

Periodo del 28 de noviembre al 11 de diciembre 2022

RESUMEN DE LAS CONDICIONES DE LA QUINCENA DEL 14 AL 27 DE NOVIEMBRE

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

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

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

Los promedios de lluvia acumulada a nivel diario varían según la región azucarera. Se registraron valores acumulados de lluvia diaria entre 0 - 7.18 mm, excepto los días 25 y 27 con montos de 18.97 mm y 16.39 mm respectivamente en la **Región Guanacaste Este**; por su parte **Guanacaste Oeste** registra entre 0.04 - 8.92 mm, excepto los días del 25 al 27 con lluvias que oscilan entre los 23.2 mm a 27.1 mm; al tiempo que la **Región Norte** reporta entre 3 - 24.32 mm, excepto los días 19 y 27 que registran montos de 52 mm y 40.12 mm respectivamente. La **Región Puntarenas** presentó entre 0 - 5.4 mm, excepto los días 23 con 10.9 mm y el 27 con 34.1 mm; La **Región Sur** muestra un periodo de 7 días con lluvias entre 0.1 - 7.4 mm y el periodo restante con montos entre 12.6 mm a un máximo de 47.8 mm el día 27; por su parte la **Región Turrialba** acumula lluvias entre 0.4 - 5.14 mm, excepto los días 26 y 27 con montos de 13.51 mm y 21.2 mm respectivamente; por último, la **Región Valle Central** registra entre 0.6-16.24 mm de lluvia en todo el periodo de análisis. Donde se asume un día con lluvia si iguala o supera 1 mm.

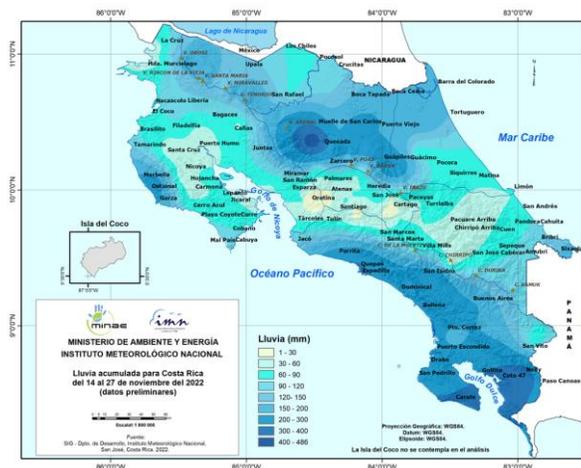


Figura 1. Valores acumulados de la precipitación (mm) durante la quincena 14 al 27 de noviembre del 2022.

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

De la figura 2 a la figura 8, se muestran los valores diarios pronosticados de las variables lluvia (mm), velocidad del viento (km/h) y temperaturas extremas (°C) para las regiones azucareras. A inicios de la semana la **Región Norte** tendrá humedad baja, pero para el fin de semana que espera que aumente, a media semana se prevé un aumento en la velocidad del viento, pero se disminuirá para el fin de semana; hay un leve incremento de la temperatura a media semana. La **Región Guanacaste (Este y Oeste)** mantendrá humedad baja hasta el viernes, para el sábado y el domingo se espera que aumente, la velocidad del viento aumentará a lo largo de la semana, pero se espera que disminuya hacia el fin de semana, habrá temperaturas más altas a media semana. En la **Región Sur** se espera contenido de humedad alta principalmente a partir del jueves, el viento irá disminuyendo, pero aumentará el fin de semana, habrá un leve incremento en las temperaturas a media semana. El **Valle**

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

Central (Este y Oeste) tendrá contenido de humedad alta a partir del jueves, la velocidad del viento aumentará durante la semana y se espera una disminución el fin de semana, las temperaturas se mantendrán constantes, pero habrá un incremento de miércoles a viernes.

Para la **Región Turrialba (Alta y Baja)** se prevé un ligero incremento de humedad el fin de semana, seguido de humedad alta todo el día, habrá un incremento en la velocidad del viento durante la semana y las temperaturas se mantendrán relativamente constantes a excepción del miércoles y jueves en que se espera un aumento de éstas. La **Región Puntarenas** tendrá un aumento de humedad a partir del jueves, las ráfagas de viento serán mayores a inicios de la semana, pero disminuirá luego del jueves y habrá un incremento de las temperaturas a media semana.

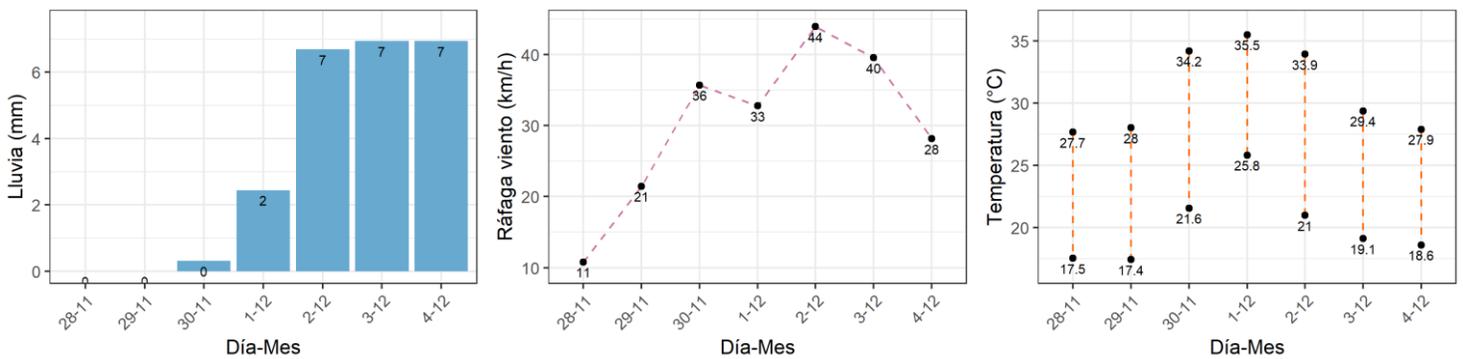


Figura 2. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 28 de noviembre al 04 de diciembre en la región cañera Guanacaste Este.

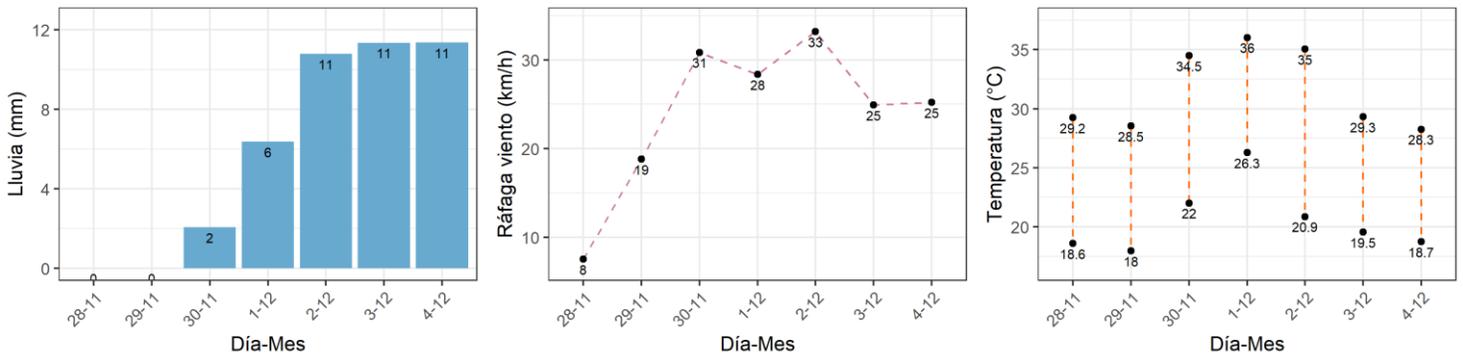


Figura 3. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 28 de noviembre al 04 de diciembre en la región cañera Guanacaste Oeste.

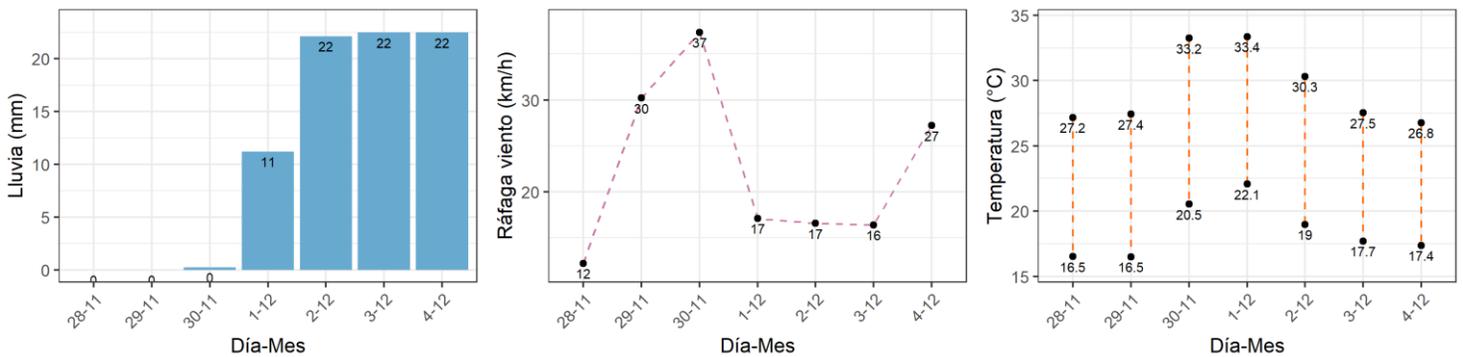


Figura 4. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 28 de noviembre al 04 de diciembre en la región cañera Puntarenas.

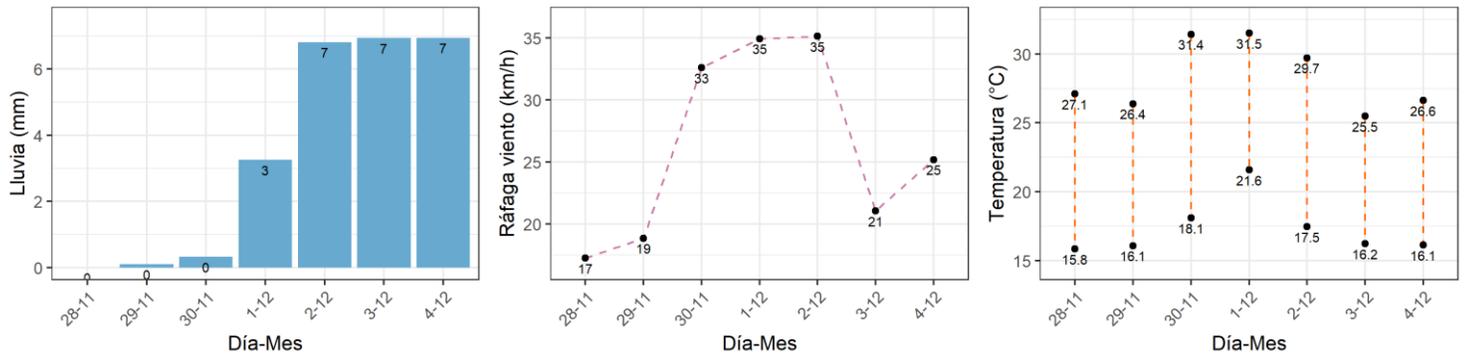


Figura 5. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 28 de noviembre al 04 de diciembre en la región cañera Región Norte.

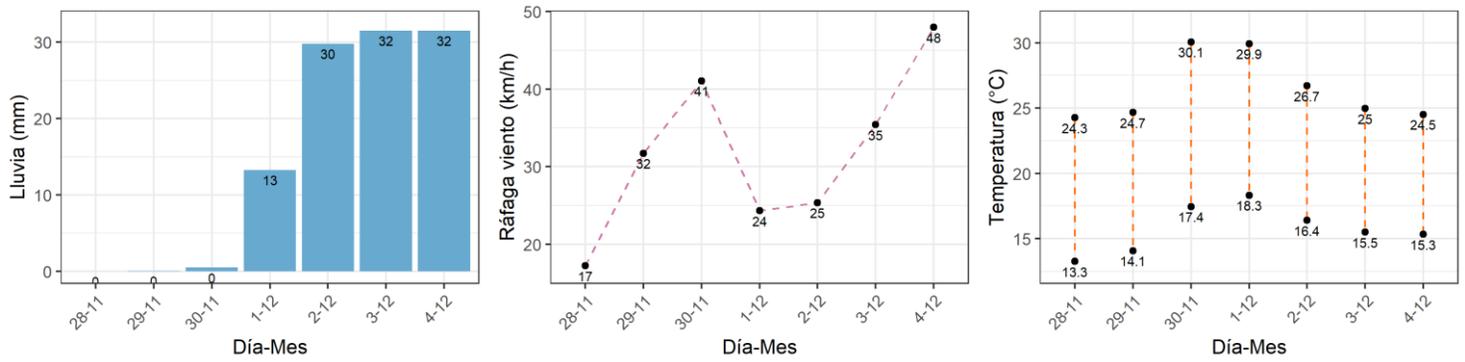


Figura 6. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 28 de noviembre al 04 de diciembre en la región cañera Valle Central (Este y Oeste).

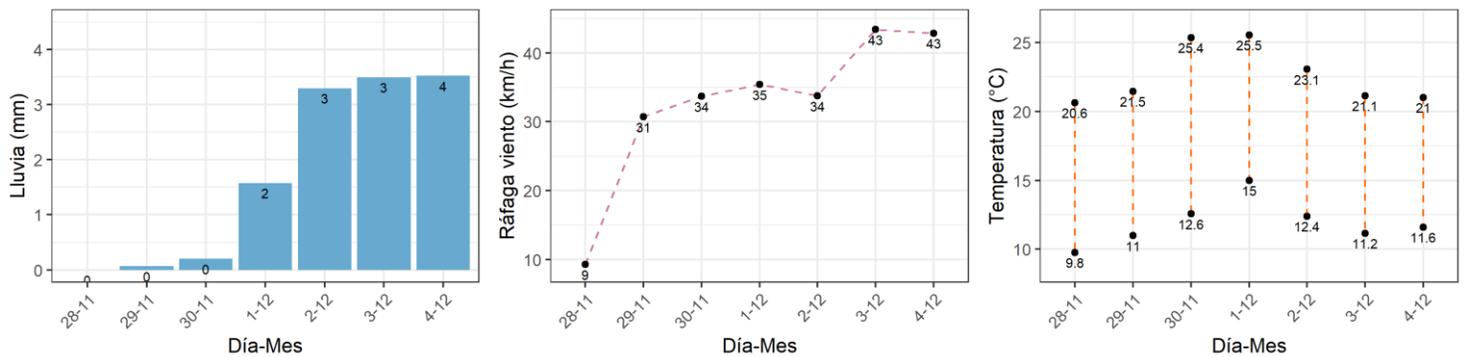


Figura 7. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 28 de noviembre al 04 de diciembre en la región cañera Turrialba (Alta y Baja).

