente en la ampliación del área sembrada; incorporando luego conceptos orientados a procurar alcanzar el incremento de la productividad basados en el uso de agroquímicos, semilla, maquinaria, riego, entre otros; sin prestar sin embargo, el énfasis deseado en los factores asociados con la calidad nutricional del producto y el impacto ocasionado sobre el ecosistema. Como consecuencia de la explotación de los abundantes recursos naturales disponibles en ese entonces, hay que reconocerlo, se produjo una severa degradación y afectación sistemática de las condiciones físicas, químicas y microbiológicas de los suelos, caracterizada por una disminución significativa de los contenidos de materia orgánica y con ello un agotamiento de su fertilidad natural (Chaves, 2017, 2020e).”

La agricultura es en definitiva una actividad esencial que por su naturaleza y características paradójicamente juega en tres escenarios fáciles de identificar, valorar y juzgar, como son:

- a) Es fuente emisora e inductora de cambios, negativos en este caso
- b) Sufre los impactos y las consecuencias de los males prevaletentes y que ella misma genera
- c) Constituye paradójicamente a su vez un importante y efectivo recurso para provocar y favorecer cambios positivos

Es por este motivo trascendente identificar elementos y factores que contribuyan mediante su estímulo y promoción, o por el contrario, a través de su eliminación y suspensión, a mitigar, atenuar y reducir el importante desbalance que en materia ambiental viene sistemáticamente generándose. La agricultura y en particular el cultivo

de la caña de azúcar, ofrecen virtud de su biotipo y atributos, enormes ventajas en este particular para constituirse en un factor con sinergia positiva para contrarrestar en grado importante la creciente afectación de la atmósfera y los ecosistemas naturales.

El cambio climático, la degradación de las tierras, la pérdida de biodiversidad y la pérdida acelerada de la capacidad productiva rentable y competitiva, han convertido los suelos en uno de los recursos más sensibles y vulnerables del mundo, circunstancia por la cual se debe prestar toda la atención debida para procurar su mejora.

El sistema suelo-vegetación es determinante en el aumento o en su caso la disminución que pueda observarse en las concentraciones de CO₂

El IPCC reporta en su quinto informe de evaluación (IPCC, 2013) que las emisiones anuales de GEI a nivel mundial de origen antrópico (provocados por la acción del ser humano), significaron la presentes en la atmósfera, lo cual depende de la velocidad de acumulo y descomposición del carbono orgánico que presente el sistema; razón por la cual, el recurso suelo constituye uno de los reservorios terrestres de C más grandes que hay en la naturaleza y al cual debe prestársele la máxima atención. Representa, asimismo, el medio más apropiado para evaluar con certeza el flujo de **Gases con Efecto Invernadero (GEI)** surgido entre la biosfera y la atmósfera. Incorporación de 8.900 millones de toneladas de C a la atmósfera, como consecuencia de la actividad desarrollada en las zonas industriales y urbanas (7.800 millones de toneladas de CO₂) y también como resultado de los cambios de uso del suelo y la deforestación (1.100 millones de toneladas de CO₂). Se infiere de lo anterior, que la influencia humana en el cambio climático es reconocida y está aceptada entre la comunidad científica mundial. Las emisiones antropogénicas de GEI son en la actualidad las más altas de la historia del ser humano, lo que ha conducido inexorablemente a incrementar las concentraciones atmosféricas manifestado por el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), entre otros, a niveles elevados y sin precedentes. Como está comprobado, la incidencia y el efecto de esas altas concentraciones en la temperatura del planeta es notoria y constatable; nada agradable, por cierto. Esta preocupación mundial obliga a los sistemas de producción agropecuaria prestar atención y reducir la emisión de esos gases y buscar por el contrario procurar el secuestro de carbono mediante la implementación de prácticas de manejo apropiadas (Chaves 2021abc).

El **Carbono Orgánico del Suelo (COS)** como se le denomina, es el componente esencial y principal de la **Materia Orgánica del Suelo (MOS)** que desempeña un papel importante en la productividad y la sostenibilidad de los sistemas agroproductivos. Como un efectivo indicador para dictaminar la salud del suelo, el carbono orgánico es importante por sus contribuciones a la producción de alimentos, la

mitigación y la adaptación al cambio climático, como también al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

El presente artículo tiene como objetivo primordial abordar con alguna especificidad un tema relevante y muy actual, como es el vinculado con el carbono orgánico del suelo (COS), que resulta estratégico en la sana y necesaria intención de disminuir y revertir en algún grado, los graves y crecientes impactos provocados por el cambio climático; particularmente los concernientes al secuestro de Gases de Efecto Invernadero (GEI). De manera complementaria, se busca contribuir con identificar medidas orientadas a favorecer la mejora del suelo, los índices de productividad y rentabilidad agroindustrial del cultivo promocionados y sustentados en criterios de sostenibilidad, eco-eficiencia y eco-competitividad.

¿Qué es el COS?

El enunciado "*carbono orgánico del suelo*" nombrado como COS se refiere a la cantidad de carbono que contiene el suelo expresado como peso del carbono por unidad de peso de suelo (gramos de C/kg de suelo). El carbono (C) del suelo corresponde al C contenido y almacenado en diferente magnitud y profundidad en prácticamente todos los suelos, sean de uso agrícola o no. Está presente genéricamente en dos formas básicas: *orgánico e inorgánico*.

El C inorgánico se presenta en formas minerales de carbono generadas por la meteorización del material parental, o en su caso, por la reacción de los minerales del suelo con el CO₂ de la atmósfera. Los minerales de carbonato constituyen la forma dominante de C del suelo en climas desérticos. El COS está presente como materia orgánica en el suelo en forma relativamente disponible como restos vegetales frescos, y también como carbono degradado por medio de la **mineralización** en forma relativamente inerte como humus y carbón vegetal (Chaves, 2020i).

El Carbono Orgánico (CO) es esencial para mantener la fertilidad del suelo en niveles satisfactorios, favorecer la biodiversidad, capacidad de infiltración y retención de agua de los ecosistemas terrestres y sostener la producción vegetal en grados rentables y competitivos. El COS se encuentra presente en forma de residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos, hasta cadenas carbonadas muy transformadas y estables como acontece con los ácidos húmicos. La cantidad de COS almacenado en un ecosistema depende fundamentalmente de la cantidad y la calidad de la materia orgánica que se reincorpora a la matriz del suelo, de la capacidad de los suelos para retener CO lo que está ligado a su textura y su Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC); además de las influencias bióticas inducidas por la temperatura y las precipitaciones. Está comprobado que la temperatura y la precipitación tienen un efecto directo sobre la acumulación de carbono en el suelo.

La fijación biológica del CO₂ como estrategia destinada a su reducción es importante de desarrollar, pues podría contrarrestar la tasa de mineralización de la materia orgánica en el suelo, configurando y convirtiendo a los sistemas terrestres como “*sumideros de carbono*”. Se hace necesario en la actualidad inducir la búsqueda de estrategias orientadas a reducir las emisiones de carbono a la atmósfera y, aumentar complementariamente, la captación de carbono en el suelo; mecanismo conocido como “*secuestro de carbono*” que corresponde a la transformación de CO₂ atmosférico en carbono orgánico almacenado en el suelo y la biomasa, quedando así inmovilizado respecto a la circulación biogeoquímica durante largos periodos de tiempo.

De acuerdo con Chaves (2024), el carbono lo contienen los compuestos orgánicos del suelo siendo por ello el componente principal de la MOS que incluye además el carbono inorgánico bajo la forma de minerales de carbonato. Refiere la literatura que el COS es un componente importante del ciclo global del C, que de acuerdo con FAO (2001), representa un 69,8 % de todo el C orgánico presente en la biosfera.

La dinámica del proceso natural revela que parte del material orgánico se incorpora al suelo como COS siendo otra liberada al medio en forma de CO₂. La oxidación de la MO provoca la transformación del carbono que contiene en forma orgánica a la inorgánica, generando con ello CO₂ que es emitido a la atmósfera.

La dinámica natural del proceso opera buscando un balance en donde el CO₂ del medio se intercambia continuamente entre la fase del suelo con la de la atmósfera. El CO₂ presente en la atmósfera se absorbe y fija a través de la fotosíntesis, donde las plantas absorben el CO₂ atmosférico y lo convierten en azúcares. Parte del CO₂ absorbido es luego devuelto y reintegrado a la atmósfera como resultado del proceso de respiración vegetal (Chaves 2023a). Cuando los seres vivos, sean plantas, animales y hasta bacterias mueren, el carbono que los compone se incorpora al suelo. Acontece que la descomposición de la MO en el suelo promovida por bacterias también libera CO₂ a la atmósfera. La dinámica ideal debe evitar promover desequilibrios en favor de concentrar CO₂ en la atmósfera. Se ha encontrado en esta dinámica, que las condiciones ambientales afectan de forma determinante la tasa de descomposición de la materia orgánica al ser influenciada por elementos como la lluvia, la temperatura, los niveles de oxígeno presentes en el suelo y la humedad, entre otros. Las condiciones cálidas y húmedas favorecen una mayor tasa de descomposición; mientras que en condiciones frías y secas esa tasa es más lenta y limitada. La presencia de niveles más altos de oxígeno aumenta la actividad microbiana y, por lo tanto, la tasa de descomposición, lo que está ligado con la mayor oxigenación del suelo (FAO, 2017; Chaves, 2020j).

Como está suficientemente comprobado por la ciencia, el COS interviene y afecta de diversa manera la mayoría de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo vinculadas con su: 1) calidad, 2) sustentabilidad y 3) capacidad productiva; motivo y razón por la cual el COS puede mantener estables o en su caso incrementar sus contenidos en un sistema agro productivo operado bajo un régimen estricto de manejo sustentable. Como indicador representativo de la calidad y la salud del suelo, el COS es importante por sus determinantes contribuciones a la producción de alimentos, la mitigación de GEI y la adaptación al cambio climático. También contribuye con el cumplimiento cabal de los **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**. Un suelo poseedor de un alto contenido en MOS está en capacidad de proporcionar nutrientes esenciales en calidad y cantidad adecuada a las plantas, mejorando además la disponibilidad de agua, lo cual contribuye con su fertilidad y, con ello, con la mejora de la productividad de los cultivos (Chaves, 2020ac).

El COS se vincula directamente con la cantidad y disponibilidad de nutrientes esenciales en el suelo al aportar elementos vitales como el N, cuyo contenido es por lo general normalmente deficitario. Además, al modificar la condición de acidez y alcalinidad del medio llevándolo a valores próximos a la neutralidad, el carbono incrementa la solubilidad de varios nutrientes, y con ello la capacidad de ser absorbidos por las raíces de las plantas. El COS asociado a la materia orgánica del suelo proporciona coloides dotados de una alta capacidad de intercambio catiónico, cuyo efecto sobre las propiedades físicas se manifiesta mediante la modificación de la estructura y la distribución del espacio poroso del suelo.

Participación del CO en la dinámica del suelo

Como se indicó y es expuesto de manera más amplia y completa, el carbono orgánico tiene un efecto directo e indirecto sobre algunas importantes **propiedades químicas** del suelo, como acontece con:

- **La reacción del suelo:** contribuye con la neutralización de la acidez por acomplejamiento (estructura molecular formada por un átomo (o grupo) central que posee orbitales de valencia no ocupados) de protones (partícula subatómica con carga eléctrica elemental positiva) y aluminio (Al³⁺) mediante aniones (ion con carga eléctrica negativa), la liberación por mineralización de bases de cambio contenidas en los compuestos orgánicos y por el contenido inicial de N orgánico asociado a la formación de NH₄⁺ que consume protones. La MOS posee grupos carboxílicos (C(=O)OH) y fenólicos (hidroxilo (OH-)) como grupos funcionales que se comportan como ácidos débiles y tienden a disminuir el valor de pH (Chaves, 2020g).
- **La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC):** un aumento en el valor de pH incrementa la CIC variable que depende de las sustancias húmicas. La interacción entre COS y cationes se da

mediante reacciones de intercambio catiónico, esto es, entre los grupos carboxílicos cargados negativamente y los cationes presentes en el medio.

- **Acomplejamiento de materiales inorgánicos:** se da por bloqueo de sitios potenciales de reacción que afectan la fertilidad del suelo; por ej. el aumento en la disponibilidad de P por bloqueo de sitios de reacción con iones de Fe, Al y Ca.
- **Disponibilidad nutricional:** el contenido de COS se ha correlacionado positivamente con el N total, el K disponible y la relación C/N. El ajuste y adecuación del pH es determinante en la solubilidad y disponibilidad de nutrimentos esenciales.