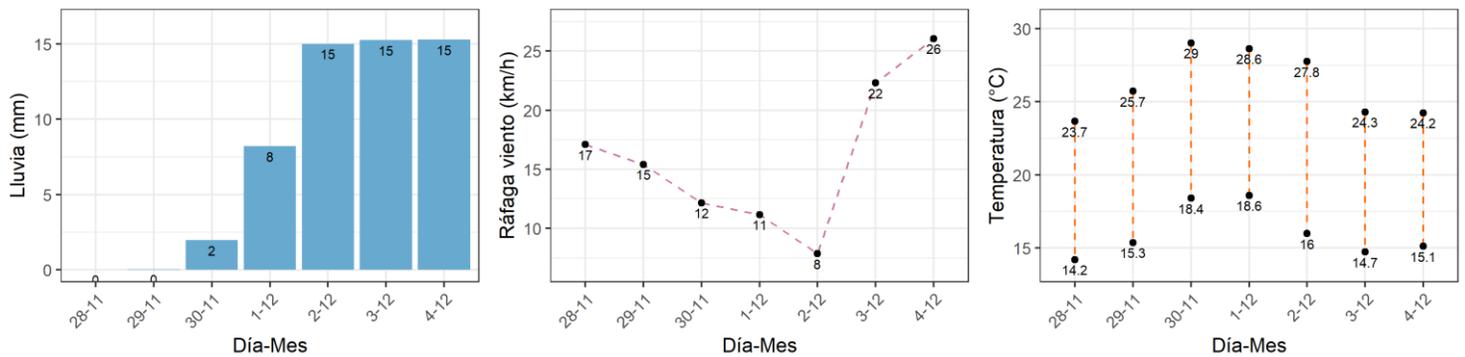


Figura 8. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 28 de noviembre al 04 de diciembre en la región cañera Región Sur.

Noviembre 2022 - Volumen 4 – Número 24

TENDENCIA PARA EL PERIODO DEL 05 AL 11 DE DICIEMBRE

Para este periodo se espera un ambiente de lluvias más recurrente en el Caribe y Zona Norte. El Pacífico Norte y Valle Central tendrán episodios de vientos alisios moderados con ocasionales ráfagas fuertes. El Pacífico Central y Sur tendrán lluvias aisladas vespertinas.

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 el periodo del 21 al 27 de noviembre se presentaron condiciones de alta saturación en la Región Guanacaste Oeste, Región Sur y Región Norte, en el resto de las zonas cañeras la humedad se mantuvo entre media y baja.

Como se observa en la figura 09, la Región Guanacaste Oeste tiene entre 30% y 90%, la Región Guanacaste Este presenta entre 30% y 75%, la Región Puntarenas está entre 30% y 75%, la Región Valle Central Oeste tiene entre 60% y 90% mientras que la Región Valle Central Este presenta entre 45% y 60%.

La Región Norte presenta entre 30% y 100%, la Región Turrialba Alta (> 1000 m.s.n.m.) tiene entre 45% y 100%, la Región Turrialba Baja (600-900 m.s.n.m.) está entre 45% y 60%. La Región Sur varía entre 15% y 100% de humedad.

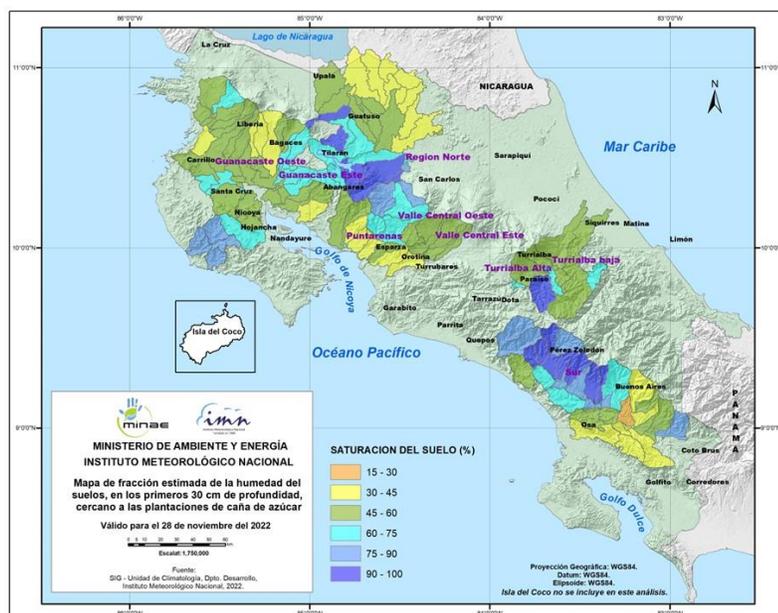


Figura 09. Mapa de fracción estimada de la humedad en porcentaje (%), en los primeros 30 cm de profundidad, cercano a las plantaciones de caña de azúcar, válido para el 28 de noviembre del 2022.

LAICA Y EL IMN LE RECOMIENDAN

Mantenerse informado con los avisos emitidos por el IMN en:

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

NOTA TÉCNICA

Descarbonizar la atmósfera y recarbonizar el suelo: elementos promotores de productividad y competitividad en la producción sostenible de caña de azúcar

Ing. Agr. Marco A. Chaves Solera, M.Sc.
chavessolera@gmail.com
Especialista en el Cultivo de la Caña de Azúcar

Introducción

La humanidad entera, el comercio y por consecuencia la agricultura y la alimentación están sumidas actualmente en una compleja, confusa y difícil coyuntura que debe ser resuelta de manera oficiosa y satisfactoria en varios ámbitos; lo grave, sin embargo, es que el tiempo es el mayor enemigo de este imperativo, pues los impactos y consecuencias que se vienen observando de manera creciente y consistente cada vez con mayor frecuencia, son realmente preocupantes virtud de su magnitud e intensidad. El clima, un factor que por antecedente siempre fue benévolo, favorable e indulgente hoy se torna verdugo implacable de los profundos y vertiginosos daños que sufren los ecosistemas, las poblaciones, las economías y las familias en afectación directa de su calidad de vida.

El clima es la causa y origen de muchos de los males percibidos ya no importa la época del año que se trate, los cuales asociados a otros elementos del entorno generan una condición coligada con huracanes, tormentas y depresiones tropicales, olas de calor y frío por cambios térmicos abruptos, sequías e inundaciones extremas que de manera recurrente arrasan con la infraestructura y también con las cosechas. La probabilidad y severidad de la mayoría de los eventos climáticos extremos analizados por los científicos, se ha relacionado y vinculado directamente con el cambio climático (CC) cuyo origen y en consecuencia posible solución, debe necesariamente surgir de quién lo provoca: el hombre mismo.

Como bien lo apuntara Chaves (2020i) "El modelo agrícola vigente hasta hace algunos años y que fuera fomentado en el mundo y en el país, se fundamentó en principio 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 2017b, 2020df)."

Esta triste y lamentable realidad provoca y obliga a que los sistemas de producción agropecuaria actuales y futuros que pretendan participar con éxito y posicionarse de manera competitiva y sostenible en los mercados y destinos más selectos y de mejores precios, sea nacional o externo, deban imperativa e insoslayablemente ajustarse a los requerimientos y estrictas condiciones establecidas por la demanda, en este caso el exigente consumidor actual. Como expresará Chaves (2020j) al respecto con gran sentido de realidad "En el entorno comercial actual y futuro, la demanda y no la oferta, será la que definirá que tipo y calidad de productos que desea adquirir el consumidor, mandato que llegará nítido y claro al campo, los invernaderos y centros de producción. Por tanto, quién no se ajuste y alinee a ese deseo personal de quién paga por adquirir productos según su necesidad, simplemente quedará fuera del negocio y pronto desaparecerá. En este sentido los alimentos sanos, naturales, producidos con la menor intervención y empleo de agroquímicos vienen adquiriendo fuerza comercial, razón por la cual ajustar el sistema agro productivo aprovechando e incorporando los recursos naturales del suelo, entre ellos la materia orgánica, adquiere sentido y se ajusta a esta novedosa modalidad de producción. El modelo tradicional para hacer agricultura rentable y competitiva debe incondicionalmente cambiar y ajustarse, pues resulta irreconciliable con las condiciones impuestas por la realidad comercial y social actual y también la futura."

Asegura FAO en torno al mismo tópico, que "...cada cinco segundos se erosiona el equivalente a un campo de fútbol", mientras que "se necesitan mil años para producir unos pocos centímetros de capa superficial del suelo". Si esta tendencia continúa, 90% de todas las tierras aptas para la agricultura se habrán degradado para el año 2050, dejando al planeta sin su fuente principal de alimentos. Resalta el informe que "95% de los alimentos que consumimos depende de los suelos", por lo que su degradación implica una grave amenaza

Noviembre 2022 - Volumen 4 – Número 24

para la seguridad alimentaria, además de acelerar el cambio climático” (InduAmbiente 2022).

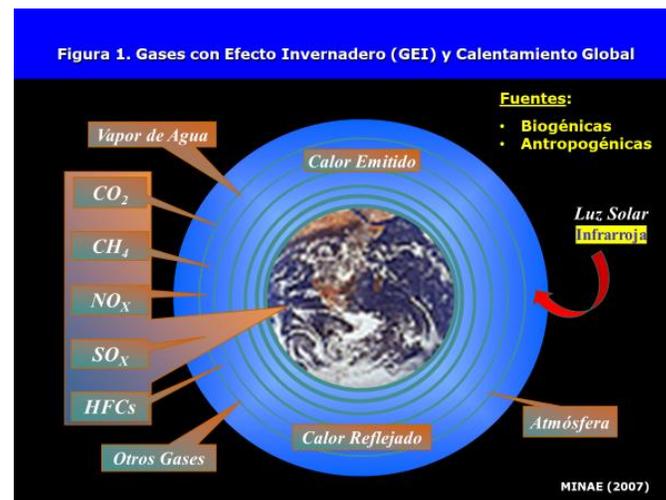
Lo grave, inmediato e insoslayable de la situación prevaleciente proyectada al futuro inmediato de la humanidad, ha provocado que la producción de alimentos finalmente aparezca incorporada en el debate permanente que sobre el clima se desarrolla actualmente a nivel mundial; lo cual debe reconocerse opera en doble vía, sea como objeto de los impactos, pero también como inductor y provocador de los males. Estas preocupaciones, que son de todos, deben llevar no apenas a quedarse en los análisis, los juzgamientos, las reprensiones, los juicios de valor y el señalamiento de problemas que poco aportan a la causa; sino también, en la búsqueda seria y responsable de posibles soluciones que eliminen, reduzcan o en su caso mitiguen de manera pronta los efectos y consecuencias provocados por el CC. El objetivo primordial del presente documento es abordar con enfoque y haciendo uso de elementos técnicos, parte de la solución al problema del CC, visto desde la perspectiva del secuestro y fijación del CO₂ atmosférico mediante la recarbonización de los suelos de uso agropecuario, en particular los cultivados en este caso con caña de azúcar en Costa Rica.

Calentamiento Global y Cambio Climático

Los cambios que sistemáticamente se han venido sucediendo y percibiendo en el clima de manera cada vez más intensa, con mayor frecuencia y potencial de impacto no son casuales, naturales, ni tampoco mediáticos; sino por el contrario, el resultado de una serie de eventos inducidos que de forma metódica se han acumulado con los años hasta alcanzar niveles que superan la capacidad del sistema natural de poder asimilarlos, generando por consecuencia los desequilibrios observados.

Para una mayor y mejor comprensión del fenómeno atmosférico de consecuencias ambientales, cabe retomar lo señalado por Chaves (2022b), al expresar en torno al tópico, que “El efecto invernadero es originado a partir de la absorción que realiza la atmósfera de la radiación térmica emitida por el sol, por la tierra y por los océanos, la cual es repelida, reflejada e irradiada (devuelta) nuevamente de la atmósfera hacia la tierra, incrementando con ello la temperatura de su superficie, proceso de carácter natural que en condiciones normales y sin excesos permite mantener un clima aceptable que favorece que en la tierra exista vida. La ecuación del efecto percibido es muy simple de explicar, correspondiendo a factores diferentes que no deben, como señalara Chaves (2021d), confundirse ni tampoco igualarse pues corresponden a procesos diferentes, donde: efecto invernadero + calentamiento global = cambio climático. Es conocido que el calentamiento global y el cambio climático coinciden en la principal de las causas que los originan, cual es la emisión masiva de los diferentes Gases de Efecto Invernadero o GEI que reflejan y retienen el calor dentro de la atmósfera y sobre la superficie terrestre a través del denominado efecto invernadero.”

La Figura 1 expone con algún grado de detalle la relación e interacción de factores que intervienen y generan a nivel atmosférico el calentamiento global inductor del cambio climático.



Seguidamente se replican y amplían (LAICA 2022ab) para conocimiento general algunos términos considerados de interés necesario saber y aplicar al tópico abordado, con el objeto de comprender y lograr mejores inferencias y conclusiones:

- 1) **Calentamiento Global (CG):** Incremento progresivo y gradual de la temperatura superficial de la tierra, debido a que la radiación térmica emitida por ésta queda atrapada en la atmósfera por causa de los Gases de Efecto Invernadero (GEI). El CG es responsable de los cambios ocurridos en los patrones del clima.
- 2) **Gases de Efecto Invernadero (GEI):** Son componentes gaseosos de la atmósfera, tanto de origen natural como los resultantes de la actividad humana (antropogénica), que absorben y emiten radiación infrarroja al medio; propiedad que ocasiona el efecto de calentamiento global. La Figura 2 presenta un detalle de los diversos gases implicados con el CC y la contaminación atmosférica.

Gases contaminantes del aire

Gases de Efecto Invernadero	Otros Gases Contaminantes
<ul style="list-style-type: none"> • Dióxido de carbono (CO₂) • Metano (CH₄), Potencial de calentamiento global (21 veces) • Óxido nítrico (N₂O), Potencial de calentamiento global (310 veces) • Hidrofluorocarbonados (HFC) y Perfluorocarbonados (PFC), Potencial de calentamiento global (1-12.000 veces) 	<ul style="list-style-type: none"> • Monóxido de carbono (CO) • Hidrocarburos volátiles (Propano, Butano, otros) • Óxidos de nitrógeno (NO_x) • Dióxido de Azufre (SO₂) • Clorofluorocarbonados (CFC), Regulados por Protocolo de Montreal • Partículas sólidas en suspensión (PTS). No es un gas pero son contaminantes del aire • Ozono (O₃). • Especies Fluorinadas (SF₆).

CO₂ = "dólar ambiental"

Figura 2. Gases vinculados con el calentamiento global y la contaminación atmosférica.

- 3) Efecto Invernadero: Este efecto es originado a partir de la absorción que realizan los GEI presentes en la atmósfera de la radiación térmica emitida por el sol, por la tierra y por los océanos, la cual es repelida, reflejada e irradiada (devuelta) nuevamente de la atmósfera hacia la tierra, incrementando con ello la temperatura de su superficie: Es un proceso de carácter natural que en condiciones normales y sin excesos permite mantener un clima aceptable que favorece la vida en la tierra.
- 4) Cambio Climático (CC): Es consecuencia de las emisiones de GEI que se originan de manera directa o indirecta a partir de las diversas actividades (antropogénicas) promovidas por el hombre, principalmente las derivadas de la quema de combustibles fósiles (hidrocarburos), biomasa (orgánico) y otros materiales, del cambio de uso del suelo, de las actividades y labores implicadas en la producción agrícola (uso de enmiendas y fertilizantes nitrogenados) y ganadera; como también del manejo de los desechos agroindustriales y domésticos depositados en el medio. Dichos cambios alteran y modifican la composición y balance global de la atmósfera y suman a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.
- 5) Fuente de Emisión: Actividad antropogénica o ecosistémica vinculada a la emisión de GEI.
- 6) Factor de Emisión: Supone la cantidad de GEI emitidos por cada unidad del parámetro “dato de actividad” evaluado y medido. Estos factores varían en función de la actividad que se trate. A nivel nacional y para ser utilizados en los inventarios de GEI los Factores de Emisión son propuestos por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN 2021).
- 7) Mitigación: Intervención humana desarrollada para reducir en algún grado las Fuentes de Emisión o en su caso aumentar los “sumideros” de GEI.
- 8) Sumidero: Reservorio (de origen natural o producto de la actividad humana, en suelos, océanos y plantas) en el que un Gas de Efecto Invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de efecto invernadero se almacena. Corresponde a cualquier proceso, actividad o mecanismo que remueve un GEI, un aerosol o un precursor de un gas de efecto invernadero de la atmósfera.
- 9) Secuestro: Proceso de aumento del contenido en Carbono (C) de un depósito de C que no sea la atmósfera. Desde un enfoque biológico incluye el secuestro directo de dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera mediante un cambio en el uso de las tierras, la forestación, reforestación y otras prácticas que mejoran el contenido de C en los suelos agrícolas. En condiciones naturales el carbono se incorpora al suelo por medio del aporte continuo de material orgánico, principalmente de origen vegetal. En suelos cultivados el mayor aporte de C ocurre con los Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC), lo que es muy válido para el caso de la caña de azúcar (Chaves 1985ab, 2001, 2007). Desde un enfoque físico incluye la separación y eliminación del dióxido de carbono (CO₂) procedente de gases de combustión o del procesamiento de combustibles fósiles para producir fracciones con un alto contenido de hidrógeno y dióxido de carbono, y el almacenamiento a largo plazo bajo tierra en depósitos de gas y petróleo, minas de carbón y acuíferos salinos agotados.
- 10) Remoción de dióxido de carbono: Actividad antropógena por la cual se remueve CO₂ de la atmósfera y se almacena de forma duradera en reservorios geológicos, terrestres u oceánicos, o en productos. Incluye el refuerzo antropógeno actual y potencial de los sumideros biológicos o geoquímicos y la captura directa de aire y almacenamiento, pero excluye la remoción natural de CO₂ no directamente causada por actividades humanas.
- 11) Impactos: Efectos provocados por el cambio climático en los sistemas humanos y naturales. Los impactos pueden repercutir de forma beneficiosa o adversa en los medios de subsistencia, la salud y el bienestar, los ecosistemas y las especies, los servicios, las infraestructuras, la agricultura y los bienes económicos, sociales y culturales.
- 12) Servicios ecosistémicos o ambientales: son aquellos que la naturaleza o los procesos ecológicos proveen a los seres vivos y al planeta. Son recursos o procesos de los ecosistemas naturales que benefician a los seres humanos. Para la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), son el motor del medio ambiente. Son esenciales para la vida, por lo que la tierra, el agua, el aire, el clima y los recursos genéticos se deben utilizar de forma responsable para las presentes y futuras generaciones.

El tema es incuestionablemente de gran actualidad, prioritario de atender y sobre todo un desafío imperativo de procurar resolver con la efectividad y temporalidad requeridas y necesarias, pues como apuntara Chaves (2022bc) al respecto “El cambio climático viene adquiriendo cada vez mayor relevancia e importancia en la comunidad internacional virtud de los impactos que con graves consecuencias genera de manera ya casi permanente, afectando poblaciones y familias que en forma directa o indirecta se ven intervenidas por los embates que los elementos del clima provocan. Estos cambios se manifiestan de diferente manera, sea por transformaciones climáticas provocadas por aumentos de la temperatura media global, modificaciones en el patrón normal y tradicional de las precipitaciones, incrementos en el nivel marítimo y severas modificaciones en los patrones de eventos climáticos con tendencia a calificar por su magnitud como “extremos”. Hablar de clima hoy día es referirse a situaciones caracterizadas por sequías, inundaciones, huracanes, tormentas y depresiones tropicales, altas o bajas temperaturas, todo lo cual afecta los sistemas productivos, el patrón de vida comunitaria y la economía en general de comunidades, regiones y países.”

Se asegura que la agricultura, la silvicultura (disciplina que trata sobre la gestión y cultivo de los bosques y montes forestales) y otros usos de la tierra contribuyen aproximadamente entre el 21% y el 37% con las emisiones totales de GEI; al mismo tiempo que paradójicamente,

esas mismas actividades son fundamentales y determinantes para el secuestro y almacenamiento de carbono atmosférico, por tanto, contribuyentes clave para la mitigación (IPCC 2019); todo depende y está asociado con la forma en que esos recursos se manejen. El impacto negativo provocado por el cambio climático en la productividad de los cultivos, aún los más rústicos y resilientes como la caña de azúcar, la ganadería, la pesca y la silvicultura será cada vez más grave en todas las regiones del mundo, sin obviar Costa Rica. Entre los sectores más vulnerables estarán sin duda las personas y actividades que dependen de la agricultura para su sustento e ingreso familiar.

Descarbonizar la atmósfera y recarbonizar el suelo

En la dialéctica climática popular y hasta técnica aplicada a la agricultura hay dos conceptos de alcance ambiental muy empleados en la actualidad que constituyen verdaderos principios que por lo general se confunden, o al menos no se articulan y aplican como corresponde, lo que genera distracción y perturbación. Dichos vocablos son Descarbonizar y Recarbonizar, los cuales vistos desde una perspectiva ambiental constituyen partes (mecanismos) de un mismo proceso que en lo semántico y lo pragmático resultan sin embargo diferentes.

La Descarbonización es el proceso de reducción o mitigación de emisiones de C, sobre todo de dióxido de carbono (CO₂) producido por la actividad humana y emitido a la atmósfera, con lo cual se busca atenuar el CC y evitar sus catastróficas consecuencias. Su objetivo entre otros es lograr adaptar y posicionar una economía global con bajas emisiones que logre la neutralidad climática a través de la transición energética, la modificación y el ajuste de los sistemas productivos, el comercio y el modo de vida generador del problema atmosférico. La descarbonización busca dejar de emitir o al menos reducir y mitigar los GEI destinados a distorsionar y generar el desbalance gaseoso de la atmósfera. La descarbonización eficiente es aquella que logra avanzar exitosamente en la neutralidad en carbono con el menor costo posible, propiciando que cada uso final de los recursos reduzca sus emisiones utilizando opcionalmente la alternativa más resiliente y competitiva que se disponga.

Acontece paradójicamente que, al quemar combustibles fósiles, producir alimentos por vías tradicionales, deforestar para urbanizar, promover el cambio de uso de la tierra y operar otras prácticas degradantes se supone necesarias para el desarrollo de las economías y bienestar de la sociedad, el ser humano ha incrementado de manera desmedida las emisiones de CO₂, uno de los agentes (fuentes) causantes del efecto invernadero, y por tanto del calentamiento global inductor del cambio climático. Por tanto, para lograr la descarbonización del sistema es necesario realizar una profunda transición, operar un cambio estructural de fondo que reduzca significativamente la emisión de carbono en la producción agropecuaria, el uso de combustibles fósiles, la labranza innecesaria

y excesiva de los suelos, el empleo irracional de los fertilizantes nitrogenados, el uso de equipos de refrigeración y otros mecanismos, procesos y factores que operan favoreciendo la emisión de GEI y gases contaminantes al ambiente. Se trata entonces de acondicionar la economía con base en energías y sistemas productivos alternativos limpios, que emitan únicamente lo que el planeta puede absorber y procesar; esa es la meta de los Programas de Descarbonización como el operado actualmente en Costa Rica con visión y expectativa para el periodo 2018-2050 cuyas metas, objetivos y políticas regulatorias procuran la consecución de una economía baja en carbono (Chaves 2022c).

El Plan Nacional de Descarbonización de la Economía Costarricense propone entre otras cosas:

“...sentar las bases de la nueva economía costarricense del siglo XXI, creando una visión positiva, innovadora e inspiradora del futuro. Una economía que responda a los cambios del contexto mundial, transitando hacia una economía verde, que promueve el uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales”.

La recarbonización es por su parte una iniciativa agropecuaria de trasfondo tecnológico que tiene como objetivo promover el almacenamiento de Carbono Orgánico en los Suelos (COS) en este caso bajo uso agrícola y pecuario; por ello se habla de recarbonización del suelo. Básicamente es traer (secuestrar) el CO₂ atmosférico e incorporarlo (fijarlo) al suelo, mediante la implementación de prácticas sostenibles de manejo operadas a gran escala encauzadas en mantener el C del suelo evitando que el que hay se pierda y retorne a la atmósfera y donde exista potencial, incrementarlo.

Como se infiere de lo anterior, ambos mecanismos operan de manera simultánea y complementaria, aunque también antagónica según la intensidad y magnitud de su actividad. Lo deseable para todos es tener una alta descarbonización atmosférica y una muy elevada recarbonización en el suelo, con lo cual se lograría que los excesos de GEI causantes del calentamiento global sean retirados (secuestrados) y aprovechados en el mejoramiento del suelo. La lógica deseable dicta que se debe minimizar la emisión de GEI, optimizar la descarbonización atmosférica y maximizar la recarbonización del suelo, con lo cual los efectos sobre el calentamiento global, el cambio climático y la productividad agropecuaria sostenible se perfeccionan.

Degradación de los suelos

La degradación de los suelos es posiblemente una, entre muchas otras (Chaves 2015), de los males y enfermedades más graves que padece la agricultura de la caña de azúcar en Costa Rica, la cual con el transcurrir del tiempo limita y reduce su potencial agroproductivo, con el agravante de que sufre de tres peligrosas falencias: 1) es un mal oculto y silencioso cuyos signos se perciben de manera indirecta, 2) opera de manera sistemática, continua y acumulativa y 3) la indiferencia, la ignorancia y el “sentimiento erróneo de modernidad”

hacen perder perspectiva a los responsables de procurar evitarla, contrarrestarla y mitigarla. La situación prevaleciente en el país con este mal agrícola tan común es realmente preocupante y debe exponerse y denunciarse en procura de que las instituciones, las empresas y los agricultores adopten las medidas correctas pertinentes que conlleven a su atención.

El mayor problema con el tema estriba no apenas en la enorme dificultad que existe en el campo de poder contrarrestar los efectos y consecuencias que sufre un suelo degradado, sino también por la concepción y percepción errada que muchas personas, aún connotados y muy calificados profesionales del más alto nivel tienen del problema, sea por razones personales (productivistas a ultranza, cumplimiento de mandatos superiores), intereses creados (vendedores de agroquímicos, insumos y equipo mecánico), preconcepciones, desconocimiento del tema edáfico o aún los detentores de ideas casi dogmáticas asociadas a corrientes modernistas, mecanicistas, tecnócratas, mercantilistas y liberales que abogan por producir más sin importar como; verdaderamente de todo hay en el medio. Como apuntara Chaves (2020d) al respecto, “Para muchos persiste la creencia y hasta el convencimiento de que el suelo es infinito y con la aplicación de fertilizantes y el uso de sofisticada maquinaria todo se resuelve y pronto recupera y habilita de nuevo. Que como factores naturales el clima no lo perjudica. Que el suelo es un factor que permanentemente se rejuvenece y rehabilita solo. Que los suelos son entes estáticos que no cambian. En fin, son muchos los prejuicios, preconcepciones y errores conceptuales que existen en torno al factor edáfico, que lamentablemente conducen a su rápido deterioro y degradación. Desconocen sin embargo esos detractores y conspiradores del suelo, que este es un ente vivo y muy sensible con presencia de una inmensa actividad biológica y microbiológica que lo enriquece y mantiene fértil y activo, que caso no mantenerse y estimularse lo vuelve estéril, infértil, improductivo e inviable para la actividad agrícola. De igual manera, se debe tener presente que como entes vivos los suelos pasan por etapas juveniles, maduras y seniles donde pierden muchas de sus capacidades básicas primarias y potenciales.”

Pero bueno ¿Qué es y en qué consiste la degradación? ¿Cómo aplica en un suelo? ¿Qué debo hacer y cómo actuar para procurar mitigarla, eliminarla y contrarrestarla?

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

una inadecuada utilización y manejo. Algunos lo califican como un cambio severo en la salud del suelo. Como se infiere, la connotación anotada conlleva un trasfondo comercial por el empleo que se le da al término.

Se mencionan como procesos de degradación física la compactación, artificialización (designa la ocupación para vivienda, infraestructura y equipamiento, que implica la impermeabilización y “sellado del suelo”), y las de naturaleza química están asociadas con la acidificación, salinización, pérdida de materia orgánica y contaminación del suelo. Una rápida pero detallada contextualización de esas causas al área sembrada comercialmente con caña en el país permite de inmediato comprobar que todas, exceptuando y minimizando la salinización, están presentes en nuestros campos, como se ha ampliamente señalado para el caso de la compactación (Chaves 2017b, 2019bd), la acidificación (Chaves 1999ab, 2002, 2017a, 2019a, 2020f), la pérdida de materia orgánica (Chaves 2020b) y la contaminación.”

A lo anterior se suman los severos problemas de erosión tanto hídrica como eólica que padecen muchos terrenos por cultivo en condiciones de alta pendiente, exceso de mecanización, carencia de programas y medidas de conservación y razones de índole climático asociadas a las altas precipitaciones y vientos de alta velocidad, como lo señala Chaves (2020e).

Hay que reconocer que el tema de la degradación de los suelos no es nada fácil de ubicar, comprender y más aún de tratar y resolver, pero el mal existe, crece y hay por obligación que reconocerlo y atenderlo con carácter prioritario, pues caso contrario, poca o ninguna posibilidad de crecer en cantidad y calidad de productos se tendrá; además de los costos incrementales que sistemáticamente generará una unidad agroproductiva degradada para lograr obtener igual o menos productividad. Esta afectación conlleva a justificar los bajos rendimientos y altos costos relacionados por parte de técnicos, administradores y empresarios a presuntas circunstancias de clima, variedades inadaptadas, razones fitosanitarias ocultas, humedad del suelo (alta-baja) o calidad limitada de los insumos aplicados; desconociendo el fondo real y causa de los males percibidos con la cosecha. Lo cierto del caso es que la degradación genera infertilidad de los suelos, incapacidad de lograr grados de productividad altos, sostenibles, rentables y competitivos. La agricultura cañera costarricense padece del grave problema de la degradación de sus suelos, aunque muchos quieran desconocerlo o no actuar con la agilidad, profundidad y contundencia que la misma demanda para procurar su atenuación y eventual solución. Pocas posibilidades de crecer en productividad se tendrán si no hay acciones orientadas a contrarrestar sus efectos, consecuencias e impactos.