Asimismo, interviene algunas **propiedades físicas** del suelo, como es el caso de:

- **Agregación del suelo:** el COS tiene un efecto importante en la agregación de las partículas del suelo; estableciendo una correlación positiva entre tamaño y estabilidad de los agregados y contenido de COS presente.
- **Porosidad y retención de agua:** la estructura del suelo relaciona la forma, el grado y el tamaño de los agregados, afectando la porosidad y con ello la retención y disponibilidad de agua para las plantas; además de su capacidad de aireación. La porosidad afecta, además, la dinámica de crecimiento y exploración de las raíces en el perfil del suelo, lo cual en el caso de la caña de azúcar es determinante para el éxito productivo y el anclaje de la planta (Chaves, 2020c).
- **Compactación y carbono orgánico del suelo:** la compactación consiste en una reducción del espacio poroso causado por una carga aplicada a la superficie del suelo. Cuantifica la resistencia que ofrece el suelo a ser penetrado por una herramienta de corte o en su caso las raíces de la planta. Depende de varias propiedades básicas como la resistencia a la deformación del suelo, la compresibilidad y la fricción suelo-metal; se asocia a propiedades fáciles de medir como la Densidad Aparente (Dap), el contenido de agua, la materia orgánica y la cantidad de agentes cementantes. Esta propiedad afecta otras importantes características del suelo que se asocian directamente con el desarrollo de las plantas y las labores agrícolas (Chaves, 2019b, 2020h). Son efectos de la MOS sobre la estructura y compactación del suelo: a) la floculación de las partículas minerales, b) reducción de la humectación de los agregados y c) cambios en la resistencia mecánica (coherencia) de los agregados. La MOS parece tener un efecto tampón sobre las fuerzas que compactan el suelo, aumentando su capacidad de soportar cargas compactantes superiores respecto a otro suelo con menos MO.
- **Infiltración de agua en el perfil:** mejora e incrementa la tasa de infiltración de agua en el suelo. Se han encontrado aumentos

importantes en la conductividad hidráulica a saturación en condiciones de suelos con mayor aporte de materia orgánica.

Las **propiedades biológicas** del suelo también se ven intervenidas por el COS, principalmente en:

- **Proporciona recursos energéticos a los organismos del suelo:** principalmente heterótrofos que descomponen por mineralización los residuos orgánicos buscando obtener energía, participando activamente en los ciclos de varios nutrimentos esenciales utilizados por las plantas, y en la formación y estabilización de la estructura y porosidad del suelo, entre otras (Chaves, 2020i). Aseguran Henríquez y Cabalceta (1999) sobre el mismo tema, que *“La M.O. favorece por otro lado el sustrato adecuado para el desarrollo de poblaciones de micro, meso y microorganismos en el suelo, los cuales interaccionan principalmente a nivel radical con los cultivos. Muchos de ellos son antagonistas de organismos fitopatógenos o bien son de tipo simbiótico (micorrizas, bacterias fijadoras de N).”*

El importante componente microbiano contenido en los suelos y responsable de actuar durante la fase de mineralización de los componentes orgánicos en el suelo, como señalaran Paul *et al.* (1999), incluye varios géneros de nematodos, protozoos, organismos filamentosos, levaduras, hongos, microalgas y una gran diversidad de bacterias, considerados los actinomicetes, el grupo archae, los quimio y fotolitotrofos y una gran cantidad de formas aun no cultivadas.

Es conocido que el COS puede perderse fácilmente por gasificación como CO₂, N₂O, CH₄, N₂ al ser emitido a la atmósfera; también como material erosionado o como carbono orgánico disuelto en agua que desagua y deposita en ríos y océanos, perdiendo con ello el acceso a los beneficios citados anteriormente.

Carbono orgánico y ambiente productivo

Se proyecta con base firme que los impactos que provocará el cambio climático en los próximos años serán crecientes, acumulativos y particularmente muy adversos sobre los ecosistemas de producción agropecuaria, lo que podría llegar a impactar y disminuir los índices de productividad de los cultivos si no se incorporan medidas contingentes de adaptación y mitigación efectivas. Con base en la información generada por la comunidad científica internacional basada en estudios, estima el IPCC (2014), que es posible que, con el cambio climático en desarrollo, los rendimientos globales en el 2050 puedan disminuirse entre 20 y 30%.

La relación que existe entre agricultura y ambiente es la misma que prevalece de manera más específica entre carbono orgánico y clima, la cual es compleja, multivariada y multifactorial virtud de la cantidad y diversidad de factores y elementos que se encuentran relacionados

y vinculados entre sí. Como se explicará en lo sucesivo, las relaciones surgidas son de carácter sinérgico, pero también antagónico, lo que denota un complejo de reacciones con resultados variables de acuerdo con las características y condiciones particulares de cada entorno específico, lo que conoceremos y llamaremos para nuestro interés “ambientes de producción”.

El vínculo más directo entre COS, producción y clima se da mediante procesos de pérdida (descarbonización), secuestro (captura) y mejora incremental (recarbonización). El mismo se relaciona con la sustentabilidad de los sistemas de producción agrícola afectando de diferente forma e intensidad las propiedades del suelo relacionadas con el rendimiento sostenido y satisfactorio de los cultivos en el tiempo; que en el caso particular de la caña de azúcar se manifiesta mediante una vida comercial prolongada y satisfactoria de las plantaciones comerciales, con índices de productividad agrícola e industrial rentables. Un alargamiento en el uso comercial de una plantación constituye un beneficio traducible en una mayor rentabilidad; por ej. pasar de 5 a 6-7 cosechas rentables es muy significativo y deseable en todos los ámbitos.

La cantidad de C presente en un suelo no solo depende de las condiciones ambientales locales, sino que es afectada de manera determinante por el manejo que se le proporcione al sustrato suelo. Existen prácticas de manejo degradantes que provocan un detrimento y pérdida del COS en el tiempo; sin embargo, hay prácticas que por el contrario favorecen su acumulación y enriquecimiento sistemático. El carbono del suelo según la literatura se concibe como un “sumidero natural de carbono” con respecto al ciclo global del elemento, desempeñando por ello un papel preponderante y esencial en la biogeoquímica (estudia la interacción entre los compuestos geoquímicos y los organismos vivos), la mitigación del cambio climático y la construcción de modelos climáticos globales favorables. Por esta razón, un manejo prudente, técnico y apropiado favorece que el suelo actúe como fuente o reservorio de C dependiendo de su empleo y aprovechamiento.

Los factores que intervienen y afectan de diferente manera y en magnitud variable el secuestro, acumulo y pérdida de carbono en el suelo son diversos en su naturaleza y características, como se aprecia en la Figura 1. Entre los factores climáticos se señala que la temperatura y la lluvia tienen un efecto directo importante sobre la acumulación de carbono (C); sin embargo, se considera que los factores edáficos juegan un papel que podría ser aún más determinante. Mucho de la sostenibilidad de las plantaciones de caña de azúcar en Costa Rica está relacionada directamente con la disponibilidad de nitrógeno (N) y su relación con el C, donde el clima y el orden taxonómico del suelo también interaccionan con el potencial de retención de C y N. Considerando por extensión que Costa Rica cuenta con suelos y climas de muy diversa naturaleza y características

(Chaves, 2017, 2019b), es importante considerar y establecer esta diferenciación en cualquier inferencia que sobre el tema se haga.

De acuerdo con Panichini y Ovalle (2020) la fracción textural de arcilla tiene una participación sobresaliente en la estabilización y acumulación de C en el suelo, pese a lo cual, no es tampoco determinante para todos los órdenes de suelos. Sobre ese tema consideran esos investigadores, que “*hay que diferenciar entre la estabilización de la materia orgánica en suelos volcánicos y no volcánicos. En suelos de origen volcánico, la mayor cantidad de C se encuentra formando complejos entre el aluminio y el hierro unido al humus. Este reservorio constituye la fracción mayoritaria en los horizontes superficiales, cuando el suministro de materia orgánica es abundante. Generalmente, este tipo de suelos se caracteriza por presentar pH ligeramente ácido y baja densidad aparente, lo que junto a las condiciones climáticas, permiten que la tasa de descomposición de los compuestos orgánicos sea más lenta, otorgando un mayor tiempo de residencia del C en el suelo.*” Amplían en torno al mismo tópico los autores manifestando en relación a los suelos no volcánicos, que “*... protegen el C generando uniones con la arcilla y el limo, lo que, unido a la menor cobertura vegetal y condiciones climáticas, favorece una mayor tasa de descomposición y, por ende, un menor tiempo de residencia del C en el suelo.*”

Está demostrado que la materia orgánica varía significativamente sus contenidos en función de las características del suelo relacionadas con el tipo de coloide o arcilla dominante, influenciadas además por las condiciones del entorno en lo que a temperatura y humedad corresponde. En lo pragmático se ha encontrado que los suelos Andisoles derivados de cenizas volcánicas poseen contenidos superiores de MO cuando se comparan con los del Orden Vertisol y Ultisol; lo cual acontece por la presencia de alofanos que tienen la capacidad de formar compuestos estables con la MO.

La práctica agrícola ha demostrado con creces que el uso y manejo que se haga del factor suelo desempeña un rol fundamental en la protección y acumulación de materia orgánica. La experiencia internacional ha revelado de igual manera, que la conversión de ecosistemas naturales a sistemas agrícolas por cambio de uso del suelo ha disminuido de manera significativa los contenidos de COS, elevando por el contrario las concentraciones de CO₂ atmosférico. Por tanto, la aplicación de medidas dirigidas a disminuir las emisiones debe orientarse a fomentar y estimular la implementación de prácticas que promuevan la protección del suelo y aumenten los niveles de materia orgánica, como es el caso de la mínima labranza o labranza cero, la contención de la erosión, evitar problemas con el drenaje, la incorporación de materia orgánica estabilizada (compost), la eliminación de las quemadas agrícolas, entre otras (Figura 1). Está demostrado que descontinuar de inmediato la quema de rastrojos en el suelo es una medida necesaria implementar, pues con esa práctica

Agosto 2024 - Volumen 1 – Número 5

se emiten altas cantidades de CO₂ al ambiente y destruye la biomasa biodegradable.

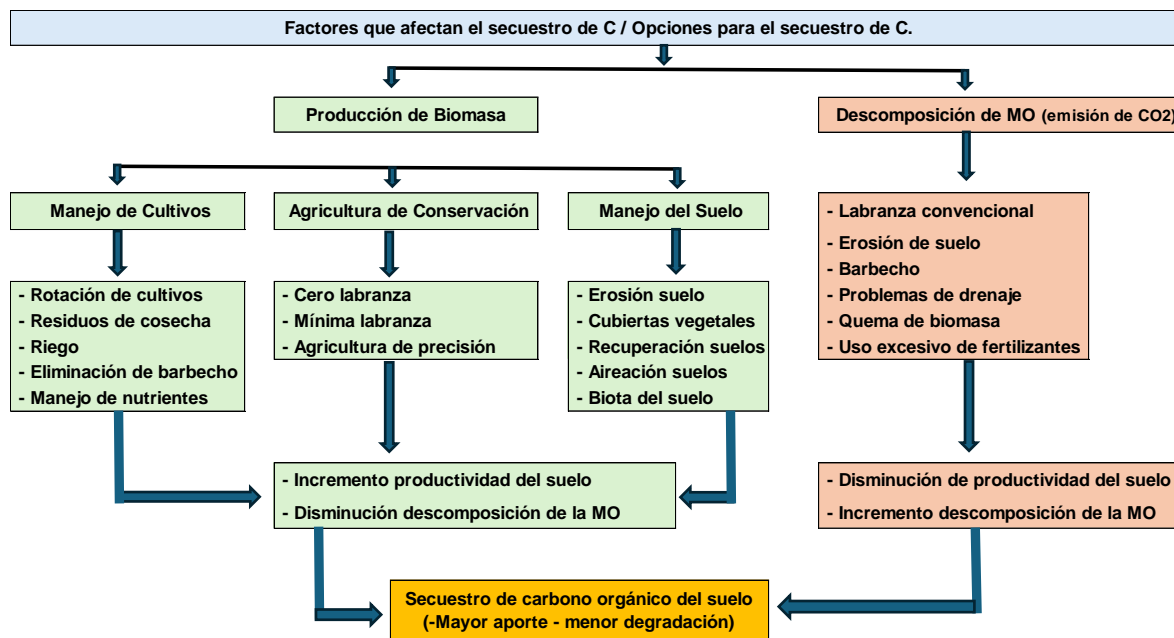


Figura 1. Factores que afectan el secuestro de carbono en el suelo (adaptado de Lal (2003); Marek y Lal (2003), complementado por Chowdhury *et al.* (2011) y Panichini y Ovalle (2020).

La gran heterogeneidad edafoclimática prevaeciente en el área cañera costarricense como ha sido ampliamente demostrado por Chaves (2017, 2019b, 2022b), provoca que los resultados esperables en cualquier estrategia orientada a fortalecer la recarbonización de los suelos cultivados, sean muy diferentes de acuerdo a la zona agroecológica donde se ubiquen las plantaciones de caña, el tipo de suelo dominante, el sistema de cultivo empleado, el manejo que se haga de los residuos biomásicos (RAC) y las características del clima imperante en cada localidad, entre otros (Chaves, 2022b). Es por tanto concluyente, que no todas las prácticas y medidas por implementar con ese objetivo muestren resultados similares en torno a su capacidad de secuestrar carbono.