Para poder atender con la capacidad resolutoria necesaria el problema es imperativo en primera instancia conocer el origen y las causas que lo provocan y favorecen, entre las cuales se mencionan tres

principales: 1) presencia de condiciones naturales (edafoclimáticas) insuperables o de inviabilidad técnico-económica para corregirlas, 2) producción intensiva y extractiva, superior a la capacidad y potencial de restitución natural del suelo lo que genera desbalance y 3) manejo inadecuado de las plantaciones con ausencia de prácticas que favorezcan la mantención, complementación y restitución de lo

existente, sustraído y/o perdido; o en su caso por el uso excesivo y desequilibrado de otros factores que agudizan el problema.

En el Cuadro 1 se anotan algunas sugerencias específicas con opción de implementar en la caña de azúcar para atender algunos de los factores inductores de degradación del suelo.

Cuadro 1. Acciones correctivas orientadas a mitigar, contrarrestar y corregir degradación del suelo.

Factor degradante	Acción correctiva
Erosión	Construir infraestructura de riego y drenaje, conducir aguas (pluviales y riego), regular pendiente, no sobremecanizar, regular uso de arado y rastra, incorporar medidas de conservación, emplear prácticas alternativas, realizar siembras a contorno, arborizar y reforestar donde sea permisible, no sembrar en áreas inconvenientes, control de malezas prudente, regulado y apropiado
Compactación	Subsolado, regular y controlar tránsito de equipo mecánico en plantaciones, incorporar materia orgánica, realizar desaporca-aporca, regular uso del agua, definir lámina de riego, utilizar equipo dimensionado a necesidades reales
Acidificación	Incorporar correctivos y enmiendas apropiadas, regular fuentes y dosis de N, aplicar materia orgánica y bioinsumos, fertilizar correctamente, siembra de variedades resilientes
Salinización	Aplicar y evacuar agua, regular nivel freático, favorecer salida de aguas salinas, posibilitar uso de yeso
Pérdida Materia Orgánica	Recarbonizar el suelo, incorporar y compostear la biomasa residual, evitar quemar residuos vegetales, favorecer y estimular la actividad microbial, sembrar plantas de cobertura, controlar acidez, realizar prácticas conservacionistas, incorporar materia orgánica (abono), trabajar la microbiología del suelo
Contaminación	Seleccionar agroquímicos, calibrar equipos de aplicación y dosificar correctamente, no depositar residuos en fuentes hídricas, utilizar materia orgánica, respetar regulaciones, hacer conciencia del problema.

Fuente: adaptado y ampliado de Chaves (2020d).

Como se infiere de todo lo anterior, la gestión tecnológica orientada a evitar la pérdida y en contrapartida la recuperación del carbono del suelo (valorado como materia orgánica), son acciones que se tornan imperativa e insoslayablemente necesarias de realizar con carácter prioritario, si se desea y pretende resolver efectivamente el grave problema surgido con la degradación de los suelos agrícolas sembrados con caña de azúcar; lo cual es viable y factible mediante un programa visionario de recarbonización asociado a otras medidas coadyuvantes y complementarias operadas en la misma orientación. El tiempo implicado en la recuperación de los contenidos de COS es prolongado pues los procesos implicados son lentos y muy sensibles. Una verdad absoluta dicta que fácil y rápido es perder carbono en el suelo, lento y prolongado recuperarlo, por lo que no pueden esperarse cambios inmediatos.

¿Qué es carbono en el suelo?

De acuerdo con FAO (2017) “El carbono orgánico del suelo (COS) es una pequeña parte del ciclo global del carbono, el cual implica el ciclo del carbono a través del suelo, la vegetación, el océano y la atmósfera.” Agrega en adición al concepto la misma fuente, que “Este extraordinario reservorio de COS no es estático, sino que está

constantemente circulando entre las diferentes reservas mundiales de carbono en formas moleculares diversas.”

El suelo representa una importante y conocida reserva de carbono, encontrando que contiene más C que la atmósfera y la vegetación terrestre en conjunto. El Carbono Orgánico del Suelo (COS) representado en este caso por el carbono almacenado en la materia orgánica es muy dinámico, no obstante, los impactos antropogénicos que se dan sobre el substrato suelo, entre los que contabilizan los agropecuarios, pueden convertirlo rápidamente de manera contraproducente en un sumidero o fuente de emisión neta de Gases de Efecto Invernadero (GEI), con los efectos indeseados consecuentes.

El COS es un componente muy importante del ciclo global del C, ocupando según estimaciones de FAO (2001) un 69,8 % del C orgánico de la biosfera; encontrando que la cantidad de COS almacenada en un suelo depende en alto grado del equilibrio que exista entre la cantidad de C que ingresa en el suelo y la que sale del mismo como gases de respiración basados en C, procedentes de la mineralización microbiana y, en menor medida, a través de la lixiviación del suelo. El suelo puede por esta razón actuar en este caso como fuente o

reservorio de C dependiendo del uso y manejo que se le preste. El COS corresponde al carbono sólido almacenado en los suelos; es el componente principal de la materia orgánica del suelo (MOS) que incluye además el carbono inorgánico bajo la forma de minerales de carbonato. El COS puede perderse en forma de CO_2 o también como metano (CH_4) al emitirlo de nuevo a la atmósfera, como material erosionado o como carbono orgánico disuelto que desemboca en ríos y océanos. Como indicador de la salud del suelo, el COS es importante de considerar virtud de su incuestionable contribución a la producción de alimentos, la mitigación y la adaptación al cambio climático; también al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Como está suficientemente demostrado en la práctica agrícola, un alto contenido de MO en un suelo mejora la fertilidad general y proporciona nutrimentos esenciales a las plantas, mejorando adicionalmente la disponibilidad de agua, la agregación y aireación, lo cual mejora la productividad de los cultivos (Chaves 2020j).

Como apuntaron (Martínez et al 2008) “El carbono orgánico del suelo (COS) se relaciona con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas afectando las propiedades del suelo relacionadas con el rendimiento sostenido de los cultivos. El COS se vincula con la cantidad y disponibilidad de nutrientes del suelo, al aportar elementos como el N cuyo aporte mineral es normalmente deficitario. Además, al modificar la acidez y la alcalinidad hacia valores cercanos a la neutralidad, el COS aumenta la solubilidad de varios nutrientes. El COS asociado a la materia orgánica del suelo proporciona coloides de alta capacidad de intercambio catiónico. Su efecto en las propiedades físicas se manifiesta mediante la modificación de la estructura y la distribución del espacio poroso del suelo. La cantidad de COS no solo depende de las condiciones ambientales locales, sino que es afectada fuertemente por el manejo del suelo. Existen prácticas de manejo que generan un detrimento del COS en el tiempo, a la vez hay prácticas que favorecen su acumulación.”

Asegura asimismo FAO (2022) al respecto, que “El Carbono Orgánico del Suelo (COS) es un componente principal de la materia orgánica del suelo (MOS) que permite varias funciones y servicios ecosistémicos del suelo. El rol del COS en el sistema climático y en el contexto de la adaptación y mitigación al cambio climático está ganando relevancia en el ámbito internacional y la gestión sostenible de los suelos está siendo reconocida como una solución viable para secuestrar carbono atmosférico y otros gases efecto invernadero (GEI) tales como NO_2 y CH_4 . Los suelos constituyen el principal sumidero terrestre de carbono. Tan solo a 30 cm de profundidad, tenemos 694 Gt de carbono orgánico de suelo (COS). Si vamos más profundo, esta cantidad no hace sino aumentar.”

Como se indicó el carbono es crucial para la salud y la fertilidad del suelo, así como para los servicios ecosistémicos (recursos o procesos de los ecosistemas naturales que benefician a los seres vivos y al planeta, ej. alimentos nutritivos y agua limpia, regular enfermedades

y el clima, mejorar los suelos), incluyendo la producción de alimentos, tornando su preservación y restauración esencial para el desarrollo sostenible.

Carbono del suelo y adaptación al Cambio Climático

Existe y puede establecerse una relación y vínculo directo entre el COS con respecto a los factores ambientales, pues en condiciones naturales y normales, el C orgánico contenido en el suelo es como se ha indicado a través del documento, el producto generado a partir del balance que se da entre la incorporación al suelo del material orgánico fresco y la salida (pérdida por emisión) de C del suelo en forma de CO_2 hacia la atmósfera. La relación y equilibrio establecido entre esos dos importantes conceptos y principios es determinante para efectos climáticos, pues un desbalance en favor de las pérdidas de CO_2 , promueve la emisión de GEI a la atmósfera y con ello el calentamiento global y en consecuencia el CC. Ese C orgánico es encontrado en el suelo en forma de residuos orgánicos procedentes de vegetales, animales y microorganismos que se encuentran en principio poco alterados y mineralizados en forma de humus y otras formas muy condensadas de composición próxima al C elemental. En aquellos suelos que presentan condiciones aeróbicas (oxigenadas), una parte importante del C que ingresa al suelo es lábil y se mineraliza rápidamente acumulando una pequeña fracción como humus estable; en cuyo caso dicho C está constituido principalmente por compuestos orgánicos simples, aminoácidos y carbohidratos entre otros compuestos, que facilitan el acceso y transformación por parte de los microorganismos (biota) presentes en el suelo.

Por esta razón la promoción, fortalecimiento, implementación y desarrollo de estrategias, programas y medidas que favorezcan el secuestro de carbono de la atmósfera y su fijación por recarbonización en los suelos productivos del mundo, resulta vital para lograr contrarrestar los efectos del CC. Para dicho fin, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) a través de la Alianza Mundial por el Suelo (AMS), canalizan y procuran actualmente por medio del programa RECSOIL, disminuir la degradación de la tierra, restaurar los ecosistemas y certificar los suelos bajo una gestión sostenible de los recursos naturales.

Para mejor entender, RECSOIL o Recarbonization of Global Soils (por sus siglas en inglés), es una innovadora iniciativa de alcance mundial que opera también en Costa Rica, cuyo objetivo primordial es mejorar la salud del suelo mediante el mantenimiento y la mejora continua de las reservas de COS; donde se estimula y potencia la capacidad del suelo para generar beneficios múltiples a través de los servicios ecosistémicos. Como está demostrado en el campo, los suelos fértiles y saludables contribuyen a mejorar de manera directa la seguridad alimentaria, incrementar los índices de productividad, los ingresos y la rentabilidad derivados, reducen complementariamente la pobreza y la desnutrición, proveen servicios ecosistémicos esenciales,

contribuyen ostensiblemente al logro de los ODS, batallan contra el CC y fortalecen la resiliencia de los suelos ante la ocurrencia de eventos climáticos extremos incluyendo pandemias, como apuntan sus seguidores. El RECSOIL es en lo pragmático y mediático un mecanismo programático institucional que busca viabilizar el Manejo Sostenible del Suelo (MSS) con enfoque centralizado en el COS. Sus prioridades son entre otras: a) prevenir futuras pérdidas de COS y aumentar sus stocks en el suelo; b) mejorar los ingresos y la rentabilidad de los agricultores y c) contribuir con la seguridad alimentaria de los países. El programa se enfoca y concentra esfuerzos en los suelos agrícolas degradados, como acontece con muchos de los cultivados con caña de azúcar en Costa Rica. El mecanismo apoya la provisión de incentivos (créditos voluntarios de carbono) para los agricultores que acuerdan implementar buenas prácticas en sus plantaciones (Bertsch 2021; FAO 2022).

Queda claro que el combate al cambio climático, la mejora ambiental y agroproductiva de las plantaciones aplicada al caso particular de la caña de azúcar corre por dos vertientes muy bien tipificadas: 1) dejar de emitir o al menos mitigar las emisiones de GEI y 2) incrementar el COS mediante la recarbonización del suelo mejorando los contenidos de materia orgánica.

Carbono y producción sustentable

Es importante de previo para evitar confusión distinguir para fines prácticos las diferencias de concepto que se establecen entre los términos sustentable y sostenible. Se dice que algo sustentable es aquello que se mantiene por sí solo, por ejemplo, los recursos del planeta si se les provee un tratamiento adecuado, y algo sostenible es el conjunto de procesos que contribuirán a crear un avance social y vivir una vida más sana, respetuosa y en armonía con el planeta, los demás seres vivos y las generaciones futuras. En definitiva, ambos conceptos van de la mano y, sobre todo, tienen el mismo objetivo cual es preservar los recursos del planeta. La sustentabilidad se centra en esos recursos y procura su preservación y uso racional, siendo el caso de las energías renovables un buen ejemplo, ya que proporcionan recursos inagotables que no repercuten en el bienestar de las generaciones futuras; de igual manera el reciclaje de residuos, el ahorro de energía y el uso de energías verdes aplican en la misma noción. La sostenibilidad por su parte considera toda una serie de procesos que buscan provocar un cambio integral: medioambiental, social, económico, político, tecnológico y cultural, como sucede con los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (ONU-CEPAL 2022).

La producción sostenible puede entonces concebirse genéricamente como un modelo de producción de bienes y servicios, en nuestro caso vinculados con la producción e industrialización de la caña de azúcar, que reduce, minimiza, aprovecha y optimiza el uso de los recursos naturales disponibles, controla la generación de materiales tóxicos, residuos y emisiones contaminantes; mediante la promoción e

implementación de una estrategia de gestión productiva que integra y articula la dimensión ambiental por medio de un enfoque preventivo de la contaminación y la administración eficiente y efectiva de los recursos. Se busca con ello, armonizar el crecimiento económico con la inclusión social y el cuidado del ambiente; promoviendo un desarrollo agroindustrial que no ponga en riesgo las necesidades productivas, sociales y ambientales de las generaciones futuras. Implica proteger y usar racional y óptimamente los recursos disponibles, suficientes o no, sin comprometer el futuro.

Considerando que el CO₂ (dióxido de carbono) y el CH₄ (metano) son los principales gases atmosféricos basados en carbono, acontece que los organismos autótrofos producen a partir de ellos compuestos orgánicos complejos (proteínas por ej.) usando el C de sustancias simples como el CO₂ (principalmente las plantas); los microorganismos foto y quimio autótrofos sintetizan por su parte el CO₂ atmosférico en material orgánico, lo cual debe conocerse para poder estimularlo, promoverlo y aprovecharlo para alcanzar el objetivo de sustentabilidad pretendido. El material orgánico muerto y expuesto en forma de residuos vegetales y exudados, es incorporado al suelo por la fauna existente, lo que conlleva el ingreso de C mediante la transformación del material orgánico por microorganismos heterótrofos. Este proceso de transformación de materiales orgánicos da como resultado una mezcla biogeoquímica compleja de residuos vegetales y productos de la descomposición microbiana en varias etapas de descomposición, que pueden asociarse con minerales del suelo y ocluirse dentro de los agregados, favoreciendo la persistencia del COS en el suelo por mucho tiempo. El CO₂ se emite de vuelta a la atmósfera cuando la materia orgánica del suelo (MOS) es descompuesta (o mineralizada) por microorganismos. La pérdida de C puede ser causada por exudados radiculares como el ácido oxálico, que libera compuestos orgánicos. El C es también parcialmente transportado de los suelos a ríos y océanos como CO disuelto (COD) o como parte del material producto de la erosión.

Entre los factores que controlan la descomposición de la MOS se incluyen principalmente la temperatura del suelo, el pH y el contenido de humedad presente (determinado por las condiciones del clima), que influyen mucho en el almacenamiento del C por su efecto directo sobre la actividad microbiana del suelo. La composición de la comunidad microbiana (por ejemplo, la relación bacterias-hongos) también puede influenciar la descomposición preferente de ciertos compuestos más específicos. La presunta recalcificación química de las moléculas complejas que acumulan COS, como la lignina o los lípidos, no contribuye sustancialmente a la persistencia de la MOS en el suelo.

Producir caña y fabricar azúcar de manera sustentable y sostenible es un reto y un desafío que inexcusable e insoslayablemente toda organización, empresario y agricultor serio y responsable deben tener por meta, guste o no, puesto que el destino de su gestión y esfuerzo será por encadenamiento demandado por mercados de destino con

consumidores comprometidos y solidarios con estos principios. Desviarse de esos objetivos será actuar al margen de lo que paradójicamente se anhela: operar en buenos mercados competitivos de altos precios. Como se infiere el tema tecnológico esta amplia y directamente ligado al asunto comercial.

Carbono, materia orgánica y biodiversidad en los suelos

La materia orgánica viene a representar genéricamente los diversos constituyentes orgánicos contenidos en el suelo que se encuentran activos operando en diversas etapas y grados de descomposición o mineralización, como acontece con los tejidos de vegetales, animales muertos, materiales con tamaño inferior a 2 mm, macro y microorganismos presentes en el suelo. Por tanto, la relación directa que tiene el agricultor con el C es directamente a través de la materia orgánica, lo que implica un manejo muy conocido para la mayoría, quienes conocen de sus ventajas, virtudes y también de sus necesidades. Difícilmente algún agricultor podrá señalar inconvenientes a los efectos y bondades de los materiales orgánicos, excepto, posiblemente, su dificultad de manejo por los volúmenes y características del material implicado.

Asegura Chaves (2020c) 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.”

La materia orgánica en los suelos cañeros de Costa Rica es por lo general de contenidos mayoritariamente bajos (<5%), muy variables en magnitud y próximos al 3% como respuesta a la heterogeneidad edafoclimática donde se ubican las plantaciones de acuerdo con la región, localidad y condición de cultivo; siendo por lo general superiores (>6%) en zonas altas (>1.000 msnm). Los mismos están influenciados y determinados por varios factores que de manera diferencial los intervienen, condicionan y definen, como son entre otros los siguientes: a) altitud del lugar (msnm), b) condiciones climáticas prevalecientes en particular el régimen de lluvias y el patrón de temperaturas, c) tipo de suelo presente y dominante (Orden y Suborden), d) familia textural del suelo, e) características físico-químicas y biológicas del substrato, f) régimen de humedad del suelo (ej Ústico), g) características, naturaleza y composición del material orgánico, h) actividad biológica (macro y micro), i) profundidad del perfil del suelo y j) manejo agronómico prestado al suelo, como apuntara y desarrollara Chaves (1999a, 2019e, 2020bjk).

Mucho puede aportarse y comentarse en torno a los beneficios y bondades que posee y son atribuidos por antecedente comprobado a la materia orgánica, entre los cuales pueden destacarse entre otros los siguientes: a) actúa sobre la fracción húmica, b) absorbe una cantidad de agua superior varias veces respecto a su propio peso, c) retiene agua en suelos de textura arenosa, d) sus propiedades cohesivas contribuyen a estabilizar los suelos arenosos, e) posee la capacidad de captar calor lo que contribuye con la germinación y el retoñamiento de las plantas y semillas, f) su presencia origina y mantiene una buena estructura, con lo cual las partículas del suelo (arena, limo y arcilla) forman agregados que crean poros (macro y micro) que facilitan la oxigenación, penetración, infiltración y movimiento del agua, el aire y las raíces por todo el perfil del suelo, g) es una fuente rica que aporta nutrimentos esenciales y necesarios, entre ellos el nitrógeno (N), h) el humus actúa como “almacén” de los nutrimentos que se adicionan con la fertilización o se aportan por el proceso de mineralización de materiales orgánicos, i) es fuente de energía para la mayoría de los microorganismos que actúan en el suelo aún los asociados con su propia descomposición, j) neutraliza efectos tóxicos de metales pesados y otros de acción degradante, k) mejora en alto grado la condición de fertilidad natural del suelo, habilitándolo para su uso comercial y l) favorece, promueve, estimula y dinamiza la biodiversidad en el suelo (Saynes 2021). Las diferencias prevalecientes en estos elementos provocan que los suelos no acumulen materia orgánica de igual manera en todos los lugares, aún dentro de la misma finca. Los beneficios proveídos por la materia orgánica son inobjetables, incuestionables y benéficos en todos los ámbitos sean productivos, ambientales, tecnológicos y económicos.

Una valoración de contenidos y formas químicas revela que entre el 97-98% del N presentes en el suelo se encuentra en formas orgánicas como proteínas, aminoácidos, etc., conformando la materia orgánica. Pese a que esas formas nitrogenadas no son asimilables por las plantas, representan su principal reservorio. En contraparte, el N-inorgánico representa según Chaves (1999a), apenas el 2% del N total, siendo el N disponible y accesible para las plantas el presente como iones amonio (NH_4^+), amoniacado (NH_3), nitrato (NO_3^-), óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO) y nitrito (NO_2^-), incluyendo pérdidas gaseosas de N como NO_x (NH_3 , N_2O) hasta llegar inclusive a pérdidas de N en forma molecular como N_2 .

En principio la acción de los organismos heterótrofos (utilizan el C como fuente de energía) como bacterias, hongos y actinomicetos, los cuales por digestión enzimática (proteolítica) provocan en un inicio (fase de Aminación) la ruptura de las estructuras celulares complejas, en este caso proteínas y compuestos afines, liberando el N en su forma amínica como aminos y aminoácidos. Parte de la acción microbial es ejecutada por organismos autótrofos que obtienen su energía a partir de la oxidación de sales inorgánicas simples y del carbono del CO_2 atmosférico. En el proceso (amonificación-nitrificación) hay una amplia y muy específica actividad

microbiológica promovida por bacterias del género *Nitrococcus* y *Nitrosomonas*, principalmente. Como está comprobado la planta de caña de azúcar tiene la ventaja natural de fijar N atmosférico, como lo explica Chaves (2021c) en su documento. La Figura 3 plantea el ciclo del N visto desde una perspectiva bioquímica del proceso de mineralización de la materia orgánica en el suelo.

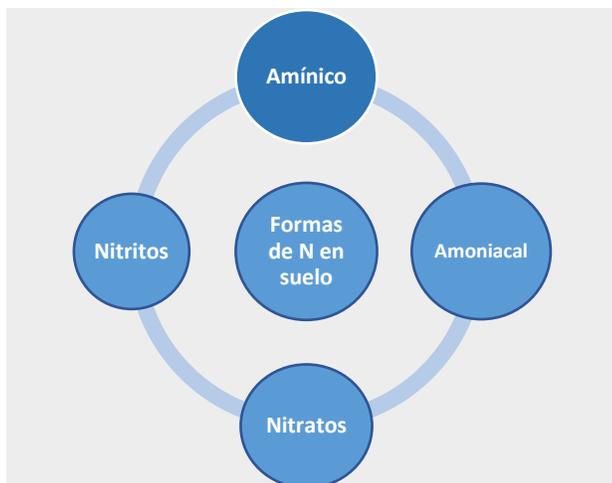


Figura 3. Formas químicas de N presentes en el ciclo de la materia orgánica en el suelo.

Carbono del suelo y estabilidad de los rendimientos agrícolas

Se dice con acertado criterio técnico, que “Todo se mide por el carbono orgánico contenido en el suelo, que es como la piel del suelo. Es el que nos permite producir alimentos, bosques, filtrar el agua. La degradación del suelo se produce, sencillamente, por la pérdida del carbono orgánico”. El carbono como ha sido ya ampliamente comentado es el principal componente estructural de la materia orgánica del suelo. Su función es crucial para incrementar y mantener su fertilidad y estimular la producción abundante de alimentos nutritivos. Se busca con los esfuerzos mundiales y nacionales desarrollados actualmente en el campo ambiental, procurar la descarbonización de la economía con el objeto de reducir los GEI (Chaves 2022c); iniciativa asociada y complementada con los esfuerzos por “rearbonizar los suelos” a efecto de restaurarlos y combatir con ello no solo el cambio climático sino también el hambre y las necesidades alimentarias de los países (Chaves 2022de).

Como se comentó con anterioridad, gran parte de los suelos de uso agrícola en el país están degradados o en fase activa de degradación debido al empleo continuado de prácticas tradicionales insostenibles desarrolladas en la gestión agroproductiva los cuales favorecen y provocan erosión, acidificación, salinización, compactación, contaminación por el uso inadecuado de maquinaria, fertilizantes y agroquímicos; como también a factores de índole climático favorecidos por la lluvia, las temperaturas y el viento, entre otras

(Chaves 2015, 2019abde, 2020bdefi, 2021f, 2022e). Esa degradación se traduce en una pérdida neta significativa, sistemática y acumulativa de productividad, rentabilidad y competitividad; donde los costos crecen, pero no así la productividad en una proporción inferior que genere rentabilidad, independientemente de la tecnología incorporada. Las dificultades observadas en crecer en productividad agrícola así lo demuestra, como lo señala Chaves (2022a).

Es un hecho comprobado que el contenido de materia orgánica de un suelo disminuye rápidamente con el paso del tiempo si esta no es restituida, siendo esa disminución por lo general acelerada por la presencia de factores inductores que la favorecen y dinamizan, como son la humedad, la alta temperatura, la aireación, el enclado y la actividad microbial, entre otras; en consecuencia, los suelos sembrados con caña de azúcar y que son sometidos a una explotación intensiva se van con el tiempo rápidamente empobreciendo y degradando, tornándolos infértiles e improductivos (Chaves 2020d). La estrategia empresarial prudente y visionaria en este caso es evitar que esa materia orgánica se pierda y buscar, por el contrario, la forma complementaria y simultánea de incrementarla, de manera que la recuperación sea positiva.

El suelo como es conocido es un recurso natural lamentablemente no renovable, como muchos erróneamente creen. Se dice con acierto por ello, que un centímetro de suelo demora cerca de mil años en generarse, lo que denota el valor intrínseco del recurso. Ciertamente un suelo no puede renovarse, pero sí se puede regenerarse para que tenga un buen equilibrio y sea capaz de desarrollar y mantener una agricultura sostenible y resiliente, para lo cual es insoslayable tener que restaurar los contenidos de COS; siendo una de las principales técnicas protegerlo y mejorarlo mediante el uso de abonos y coberturas vegetales. No cabe duda de que los suelos sanos y manejados de manera sostenible, con altos contenidos de materia orgánica, biodiversidad, nutrientes y humedad, son fundamentales para mantener la producción agropecuaria en niveles altos, satisfactorios y rentables. La caña de azúcar pese a su reconocida rusticidad y elevada capacidad de adaptación es una planta sensible y de muy buena respuesta a condiciones que favorezcan su fisiología y expresión de su potencial genético, como lo apuntara Chaves (2020ah, 2021b).

El COS interviene y afecta positiva y/o negativamente la mayoría de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo vinculadas con su: 1) calidad, 2) sustentabilidad y 3) capacidad productiva; motivo y razón suficiente por la cual debe inexcusablemente procurar mantenerse y aumentarse sus contenidos mediante un manejo sustentable del sistema agroproductivo. Resulta empresarialmente muy difícil en el campo esperar mantener de manera sostenida en el tiempo, grados elevados y competitivos de productividad de caña (> 85 t/ha) con altas concentraciones de sacarosa recuperable en sus tallos (> 110 kg 96°/t caña), sin contar con un suelo nutricionalmente

fértil, un ambiente productivo satisfactorio y un nivel tecnológico apropiado, los antecedentes nacionales así lo demuestran (Chaves 2021a, 2022a). La materia orgánica contenida en un suelo puede asociarse y vincularse casi de seguro con estructuras productivas competitivas y rentables; lo contrario es también válido.

¿Cómo capturar carbono en suelos cañeros?

Cuando pensamos en medidas viables, pragmáticas y factibles para capturar CO₂ de la atmósfera y contribuir a mitigar con ello el cambio climático, inevitablemente lo primero que pensamos es en plantar árboles; lo cual hacemos de manera lógica y razonable, ya que los bosques son los principales sumideros -o reductores- de CO₂ del planeta, pues tienen la capacidad natural de absorber dicho gas de la atmósfera gracias a la energía del sol. Sin embargo, no puede por ello desconocerse y minimizarse el importante aporte que da la fotosíntesis como mecanismo general de fijación y utilización en plantas no leñosas (crecimiento secundario), lo que habilita al resto de vegetales categorizados como plantas superiores y otras, entre ellas la caña de azúcar, la cual como planta dotada con ciclo fotosintético C₄ posee una alta eficiencia de captura, conversión y empleo, como lo explica Chaves (2020a). Se tiene entonces que el secuestro de CO₂ atmosférico puede ocurrir directamente en la planta mediante los mecanismos fisiológicos y metabólicos conocidos; como también incorporada por medio de la biomasa depositada en el suelo pronta a ser mineralizada.

La recarbonización eficiente de un suelo es aquella que logra avanzar con la captura de carbono con el menor costo y velocidad posible, propiciando que cada actividad y labor realizada utilice la alternativa más efectiva, sostenible y competitiva. A esto se suma en tecnología inversa basada en operar actividades de campo de manera óptima de tal forma que eviten la pérdida de CO₂ por oxidación, como acontece con las labores de mecanización, movimiento y preparación de tierras.

Chaves (2020b) al describir la naturaleza y conformación fraccional de la materia orgánica e inorgánica residual que se encuentra, produce y es depositada por lo general en los campos sembrados con caña (Foto 1), indica que “En el caso particular de la caña de azúcar, el componente orgánico principal y residual se conforma básicamente de hojas verdes, hojas secas, tallos industrializables y no industrializables (mamonos) verdes y secos, inflorescencias, raíces, cepas, cogollos y malezas; así como también bagazo, cachaza y cenizas producto de la quema de plantaciones en el campo e incineración del bagazo en las calderas de los ingenios. Adicionalmente se tienen aguas residuales y vinazas resultantes de la fermentación de etanol conteniendo carga orgánica.”



Foto 1. Residuos agrícolas de cosecha (RAC) remanentes en una plantación cosechada en verde.