Es importante llamar la atención y alejar falsas expectativas respecto a creer que con la simple adición de materia orgánica se logra la recuperación inmediata de los suelos, y casi por arte de magia, el incremento de los rendimientos agroindustriales a niveles significativos y hasta insospechados. Lo cierto es que la realidad del campo no opera de esa manera virtud de la complejidad de factores que intervienen y participan de los cambios. Como es conocido cualquier suelo se resiste por naturaleza y efecto buffer a provocar cambios drásticos en su estructura y funcionalidad, buscando por el contrario atenuarlos y contrarrestarlos, motivo por el cual es necesario

mantener la intensidad del efecto inductor en el tiempo para notar cambios continuos de mejora en los indicadores deseados. Por lo anterior, la relación entre adición de materia orgánica y aumento de la productividad es a veces difícil de verificar en el corto plazo, como la misma literatura refiere.

Carbono y materia orgánica

Es en primera instancia necesario ubicar conceptualmente ambos términos para poder dictaminar con buen criterio sus similitudes y diferencias. Se conoce y reconoce como **Materia Orgánica del Suelo (MOS)** a un conjunto de residuos orgánicos de origen vegetal y/o animal, que se encuentran en diferentes fases de degradación o descomposición concebidas como mineralización, y que se acumulan tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo a diferentes profundidades. Esa fracción incluye y considera la parte viva o biota, que participa en la descomposición y transformación de los residuos orgánicos (Chaves, 2020i).

La MOS distingue una fracción lábil (de fácil descomposición y gran actividad), disponible como fuente energética, que mantiene presentes las características químicas de su material de origen (hidratos de carbono, ligninas, proteínas, taninos, ácidos grasos); así como también una fracción húmica, más estable, constituida por

ácidos fulvicos, ácidos húmicos y huminas. La MOS presente en grados de transformación variable constituye un importante reservorio de COS que provee la energía vital requerida por los organismos que habitan en ese medio. Constituye asimismo como se indicó con anterioridad, una reserva que se relaciona con la sustentabilidad del sistema suelo y mejora sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Como se ha demostrado con creces, el COS está estrechamente relacionado con el cambio climático por ser componente de su ciclo biogeoquímico y fuente primaria del CO₂ atmosférico.

Expresa Chaves (2020d) al respecto, que *“La Materia Orgánica del suelo comprende los residuos vegetales o animales que se encuentran contenidos en el suelo en grados variables de composición, en íntima relación con los constituyentes minerales. La MO del suelo está bajo ese principio formada por compuestos que provienen de restos de organismos, ya sea vegetales y/o animales y sus productos de desecho. Por su naturaleza química, la MO está constituida por compuestos de complejidad variable que se encuentran en un dinámico y continuo estado de transformación, desde los residuos recientemente incorporados hasta las complejas estructuras alcanzadas luego de padecer períodos prolongados de transformación físico-química y microbiológica.”*

De acuerdo con Curi et al. (1993), la materia orgánica corresponde a la *“Fracción orgánica del suelo incluyendo residuos animales y vegetales que sufrieron descomposición a una extensión que la fuente no es reconocible, residuos microbianos y los productos finales relativamente estables de la descomposición (humus)”* La misma fuente describe y conceptualiza el **Humus** como *“Fracción relativamente resistente de la materia orgánica del suelo, “peats” o compuestos orgánicos, usualmente bruno oscuro a negro, formada por la descomposición biológica de los residuos orgánicos. Normalmente constituye la principal fracción de la materia orgánica del suelo”*. Chaves (2020i) complementa al respecto, señalando que *“Humus en la semántica popular se refiere indiscriminadamente a todo tipo de materia orgánica presente en el suelo, independientemente de su grado de descomposición y de su estado de agregación. Desde el punto de vista pedológico, el humus es concebido como un agregado de compuestos orgánicos de composición indefinida, bastante uniforme desde el punto de vista físico, por los agentes de descomposición, confiriéndole por ello una naturaleza amorfa.”*

Las sustancias húmicas constituyen el principal componente de la MOS y representan por lo menos el 50% de la misma y las huminas su componente más abundante; siendo por esto el material orgánico más abundante del ambiente terrestre, lo que maximiza su relevancia para el tópico abordado.

El COS es considerado el principal elemento que forma parte de la MOS, motivo por el cual es muy común que ambos términos se

confundan, se nombren indistintamente y hasta se consideren sinónimos. Al respecto cabe señalar como será ampliado más adelante, que los métodos analíticos empleados rutinariamente en el laboratorio determinan el COS, valor a partir del cual se estima luego la MOS multiplicado el COS por factores empíricos que pueden variar entre 1,7 para suelos superficiales y 2,5 para subsuelos. Considerando que existe una notable variación entre diferentes suelos y horizontes en el factor de conversión COS/MOS aplicado, se estima más conveniente reportar el valor original de COS sin transformar.

La Materia Orgánica (MO) como el Carbono Orgánico (CO) constituyen sin lugar a duda dos de las propiedades bioquímicas del suelo de mayor importancia, relevancia y trascendencia, ya que son factores que inciden directamente en la calidad edáfica y con ello en su aprovechamiento agro productivo. Como está demostrado y fue mencionado pero es importante reiterar, ambos componentes intervienen sobre otras propiedades del suelo, por medio de lo cual: aumenta la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), contribuye con la modificación del pH llevándolo hacia su neutralidad, favorece la retención de humedad, mejora la condición de los suelos arcillosos al aglutinar las partículas para formar agregados estables, estimula y dinamiza la actividad microbiológica, favorece la liberación de nutrimentos esenciales disponibles para las plantas, entre otras propiedades que las tipifican como factores muy deseables para la agricultura sostenible y competitiva.

En la coyuntura actual es sin lugar a duda obligado revisar y reflexionar sobre lo actuado en materia de nutrición y fertilización del cultivo, pero sobre todo rectificar y reorientar los métodos, mecanismos y criterios empleados para proveer lo que en materia de nutrición el cultivo de la caña de azúcar requiere, como lo conceptualizara Chaves (2020i) al expresar, que *“La materia orgánica ha sido a través de los siglos, el punto culminante de apoyo sobre el que se ha sustentado la agricultura de los pueblos, hoy, como factor condicionante resulta casi imprescindible, pues pensar en sistemas productivos eficientes y competitivos sin su uso resulta realmente cuestionable. Acontece sin embargo que, los principios fundamentales de la ciencia del suelo vienen siendo comprometidos y empañados por la predominancia de la tradicional fórmula NPK y el exclusivismo de su uso. Resulta necesario advertir y llamar la atención juiciosa y sensata en estos momentos, sobre la necesidad precautoria de no prescindir del precioso recurso que significa la materia orgánica como factor de equilibrio y beneficio en la preservación de la productividad, mitigación de la degradación y la sanidad del suelo como bien universal. Lo que fomenta esa conducta productiva degradativa son las fuerzas e intereses económicos y comerciales que, en el afán de lograr lucros inmediatos, sin ningún recato y moderación, pasan por encima y violentan los principios consagrados en el resguardo y mejora del recurso suelo. Resulta por ello imperativo y necesario, procurar*

equilibrar mediante el uso de la materia orgánica los indicadores que determinan la fertilidad y la estructura activa de un suelo, por cuanto ambos son dependientes de la actividad biológica. La solución está a la mano y consiste en reponer la materia orgánica contenida y consumida en los suelos de uso agropecuario, entre ellos los cultivados con caña de azúcar.”

Cantidades en el suelo

A nivel global los suelos de áreas tropicales como la nuestra y las subtropicales presentan una mayor capacidad de almacenamiento de carbono en consideración a la mayor cantidad de materia orgánica que se produce y descompone. En general, se espera que los suelos sometidos a condiciones de alta precipitación y humedad mantengan una mayor cantidad de carbono orgánico acumulado debido a la mayor cantidad de materia orgánica (biomasa) que se produce y descompone; sin embargo, la acción humana resulta igualmente determinante en esa condición. De igual manera, se espera que los suelos dotados de una mayor actividad biológica, como acontece con los bosques, los pastizales y áreas de alta biodiversidad vegetal, presenten una mayor cantidad de CO debido a la mayor cantidad de organismos vivos que contribuyen con la producción de biomasa y descomposición de la materia orgánica.

En condiciones naturales, el CO contenido en un suelo es el resultado del balance que surge y establece entre la incorporación al medio de material orgánico fresco y la pérdida o salida de C del suelo en forma de CO₂ hacia la atmósfera por oxidación del material orgánico, la erosión y la lixiviación, entre otros procesos.

Se ha encontrado que en los suelos hay contenido más C que la existente en la vegetación y en la atmósfera juntas, como apuntara Swift (2001), lo que ratifica su actuar como reservorio. Como fue anotado oportunamente, el carbono en los suelos puede encontrarse en forma tanto orgánica como inorgánica o mineral; habiéndose estimado la cantidad total de C orgánico almacenada y estimada por diversos métodos en un valor próximo a 1.500 Pg a 1 metro de profundidad (1 Pg = 10¹⁵ g) como lo consignaran Gifford (1994), Swift (2001) y FAO (2001), entre otros. De acuerdo con las estimaciones y proyecciones, los contenidos de C inorgánico reportan valores en el suelo cercanos a 1.700 Pg C, principalmente en formas químicas estables como CaCO₃ y MgCO₃ · CaCO₃, CO₂, HCO₃⁻ y CO₃²⁻ (FAO, 2001; Swift, 2001).

Desde una perspectiva taxonómica de acuerdo con los órdenes vigentes de acuerdo con ese sistema, se ha encontrado como muestra el Cuadro 1, que los suelos que acumulan la mayor cantidad de COS corresponden al orden Histosol, pese a ser el orden que presenta la menor superficie (km²) con relación a los otros 11 Ordenes. Ese Orden es el que tiene la mayor relación cantidad de COS/ superficie como se

infiere del cuadro (Eswaran *et al.* 1993; Soil Survey Staff, 1999; USDA, 2014; Chaves y Chavarría, 2017ab). Le siguen en contenido de COS muy cercanos los suelos del Orden Inceptisol y más distante los Entisoles y Alfisoles; destacando por el contrario el relativo bajo contenido reportado en suelos del Orden Andisol, Mollisol y Vertisol, como podría esperarse.

Cuadro 1: Carbono orgánico en los suelos del mundo.

Orden ¹	Área (10 ³ km ²)	COS (Pg) ²	COS/Área (Pg 10 ⁻³ km ²)
Histosoles	1.745	357	0,205
Inceptisoles	21.580	352	0,016
Entisoles	14.921	148	0,010
Alfisoles	18.283	127	0,007
Oxisoles	11.772	119	0,010
Aridisoles	31.743	110	0,003
Ultisoles	11.330	105	0,009
Andisoles	2.552	78	0,031
Mollisoles	5.480	72	0,013
Spodosoles	4.878	71	0,015
Vertisoles	3.287	19	0,006
Misceláneos	7.644	18	0,002
Total	135.215	1.576	0,012

Fuente: modificado de Eswaran *et al.* (1993).

1 Soil Survey Staff (1999).

2 Carbono orgánico del suelo.

1 Pg = 10¹⁵ g

Se ha determinado a nivel global, que las existencias de carbono orgánico se estiman en una media de 1.417 Pg C en el primer metro de profundidad del suelo, aunque debe considerarse que su distribución es espacial y temporalmente muy variable debido a los cambios naturales que observa el elemento.

La FAO (2002) indica que en condiciones aeróbicas (no anaeróbicas como manglares o humedales), una parte importante del carbono que ingresa al suelo (55 Pg C año⁻¹ a nivel global) es lábil y se mineraliza rápidamente; mientras que otra fracción menor se acumula como humus estable (0,4 Pg C año⁻¹). Los manglares contienen, absorben y secuestran mucho carbono en el suelo, contribuyendo a reducir de manera significativa los gases de efecto invernadero que generan el cambio climático global.

Segura y compañeros (2005) encontraron que los suelos de México tienen, en promedio, 1,8% de CO (3,1% de materia orgánica del suelo), lo que representa un contenido total de 10,5 Pg de CO en la capa superficial (de 0 a 20 cm de profundidad).

La investigación ha determinado que el tipo de vegetación constituye uno de los factores determinantes que incide sobre el aporte del CO en los suelos, lo que motiva que los contenidos cambien muchas veces de manera significativa en correlación con las características de la vegetación prevaleciente, el tipo de material parental constituyente y los factores topográficos del área de influencia.

Los contenidos de MO presentes en un suelo como se indicó dependen mucho del tipo de arcilla o compuesto dominante en el suelo (caolinita, montmorillonita, vermiculita, ilita, esmectita, halloysita, gibbsita y alofana, etc.), de las condiciones climáticas del lugar y el manejo prestado al terreno. La arcilla y la materia orgánica son elementos principales de la estructura del suelo; las arcillas que floculan forman dominios estables y junto con la MO actúan como material de unión entre las partículas minerales en la formación de la estructura.