Queda claro entonces que la gestión de los bosques como sumideros de carbono no son (ni deben serlo) la única iniciativa personal e institucional que permita reducir (descarbonizar) el CO₂ de la atmósfera, pues hay otros procesos naturales y prácticas agropecuarias sostenibles que también contribuyen al mismo objetivo, y deben por ello, apoyarse, promoverse y estimularse, entre las cuales pueden mencionarse las siguientes, algunas de las cuales operan perfectamente en la caña de azúcar:

- 1) Ejecutar prácticas y labores de campo que incrementen los contenidos de materia orgánica en el suelo con el objeto de secuestrar carbono atmosférico y, adicionalmente, mejorar la condición de fertilidad química, física y microbiológica de los suelos generando una relación de “ganar-ganar”.
- 2) Entre esas prácticas se tiene la inclusión de cultivos de cobertura que representa una de las actividades más prometedoras, viables y factibles de realizar. Los cultivos de cobertura son cultivos que no tienen necesariamente un destino y objetivo comercial, y se usan generalmente durante el invierno para cubrir los suelos disminuyendo los procesos de erosión. Antes de establecer el cultivo comercial se secan e incorporan y sus residuos se mantienen en el suelo favoreciendo la fijación de C y el reciclado de nutrientes. Además, tienen otros beneficios como es el control de malezas resistentes a herbicidas, la reducción en el uso de agroquímicos, la eliminación de excesos de agua, la biodiversidad y el balance fitosanitario del sistema, la mejora de la estructura de los suelos y, a su vez, en caso de ser leguminosas generan un aporte neto de N al sistema por lo que en la actualidad representan gran interés. Las plantas más comunes utilizadas para uso como coberturas vivas se emplean, según Chaves (2019e), algunas leguminosas fijadoras de N como mucuna (*Mucuna puriens*), crotalaria (*Crotalaria juncea*), kudzú (*Pueraria phaseoloides*), canavalia (*Canavalia ensiformis*), frijoles (*Phaseolus spp*; *Dolichos lablad*), gandul (*Cajanus cajan*), arveja (*Vicia sativa*), vainicas, Maní (*Arachis pintoi*), cubá, caupí (*Vigna unguiculata*),

trébol (*Trifolium repens*), soya (*Glycine spp*), entre otras. Existen en el país algunas experiencias positivas al respecto (Foto 2).



Foto 2. Cobertura verde empleando *Mucuna puriens* en Zona Norte.

- 3) Sabiendo que el potencial de secuestro de C dependerá del tipo de suelo asociado principalmente a indicadores como son el contenido y tipo de arcilla y de C nativo, el factor clima vinculado con la temperatura y la precipitación, el tipo de cultivo de cobertura existente pues determina la producción de materia seca y también la relación C/N (en la caña es relativamente alta); es imperativo entonces procurar proveer las condiciones que generen sinergismos y constituyan estímulos que favorezcan la mineralización de la materia orgánica y la recarbonización del suelo.
- 4) Tener presente que el aumento del COS proporciona beneficios económicos positivos a corto plazo y beneficios ambientales a largo plazo en cuanto a la adaptación y la mitigación del cambio climático, la biodiversidad, la productividad, la mejora de las funciones y los servicios ecosistémicos. No pueden esperarse por tanto efectos inmediatos y significativos de muy corto plazo; lo que debe sin embargo asegurar intensidad continuada y sistemática en todas las acciones emprendidas para lograrlo en el tiempo. Los efectos benéficos se verán y recuperarán con el tiempo.
- 5) Impulsar las prácticas y labores renovables, incentivando mecanismos competitivos y no apenas tradicionales.
- 6) Ejecutar prácticas de manejo sostenible del suelo evitando y contrarrestando todo lo que favorezca y conduzca a su degradación.
- 7) Lo primero que se debe hacer por razones obvias es no deteriorar más el sistema productivo (siembras donde no caben, labranzas en momento, forma e intensidad inadecuada, carga excesiva de animales, prácticas degradantes, uso desproporcionado de agroquímicos). Se debe tener siempre

presente que un suelo se deteriora mucho más rápido de lo que se lo recupera.

- 8) Prevenir y evitar la deforestación de zonas aledañas a las áreas de cultivo, pues éstas sirven como contención y protección. La arborización perimetral donde es posible realizarla resulta muy conveniente.
- 9) Sembrar y repoblar dentro de la unidad agroproductiva áreas no agrícolas con algún potencial forestal. Es viable utilizar especies frutales y también maderables.
- 10) Proteger y conservar los humedales cuando existan, pues las turberas contienen el 30% de todo el carbono almacenado en el planeta a pesar de que apenas suponen el 3% de la superficie terrestre.
- 11) Evitar y contrarrestar la erosión (hídrica, eólica) mediante la incorporación de prácticas de conservación, preservación y contención apropiadas para cada condición particular.
- 12) Es importante saber que un suelo puede contener naturalmente altos contenidos de materia orgánica por razones de clima (altitud elevada y bajas temperaturas que inhiben la actividad microbiológica), exceso de humedad en el suelo (causante de reducción y falta de O₂), por afectación de la acción microbiológica que determina la velocidad de mineralización, o por presencia de materiales con una elevada relación C/N, contenido y tipo de arcilla presente (MO puede formar complejos estables con arcillas y limo que dan una protección física al residuo que limita la acción microbiana), entre otros. Los suelos del Orden vertisol son un buen ejemplo, pues los suelos más arcillosos pierden menos materia orgánica, porque al reducir la acción de los microorganismos se favorece la acumulación de materia orgánica. En general los suelos más finos pueden almacenar más carbono respecto de suelos más arenosos y gruesos. Esta situación es engañosa pues pese a esos contenidos altos de COS la condición de fertilidad no es la mejor, lo que también cuenta.
- 13) Recarbonizar sistemáticamente los suelos agrícolas mediante la implementación de un plan estratégico que recolecte, adecue e incorpore lo generado por el propio sistema agroproductivo y reciba complementariamente el aporte de abonos orgánicos y bioinsumos externos empleados con el mismo fin (Foto 3).



Foto 3. Manejo de residuos orgánicos de cosecha en caña de azúcar.

- 14) Crear unidades productivas verdes que eviten el empleo de prácticas e insumos contrarios al enriquecimiento de los suelos con materia orgánica y protección de los recursos naturales y la biodiversidad; lo cual no es en absoluto contrario a la meta procurada de ser eficientes y competitivos.
- 15) Debe evitarse quemar la biomasa residual en el campo (sea en plantaciones en pie o ya cortadas).
- 16) La decisión de hacer o no laboreo y movimientos importantes de tierra debe ser adoptada de manera muy técnica y racional, ajustándola estrictamente a las necesidades y condiciones particulares, evitando la sobre mecanización y el tránsito excesivo e innecesario de equipo mecánico por la plantación. Debe quedar claro que la medida no es contraria a la necesidad de mecanizar, pero sí a su empleo irracional y excesivo.
- 17) Hay que tener mucho cuidado con la contaminación y deterioro del suelo provocada por el uso excesivo o inadecuado de agroquímicos, especialmente fertilizantes y herbicidas.
- 18) Es importante identificar, organizar, motivar y capacitar a los agricultores comprometidos y concientizados en cambiar el manejo tradicional del suelo y la plantación con un enfoque de carbono mediante el manejo técnico de la materia orgánica.
- 19) Luchar por obtener incentivos como pagos en el marco del financiamiento climático por servicios ambientales (opera en Costa Rica desde hace más de 20 años), por medio del cual se entregue un reconocimiento financiero por parte del Estado a los pequeños y medianos propietarios que contribuyan con el secuestro y almacenamiento del CO₂ atmosférico mediante la

recarbonización del suelo y protección del ambiente. Debido a esta iniciativa aplicada al área forestal, Costa Rica aumentó su cobertura boscosa desde 25% en la década de 1980, a 52% en la actualidad. Ahora, en una nueva versión y modalidad del Pago por Servicios Ambientales se busca incluir el cuidado y recuperación de los suelos degradados a través del aumento de su carbono orgánico, con lo que se busca elevar los contenidos de C. La iniciativa RECSOIL debe apoyarse y defenderse como expresaron Bertsch y compañeros (2021).

- 20) Es necesario diseñar, formular e implementar con carácter estratégico y prioritario nuevos enfoques operados y aplicados a la agricultura y la alimentación, para mejorar la productividad y proteger los sistemas naturales y la biodiversidad como bienes patrimoniales de la naturaleza.

Sobre este tópico tan pragmático y realista cabe revisar y retomar lo aseverado por Chaves (2020j) para el caso nacional, al expresar, que “La agroindustria azucarera costarricense, no hay duda, posee los recursos suficientes emanados de su propia actividad agrícola e industrial, representados por residuos, derivados y efluentes dotados con una importante carga orgánica, que bien organizados, tratados y operados en el campo, pueden complementar y satisfacer parcialmente las necesidades de materiales orgánicos orientadas a inducir y estimular la mejora físico-química y biológica de sus suelos; con lo cual se provocaría un interesante y nada despreciable beneficio productivo, ambiental y económico. Debe conceptualizarse el sistema productivo de la caña de azúcar como un sistema endógeno, cerrado y parcialmente autosuficiente.”

Mirar al suelo

Como principio general puede aseverarse que cuantos más residuos biomásicos potencialmente degradables existan en el medio, presumiblemente mayor contenido de materia orgánica habrá disponible en el sistema; lo cual es válido aceptando las salvedades y limitantes que en torno a la dinámica de la mineralización puedan existir. Lo cierto es que el suelo y no solo la planta o el factor clima mantienen relevancia en su disponibilidad y potencial de empleo. Por esta razón, es importante y obligado mirar el suelo como estructura viva tridimensional para buscar y encontrar respuestas a las inquietudes que puedan surgir en torno a la materia y el carbono orgánico. El suelo es un ente con vida muy activo y no apenas un substrato inerte y muerto como erróneamente algunos puedan creer.

Para recarbonizar los suelos o recuperar la materia orgánica contenida en los mismos, lo primero que se tiene que saber es qué tipo y calidad de suelos tengo, conocer su capacidad de secuestro de C, considerando que la mayoría está contenida por debajo de donde estamos mirando, pues se ubica generalmente por debajo de los 20 cm. En esta materia la cantidad de COS existente sí importa, si es que se quiere trabajar con posibilidades de éxito sobre el secuestro de carbono, lo que implica incrementar aportes operando esquemas en

los que se logre la incorporación de residuos vegetales con potencial mineralizable.

Lo cierto es que el suelo no solo opera como sustento y anclaje físico para asegurar la producción de caña, sino también como un sumidero importante de carbono de jerarquía capital para mitigar con alguna eficiencia los efectos detrimentales inducidos por las emisiones de GEI y el CC. Es por ello necesario mirar al suelo para buscar y complementar soluciones al problema productivo y ambiental presentes actualmente.

Sugerencias y recomendaciones

Virtud de su trascendencia y actualidad es imperativamente necesario, apropiado y obligado sugerir y recomendar algunas acciones y actividades que se considera pueden y deben atenderse, adoptarse y ejecutarse en materia edafoclimática, si es que verdaderamente se desea provocar e inducir el cambio positivo requerido en los sistemas de producción comercial de caña de azúcar en Costa Rica; adaptándolos a los nuevos paradigmas que imponen los consumidores y los mercados exigentes, la legislación activa, la obligación e ineludible compromiso ciudadano y hasta el sentido común que hay de sumar en la lucha por la materia ambiental y climática. Entre ellas se suscriben entre otras las siguientes recomendaciones:

- 1) Es imperativo y obligado ajustar y adaptar la agricultura y los sistemas tradicionales de producción comercial de caña de azúcar a las nuevas corrientes vinculadas con el ambiente y el cambio climático, tanto en lo concerniente a procurar su mitigación como contribuir a contrarrestar sus efectos, consecuencias e impactos. La descarbonización atmosférica, la recarbonización y el combate de la degradación del suelo son algunos de los retos vigentes, que asociados con la protección del recurso hídrico y la biodiversidad conforman parte de la nueva y visionaria agenda agrícola por atender. El sector cañero-azucarero nacional no puede ni debe quedarse al margen de contribuir con la innegable responsabilidad histórica que tiene con la ciudadanía, la nación y el mundo en materia ambiental ¡La gestión por desarrollar es hoy, no mañana!
- 2) La agroindustria debe coadyuvar y colaborar de manera decisiva, efectiva e intensiva con los esfuerzos mundiales y nacionales orientados a mitigar la emisión de GEI, que favorece e induce el indeseable cambio climático; lo cual implica actuar en varias vías: tecnológica, comercial, productiva y legal.
- 3) En esta gestión de carácter sectorial e institucional la participación de DIECA como órgano tecnológico responsable es primaria e incuestionable, no apenas como instancia técnica vinculada por delegación y obligación con la investigación, sino asumiendo el liderazgo histórico que le compete y corresponde desarrollar para inducir y orientar con agilidad, fuerza, consistencia y dinamismo los profundos y complejos cambios

requeridos implementar. La gestión de DIECA no puede quedarse apenas en investigar de manera discreta y aislada en pequeña escala, sino actuar y escalar con fuerza y convicción para que la tecnología sea adoptada e implementada en el campo por los agricultores en el menor tiempo posible. El compromiso trasciende y supera la responsabilidad de investigar y permanecer cómodamente apenas en el ámbito científico. El tiempo es importante.

- 4) Es imperativo promover, fundamentar y consolidar la Gestión Sostenible del Suelo como iniciativa tecnológica sectorial e institucional; todo fundamentado en los incuestionables beneficios ambientales y agroproductivos generados, manifestados en una mayor sostenibilidad productiva y una mejor rentabilidad final. El mejor y más convincente mensaje para un empresario cañero es mejorar la productividad y las finanzas.
- 5) La agroindustria cañero-azucarera costarricense cuenta como señalara Chaves (1985ab, 2001, 2007), con un importante recurso biomásico dotado de un gran potencial de uso distribuido en todas las áreas productoras del país, representado por hojas verdes y secas, cogollo, tallos, mamones y bagazo, que puede ser debidamente tratado, acondicionado y empleado en la recarbonización de los suelos (Foto 4). Las características, naturaleza y duración (12-24 meses) de su ciclo vegetativo contribuye para que los volúmenes de material vegetal producido en el país y depositado en el suelo sean constantes y de magnitud importante, como apuntara Chaves (2019c).

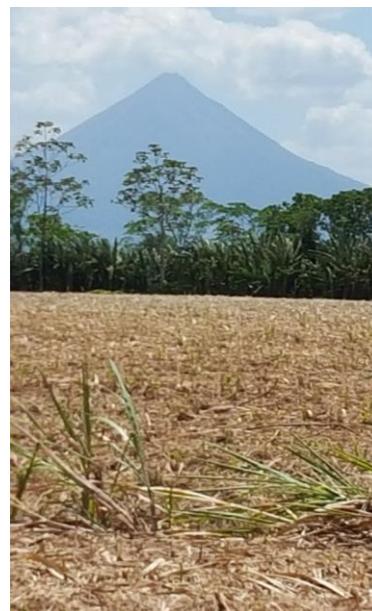


Foto 4. Producción de biomasa en una plantación comercial de caña.

- 6) El tema obliga organizar, gestionar y posicionar la recarbonización de los suelos en la agenda sectorial mediante la acción colectiva de todas las instancias vinculadas con la producción de caña en el campo y la industrialización de la materia prima a nivel de fábrica.
- 7) La importancia y trascendencia del tópico implica actuar en mejorar la gobernanza general del suelo, con el objeto de trabajar integralmente por lograr satisfacer los objetivos que fuesen planteados y establecidos con base en necesidades puntuales identificadas a nivel regional y local. Deben crearse, integrarse y articularse los mecanismos e instancias institucionales que habiliten la gestión por el clima y los suelos.
- 8) Deben establecerse y operarse de manera integrada, inclusiva y articulada políticas sectoriales específicas en el sector cañero que permitan impulsar la adopción de medidas técnicas apropiadas, en el entendido de que la solución de los problemas asociados con la degradación sistemática que padecen los suelos cañeros depende, sobre todo, de las decisiones internas que adopten las organizaciones, empresas y productores independientes. La gravedad de la situación así lo impone, siendo la investigación, la capacitación y la transferencia de información y conocimientos los mecanismos más efectivos de convencimiento e inducción.
- 9) Se debe diseñar e impulsar una iniciativa destinada a "crear capacidad institucional orientada a investigar, financiar, capacitar, motivar y educar en materia de mejoramiento de suelos y combate a su degradación".
- 10) Deben definirse y ubicarse geográficamente las zonas y localidades que cuentan con mayor capacidad natural para el secuestro de CO₂ atmosférico, que permita alcanzar neutralidad en el balance de carbono. Es relevante para ello, identificar qué regiones, suelos, climas y sistemas de manejo de plantaciones cuentan con un mayor potencial y disposición natural para incrementar las existencias de COS, con el fin de establecer y fijar prioridades para la investigación e implementación de acciones puntuales sobre la materia.
- 11) Como medida inmediata por realizar es necesario evaluar y monitorear de inmediato el contenido de C existente en los suelos sembrados con caña de azúcar en todo el país. Es para ello obligatorio evaluar de manera continua por largo tiempo, al menos 5 años, en puntos referentes estratégicamente seleccionados y ubicados, los stocks de carbono contenidos en los suelos, con el objeto de situar con certeza la situación prevaleciente. Conocer el stock de C edáfico no es sin embargo una tarea sencilla y menos barata, pues implica obtener una cantidad grande y onerosa de muestras por analizar de manera continua por mucho tiempo. Dicho muestreo debe formularse de manera geográficamente estratégica y representativa a dos profundidades: 0-20 y 20-40 cm (o una a 30 cm), tomando muestras al menos una vez al año, preferiblemente dos anuales con repeticiones de ser viable. La sensibilidad del método empleado es en este caso muy importante (Chaves 2022f). Es importante señalar que la frecuencia de muestreo para valoración del COS difiere dependiendo de su objetivo y propósito, pues puede: a) ser empleado como seguimiento en una NAMA para corroborar el efecto y cambio provocado por las prácticas y mejoras implementadas en el campo sobre un factor determinado y b) para ver la dinámica y los cambios naturales acontecidos en los contenidos de COS, lo que implica realizar muestreos en intervalos de tiempo más amplios (3-4 años).
- 12) Es necesario desarrollar e implementar una metodología apropiada para generar mapas que referencien los contenidos y el potencial de C que es posible secuestrar en diferentes ambientes y sistemas productivos, lo cual depende en gran medida, como ya se explicó, del tipo de suelo (textura y tipo de arcilla) y su contenido actual de C, de las condiciones edafoclimáticas del lugar y, fundamentalmente, de las prácticas de manejo de plantaciones ejecutadas habitualmente en el lugar que permitan proyectar y estimar los potenciales de ganancia y pérdida de C en el sistema. El mapa proporciona mejores herramientas y criterios para la toma correcta y oportuna de decisiones en lo que respecta al cambio climático y la capacidad de los suelos para capturar carbono como apuntara Gutiérrez (2021). Este tipo de mapas permite redireccionar actividades y conocer sobre la capacidad real de los suelos de ser y actuar como sumideros de C. La gestión de diseñar mapas pone en evidencia el valor real del inestimable recurso disponible.
- 13) El diseño de mapas conteniendo el potencial de secuestro de C es una herramienta técnica fundamental para poder comparar tasas de secuestro de C relativas a distintas formas de manejo de plantaciones, y evaluar discrecionalmente por zonas geográficas y ambientes agroproductivos las mejores formas y estrategias de incrementar el COS. La Figura 4 expone el resultado de una interesante aproximación desarrollada en el país que sirve de referencia (Bertsch et al 2021), donde se midió y estimó la cantidad de carbono (t C/ha/año) fijada en el suelo, demostrando que el margen de dispersión es pequeño y la concentración de valores alta al ubicarse en un rango muy corto. Superponiendo las áreas sembradas con caña de azúcar al mismo, se concluye que efectivamente el contenido de C en los mismos es bajo resultado de su insuficiencia o de contar con una alta tasa de mineralización de la materia orgánica allí contenida.

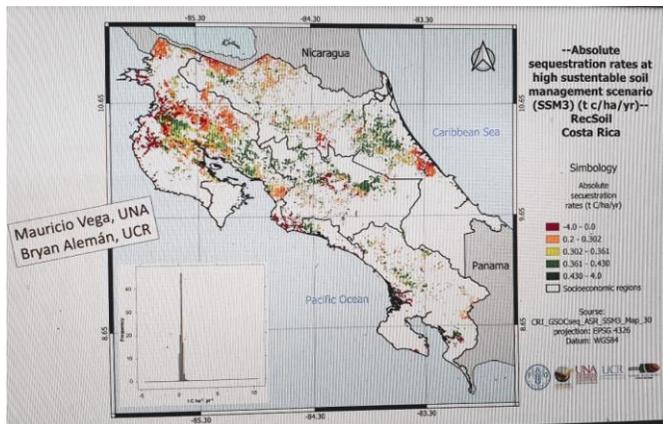


Figura 4. Tasa absoluta de secuestro de C (t C/ha/año) por suelos en Costa Rica. Fuente: Bertsch (2021).

- 14) Es importante y muy valioso valorar y promover el posible desarrollo, implementación y adaptación de un “modelo cañero de simulación de secuestro de C”, el cual considere el contenido inicial y estime el potencial final de C presente en el suelo bajo distintas prácticas de manejo.
- 15) Con el objeto de poder mejorar la información de suelos y aproximarla a la realidad de cada finca y unidad productiva, es necesario invertir en la toma representativa de muestras de suelos y proceder con el análisis fisicoquímico respectivo de laboratorio de forma regular hasta conformar un mapa semidetallado de suelos cañeros (Chaves 2022f).
- 16) De igual manera y en complemento con el punto anterior, es necesario trabajar la posibilidad de establecer estratégicamente, integrar, articular y operar en asocio con el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) una red nacional de estaciones meteorológicas (Clase A) propias del sector azucarero; como también estimar y ubicar los regímenes de humedad del suelo; determinar las familias texturales de los suelos cañeros; llevar un registro detallado de las prácticas de manejo particulares y más representativas de cada localidad; capturar y organizar la información de antecedentes productivos e índices de productividad agrícola (t caña/ha) e industrial (kg sacarosa 96°/t) a escala regional y local; con lo cual se puede conformar y dar cuerpo a la necesaria Zonificación Agroecológica del sector cañero (Chaves 2022g).
- 17) Es imperativo como meta inmediata evitar incurrir en labranzas intensivas y excesivas del suelo, donde hay más salidas (pérdidas por emisión al oxidarse la materia orgánica) que entradas (secuestro) de CO₂. En esta materia los balances tienen que ser positivos en favor de la fijación y eso se debe manifestar en las formas de manejo del sistema agroproductivo. Las labores vinculadas con la preparación y manejo del suelo y el tránsito mecánico por las plantaciones deben ser prudentes, apegadas estrictamente a necesidades reales y no teóricas, operadas con equipos de dimensión apropiada en la forma y momento oportuno.
- 18) Se debe evitar como siempre se consideró erróneamente era lo correcto, tener el lote plantado totalmente limpio y sin cobertura vegetal en las entrecalles hasta que presumiblemente llegara el cultivo estrella que todo lo resuelve, en este caso la caña de azúcar (Chaves 2015). Los nuevos conceptos consideran hoy día importante mantener un nivel bajo de cobertura (calificado como malezas) en grados no competitivos para la caña, que aporten por el contrario beneficios en varias vías.
- 19) Se deben utilizar más abonos de origen orgánico de alta calidad y bioinsumos debidamente investigados y validados en el campo en lo concerniente a fuentes, dosis, proporciones, composición, época y forma de aplicación, entre otros (Chaves 2020k). La participación de DIECA en esta materia debe ser visionaria y no debe quedarse apenas en valorar de manera aislada y parcial el efecto de incorporar “biochar” en pequeña escala; sino que se deben buscar formas alternativas de enriquecimiento de ese material por ejemplo con ácidos húmicos, fúlvicos, nutrimentos y otros aditivos que incrementen su capacidad mejoradora. Hay que entender que técnicamente el biochar no es por sí solo el restaurador y salvador de los suelos degradados, pues otras muchas medidas complementarias deben adoptarse.
- 20) El estudio del sistema radical del cultivo de la caña como “boca de la planta” adquiere gran actualidad virtud de su importancia para el desempeño y aprovechamiento del potencial anatómico, genético y fisiológico intrínseco que posee la planta. Conocer sobre los ambientes radicales, sus condiciones de crecimiento y expansión en el suelo, características y diferencias entre variedades, limitantes y también factores de estímulo constituyen una necesidad por investigar en consideración de su implicación productiva, como bien lo apuntara Chaves (2020acg).
- 21) Virtud de su importancia, actualidad y trascendencia resulta necesario incursionar y profundizar con decisión y fuerza en la investigación sobre el tema de la microbiología de suelos, evaluando la situación presente respecto al accionar de hongos benéficos y bacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR), las cuales pueden incrementar de manera directa e indirecta el desarrollo y la productividad vegetal, siendo los géneros más conocidos y utilizados en la agricultura los siguientes: *Rhizobium*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Actinoplanes*, *Agrobacterium*, *Azobacter*, *Bacillus*, entre otros. Las PGPR pueden actuar como bioestimulantes, fitoestimuladores, biopesticidas o agentes de biocontrol. El tema de la microbiología, como apuntara Chaves (2021c, 2022e), dejó de ser un campo ajeno y lejano a los intereses agrícolas inmediatos pues como está demostrado su conocimiento y aplicación generan grandes e interesantes

beneficios al agro. El sector cañero-azucarero debe apoyar la gestión en esta nueva área temática.

- 22) Obvio resulta señalar la necesidad de manejar de manera prudente, técnica y racional el tema de los fertilizantes sintéticos, conceptualizándolos y ubicándolos integralmente en los principios pregonados por la nutrición y no apenas por la fertilización comercial, como habitual y lamentablemente ocurre por impericia, cálculo y desconocimiento. El uso del N cobra especial y particular importancia en esta materia virtud de su función y su funcionalidad en el suelo, la planta y también en la atmósfera (Chaves 2010, 2021ef, 2022e).

Conclusión

El cambio climático podría considerarse por desconocimiento, desinterés o cálculo mediático un fenómeno meteorológico que solo nos afectaría con severidad en un futuro muy lejano; sin embargo, los crecientes, constantes y sistemáticos eventos y certidumbres climáticas manifestadas por tormentas y depresiones tropicales, huracanes, inundaciones, sequías prolongadas, cambios significativos en las temperaturas, están evidenciando que el problema está ya presente provocando impactos de graves y onerosas consecuencias que se agudizan e intensifican rápidamente con el tiempo. Estas incuestionables perturbaciones del clima obligan tomar medidas urgentes buscando eliminar, reducir o al menos mitigar el efecto de los factores que contribuyen con el problema. La realidad de lo que vemos hoy y se espera ocurra en el futuro inmediato, exige y obliga tomar con sentido responsable de prioridad medidas efectivas y viables de contención y corrección destinadas a reducir la vulnerabilidad, amenaza e impactos que, de no intervenir, de seguro inducirán eventos extremos provocados por el inminente cambio climático en desarrollo activo y evolución. Desconocer que el cambio climático es una inminente e irrefutable realidad solo tiene un significado: ignorancia.

Es definitivo que los incuestionables y cada más frecuentes e intensos impactos provocados por el cambio climático que tanto daño ocasionan a la calidad de vida de las poblaciones del mundo, y las posibles respuestas y argumentaciones que puedan darse a estos, están estrechamente vinculadas con el desarrollo sostenible que equilibra la producción competitiva, el comercio, el bienestar social, la prosperidad económica y la protección ambiental. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por las Naciones Unidas y adoptados en 2015 (ONU-CEPAL 2022), proporcionan el marco apropiado para evaluar con buena aproximación los vínculos que existen entre el calentamiento global, el cambio climático y los ODS que incluyen entre otros la erradicación de la pobreza, la reducción de las desigualdades y la acción en materia climática. Las opciones de adaptación que reducen la vulnerabilidad de los sistemas humanos y naturales, entre ellos la agricultura, tienen muchas sinergias y asociaciones con el desarrollo sostenible si se gestionan y operan bien; por ejemplo, al garantizar la seguridad y la calidad de los

alimentos y del agua, reducir los riesgos de desastres, mejorar las condiciones de salud, mantener los servicios ecosistémicos, reducir la pobreza y la desigualdad caminan con fuerza en esa dirección.

Algunas medidas de descarbonización por remoción del CO₂ inductor del calentamiento global y por consecuencia del cambio climático, como son la restauración de los ecosistemas naturales, el secuestro (fijación) de carbono atmosférico a través de la fotosíntesis en plantas superiores y su recarbonización en el suelo, podrían arrojar cobeneficios interesantes y muy valiosos como son lograr una mayor biodiversidad, una mejor calidad del suelo y mejores índices de productividad y crecimiento en la seguridad alimentaria local. En caso de aplicar sectorialmente esas medidas a nivel de actividad agroproductiva, se requeriría necesariamente contar con sistemas de gobernanza apropiados que permitan y promuevan una gestión sostenible de uso de la tierra que conserve, proteja e idealmente incremente los depósitos de carbono terrestres; además de otras funciones y servicios ecosistémicos asociados. El sector agrícola representa un área de oportunidad y acción muy importante para promover la gestión en procura de lograr la mitigación del cambio climático.

Es imperativo en esta compleja labor contar con un muy elevado entendimiento del ciclo del carbono y también de la forma en que opera el sistema climático del lugar. El suelo es el principal almacén o sumidero de C en ecosistemas terrestres, motivo por el cual el secuestro de C atmosférico y su recarbonización en el suelo constituye una opción de repuesta muy efectiva para contrarrestar en grado importante al cambio climático y otros desafíos afines, como acontece por ejemplo con la grave e inconveniente degradación sistemática que vienen sufriendo los suelos de uso agrícola en el país. Puede asegurarse con absoluta certeza, que el carbono es el elemento que condiciona y determina en buena parte la sustentabilidad del agro. El ciclo del C interviene de manera decisiva en el equilibrio climático del planeta, por lo cual hoy en día los suelos son considerados “sumideros de carbono” que pueden contribuir de manera ostensible y efectiva a que no haya tanto CO₂ en la atmósfera, favoreciendo y promoviendo el calentamiento global y con ello el cambio climático. Hay necesidad de implementar y operar un enfoque integrado para monitorear la acumulación de COS y medir las emisiones de GEI en los sistemas agrícolas, especialmente de CO₂ y N₂O dado su alto poder de calentamiento global y su larga vida y permanencia en la atmósfera.

El ser humano, al emplear y quemar combustibles fósiles y desarrollar agricultura para el desarrollo de su economía y aseguramiento de su alimentación, ha incrementado de manera dinámica, sistemática y desproporcionada las emisiones de CO₂ a la atmósfera, uno de los gases causantes del efecto invernadero, el calentamiento global y por consecuencia el cambio climático, lo que obliga pensar en cómo eliminar, reducir o al menos mitigar de manera pronta sus efectos (Chaves 2022cde). Para lograr satisfacer ese difícil pero insoslayable y

obligado objetivo es necesario proceder por dos vías posibles: 1) bajar las emisiones antropogénicas y 2) contrarrestar las emisiones totales; en cuyo caso la descarbonización atmosférica y la recarbonización del suelo constituyen los mecanismos habilitantes más viables y factibles para alcanzar esas metas.