Cuadro 2. Niveles propuestos de materia orgánica en diferentes suelos de Costa Rica.

Orden	Ámbito		
	Bajo	Normal	Alto
Andisoles	< 9	14 - 16	> 20
Inceptisoles			
- bien drenado	< 5	6 - 8	> 10
- mal drenado	< 8	10 - 12	> 14
Entisoles	< 5	7 - 9	> 10
Mollisoles	< 3	5 - 6	> 10
Ultisoles	< 2	3 - 5	> 8
Vertisoles	< 1	2 - 3	> 6

Fuente: Henríquez y Cabalceta (1999).

La génesis del suelo tiene, como demostraron Abarca *et al* (2018) para el caso de Costa Rica, una determinante influencia directa sobre la capacidad del suelo para almacenar carbono.

En el caso de los Andisoles los contenidos de MO pueden llegar a 9-20%; en tanto que en Vertisoles difícilmente supera el 3%. Por contenido, es en los suelos del Orden Histosol donde se encuentran los mayores valores debido a que las condiciones prevalecientes limitan la descomposición por mineralización del material orgánico, sea por presencia de bajas temperaturas o por condiciones reductoras

(humedad constante). Estos suelos se encuentran saturados de agua o inundados la mayor parte del año.

En el Cuadro 2 se presenta una propuesta de contenidos de MO para Costa Rica considerando los Ordenes de suelo de mayor actividad y uso agropecuario, lo que aplica perfectamente para la caña de azúcar (Chaves y Chavarría, 2017ab), ratificando con ello las grandes diferencias que existen entre ordenes taxonómicos. La dispersión del cultivo en el territorio nacional contribuye con la heterogeneidad prevaleciente en elementos edafoclimáticos básicos; complementado con la diversidad de sistemas de manejo de plantaciones comerciales de caña en el país, como lo detallara Chaves (2022b). Es por esto esperable encontrar importantes diferencias en cuando a contenidos de COS en el área cañera nacional.

Pérdidas de COS

Como es comprensible reconocer los contenidos de CO son muy variables, dinámicos y podría decirse hasta volátiles en el suelo virtud de su alta sensibilidad, donde se tienen aumentos pero también pérdidas perceptibles, lo que por desgracia pareciera ser dominante precisamente por la forma de operar y conducir los sistemas agroproductivos, el aumento de la deforestación, la erosión y desertificación, la impericia en la mecanización, la degradación sistemática y otras actividades que favorecen esa tendencia (Chaves 2020beh). La disminución a nivel mundial del COS como consecuencia de la deforestación, la agricultura migratoria y el cultivo con sistemas de labranza desproporcionados, ha contribuido de manera significativa al incremento del nivel de CO₂ en la atmósfera con las consecuencias derivadas sobre el calentamiento global y el cambio climático.

Los cambios acontecidos en el ambiente climático manifestados por variaciones de diferente magnitud en indicadores referentes determinantes, como son la temperatura y la precipitación, inciden e influyen sobre la descomposición y la cantidad de CO contenido en el suelo que se almacena en un ecosistema y se libera a la atmósfera. La acción humana ha intervenido y modificado la dinámica natural del proceso generando cambios que se han traducido en un inconveniente y controvertido proceso de **“descarbonización del suelo y carbonización de la atmósfera”**, el cual debe ser revertido para evitar sufrir los impactos que en materia ambiental se vienen padeciendo.

El cambio climático y los impactos antrópicos provocados por el hombre pueden ser causa y provocar pérdidas sensibles en la biodiversidad y el carbono del suelo, lo cual está conduciendo a alterar los ciclos naturales del carbono y la funcionalidad de los ecosistemas, derivando en procesos acelerados de degradación y desertificación, entre otros. La degradación es definida como **“un cambio en la salud**

del suelo resultando en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios" (FAO, 2016).

La degradación física y química de los suelos, como procesos principales, muy a menudo decantan en degradación biológica. Los estudios mundiales han revelado que la erosión hídrica y eólica constituyen, cuantitativamente, los procesos de degradación más importantes. Las causas principales que favorecen esa degradación son la deforestación, el sobrepastoreo y el mal manejo que se hace de los suelos al producir alimentos. Pese a todo, la pérdida de materia orgánica no ha sido identificada y catalogada como un proceso específico de degradación, lo que debe ser revisado, pero cerca de la mitad de los suelos químicamente degradados se ha comprobado que están agotados y son productivamente muy deficientes y limitados.

Está demostrado que el mal manejo del suelo constituye una, sino la principal, de las causas que interviene en los cambios observados en los contenidos del COS, con influencia directa en la disminución de sus reservas. Las reservas de C en el suelo en este caso son el resultado del balance que se establece entre las entradas (fundamentalmente por vía fotosintética) y las salidas (debidas a la respiración y oxidación de la MO).

Cuadro 3. Degradación mundial de suelos en relación a los cuatro procesos principales de degradación (terreno moderado a extremadamente degradado, dado en millones de hectáreas).*

Área **	Erosión hídrica	Erosión eólica	Degradación química	Degradación física	Total (x 10 ⁶ ha)
Asia	315	90	41	6	452
África	170	98	36	17	321
Europa	93	39	18	8	158
América Central y del Norte	90	37	7	5	139
América del Sur	77	16	44	1	138
Australia	3	15	1	2	21
Total	748	295	147	39	1.229**

Fuente: Oldeman *et al.*, (1991); FAO (2002).

* Los tres factores causantes, de importancia similar, son deforestación, sobrepastoreo y mal manejo agrícola.

** El total llega a 1.965 millones de hectáreas si se agregan los suelos ligeramente afectados.

El resultado de la *Evaluación Global de la Degradación del Suelo* (Oldeman *et al.*, 1991), indica que las tierras degradadas representan una gran proporción de los distintos tipos de tierras disponibles globalmente, cualquiera sea su tipo de uso y ocupación. El total se estima que llega a 1.965 millones de hectáreas en todo el mundo, la mayoría de las cuales se encuentra en áreas tropicales y en tierras áridas. El Cuadro 3 presenta una aproximación por continente, donde se estima el nivel de degradación expresado en área afectada (ha) de acuerdo con el tipo de afectación diagnosticada. Se infiere de los resultados que el mayor problema lo representa la erosión hídrica

seguida por la eólica y luego la de carácter químico, lo que aplica para Centroamérica y nuestro país.

Se ha comprobado que los contenidos de MOS son por lo general más bajos en aquellas condiciones donde la degradación es más severa; lo que sugiere que la cantidad de carbono que puede ser capturada a través de su rehabilitación y recarbonización será más efectiva e impactante, representando por ello una interesante e importante alternativa de mejora en áreas degradadas. En los suelos tropicales la degradación inducida por la acción del hombre se estima que afecta entre el 45 y 65 por ciento de las tierras agrícolas, dependiendo del continente, como lo demuestran Oldeman *et al.* (1991) y FAO (2002) y anota en el Cuadro 3. Esta condición hace que el margen potencial de captura de carbono y efecto positivo en suelos tropicales degradados sea muy alto. Los beneficios adicionales relacionados incluirán el mejoramiento de las propiedades químicas, la mayor disponibilidad de elementos en favor de una mayor fertilidad y la resiliencia contra la degradación física, especialmente la provocada por la erosión. Es de esperar, por lo tanto, que la captura de carbono contribuya a restaurar y mejorar la calidad de los suelos degradados.

González *et al.* (2016) encontraron que el manejo tradicional y de manera intensiva de los suelos plantados con caña de azúcar en Cuba, constituye una de las causas fundamentales a las que atribuyen las pérdidas de COS; a lo cual ha contribuido también la afección sobre tasa de acumulación el clima, la textura del suelo y el tiempo de residencia de los residuos en la superficie del suelo. Consideran por ello, que una de las formas de revertir el efecto negativo provocado por la mecanización en el COS, es a través del manejo de los residuos de cosecha, los cuales aportan al ecosistema terrestre gran cantidad de carbono.

Se estima que, con la incorporación de nuevos suelos a la agricultura para atender la creciente demanda mundial por alimentos, operados bajo sistemas intensivos de cultivo, producen pérdidas de COS que varían entre 30 y 50% del estado natural en que se encontraba inicialmente ese suelo, como lo han señalado algunos investigadores. La investigación ha encontrado que la pérdida de material húmico de los suelos cultivados es muy superior en relación a la tasa de formación de humus observada en suelos no perturbados; lo cual implica que suelos aprovechados bajo sistemas de cultivo convencional y tradicional, se convierten en una fuente emisora importante que libera y aporta CO₂ a la atmósfera, contribuyendo directamente con el calentamiento global y el cambio climático. **Es en el mal uso del suelo donde se generan grandes pérdidas de CO₂ y, por ende, donde deben habilitarse estrategias que favorezcan su mitigación por un lado y promuevan la recarbonización por otro.**

Ganancias de COS

Para que la opción de mejora en los contenidos de COS sea válida debe actuarse en doble vía: *aporte y reducción/ eliminación*. La primera acción opera buscando incorporar al sistema materiales ricos en carbono orgánico que mantengan y acrecienten sus contenidos; la segunda, evitando, mitigando y eliminando el efecto inducido por los factores y prácticas que promueven y favorecen las pérdidas. Solo una estrategia sensata, integral y equilibrada operada en esas dos vías podrá contrarrestar la tendencia negativa actual, pues la sinergia entre pérdidas/aportes generará un cambio positivo como el deseado y requerido.

Como resultado de la válida y enorme preocupación que existe en la actualidad a nivel mundial por el avance acelerado y consistente del calentamiento de la atmósfera como agente inductor y promotor del cambio climático, que tantos desastres viene provocando con sentidas pérdidas humanas y de infraestructura, afectación de proyectos productivos estratégicos, estrés general y deterioro de la calidad de vida de las poblaciones; se han identificado y vienen promoviéndose prácticas agronómicas que favorecen la captura (secuestro) y el acumulo de C en el suelo.

El secuestro de carbono en el suelo como apuntaron Panichini y Ovalle (2020) *“es la remoción del carbono de la atmósfera mediante la fotosíntesis de las plantas y su almacenamiento como forma de materia orgánica estable y de larga vida en el suelo. Para ello, se requieren cambios en las prácticas agrícolas tradicionales, para aportar más materia orgánica, que ésta sea más estable, y/o que retarde su descomposición”*.

Pese a tener consciencia y convencimiento de los innumerables e incuestionables beneficios que aporta la materia orgánica en los suelos, el pretender incrementar su contenido no es una labor sencilla de alcanzar, pues su logro requiere de tiempo, la incorporación y adaptación de prácticas agronómicas apropiadas cuya implementación se debe dar en un periodo de mediano y largo plazo. La persistencia del carbono en el suelo depende en gran medida del balance que se establezca entre los aportes y las pérdidas que se den por descomposición de la MO. En este complejo y dinámico proceso de transformaciones hay factores que desempeñan un rol determinante en la estabilización del sistema, como acontece con los factores climáticos, la mineralogía del suelo, la labor de labranza ejecutada, el cambio de uso del suelo y la tasa de incorporación de materia orgánica de calidad al sistema.

La recarbonización puede provocarse mediante la incorporación de prácticas como la labranza conservacionista que incluye la cero labranza, como también la agricultura orgánica, el empleo de materiales y abonos orgánicos, el uso de bioinsumos, el compostaje,

reciclaje, la rotación de cultivos y la siembra de plantas destinadas a incorporarse como abono verde, las cuales son propias de sistemas de manejo de suelos que poseen una alta capacidad potencial para secuestrar e incorporar C en el suelo (Figura 1).

En contraparte y de manera complementaria, los controles efectivos de la erosión (hídrica y eólica), la compactación, la acidificación progresiva, contaminación, infertilidad creciente, laboreo excesivo y degradación general de los terrenos debe ser contrarrestada, eliminando las pérdidas y el deterioro sistemático del recurso edáfico, lo cual contribuye de manera ostensible con la acumulación de C orgánico en el suelo.

La abundante cantidad y diversidad de biomasa que genera el cultivo de caña durante prácticamente todo su ciclo vegetativo (11 a 24 meses), es en definitiva una fuente importante de COS (Chaves, 2023b). De igual manera, virtud de la importancia y demostrada capacidad exploratoria que presenta el voluminoso y eficiente sistema radical de la planta, su aporte en COS es relevante, lo que se debe tener presente en cualquier medición y estimación que se haga al respecto; motivo por el cual la determinación de carbono en profundidad del perfil es determinante como aporte al suelo (Chaves, 2020c). Por la importancia que poseen las raíces y su relación con el COS, se debe contar con estimaciones precisas de su abundancia y su distribución en las diferentes modalidades de manejo y uso prestado a la tierra.

En lo pragmático a nivel de campo el agricultor debe actuar en procura de incrementar los contenidos de MO en el suelo, con lo cual se aumenta el COS. En este sentido y de acuerdo con Lavelle y Spain (2005), *“son tres los procesos que determinan la acumulación de la materia orgánica en el suelo.*

- 1) *La producción de biomasa de las plantas, que aporta la mayor parte de las entradas que dan lugar a este material.*
- 2) *La capacidad del suelo para estabilizar y almacenar materia orgánica, que depende de la profundidad del suelo, de la cantidad y tipos de arcilla y de otros minerales disponibles para formar compuestos órgano-minerales estables.*
- 3) *La tasa de mineralización a través de la oxidación biológica que está determinada por una serie de factores organizados jerárquicamente, como clima, ciertas propiedades del suelo -tipo y cantidad de arcilla, pH-, y actividades biológicas, especialmente de los organismos más grandes.”*

Es de considerar que la reserva de CO en el suelo procede de dos fuentes principales: 1) la del carbono orgánico en el suelo (COS); y 2) la del carbono inorgánico del suelo.

COS y caña de azúcar ¿Qué ofrece el cultivo?

Como en múltiples ocasiones se ha indicado de forma reiterativa, la caña de azúcar es una planta muy especial dotada de características y propiedades genéticas, anatómicas y fisiológicas excepcionales que la hacen muy eficiente para adaptarse a condiciones donde otros cultivos por lo general no prosperan o presentan grandes dificultades para su normal desarrollo, entre las cuales aplicadas al tema abordado pueden destacarse entre otras las siguientes:

- La caña es una gramínea con metabolismo fotosintético tipo Ciclo C4 con anatomía Kranz dotada de condiciones, atributos y propiedades excepcionales que la diferencian de otras.
- La condición anterior caracteriza a la planta de caña por tener una alta eficiencia para fijar C.
- Anatomía dispuesta para favorecer captación de luz.
- Planta muy rústica.
- Alto potencial de recombinación genética (poliploide) lo que permite generar nuevos clones de manera permanente.
- Gran capacidad de resiliencia y tolerancia a condiciones adversas.
- Muy eficiente en la captación y uso de recursos vitales como luz, agua y nutrientes.
- Regulación osmótica y estomática alta que favorece condición hídrica.
- Poseedora de un poderoso sistema radical capaz de explorar un amplio espacio del perfil del suelo, tanto en extensión como en profundidad. Potencial de absorber agua y nutrientes es muy elevada.
- Conversión de energía en biomasa es muy alta.
- Excepcional producción de biomasa biodegradable.
- Producción de material vegetal de diferentes características y composición (hojas, tallos, cogollo, raíces, flor, retoños).
- Generación de residuos y derivados de composición y estructura orgánica.

Como acontece con cualquier planta dispuesta y empleada como cultivo comercial, también hay elementos que resultan contraproducentes para fines ambientales, como son:

- Es un cultivo extensivo que ocupa y requiere disponer de áreas importantes para su desarrollo rentable (economía de escala).
- Lo anterior obliga incorporar y operar un componente mecanizable importante.
- Biológica y agrónomicamente se comporta como un monocultivo.
- Es un cultivo de relativamente difícil manejo de las plantaciones, entre otras cosas, por su porte alto y la gran cantidad de follaje que genera.
- Poco contribuye con la biodiversidad del ecosistema.

- La demanda por agua y nutrientes es elevada lo que puede contribuir con la degradación de los suelos.
- Mantiene vigentes por tradición y necesidad prácticas ambientalmente poco deseables como es el caso de la quema de las plantaciones para su cosecha.

La actividad agroproductiva vinculada al cultivo, manejo y explotación comercial de la caña de azúcar en Costa Rica es amplia y compleja en lo concerniente a fuentes de emisión de CO₂, como lo demostrarán Montenegro y Chaves (2022)

Esos y otros atributos han hecho posible que la caña de azúcar se cultive y adapte competitivamente en muchos países situados en la zona tropical y subtropical del planeta. Se dice por esas y otras razones que **la planta de caña es muy atractiva ya que posee una elevada plasticidad agroecológica que le permite ser utilizada en diversos tipos de suelos y climas.**

¿Por qué es importante incrementar el COS?

No cabe duda de que una de las medidas y acciones estratégicas más efectivas, viables y factibles de implementar en el campo para pretender elevar los índices de producción y productividad de los cultivos, lo representa mejorar integralmente las condiciones generales del suelo e incrementar y mantener los contenidos de carbono orgánico en el mismo. El tema y la duda transcurre por el tiempo implicado para alcanzar el cambio deseado y si la relación COS vs productividad es directa.

Pretender justificar la importancia y necesidad de incrementar los contenidos de CO en el suelo resulta innecesaria y hasta burda, pues está más que demostrada, reconociendo que las reservas de COS generan servicios ecosistémicos esenciales que incluyen la filtración de agua, control de la erosión, resistencia y estabilidad del suelo, conservación de nutrientes, desnaturalización e inmovilización de contaminantes, hábitat y fuente de energía directa para organismos del suelo, regulación de plagas y enfermedades, adaptación y mitigación del cambio climático por medio del secuestro y recarbonización de CO₂ atmosférico.

Con prudencia y sensatez basado en experiencias investigativas y productivas se considera que establecer una relación directa de dependencia entre el COS y el potencial de productividad del suelo es aventurado, virtud de su complejidad, por cuanto el vínculo y la relación es de carácter multifactorial. La información generada y disponible en torno al tema, por medio de la cual se documentan los efectos del COS sobre las propiedades del suelo que benefician el desarrollo de los cultivos es abundante; aunque muy poca, cabe reconocer, demuestra con la consistencia debida la relación y contribución directa inducida en el corto plazo por un aumento del COS sobre la productividad del suelo, traducida y expresada en la

obtención de mejores niveles de productividad. En esta relación el tiempo y el clima juegan un papel determinante que no puede ni debe obviarse.

Determinación del carbono en el suelo en el laboratorio

Indica la literatura que el **método Kjeldahl** clásico se ha reconocido como el método de referencia tradicional para la determinación de nitrógeno desde su publicación en 1883, considerando y calificando durante mucho tiempo, sus resultados como indiscutibles. El método de combustión de Dumas de 1831, más antiguo, solo ha podido establecerse como método de referencia para la determinación de nitrógeno en las últimas décadas, evolucionando y posicionándose más recientemente.

Sobre el tópico vinculado con la determinación del carbono, refiere FAO (2019) al respecto, que *“El análisis y la cuantificación del carbono total del suelo (CT) es necesario para estimar el contenido de materia orgánica del suelo, la cual es un parámetro útil cuando se evalúa la productividad de un sistema natural. La cuantificación de CT puede ser utilizada para monitorear la reserva de carbono del suelo (C) y para evaluar el rol y la efectividad del secuestro de C para mitigar el cambio climático.*

Se utilizan varios métodos para cuantificar el C del suelo. El método de combustión seca Dumas determina el carbono total, el cual representa todas las formas químicas de C en el suelo. Otros métodos pueden ser utilizados para cuantificar las variadas formas de carbono. Por ejemplo, el método Walkley & Black determina el carbono orgánico oxidable.”

En referencia al análisis de las muestras en el laboratorio para determinar el contenido de carbono cabe señalar como se anotó anteriormente que se realiza por el **Método Dumas**, también conocido como método de análisis elemental o método de combustión, apunta Chaves (2024), es un procedimiento primario que detecta el contenido total de nitrógeno (N), no apenas el contenido en las proteínas, que garantiza además resultados rápidos, facilidad de uso, seguridad y calidad de los resultados. A menudo se le considera una alternativa al método clásico de Kjeldahl, siendo sin embargo más antiguo que este. Además del contenido de nitrógeno orgánico, el método de combustión también puede utilizarse para analizar el contenido total de nitrógeno, incluidos los componentes inorgánicos. Se utiliza en el análisis de C, N y S del suelo.

Cuadro 4. Ventajas comparativas de métodos analíticos Kjeldahl y Dumas.

Método de Análisis	
Kjeldahl	Dumas
Máxima flexibilidad en el pesaje	Bajo uso de consumibles = bajos costes de análisis
Método de referencia absoluto para todos los tipos de muestras	Todo integrado en un solo aparato
Ideal para los tipos de muestras que cambian constantemente	Tiempo de análisis rápido de 3 a 5 minutos
Desde sistemas manuales sencillos hasta la automatización total, muchas configuraciones posibles	Tecnología prácticamente libre de productos químicos para funcionar sin sistema de extracción de gases
Conformidad con las normas internacionales	Conformidad con las normas internacionales
Análisis está en gran medida automatizado	Genera menos desviaciones en el contenido de proteínas en las muestras de alimentos analizadas
	No requiere espacio en la campana de extracción de gases
	No requiere el uso de sustancias químicas nocivas o tóxicas ni de catalizadores

Fuente: Gerhardt Analytical Systems: <https://www.gerhardt.de/es/know-how/metodos-analiticos/el-metodo-dumas/kjeldahl-contra-dumas/>

La determinación de N con la técnica Dumas requiere de muestras bien homogeneizadas, calentadas en horno de alta temperatura donde la combustión ocurre rápidamente a más de 1.000 °C en presencia de

oxígeno puro. Esto produce principalmente agua, dióxido de carbono (CO₂) y N en forma de diferentes óxidos (NO_x). La mezcla de gases pasa a través de una cámara de reducción que contiene cobre (Cu)

calentado a unos 650 °C. Este paso convierte los óxidos de nitrógeno en nitrógeno elemental y recoge el exceso de oxígeno. Las trampas específicas eliminan el agua residual y el CO₂. El contenido total de N se mide por medio de un detector de conductividad térmica.

Como se aprecia en ecuación siguiente la muestra se mezcla con cobre y luego se calienta a altas temperaturas con la adición de oxígeno (O₂). La mezcla de gases obtenida se oxida en los subproductos agua (H₂O), CO₂, nitrógeno elemental (N₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x), añadiendo de nuevo cobre.

Muestra + O₂ → CO₂ + H₂O + NO_x + O₂ + otros óxidos

CO₂ + H₂O + NO_x + O₂ + Cu → CO₂ + H₂O + N₂ → N₂

De acuerdo con la literatura no existen diferencias significativas entre los análisis realizados mediante el método Kjeldahl y el método de Dumas; sin embargo, el método Dumas tiene la ventaja de ser fácil de utilizar y estar automatizado. También es considerablemente más rápido en lograr resultados que el método Kjeldahl, donde cada medición tarda algunos minutos, en contraposición con la hora o más del método Kjeldahl. Asimismo, no utiliza productos químicos tóxicos perjudiciales, ni tampoco catalizadores.

Importante considerar que el método Kjeldahl consta de tres etapas donde el objetivo del procedimiento de digestión es romper todos los enlaces de nitrógeno de la muestra y convertir todo el nitrógeno unido orgánicamente en iones amonio (NH₄⁺). El carbono orgánico y el hidrógeno forman a su vez dióxido de carbono y agua.

Las diferencias de fondo existentes entre los métodos Kjeldahl y Dumas para analizar nitrógeno son como se aprecia en el Cuadro 4, variadas, pese a que ambos métodos están perfectamente habilitados para su empleo; pese a lo cual viene imponiéndose Dumas por sus atributos y ventajas.

Por su relación con el tema no puede dejar de mencionarse que el método más conocido y utilizado, aunque no necesariamente el más preciso, para determinar materia orgánica es el de **Walkley y Black** (1938); el cual opera mediante oxidación de la MO utilizando dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) y ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄), el cual acelera la reacción de oxidación.

Muestreo y estimación del carbono contenido en el suelo

En la práctica de campo el método desarrollado para conocer y estimar la situación respecto a este importante componente químico consiste básicamente en determinar los contenidos de COS a diferentes profundidades del perfil, o específicamente de forma independiente para cada uno de los horizontes de interés del mismo, según sea el objeto pretendido. Los datos recabados son posteriormente transformados tomando en consideración la Densidad Aparente (DAP)

y el grado de pedregosidad del suelo (FAO, 2002; Chaves, 2024). La estimación aplicada puede ser proyectada a nivel de parcela, localidad, región, país y hasta un continente o zona agroecológica en específico, como puede encontrarse en la literatura disponible.

En lo específico aplicado a la caña de azúcar, la técnica metodológica recomendada para la toma de muestras en el campo fue descrita por Chaves (2022a, 2024), sugiriendo tomar muestras representativas en tres profundidades: 0-20, 20-40 y 40-60 cm, en consideración de visualizar y ponderar correctamente la presencia y el acumulo de CO en profundidad, favorecido por las características y propiedades del sistema radical de la planta, cuya capacidad exploratoria (horizontal-vertical) en el suelo, como es conocido, es excepcional como asegura Chaves (2020c). Deben fijarse estratégicamente puntos de muestreo representativos y suficientes en la plantación, en los cuales “se tomarán 5 muestras con el barreno que constituirán submuestras, las cuales se colocarán en un balde, mezclarán, homogenizarán y “cuartearán” sucesivamente hasta conformar una muestra compuesta de 0,5 kg.”; lo anterior aplicado a cada profundidad.

Se indica adicionalmente en materia de cuidados y prevenciones a tener presentes en torno al manejo de las muestras, que “El COS es una variable muy sensible por lo cual demanda tratamiento especial en su manipulación en todas las fases del proceso, razón que obliga adoptar las medidas preventivas y de cuidado pertinentes. La muestra debe colocarse luego de tomada en condición apropiada para evitar la pérdida de carbono por volatilización como CO₂. El material recolectado debe colocarse en un lugar abierto y fresco evitando la insolación o el sometimiento a condiciones de temperatura inconvenientes por largo tiempo.”

El sitio y momento de muestreo de COS es conveniente que coincida para efectos de estimación y cálculo posterior con una determinación de Densidad Aparente (DAP), y muy deseable, con una prueba de resistencia a la compactación. Para fines de estimación de aporte de C al suelo y secuestro de CO₂ atmosférico es necesario establecer una Línea Base de contenidos valorada en el tiempo, con evaluaciones preferiblemente anuales tomadas en los mismos sitios y condiciones de muestreo.

Como se comentó oportunamente, el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) está estrechamente relacionado con el de materia orgánica del suelo (MOS), estableciendo el vínculo conforme al uso de factores de conversión que pueden variar entre 1,7 para suelos superficiales y 2,5 para subsuelos más compactados; en cuyo caso la relación aproximada tradicional es: COS × 1,72= MOS. En consideración de ese posible sesgo, el factor de conversión de la relación COS/MOS puede variar significativamente entre diferentes suelos y horizontes, motivo por el cual se estima más conveniente y prudente reportar el contenido original de COS sin transformar.

Estimación del CO del suelo

¿Cuánta es la cantidad de CO contenida en un suelo? Pregunta habitual y necesaria responder para poder conocer y dictaminar con buen criterio las ganancias o eventuales pérdidas que puedan estar ocurriendo en un determinado suelo, localidad o sistema agro productivo. Para estimar y aportar un valor representativo se debe contar con la siguiente información básica:

- Conocer el área (m²) de interés a proyectar.
- Conocer la Densidad Aparente (Dap) del terreno, dada en g/cm³.
- Contar con un valor representativo del % COS estimado a la profundidad (cm) deseada.
- A partir de dicha información se procede posteriormente a:
- Calcular el Volumen de suelo del área (m²) vinculada, considerando la profundidad (cm) de interés.
- Calcular el Peso de suelo (toneladas) del área (m²) y la profundidad (cm) consideradas, incorporando y vinculando su Densidad Aparente (Dap).

- Calcular el carbono orgánico (toneladas) contenido en ese volumen (m³) y profundidad (cm) específico de suelo.

En el Cuadro 5 se expone y desarrolla un ejemplo metodológico de cálculo y estimación del carbono orgánico (toneladas) contenido en el suelo de tres fincas con valores de DAp y % COS variable. Se infiere de los resultados alcanzados la significativa influencia que tienen la profundidad (cm) de estimación, el nivel de agregación y la condición textural del suelo expresada por el valor de la Densidad Aparente. Una variación en cualquiera de esos indicadores genera volúmenes y toneladas de suelo diferentes para una misma área, lo que consecuentemente incide sobre el resultado final. Al incorporar además el % de COS determinado en ese terreno, las posibilidades de variación son muy altas.

Cuadro 5. Estimación de la cantidad de CO contenido a una profundidad de 30 cm en el suelo de tres fincas diferentes en Densidad Aparente (Dap) y COS.

Finca	Área (m ²) *	Profundidad (cm)	Dap (g/cm ³)	COS (%)	Volumen Suelo (m ³) a 30 cm **	Peso Suelo (t) a 30 cm ***	COS (t/ha) ****
N° 1	1 hectárea	30	0,85	4,8	3.000	2.550	122,40
N° 2	1 hectárea	30	1,05	3,2	3.000	3.150	100,80
N° 3	1 hectárea	30	1,35	6,5	3.000	4.050	263,25

Estima las toneladas de COS contenidas en los primeros 30 cm en 3 fincas diferentes de 1 hectárea c/u, mediante una relación aritmética que considera la Densidad Aparente (Dap) y el contenido de COS (%) promedio.

* 1 ha = 10.000 m²

** Es el volumen de suelo dado en m³ estimado a una profundidad de 30 cm (10.000 m² x 0,30 m).

*** Corresponde al peso (toneladas) del suelo a la profundidad y con la DAp estimada (3.000 x 0,85).

**** Estima la cantidad (toneladas) de CO contenida en un volumen de suelo (2.550 x 0,048).

La relación entre esos indicadores explica por qué una DAp más alta como acontece en los suelos compactados o arcillosos del Orden Vertisol, conduce a generar un peso mayor en un mismo volumen de suelo determinada a la misma profundidad. Sobre este tópico es interesante comprobar que los valores de DAp presentan importantes y

significativas diferencias genéricas entre tipos de suelo a nivel mundial, que fueron comprobadas por Alvarado y Forsythe (2005) y Abarca *et al* (2018) para el caso particular de Costa Rica. Mencionan los primeros que en 9 órdenes taxonómicos diferentes de suelos en el mundo, los valores de DAp varían entre 0,14-2,00, encontrando los valores más bajos en

Agosto 2024 - Volumen 1 – Número 5

Histosoles y Andisoles, mientras que los más elevados ocurren en suelos Vertisoles. La densidad tiende a aumentar con la profundidad del suelo, debido a la mayor actividad biológica observada superficialmente en el horizonte A, pese a lo cual se encuentra en algunos casos un aumento en profundidades intermedias asociado al pisoteo del ganado y a la carga mecánica aplicada cuando los terrenos se cultivan (Foto 1).

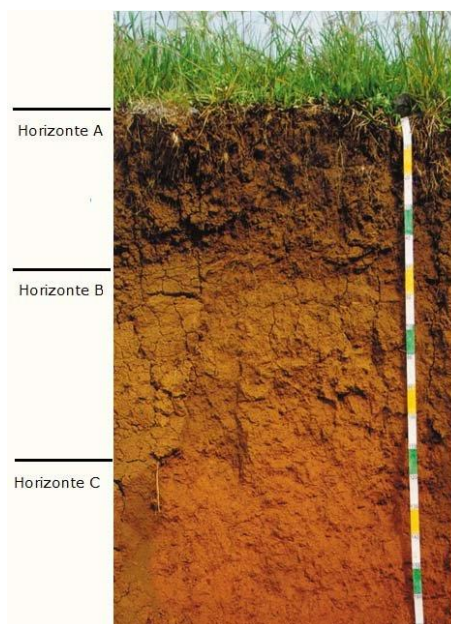


Foto 1. Perfil del suelo con diferenciación de horizontes que determinan en profundidad la Densidad Aparente y los contenidos de COS.

Es por esta razón imperativo y necesario realizar una correcta lectura de la DAP, pues la estimación del contenido de COS y por consecuencia la cantidad CO₂ equivalente incorporado o removido de la atmósfera, lo incorporan en su cálculo como se mostrará próximamente.

Genéricamente y de manera simple es posible desarrollar el mismo cálculo empleando la siguiente ecuación:

$$\text{Masa de COS (t/ha)} = \% \text{ COS} \times P_m \times \text{DAP} \times 10^4$$

Donde:

COS = Carbono orgánico del suelo.

t/ha = Mg ha⁻¹ (mega gramos por hectárea).

P_m = Profundidad de muestreo (0,3 m es el índice estándar de uso internacional).

DAP = Densidad Aparente (g/cm³ = tm⁻³)

10⁴ = 10.000 m.

Un ejemplo de cálculo:

$$\text{Masa de COS en t/ha} = 0,048 \times 0,03 \times 0,85 \times 10.000 = 122,4$$

O también

$$\text{Masa de COS en t/ha} = 4,8 \times 30 \times 0,85 = 122,4$$

Estimación pérdida-ganancia

La conformación de una Línea Base (LB) de COS valorada en el tiempo (años) permite estimar los ingresos (ganancias, adiciones) o en su caso pérdidas (salidas) de carbono orgánico que puedan darse en un determinado periodo de tiempo (t₀-t₁). Siguiendo el mismo ejemplo anterior, se tiene que en la Finca N° 1 los contenidos de COS podrían ser de 122,40 toneladas en t₀ y transcurrido un n de años (t₁) se podría encontrar un valor de 125,20 toneladas, lo que significaría, que: (t₀-t₁) = 122,40 - 125,20 = hay una ganancia o adicionalidad de 2,80 toneladas.

Estimación CO₂ removido

En el campo ambiental y particular de la estrategia NAMA lo que interesa es conocer ¿Cuánto **CO₂ equivalente** es removido de la atmósfera? lo que implica y obliga transformar y convertir el valor de COS a CO₂e para lo cual debe establecerse la constante correspondiente dada por:

- Pesos moleculares del carbono (C)= 12 y oxígeno (O)= 16
- El valor del CO₂ = 44 producto de la relación 12 + 16 x 2
- La constante para pasar de COS a CO₂e (44/12) = 3,67

Dando continuidad al ejemplo se tiene que la remoción estimada es:

$$\text{Remoción en el periodo (t}_0\text{-t}_1\text{)} = 2,80 \times 3,67 = 10,3 \text{ toneladas/ha de CO}_2\text{e.}$$

¿Qué hacer en el cultivo de la caña?

La reflexión e inquietud necesario e ineludible responder virtud del interés inmediato del agricultor en el tema es ¿Qué puedo y debo hacer para mejorar los contenidos de COS en los suelos sembrados comercialmente con caña de azúcar? La respuesta como acontece en un cultivo extensivo expuesto a las severas inclemencias del clima, sujeto a las variaciones edafoclimáticas de los entornos donde se cultiva, las afectaciones fitosanitarias y sometido a las diferentes formas de manejo agronómico de las plantaciones, no resulta la verdad fácil de pronunciar con la certeza y firmeza requeridas. La complejidad de encontrar soluciones prontas y efectivas se ratifica al analizar con detalle el denominado “*ciclo de vida comercial*” involucrado con la producción primaria de caña de azúcar en el país, como lo demuestran Montenegro y Chaves (2022).

Sin embargo, lo cierto es que muchas cosas pueden y debe realizar el productor de caña en el campo y desde la oficina, para pretender mejorar en primera instancia el sitio de producción, lo que permitirá luego esperar que la planta exprese todo su potencial genético intrínseco. Entre esas prácticas y labores se tienen las siguientes entre lo que NO debe hacerse:

- 1) Ubicar un terreno para siembra sin potencial productivo real, pues de resultará muy difícil y sobre todo muy oneroso tornar posible lo que en principio es deficiente y limitado.
- 2) Realizar prácticas de mecanización del suelo cuando las condiciones del clima no son las deseadas, lo que conduce a provocar compactación y erosión.
- 3) Preparar el suelo con impericia y sin sustento en lo técnicamente recomendado, removiéndolo más de lo necesario y requerido. Una labranza excesiva favorece la extracción, exposición y mineralización del material orgánico contenido en el subsuelo favoreciendo la pérdida de nitrógeno por oxidación.
- 4) Emplear equipos y maquinaria pesada innecesaria y descontextualizada de la labor por realizar.
- 5) Permitir y favorecer el paso indebido e innecesario de equipos mecánicos durante el manejo de las plantaciones lo que favorece la compactación y la erosión (Chaves, 2020fh).
- 6) Aplicar agroquímicos innecesarios de alta toxicidad en exceso y con impericia técnica.
- 7) Quemar la plantación para su cosecha sea en pie o con la caña ya cortada.
- 8) Quemar los rastrojos RAC residuales en el suelo.

En relación a lo que por el contrario **SI debe hacer el agricultor**, pueden mencionarse entre otras acciones las siguientes:

- 1) Seleccionar la variedad más apropiada para las condiciones particulares y específicas del entorno donde será cultivada.
- 2) Utilizar semilla de alta calidad dotada de pureza genética comprobada.
- 3) El laboreo vinculado con la preparación, nivelación, surcado y siembra de la plantación comercial se debe realizar bajo principios protocolarios estrictos que aseguren la optimización en todos los sentidos (calidad, momento, intensidad, profundidad).
- 4) Considerar y ponderar de manera razonable la posibilidad de incorporar prácticas de manejo del suelo asociadas con la mínima labranza.
- 5) Incorporar e implementar medidas de conservación de suelos apropiadas (Chaves, 2020k).
- 6) Practicar una corrección y adecuación prudente en el caso de los suelos ácidos (Chaves, 1999, 2017).
- 7) Utilizar abonos orgánicos de calidad, forma, cantidad y momento oportunos.
- 8) Valorar la opción de incorporar bioinsumos debidamente certificados. El biocarbón es liviano, poroso y presenta una alta capacidad de retención de agua, lo que lo habilita como una buena opción comercial.
- 9) En lo posible, viable y factible intercalar con plantas asociadas, particularmente leguminosas (Chaves 2020j).
- 10) Practicar la rotación de cultivos cuando sea permisible.
- 11) Racionalizar y optimizar el empleo de agroquímicos, en lo particular fertilizantes químicos y herbicidas.

- 12) Controlar la disposición, conducción y buen aprovechamiento del recurso hídrico (riego, lluvia) mediante la aplicación óptima y el desagüe oportuno y efectivo de los excedentes.
- 13) Aprovechar los Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) buscando su compostaje y reincorporación (economía circular).
- 14) Manejar la plantación con base en las necesidades establecidas por su ciclo biológico y fenología particular del cultivo.

En un estudio desarrollado por García *et al.* (2018) en donde se evaluó comparativamente el efecto e impacto de la cosecha de plantaciones de caña de azúcar en verde y quemada, sobre la calidad del suelo, se encontró al evaluar variables químicas, físicas y biológicas del suelo, que la quema no afectó significativamente la mayoría de las propiedades químicas, y que las más relevantes fueron la disminución y bloqueo (antagonismo) del K^+ , y el deterioro de los contenidos de materia orgánica. Esa condición indujo el deterioro de la estructura y la disminución significativa de la actividad biológica, provocando la reducción de la capacidad productiva de los suelos. Concluyeron esos investigadores, que *“La cosecha de caña mediante la quema constituye un elemento negativo que contribuye a la degradación del medio edáfico.”*

Como se infiere de lo expuesto, son más las cosas buenas con actitud mejoradora por hacer que las negativas por dejar de practicar, lo que visto sin embargo en doble vía y de manera integral tal como se indicó y recomendó anteriormente, llega a sumar en la sana intención e imperiosa necesidad de recarbonizar el suelo y evitar por otro lado la pérdida innecesaria del COS. Es mucho lo que puede y debe hacerse sin necesidad de incorporar muchas veces gastos extraordinarios que eleven los costos de producción, y atenten contra la rentabilidad final de la agro empresa.

Conclusión

El suelo constituye un recurso natural muy económico, pero relativamente escaso para uso agropecuario competitivo, que resulta esencial sobre todo en los sistemas agroproductivos de carácter extensivo como es el caso de la caña de azúcar. La sustentabilidad, rentabilidad y capacidad competitiva de estos sistemas depende en alto grado de la calidad y forma de manejo que se haga del substrato; esto visualizado no apenas desde una perspectiva productiva y económica mediática sino también ambiental de futuro virtud de las relaciones e implicaciones que tiene.

El suelo es considerado por los científicos como el segundo depósito más grande de carbono después de los océanos, pudiendo el mismo perderse y liberarse a la atmósfera a través de la descomposición y mineralización de la materia orgánica y la oxidación del carbono inorgánico contenidos en el suelo. El cambio climático es sin objeción una de las principales preocupaciones actuales, y su mitigación una meta futura de todos por atender y procurar satisfacer lo más pronto posible; es así, como la retención e incremento que se pueda hacer del carbono en el suelo constituye una de las formas efectivas y viables de mitigar el efecto del aumento de CO₂ inductor del calentamiento de la atmósfera.

En este caso, acontece que el COS representa una fuente importante generadora de Gases de Efecto Invernadero (GEI), razón por la cual cumple un rol determinante en el ciclo global del carbono. Por lo tanto, es importante conservar y aumentar en lo posible los contenidos de COS con el objeto de mitigar los efectos provocados por el cambio climático y mejorar adicionalmente con ello la sostenibilidad y la productividad del suelo en el largo plazo.

Acontece, sin embargo, que el COS puede ser liberado a la atmósfera de manera rápida e intensiva a través de la degradación del suelo, la erosión y la deforestación. La degradación como se ha comentado con amplitud (Chaves 2017, 2020b) es un problema muy complejo por su naturaleza multivariada, integral en sus efectos, de avance creciente y sistemático en todo el mundo debido a la intensificación de la agricultura, el mal uso y sobreexplotación de los recursos y la progresiva urbanización que reduce y agota la disponibilidad de terrenos aptos, que reducen la cantidad de COS y contribuyen ostensiblemente con la aceleración del indeseable cambio climático.

Los beneficios y ventajas promovidas por el COS son amplias y muy diversas al estar constituido por compuestos de diversa naturaleza y composición química y estado variable de degradación, pues interviene sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo, aumenta su Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y mejora la capacidad tampón sobre el pH. Como resultado de la mineralización de la MOS se liberan diversos nutrientes esenciales para las plantas, la mayoría de los cuales se encuentran presentes en forma deficitaria en el suelo. El C orgánico interviene en la biota del suelo especialmente sobre las propiedades microbiológicas, actuando básicamente como fuente energética para los organismos heterótrofos del suelo (no pueden producir su propio alimento, sino que se nutren de otras fuentes de carbono orgánico). Se ha comprobado que el COS actuando a través de los efectos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, se ha constituido como uno de los principales determinantes potenciadores de su productividad y sostenibilidad.

En síntesis, el secuestro de carbono atmosférico que habilita su retorno y recarbonización implica incorporar cambios permanentes en las labores de manejo del suelo, lo que no se logra con prácticas aisladas y muchas veces discontinuas que sólo se aplican por periodos cortos, lo que garantiza que el aporte de carbono sea creciente y sostenido en el tiempo en beneficio del ambiente y el sistema productivo.

En este contexto existen algunas prácticas agrícolas de campo sencillas de relativa fácil implementación y bajo costo, que en el cultivo de la caña de azúcar pueden aportar y contribuir ostensiblemente con la conservación y el incremento de los contenidos de carbono en el suelo en el mediano y largo plazo, como son entre otras las nombradas a continuación:

➤ **Fomentar la zonificación agroecológica del cultivo:** para todos los efectos sean ambientales, productivos, económicos, urbanísticos, sociales y técnicos, promover la zonificación del cultivo siguiendo principios, protocolos y criterios apegados a la agroecología, como

recomendara Chaves (2022bc), es lo mejor que le puede suceder a la agroindustria de la caña de azúcar, pues con ello es posible optimizar y maximizar la expresión de factores potenciales favorables, evitando y minimizando los negativos. Lo anterior implicaría posiblemente tener que mecanizar menos, utilizar menos agroquímicos y fertilizantes, gozar de una mejor fitosanidad, contar con suelos más sanos, menos degradados y más fértiles, aprovechar el recurso hídrico disponible y las bondades climáticas, todo lo cual se traduciría en menores costos y mayor rentabilidad resultante de una mayor productividad agrícola e industrial y una mayor y mejor relación beneficio/costo. El tema y la meta no es fácil de operar pero se debe iniciar pues de lo contrario será la legislación la que fije la ruta a seguir.

- **Manejo de plantaciones con base en la fenología del cultivo:** las operaciones y labores de campo deben corresponderse estricta e inequívocamente con los cambios naturales de índole fisiológico/metabólico que se producen en las plantas, los cuales están directamente relacionados con los cambios climáticos. Labores como siembra, fertilización, riego, drenaje, desaporca/aporca, control de malezas, maduración, floración y cosecha deben coincidir obligadamente con las necesidades fisiológicas propias del desarrollo general que establece el ciclo vegetativo del cultivo de la caña en su entorno, lo que obliga establecer, cumplir y respetar “*los calendarios agrícolas naturales*”. Disponer de información climática de calidad resulta inexcusablemente obligada en este acápite pues sin ello se carece de la base técnico-científica necesaria para actuar (Chaves, 2019a, 2020ad, 2023a).
- **Uso de abonos orgánicos:** la composta de residuos biomásicos e incorporación de materiales orgánicos de calidad certificada, no cualquier producto disponible en el comercio, constituyen una fuente importante de nutrientes accesibles para las plantas; contribuyendo adicionalmente con el incremento del carbono al incorporar materia orgánica al suelo humificada (Chaves, 2017, 2019b, 2020ij, 2023bcd). Es imperativo y muy necesario potenciar, habilitar y disponer el uso masivo de biocarbón en las plantaciones comerciales de caña de azúcar de Costa Rica en el menor tiempo posible, dentro de las estrategias para capturar carbono en el suelo.
- **Practicar el compostaje:** es importante fomentar alternativamente el aprovechamiento de los residuos biomásicos del cultivo (agricultura circular) buscando su incorporación y compostaje, pues una buena práctica de manejo sustentable de los residuos debería satisfacer parcialmente los requerimientos del cultivo. La elaboración de compost constituye una muy buena práctica de manejo y aprovechamiento a considerar, ya que mediante un proceso biológico controlado y técnicamente bien orientado, es posible obtener un producto de alto valor comercial y nutricional (Velarde *et al*, 2004). Es importante mencionar, que los residuos provenientes de una planta de caña cultivada en condiciones de fertilidad natural, posee una velocidad de mineralización muy lenta debido a su alta relación C/N motivo por el cual su aporte al COS no será tan significativo, como para contrarrestar las pérdidas.

Aseguran De León *et al.* (2016), que para que se descomponga el 95% de los residuos, deben mediar cerca de 2,4 años.

- **Control, regulación, adecuación y optimización de la labranza:** representa posiblemente una de las medidas junto con la fertilización de mayor impacto para satisfacer el objetivo deseado y procurado, pues en definitiva el cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica presenta grandes limitantes en esta área operacional. Priorizar labores de campo y equipos de acuerdo a necesidades reales; escalar y dimensionar el uso de equipos mecánicos de acuerdo a las condiciones de campo del lugar; protocolizar y calendarizar actividades de preparación, siembra y manejo de plantaciones; optimizar la cantidad e intensidad en la labor de mecanización de terrenos; evitar el tránsito innecesario y/o excesivo de equipos en plantaciones, entre otras, son medidas muy necesarias y efectivas. Está demostrado que la práctica de sembrar y renovar plantaciones en los suelos dedicados al cultivo de la caña (cada 5 o 6 años), pierden buena parte del carbono almacenado en todo un ciclo comercial de cosechas, razón por la que ha establecido una relación directa entre la labranza del suelo y la mineralización del carbono.
- **Practicar una agricultura conservacionista:** la agricultura de conservación implica incorporar prácticas de cultivo que tienen como objetivo principal conservar el suelo, evitar su degradación y mejorar su estructura, como acontece con la adopción de medidas diversas de contención de la erosión (hídrica y eólica), evitar la compactación y la acidificación. Diversas opciones de mejora existen en esta estrategia, como lo apuntara Chaves (2020k). Estas prácticas ayudan al aumento del carbono al conservar la materia orgánica y evitar la degradación del suelo.
- **Regular y reducir el uso de plaguicidas y fertilizantes químicos:** la tendencia pragmática de maximizar el uso de plaguicidas y fertilizantes químicos creyendo lograr con ello una mayor eficiencia y eficacia en su empleo es un craso error, pues como está demostrado, esa acción puede por el contrario afectar la biota y estructura del suelo y reducir con ello la cantidad de carbono. La optimización en el uso de agroquímicos contribuye a conservar y aumentar el contenido de carbono del suelo.
- **Optimizar el uso de Nitrógeno:** las valoraciones realizadas en materia de fuentes generadoras de GEI (LAICA, 2022ab) han demostrado que la fertilización nitrogenada constituye el mayor emisor de gases, propiamente óxido nitroso (N₂O), al aportar sectorialmente cerca del 63,7% de los mismos. Esta circunstancia obliga a regular, reducir en lo pertinente y optimizar las adiciones de N, lo cual es viable y factible mejorar mediante valoraciones técnicamente razonadas y justificadas, operar con programas ajustados a necesidades reales, realizar aplicaciones técnicamente bien orientadas y hacer uso de fertilizantes de liberación controlada, lenta y estabilizados para uso en la caña de azúcar, como lo recomendara Chaves (2021d).
- **Corrección y adecuación de suelos:** el uso de enmiendas es incontestablemente necesario considerar en el caso particular de los suelos ácidos buscando su adecuación u neutralidad, como acontece en buena parte de los suelos cañeros del país,

particularmente del Orden Ultisol y Andisol. La incorporación debe sin embargo realizarse de manera técnica siguiendo y respetando los principios que la regulan como expusiera Chaves (1999). Debe tenerse presente que el encalado aporta CO₂ al medio que contribuye con los GEI, lo cual fue estimado en el caso nacional en un 2,2% para la caña (LAICA, 2022a).

- **Evitar y cortar la continuidad de la práctica de quemar:** el fuego es en definitiva y por razones obvias enemigo directo de la biodiversidad, el acumulo de biomasa y carbono del suelo; motivo por el cual se debe evitar quemar las plantaciones para su cosecha y sobre todo los residuos depositados en el suelo. Eliminar la materia prima de carbono y los agentes que participan de su descomposición constituye un contrasentido para cualquier iniciativa de recarbonización que se pretenda implementar; lo mismo que para cualquier sistema productivo que pretenda ser sostenible y competitivo en el tiempo. La contribución de esta práctica como aporte de CO₂ a la atmósfera se estimó según LAICA (2022a) en un significativo 15,8% como fuente de emisión.
- **Asociación de cultivos:** La siembra de cultivos asociados con la caña, principalmente leguminosas como apuntara Chaves (2020j, 2023cd), con el objeto de proteger el suelo, mejorar su estructura, incorporar nitrógeno y de ser viable generar una renta adicional; es una práctica beneficiosa sobre todo en plantaciones pequeñas propias de pequeños agricultores. Esta medida ayuda a aumentar el carbono del suelo al incrementar la cantidad de materia orgánica rápidamente mineralizable presente. En el caso de la caña esta opción debe ser revisada y operada como técnicamente corresponde, pues deben cumplirse y respetarse algunos principios básicos que eviten una relación competitiva contraria al fin procurado.
- **Rotación de cultivos:** la rotación de cultivos implica plantar sucesivamente diferentes tipos de cultivos en un mismo terreno en diferentes periodos, que en el caso de la caña no puede ser inferior a cinco años. La medida ayuda a “descansar el suelo”, mejorar su estructura y aumentar la cantidad de materia orgánica, lo que a su vez puede acrecentar el carbono del suelo (Chaves, 2020j).

Como corolario, es importante e inexcusable no reconocer en los tiempos actuales que el COS tiene un importante y significativo valor de alcance ambiental, productivo, económico y social que debe necesariamente pese a sus limitaciones y dificultad, revalidarse, incorporarse y medirse como novedad en cualquier estimación que sobre toda actividad agroproductiva, en este caso agroindustrial aplicada a la caña de azúcar, se realice. Es imperativo generar, modelar y ajustar un protocolo metodológico y procedimental que permita medir y estimar el impacto económico provocado por una disminución, o en su caso, un aumento, observado en el contenido de COS sobre los rendimientos agroindustriales del cultivo.

Los resultados investigativos mundiales recientes demuestran la ocurrencia de cambios notables y muy preocupantes de magnitud significativa, en el contenido de MO y CO acumulados en los suelos de uso agropecuario, operados bajo los actuales sistemas de producción

convencional; sugiriendo que los mismos deben ser necesariamente revertidos y/o ajustados en el mediano y largo plazo mediante la implementación de estrategias efectivas que eviten y mitiguen las pérdidas por un lado, y acrecienten la recarbonización y el acumulo de CO en el suelo por el otro. Esa es una obligación institucional y profesional de todos los involucrados en el negocio agropecuario, particularmente los de la agroindustria cañero-azucarera nacional.

Se requiere imponer en la coyuntura ambiental actual un profundo cambio de paradigma hacia el establecimiento de sistemas agropecuarios y alimentarios que sean más resilientes, más productivos y más sostenibles, en donde la agricultura en sentido amplio y el uso y el manejo que se da al suelo, contribuyan a bajar su alta participación en las emisiones de GEI promotores del calentamiento global.

Como en otras oportunidades se ha expresado (Chaves, 2022d) y cabe en esta ocasión reiterar virtud de su necesidad, actualidad y validez, es imperativo **descarbonizar la atmósfera y recarbonizar el suelo**, misión en la cual el manejo óptimo del carbono del suelo es esencial. Esa es la obligación, aspiración y meta de todos.

Literatura citada

- Abarca Monge, S.; Arguedas Acuña, F.; Soto Blanco, R. 2018. **Carbono orgánico del suelo y variación del nitrógeno en fincas ganaderas de cría**. Alcances Tecnológicos (Costa Rica) 12 (2):05-13.
- Alvarado, A.; Forsythe, W. 2005. **Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica**. Agronomía Costarricense 29 (1):85-94.
- Curi, N.; Iturri Larach, J.O.; Kämpf, N.; Moniz, A.C.; Ferreira Fontes, L.E. 1993. **Vocabulario de Ciência do Solo**. Campinas. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 90 p.
- Chaves, M. 1999. **La práctica del encalado de los suelos cañeros en Costa Rica**. En: Congreso de ATACORI "Randall E. Mora A.", 13, Guanacaste, Costa Rica, Sol Playa Hermosa Beach Resort-Condovac La Costa, 16-18 de setiembre, 1999. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI). p: 216-223.
- 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, Hotel Crowne Plaza San José Corobicí, del 25 al 27 de octubre, 2017. Memorias. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). 6 p.
- Chaves Solera, M.A. 2017. **Suelos, nutrición y fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica**. En: Seminario Internacional Producción y Optimización de la Sacarosa en el Proceso Agroindustrial, 1, Puntarenas, Costa Rica, 2017a. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), octubre 10 al 12, Hotel Double Tree Resort by Hilton. 38 p.
- Chaves Solera, M.A. 2019a. **Clima y ciclo vegetativo de la caña de azúcar**. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1 (7): 5-6, julio.
- Chaves Solera, M.A. 2019b. **Entornos y condiciones edafoclimáticas potenciales para la producción de caña de azúcar orgánica en Costa Rica**. En: Seminario Internacional: *Técnicas y normativas para producción, elaboración, certificación y comercialización de azúcar orgánica*. Hotel Condovac La Costa, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 2019. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 15, 16 y 17 de octubre, 2019. 114 p.
- Chaves Solera, M.A. 2020a. **Atributos anatómicos, genético y eco fisiológicos favorables de la caña de azúcar para enfrentar el cambio climático**. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(11): 5-14, mayo.
- Chaves Solera, M.A. 2020b. **Participación del clima en la degradación y mineralización de la materia orgánica: aplicación a la caña de azúcar**. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(12): 6-17, junio.
- Chaves Solera, M.A. 2020c. **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. 2020d. **Clima, germinación, ahijamiento y retoñamiento de la caña de azúcar**. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(14): 6-14, julio.
- 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, acidez del suelo y productividad agroindustrial de la caña de azúcar en Costa Rica**. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(18): 8-17, agosto.
- Chaves Solera, M.A. 2020h. **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. 2020i. **Materia orgánica y disponibilidad de nitrógeno para la caña de azúcar**. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2 (21): 6-16, octubre.

- Chaves Solera, M.A. 2020j. **Abono verde, consociación y rotación de cultivos en caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2 (22): 5-19, octubre.
- Chaves Solera, M.A. 2020k. **Principios conservacionistas aplicados a la caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2 (25): 6-14, diciembre.
- Chaves Solera, M.A. 2021a. **Óxido nitroso (N₂O) y uso del nitrógeno en la caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3 (19): 5-29, setiembre.
- Chaves Solera, M.A. 2021b. **Nitrificación y pérdidas potenciales de nitrógeno en suelos cañeros.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3 (20): 6-24, setiembre.
- Chaves Solera, M.A. 2021c. **Amonificación y volatilización de nitrógeno en suelos cañeros.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3 (21): 6-22, octubre.
- Chaves Solera, M.A. 2021d. **Fertilizantes de liberación controlada, lenta y estabilizados para uso en la caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3 (25): 6-23, noviembre-diciembre.
- Chaves Solera, M.A. 2022a. **Muestreo de suelos agrícolas: aplicación a la caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4 (14): 5-22, julio.
- Chaves Solera, M.A. 2022b. **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. 2022c. **Zonificación agroecológica del cultivo de la caña de azúcar: elementos básicos para su implementación en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4 (22): 5-29, octubre.
- Chaves Solera, M.A. 2022d. **Descarbonizar la atmósfera y recarbonizar el suelo: elementos promotores de productividad y competitividad en la producción sostenible de caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4 (24): 5-25, noviembre.
- Chaves Solera, M.A. 2023a. **Sistema fotosintético: motor natural de eficiencia de la caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 5 (5): 5-18, marzo.
- Chaves Solera, M.A. 2023b. **Residuos y derivados de la agroindustria cañero-azucarera ¿Qué se produce? ¿Qué se genera? ¿Qué se aprovecha?** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 5 (14): 5-29, julio.
- Chaves Solera, M.A. 2023c. **Uso de abono verde en el cultivo de la caña de azúcar: potencial y condiciones para su empleo en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 5 (19): 5-29, setiembre.
- Chaves Solera, M.A. 2023d. **Abonos verdes en el cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica: apuntes y aproximación para su manejo agronómico.** Heredia, Costa Rica, octubre. 103 p.
- Chaves Solera, M.A. 2024. **NAMA Caña de Azúcar Costa Rica. Muestreo de Suelos y Gases del Piloto Nacional Caña de Azúcar.** San José, Costa Rica. Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar-LAICA. 90 p.
- De León, O.M.; González, H.M.; Cortegaza, A.P.L.; Pérez, I.M.; Villegas, D.R. 2016. **Aporte de nutrientes a partir de los residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar.** En: Encuentro ATAM- ATAC., 3, Centro de Convenciones Lázaro Peña, La Habana, Cuba, 2016. La Habana.
- Eswaran H., E.; Van Den Berg, Reich, P. 1993. **Organic carbon in soils of the world.** Soil Science Society of America Journal 57: 192-194.
- FAO. 2001. **Soil carbon sequestration for improved land management.** World soil reports 96. Food and Agriculture and Organization (FAO), Rome. 58 p.
- FAO. 2002. **Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos.** Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Reporte 96. Roma, Italia. 70 p.
- FAO. 2016. **Estado Mundial del Recurso Suelo. Resumen Técnico.** Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma, Italia. 80 p.
- FAO. 2017. **Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto.** Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma, Italia. 90 p.
- FAO. 2019. **Carbono Total del Suelo. Método de combustión seca Dumas.** 2da versión. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma, Italia. Red mundial de laboratorios de suelos GLOSOLAN, octubre. 12 p.
- García, Y.; Vega, A.; Castro, R. 2018. **Efecto de dos sistemas de cosecha de la caña de azúcar sobre la calidad del suelo en Cantón Milagro, Ecuador.** Acta Agrícola y Pecuaria (Ecuador) 4 (2): 60-68, mayo-agosto.
- Gifford, R.M. 1994. **The global carbon cycle: A viewpoint on the missing sink.** Australian Journal of Plant Physiology 21: 1-15.
- González, H.M.; Arcia, J.; Pérez, E.; López, S.T. 2016. **Simulación de la dinámica del carbono orgánico del suelo frente al cambio climático en Matanzas.** Revista Ingeniería Agrícola (Cuba) 6 (3): 54-59.
- Henríquez H., C.; Cabalceta A., G. 1999. **Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola.** San José, Costa Rica. 1. ed. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). 112 p.
- IPCC. 2013. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis.** In: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y.

- Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
- IPCC. 2014. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. In: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 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.
- Lal, R. 2003. **Erosión del suelo y el presupuesto global de carbono**. Environmental International N° 29: 437-450.
- Lavelle, P.; Spain, A.V. 2005. **Soil ecology**. 2nd. Printing. Dordrecht, Netherlands, Springer. 654 p.
- Marek K, J.; Lal, R. 2003. **Manejo de cultivos para el secuestro de carbono en el suelo**. Critical Reviews in Plants Sciences 22 (6): 471- 502.
- Montenegro Ballesteros, J.; Chaves Solera, M. 2022. **Análisis de ciclo de vida para la producción primaria de caña de azúcar en seis regiones de Costa Rica**. Revista de Ciencias Ambientales (UNA). Vol 56 (5): 96-119, enero-junio.
- Oldeman, L.R.; Hakkeling, R.T.A.; Sombroek, W.G. 1991. 2 ed. **World map of the status of humaninduced soil degradation: an explanatory note**. United Nation Environment Programme, Nairobi.
- Panichini P., M.; Ovalle M., C. 2020. **Secuestro de carbono en suelos, opción real para la mitigación**. TIERRA ADENTRO N° 112. Revista del Instituto de Investigaciones Agropecuarias – INIA (Chile): Preparando la agricultura para el Cambio Climático, enero. p: 16-20.
- Paul, E.A.; Harris, D.; Klug, M.J.; Ruess, R.W. 1999. **The determination of microbial biomass**. In: G.P. Robertson, D.C. Coleman, C.S. Bledsoe, and P. Sollins. Standard soil methods for long-term ecological research. Oxford University Press. New York. p: 291-317.
- Segura Castruita, M.A.; Sánchez Guzmán, P.; Ortiz Solorio, C.A.; Gutiérrez Castorena, M.C. 2005. **Carbono Orgánico de los Suelos de México**. Terra Latinoamericana 23 (1): 21-28, enero-marzo.
- Soil Survey Staff. 1999. **Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys**. Segunda Edition. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436.
- Swift, R.S. 2001. **Sequestration of carbon by soil**. Soil Science 166: 858-871.
- 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 01 ag. 2024. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>
- Velarde Sosa, E.; De León Ortíz, M.; Cuellar Ayala, I.; Villegas Delgado, R. 2004. **Producción y Aplicación de Compost. Orientado a las condiciones de la agroindustria azucarera**. Primera Edición. La Habana, Cuba. Unidad de Producciones Gráficas del MINREX. 182 p.

CRÉDITOS BOLETÍN AGROCLIMÁTICO

Producción

Karina Hernández Espinoza, Meteoróloga (Coordinadora y editora)

Katia Carvajal Tobar, Ingeniera Agrónoma

Nury Sanabria Valverde, Geógrafa

Marilyn Calvo Méndez, Geógrafa

DEPARTAMENTO DE DESARROLLO
INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL

Recomendaciones agrícolas

Erick Chavarría Soto, Ingeniero Agrónomo

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES
LIGA AGRÍCOLA INDUSTRIAL DE LA CAÑA DE AZÚCAR

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