Las estrategias de mitigación no pueden basarse exclusivamente en un enfoque correctivo, por lo que deben ser también preventivas. Es por ello imperativo implementar de inmediato un profundo cambio estructural, operativo y de gestión que habilite la recuperación de C en el suelo, de manera que favorezca la producción agropecuaria en forma sostenible y eficaz procurando alcanzar la ecoeficiencia y la eco-competitividad. Se trata de descarbonizar la economía y recarbonizar el suelo con base en el uso de tecnologías limpias que emitan únicamente lo que el planeta puede absorber y asimilar. La descarbonización es el proceso de reducción de emisiones de C, sobre todo dióxido de carbono (CO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) a la atmósfera. Su objetivo primario es lograr una economía global con bajas emisiones que aspire a lograr alcanzar la neutralidad climática en el menor tiempo posible.

No cabe duda que serán solamente los esfuerzos individuales y colectivos operados en todos los niveles, integrando recursos, voluntades, conocimiento y capacidades institucionales, los que podrán conducir a contrarrestar con alguna posibilidad de éxito los efectos detrimentales provocados por la creciente degradación observada en los suelos cultivados con caña de azúcar en el país, expresada y comprobada por la pérdida sistemática de productividad agroindustrial pese a la incorporación de tecnología moderna, con el consecuente e inconveniente incremento de los costos de producción relacionados, como lo ha constatado Chaves (2022a).

La evidencia y los antecedentes están ahí presentes y es información perfectamente verificable, concluyendo que los rendimientos agrícolas e industriales no crecen, salvo algunas excepciones, en la misma medida y proporción con respecto a la tecnología incorporada expresada por más mecanización, más y mejores insumos, mejores variedades, mejor manejo agronómico, mayor control de la madurez de la planta, mejores sistemas de cosecha y procesamiento, más investigación y capacitación, entre otras. Lo que sí es claro, es que los costos se incrementan significativamente y la rentabilidad disminuye de manera desproporcionada en afectación directa y preocupante para la capacidad de inversión y la estabilidad financiera de la agroempresa. La degradación de los suelos como “enfermedad oculta y silenciosa” es parte importante y factor determinante del problema, aunque muchos no quieran reconocerlo y menos admitirlo. Si no se atiende el problema edáfico con la prioridad, profundidad y tecnologías requeridas, pocas posibilidades de incrementar de manera consistente y sostenida los rendimientos agroindustriales nacionales se tendrá, pues solo los costos de producción crecerán. Si no se reconoce en primera instancia la magnitud y severidad del grave problema existente con buena parte de los suelos cultivados con caña

de azúcar en Costa Rica, pocas posibilidades de mejorar en productividad, rentabilidad y competitividad existirán; el tiempo lo dirá.

En esta misión de mejora productiva acontece que es posible secuestrar, fijar y recarbonizar la tierra incrementando el contenido de Carbono Orgánico del Suelo (COS), mediante la adecuación, mejora y rehabilitación de los suelos degradados y la adopción de prácticas de manejo sostenible de las plantaciones, lo cual implica necesariamente diseñar, implementar y operar planes y programas específicos orientados a ese objetivo, lo cual involucra incorporar tecnologías apropiadas a cada condición y ambiente de producción, generar información y desarrollar campañas de capacitación y concientización en todos los niveles sobre el tema. El cambio debe iniciar en la mente para luego pasar al campo.

En conclusión, lo responsable, aceptable y esperado es que cualquier proyecto de producción agropecuaria, no apenas de caña de azúcar, no importa su ubicación, extensión, intensidad, producto o tecnología involucrada, atienda y respete solidariamente los principios que pregonan la sustentabilidad y sostenibilidad en el manejo de los recursos naturales; por cuanto como está suficientemente demostrado, es en la actualidad posible producir eficientemente y de manera rentable, responsable y competitiva, acogiendo el respeto por los recursos naturales como norma orientadora. La verdad es que el tema ambiental es un asunto innegociable que los consumidores y los mercados de destino hacen valer cada vez con mayor fuerza, de manera que quién no se alinee se quedará inexorablemente en el camino operando en mercados de bajos precios y posiblemente exigiendo al gobierno que le resuelva su situación. Como expresara Chaves (2017a) con absoluta veracidad y actualidad “El agricultor es gestor y protagonista de su propio mejoramiento”; si no lo es, tiene al menos la obligación moral de procurar serlo en beneficio propio y el de su familia.

Literatura citada

- Bertsch, F.; Vega Araya, E.; Vega Araya, M.; Alemán Montes, B.; Chacón, M.; López, T. 2021. Proyecto de Implementación de RECSOIL en Costa Rica. En: Herramientas técnicas y financieras para valorizar el potencial productivo y ambiental de los suelos en Latinoamérica y El Caribe. Organizado por FAO-Alianza Mundial por el Suelo, Webinar, 4-8-9 junio. Presentación Electrónica en Power Point 26 láminas. Disponible en: <https://www.fao.org/global-soil-partnership/regional-partnerships/america-latina-y-el-caribe/presentations-latin-america-and-the-caribbean-meeting-co>
- Chaves Solera, M.A. 1985a. Algunas nociones sobre la producción de residuos agroindustriales y la legislación vigente en Costa Rica para regular sus efectos contaminantes. En: Taller Regional Sobre Residuos Agrícolas y Agroindustriales en América Latina y El

- Caribe. Santiago, Chile, 1984. Memorias. Santiago de Chile, PNUMA/CEPAL/GEPLACEA, julio. 25 p.
- Chaves Solera, M.A. 1985b. Diagnóstico sobre la producción y utilización de los residuos agrícolas y agroindustriales en Costa Rica. En: Taller Regional sobre Residuos Agrícolas y Agroindustriales en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile, 1984. Memorias. Santiago de Chile, PNUMA/CEPAL/GEPLACEA, julio. p: 155-321.
- Chaves Solera, M. 1999a. El Nitrógeno, Fósforo y Potasio en la caña de azúcar. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, setiembre. 130 p.
- Chaves, M. 1999b. La práctica del enclado de los suelos cañeros en Costa Rica. En: Congreso de ATACORI "Randall E. Mora A.", 13, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 1999. Memoria. San José, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), setiembre. p: 216-223.
- Chaves Solera, M. 2001. Estimación de la cantidad de residuos y derivados producidos por la agroindustria azucarera costarricense. In: Seminar on Development of Environmentally Compatible Polymers from Biowaste. San José, Costa Rica, 2001. Proceedings. San José, UNA/POLIUNA/NIMC/Fukui University of Technology. February - March. p: 92-110.
- Chaves Solera, M. 2007. Producción potencial de residuos agroindustriales por el sector azucarero costarricense. En: Encuentro Nacional Sobre Uso de Derivados Agroindustriales de la Caña de Azúcar, 1, Liberia, Guanacaste, 2007. Memoria. San José, Dirección de Investigación de la Caña de Azúcar; Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) y Escuela Agrícola de la Región Tropical Húmeda (EARTH)/La Flor, Centro Daniel Oduber, 26-28 de junio.
- Chaves Solera, M. 2010. Dinámica del Nitrógeno en el suelo y la planta de caña de azúcar. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, noviembre. Presentación Electrónica en Power Point. 57 láminas.
- Chaves Solera, M.A. 2015. Errores y omisiones técnico-administrativas que sacrifican productividad y cuestan dinero en la agroindustria azucarera. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, febrero. 16 p.
- Chaves Solera, M.A. 2017a. El agricultor: gestor y protagonista de su propio mejoramiento. Revista Germinar, Órgano Informativo Oficial del Colegio de Ingenieros Agrónomos de Costa Rica, Año 7, Edición N° 21, junio. p: 5-6.
- Chaves Solera, M.A. 2017b. Suelos, nutrición y fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica. En: Seminario Internacional Producción y Optimización de la Sacarosa en el Proceso Agroindustrial, 1, Puntarenas, Costa Rica, 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. Lluvia: imperativo para corregir la acidez de los suelos para cultivar caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(2): 4-5, mayo.
- Chaves Solera, M.A. 2019b. Humedad y compactación de suelos en la caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1(6): 4-6, junio-julio.
- Chaves Solera, M.A. 2019c. Clima y ciclo vegetativo de la caña de azúcar. Boletín Agroclimático 1(7): 5-6, julio.
- Chaves Solera, M.A. 2019d. Relación agua-suelo en la caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1(10): 5-7, agosto-setiembre.
- Chaves Solera, M.A. 2019e. 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. Clima, germinación, ahijamiento y retoñamiento de la caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(14): 6-14, julio.
- Chaves Solera, M.A. 2020d. 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. 2020e. 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. 2020f. 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. 2020g. 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. 2020h. El azúcar se hace en el campo y extrae en la fábrica: una verdad incuestionable. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(19): 6-13, setiembre.
- Chaves Solera, M.A. 2020i. 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. 2020j. Materia orgánica y disponibilidad de nitrógeno para la caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(21): 6-16, octubre.
- Chaves Solera, M.A. 2020k. Abono verde, consociación y rotación de cultivos en caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(22): 5-19, octubre.
- Chaves Solera, M.A. 2021a. Indicadores históricos de producción y productividad de la agroindustria azucarera costarricense: análisis del periodo 1969-2019 (51 zafras). Revista Entre Cañeros N° 19. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, marzo. p: 9-67.
- Chaves Solera, M.A. 2021b. Caña de azúcar: una planta rústica pero sensible al ambiente. San José, Costa Rica. En: Exposición realizada con motivo de celebrar la “Semana Ambiental”, organizada por la Federación de Estudiantes de la Universidad de Costa Rica (FEUCR), junio. Presentación Electrónica en Power Point. 101 láminas.
- Chaves Solera, M.A. 2021c. Fijación biológica de nitrógeno atmosférico (N₂) por la caña de azúcar: un importante potencial por aprovechar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(15): 7-24, julio.
- Chaves Solera, M.A. 2021d. Condiciones del sector cañero-azucarero costarricense para implementar una NAMA: caracterización sectorial. En: Seminarios de inducción y capacitación para el diseño y la formulación de la NAMA-Caña de azúcar. Organizados por la Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA), 26 noviembre. San José, Costa Rica. Presentación Electrónica en Power Point 97 láminas.
- Chaves Solera, M.A. 2021e. Fertilizantes de liberación controlada, lenta y estabilizados para uso en la caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(25): 6-23, noviembre-diciembre.
- Chaves Solera, M.A. 2021f. Sugerencias y recomendaciones para el uso óptimo de fertilizantes en la caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(26): 8- 23, diciembre.
- Chaves Solera, M.A. 2022a. Productividad agrícola de la caña de azúcar en Costa Rica según región productora. Periodo 2012 - 2020 (9 zafras). Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(4): 5-31, febrero-marzo.
- Chaves Solera, M.A. 2022b. Acciones estratégicas para mitigar Gases con Efecto Invernadero (GEI) en la fase de producción primaria de la caña de azúcar en Costa Rica: recomendaciones y sugerencias pragmáticas. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(6): 5-27, marzo.
- Chaves Solera, M.A. 2022c. La caña de azúcar en el Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050: oportunidad histórica para crecer y trascender con producción baja en emisiones. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(8): 5-18, abril.
- Chaves Solera, M.A. 2022d. NAMA como instrumento ambiental para mitigar Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la agricultura: el caso de la caña de azúcar en Costa Rica. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(10): 5-15, mayo.
- Chaves Solera, M.A. 2022e. Retos tecnológicos de la agroindustria azucarera costarricense en procura de lograr la ecoeficiencia y la eco-competitividad comercial. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(12): 5-21, junio.
- Chaves Solera, M.A. 2022f. Muestreo de suelos agrícolas: aplicación a la caña de azúcar. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(14): 5-22, julio.
- Chaves Solera, M.A. 2022h. 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.
- Duro diagnóstico de la FAO sobre los suelos cultivables: casi se acabarían para 2050. InduAmbiente, Revista de Descontaminación Industrial, Recursos Energéticos y Sustentabilidad. Noviembre 2022. Disponible en: <https://noticias-ambientales-internacionales.blogspot.com/>
- FAO. 2017. Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Roma, Italia. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 90 p.
- FAO. 2001. Soil carbon sequestration for improved land management. World soil reports 96. Rome, 58 p.
- FAO. 2022. Alianza Mundial por el Suelo. Consultado 18 de noviembre 2022. Disponible en: <https://www.fao.org/global-soil-partnership/areas-of-work/recarbonizacion-de-los-suelos-globales/es/>
- Gutiérrez, J. 2021. Proyecto Climate Action Enhancement Package - CAEP II. Uso y manejo de mapas digitales de secuestro de carbono como insumo para la adopción de estrategias de mitigación al

cambio climático. En: Herramientas técnicas y financieras para valorizar el potencial productivo y ambiental de los suelos en Latinoamérica y El Caribe. Organizado por FAO-Alianza Mundial por el Suelo, Webinar, 4-8-9 junio. Presentación Electrónica en Power Point 16 láminas. Disponible en: <https://www.fao.org/global-soil-partnership/regional-partnerships/america-latina-y-el-caribe/presentations-latin-america-and-the-caribbean-meeting-co>

Instituto Meteorológico Nacional (IMN). 2021. Factores de emisión de gases de efecto invernadero. Undécima edición / 2021. San José, Costa Rica. MINAE, IMN, ICE, LCM. 8 p.

IPCC. 2019. Calentamiento global de 1,5°C. Resumen para responsables de políticas. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)/OMM/PNUMA. 32 p. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf

LAICA. 2022a. NAMA Caña de Azúcar Costa Rica. San José, Costa Rica. Marco Chaves Solera y Zaida Solano Valverde (Coordinadores). 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. San José, Costa Rica. Marco Chaves Solera y Zaida Solano Valverde (Coordinadores). Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA). 104 p.

Martínez H., E.; Fuentes E., J.P.; Acevedo H., E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. R. C. Suelo Nutr. Veg. 8 (1): 68-96.

ONU-CEPAL. 2022. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Consultado martes 22 noviembre 2022. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/temas/agenda-2030-desarrollo-sostenible/objetivos-desarrollo-sostenible-ods>

Saynes Santillán, V. 2021. El carbono orgánico del suelo y nitrógeno: revisión de los retos para la mitigación y adaptación al cambio climático en sistemas agroalimentarios. En: Herramientas técnicas y financieras para valorizar el potencial productivo y ambiental de los suelos en Latinoamérica y El Caribe. Organizado por FAO-Alianza Mundial por el Suelo, Webinar, 4-8-9 junio. Presentación Electrónica en Power Point 21 láminas. Disponible en: <https://www.fao.org/global-soil-partnership/regional-partnerships/america-latina-y-el-caribe/presentations-latin-america-and-the-caribbean-meeting-co>

CRÉDITOS BOLETÍN AGROCLIMÁTICO

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

Modelos de tendencia del Departamento de
 Meteorología Sinóptica y Aeronáutica

INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL