UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Comportamiento fisiológico y contenido de carbono en caña para la producción de panela bajo diferentes sistemas de corte

Paola González Gutiérrez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá D.C., Colombia

2024 Año

Comportamiento fisiológico y contenido de carbono en caña para la producción de panela bajo diferentes sistemas de corte

Paola González Gutiérrez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias Agrarias

Director (a):

M. Sc. Bellanid Huertas Carranza

Codirector (a):

Dr. Sc. Helber Enrique Balaguera López

Línea de Investigación:

Fisiología de Cultivos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá D.C., Colombia

2024

Dedicatoria

A mi abuelita que está en el cielo
A mi mamá y mi novio quienes me apoyaron y vieron mi proceso

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Paola González Gutiérrez

Paola González Gutiérrez

Fecha 26/07/2023

Agradecimientos

A Dios por guiarme y llevarme por el camino correcto, y cumplir sus promesas.

A mi mamá Sandra Gutiérrez Moreno por apoyarme no solo económicamente, sino emocional y físicamente.

A mi novio Jhon Alexander Gómez por su ayuda para mi alistamiento para campo, revisión de redacción y organización de las figuras en el documento.

A mis entrenadores Débora Inés Medina y Daniel Yovanny Castro Prieto quienes me ayudaron y acompañaron en el proceso de obtención de la beca deportiva.

Al profesor Helber Enrique Balaguera López por enseñarme y tenerme paciencia desde el inicio de la Maestría en la clase Fisiología de Cultivos, hasta la elaboración de este documento.

A mi directora de tesis Bellanid Huertas Carranza quien me apoyó y me cuidó como una mamá en campo y aportó sus conocimientos para la elaboración del documento.

Al equipo de investigación de AGROSAVIA Eduar Yovany Antolinez Sandoval, Jose Luis Tauta y Ginna Natalia Cruz Castiblanco (Ginnis) por ayudarme y tenerme paciencia en campo, y por sus aportes sobre el uso del equipo LI-COR 6800 y aportes en estadística.

A los productores de panela por su hospitalidad.

A los estudiantes de estadística de la universidad por su ayuda en la estadística Nathaly Vergel Serrano, Kevin Andrés Leal Pérez, Daniel Alejandro Siatoya Patiño y Laura Andrea Nieto Osorio.

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) por el apoyo para el desarrollo del trabajo.

Resumen

Comportamiento fisiológico y contenido de carbono en caña para la producción de panela bajo diferentes sistemas de corte.

En Cundinamarca existen tres tipos de cosecha de caña de azúcar para la producción de panela: corte por entresaque en el que cortan los tallos maduros, corte por parejo sin renovación en el que cortan todos los tallos, dando lugar a cosechas sucesivas y corte por parejo en el cual cosechan y reemplazan el cultivo con uno nuevo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento fisiológico y el contenido de carbono en caña de azúcar para la producción de panela bajo tres sistemas de cosecha. Para esto se realizaron cuatro visitas a los municipios de Quebradanegra, Nocaima y Nimaima en donde se estableció un área de muestreo de 25 m^2 en 17 fincas. Se tomaron muestras para evaluar el contenido de carbono en laboratorio y durante el monitoreo se tomaron datos de altura y diámetro del tallo, número de hojas verdes y secas, área foliar, unidades SPAD, grados brix, asimilación fotosintética, carbono interno, conductancia estomática, transpiración y temperatura foliar. Se encontró el mayor valor de asimilación para el corte por entresaque (29,9 µmol m^{-2} s^{-1}), el mayor valor de área foliar para corte por parejo sin renovación (553,61 cm^2), mayor altura para corte por entresaque (3,39 m) y no hubo diferencias significativas para el contenido de carbono en ninguno de los órganos de la planta, ni para el índice de madurez. Los sistemas de cosecha generan cambios sobre el comportamiento fisiológico del cultivo que varían en función del tipo de corte.

Palabras clave: caña de azúcar, panela, comportamiento fotosintético, sistema de cosecha.

Abstract

Physiological behavior and carbon content in sugarcane for the production of panela under different harvest systems.

In Cundinamarca there are three types of sugarcane harvesting for the production of panela: cutting by “entresaque” in which the mature stalks are cut, cutting by “parejo sin renovación” in which all the stalks are cut, giving rise to successive harvests, and cutting by “parejo” in which the crop is harvested and replaced with a new one. The objective of this work was to evaluate the physiological behavior and carbon content of sugarcane for the production of panela under three harvesting systems. Four visits were made to the municipalities of Quebradanegra, Nocaima and Nimaimaima, where a sampling area of 25 m^2 was established in 17 farms. Samples were taken to evaluate carbon content in the laboratory and during the monitoring, data were collected on stem height and diameter, number of green and dry leaves, leaf area, SPAD units, ºbrix, assimilation, internal carbon, stomatal conductance, transpiration and leaf temperature. The highest assimilation value was found for the “entresaque” cut (29.9 µmol m^{-2} s^{-1}), the highest leaf area value for the “parejo sin renovación” cutting (553.61 cm^2), the greatest height for the “entresaque” cut (3.39 m) and there were no significant differences for carbon content in any of the plant organs, nor for the maturity index. The environmental conditions that vary according to the harvesting system could have generated physiological changes in the plants that favored photosynthetic behavior; however, this had no effect on the carbon content of the plant.

Keywords: sugar cane, panela, photosynthetic behavior, carbon content, physiological behavior, harvest system.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Lista de figuras ..... **XIII**

Lista de tablas ..... **XV**

Introducción **1**

1. Marco teórico **5**
1.1 El cultivo de caña de azúcar 5
1.2 Fotosíntesis de la caña de azúcar 7
1.3 Limitaciones de la fotosíntesis 9
1.4 Carga y descarga de asimilados 12
1.5 Desarrollo de la caña de azúcar 14
1.5.1 Germinación 15
1.5.2 Macollamiento 16
1.5.3 Elongación del tallo 16
1.5.4 Maduración 17
1.6 Cosecha y sistemas de cosecha 17
1.6.1 Corte por entresaque 18
1.6.2 Corte por parejo 18

2. Materiales y métodos **21**
2.1 Zona de estudio 21
2.2 Descripción del muestreo 24
2.3 Toma de datos 26
2.3.1 Comportamiento fotosintético 26
2.3.2 Variables de crecimiento e índice de madurez 27
2.3.3 Contenido de carbono 28
2.3.4 Análisis estadístico 28

3. Resultados **29**
3.1 Comportamiento fotosintético 29
3.2 Variables de crecimiento, índice de madurez y contenido de clorofilas 44
3.3 Contenido de carbono 52

4. Discusión **56**
4.1 Comportamiento fotosintético 56
4.2 Variables de crecimiento, índice de madurez y contenido de clorofilas 61
4.3 Contenido de carbono 63

4.4 Interacción entre las variables y el sistema de cosecha 65

5. Conclusiones 69

6. Bibliografía 71

Lista de figuras

Pág.

Figura 1-1 Diagrama de flujo de productos y derivados de la caña de azúcar. 2
Figura 1-1: Metabolismo fotosintético C4...... 8
Figura 1-2: Representación gráfica de la síntesis, ruta, partición y acumulación de la sacarosa en la caña de azúcar. 13
Figura 2-1: **Precipitación mensual de los municipios Quebradanegra y Nimaima durante la época de muestreo (octubre del 2020 a noviembre del 2021)**. 22
Figura 2-2: Resumen de la metodología desarrollada por Carrillo (2022) para la caracterización de las zonas de muestreo. 23
Figura 2-3: Zona en donde se realizó el estudio. 24
Figura 2-4: Esquema del corte por entresaque, corte por parejo sin renovación y corte por parejo. 25
Figura 2-5: Tipos de corte o cosecha que se reconocen en el departamento de Cundinamarca en el cultivo de caña de azúcar para la producción de panela...... 26
Figura 3-1: Respuesta fotosintética de plantas de caña bajo tres tipos de corte.... 31
Figura 3-2: Gráfico de dispersión multifactorial (a) A-Ci (b) A-gs (c) E-gs en plantas de caña bajo tres sistemas de corte 35
Figura 3-3: Matriz de diagramas de dispersión para determinar correlación. 39
Figura 3-4: Diagrama de dispersión de la relación de A-gs (a), A-Ci (b), A-Ca (c) y A-Tf (d), en plantas de caña bajo tres sistemas de corte. 42
Figura 3-5: Diagrama de Análisis de Componentes Principales (ACP). Circulo unitario de correlación de cada variable con los dos primeros componentes...... 43
Figura 3-6: Biplot de dispersión en el que se ubica el factor sistema de corte en relación con las variables...... 44
Figura 3-7: Diámetro del tallo de plantas de caña para la producción de panela bajo diferentes tipos de corte, en dos cosechas...... 45
Figura 3-8: Área foliar de plantas de caña para la producción de panela bajo diferentes tipos de corte, en dos cosechas...... 46
Figura 3-9: Altura de plantas de caña de azúcar bajo diferentes tipos de corte, en dos cosechas. 47
Figura 3-10: Velocidad de crecimiento de plantas de caña de azúcar bajo diferentes tipos de corte...... 48
Figura 3-11: Número de hojas verdes de plantas de caña de azúcar bajo diferentes tipos de corte, en dos cosechas. 49

Figura 3-12: Número de hojas secas y hojas verdes durante el monitoreo correspondiente a los meses de marzo, junio, agosto y octubre en plantas de caño bajo tres sistemas de corte. 50
Figura 3-13: Índice de madurez en plantas de caña de azúcar bajo diferentes tipos de corte, en dos cosechas. 51
Figura 3-14: Estimación de clorofilas totales en plantas de caña de azúcar bajo diferentes tipos de corte, en dos cosechas. 52
Figura 3-15: Porcentaje de carbono en muestras de hojas, yaguas, cogollo, raíz y tallo en plantas de caña bajo tres sistemas de corte. 53
Figura 3-16: Matriz de correlación para variables fisiológicas de la caña de azúcar sometidas a diferentes tipos de corte. 54
Figura 3-17: Matriz de correlación para asimilación del mes y contenido de carbono de cada órgano de la caña de azúcar sometidas a diferentes tipos de corte. 55

Lista de tablas

Pág.

Tabla 4-1: Comparación de la respuesta fisiológica de los cultivos sometidos a tres sistemas de corte 67

Abreviaturas

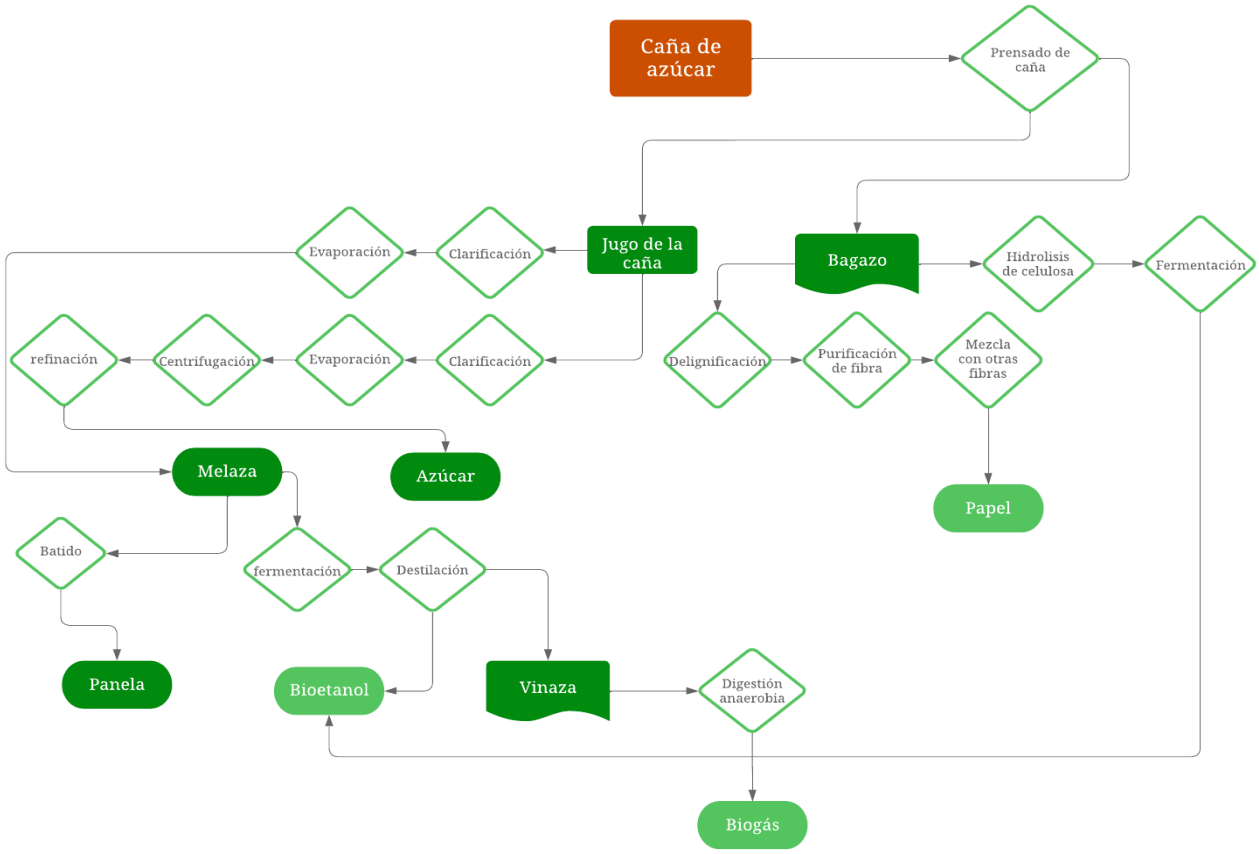
Abreviatura	Término
SE	Servicios Ecosistémicos
AF	Agricultura Familiar
A	Tasa de fotosíntesis
tl	Temperatura Foliar
gsw	Conductancia Estomática
E	Transpiración
Ci	Carbono interno
Ca	Carbono ambiental

Introducción

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es nativa de climas cálidos templados a tropicales del sur y sureste de Asia, pero se cultiva en más de 100 países en el mundo (FAO, 2019). La expansión de este cultivo se ha dado principalmente por el requerimiento de bioetanol como fuente de bioenergía sostenible (El Chami et al., 2020), aunque también se derivan productos como el biogás a partir de la vinaza; la panela, azúcar y melaza como productos del jugo de caña y el papel como resultado del uso del bagazo (Figura 1-1) (Raharja et al., 2019; Parsaee et al., 2019; Cardona et al., 2010; Hernández y Rodríguez, 2017; Pinzón, 2018). Los principales productores del cultivo de caña de azúcar en orden descendente son Brasil, India, China, Tailandia, Pakistán, México, Colombia, Guatemala, Australia y USA, estos países representan el 21,1% de la producción mundial de cultivos (FAO, 2019). La expansión de este cultivo impone un cambio en las externalidades que dependen del manejo del cultivo y del ecosistema que fue reemplazado, en adición, la productividad, además de estar sujeta a estos factores, también obedece a la situación actual de cambio climático (Zhao y Li, 2015; El Chami, et al., 2020).

Adicionalmente, el cultivo de caña también tiene relación con los servicios ecosistémicos (SE), en este sentido, uno de los primordiales temas de discusión es el secuestro del carbono, el cual, se ha evidenciado que existe una mayor proporción de carbono orgánico en el suelo en zonas de cultivos de caña en comparación con pastizales (Oliveira et al., 2019), pero la emisión de CO_2 puede aumentar debido a la actividad microbiana y las condiciones óptimas para ella que ocurren en cultivos de caña con depósitos de paja (Tavares et al., 2015). Basado en lo anterior, el efecto que tiene el cultivo de caña sobre la provisión de SE no solo depende del establecimiento del cultivo, sino que abarca más factores en los que se encuentra el manejo del cultivo y la sinergia de los efectos que se producen en él.

Figura 6-1 Diagrama de flujo de productos y derivados de la caña de azúcar.



La caña de azúcar como materia prima, de la que a través de diferentes procesos (rombos) se obtienen productos consumibles (rectángulo curvo verde oscuro). Estos procesos generan residuos (símbolo de cinta) que también son sometidos a procesos para generar consumibles secundarios (rectángulo curvo verde claro) (Raharja et al., 2019; Parsaee et al., 2019; Cardona et al., 2010; Hernández y Rodríguez, 2017; Pinzón, 2018).

De otra parte, en Colombia la caña de azúcar se destina en gran medida para la producción de panela, cultivándose con este propósito en 28 departamentos, los de mayor influencia son Boyacá, Santander, Antioquia, Nariño y Cundinamarca. El proceso de obtención de panela se caracteriza por su práctica en pequeñas explotaciones campesinas que comúnmente son familias, lo que indica que es una agroindustria tradicional (Rodríguez *et al.,* 2020). La importancia del cultivo de la caña de azúcar en Colombia radica en el papel que desempeña en la seguridad y soberanía alimentaria del país y su aporte a la economía del sector rural (Cuevas *et al*., 2017), puesto que representa el 5,9% del PIB agropecuario, genera empleo equivalente a 45 millones de jornales al año para la producción de panela, y en este proceso están inmersas alrededor de 350.000 familias, en adición, la panela

contribuye a la alimentación y nutrición del 96% de la población, siendo un producto indispensable de la canasta familiar (Minagricultura, 2017).

La agricultura familiar (AF) comprende la gestión de los recursos naturales y el trabajo de la tierra, en un contexto intercultural enmarcado por las relaciones sociales organizadas en espacios familiares y comunitarios (Acevedo et al., 2018). Una característica de la AF es la producción de consumibles para los mercados nacionales, que bajo modelos de agronegocios pueden garantizar su participación en estos mercados, y de esta manera ofrecer seguridad alimentaria en un territorio local (Ramírez y García, 2015; Piza et al., 2016). Dado que la gestión de este negocio proviene de una familia, la AF se subsidia a sí misma, por lo tanto, contribuye a la protección de la naturaleza dirigiendo esta actividad hacia la agricultura sostenible (Crowley, 2013; Rosset y Martínez, 2013; Fonseca et al., 2019).

En Cundinamarca se reconocen tres tipos de cosecha de caña para la producción de panela: i) Corte por entresaque, en el que solo se cosechan los tallos maduros, ii) Corte por parejo en el que se cosechan todos los tallos sin discriminación y existe una posterior remoción del suelo (Rodríguez et al., 2020), y en este estudio se reconoció otro sistema iii) Corte por parejo sin renovación, en el que cortan todos los tallos, pero se obtienen cosechas sucesivas del mismo cultivo. Estos sistemas de cosecha generan diferencias en el agroecosistema panelero de manera que el sistema de corte por entresaque tiene ventajas como la protección del suelo en zonas con pendientes fuertes o zonas erodables que, por el contrario de la cosecha por parejo, provoca compactación en el suelo, reducción en la porosidad y pérdida del suelo y del agua por escorrentía, afectando el desarrollo de la raíz y el crecimiento de la planta (Otto, et al. 2011; Souza et al. 2014). Por otro lado, el rendimiento del cultivo disminuye a medida que va aumentando el número de cosechas del mismo cultivo (Marín *et al*., 2019), en adición a esto, el bajo rendimiento se le atribuye a un mal tratamiento del suelo provocando baja disponibilidad de nutrientes y una pobre estructura física del suelo (Otto et al., 2011; Cherubin et al., 2016). Sin embargo, aún no se ha determinado la respuesta fisiológica y la capacidad de captura de carbono del cultivo de caña para la producción de panela frente a los tres sistemas de cosecha descritos, por tanto, los cañicultores desconocen cuál de estos sistemas de corte es el más recomendable para el ecosistema y la productividad del cultivo.

Teniendo en cuenta lo anterior, surgen las siguientes preguntas de investigación: ¿Qué efecto tienen los tres sistemas de cosecha sobre el comportamiento fotosintético de la caña para la producción de panela en Cundinamarca?, ¿Cuál es el impacto de estos tres sistemas de cosecha sobre las variables fisiológicas y de crecimiento de la caña de azúcar para la producción de panela en Cundinamarca?, ¿Qué efecto tienen estos tres sistemas de cosecha sobre el contenido de carbono de la caña de azúcar para la producción de panela?

Para responder estas preguntas fue necesario seguir con los siguientes pasos: evaluar el efecto de tres sistemas de cosecha (corte por entresaque, corte por parejo y corte por parejo sin renovación) en el comportamiento fotosintético de plantas de caña de azúcar para la producción de panela en Cundinamarca, determinar el impacto de tres sistemas de cosecha sobre algunas variables fisiológicas y de crecimiento de cultivos de caña de azúcar para la producción de panela en el departamento de Cundinamarca y determinar el efecto de tres sistemas de cosecha sobre el contenido de carbono en cultivos de caña de azúcar para la producción de panela. Esto con el fin de evaluar el comportamiento fisiológico y el contenido de carbono en caña de azúcar para la producción de panela bajo tres sistemas de cosecha (Corte por entresaque, corte por parejo y corte por parejo sin renovación) en el departamento de Cundinamarca.

1. Marco teórico

1.1 El cultivo de caña de azúcar

La caña de azúcar es una gramínea de metabolismo C4, con la sobresaliente capacidad de convertir la energía solar en energía química, en comparación con otros cultivos (Calderini y Sadras, 2020; Watt et al., 2014). Su particularidad radica en su sistema fuente-vertedero, el cual se caracteriza por almacenar sacarosa, un soluto osmóticamente activo en el parénquima, que equivale al 18% del peso fresco del tallo (Calderan et al., 2021; Lobo, 2016). La sacarosa se almacena en el tallo en su etapa de maduración por la estimulación que provoca la alta fuerza vertedero la cual aumenta la actividad fotosintética en las hojas fuente; más adelante, cuando la planta ya alcancé la madurez, el órgano vertedero disminuye su fuerza que conlleva a la inhibición de la actividad fotosintética de las hojas (Lobo, 2016; Watt et al., 2014). Las reacciones bioquímicas que ocurren en la planta generan metabolitos que responden a señales genéticas propias de la planta, o señales bioquímicas que ocurren durante el desarrollo fenológico de la misma, con el fin de cumplir funciones celulares o fisiológicas en la planta (Basler et al, 2018; Calderan et al., 2021).

La caña de azúcar es una planta monocotiledónea con la morfología típica de la familia de las Poaceae o gramíneas, el tallo está compuesto por numerosas unidades de fitómeros, cada uno con un nudo, un entrenudo y una hoja. La hoja se compone de lámina con venación paralela, la vaina que rodea la sección de tallo inmaduro y el cuello (la articulación entre ambos). Otra característica típica de estas plantas es la inflorescencia en forma de panícula, con un eje principal o raquis que posee ramificaciones y flores sésiles (Rae *et al*, 2013). La raíz de la caña presenta dos patrones de crecimiento distintos que dependen de la forma en la que se sembró; las seminales, cuando la raíz nace de una semilla, el embrión genera la coleorriza, que envuelve la radícula y que más tarde será la raíz primaria, y las adventicias que para la brotación de una yema se observa en la base de cada entrenudo

una corona de primordios radiculares que rodea el tallo, después de la plantación estos primordios se desarrollan y se alargan y el primordio agrandado empuja la corteza del tallo y crece (Rea et al., 2013; Alfaro y Ocampo, 2015).

La caña de azúcar es un cultivo de zonas áridas o semiáridas y climas cálidos a templados, se desarrolla en zonas tropicales húmedas con suelos fértiles, húmedos y bien aireados, puede llegar a alcanzar los 1600 m de altitud (Li, 2023). Dentro de los requerimientos del cultivo de caña de azúcar para la producción de panela, es necesario un buen drenaje, por lo que es común que estos cultivos se encuentren en zonas de ladera (Rodríguez *et al*., 2022) el contenido necesario de agua en el suelo para la emergencia está entre 20 y 30% de humedad y buen aireamiento para un flujo rápido de nutrientes durante la germinación y el desarrollo de raíces (Li, 2023). Los suelos más adecuados para el desarrollo de la caña son los de textura franca o franco-arcillosa, las mayores producciones de este cultivo se obtienen en suelos con pH de 5 y 8 (Romero *et al.*, 2018). Para el desarrollo del cultivo dos factores son muy importantes: el régimen térmico y la disponibilidad hídrica, para ambos aspectos, cada fase tiene distintos requerimientos (ver en el apartado 1.5 *Desarrollo de la caña*), aunque se estimen valores es importante mencionar que esto depende de factores como la variedad de la planta y la disponibilidad hídrica (Romero *et al*., 2018). La caña soporta temperaturas entre los 19 y 37°C, puede recibir una densidad de flujo de fotones máxima de 2000 µmol m^{-2} s^{-1} con luz solar plena (Sage *et al*., 2013), y requiere precipitaciones anuales de 1500 a 1800 mm (caña de azúcar para la producción de panela) (Rodríguez *et al.*, 2020). Puesto que la caña de azúcar es un cultivo eficiente para la producción de materia vegetal, demanda altos volúmenes de agua (Romero *et al*., 2018). Los cambios en las necesidades hídricas se dan debido a la interacción de varios factores como la cobertura foliar del suelo, altura y la resistencia aerodinámica que generan cambios en la evaporación del suelo que también disminuye con el crecimiento de las raíces (Echeverry y Montero, 2017).

El manejo del cultivo también genera ventajas para el desarrollo del mismo, cuando la materia vegetal que es residuo de la cosecha de la caña se conserva en el suelo provoca un aumento de lixiviados que proporciona mayor materia orgánica al suelo, lo que promueve el desarrollo de microbiota que descompone estos ingresos del suelo y los convierte en compuestos que pueden ser tomados como nutrientes para el desarrollo del nuevo cultivo (Gómez, 2016). Esta asociación de microorganismos con el cultivo de caña

no siempre se relaciona con patógenos, pues se han encontrado hongos que contribuyen a la producción de giberelinas, importante para el crecimiento de la planta, también existen dentro de la microbiota asociada a la caña, hongos que fijan el nitrógeno para favorecer la absorción del mismo por la planta, la mayoría de los microorganismos encontrados en la biodiversidad de estos cultivos, se encontraron en las raíces y hojas de la planta (Vanegas y Rodríguez, 2018).

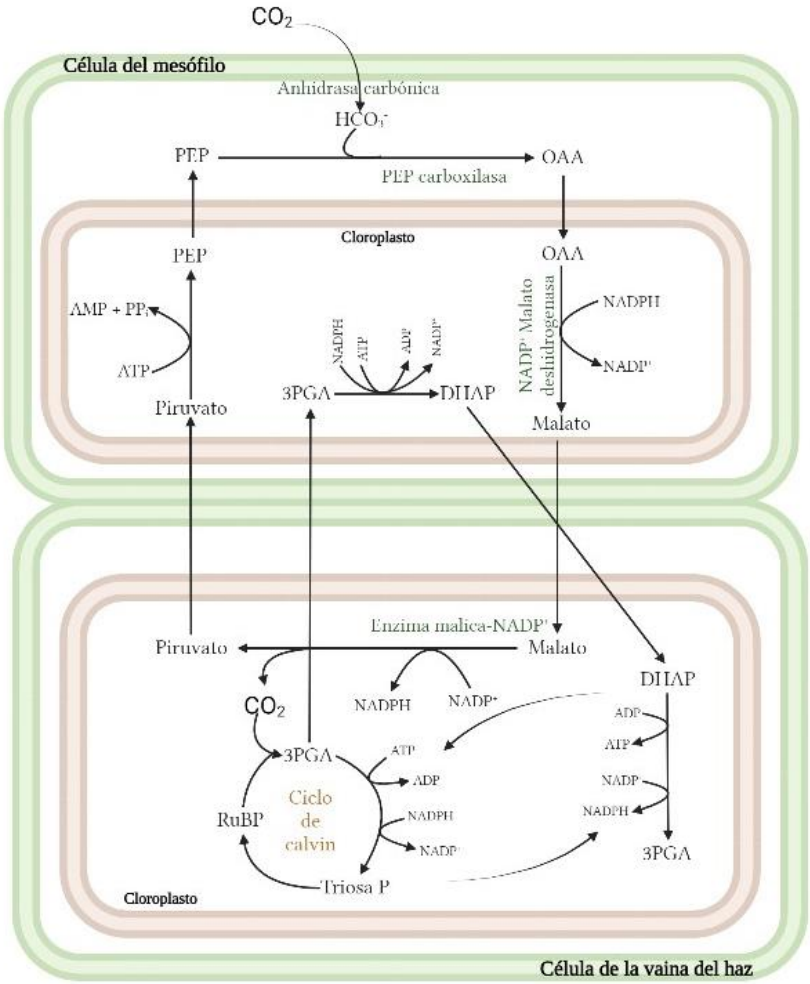
1.2 Fotosíntesis de la caña de azúcar

Así como en las plantas de metabolismo C4 la caña de azúcar se caracteriza por presentar anatomía Kranz, la cual obedece a un arreglo celular en el que, existen dos tipos diferentes de células: el primero las células del mesófilo en las que ocurre la asimilación del CO_2 que luego es enviado al segundo tipo de células, las células de la vaina del haz, encargadas de la reasimilación del CO_2 por Rubisco (Sadras y Calderini, 2020; Sage et al., 2013). Las células de la vaina del haz en la caña de azúcar están derivadas del mestoma que está dentro de la vaina del haz alrededor de los haces vasculares (Robinson y Evert, 1991). La pared de las células de la vaina del haz tiene varios plasmodesmos para favorecer la difusión hacia las células del mesófilo vía simplasto; en este caso la vía apoplasto puede ser complicada dado que la permeabilidad de estas células es baja debido a la presencia de una capa conocida como suberina (Sage et al., 2013).

La caña de azúcar pertenece al subtipo más eficiente de plantas C4 (Romanowska, et al., 2017) el subtipo NADP-ME, esto significa que, en la célula del mesófilo, el oxalacetato se convierte en malato, el cual, con ayuda de la enzima málica dependiente de NADP+ produce piruvato (Figura 1-2) (Taiz et al., 2017; Wang et al., 2014). Las plantas pertenecientes a este subtipo del metabolismo C4 tienen la particularidad de poseer cantidad de granas reducida y bajos niveles de fotosistema II en las células de la vaina del haz (Sonawane et al, 2018; Zhu et al., 2010), teniendo en cuenta su condición, se consideran muy eficientes dado que son capaces de convertir el malato en carbohidratos con la actividad del fotosistema I (Zhu et al., 2010). La eficiencia se basa en el transporte cíclico de electrones entre el fotosistema I y el complejo Cyt b6/f que genera la translocación de dos protones por fotón. De esta manera, para la producción de 2 ATP de más, necesarios para la conversión de piruvato a fosfoenolpiruvato (Figura 1-2) en este subtipo de plantas C4, se requiere la absorción de 8 protones, es decir 4 fotones únicamente para esta fase de la fotosíntesis (Zhu et al., 2010, Lambers y Oliveira, 2019).

Igualmente, también existe poca producción de NADPH+ necesario para el ciclo metabólico C3, una parte del suministro se da en la importación del malato hacia las células de la vaina del haz, en donde, con la participación de la enzima málica NADP+ se produce una parte del NADPH+, la otra parte se produce en la exportación de una parte del PGA hacia el mesófilo (Leegood y Walker, 1999; Sage et al., 2013).

Figura 1-1: Metabolismo fotosintético C4.



El CO_2 entra a la célula del mesófilo y se convierte en bicarbonato mediante la enzima anhidrasa carbónica para servir de sustrato de la fosfoenol piruvato carboxilasa, la cual cataliza la carboxilación del fosfoenol piruvato (PEP) para la producción de oxaloacetato (OAA), que a su vez es sustrato de la enzima $NADP^+$ malato deshidrogenasa que con el consumo de NADPH produce malato, compuesto que será transportado a la célula de la vaina del haz. La enzima málica $NADP^+$ descarboxila el malato para liberar el CO_2 junto con el piruvato y poder reductor. El CO_2 liberado entra al ciclo de Calvin, el cual requiere más moléculas de NADPH, de manera que una parte del fosfoenolglicerato producido en este ciclo se devuelve a la célula del mesófilo para la producción de dihidroxiacetona fosfato (DHAP), que vuelve a la célula de la vaina para mayor producción de poder reductor. Finalmente, el piruvato obtenido en la descarboxilación del malato se envía a la célula del mesófilo para formar PEP por medio de la enzima piruvato di-kinasa (Azcon-Bieto y Talón, 2013).

Esta vía del metabolismo C4 brinda una alta actividad fotosintética producto de la fijación de CO_2 por la Rubisco (Sonawane et al, 2018). No obstante, las reservas limitadas de ATP y NADPH pueden derivar a desajuste rápido en la actividad fotosintética (Kramer y Evans, 2011), además existen cambios metabólicos y enzimáticos que influyen en el comportamiento fotosintético de la caña de azúcar (Wan et al., 2021). Se ha encontrado que la tasa de intercambio de CO_2 es limitada por la enzima Piruvato dikinasa en situaciones de luz intensa, mientras que a bajas intensidades lumínicas esta tasa de intercambio es limitada por la conductancia estomática y por la actividad de la PEP carboxilasa (Yu et al., 2000).

La conductancia estomática responde a la luz y al carbono interno, en situaciones de oscuridad pueden abrirse si la concentración de CO_2 en el aire es baja, pero a condiciones de CO_2 elevado aumenta la asimilación y disminuye la conductancia estomática; por otro lado, el carbono interno representa la relación entre la pérdida de agua y la ganancia de carbono (Black et al., 2012), por lo tanto, una reducción de la densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos provoca una reducción en la pérdida de agua y a su vez, disminuye la conductancia estomática (Grantz, 2013). A niveles de CO_2 dados, la caña de azúcar alcanza un punto de saturación cerca de los 2000 µmol de fotones m-2 s-1 (más alto en comparación con plantas C3), y la diferencia de la eficiencia con la que la planta transforma esta energía lumínica en carbono fijado se refiere el rendimiento cuántico intrínseco que para la caña de azúcar está entre 0,042 y 0,075 (Sage et al., 2013).

1.3 Limitaciones de la fotosíntesis

Para entender el comportamiento de una planta es necesario identificar las limitaciones que afectan el proceso fotosintético, puesto que encontrar el punto de limitación es un indicio de dónde se encuentra el mayor grado de inversión de la planta para optimizar su actividad fotosintética (Decanos *et al.,* 2019). A grandes rasgos, las limitaciones fotosintéticas en caña de azúcar se dan por la falta de suministro de CO_2 al sitio de carboxilación por razones estomáticas o difusión del mesófilo, dificultades en el uso del CO_2 que puede ser producto de alguna limitación bioquímica en el ciclo de Calvin o limitaciones enzimáticas (Marchiori *et al.*, 2014; Decanos *et al.,* 2019). Otro motivo importante para esta planta es la relación fuente-vertedero, dado que además de presentar metabolismo C4, la caña de azúcar acumula grandes cantidades de sacarosa en su tallo, lo que la hace sensible a los cambios en la relación fuente-vertedero (Ribeiro *et al.,* 2017).

La detección de la presencia de azúcares como sacarosa, glucosa y fructosa en las hojas genera una supresión de la fotosíntesis de la caña de azúcar (Ribeiro *et al*., 2017). En esta planta se ha encontrado que la disminución de la fotosíntesis frente a cambios en los niveles de azúcares no estuvo correlacionada con la conductancia estomática, lo que demuestra que estos azúcares crean vías de señalización metabólicas que pueden ser mediante la hexoquinasa puesto que se ha demostrado que tienen una correlación negativa (Verma *et al.*, 2017). En oscuridad, los niveles de hexosas pueden verse disminuidos dado que son necesarias para la respiración de la planta, sin embargo, cuando la caña de azúcar se reincorpora a la luz, la actividad fotosintética aumenta (Li y Sheen, 2016). También se ha encontrado que la restricción de la actividad fotosintética por azúcares se da en mayor medida por la supresión de genes Rubisco, lo que disminuye la cantidad de Rubisco y afecta específicamente la parte C3 del ciclo fotosintético (Lobo *et al.,* 2015). Puesto que no se ha definido exactamente como ocurre la restricción de la actividad fotosintética, también se ha afirmado que esta no se da únicamente en las hojas fotosintéticas, sino que la sacarosa en la savia del floema también puede ejercer un mecanismo de retroalimentación negativa a larga distancia, otros estudios indican que esta regulación puede ser incluso desde el sumidero de la planta (Ainsworth *et al.,* 2018; McCormick *et al.,* 2009).

Con relación al déficit hídrico, se ha reportado que existe una relación entre el uso del Nitrógeno (N) por la planta y el suministro hídrico, en la que se encontró mayor rendimiento del cultivo con la adición de N y su combinación con el agua, esto se le atribuye a la división progresiva del fertilizante a lo largo del desarrollo de la caña (Kölln *et al.,* 2021). El N es importante para la planta dado que es el mayor constituyente de ácidos nucleicos, enzimas y proteínas, además de ser importante también en la constitución de las moléculas de clorofila (Kingston, 2013). El proceso fotosintético de caña de azúcar se ve afectado por le deficiencia de N principalmente en la fase de carboxilación, en la que afecta a Rubisco, aunque anteriormente han descrito que la limitación se da por la afectación de PEP, se ha encontrado que, a bajas concentraciones de N, ha aumentado la disponibilidad de CO_2 en las células de la vaina del haz (Tofanello *et al.,* 2021). La deficiencia de N afecta en primer lugar a las hojas más antiguas dada la retranslocación del N a las hojas jóvenes, esto posteriormente afectará a la planta con la obtención de tallos más delgados y la disminución del macollamiento de la planta (Kingston, 2013).

Otra limitación de la fotosíntesis importante es la temperatura fuera de los rangos óptimos, las temperaturas bajas afectan el transporte de electrones, el metabolismo del carbono y la conductividad estomática; también tienen efectos negativos sobre la actividad enzimática de los estromas y las inmersas en la asimilación del carbono, y limita la fosforilación y regeneración de Rubisco (Bhattacharya, 2022). En contraste, las temperaturas altas afectan la actividad del fotosistema II, reduce los pigmentos fotosintéticos, y afecta la tasa de asimilación neta (Srivastava *et al.,* 2012; Hussain *et al.,* 2018). Así como ocurre con la deficiencia hídrica, la temperatura afecta de manera distinta a la planta en cada fase del desarrollo, principalmente las etapas de brotación y emergencia (Chandiposha, 2013). Cuando la temperatura es elevada en las primeras etapas del crecimiento de la planta, existe una mayor producción de entrenudos, situación que no asegura que la altura de estas plantas sea mayor (Rai *et al*., 2017), además, la cantidad elevada de entrenudos aumenta la fibra y disminuye la porción de sacarosa del tallo (Chandiposha, 2013).

La eficiencia fotosintética también se ve afectada por el sombreado o la alta intensidad lumínica, esta baja actividad se le atribuye a limitaciones metabólicas o limitaciones de difusión (Sales *et al.,* 2023). En presencia de alta intensidad de luz, la tasa de saturación de la planta disminuye debido a una menor inversión de nitrógeno para Rubisco o a una reasignación del nitrógeno de enzimas fotosintéticas a complejos pigmento-proteína (Sales *et al.,* 2023). En sombreado esta actividad puede verse afectada por la retrodifusión del CO_2 de las células de la vaina a las células del mesófilo, lo que implica gasto energético debido a la producción de PEP a cambio de ATP sin la fijación de CO_2, o por la fotorespiración la cual también demanda un gasto energético (Kromdijk *et al.,* 2014). Se ha encontrado que el sombreado también provoca un cuello de botella metabólico que ocurre después de las reacciones dependientes de la luz en las células del mesófilo ocasionan la reducción del oxalacetato a malato que puede conducir a una disminución de plasmodesmos lo que también conduce a una disminución de la difusión de productos C4 hacia las células de la vaina del haz (Danila *et al.,* 2019; Ermakova *et al.,* 2021).

Por otro lado, existe una limitación de la fotosíntesis muy común en caña de azúcar que dependiendo del estado del cultivo podría calificarse como ventaja o desventaja. La limitación por déficit hídrico causa la disminución de la conductancia estomática y, por lo tanto, la reducción de la difusión de CO_2 en la hoja (Cruz *et al*., 2018). En este caso la fotosíntesis no se ve limitada únicamente por la disminución del CO_2 interno, sino que

además se reduce por daños bioquímicos que pueden ser visibles en la disminución de la carboxilación (Sales *et al.,* 2015). En concordancia, los pigmentos fotosintéticos absorben la energía luminosa, sin embargo, la asimilación de CO_2 no es eficiente, consecuentemente, se produce un desequilibrio en las reacciones fotoquímicas y de carboxilación, que genera un exceso de energía en las membranas de los tilacoides (Foyer y Shigeoka, 2011), esto es producto de las especies reactivas de oxígeno (ROS) que se generan durante el transporte de electrones en el PSII y que causan daños como peroxidación de lípidos, desnaturalización de proteínas y mutación del ADN (Aguiar *et al.,* 2016). La deficiencia por sequía en caña de azúcar afecta principalmente el crecimiento de la planta y la producción de biomasa en las primeras etapas del desarrollo de la planta, por lo tanto, las etapas más críticas del desarrollo son el macollamiento y la elongación del tallo, dado que es en estas etapas en las que se produce la mayor cantidad de biomasa. Por otro lado, cuando el déficit hídrico ocurre en las etapas más cercanas a la cosecha, provoca la conversión de azúcares reductores a sacarosa, lo que conduce a la ralentización del crecimiento de vegetativo y la concentración de sacarosa en el tallo aumenta, así continúa la maduración de la planta (Cardozo y Sentelhas, 2013).

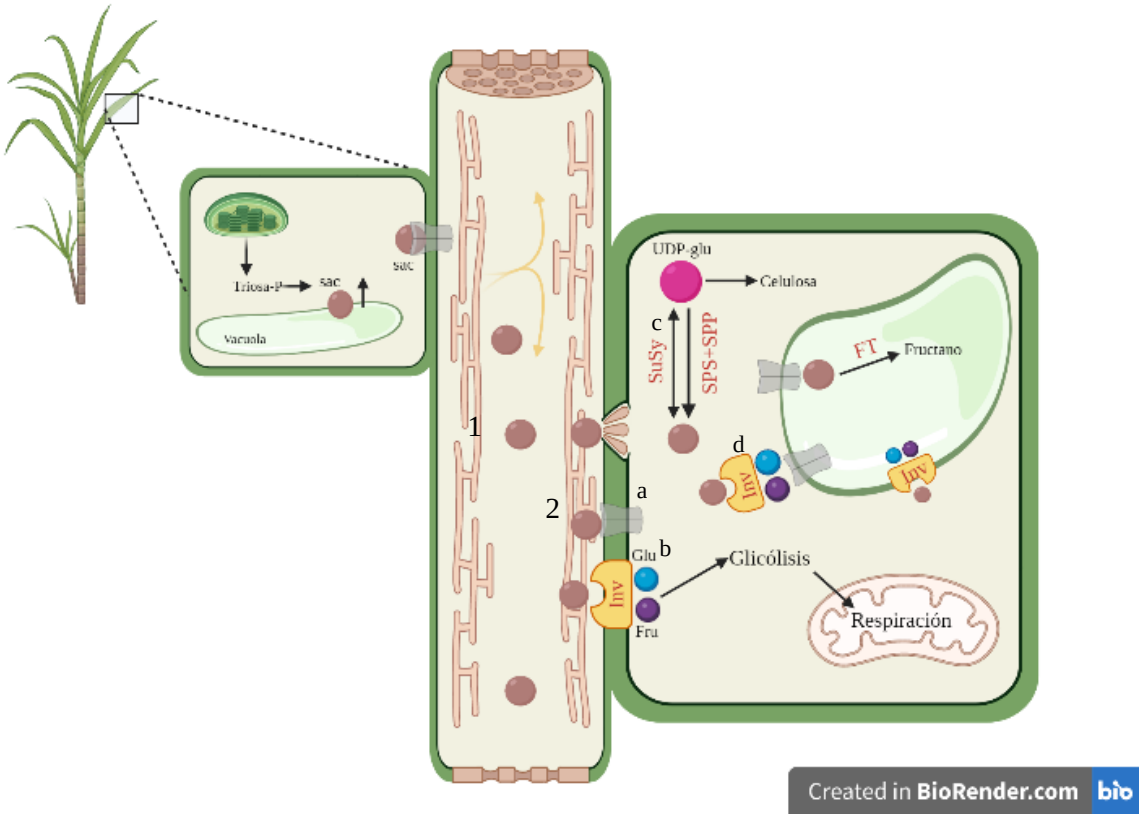
1.4 Carga y descarga de asimilados

El 18% del peso fresco de la caña de azúcar corresponde a la sacarosa almacenada en su tallo, específicamente en las células del parénquima (Inman et al, 2011). Esta sacarosa que inicialmente fue sintetizada en las hojas fotosintéticamente activas se transporta por el floema y desde allí tiene dos opciones para continuar hacia su destino: por la vía simplasto que se sugiere está en mayor medida en tallos maduros y vía apoplasto que implica su posterior hidrólisis (Wang et al., 2013). La limitación de la repartición de la sacarosa difiere del tipo de sumidero (Botha et al., 2023), la sacarosa que será utilizada en sumideros meristemáticos como tallos inmaduros está limitada por la producción de asimilados, mientras que la sacarosa que se dirige a sumideros de almacenamiento está limitada por la fuerza del vertedero (McCormick et al., 2008, Sales et al., 2018).

Teniendo en cuenta lo anterior, el flujo de la sacarosa que inicia en las células del mesófilo se da por el gradiente de la sacarosa citosólica de estas células hacia el parénquima vascular y de este hacia el floema por difusión (Figura 1-3) (Grof et al., 2013). Se ha reportado que la carga del floema para la caña de azúcar se realiza mediante el apoplasto

puesto que las células conductoras del floema no están conectadas con las células adyacentes por plasmodesmos (Beebe y Russin, 2012). La descarga del floema depende del tipo de sumidero al que se dirijan los asimilados, para los meristemas apicales de raíces la descarga se puede realizar por el simplasto mediante la diferencia de presión hidrostática entre la criba y las células meristemáticas, hacia las zonas más distales la descarga ya se puede realizar por el apoplasto por medio de transportadores de membrana; durante el crecimiento del tallo ocurre un cambio progresivo de transporte apoplástico a simplástico, en la que se van generando barreras intercelulares en las células de la vaina del haz, la finalización de esta barrera ocurre al tiempo que la terminación de la formación del entrenudo para iniciar la carga de sacarosa para almacenamiento (Grof et al., 2013).

Figura 1-2: Representación gráfica de la síntesis, ruta, partición y acumulación de la sacarosa en la caña de azúcar.



El transporte de la sacarosa se puede dar vía simplasto (1) o vía apoplasto (2), dentro de esta vía puede transportarse mediante transportadores de sacarosa (a) y mediante invertasas de la pared celular (b), las cuales hidrolizan para obtener hexosas. Dentro de la célula receptora la sacarosa se puede escindir mediante

la enzima SuSy (c) o hidrolizar con ayuda de enzimas citosólicas (d) para acumularse en la vacuola o hidrolizarse por medio de invertasas vacuolares (e). (Stein y Granot, 2019; Misra *et al,* 2022*).*

La partición de sacarosa compite entre varios sumideros dentro de los que se encuentran los metabólicos como la respiración, hexosas, ácidos orgánicos o proteínas y también la formación de la pared celular (Wang *et al*., 2013). Para este fin la sacarosa no solo es sintetizada en los órganos fotosintéticos de la planta, también se sintetiza en las células de almacenamiento (Wang et al., 2013). Para que ocurra, en primer lugar deber ser almacenada en la vacuola de las células del apoplasto o células del parénquima (Wang et al., 2013), para este fin es necesaria la hidrólisis de la sacarosa con ayuda de la invertasa de la pared celular (Misra et al., 2022) en monómeros de fructosa y glucosa las cuales ingresan al órgano receptor por medio de transportadores de hexosas (Stein y Granot, 2019), la sacarosa también puede almacenarse como sacarosa (en este caso ingresa a la célula con transportadores de sacarosa) o como fructano mediante la fructosiltransferasa (FT); la escisión de la sacarosa se realiza principalmente en el citosol por medio de SuSy, enzima que cataliza la hidrólisis reversible de la sacarosa, así produce fructosa y UDP-glucosa (Figura 1-3) (Stein y Granot, 2019). La resíntesis de la sacarosa inicia con la sacarosa fosfato sintasa (SPS) que a partir de fructosa-6-P y UDP-glucosa forma sacarosa-P la cual es transformada en sacarosa por la enzima sacarosa fosfato fosfatasa (SPP) (Figura 1-3) (Wang *et al*., 2013).

1.5 Desarrollo de la caña de azúcar

El desarrollo de la caña de azúcar es lento en comparación con otros cultivos de gramíneas, sin embargo, es eficiente a la hora de acumular biomasa y obtener altos rendimientos (Sadras y Calderini, 2020). La caña de azúcar crece de forma óptima bajo condiciones cálidas (28-30°C) y soleadas, asimismo necesita un volumen considerable de agua que va desde 1100 a 1800 mm al año (Carr y Knox, 2011); los valores de temperatura e hidratación que favorecen una situación de estrés para el cultivo son 10°C y menos de 700 mm por año, respectivamente (Portman et al., 2008). El desarrollo del cultivo puede durar alrededor de los 12 meses cuando las condiciones son favorables, mientras que en ambientes templados puede llegar a durar 24 meses (Sadras y Calderini, 2020).

El desarrollo de la caña de azúcar se puede resumir en las siguientes etapas: germinación, macollamiento, elongación del tallo, concentración de azúcares o maduración y floración

(Bonnett, 2014), cada una de estas etapas dependen de un tiempo térmico en específico y dentro del crecimiento del cultivo es posible que exista solapamiento o avances diferenciales entre plantas del cultivo debido a la variabilidad de latencia en las yemas, o distintas temperaturas del suelo en el posicionamiento de las yemas (Poser *et al*., 2019; Jones y Singels, 2018). En el caso del cultivo de la caña de azúcar, la maduración de la planta no coincide con la maduración agronómica, puesto que la floración de la planta reduce el rendimiento y la calidad del cultivo; cuando inicia esta etapa, las hojas completamente verdes comienzan la senescencia, lo que disminuye la actividad fotosintética de la planta, en adición, la pérdida de la dominancia apical induce el brote de ramas laterales, las cuales captan la sacarosa que se ha almacenado anteriormente en el tallo (Sadras y Calderini, 2020).

Para estimar el desarrollo de la planta en función de la temperatura se usan los grados día de crecimiento (GDC), los cuales tienen en cuenta el tiempo fisiológico, que se refiere a la energía que necesita la planta para alcanzar la siguiente etapa del desarrollo y está controlado por la temperatura, que define la velocidad de las reacciones bioquímicas (Sierra, 2023). Este índice se obtiene mediante el valor de la temperatura base (Tb), por debajo de la cual el crecimiento de la planta es cero que para el caso de la caña de azúcar es 24,8°C, mientras que la temperatura óptima (temperatura a la cual ocurre el crecimiento máximo) es de 27,7°C y la temperatura máxima (temperatura a la cual el crecimiento se detiene por estrés) es de 32,3°C.

1.5.1 Germinación

Esta fase del desarrollo puede llegar a durar hasta 45 días (Rai *et al*., 2017) y necesita una temperatura de 30 a 35°C y una temperatura base de aproximadamente 17°C, aunque puede variar dependiendo de la variedad (Jones y Singels, 2018; Smit, 2011). A pesar de que se conocen métodos para la reproducción sexual de esta planta, es común la propagación vegetativa del cultivo que se da mediante el corte del tallo en fragmentos pequeños que tienen una o más yemas; en estas yemas se ubica tejido meristemático, del que pueden surgir raíces o brotes puesto que al cortar el tallo se pierde la dominancia apical (Sadras y Calderini, 2020; Moore *et al.,* 2014).

1.5.2 Macollamiento

El macollamiento dura aproximadamente 120 días (Rai *et al*., 2017), esta fase se refiere a la ramificación subterránea del tallo y ocurre cuando los brotes primarios generan entrenudos pequeños, los cuales tienen una hoja y una yema de la que nacen brotes secundarios para formar los macollos (Vasantha et al., 2012; Sadras y Calderini, 2020). Cuando la planta alcanza un número máximo de macollos, que se reporta a los 120 días después de la siembra, inicia la mortalidad con el fin de mantener los macollos que quedan vivos (Kapur et al., 2011). Los macollos que mueren entran en senescencia debido a que aumenta el nivel de ABA y ocurre una retraslocación del carbono hacia los macollos verdes (Vasantha et al., 2012).

1.5.3 Elongación del tallo

El inicio de la elongación del tallo no está realmente definido, sin embargo, se podría determinar mediante la aparición de un número determinado de hojas bien desarrolladas o después del alcance de una biomasa seca específica (Hoffman et al., 2018; Martiné y Todoroff; 2004). La forma de crecimiento del tallo de la caña inicia generando nuevos entrenudos en el ápice de esta, de manera que los entrenudos jóvenes se encuentran en la parte superior del tallo (Lingle y Thomson, 2012). Cuando ya está completamente desarrollada la hoja, inicia el alargamiento del entrenudo y a partir de allí inicia el crecimiento del tallo que puede durar desde 70 a 170 días (Rai *et al*., 2017), durante el cual ocurre el alargamiento celular de la pared celular primaria de cada entrenudo, cuando este alargamiento finaliza inicia la formación de la pared celular secundaria que comienza en la parte superior del entrenudo y se va extendiendo hacia abajo, esto ocurre a los días del inicio del alargamiento del entrenudo (Sadras y Calderini, 2020; Boudet, 2003). Finalizado el crecimiento inicia el almacenamiento de sacarosa, no obstante, la carga de azúcares solubles inicia inmediatamente; en los entrenudos jóvenes se encuentra en mayor medida glucosa y fructosa hasta la finalización del crecimiento del entrenudo (Lingle y Thomson, 2012).

En cuanto a la estructura del tallo, a medida que va ocurriendo el alargamiento del entrenudo, va disminuyendo la concentración de hemicelulosa y aumentando la de celulosa, la cual llega a su punto máximo cuando finaliza el alargamiento del entrenudo,

posteriormente inicia el aumento de la concentración de lignina y la disminución de celulosa al mismo tiempo en que inicia la acumulación de sacarosa (Lingle y Thomson, 2012); la lignina aparece en un principio en el protoxilema de la planta y se va transportando hacia el exterior del tallo, pasando por el metaxilema, interior y luego exterior de la vaina del haz, parénquima de almacenamiento y haces periféricos y epidermis (Jacobsen et al., 1992; Lingle y Thomson, 2012), este polímero es el principal componente de la pared celular puesto que su condición de *polímero no lineal*, formado a partir de varios monómeros de baja reactividad, impide la degradación del mismo por una sola enzima, lo que es bastante útil a la hora de evitar el proceso de fermentación de la biomasa, y lo que lo convierte en el responsable de la recalcitrancia de la biomasa (Van Acker *et al*., 2013; Bottcher *et al.*, 2013).

1.5.4 Maduración

Para términos de productividad, el desarrollo del cultivo de caña se tiene en cuenta hasta la fase vegetativa. La caña de azúcar madura naturalmente con temperaturas frescas y un leve grado de estrés por déficit hídrico (Sadras y Calderini, 2020). Se dice que la maduración comprende dos etapas: en la primera ocurre el desprendimiento de las hojas y en la segunda ocurren los cambios bioquímicos relativos a la acumulación de azúcar en el tallo que dependen de la variedad de la planta y factores ambientales (Vasantha et al., 2021).

1.6 Cosecha y sistemas de cosecha

La cosecha de caña de azúcar para la producción de panela se basa en el corte de los tallos que visualmente están maduros, de manera que cuando los tallos alcanzan una coloración amarillenta a marrón y las hojas de la parte media baja del tallo comienzan a secarse, los grados Brix para estas cosechan oscilan entre los 17 y 23° (Rodríguez et al., 2020). Dentro de la literatura se reportan dos sistemas de corte o cosecha: corte por entresaque y corte por parejo. En Cundinamarca el 93,7% de productores cosechan por entresaque, el 3,8% cosecha por parejo y el 2,5% practica los dos tipos de cosecha (Corpoica, 2016). Después de la cosecha, para todos los tipos de corte, normalmente se separan los cogollos y las hojas secas, de manera que el encargado de cosechar solo se lleva los tallos y el resto de material vegetal queda en el lote, en algunos casos esta biomasa sirve como alimento para el ganado.

1.6.1 Corte por entresaque

El corte por entresaque es común en pequeños productores y en lugares en donde la caña es un cultivo complementario que generalmente es el café; se cosechan los tallos maduros y se dejan en la planta aquellos que todavía no están visualmente maduros para que continúen su desarrollo, la intensidad de entresaque, es decir, la cantidad de tallos cosechados respecto a la cantidad total de tallos en el lote, junto con la capacidad de la planta para producir tallos nuevos, la edad de la cepa y las prácticas culturales, definen la frecuencia de cosecha para este sistema de corte, que generalmente es cada cuatro o seis meses, o de acuerdo a la necesidad del productor (Rodríguez *et al*., 2020).

Según López (2015) el corte por entresaque presenta ventajas como:

- Posibilidad de cosecha con mayor frecuencia.
- Protege al suelo en aquellos lotes que tienen pendientes fuertes o erodables.
- La calidad de la panela es mejor en aquellos lugares en donde se cosecha con conciencia.

Por otro lado, las desventajas presentes en el corte por entresaque son (López, 2015):

- Debido a la presencia de tallos más largos durante el crecimiento de los nuevos, es necesaria una mayor distancia de siembra para garantizar la entrada de luz a todos los tallos.
- La distancia de siembra favorece el desarrollo de malezas.
- Daño de tallos inmaduros durante el corte de tallos maduros.
- Mayor afectación de plagas y enfermedades (presencia de todas las etapas fenológicas).
- En la mayoría de los casos los rendimientos de caña y panela son bajos.
- Baja posibilidad de renovación de cultivos.

1.6.2 Corte por parejo

El corte por parejo se desarrolla en cultivos tecnificados y consiste en el corte de todos los tallos ubicados en un mismo lote, generalmente, para que el desarrollo del cultivo sea uniforme, se siembra en chorrillo (Rodríguez *et al.*, 2020). Este sistema de cosecha a su vez se divide en dos: corte por parejo y corte por parejo sin renovación, la diferencia que

existe entre estos dos sistemas radica en el desarrollo del mismo cultivo después de la cosecha (corte por parejo sin renovación), y el cambio del cultivo junto con la remoción del suelo (corte por parejo).

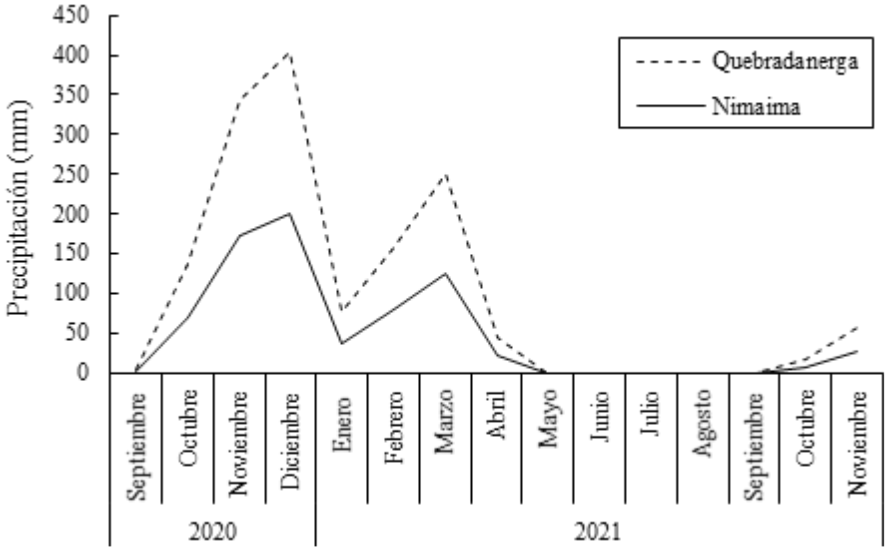
Aunque este tipo de corte facilita la organización de la finca y reduce los costos de cosecha (Lopera, 2015), se ha reportado que estos sistemas de corte generan las mayores pérdidas de suelo, y que estas pérdidas son más evidentes al momento justo después de la cosecha (Muñóz *et al*., 2022).

2. Materiales y métodos

2.1 Zona de estudio

Con ayuda de la base de datos de agricultores que tipificó AGROSAVIA, se determinaron los predios que serían evaluados en el departamento de Cundinamarca, corresponden a los municipios de Quebradanegra (5° 6'50.69"N, 74°30'0.97"O; 5° 5'37.60"N, 74°30'43.37"O), Nocaima (5° 2'47.11"N, 74°24'50.15"O; 5° 4'40.02"N, 74°23'5.81"O) y Nimaima (5° 9'52.76"N, 74°22'39.93"O) en lotes localizados en el rango altitudinal entre 900 a 1105 msnm en la provincia de Gualivá. La temperatura promedio de la región es de 23°C, siendo agosto el mes de mayor temperatura (25°C) y noviembre el de menor temperatura (22°C); tiene un comportamiento bimodal de dos periodos húmedos entre febrero - mayo, y septiembre - diciembre, con una precipitación anual de 986 mm (IDEAM, 2020; Figura 2-1). Según la CAR (2020) el tipo de paisaje predominante es el de montaña; y presenta suelos desarrollados a partir de rocas clásticas limo-arcillosas y químicas carbonatadas, profundos a superficiales con texturas que varían entre finas y medias y buen drenaje (IGAC, 2020).

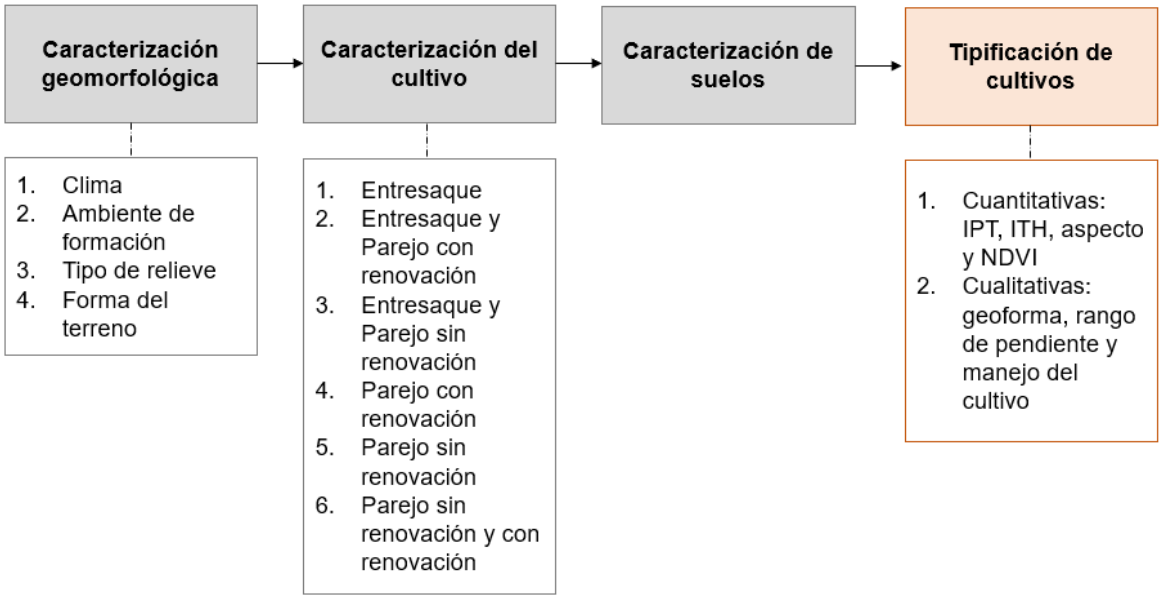
Figura 2-1: **Precipitación mensual de los municipios Quebradanegra y Nimaima durante la época de muestreo (octubre del 2020 a noviembre del 2021).** Se utilizaron datos de precipitación de la base de datos del sistema DHIME del IDEAM.



Se utilizó una base de datos de agricultores tipificados previamente por AGROSAVIA, que contenía 341 predios con cultivos de caña para la producción de panela. Posteriormente, se realizó un primer filtro en el que se escogieron aquellos productores con los que fue posible tener contacto, se obtuvieron finalmente 178 predios. Posterior a esto, para escoger las fincas en las que se evaluó el comportamiento fisiológico del cultivo de caña de azúcar para la producción de panela, se hizo el análisis de hipercubo latino (Figura 2-2), en el que se consideró la caracterización geomorfológica, caracterización del cultivo y caracterización del suelo para obtener los 5 clúster que se utilizaron en este trabajo. Esta metodología desarrollada por Carrillo (2022) describió tres de los cinco clúster, los cuales se caracterizan de la siguiente manera:

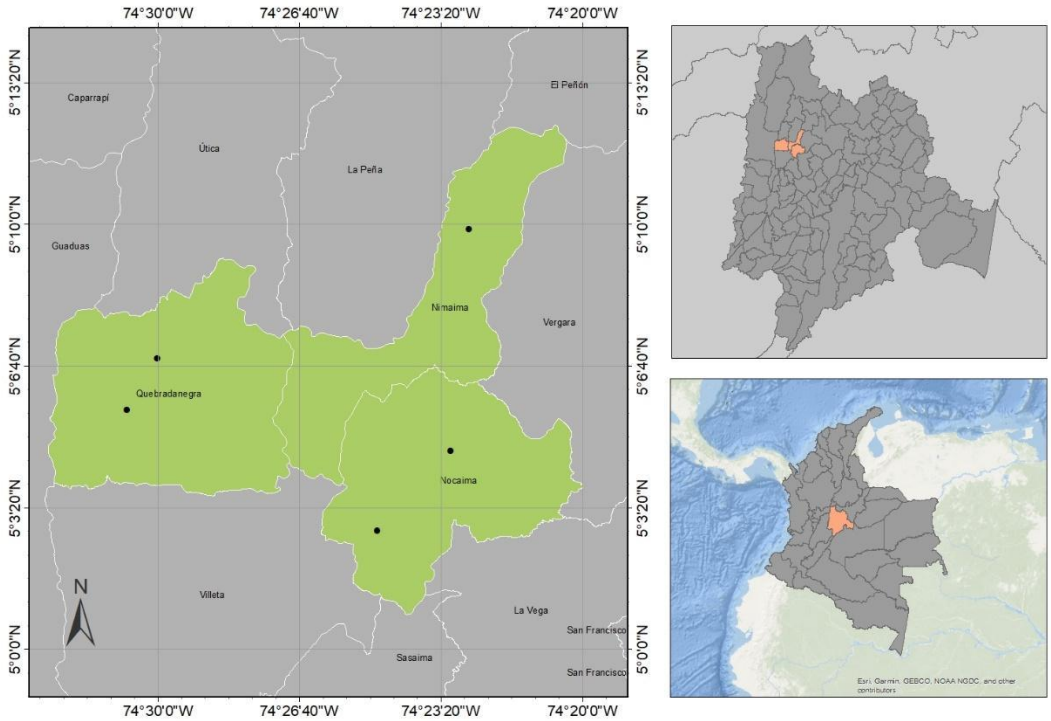
- Geoforma: Frente de Espinazo, Manejo: Parejo sin renovación y Pendiente: 25-50%.
- Geoforma: Revés de Espinazo, Manejo: Entresaque y Pendiente: 25-50%.
- Geoforma: Cima y ladera de loma, Manejo: Parejo sin renovación y Pendiente: 12-25%.

Figura 2-2: Resumen de la metodología desarrollada por Carrillo (2022) para la caracterización de las zonas de muestreo.



Dentro de la zona de muestreo que se caracterizó, se evaluaron un total de 17 fincas de las cuales se escogieron cinco (dos en Nocaima, dos en Quebradanegra y una en Nimaima) que corresponden a los cinco clúster identificados en la tipificación, esto para la evaluación de respuesta fotosintética (Figura 2-3), en estos predios se seleccionaron dos parcelas de 25 m^2 y se hizo la medición de fotosíntesis en una planta por parcela, es decir dos plantas por predio.

Figura 2-3: Zona en donde se realizó el estudio.



Los lotes se encontraban en un rango altitudinal de 900 a 1105 msnm en la provincia de Gualivá en el departamento de Cundinamarca.

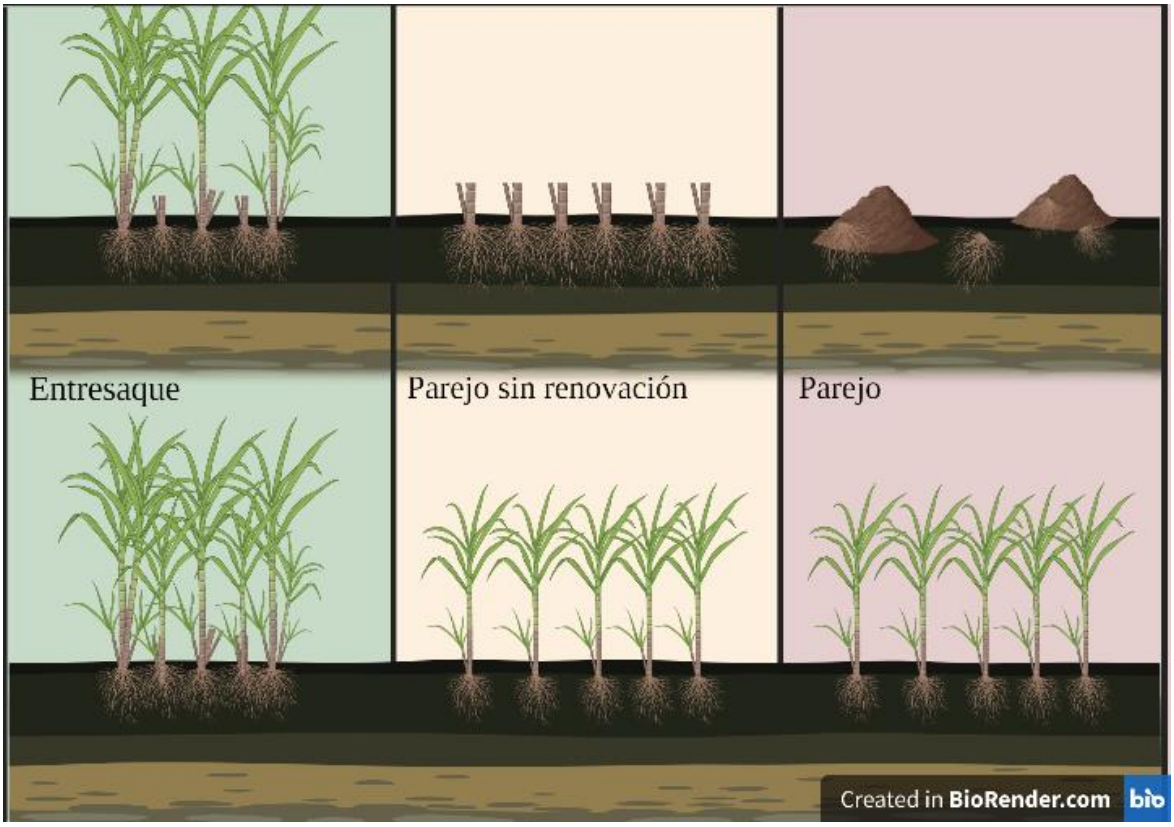
2.2 Descripción del muestreo

En cada predio se determinó el sistema de cosecha que el agricultor manejaba. La evaluación del comportamiento fotosintético se ejecutó (Figura 2-4) en los meses de marzo, junio, agosto y octubre. Dentro de cada parcela se seleccionaron cinco cepas y de cada cepa cinco plantas, para la medición se tomaron cuatro plantas al azar de las 25 totales por parcela.

Para la determinación del tipo de cosecha fue necesario especificar esta información con el productor quien definía el sistema de cosecha entre parejo, parejo sin renovación y entresaque (Figura 2-5). Para las plantas cuyo cultivo se cosechaba por corte por entresaque solo se midieron y cosecharon los tallos maduros en la última medición. Dentro de la valoración del sistema de cosecha de cada finca, no se incluyó un estudio de las variedades que cada productor maneja, puesto que en la mayoría de los casos el productor

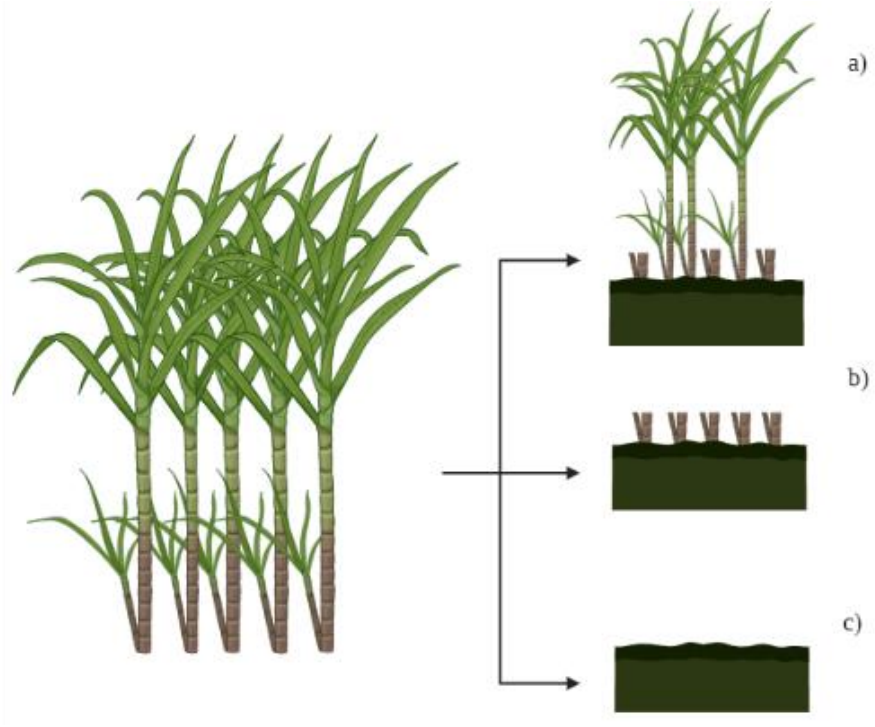
no conoce la variedad que cosecha y dentro de su cultivo pueden existir mezclas de variedades. En adición, a pesar de que se seleccionaron las plantas para realizar el seguimiento, no se controlaron otros aspectos como temperatura, precipitación, variedad de la planta, etc. Por estos motivos este estudio es de carácter observacional.

Figura 2-4: Esquema del corte por entresaque, corte por parejo sin renovación y corte por parejo. En la primera fila se observa el cultivo recién cosechado, es decir la primera medición, en la segunda fila se observa el cultivo tiempo después del corte, es decir en la última medición.



Este trabajo correspondió a un estudio observacional descriptivo (Manterola y Otzen, 2014; Walpore et al., 2007), en el que se realizó un registro transversal en dos momentos de cosecha: octubre del 2020 y noviembre del 2021, en cada una de las 17 fincas. Posterior al reconocimiento del tipo de corte (Figura 2-5), dentro de cada finca, se escogieron dos parcelas de 25 m^2, de cada una de ellas se extrajeron aleatoriamente ocho cañas para la medición de las variables fisiológicas y de contenido de carbono, para el caso de cultivos de corte por entresaque, se escogieron las cañas visualmente maduras (condición evaluada por el productor).

Figura 2-5: Tipos de corte o cosecha que se reconocen en el departamento de Cundinamarca en el cultivo de caña de azúcar para la producción de panela.



a) Corte por entresaque: el productor escoge las cañas visualmente maduras para ser cosechadas, b) corte por parejo sin renovación: el productor corta todas las cañas sin discriminación, pero deja la cepa para un cultivo en sucesión, c) corte por parejo: el productor cosecha todas las cañas sin oportunidad de una siguiente cosecha del mismo cultivo.

2.3 Toma de datos

2.3.1 Comportamiento fotosintético

Cada muestreo se realizó en la mañana entre las 9:00 am y 11:00 am, se escogió este horario porque es donde hay mayor intercambio gaseoso. Para la toma de datos se utilizó el IRGA LiCor-6800, como primera medida se procedió a calibrar y verificar el funcionamiento del equipo, se utilizó una cámara de apertura de 1x3FB, el flujo de referencia de H_2O fue de 20 mmolmol^{-1}, el de CO_2 de 400 mmolmol^{-1}, el de fotones de 1500 µmol m^{-2} s^{-1} y la temperatura se mantuvo en 30°C.

Luego de la puesta en marcha del equipo, se ubicó la cámara del cabezal sobre una hoja representativa de cada planta, es decir, una hoja bien desarrollada y se capturó el dato al observar estable la variable “Tasa de asimilación”. Las variables que se registraron en cada medición fueron: tasa de asimilación neta (A), transpiración (E), carbono interno (Ci), carbono ambiental (Ca), temperatura foliar (tl) y conductancia estomática (gs).
También se estimó el contenido de clorofilas (unidades Spad), para esto se utilizó la primera hoja totalmente desarrollada de cada caña, y se hizo lectura mediante el uso del SPAD-502 en tres partes de la hoja (base, ápice y parte media), posteriormente se realizó un promedio entre estos tres valores.

2.3.2 Variables de crecimiento e índice de madurez

Se evaluaron variables de crecimiento como, la altura de la planta (m), la cual se midió desde el suelo hasta la base de la primera hoja completamente desarrollada con una mira estadimétrica de nivelación combinada GKNL4M Leica. El diámetro de la caña (mm) se determinó en la parte media del tallo de la caña con un calibrador pie de rey (Mitutoyo, Andover). Para el área foliar (cm^2) se extrajo la primera hoja totalmente desarrollada de tres cañas de cada cepa seleccionadas al azar, luego se hizo la determinación con un medidor portátil de área foliar ADC modelo AM350. Por último, para el número de hojas se hizo un conteo de hojas completamente verdes de cada caña (aquellas que tenían daños que no fueran mecánicos, no se tenían en cuenta). Se determinó la velocidad de crecimiento mediante la fórmula propuesta por Sierra (2023):

$$AGR = g/t$$

Donde:
AGR = Velocidad de crecimiento (cm/día)
g = Altura del tallo (cm)
t = tiempo desde el momento de siembra hasta el momento “g”

Finalmente se calculó el índice de madurez, se extrajo el jugo de la caña en la parte del ápice y la base con ayuda de un punzón, se dejó caer una gota de la cantidad de líquido extraída en un refractómetro digital Hanna Instruments (Hi 96801) para obtener los grados brix, el índice de madurez (IM) se calculó con la siguiente fórmula:

$$IM = \frac{Grados\ brix\ del\ ápice\ del\ tallo}{Grados\ brix\ de\ la\ base\ del\ tallo}$$

2.3.3 Contenido de carbono

En cada finca se trazó un cuadrante y realizó una cajuela de 40 cm de largo, 40 cm de ancho y 70 cm de profundidad retirando el suelo adherido a las cepas y raíces. Posteriormente, se separaron los reservorios (hojas, tallos, yaguas, cogollos, raíz y cepa) se registró el peso de la materia fresca y se almacenaron en bolsas ziploc de cada reservorio y se llevaron al laboratorio. En el laboratorio se obtuvo el valor de la materia seca por medio del secado de la muestra en una estufa a 60°C por 48 horas, luego se trituró en un molino y se determinó el carbono de la planta con el método analítico para la cuantificación del contenido de carbono orgánico en tejido vegetal de Walkley y Black (1934).

2.3.4 Análisis estadístico

Para las variables de intercambio gaseoso se hizo una depuración de datos con el fin de eliminar aquellos que presentaban valores atípicos y de esta manera se obtuvieron dos repeticiones por planta. A continuación, mediante el uso del programa R versión 3.6.0., se realizó el análisis multivariado de datos no paramétricos PERMANOVA de la librería “vegan” y por último, para la descripción del comportamiento de las variables un Análisis de Componentes Principales (ACP) para el que fueron necesarias las librerías “GGally” y “ggplot2”.

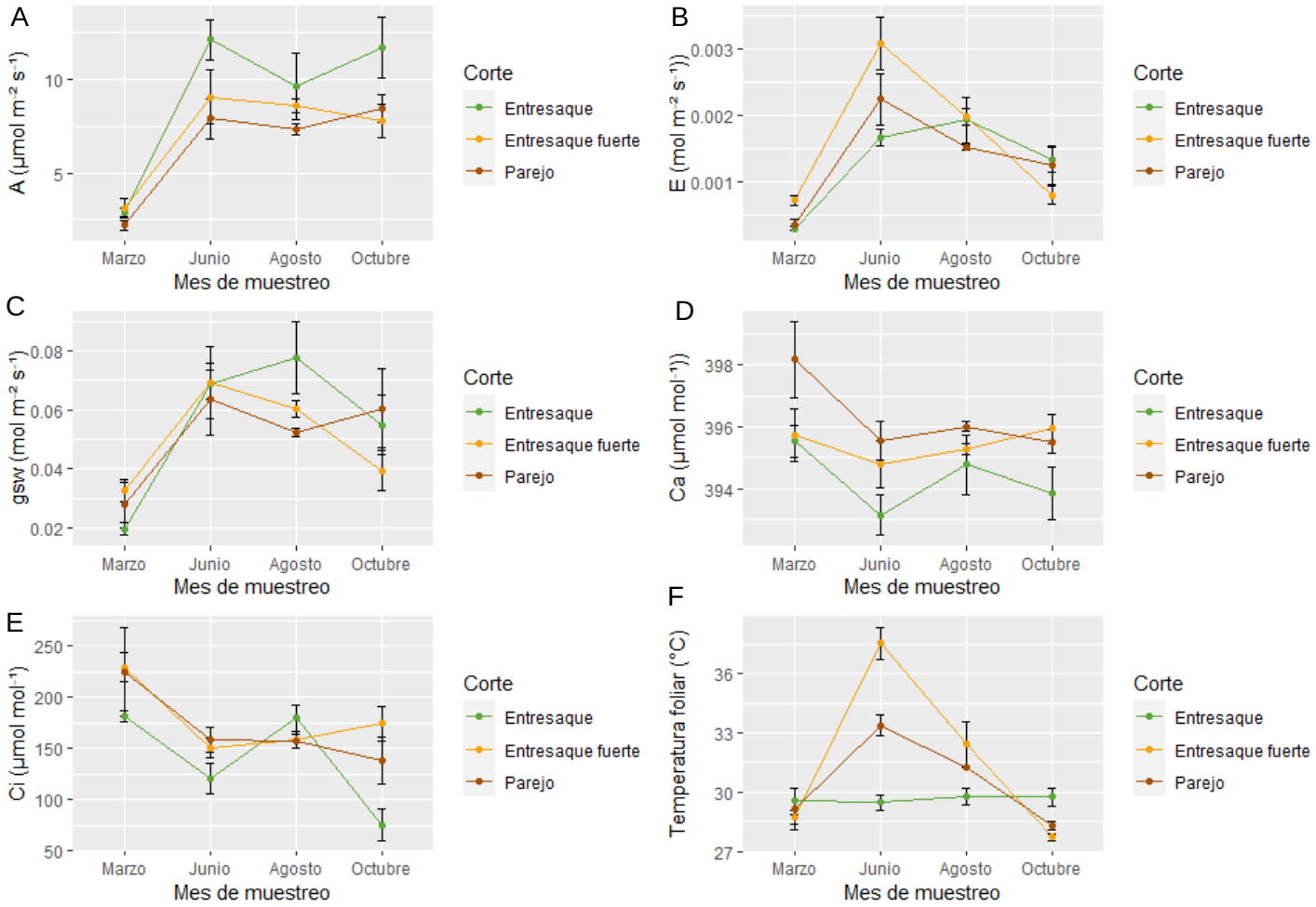
En las demás variables se realizaron pruebas de supuestos de normalidad de Shapiro Wilk y homocedasticidad de Levene. Para las variables que no cumplieron los criterios de normalidad y homocedasticidad se realizó una transformación de raíz cuadrada, luego se llevó a cabo un ANOVA y posterior a esto una prueba post-hoc de Tukey ($P \leq 0,05$). Se hizo una prueba t-student ($P \leq 0,05$) para determinar diferencia de medias entre las dos cosechas para cada tratamiento. Finalmente se realizó un análisis de correlación entre variables. Los datos se analizaron usando el software estadístico R, versión 3.6.0.

3. Resultados

3.1 Comportamiento fotosintético

El comportamiento de las variables en el tiempo se observa en la Figura 3-1 en la que se encontró que, durante el desarrollo de los cultivos de caña, A, E, y gs incrementaron del primer muestreo (marzo) al segundo (junio). Este incremento fue más evidente en el corte por parejo sin renovación en E y Gs, posterior a este tiempo, E y Gs disminuyeron y tendió a mantenerse constante. Por el contrario, Ci y Ca iniciaron en valores altos y siguieron una tendencia decreciente, Ca inició decreciendo y mantuvo sus valores constantes para los últimos muestreos (Figura 3-1D) y Ci se mantuvo constante a excepción del corte por entresaque que disminuyó considerablemente en el último muestreo (Figura 3-1E). La temperatura foliar (Figura 3-1F) se mostró constante para todos los tipos de cosecha, aunque dicha variable aumentó levemente en el segundo muestreo para el corte por parejo y parejo sin renovación.

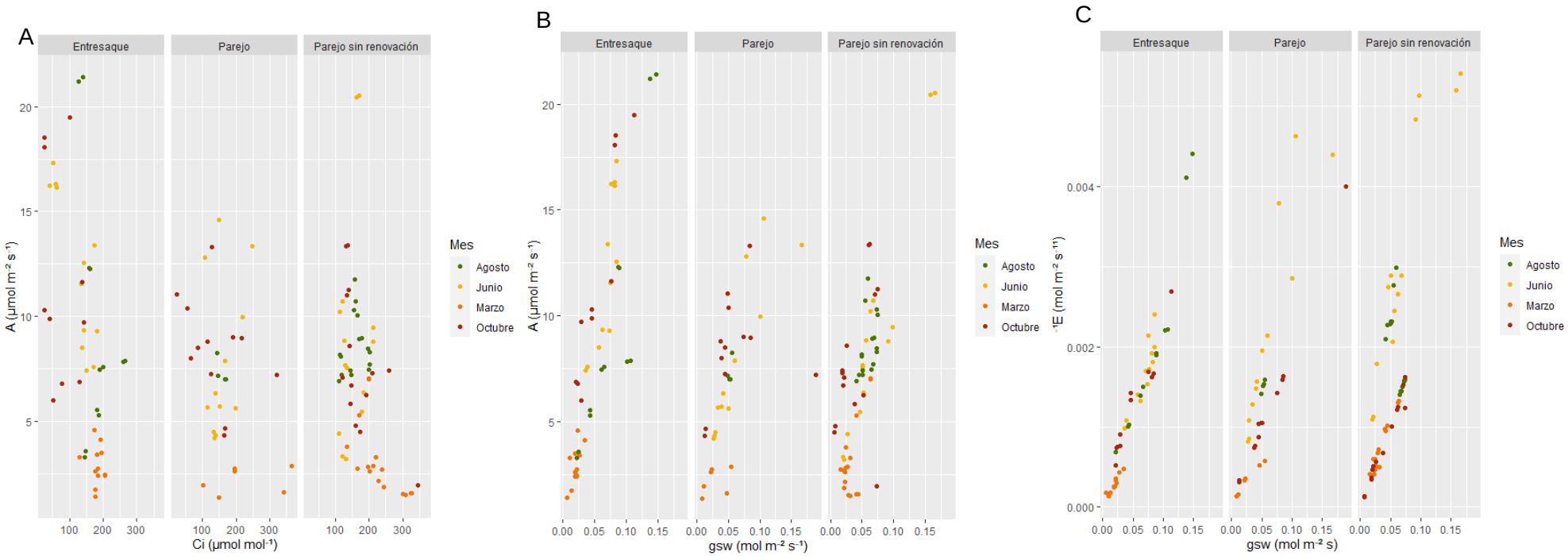
Figura 3-1: Respuesta fotosintética de plantas de caña para elaboración de panela bajo tres tipos de corte.



Las variables corresponden a: a) Asimilación b) transpiración c) Conductancia estomática d) Carbono ambiental e) Carbono interno f) temperatura foliar. Se midieron en cuatro momentos después de la primera cosecha. Barras verticales en cada promedio indican el error estándar (n=250).

En la Figura 3-2 se obtuvo que los mayores valores de A se presentaron en el corte por entresaque durante los meses de junio, agosto y octubre. Los valores de Ci presentaron mayor dispersión en el corte por parejo, en cambio, en el corte por entresaque estos valores se organizaron en la parte más baja de la escala, al contrario, en el corte por parejo sin renovación los valores de Ci se organizaron en la parte de mayor escala para esta variable (Figura 3-2A). Para gsw también se observa que los datos con menor dispersión se encontraron en el corte por entresaque. La relación de esta variable con E mostró que el corte por parejo y parejo sin renovación presentaron mayores valores de gsw pero aquella que presentó mayores valores de E para el aumento de gs fue en el corte por parejo sin renovación (Figura 3-2C).

Figura 3-2: Gráfico de dispersión multifactorial (a) A-Ci (b) A-gs (c) E-gs en plantas de caña bajo tres sistemas de corte



Con la prueba para datos no paramétricos PERMANOVA se encuentran diferencias significativas ($p \leq 0,05$) teniendo en cuenta los factores mes y tipo de corte, y cuidando rigurosamente la intercorrelación entre todas las variables.

Los resultados del análisis de correlación que se realizó para los cultivos de Cundinamarca se presentan en la Figura 3-3. Se encontró correlación positiva entre A y E (0,678), estas variables denotan un sesgo a la izquierda lo que reflejó una mayor frecuencia en los valores bajos para los dos parámetros fisiológicos. E a su vez mostró correlación positiva con gs (0,839), variable que reflejó una correlación positiva alta con A y negativa con Ca.

Entretanto, Ci mostró una dispersión más amplia en comparación con Ca, y tuvo mayor abundancia de datos en valores cercanos a los 150 µmol mol^{-1}, no presentó correlaciones altas pero la mayor correlación que se observó es con A, siendo una correlación negativa de -0.475, en la Figura 3-3 se observa como Ci estuvo altamente correlacionado (coeficiente de correlación = 1) con el índice Ci/Ca lo que confirmó que Ca es constante y no define los cambios sobre este índice. El segundo índice que se tuvo en cuenta fue Ci/gs que mostró correlación negativa con todas las variables a excepción de Ca, Ci, tl y Ci/Ca, sin embargo, en la tendencia se observó que tanto Ca como Ci están positivamente relacionadas con este índice.

Por otro lado, el comportamiento de las variables y sus correspondientes correlaciones difirieron cuando se hizo la comparación entre sistemas de cosecha. Se encontró que, en el corte por parejo, la mayor cantidad de plantas presentaron los valores más bajos de E y a pesar de que el corte por entresaque y parejo sin renovación tuvieron en promedio la misma cantidad de individuos para valores bajos, el corte por parejo sin renovación presentó mayor dispersión con tendencia hacia valores altos para esta variable (Figura 3-3). E presentó mayor correlación con gs para el corte por entresaque (0,965) y menor correlación para el corte por parejo sin renovación (0,812).

Asimismo, en gsw se encontró la mayor cantidad de plantas con valores bajos para el corte por parejo. En el corte por entresaque se observaron dos picos de abundancia en los valores cercanos a 0,03 y 0,07. Las variables gs y A presentaron correlación positiva alta y fue mayor para el sistema de corte por entresaque y menor para el corte por parejo; el corte por entresaque es el sistema de cosecha cuya cantidad de individuos fue mayor en los valores más altos de A y es aquel que presentó la menor cantidad de plantas en los valores más bajos de A en comparación con los otros dos cortes, para esta variable el corte por parejo sin renovación y corte por parejo presentaron un comportamiento similar en el que la mayor cantidad de plantas se encontraron en valores alrededor de 7 (Figura 3-3).

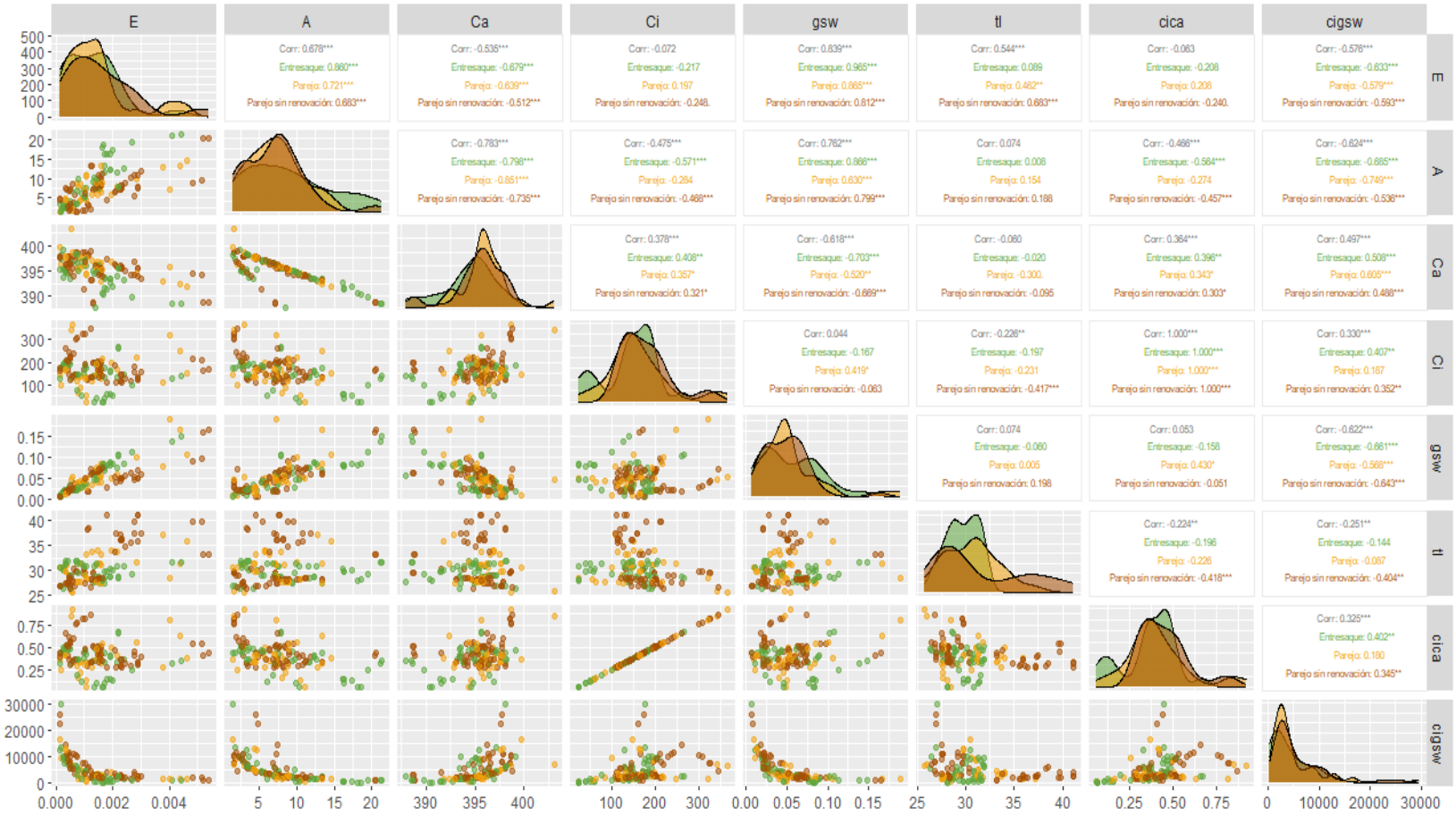
La correlación que existe entre A y Ca es otro valor que resaltó, A y Ca presentaron una correlación negativa alta y fue más elevada para el corte por parejo. En el diagrama de

densidad de la Figura 3-3, Ca expone que todos los cortes presentaron la mayor cantidad de individuos en valores aproximados a 395, no obstante, el corte que presentó mayor abundancia de plantas para este valor fue el corte por parejo y el que presentó menor abundancia fue el corte por entresaque, esta variable presentó una correlación alta negativa (-0,703) con gs para el corte por entresaque y baja para el corte por parejo (-0,520). Al igual que Ca, Ci no presentó inclinaciones hacia algún valor, sin embargo, Ci tiende a tener mayor cantidad de plantas en valores menores al promedio y el corte por entresaque mostró la mayor cantidad de individuos hacia los 200. Dado que Ci tuvo una correlación de 1 con el índice Ci/Ca, el comportamiento de esta variable es el mismo para todos los tipos de corte.

El índice Ci/gs presentó un sesgo hacia la izquierda para todos los tipos de corte, pero la mayor abundancia se encontró en el corte por parejo y la mayor dispersión de individuos en el corte por parejo sin renovación. Se observó una correlación negativa entre Ci/gs y A en la que el valor más negativo fue para el corte por parejo y el menos negativo para el corte por parejo sin renovación. Asimismo, la correlación entre Ci/gs y gs fue negativa pero el valor más negativo estuvo en el corte por entresaque y el menos negativo en el corte por parejo.

Con respecto a la variable de tl, la cual presentó los menores valores de correlación se encontró que dentro del intervalo de temperatura entre 25 y 40° C todos los cortes muestran un sesgo hacia valores bajos de este intervalo. Los individuos con mayor abundancia que rondan temperaturas cercanas a 30 (sd = 1,62) se encuentran dentro del factor de corte por entresaque, de la misma manera, el corte por parejo tuvo su pico de abundancia cerca a los 30 (sd = 2,75), pero su abundancia fue menor en comparación con el corte por entresaque. El corte por parejo sin renovación expuso mayor abundancia de individuos en valores cercanos a los 25 y estos pueden dispersarse hasta el punto de los 40°C (Figura 3-3).

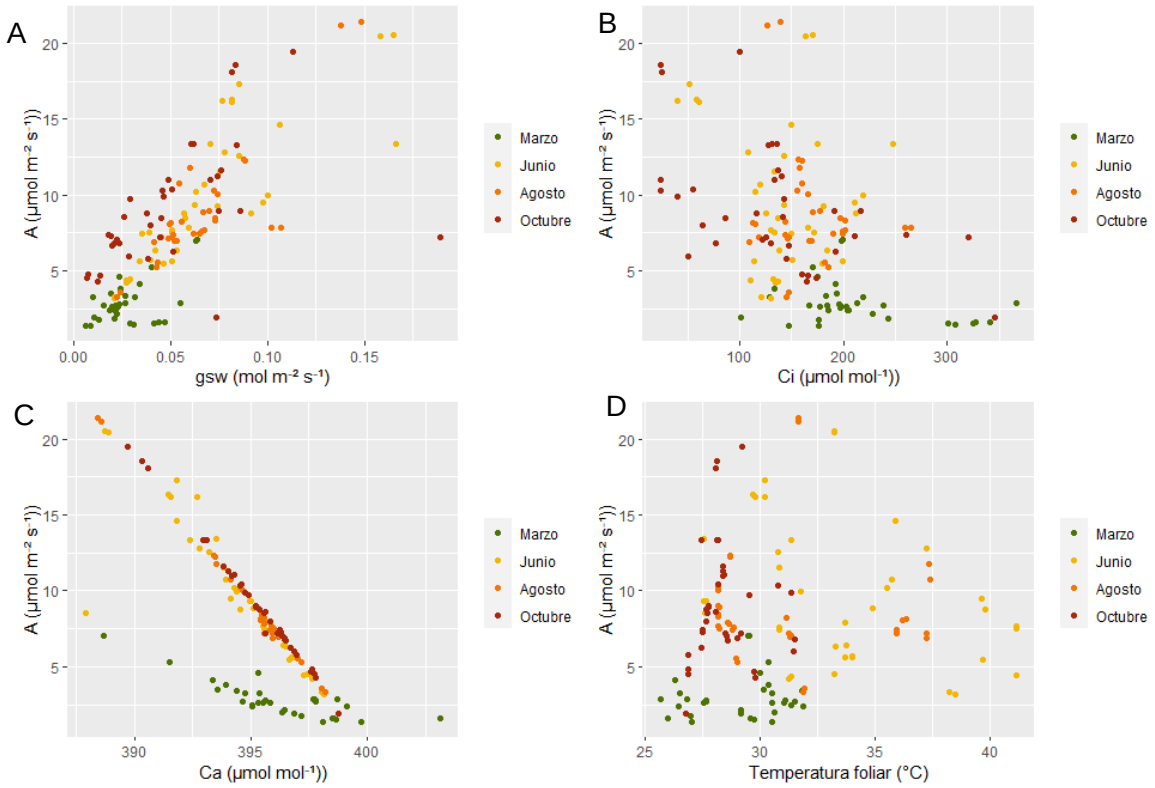
Figura 3-3: Matriz de diagramas de dispersión para determinar correlación.



En la parte inferior izquierda se muestran los diagramas de dispersión bivariados, en la diagonal se muestran los diagramas de densidad que describen el comportamiento de cada variable, y en la parte superior derecha aparecen los valores de la correlación entre las variables, por sistema de cosecha y correlación total. El color café representa el comportamiento del corte por parejo, en amarillo parejo sin renovación y en verde entresaque. Los números negros de correlación representan la correlación sin tener en cuenta el tipo de corte.

Se encontró que muchas de las tendencias que se observan en la Figura 3-3 también siguieron un patrón de acuerdo con el tiempo en que se tomó la medición (Figura 3-4). En la Figura 3-4 se evidenció que todos los valores de A para el mes de marzo se ubicaron hacia los menores rangos, este patrón se cumplió de manera proporcional para la figura de A vs gs (Figura 3-4A). En contraposición, para las demás variables presentadas en la Figura 3-4 se observa que A no cambió a medida que Ci o Ca aumentaron. Para los siguientes meses, no se observaron patrones distintos. En el caso de la relación A y gs se expone un comportamiento proporcional, al contrario de la relación A y Ca en la que se observó un comportamiento inverso. En la relación de A con Ci no se observó linealidad, pero si se encontró que en el mes de octubre hubo individuos con Ci bajo. Un comportamiento distinto también se observó en Tl, en el cual se encontraron agrupaciones por meses, marzo y octubre fueron los meses en los que la temperatura foliar fue más baja con valores de 25,7°C - 31,9°C y 26,7°C - 31,5°C respectivamente, pero en octubre la asimilación fue mayor (19,5 µmol m^{-2} s^{-1}) comparada con el mes de marzo (7,05 µmol m^{-2} s^{-1}), los mayores valores de Tl se encontraron en junio (41,1°C) y agosto (37,4°C) y los valores de asimilación mostraron el mismo comportamiento en el que A fue mayor para el mes de junio (29,9 µmol m^{-2} s^{-1}) que para agosto (21,4 µmol m^{-2} s^{-1}).

Figura 3-4: Diagrama de dispersión de la relación de A-gs (a), A-Ci (b), A-Ca (c) y A-Tf (d), en plantas de caña bajo tres sistemas de corte.

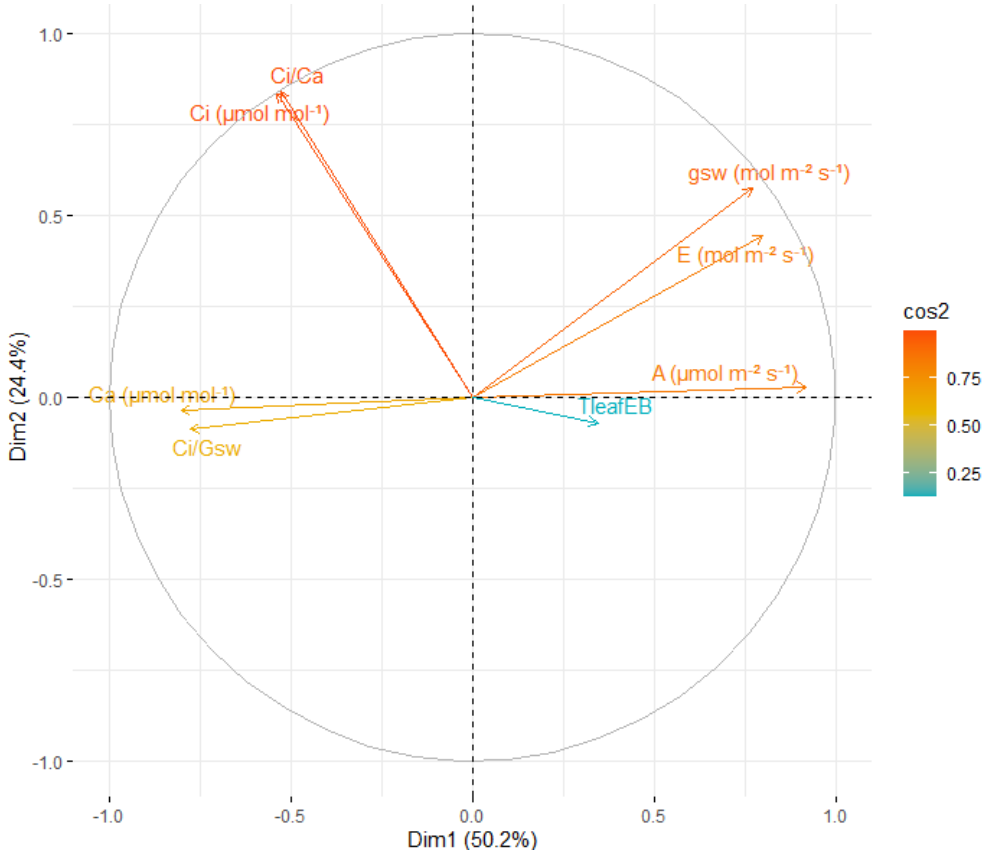


El factor considerado en esta gráfica es el mes. Con la prueba para datos no paramétricos PERMANOVA se encuentran diferencias significativas ($p \leq 0,05$) teniendo en cuenta el factor mes y cuidando rigurosamente la intercorrelación entre todas las variables.

Para la descripción del comportamiento de las variables frente al tipo de corte o cosecha, el análisis estadístico arrojó que, si existen diferencias significativas ($p<0,05$) para la respuesta fotosintética por tipo de corte. Con estos resultados se puede describir la respuesta fotosintética de los cultivos de caña para la producción de panela a los distintos tipos de corte con el gráfico de ACP. En la Figura 3-5, se definen los dos primeros componentes, el primero está dado por aquellos individuos que presentan mayores valores de A y E, mientras que el segundo se define por individuos con mayores valores de Ci. La temperatura foliar no tiene mucha influencia en los dos primeros componentes y las variables Ci y Ci/Ca fueron tan cercanas (coeficiente de correlación = 1) que mediante el

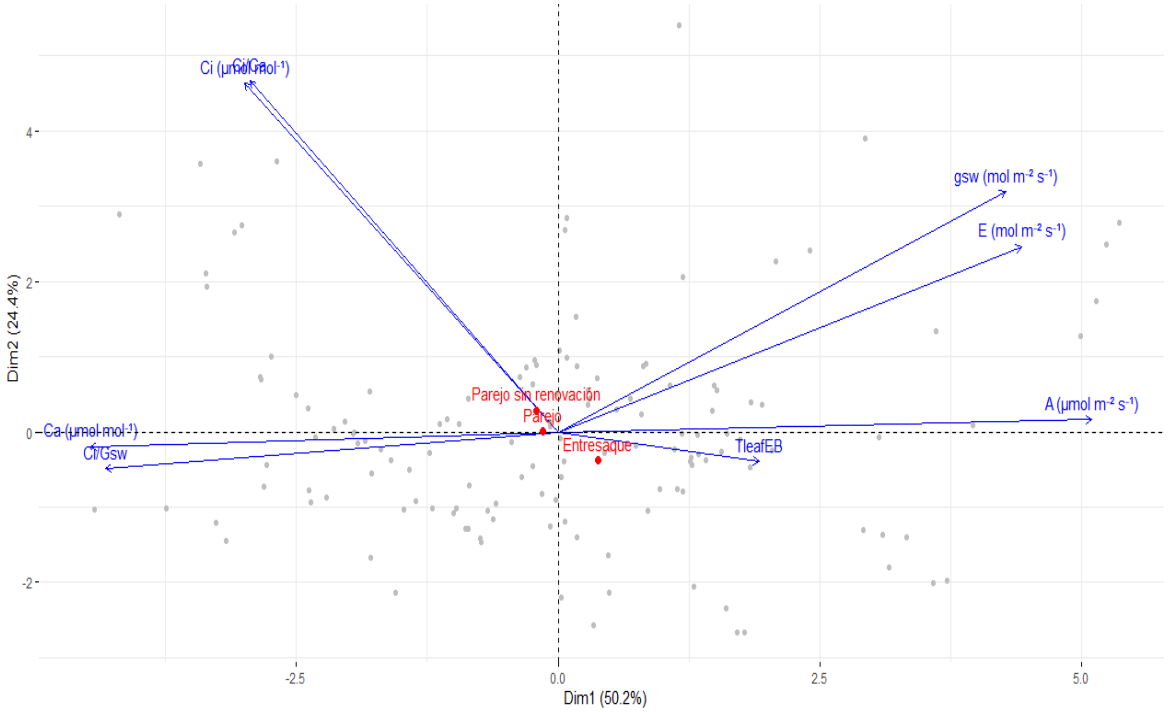
comportamiento de una de ellas se puede describir el comportamiento de la segunda. Las variables cuya influencia fue mayor se denotan con el color naranja, en la Figura 3-5 se expone que las variables con mayor influencia fueron Ci y Ci/Ca, y la variable con menor influencia fue la que está representada con el color azul, es decir, la temperatura foliar.

Figura 3-5: Diagrama de Análisis de Componentes Principales (ACP). Circulo unitario de correlación de cada variable con los dos primeros componentes.



Los cultivos de caña que se sometieron a corte por parejo y parejo sin renovación se encuentran ubicados hacia los cuadrantes de la izquierda (Figura 3-6), lo que indica que presentaron mayores valores de Ca y Ci/Gs, mientras que los cultivos sometidos a corte por entresaque presentaron mayores valores de A, E y gsw. Aunque Ci y Ci/Ca no tuvieron un mayor efecto sobre el primer componente, si lo tienen en el segundo, lo que termina por explicar la distribución de los individuos, de manera que aquellos cultivos que fueron sometidos a corte por parejo sin renovación presentan mayores valores de Ci en comparación con los otros dos sistemas de cosecha.

Figura 3-6: Biplot de dispersión en el que se ubica el factor sistema de corte en relación con las variables.

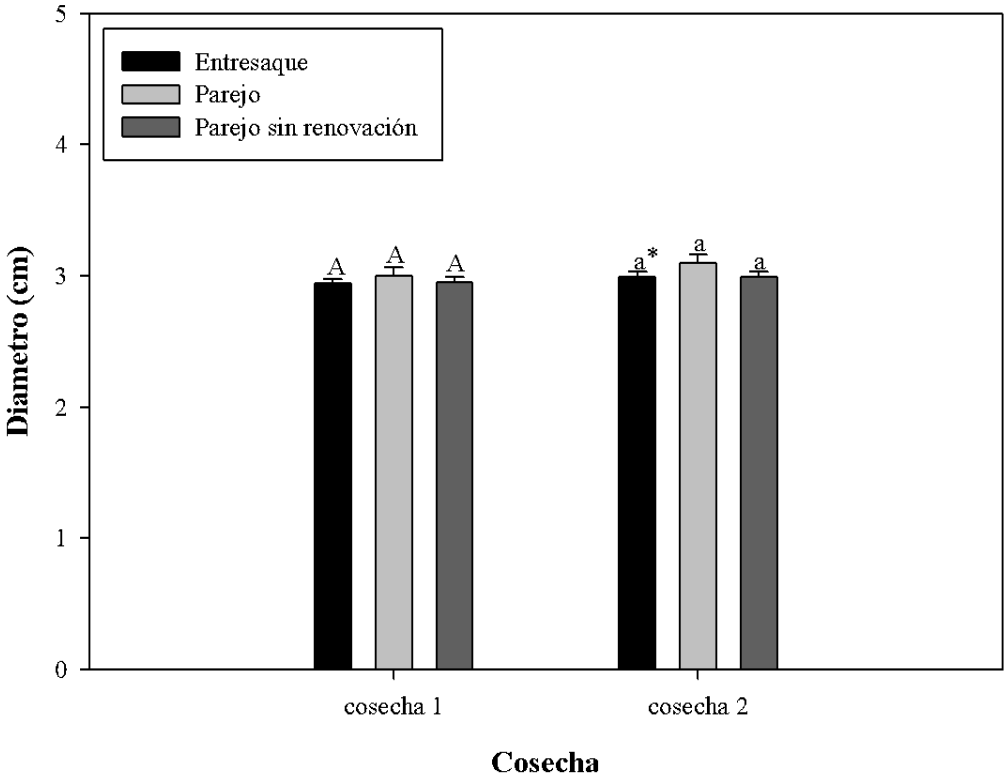


Los dos factores de este diagrama explican el comportamiento de las variables en un 74,6%. Los puntos rojos señalan los tipos de corte y las flechas azules las variables fotosintéticas.

3.2 Variables de crecimiento, índice de madurez y contenido de clorofilas

En el diámetro del tallo no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tipos de cortes (p-value = 0,52 para el primer muestreo y p-value = 0,65 para el segundo muestreo) en ninguna de las dos cosechas (Figura 3-7). Con respecto a las cosechas solo se encontraron diferencias significativas (p-value = 0,026) en el corte por entresaque en el que el valor del diámetro del tallo fue mayor para la segunda cosecha con un valor promedio de 3,12±0,04 cm y 3±0,01 cm para la primera cosecha (Figura 3-7).

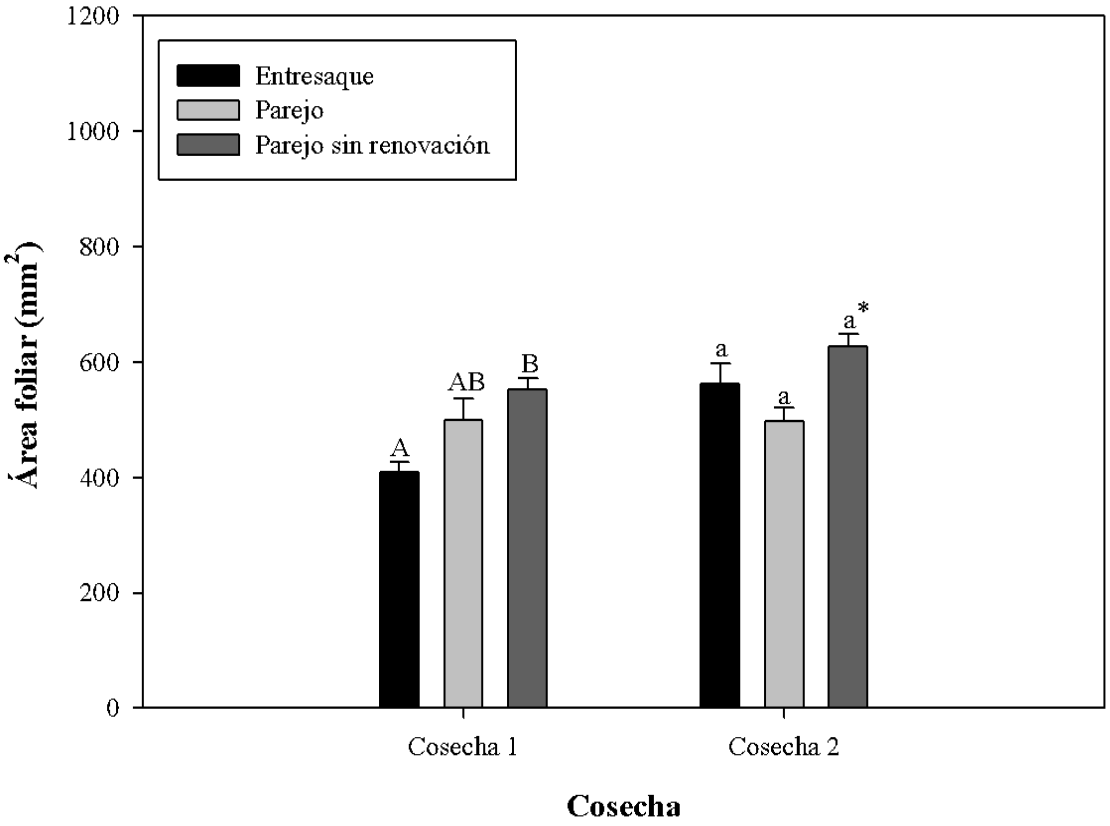
Figura 3-7: Diámetro del tallo de plantas de caña para la producción de panela bajo diferentes tipos de corte, en dos cosechas.



Barras verticales en cada promedio indican el error estándar (n=360). Promedios seguidos de letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas en la primera cosecha y minúsculas en la segunda cosecha de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0,05). El asterisco indica diferencias significativas entre cosechas para el mismo tipo de corte de acuerdo con la prueba t-student (p≤0,05).

El área foliar mostró diferencias significativas para la primera cosecha (p-value = 0,0001), el mayor valor promedio correspondió al corte por parejo sin renovación (553,61±0,01 cm^2), seguido por el corte por parejo y el menor corte por entresaque con valores promedio de 498,76±0,02 cm^2 y 408,21±0,03 cm^2 respectivamente. Para la segunda cosecha no se encontraron diferencias significativas entre los tipos de corte. Sin embargo, si hubo diferencias entre el corte por parejo sin renovación entre la primera y segunda cosecha (p-value = 0,0001) (Figura 3-8).

Figura 3-8: Área foliar de plantas de caña para la producción de panela bajo diferentes tipos de corte, en dos cosechas.

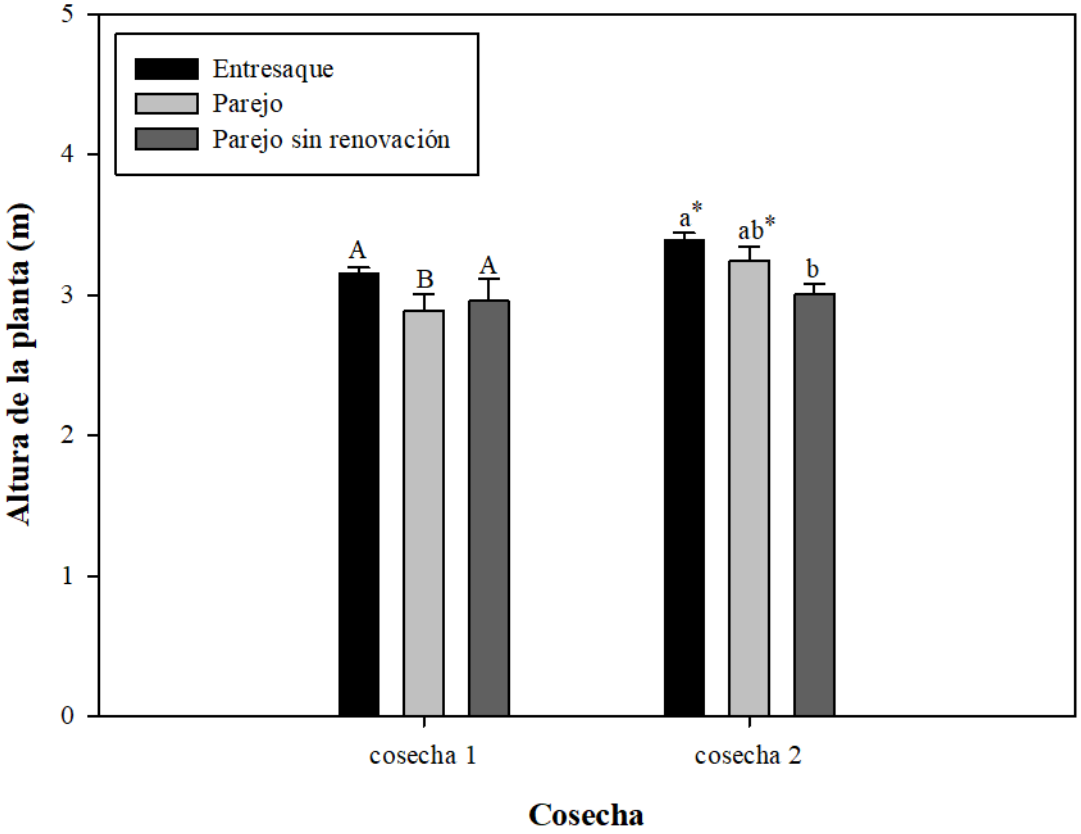


Barras verticales en cada promedio indican el error estándar (n=360). Promedios seguidos de letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas en la primera cosecha y minúsculas en la segunda cosecha de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0,05). El asterisco indica diferencias significativas entre cosechas para el mismo tipo de corte de acuerdo con la prueba t-student (p≤0,05).

Con respecto a la altura de la caña se encontraron diferencias estadísticamente significativas para ambas cosechas, para la primera cosecha hubo diferencias significativas entre los cortes por entresaque y parejo sin renovación respecto al corte por parejo (p-value = 0,0001), para la segunda cosecha el corte por entresaque fue significativamente distinto al corte por parejo sin renovación (p-value = 0,0001). En ambas cosechas el mayor valor de altura fue para el corte por entresaque, para la primera cosecha el valor promedio de la altura fue de 3,15±0,03m y para la segunda 3,39±0,02m, el menor valor en la primera cosecha correspondió al corte por parejo (2,89±0,06m), y en la segunda

cosecha el menor valor fue para el corte por parejo sin renovación (3±0,02m). Se encontraron diferencias significativas entre cosecha para el corte por entresaque (p-value = 0,0007) y el corte por parejo (p-value = 0,046) (Figura 3-9).

Figura 3-9: Altura de plantas de caña de azúcar bajo diferentes tipos de corte, en dos cosechas.

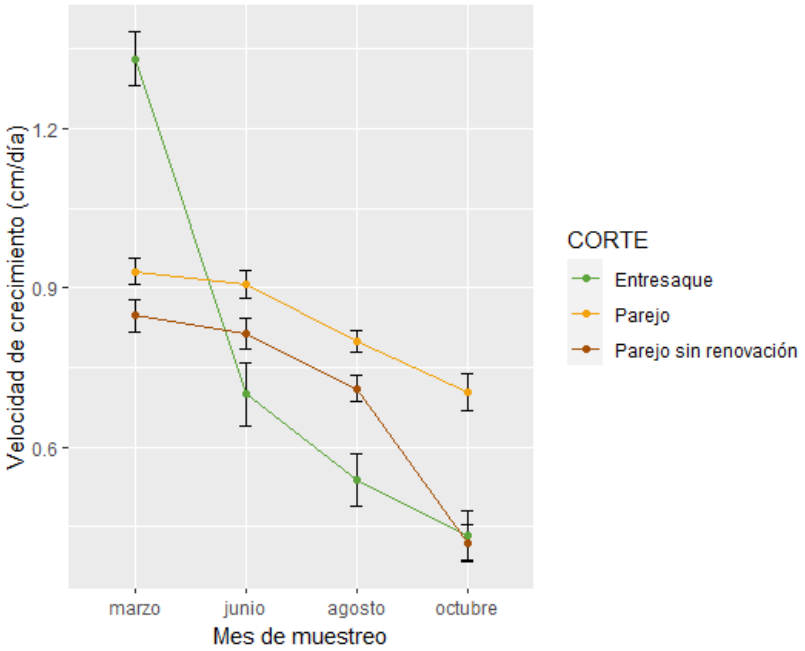


Barras verticales en cada promedio indican el error estándar (n=360). Promedios seguidos de letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas en la primera cosecha y minúsculas en la segunda cosecha de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0,05). El asterisco indica diferencias significativas entre cosechas para el mismo tipo de corte de acuerdo con la prueba t-student (p≤0,05).

Se encontró que la tendencia de la velocidad de crecimiento de las plantas sometidas a corte por parejo y parejo sin renovación durante los meses de marzo, junio y agosto es similar, mientras que, la velocidad de crecimiento del corte por entresaque es mayor en marzo y disminuye hasta llegar a el menor valor de los tres sistemas de corte en el mes de junio y a partir de ahí conserva los menores valores para esta variable. El corte por parejo

conserva los mayores valores de velocidad de crecimiento a partir del mes de junio (Figura 3-10).

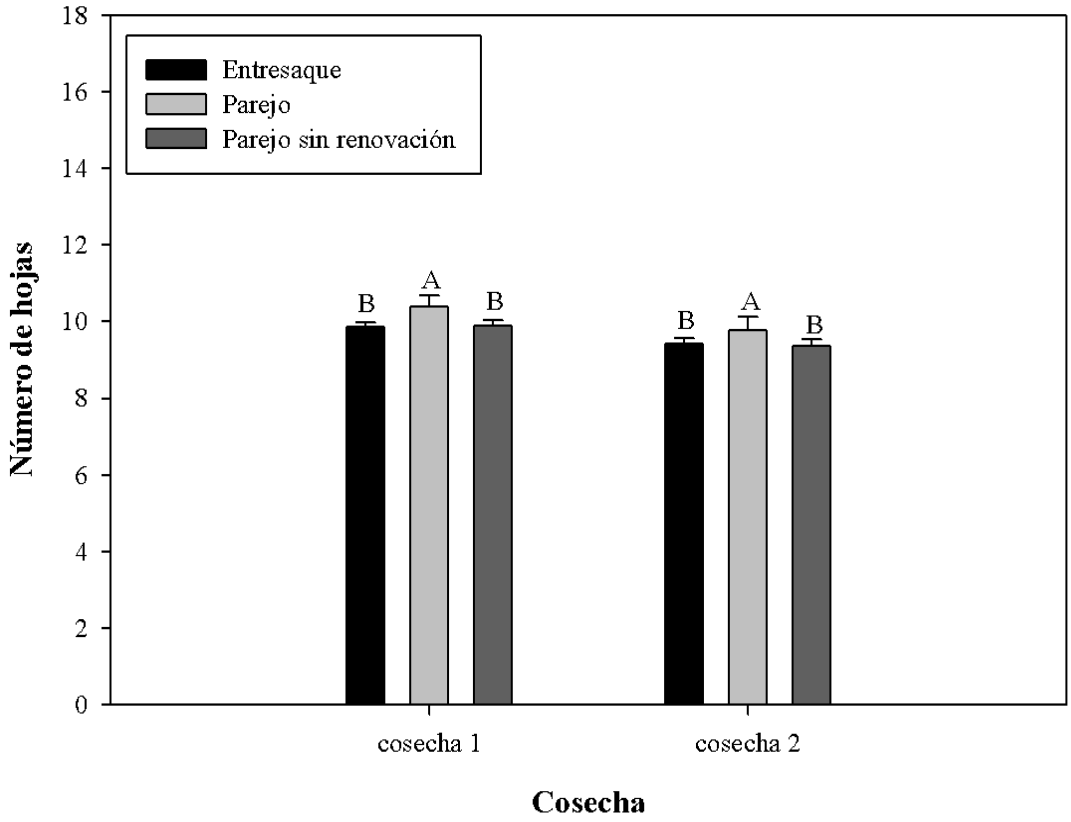
Figura 3-10: Velocidad de crecimiento de plantas de caña de azúcar bajo diferentes tipos de corte.



Para esta variable se utilizó la altura de las plantas en cm medida en cuatro momentos después de la primera cosecha. Barras verticales en cada promedio indican el error estándar (n=250).

No hubo diferencias significativas en ninguno de los cortes en cuanto a la comparación de cosechas, pero sí se encontraron diferencias significativas entre el corte por entresaque y corte por parejo sin renovación con respecto al corte por parejo en las dos cosechas (primer muestreo: p-value = 0,0004 y segundo muestreo: p-value = 0,0008). El mayor valor promedio de número de hojas se obtuvo con el corte por parejo, para la primera y segunda cosecha fue de 11 y 9 hojas verdes respectivamente (Figura 3-11).

Figura 3-11: Número de hojas verdes de plantas de caña de azúcar bajo diferentes tipos de corte, en dos cosechas.

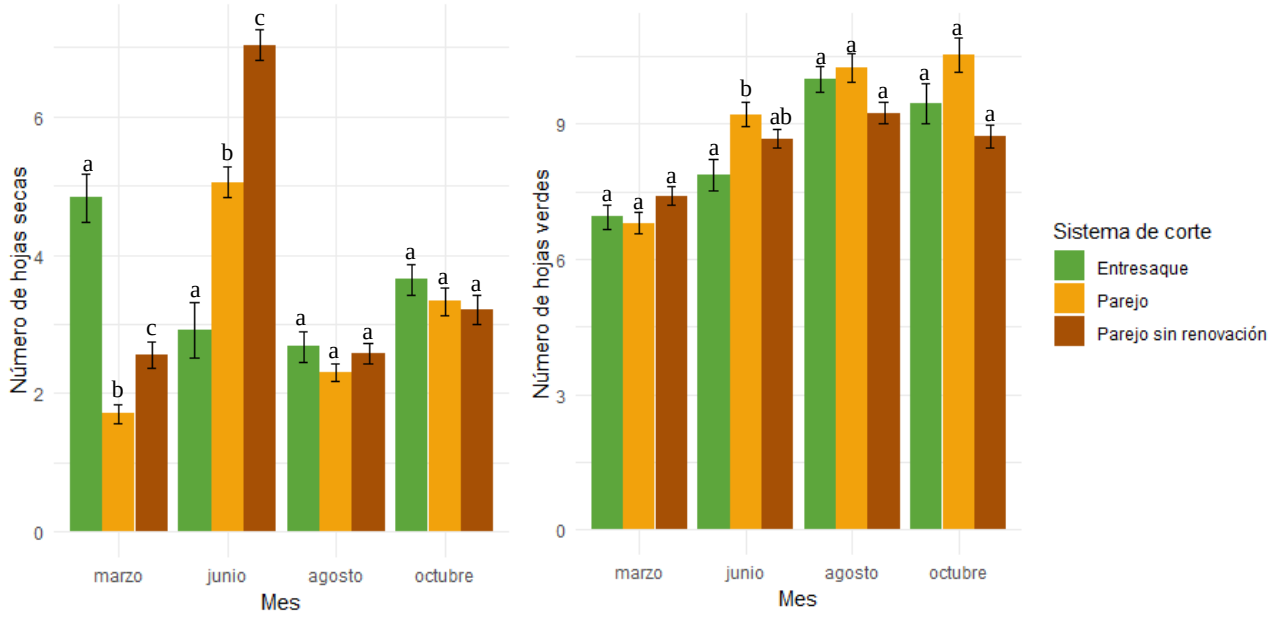


Barras verticales en cada promedio indican el error estándar (n=360). Promedios seguidos de letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas en la primera cosecha y minúsculas en la segunda cosecha de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0,05). El asterisco indica diferencias significativas entre cosechas para el mismo tipo de corte de acuerdo con la prueba t-student (p≤0,05).

Durante el monitoreo se encontraron diferencias significativas en el número de hojas secas, pero solo para los meses de marzo y junio con mayor cantidad de hojas secas en el corte por entresaque durante el mes de marzo (p-value = 0,0209) y mayor cantidad de hojas secas en el corte por parejo sin renovación en el mes de junio (p-value = 2e-7). En contraste, para el número de hojas verdes se encontraron diferencias significativas únicamente para el mes de junio (p-value = 0,037) en el que se encontró mayor número

de hojas verdes en el corte por parejo y menor número de hojas verdes en el corte por entresaque (Figura 3-12).

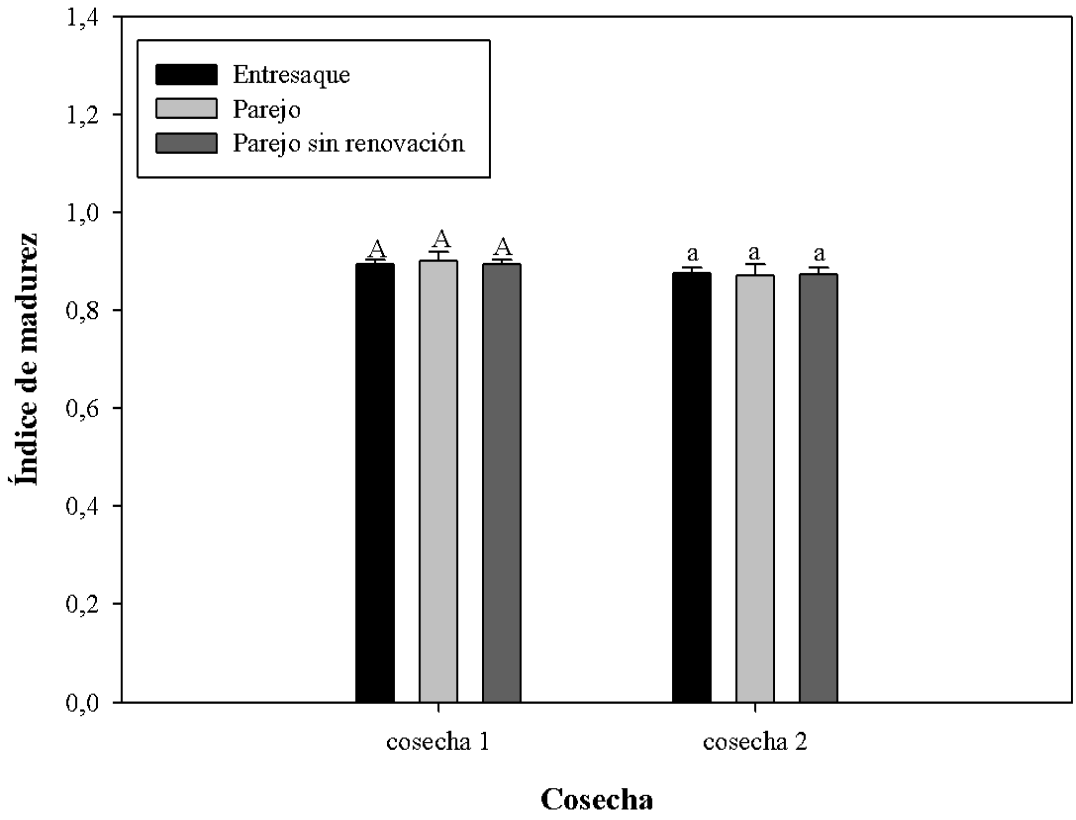
Figura 3-12: Número de hojas secas y hojas verdes durante el monitoreo correspondiente a los meses de marzo, junio, agosto y octubre en plantas de caño bajo tres sistemas de corte.



Barras verticales en cada promedio indican el error estándar (n=250). Promedios seguidos de letras diferentes indican diferencias significativas en sistemas de corte de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0,05).

Respecto al Índice de madurez no se encontraron diferencias significativas (p>0,05) para ninguno de los cortes y tampoco para las cosechas, los valores del índice estuvieron entre 0,8 y 0,9, y los azúcares totales encontrados presentaron valores en el intervalo de 17 y 19 ºBrix (Figura 3-13).

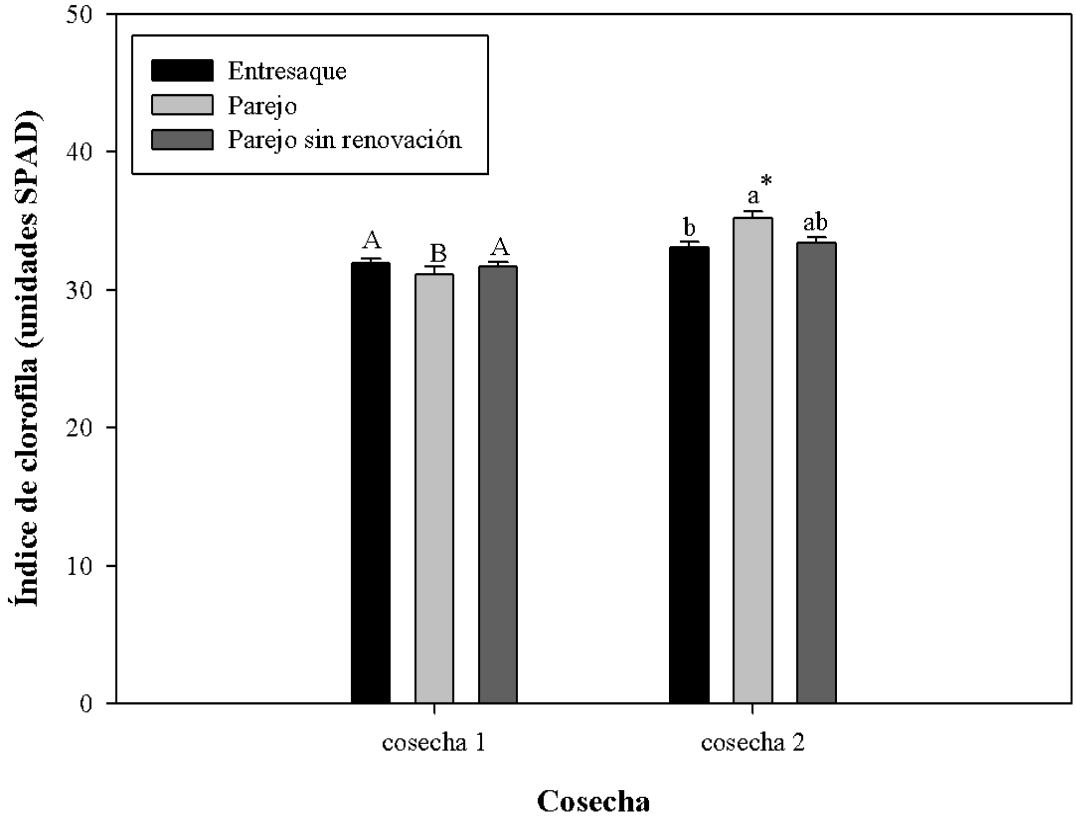
Figura 3-13: Índice de madurez en plantas de caña de azúcar bajo diferentes tipos de corte, en dos cosechas.



Barras verticales en cada promedio indican el error estándar (n=360). Promedios seguidos de letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas en la primera cosecha y minúsculas en la segunda cosecha de acuerdo a la prueba de Tukey (p≤0,05). El asterisco indica diferencias significativas entre cosechas para el mismo tipo de corte de acuerdo con la prueba t-student (p≤0,05).

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el índice de clorofilas con respecto al corte por entresaque y corte por parejo sin renovación comparado con el corte por parejo. En la primera cosecha (p-value = 0,017) el corte por parejo presentó el menor índice de clorofilas con un valor promedio de 29,3±0,09. En la segunda cosecha se encontraron diferencias significativas entre el corte por entresaque y corte por parejo (p-value = 0,049) el corte por parejo presentó mayor valor y el corte por entresaque el menor, 36,7±0,17 y 32,5±0,07 respectivamente. También se encontraron diferencias estadísticamente significativas (p-value = 0,0001) en el corte por parejo comparando ambas cosechas, fue mayor el índice de clorofilas en la segunda cosecha (Figura 3-14).

Figura 3-14: Estimación de clorofilas totales en plantas de caña de azúcar bajo diferentes tipos de corte, en dos cosechas.

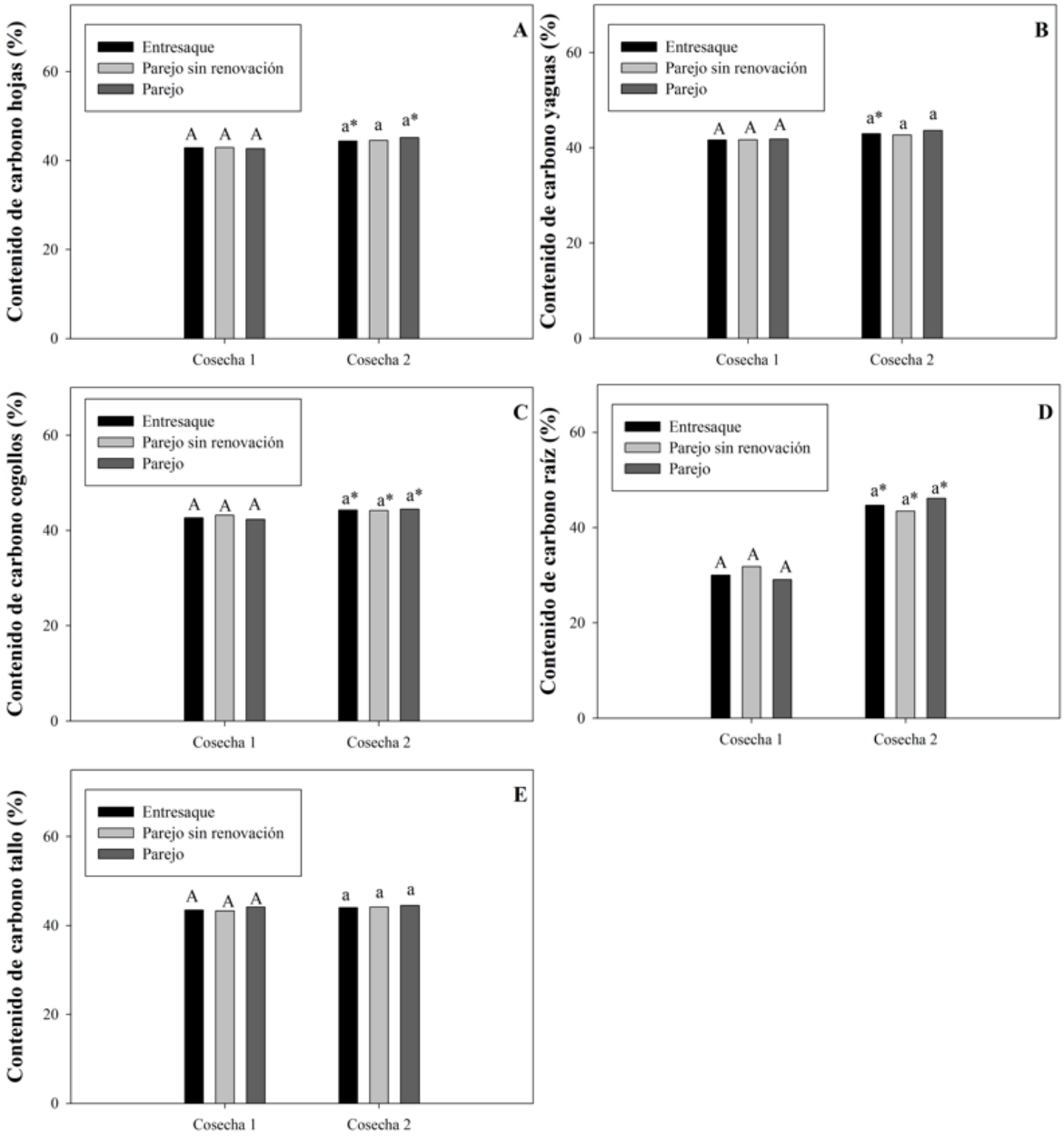


Barras verticales en cada promedio indican el error estándar (n=360). Promedios seguidos de letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas en la primera cosecha y minúsculas en la segunda cosecha de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0,05). El asterisco indica diferencias significativas entre cosechas para el mismo tipo de corte de acuerdo con la prueba t-student (p≤0,05).

3.3 Contenido de carbono

Con respecto al contenido de carbono (Figura 3-15), no se encontraron diferencias significativas entre cortes en ninguna de las cosechas. Sin embargo, sí hubo diferencias en el contenido de carbono con respecto a las cosechas para las variables de contenido de carbono en la raíz (p-value = 0,0001) y en el cogollo en todos los cortes (p-value = 0,0001), en hojas (p-value = 0,0004) y yaguas (p-value = 0,0032) hubo diferencias entre cosechas para el corte por entresaque, y para todos los órganos de la planta se encontraron los mayores valores en la segunda cosecha.

Figura 3-15: Porcentaje de carbono en muestras de hojas, yaguas, cogollo, raíz y tallo en plantas de caña bajo tres sistemas de corte.

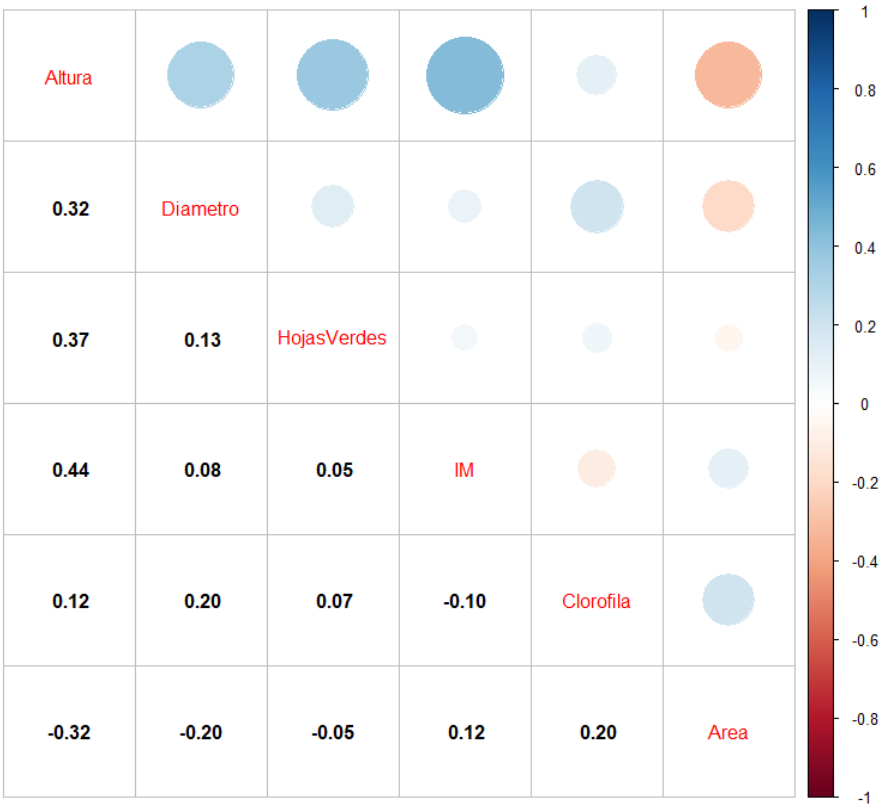


Barras con letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas en la primera cosecha y minúsculas en la segunda cosecha de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0,05). El asterisco indica diferencias significativas entre cosechas para el mismo tipo de corte de acuerdo con la prueba t-student (p≤0.05).

En la Figura 3-16 se observan los coeficientes de correlación para las variables fisiológicas de la planta, se encontraron coeficientes de correlación medios a bajos. Dentro de los más

sobresalientes está la relación positiva entre la altura y el índice de madurez (0,44), altura y número de hojas verdes (0,37), altura y diámetro (0,32); la relación negativa que se pudo resaltar fue entre el área foliar y la altura (-0,32).

Figura 3-16: Matriz de correlación para variables fisiológicas de la caña de azúcar sometidas a diferentes tipos de corte.

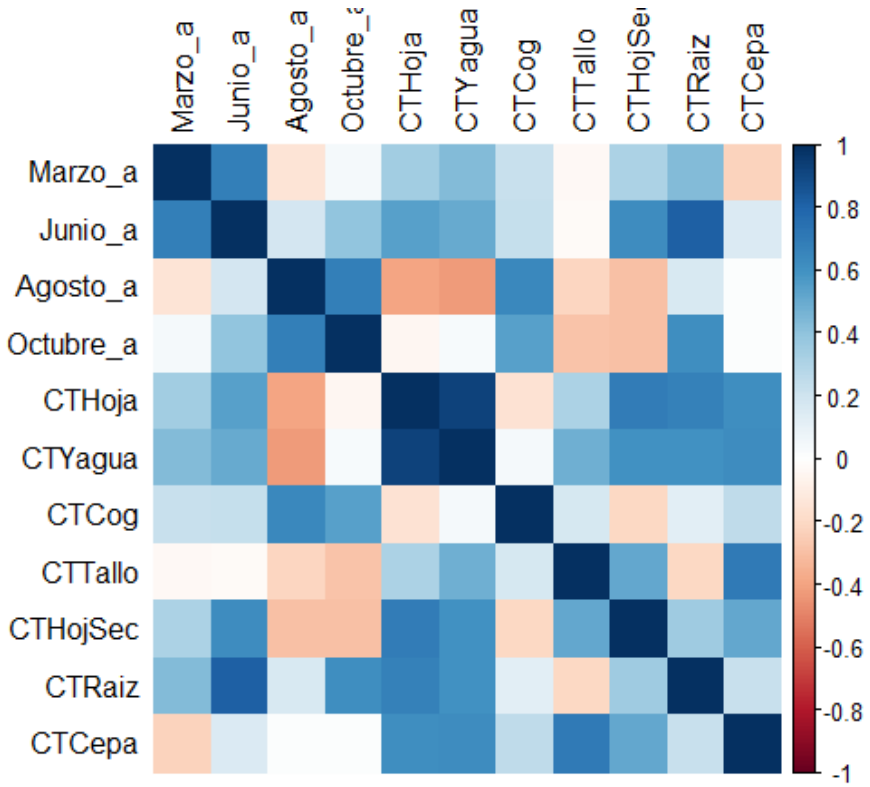


En la parte inferior de la matriz se indican los coeficientes respectivos para cada relación de variables, en la mitad superior se encuentra el grado de correlación de las variables, círculos grandes indican un mayor coeficiente de correlación, círculos de color azul indican correlación positiva y círculos de color rojo indican correlación negativa.

En la Figura 3-17 se encontró que la correlación más alta que puede observarse se evidencia entre el contenido de carbono en hojas y yaguas y la asimilación durante el mes de agosto (-0,395 y -0,429 respectivamente) ambas correlaciones son negativas, lo que indica una relación inversa entre la asimilación y el contenido de carbono para este mes. Otra correlación importante se encontró en el contenido de carbono de la raíz y la asimilación del mes de junio (0,819), en la que se observó que a medida que aumentaba

la asimilación, aumentaba el contenido de carbono de la raíz. Durante el mes de junio también existe correlación positiva entre el contenido de carbono de las hojas y yaguas y la asimilación del mes de junio (5,545 y 0,504). La asimilación de los meses de agosto y octubre se correlaciona positivamente con el contenido de carbono del cogollo con valores de 0,645 y 0,547 respectivamente.

Figura 3-17: Matriz de correlación para asimilación del mes y contenido de carbono de cada órgano de la caña de azúcar sometidas a diferentes tipos de corte.



Colores azules indican correlación positiva y colores rojos indican correlación negativa. Entre más oscuro sea el color más alto es el valor de la correlación.

4. Discusión

4.1 Comportamiento fotosintético

Dentro de las limitaciones fotosintéticas que existen en la caña de azúcar se pueden encontrar la limitación estomática, limitación bioquímica y limitación fotoquímica (Marchiori et al., 2014). Según datos tomados por el IDEAM, en el año 2021 las precipitaciones en Quebradanegra y Nimaima se redujeron desde mayo hasta septiembre; en junio del mismo año gsw se redujo para los cortes por parejo y parejo sin renovación, a diferencia del corte por entresaque, el cual demuestra un aumento en gsw que posteriormente disminuye para el mes de octubre (Figura 2-4). Ante situaciones desfavorables de suministro hídrico la caña de azúcar responde rápidamente con el cierre de estomas, situación que beneficia a la planta hasta el punto en que evita perder agua (Medeiros et al., 2013).

No obstante, cuando el tiempo de cierre estomático es prolongado, conlleva a un efecto negativo en el que se limita la disponibilidad de carbono interno afectando la fotosíntesis (Inman et al., 2012), Jailma et al. (2019), evaluaron distintas variedades de caña de azúcar, encontrando que la variedad RB72454 respondía con la disminución de gsw y A, mientras que otra variedad (RB92579) no demostraba disminución en estas variables, para lo cual afirmaba que esta variedad de caña de azúcar era tolerante al estrés por sequía. Esto podría sugerir que el corte por entresaque estaría generando cambios en la conductancia debido a las características de manejo de este tipo de corte mencionadas anteriormente, dado que los cultivos sometidos a este tipo de corte suelen ser de mayor edad, por lo que su sistema radical con mayor longitud y volumen es más completo en comparación con los otros dos tipos de corte, lo que genera una exploración del recurso suelo-sustrato más efectiva (Pissolato *et al*., 2021), ésta condición favorece a la planta en cuanto a la absorción del agua del suelo, que en adición se reporta mayor humedad en aquellas zonas en las

que la distancia de siembra entre plantas es mayor, tal como sucede en el sistema de corte por entresaque, esta mayor disponibilidad de agua para la planta permite mayor conductancia (Chumpu *et al*., 2019)

De Souza *et al*. (2018) encontraron que A y gsw están correlacionados después de un periodo prolongado (de seis a nueve meses) de sequía debido a la reducción de humedad del suelo, de manera que en los primeros meses de sequía si disminuye A, pero gsw no. En este caso la correlación más alta se observó en el corte por entresaque, por lo tanto, se puede sugerir que los mayores valores de A pueden ser el resultado de la posible tolerancia a la sequía por la menor susceptibilidad de estos cultivos al cierre estomático. Con la disminución de gsw se espera que la concentración de Ci disminuya siempre y cuando el aparato fotosintético no esté afectado por el déficit hídrico (Ribeiro et al., 2013), que en situaciones de déficit hídrico severo genera una sobre reducción del lado aceptor del PSI debido a la inhibición de la fijación de carbono, así ocurre el daño del centro de reacción del PSI y al mismo tiempo al flujo cíclico de electrones (Huang *et al*., 2013; De Oliveira *et al*., 2020). A pesar de que la mayor correlación positiva que se encontró entre gsw y Ci fue en el corte por parejo, el mayor gasto de Ci para gsw bajo se encuentra en el corte por entresaque, lo que respalda los mayores valores de A para este tipo de corte, dado que para un incremento de A es necesario el gasto de Ci y por tanto, se observa mayor correlación negativa para Ci y A (Figura 3-3).

La actividad estomática tiene una fuerte influencia sobre la transpiración y fotosíntesis (Medeiros et al., 2013). De este modo, aquellas plantas sensibles al déficit hídrico demuestran una mayor reducción en la transpiración comparadas con aquellas tolerantes a este tipo de estrés (Jailma et al., 2019). Los datos encontrados muestran que los valores más bajos de transpiración, en los meses de marzo y junio, se encontraron en cultivos de caña de azúcar sometidos al corte por entresaque (Figura 3-1), la particularidad que existe en el corte por entresaque es la presencia de cobertura vegetal en el suelo todo el tiempo. En un estudio realizado por Gonçalves *et al*. (2022) se discutió que el punto en el que la pérdida de agua del suelo disminuye, ocurre cuando el cultivo presenta su mayor índice de área foliar, puesto que la luz es interceptada por las hojas y no llega al suelo, así evita la evaporación del agua del suelo. Además de proteger el suelo de la radiación solar, la presencia de cobertura vegetal también genera cambios en otros factores ambientales como la humedad relativa, velocidad del viento y temperatura del aire (Carvalho et al.,

2019) estos factores generan una disminución en la evaporación del agua del suelo (Peres et al., 2010).

Se ha encontrado que el balance de radiación es otro factor determinante para la transpiración (Carvalho *et al*., 2019) puesto que la transpiración es un componente del balance de energía de la planta que está influenciado por la radiación solar, humedad del aire, temperatura y velocidad del viento (Leuzinger *et al*., 2010), cuando la radiación solar aumenta, aumenta el balance de energía de la planta y con disponibilidad de agua, la transpiración aumentará (Wang y Gartung, 2010). Se compararon dos cultivos de caña de azúcar, uno tenía residuo vegetal de la cosecha y en el otro se habían removido estos residuos y se encontró que la transpiración de cultivos con presencia de residuo vegetal era de 0,000849 mol m^{-2} s^{-1} y de 0,000636 mol m^{-2} s^{-1} sin presencia de residuo vegetal, en comparación con los resultados obtenidos en este estudio, la transpiración fue de 0,00146 mol m^{-2} s^{-1}, 0,00186 mol m^{-2} s^{-1}y 0,0013 mol m^{-2} s^{-1} para corte por parejo, parejo sin renovación y entresaque respectivamente. Se puede inferir que dado que las plantas que crecen en presencia de otras más desarrolladas (como ocurre en el corte por entresaque) reciben menor radiación en los primeros meses del desarrollo pero las plantas que crecen de manera uniforme (corte por parejo y parejo sin renovación) reciben mayor luz durante las primeras etapas del desarrollo que además por el poco desarrollo de sus hojas tienen mayor interceptación de luz y por lo tanto mayor balance de energía que permite mayor transpiración.

Por otro lado, se asegura que la transpiración es una respuesta de la planta cuyo fin es reducir la temperatura foliar, dicho incremento se da en plantas sensibles al estrés por sequía (Silva *et al.*, 2014; Endres *et al.*, 2019). En este caso se encontró que la menor temperatura foliar ocurría en cultivos sometidos a corte por entresaque, mientras que la mayor temperatura foliar a cultivos sometidos a corte por parejo sin renovación. Asimismo, la correlación entre la transpiración y la temperatura foliar fue baja para el corte por entresaque pero alta para los cortes por parejo y parejo sin renovación. Urban *et al* (2017) concluyen que el aumento de la transpiración es un mecanismo de la planta de disipación de altas temperaturas, lo que podría coincidir con los resultados para los cortes por parejo y parejo sin renovación (Figura 3-1) el aumento de la transpiración fue necesario para regular la temperatura foliar, adicionalmente, en el corte por entresaque la cobertura

vegetal no solo favorece la protección del suelo, sino que protege al cultivo de la exposición directa a factores ambientales.

Dado que este trabajo es un estudio de observación, los factores ambientales que pudieron tener efecto sobre el desarrollo de los cultivos en Cundinamarca pueden ser además de la precipitación, la temperatura, la intensidad lumínica (Ramírez et al., 2019) y el manejo. Las temperaturas altas, al igual que la precipitación tienen efectos sobre las variables relacionadas con el intercambio gaseoso de la hoja; así, A, E y gs disminuyen y tl puede aumentar para individuos sensibles a este tipo de estrés (Kohila y Gomathi, 2018). En conjunto la temperatura y precipitaciones son factores importantes para el desarrollo de la caña de azúcar puesto que la temperatura determina la duración y el ritmo de la emergencia y crecimiento de los tallos, pero también el crecimiento de los tallos está influenciado por la cantidad de agua que recibe la planta (Ramírez et al., 2019).

En el análisis de componentes principales, las variables se organizan de manera que aquellas que responden al intercambio de gases están separadas del carbono interno y carbono ambiental. Por lo tanto, se pueden separar los individuos como moderadamente tolerantes o poco tolerantes a factores ambientales que puedan generar algún tipo de estrés y disminución en las variables de intercambio gaseoso, el término tolerancia hace referencia a los mecanismos que la planta utiliza para poder continuar con su crecimiento bajo condiciones de estrés leve o moderado (Ferreria *et al*., 2017). Dicho lo anterior, cuando una condición de estrés es severo o prolongado provoca la inhibición de la fotosíntesis (Ribeiro *et al*., 2013), por otro lado, las respuestas más comunes de la caña al déficit hídrico leve es la disminución de gsw que conlleva a disminución de E y Ci y finalmente a la disminución de A, siendo esto producto de una limitación estomática (Medeiros *et al.*, 2013; Basnayake *et al*., 2015). Como se observa en el diagrama de ACP (Figura 3-1-5) la cercanía de las variables gsw, E y A indica que, al igual que los reportes anteriores, se relacionan positivamente, es decir, si gsw disminuye E y A también disminuyen pero si gsw aumenta E y A también aumentan, la diferencia entre este comportamiento con el reportado es que Ci se encuentra al lado opuesto de estas variables lo que indica que si estas tres variables disminuyen, Ci aumenta o viceversa, por lo que se puede deducir que Ci responde al gasto natural para el proceso fotosintético que en este caso se evalúa con A que a su vez se ve favorecido por el aumento de gsw (Nascentes *et al*., 2018).

El grupo de individuos más próximo a Ci para el primer componente, sugieren que pueden estar relacionados con el movimiento del carbono dentro del mesófilo. La eficiencia de la conductancia del mesófilo depende del carbono interno y la conductancia estomática, por lo tanto, Ci/gsw responde en función de la apertura estomática y de la cantidad de Ci en el mesófilo que puede variar por razones como el gasto para la conversión a malato o la filtración de CO_2 hacia el mesófilo, producto de la descarboxilación del malato en las células de la vaina del haz (Wang et al., 2021; Silva et al., 2013). Los factores ambientales que pueden tener efecto sobre Ci/gsw son la intensidad lumínica, concentración de Ca, temperatura foliar y estrés por sequía (Yokoyama et al., 2023) en los resultados encontrados con los sistemas de corte, se destaca que Ci/gs tiene una correlación baja con tl, por lo que descartamos este factor como incidente en los cambios de esta variable, y aunque Ci/gsw tiene una correlación de 0,497*** con Ca, puesto que el rango de variación de esta variable está entre 393 y 399 µmol mol^{-1} no hay influencia de emisiones cercanas y se mantiene constante, por lo tanto, los cambios en la relación se deben a factores ajenos a Ca.

Por otro lado, la limitación más importante es la conductancia de la capa límite de la hoja, en la que se recarga gran responsabilidad a la hora de mantener el intercambio gaseoso y el calor de la hoja (Yokoyama et al., 2023). Kimura *et al*. (2017) reportaron que cuando la conductancia es menor, la diferencia de temperatura entre la hoja y el aire es mayor. Estas variaciones en el ambiente también se deben a la organización del cultivo, Liu y Song (2012) afirman que aquellas plantas cuyo dosel está más cercano a la superficie eran expuestas a mayor situación de estrés debido al incremento de la temperatura y la presión de vapor de agua, y aquellas plantaciones con mayor densidad, además de presentar menores temperaturas en comparación con plantaciones menos densas, la superficie del suelo está menos expuesta a la radiación y mayor humedad relativa. Por lo que la presencia de plantas que cubren a los nuevos individuos como ocurre en el corte por entresaque, generan un microclima dentro del cultivo que favorece el desarrollo de los nuevos tallos por medio de la protección de la incidencia directa de los factores ambientales.

4.2 Variables de crecimiento, índice de madurez y contenido de clorofilas

La diferencia entre el corte por entresaque y el corte por parejo sin renovación, puede darse en la competencia que existe en plantas en corte por parejo sin renovación, en donde el suministro de agua y nutrientes debe ser repartido a todos los tallos de igual manera, en comparación al corte por entresaque en el que únicamente cosechan cañas maduras y por lo tanto más desarrolladas (Anujm et al., 2015). El diámetro del tallo se puede ver favorecido por un buen suministro de agua que provoca mayor división celular y la promoción de un estímulo hormonal (Morales, 2001), no obstante, en un trabajo anterior realizado por De Miranda *et al*., (2017) encontraron que si hubo diferencias significativas cuando evaluaron el diámetro de siete variedades de caña a cinco tipos de estrés hídrico, en contraste, Santos *et al*., (2013) afirman que de todas las variables biométricas que evaluaron, el diámetro es la que menor variación presenta por lo que afirman que esta variable responde a las cualidades genéticas intrínsecas de la planta, comportamiento similar a lo encontrado en este estudio con respecto a la falta de diferencias en el diámetro del tallo (Figura 3-7), lo que explica que el tipo de corte no tuvo efecto sobre el diámetro del tallo sino la cantidad de agua suministrada al cultivo. El aumento del diámetro para la segunda cosecha en el corte por entresaque puede darse por el cambio en la densidad de siembra que implica extraer algunas de las cañas (Matsuoka y Stolf, 2012).

En el corte por entresaque ocurre un distanciamiento mayor entre plantas comparado con el corte por parejo dado que, aquellas plantas que no están maduras se siguen desarrollando hasta alcanzar la etapa de madurez en ausencia de aquellas que ya fueron cosechadas. Anjum et al. (2015) encontraron que los mayores valores de altura del tallo correspondían a plantas espaciadas debido a una mejor penetración de la luz en el dosel que conducía a una mayor tasa fotosintética, una menor competencia entre ellas por agua y nutrientes, o el favorecimiento de algunas variables de crecimiento como es el área foliar. El área foliar está directamente relacionada con la interceptación de la luz, de modo que, a mayor área foliar mayor intercepción de la luz, por lo que aquellas plantas que reciben una baja intensidad de luz tienden a tener menor área foliar (Scarpari y Beauclair, 2008). Como se observa en la Figura 3-8, los mayores valores de área foliar corresponden al corte por parejo sin renovación, en el cual los tallos de la planta crecen al mismo tiempo, lo que genera mayor competencia por luz entre estos mismos. Valores altos de área foliar pueden

afectar la producción de biomasa de la planta dado que disminuyen la eficiencia de intercepción de la luz, lo que conduce a que bajos niveles de radiación alcancen hojas maduras induciendo a estas mismas a envejecer con mayor rapidez (Tejera et al., 2007; Sadras y Calderini, 2020). Así podría explicarse el comportamiento de correlación negativa entre las variables altura y área foliar (Figura 3-16). En adición, al sistema de cosecha corte pro parejo sin renovación pertenecen los mayores valores de hojas secas durante el mes de junio (Figura 3-12), apoyando la idea de que el autosombreado que ocurre en estas plantas provoca menor duración del área foliar y aumenta el número de hojas secas.

Según Mulas et al*.* (2018), dado el tejido poco denso en las hojas que caracteriza a las plantas C4, en las primeras etapas del desarrollo de la planta existe una menor inversión de energía para generar las primeras hojas, y mayor parte de la energía se va al establecimiento de la raíz; en comparación con las cañas de soca como son las de corte por entresaque y parejo sin renovación, las cuales tienen un sistema radical establecido y fuerte, que para el momento del rebrote es la única fuente de carbono para el desarrollo inicial de la planta (Xu, et al., 2021). Este sistema radical establecido y adaptado favorece una rápida expansión foliar (Pissolato et al., 2021), por lo que podría explicar la necesidad de generar mayor número de hojas en plantas donde hubo corte por parejo, dado que son fuente de asimilados, en comparación con los cortes donde funciona el retoño que adicionalmente presentan mayores áreas foliares pero menor número de hojas verdes.

Con el índice de madurez se puede dar un indicio del grado de madurez de la caña, de este modo, se considera que con un valor de 0,95 la caña ya está madura (Ramírez *et al.*, 2014). Para este trabajo, aunque no se presentaron diferencias significativas, se observó que el corte por parejo fue el que mayor valor de índice de madurez obtuvo (0,91) y por debajo de este valor se encuentran muy similares los valores de índice madurez para el corte por entresaque y parejo sin renovación (0,88 y 0,89 respectivamente). Estos valores indican que para la fecha, ninguno de los cultivos había alcanzado el grado de madurez agronómica (Barona *et al*., 2021), sin embargo, se le puede atribuir el mayor valor promedio al corte por parejo; teniendo en cuenta que este valor se obtiene mediante la relación de grados brix apicales con grados brix de la base (Aguilar *et al.*, 2012), se puede sugerir que los cortes por entresaque y parejo sin renovación requieren mayor tiempo para almacenar azúcares en los entrenudos del ápice del tallo.

El contenido de clorofila está ligado al proceso fotosintético, por lo que un mayor contenido de clorofilas mejora la tasa fotosintética (Pastelin y Castañeda, 2018); producto de la

fotosíntesis se obtienen los azúcares que son almacenados o redistribuidos a otras partes de la planta diferentes al tallo (Villegas y Larrahondo, 2018); Pammenter y Allison (2002) encontraron que cuando ocurría una disminución de la fotosíntesis, aumentaba la partición de asimilados hacia la sacarosa, lo que indica que el almacenamiento de sacarosa tiene prioridad sobre el desarrollo vegetativo de la planta.

4.3 Contenido de carbono

La división del carbono dentro de la planta cambia según el grado de desarrollo de la misma y según el órgano (Mason *et al*., 2020), y se reparte entre el contenido de sacarosa, hemicelulosa, lignina y celulosa (Shi *et al.*, 2016). La raíz, hojas y entrenudos tiene diferentes perfiles de composición que varía a lo largo del ciclo, en la raíz la composición es similar a la de los tejidos internodales inmaduros, la diferencia se encuentra en que la cantidad de sacarosa en este órgano es menor, por lo que se concluye que la raíz utiliza más la sacarosa almacenada para la respiración y formación de estructura (De Souza *et al.*, 2013). Cuando el entrenudo es inmaduro la proporción de hexosas es mayor que el de sacarosa, debido a su importancia para la respiración y por lo tanto, la formación del tejido. Por otro lado, cuando el entrenudo es maduro la proporción de sacarosa es mayor (Mason *et al.*, 2020). A diferencia de este órgano, en las hojas no hay cambios en la composición entre tejidos maduros y tejidos inmaduros, en este órgano la composición se da principalmente por compuestos de pared celular y otros como la formación de proteínas que se debe principalmente por la presencia de maquinaria fotosintética (Costa *et al.*, 2016). Para los resultados encontrados, no se obtuvo una diferencia significativa entre los sistemas de corte (Figura 3-2-7), se sugiere que estos cambios a nivel de carbono no pueden ser muy evidentes dado que el carbono se puede encontrar tanto en azúcares solubles como insolubles y en cambio la diferencia podría encontrarse en la composición, de manera que algunos sistemas radicales tengan mayor cantidad de compuestos necesarios para respiración y formación de estructuras y otros tengan mayor cantidad de azúcar de almacenamiento. El cambio se encontró de una cosecha a otra por lo que se podría pensar que a lo largo del desarrollo y del paso del tiempo el cultivo puede ir acumulando más carbono que se traduce en mayor longitud o área de la raíz.

Una de las diferencias de los tipos de corte de caña de azúcar para la producción de panela radica en el hecho del mantenimiento de la raíz, así, el sistema de corte por entresaque y corte por parejo sin renovación mantienen el mismo sistema radical para el desarrollo de las siguientes socas, en contraste el sistema de corte por parejo inicia su desarrollo sin contar con un sistema radical bien establecido. En estudios realizados anteriormente por Singh *et al*., (2015), encontraron que la germinación y macollamiento ocurren con mayor velocidad y son favorecidos en cuanto a número de macollos para los cultivos de soca; sin embargo, las siguientes fases del desarrollo se ven afectadas, dado que encontraron que para este sistema radical ocurre una disminución del intercambio de cationes lo que disminuye la absorción de nutrientes y por tanto una actividad fotosintética reducida. Como mencionaron Mason *et a*l. (2020) la raíz almacena en menor medida (comparando con otros órganos de la planta) sacarosa lo que favorece el inicio del desarrollo de la planta.

Se ha reportado que la conservación de la hojarasca aporta nutrientes al suelo (Carvalho et al., 2017). Dentro del aporte de nutrientes se encuentra el potasio, el cual se libera en un plazo de un año, dado que no es un componente estructural de las células se libera en forma iónica rápidamente para una absorción del cultivo en un plazo corto (Franco et al., 2013), por otro lado, el nitrógeno también importante para el proceso fotosintético se libera a largo plazo pero para esto es necesario mantener toda la hojarasca por un periodo de 30 años aproximadamente (Trivelin et al., 2013). Teniendo en cuenta la anterior información, la disponibilidad de estos nutrientes puede variar en función de la frecuencia y la cantidad de la hojarasca en el cultivo, de manera que aquellos cultivos en donde la hojarasca es reciente, tiene mayor disponibilidad de nutrientes como fósforo, potasio y calcio en comparación con la hojarasca remanente de años anteriores (Arcoverde et al., 2023). Para el corte por entresaque la cantidad de hojarasca en el suelo es menor pero la frecuencia con la que se deposita es mayor en comparación con el corte por parejo sin renovación, por lo tanto está en constante suministro de nutrientes tanto de largo plazo como de corto plazo, que pueden estar favoreciendo su productividad.

4.4 Interacción entre las variables y el sistema de cosecha

Es importante destacar que este trabajo se desarrolla a partir de un estudio observacional, en el cual, no se controlaron factores ambientales dentro de los que no solo se incluyen variables climáticas sino enfermedades, depredadores y aspectos en el manejo del cultivo que por ser parte de un agroecosistema familiar no existe rigurosidad en las formas de siembra y variedades sembradas, por lo que es posible que la muerte de algunos individuos seleccionados sea producto de eventualidades; y las características de otros pudieron variar en función de la mezcla genética que pudo existir dentro de un mismo cultivo. Dado que el manejo de estos cultivos no corresponde a la agricultura industrial de la caña de azúcar, existen datos que no pudieron tomarse adecuadamente como la variedad de la especie y cuantas de estas habían dentro de un cultivo debido al desconocimiento del productor o factores que el productor pudo pasar por alto.

En Cundinamarca se reportan las siguientes variedades de caña de azúcar POJ 2878; CP 57-603; ZC; RD 75-11; CC 84-75; CC 85-92; CC 93-7711 y CC 93-7510 (Rodríguez *et al.*, 2020) Las variedades de caña de azúcar pueden presentar cambios fisiológicos como las variedades CC84-75 y RD75-11, que se destacan por presentar valores altos de biomasa (170 y 161 t ha^{-1} en 11 meses, respectivamente) producto de mayor cantidad de tallos y mayores alturas de los mismos (Castillo y Becerra, 2020), para estas dos variedades también se reporta mayor cantidad de hojas (11 y 12 hojas/tallo) que comparando con variedades como CC85-92 Y CC833895 presentan menores valores de área foliar asegurando así su capacidad fotosintética (Castillo y Becerra, 2020). La biomasa también se determina mediante el diámetro de la planta, que depende de las características intrínsecas del cultivo pero también de la nutrición que recibe y el contenido hídrico de la planta (Rodríguez *et al*., 2020; Barona *et al*., 2021) esto se observó con la variedad CC11-600 que a pesar de tener de los valores más bajos para el diámetro de sus tallos (1,99 cm), fue la variedad con mayor productividad por hectárea (146,38 t ha^{-1}) comparada con CC 00-3771, CC 10-450, CC 91-1606, CC 99-2461 (Barona *et al*., 2021).

En el presente estudio se pueden destacar dos factores que pueden influir en el comportamiento fotosintético y fisiológico de la caña de azúcar para la producción de panela. El microclima generado por el cultivo y la translocación de fotoasimilados dentro de la planta. El microclima que se genera dentro de cada cultivo se rige en primer lugar por

la cantidad de radiación solar que se transmite por el dosel y esta a su vez responde al posicionamiento del cultivo, por lo que cambios en distanciamiento del dosel genera cambios en el microclima de cada cultivo (Bosi et al., 2014; Pezzopane et al., 2015; Schwerz et al., 2018). En adición, la presencia de cobertura del suelo tiene efectos en la temperatura del suelo e infiltración y retención de agua (Nxumalo et al., 2017). Como ya se expresó con anterioridad, los cambios en la temperatura tienen efectos en el desarrollo del cultivo principalmente en las primeras etapas del desarrollo (Ruiz et al., 2019), aunque también estos cambios en el microclima tienen efectos en la fotosíntesis. Los cambios en SPAD que se obtuvieron en este estudio no mostraron reducción para ninguno de los sistemas de cosecha, sin embargo, en el corte por entresaque se obtuvieron mayores valores de asimilación, pero no de índice de clorofilas como se esperaría, y en cambio el sistema de cosecha que presentó mayor índice de clorofila fue el corte por parejo. Zhao et al, 2013 informan que los valores de SPAD no son muy sensibles a condiciones fuera de las óptimas en comparación con la asimilación y la conductancia estomática, no obstante, cuando el estrés es severo los valores de SPAD si disminuyen. Por otro lado, valores altos de carbono interno indican una disminución en la asimilación, que como se observa, está correlacionada con la conductancia estomática, no responderían al índice de clorofilas sino a limitaciones estomáticas que son influenciadas por factores ambientales que se generan dentro del cultivo (Zhao et al, 2011).

A pesar de que el contenido de carbono no mostró diferencias significativas, en la Figura 3-2-7 se observa que los mayores valores de carbono fueron encontrados en raíces en el corte por parejo y parejo sin renovación, lo que podría evidenciar que los cultivos sometidos a estos sistemas de cosecha invierten más en desarrollar un sistema radical que ayude a mantener la absorción del agua (Endres et al., 2019). En adición, se debe tener en cuenta que para los sistemas de corte por entresaque y parejo sin renovación el sistema radical bien desarrollado sigue intacto después de la cosecha lo que favorece el almacenamiento de asimilados que puede utilizar la planta para el desarrollo de los nuevos tallos, esto puede generar una menor actividad fotosintética (Endres et al., 2019), sin embargo el corte por entresaque sigue manteniendo tallos que no son maduros, siendo un sumidero importante que mantiene la alta actividad fotosintética, que beneficia el aumento de la altura para estas plantas (Hoang et al., 2019), así como la alta actividad fotosintética favorece las variables de crecimiento, adicionalmente la edad del cultivo tiene influencia sobre algunas de ellas, como sucede para la variable diámetro del tallo, el cual disminuye

a medida que el cultivo va envejeciendo (Mehareb et al., 2015), por este motivo los mayores valores del diámetro se encontraron en cultivos cuyo sistema de cosecha es el corte por parejo. El corte por parejo sin renovación presentó mayores valores de área foliar pero no fue aquel que presentó mayor actividad fotosintética. Tejera et al. (2007) afirman que una mayor área foliar disminuye la eficiencia de la planta para la interceptación de la luz, de esta manera una menor cantidad de radiación alcanza las hojas más maduras y las conllevan a senescencia.

Tabla 4-1: Comparación de la respuesta fisiológica de los cultivos sometidos a tres sistemas de corte. Las X indican mayor valor, C1 indica mayor valor en la cosecha 1 y C2 indica mayor valor en la segunda cosecha, * indica diferencias significativas. Para el caso de las variables fotosintéticas no se evaluó por cosechas, por lo tanto, no se diferencia entre C1 Y C2.

Variable	Entresaque	Parejo	Parejo sin Renovación
Diámetro	**-**	**X**	**-**
Área foliar			**X***
Altura	**X***		
Número de hojas	**-**	**X***	**-**
Índice de madurez	**-**	**-**	**-**
Índice de clorofilas	**-**	**C2***	**-**
Contenido de carbono en hojas		**C2**	**C1**
Contenido de carbono en yaguas	**-**	**X**	**-**
Contenido de carbono en cogollo		**C2**	**C1**
Contenido de carbono en raíz		**C2**	**C1**
Contenido de carbono en tallo		**X**	
Transpiración (E)	**X***		

Conductancia estomática (gs)	**X***		
Asimilación (A)	**X***		
Carbono interno (Ci)			**X***

5. Conclusiones

- La organización de los sistemas de cosecha en el ACP se rige en mayor medida por la disponibilidad de carbono interno, los cultivos que presentan mayores valores de Ci son el corte por parejo y parejo sin renovación. Por otro lado, los cultivos sometidos a corte por entresaque presentan menores valores de Ci pero mayores de A. La cantidad de Ci disponibles depende de factores como gsw y A, variables que determinan la absorción o gasto de Ci respectivamente, así los cultivos de corte por parejo y parejo sin renovación, presentan mayores valores de Ci pero menos valores de A y gsw, en contraste los cultivos sometidos a corte por entresaque presentan menores valores de Ci pero mayores valores de A y gsw.
- Para los tres sistemas de cosecha se obtuvo una correlación positiva entre la conductancia estomática y la asimilación, sin embargo, la mayor correlación se observó en los cultivos sometidos a corte por entresaque, lo que indica que la asimilación puede estar afectada por otros factores en los cultivos sometidos a corte por parejo y corte por parejo sin renovación.
- La correlación positiva entre Ci y gsw fue mayor en el corte por parejo, la proporción de carbono interno depende de la conductancia estomática (gsw), a diferencia del corte por entresaque, en el que se observó mayor correlación negativa entre Ci y A indicando que la cantidad de carbono interno cambia según el gasto que implique una alta tasa de asimilación.
- El periodo de sequía que ocurrió entre mayo y septiembre tuvo un efecto negativo en la conductancia estomática que se observó en el mes de junio para los cortes por parejo y parejo sin renovación pero no tuvo incidencia sobre esta variable para cultivos sometidos a corte por entresaque.
- Los cultivos sometidos a corte por entresaque transpiran menos en comparación con los otros tipos de cosecha, sin embargo, son los que más correlación tienen con la conductancia estomática, por lo tanto, la poca transpiración no se debe a una baja conductancia estomática.
- La temperatura foliar permaneció constante para cultivos sometidos a corte por entresaque, mientras que para corte por parejo y parejo sin renovación, aumentó

en junio y para los cultivos sometidos a corte por parejo, los cuales presentaron mayor correlación positiva entre temperatura foliar y transpiración.

- La altura y el área foliar son variables que están relacionadas negativamente. Se encontraron mayores valores de altura para las plantas sometidas a corte por entresaque pero fueron aquellos que presentaron menores valores de área foliar, por otro lado, los mayores valores de área foliar se encontraron en cultivos sometidos a corte por parejo sin renovación. Para este resultado se sugiere que la luz juega un papel importante a la hora de estimular el crecimiento del tallo y el almacenamiento de asimilados cumple una función útil para el desarrollo foliar.
- No se encontraron diferencias significativas para el contenido de carbono en ninguno de los órganos. Sin embargo, el órgano cuyos cambios en los valores para el sistema de cosecha, se evidenció más fue la raíz. Aunque el contenido de carbono no varía en mayor medida para los sistemas de cosecha, si puede variar la composición, en la que se esperaría mayor proporción de hexosas para las raíces de cultivos con mayor edad como lo son el corte por entresaque y corte por parejo sin renovación.

6. Bibliografía

Acevedo, Á., Santoyo, J. S., Guzmán, P., & Jiménez, N. (2018). La Agricultura Familiar frente al modelo extractivista de desarrollo rural en Colombia. Gestión y Ambiente, 21(2Supl), 144-154.

Aguiar, NO, Medici, LO, Olivares, FL, Dobbss, LB, Torres-Netto, A., Silva, SF, ... & Canellas, LP (2016). Perfil metabólico y respuestas antioxidantes durante la recuperación del estrés por sequía en caña de azúcar tratada con ácidos húmicos y bacterias endófitas diazotróficas. Anales de biología aplicada, 168 (2), 203-213.

Aguilar Rivera, N., Galindo Mendoza, G., & Fortanelli Martínez, J. (2012). Evaluación agroindustrial del cultivo de caña de azúcar (Saccharum officinarum L.) mediante imágenes SPOT 5 HRV en la Huasteca México.

Ainsworth, E. A., & Bush, D. R. (2011). Carbohydrate export from the leaf: a highly regulated process and target to enhance photosynthesis and productivity. Plant physiology, 155(1), 64-69.

Alfaro, R., y Ocampo, R. (2015). Evaluación del sistema radicular en tres periodos de desarrollo de la caña de azúcar. VI Congreso Tecnológico del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar. Costa Rica.

Anjum, S. A., Raza, M., Hussain, N., Nadeem, M., & Ali, N. (2015). Studies on productivity and performance of spring sugarcane sown in different planting configurations. American Journal of Plant Sciences, 6(19), 2984.

Araya, J., Alpizar, E., Valverde, W., & Chavarria, E. (2016). Aplicación del índice de madurez de la caña como criterio de cosecha: un método sencillo con un fundamento fisiológico sólido y un enfoque práctico. Revista Entre Cañeros, (6), 51-59.

Arcoverde, S. N. S., Kurihara, C. H., Staut, L. A., Tomazi, M., Pires, A. M. M., & Silva, C. J. D. (2023). Soil fertility, nutritional status, and sugarcane yield under two systems of soil management, levels of remaining straw and chiseling of ratoons. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 47, e0220138.

Azevedo, RA, Carvalho, RF, Cia, MC y Gratão, PL (2011). Caña de azúcar bajo presión: una descripción general de los estudios bioquímicos y fisiológicos del estrés abiótico. Biología de Plantas Tropicales , 4 , 42-51.

Barona, A. F., Antolinezl, E. Y., López, J. G., Viveros, C. A., Jiménez, J., Ángel, J. C., ... & Vargas, G. A. (2021). Comportamiento agroindustrial de seis variedades de Caña de azúcar (Saccharum spp.) para Panela en Barbosa (Colombia). Ciencia y Agricultura, 18(3), 15-27.

Basler, G., Fernie, AR y Nikoloski, Z. (2018). Avances en el análisis del flujo metabólico hacia el perfilado a escala del genoma de organismos superiores. Biosci. Rep. 38: BSR20170224. doi: 10.1042/BSR20170224

Basnayake, J., Jackson, PAN, Inman-Bamber, G. y Lakshmanan, P. (2012). Caña de azúcar para ambientes con escasez de agua. Variación genética en el rendimiento de la caña y el contenido de azúcar en respuesta al estrés hídrico. J. Exp. Bot. 63, 6023–6033. doi: 10.1093/jxb/ers251

Beebe, D., & Russin, W. A. (2012). in the Phloem-Loading Pathway. Plasmodesmata: Structure, Function, Role in Cell Communication, 261.

Bhattacharya, A. (2022). Efecto del estrés por baja temperatura en la fotosíntesis y rasgos afines: una revisión. Procesos fisiológicos en plantas bajo estrés por baja temperatura, 199-297.

Bieto, J. A., & Talón, M. (Eds.). (2013). Fundamentos de fisiología vegetal. Publicacions i Edicions Universitat de Barcelona. Capítulo 12. Pag. 235.

Black, E., Vidale, P. L., Verhoef, A., Cuadra, S. V., Osborne, T., & Van den Hoof, C. (2012). Cultivating C4 crops in a changing climate: sugarcane in Ghana. Environmental Research Letters, 7(4), 044027.

Bonnett, G.D., (2014). Developmental stage (phenology). In: Moore, P.H., Botha, F.C. (Eds.), Physiology, Biochemistry and Functional Biology of Sugarcane. World in Agriculture Series, Wiley-Blackwell, ISBN: 978-1-118-77138-9, pp. 35–53.

Bosi, C., Pezzopane, J. R. M., Sentelhas, P. C., Santos, P. M., & Nicodemo, M. L. F. (2014). Produtividade e características biométricas do capim-braquiária em sistema silvipastoril. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 49, 449-456.

Botha, F. C., Scalia, G., Marquardt, A., & Wathen-Dunn, K. (2023). Sink Strength During Sugarcane Culm Growth: Size Matters. Sugar Tech, 1-14.

Bottcher, A., Cesarino, I., dos Santos, AB, Vicentini, R., Mayer, JLS, Vanholme, R., ... & Mazzafera, P. (2013). Lignificación en caña de azúcar: caracterización bioquímica, descubrimiento de genes y análisis de expresión en dos genotipos contrastantes por contenido de lignina. Fisiología vegetal , 163 (4), 1539-1557.

Boudet AM (2003) Hacia una comprensión de la organización supramolecular de la pared lignificada. En: Rose JKC (ed) The plant cell wall, vol 8. CRC, Boca Raton, pp 155–182.

Bull., T. (2000) The sugarcane plant. In Manual of Canegrowing (D.M. Hogarth and P.G. Allsopp, eds), pp. 71– 82. Brisbane, Qld: BSES Limited.

Calderan, M. J., de Barros, L. L., Cheavegatti, A., & Caldana, C. (2021). Applying Molecular phenotyping tools to explore sugarcane carbon potential. Frontiers in Plant Science, 202.

Campos, PF, Alves Júnior, J., Casaroli, D., Fontoura, PR, Evangelista, AWP, & Vellame, LM (2014). Respuesta de variedades de caña de azúcar al riego deficitario en la sabana brasileña.

Cardona, C. A., Quintero, J. A., & Paz, I. C. (2010). Production of bioethanol from sugarcane bagasse: status and perspectives. Bioresource technology, 101(13), 4754-4766.

Cardozo, N. P., y Sentelhas, P. C. (2013). Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. Scientia Agricola, 70, 449-456.

Carr, M.K., Knox, W., 2011. The water relations and irrigation requirements of sugar cane (Sacchrum officinarum): a review. Exp. Agric. 47, 1–25.

Carrillo Cortés, Y. (2022). Distribución espacial del stock de carbono orgánico del suelo en paisajes ocupados por caña de azúcar (Saccharum officinarum) para panela. Universidad Nacional de Colombia.

Carvalho, JLN, Nogueirol, RC, Menandro, LMS, Bordonal, RDO, Borges, CD, Cantarella, H., & Franco, HCJ (2017). Implicaciones agronómicas y ambientales de la remoción de paja de caña de azúcar: una revisión importante. Gcb Bioenergía , 9 (7), 1181-1195.

Carvalho, K. S., Vianna, M. S., Nassif, D. S., Costa, L. G., Folegatti, M. V., & Marin, F. R. (2019). Effect of soil straw cover on evaporation, transpiration, and evapotranspiration in sugarcane cultivation. Australian Journal of Crop Science, 13(8), 1362-1368.

Castillo, Á. R., & Becerra Campiño, J. J. (2020). Respuesta agronómica de cuatro variedades de caña de azúcar en los Llanos Orientales de Colombia. Acta Agronómica, 69(2), 124-129.

Chandiposha, M. (2013). Impacto potencial del cambio climático en la caña de azúcar y estrategias de mitigación en Zimbabue.

Chumphu, S., Jongrungklang, N., & Songsri, P. (2019). Association of physiological responses and root distribution patterns of ratooning ability and yield of the second ratoon cane in sugarcane elite clones. Agronomy, 9(4), 200.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica] (2016). Requerimientos nutricionales de tres variedades de caña de azúcar para panela determinados a través de curvas de absorción para primer corte. Colombia.

Costa, TH, Vega-Sánchez, ME, Milagres, AM, Scheller, HV y Ferraz, A. (2016). Distribución específica de tejido de hemicelulosas en seis híbridos de caña de azúcar diferentes en relación con la recalcitrancia de la pared celular. Biotecnología para biocombustibles , 9 (1), 1-13.

Crowley, E. (2013). Con el apoyo adecuado, la agricultura familiar puede contribuir al futuro del desarrollo rural sostenible. Revista para el Desarrollo Rural. https://www.rural21.com/home/

Cruz, F. J. R., da Costa Ferreira Junior, D., & dos Santos, D. M. M. (2018). Low salt stress affects physiological parameters and sugarcane plant growth. Australian Journal of Crop Science, 12(8), 1272-1279.

Cuevas Reyes, V., Baca del Moral, J., Borja Bravo, M., Grass Ramírez, J. F., & Rivera Martínez, G. (2017). Agricultura familiar y tecnología para la elaboración de piloncillo granulado en la comunidad de Aldzulup Poytzén, San Luis Potosí. Nova scientia, 9(19), 481-501.

Danila, F. R., Quick, W. P., White, R. G., von Caemmerer, S., & Furbank, R. T. (2019). Response of plasmodesmata formation in leaves of C4 grasses to growth irradiance. Plant, Cell & Environment, 42(8), 2482-2494.

de Miranda Silverio, J., da Silva, TJA, Bonfim-Silva, EM, Iaia, AM, Duarte, TF, & Pires, RCM. (2017). Tolerancia a la sequía de las variedades de caña de azúcar durante el desarrollo inicial.

De Oliveira Maia Júnior, S., de Andrade, J. R., dos Santos, C. M., Silva, A. L. J., Endres, L., Silva, J. V., & dos Santos Silva, L. K. (2020). Osmoregulators' accumulation minimizes the effects of drought stress in sugarcane and contributes to the recovery of photochemical efficiency in photosystem II after rewatering. Acta physiologiae plantarum, 42, 1-11.

De Souza, A. P., Leite, D. C., Pattathil, S., Hahn, M. G., & Buckeridge, M. S. (2013). Composition and structure of sugarcane cell wall polysaccharides: implications for second-generation bioethanol production. Bioenergy Research, 6, 564-579.

De Souza P., Grandis Adriana, Arenque-Musa Bruna C., Buckeridge Marcos S. (2018) Variación diurna en el intercambio de gases y carbohidratos no estructurales a lo largo del desarrollo de la caña de azúcar. Biología vegetal funcional 45 , 865-876.

Deans, R. M., Farquhar, G. D., & Busch, F. A. (2019). Estimating stomatal and biochemical limitations during photosynthetic induction. Plant, Cell & Environment, 42(12), 3227-3240.

Decanos, RM, Farquhar, GD y Busch, FA (2019). Estimación de limitaciones estomáticas y bioquímicas durante la inducción fotosintética. Planta, célula y medio ambiente , 42 (12), 3227-3240.

Demmig, B., Cohu, CM, Muller, O. y Adams, WW III. (2012). Modulación de la eficiencia de conversión de energía fotosintética en la naturaleza: de segundos a estaciones. Fotosintetizador. Res. 113, 75–88. doi: 10.1007/s11120-012-9761-6

Echeverry Andrade, F y Montero Loaiza, D. (2017). Estimación de la evapotranspiración real en cultivos de caña de azúcar por medios de sensores remotos.

Endres, L., dos Santos, C. M., Silva, J. V., Barbosa, G. V. D. S., Silva, A. L. J., Froehlich, A., & Teixeira, M. M. (2019). Inter-relationship between photosynthetic efficiency, Δ13C, antioxidant activity and sugarcane yield under drought stress in field conditions. Journal of Agronomy and Crop Science, 205(5), 433-446.

Ermakova, M., Bellasio, C., Fitzpatrick, D., Furbank, R. T., Mamedov, F., & von Caemmerer, S. (2021). Upregulation of bundle sheath electron transport capacity under limiting light in C4 Setaria viridis. The Plant Journal, 106(5), 1443-1454.

FEDEPANELA (2020). ÁREAS, RENDIMIENTO Y PRODUCCIÓN PROYECCIÓN PARA 2020. http://www.sipa.org.co/wp/wp-content/uploads/CIFRAS_2020_FEDEPANELA.pdf

Fedepanela. La demanda de la panela creció durante la pandemia y recuperó el nivel de percios. (2021). Disponible en: https://fedepanela.org.co/gremio/la-demanda-de-la-panela-crecio-durante-la-pandemia-y-recupero-el-nivel-de-precios/#:~:text=Seg%C3%BAn%20Carlos%20Fernando%20Mayorga%2C%20presidente,a%202019%20y%202018%20este.

Fernie AR, Bachem CW, Helariutta Y, Neuhaus HE, Prat S, Ruan YL, Sonnewald U (2020) Synchronization of developmental, molecular and metabolic aspects of source–sink interactions. Nat Plants 6(2):55–66.

Ferreira, T. H., Tsunada, M. S., Bassi, D., Araújo, P., Mattiello, L., Guidelli, G. V., ... & Menossi, M. (2017). Sugarcane water stress tolerance mechanisms and its implications on developing biotechnology solutions. Frontiers in Plant Science, 8, 1077.

Food and Agriculture Organization Commodity Balances. Crops Primary Equivalent. Disponible en: http://www.fao.org/faostat/en/#data/BC/metadata (Consultado en septiembre 2022)

Foyer C.H. y Shigeoka S. (2011).: Understanding oxidative stress and antioxidant functions to enhance photosynthesis. – Plant Physiol. 155: 93-100.

Franco HCJ , Pimenta MTB , Carvalho JLN et al . (2013) Evaluación de residuos de caña de azúcar con fines agronómicos y energéticos en Brasil . Scientia Agrícola , 70 , 305 – 312.

Gómez, R. M. (2016). Evaluación del efecto de prácticas orgánicas de nutrición de caña panelera (Saccharum Officinarum L.) en el municipio de Nocaima-Cundinamarca. Escuela de Posgrados.

Gonçalves, I. Z., Costa, L. G. D., & Marin, F. R. (2022). Simulating sugarcane yield response to ETc replacements and green cane trash blanket maintenance in Brazil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 26, 586-593.

Grantz, DA (2013). Intercambio de agua, transpiración y gases. En Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology (eds PH Moore y FC Botha). https://doi.org/10.1002/9781118771280.ch10

Grof, CP, Byrt, CS y Patrick, JW (2013). Floema transporte de recursos. Caña de azúcar: fisiología, bioquímica y biología funcional, 267-305.

Hernández, A. T., & Rodríguez, M. R. G. (2017). Caracterización del proceso de producción de azúcar basado en la metodología ACV. Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca, Tantoyuca.

Hoang, NV, Furtado, A., Botha, FC, Simmons, BA y Henry, RJ (2015). Potencial de mejoramiento genético de la caña de azúcar como fuente de biomasa para biocombustibles. Frente. Bioing. Biotecnología. 3:182. doi: 10.3389/fbioe.2015.00182

Hoang, DT, Hiroo, T. y Yoshinobu, K. (2019). Eficiencia en el uso de nitrógeno y capacidad tolerante a la sequía de varias variedades de caña de azúcar bajo estrés por sequía en la etapa temprana de crecimiento. Ciencia de la producción vegetal , 22 (2), 250-261.

Hoffman, N., Singels, A., Patton, A., Ramburan, S., (2018). Predicting genotypic differences in irrigated sugarcane yield using the Canegro model and independent trait parameter estimates. Eur. J. Agron. 96, 13–21.

Huang, W., Fu, P. L., Jiang, Y. J., Zhang, J. L., Zhang, S. B., Hu, H., & Cao, K. F. (2013). Differences in the responses of photosystem I and photosystem II of three tree species Cleistanthus sumatranus, Celtis philippensis and Pistacia weinmannifolia exposed to a prolonged drought in a tropical limestone forest. Tree Physiology, 33(2).

Hussain, S., Khaliq, A., Mehmood, U., Qadir, T., Saqib, M., Iqbal, M. A., & Hussain, S. (2018). Sugarcane production under changing climate: Effects of environmental vulnerabilities on sugarcane diseases, insects and weeds. Climate Change and Agriculture, 1-17.

Hussain, S., Ulhassan, Z., Brestic, M. et al. Investigación de la fotosíntesis bajo el cambio climático. Photosynth Res 150 , 5–19 (2021). https://doi.org/10.1007/s11120-021-00861-z

Inman, NG, Bonnett, GD, Spillman, MF, Hewitt, MH y Glassop, D. (2010). La acumulación de sacarosa en la caña de azúcar está influenciada por la temperatura y el genotipo a través del equilibrio fuente-sumidero de carbono. Ciencia de cultivos y pastos, 61 (2), 111-121.

Inman-Bamber, N. G., Bonnett, G. D., Spillman, M. F., Hewitt, M. L., & Xu, J. (2009). Source–sink differences in genotypes and water regimes influencing sucrose accumulation in sugarcane stalks. Crop and Pasture Science, 60(4), 316-327.

Inman, G., Jackson, P., Bonnett, G. y Morgan, T. (2011). ¿Hemos alcanzado el pico de CCS?. Revista internacional de azúcar , 113 (1355), 798-803.

Inman, NG, Lakshmanan, P. y Park, S. (2012). Caña de azúcar para ambientes con agua limitada: evaluación teórica de características adecuadas. Investigación de cultivos de campo, 134 , 95-104.

IPCC, “Resumen para formuladores de políticas”, en Cambio Climático (2014): Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Parte A: Aspectos Globales y Sectoriales. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático , CB Field, VR Barros, DJ Dokken et al., Eds., pp. 1–32, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 2014, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_en.pdf.

Jailma Ribeiro de Andrade, S. de OMJ, CM dos SJA Carvalho Silva, Karolyne PO d. Santos, JV Silva, and L. Endres. (2019). “El grosor de la hoja y el intercambio de gases son indicadores de la tolerancia al estrés por sequía de la caña de azúcar”. Emirates

Jones, M.R., Singels, A., (2018). Refining the Canegro model for improved simulation of climate change impacts on sugarcane. Eur. J. Agron. 100, 76–86.

Jorge Maldonado, R. M. (2007). Politicas para la Agricultura Familiar en America Latina y el Caribe. (C. d. Andes, Ed.) http://americalatina.landcoalition.org/sites/default/files/Wong_AgFam_caso_Colombia.pdf

Journal of Food and Agriculture, vol. 31, núm. págs. 29-38, doi:10.9755/ejfa.2019.v31.i1.1897.

Kang, YUN, Outlaw Jr, WH, Andersen, PC y Fiore, GB (2007). Concentración de sacarosa apoplástica de células protectoras: un vínculo entre la fotosíntesis de la hoja y el tamaño de la apertura estomática en el cargador de floema apoplástico Vicia faba L. Plant, Cell & Environment , 30 (5), 551-558.

Kohila, S., & Gomathi, R. (2018). Adaptive physiological and biochemical response of sugarcane genotypes to high-temperature stress. Indian journal of plant physiology, 23, 245-260.

Kapur, R., SK Duttamajumder y K. Krishna Rao. 2011. La perspectiva de un mejorador sobre la dinámica de los macollos en la caña de azúcar. Ciencia actual 100 (2): 183–189.

Kingston, G. (2013). Mineral nutrition of sugarcane. Sugarcane: Physiology, biochemistry, and functional biology, 85-120.

Kimura, K., Yasutake, D., Nakazono, K. y Kitano, M. (2017). Distribución dinámica de los efectos térmicos de un ventilador de protección contra heladas oscilante en un campo de té. Ingeniería de Biosistemas , 164 , 98-109.

Kramer D, Evans J. (2011). La importancia del balance energético en la mejora de la productividad fotosintética. Fisiología vegetal 155: 70 – 78.

Kromdijk, J., Ubierna, N., Cousins, A. B., & Griffiths, H. (2014). Bundle-sheath leakiness in C4 photosynthesis: a careful balancing act between CO_2 concentration and assimilation. Journal of experimental botany, 65(13), 3443-3457.

Kromdijk J, Głowacka K, Leonelli L, Gabilly ST, Iwai M, NiyogiKK LSP (2016) Improving photosynthesis and crop productivity by accelerating recovery from photoprotection. Science 354:857–861.

Kromdijk, J. y Long, SP (2016). ¿Un ciclo de reproducción de cultivos por inanición? Cómo la ingeniería de la fotosíntesis de cultivos para aumentar el CO_2 y la temperatura podría ser una ruta importante para el alivio. Actas de la Royal Society B: Ciencias biológicas , 283 (1826), 20152578.

Kölln, OT, de Castro Gava, GJ, Cantarella, H., Silva, SR, y Trivelin, PCO (2021). Pérdida de rendimiento de caña de azúcar por deficiencias de agua y nitrógeno evaluada por el método de discriminación isotópica de carbono. Diario de los Emiratos de Alimentación y Agricultura .

Lambers, H., Oliveira, R. S., Lambers, H., & Oliveira, R. S. (2019). Photosynthesis, respiration, and long-distance transport: photosynthesis. Plant physiological ecology, 11-114.

Larrahondo, J., & Villegas, F. (1995). Control y características de maduración. El Cultivo De La Caña De Azúcar En La Zona Azucarera De Colombia.CENICAÑA.Colombia, , 297-313.

Leegood, R.C. & Walker, R.P. (1999) Regulation of the C4 pathway. In: C4 Plant Biology (eds. R.F. Sage & R.K. Monson), pp. 89–132. Academic Press, San Diego, California.

Leuzinger S, Vogt R, Körner C (2010) Tree surface temperature in an urban environment. Agric Meteorol. 150:56–62.

Li, Y. R. (2023). Growth and Development of Sugarcane (Saccharum spp. Hybrid) and Its Relationship with Environmental Factors. Agro-industrial Perspectives on Sugarcane Production under Environmental Stress, 1.

Li, L., & Sheen, J. (2016). Dynamic and diverse sugar signaling. Current opinion in plant biology, 33, 116-125.

Lingle, S. E., & Thomson, J. L. (2012). Sugarcane internode composition during crop development. BioEnergy Research, 5, 168-178.

Liu, T. D., & Song, F. B. (2012). Maize photosynthesis and microclimate within the canopies at grain-filling stage in response to narrow-wide row planting patterns. Photosynthetica, 50(2), 215-222.

Lobo, AKM, de Oliveira Martins, M., Neto, MCL, Machado, EC, Ribeiro, RV, & Silveira, JAG (2015). El suministro de sacarosa exógena cambia el metabolismo del azúcar y reduce la fotosíntesis de la caña de azúcar a través de la regulación negativa de la abundancia y actividad de Rubisco. Revista de fisiología vegetal , 179 , 113-121.

Lobo, A. (2016). Photosynthesis regulation by sucrose metabolism under water deficit and source-sink alterations in sugarcane.

Lopez, J. G. L. (2015). Manejo agronómico del cultivo de la caña de azúcar para panela en Antioquia. Corpoica Editorial.

Machado, R. S., Ribeiro, R. V., Marchiori, P. E. R., Machado, D. F. S. P., Machado, E. C., & Landell, M. G. D. A. (2009). Biometric and physiological responses to water deficit in sugarcane at different phenological stages. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 44, 1575-1582.

Manterola, C., & Otzen, T. (2014). Estudios observacionales: los diseños utilizados con mayor frecuencia en investigación clínica. International Journal of Morphology, 32(2), 634-645.

Marchiori, P. E., Machado, E. C., & Ribeiro, R. V. (2014). Photosynthetic limitations imposed by self-shading in field-grown sugarcane varieties. Field Crops Research, 155, 30-37.

Martiné, J.-F., Todoroff, P.R.I., (2004). Le modèle de croissance mosicas et sa plateforme de simulation simulex: état des lieux et perspectives. Rev. Agric. Sucrière Maurice 80, 133–147. LB-U1.

Mason, P. J., Furtado, A., Marquardt, A., Hodgson-Kratky, K., Hoang, N. V., Botha, F. C., & Henry, R. J. (2020). Variation in sugarcane biomass composition and enzymatic saccharification of leaves, internodes and roots. Biotechnology for biofuels, 13(1), 1-19.

Matsuoka, S., & Stolf, R. (2012). Sugarcane tillering and ratooning: key factors for a profitable cropping. Sugarcane: Production, cultivation and uses, 5(2), 137-157.

McCormick, A. J., Cramer, M. D., & Watt, D. A. (2008). Regulation of photosynthesis by sugars in sugarcane leaves. Journal of plant physiology, 165(17), 1817-1829.

Medeiros, DB, Silva, ECD, Nogueira, RJMC, Teixeira, MM y Buckeridge, MS (2013). Limitaciones fisiológicas en dos variedades de caña de azúcar bajo supresión de agua y después de la recuperación. Fisiología Vegetal Teórica y Experimental , 25 , 213-222.

Mehareb, E. M., Abou-Elwafa, S. F., & Galal, M. O. (2015). Comparative Performance of sugarcane genotypes for ratoon ability in early clonal selection stages. Journal of Sugarcane Research, 5(2), 11-21.

Misra, V., Mall, AK, Ansari, SA y Ansari, MI (2022). Transportadores de azúcar, enzimas metabolizadoras de azúcar y su interacción con fitohormonas en caña de azúcar. Revista de Regulación del Crecimiento Vegetal , 1-14.

Moore PH, Paterson AH, Tew T (2014) Caña de azúcar: el cultivo, la planta y la domesticación. En: Moore PH, Botha FC (eds) Caña de azúcar: fisiología, bioquímica y biología funcional. Wiley Blackwell, Oxford, págs. 1–17

Mulas, D., Asensio, J. A., & Calvo, M. (2018). LA MEJOR IMPLANTACIÓN POSIBLE, CLAVE DE UNOS RENDIMIENTOS MÁS ALTOS EN MAÍZ.

Muñoz, J. L. T., Tamayo, J. H. C., Borray, G. A. R., Jiménez, R. J. S., & Blanco, V. C. P. (2022). Pérdida de suelo por erosión hídrica superficial en caña de azúcar para producción de panela. Informador técnico, 87(2), 3-15.

Nascentes, R. F., Carbonari, C. A., Simões, P. S., Brunelli, M. C., Velini, E. D., & Duke, S. O. (2018). Low doses of glyphosate enhance growth, CO2 assimilation, stomatal conductance and transpiration in sugarcane and eucalyptus. Pest management science, 74(5), 1197-1205.

National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA). (2021). Tendencias del dióxido de carbono atmosférico. https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html#mlo

Nxumalo, N., Ramburan, S., & Steyn, J. M. (2017). Growth and yield responses of commercial sugarcane cultivars to mulching in the coastal rainfed region of South Africa. South African Journal of Plant and Soil, 34(1), 9-18.

Oliveira, D. M., Cherubin, M. R., Franco, A. L., Santos, A. S., Gelain, J. G., Dias, N. M., ... & Cerri, C. E. (2019). Is the expansion of sugarcane over pasturelands a sustainable

strategy for Brazil's bioenergy industry?. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 102, 346-355.

Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., & Dasgupta, P. (2014). Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ipcc.

Pammenter NW, Allison JCS (2002) Effects of treatments potentially influencing the supply of assimilate on its partitioning in sugarcane. Journal of Experimental Botany 53, 123–129. doi: 10.1093/jexbot/ 53.366.123

Parsaee, M., Kiani, M. K. D., & Karimi, K. (2019). A review of biogas production from sugarcane vinasse. Biomass and bioenergy, 122, 117-125.

Pastelín, M. C., & Castañeda, O. (2018). Afectaciones fisiológicas y bioquímicas en vitroplantas de caña de azúcar en respuesta al estrés hídrico y salino. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 9(7), 1483-1493.

Peres, JG, Souza, CF y Lavorenti, NA (2010). Evaluación de los efectos de la cobertura de paja de caña de azúcar sobre la humedad del suelo y la pérdida de agua. Ingeniería Agrícola , 30 , 875-886.

Pezzopane, J. R. M., Bosi, C., Nicodemo, M. L. F., Santos, P. M., Cruz, P. G. D., & Parmejiani, R. S. (2015). Microclimate and soil moisture in a silvopastoral system in southeastern Brazil. Bragantia, 74, 110-119.

Pinzón, A. (2018). El bagazo como materia prima para la producción de pulpa y papel.

Pissolato, MD; Cruz, LP; Silveira, NM; Machado, CE; Ribeiro, RV (2021). El rebrote de la caña de azúcar depende del tamaño del sistema radicular: un enfoque que utiliza plantas jóvenes cultivadas en solución nutritiva. Bragantia, 80 , e4321.

Piza, C., Palacios, L., Pulido, N., & Rincón, R. (2016). Agricultura familiar: una alternativa para la seguridad alimentaria. Conexion Agropecuaria JDC, 6(1), 13-25.

Portmann, F., Siebert, S., Bauer, C., Döll, P., (2008). Global Dataset of Monthly Growing Areas of 26 Irrigated Crops: Version 1.0. Frankfurt Hydrology Paper 6. Institute of Physical Geography, University of Frankfurt (Main), Germany

Poser, C., Barau, L., Mézino, M., Goebel, F.R., Ruget, F., (2019). Effect of the germination threshold temperature on the geographical distribution of the variety R583 in Réunion. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol. 30, 1804–1813.

Rae, A. L., Martinelli, A. P., & Dornelas, M. C. (2013). Anatomy and morphology. Sugarcane: physiology, biochemistry, and functional biology, 19-34.

Raharja, R., Murdiyatmo, U., Sutrisno, A., & Wardani, A. K. (2019). Bioethanol production from sugarcane molasses by instant dry yeast. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 230, No. 1, p. 012076). IOP Publishing.

Rai, R. K., Tripathi, N., Gautam, D., & Singh, P. (2017). Exogenous application of ethrel and gibberellic acid stimulates physiological growth of late planted sugarcane with short growth period in sub-tropical India. Journal of Plant Growth Regulation, 36, 472-486.

Ramírez , J., Insuasty Burbano, O., & Viveros Valens, C. A. (2014). Comportamiento agroindustrial de diez variedades de caña de azúcar para producción de panela en Santander, Colombia. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 15(2), 183-195.

Ramírez Durán, J., Insuasty Burbano, O., & Murcia Pardo, M. L. (2014a). Variedades de caña de azúcar empleadas para la agroindustria panelera de Colombia. Barbosa, Colombia: Corpoica. https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12621

Ramírez, A. & García, F. (2015). Experiencia de adquisición de alimentos a la Agricultura Familiar en el Programa de Alimentación Escolar de Brasil: factores determinantes para su diseño. Investigación Agraria 17 (1): 3-17. Disponible en http://scielo.iics.una.py/pdf/ia/v17n1/v17n1a02.pdf. Accesado: 30/01/2016.

Ramírez, M., Rodríguez, D., Ramírez, F., & Barcia, S. (2019). Variables meteorológicas y desarrollo fenológico de la caña de azúcar en Aguada de Pasajeros. Revista Cubana De Meteorología, 25. Recuperado a partir de http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/482

Reyes, J., Torres, R., Hernández, H., Hernández, V., Alvarado, E., & Joaquín, S. (2022). Rendimiento y calidad de siete variedades de caña de azúcar en El Mante, Tamaulipas. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 13(5), 883-892.

Ribeiro, RV, Machado, RS, Machado, EC, Machado, DFSP, Magalhães Filho, JR, & Landell, MGA (2013). Revelación de patrones productivos y de resistencia a la sequía en genotipos de caña de azúcar mediante la evaluación de las respuestas fisiológicas y el rendimiento del tallo. Agricultura Experimental , 49 (2), 212-224.

Ribeiro, RV, Machado, EC, Magalhães Filho, JR, Lobo, AKM, Martins, MO, Silveira, JA, ... & Struik, PC (2017). El aumento de la fuerza de sumidero compensa el efecto inhibidor de la sacarosa en la fotosíntesis de la caña de azúcar. Revista de fisiología vegetal , 208 , 61-69.

Ribeiro, RV, Machado, EC, Magalhães Filho, JR, Lobo, AKM, Martins, MO, Silveira, JA, ... & Struik, PC (2017). El aumento de la fuerza de sumidero compensa el efecto inhibidor de la sacarosa en la fotosíntesis de la caña de azúcar. Revista de fisiología vegetal , 208, 61-69.

Rodríguez, G., Huertas, B., Polo, S., González, C., Tauta, J., Rodríguez, J., ... & López, R. (2020). Modelo productivo de la caña de azúcar (Saccharum officinarum) para la producción de panela en Cundinamarca. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. https://hdl. handle. net/20.500, 12324, 35698.

Rodrigues, F. A., de Laia, M. L., & Zingaretti, S. M. (2009). Analysis of gene expression profiles under water stress in tolerant and sensitive sugarcane plants. Plant Science, 176(2), 286-302.

Rodríguez, I., Martínez, P., Alvárez, U., Cruz, A., & Mora, E. (2020). Efectos del surco de base ancha sobre el crecimiento y el rendimiento agrícola de la caña de azúcar (Saccharum spp.). Centro Agrícola, 47(2), 66-74. http://scielo.sld.cu/pdf/cag/v47n2/0253-5785-cag-47-02-66.pdf

Romanowska, E., Buczyńska, A., Wasilewska, W. et al. Differences in photosynthetic responses of NADP-ME type C4 species to high light. Planta 245, 641–657 (2017). https://doi.org/10.1007/s00425-016-2632-1

Romero, E., Tonatto, J., Scandaliaris, J., Digonzelli, P., Neme, L., (2010). “Efecto de la temperatura en la emergencia y crecimiento inicial de la planta y primera soca, variedad TUCCP2. Industrial y Agrícola, 87(1):77-42.

Romero, E., Scandaliaris, J., Digonzelli, P., Leggio, M., Giardina, J., Fernández, J., Casen, S., Tonatto, M., y Alonso, L., (2018). La caña de azúcar. Características y ecofiosología. Extraído de: https://www.eeaoc.gob.ar/wp-content/uploads/2018/11/mdc1.pdf

Rosset, P. y Martínez, M. (2013). Movimientos Sociales Rurales y Diálogo de Saberes: Territorios, Soberanía Alimentaria y Agroecología. En: Soberanía alimentaria: un diálogo crítico. Conferencia Internacional Universidad de Yale. Primero, F. (ed). Policy. 1-29.

Ruiz Corrêa, S. T., Barbosa, L. C., Menandro, L. M. S., Scarpare, F. V., Reichardt, K., de Moraes, L. O., y Carvalho, J. L. N. (2019). Straw removal effects on soil water dynamics, soil temperature, and sugarcane yield in south-central Brazil. Bioenergy Research, 12, 749-763.

Sadras, V. O., & Calderini, D. (Eds.). (2020). Crop physiology case histories for major crops. Academic press.

Sage, R. F., Peixoto, M. M., & Sage, T. L. (2013). Photosynthesis in sugarcane. Sugarcane: Physiology, biochemistry, and functional biology, 121-154.

Biology of Sugarcane. World in Agriculture Series, Wiley-Blackwell, ISBN: 978-1-118-77138-9, pp. 121–154.

Sales, C. R., Marchiori, P. E. R., Machado, R. S., Fontenele, A. V., Machado, E. C., Silveira, J. A. G., & Ribeiro, R. V. (2015). Photosynthetic and antioxidant responses to drought during sugarcane ripening. Photosynthetica, 53(4), 547-554.

Sales, C. R., Ribeiro, R. V., Hayashi, A. H., Marchiori, P. E., Silva, K. I., Martins, M. O., ... & Machado, E. C. (2018). Flexibility of C4 decarboxylation and photosynthetic plasticity in sugarcane plants under shading. Environmental and Experimental Botany, 149, 34-42.

Sales, C. R., Ribeiro, R. V., Marchiori, P. E., Kromdijk, J., & Machado, E. C. (2023). The negative impact of shade on photosynthetic efficiency in sugarcane may reflect a metabolic bottleneck. Environmental and Experimental Botany, 211, 105351.

Santos, HR, Pedrosa, EM, Nogueira, RJ, Rolim, MM, Maranhão, SR y Medeiros, DB (2013). Crecimiento de tres variedades de caña de azúcar sometidas a estrés hídrico asociado a Meloidogyne incognita. Rev. Bras. Ciencia de la agricultura. Recife , 8 (4), 547-554.

Scarpari, M. S., & Beauclair, E. G. F. (2008). Variação espaço-temporal do índice de área foliar e brix em cana-de-açúcar. Bragantia, 67(1), 35-41.

Schwerz, F., Medeiros, S. L., Elli, E. F., Eloy, E., Sgarbossa, J., & Caron, B. O. (2018). Plant growth, radiation use efficiency and yield of sugarcane cultivated in agroforestry systems: An alternative for threatened ecosystems. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 90, 3265-3283.

Shi, J., Pattathil, S., Parthasarathi, R., Anderson, NA, Kim, JI, Venketachalam, S., y Singh, S. (2016). Impacto de la composición de lignina modificada sobre la recalcitrancia de la biomasa y la eficiencia del pretratamiento de líquidos iónicos. Química Verde , 18 (18), 4884-4895.

Sierra, A. M. (2023). EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN EL ARCO SECO DE PANAMÁ. Revista Semilla del Este, 3(2), 122-144.

Silva, MDA, Jifon, JL, Santos, CMD, Jadoski, CJ y Silva, JAGD (2013). Capacidad fotosintética y eficiencia en el uso del agua en genotipos de caña de azúcar sujetos a déficit hídrico durante la fase temprana de crecimiento. Archivos brasileños de biología y tecnología , 56 , 735-748.

Silva, MDA, Jifon, JL, da Silva, JAG, dos Santos, CM y Sharma, V. (2014). Relaciones entre características fisiológicas y productividad de la caña de azúcar en respuesta al déficit hídrico. La Revista de Ciencias Agrícolas , 152 (1), 104-118.

Singels, A., Jackson, P., & Inman-Bamber, G. (2021). Sugarcane. In Crop Physiology Case Histories for Major Crops (pp. 674-713). Academic Press.

Singh, P., Rai, R. K., Suman, A., Srivastava, T. K., Singh, K. P., Arya, N., & Yadav, R. L. (2015). Soil-root interface changes in sugarcane plant and ratoon crops under subtropical conditions: Implications for dry-matter accumulation. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 46(4), 454-475.

Singh, R., Jones, T., Wai, C. M., Jifon, J., Nagai, C., Ming, R., & Yu, Q. (2018). Transcriptomic analysis of transgressive segregants revealed the central role of photosynthetic capacity and efficiency in biomass accumulation in sugarcane. Scientific reports, 8(1), 1-10.

Smit, M. A. (2011). Characterising the factors that affect germination and emergence in sugarcane. International sugar journal, 113(1345), 65.

Sonawane, BV, Sharwood, RE, Whitney, S. y Ghannoum, O. (2018). La sombra compromete menos la eficiencia fotosintética de NADP-ME que la de los pastos PEP-CK y NAD-ME C4. Revista de Botánica Experimental , 69 (12), 3053-3068.

Srivastava, S., Pathak, AD, Gupta, PS, Shrivastava, AK y Srivastava, AK (2012). Las enzimas secuestrantes de peróxido de hidrógeno imparten tolerancia al estrés oxidativo inducido por altas temperaturas en la caña de azúcar. Revista de biología ambiental , 33 (3), 657.

Stein, O., & Granot, D. (2019). An overview of sucrose synthases in plants. Frontiers in plant science, 10, 95.

Tavares, R. L. M., de Souza, Z. M., Siqueira, D. S., La Scala Júnior, N., Panosso, A. R., & Campos, M. C. C. (2015). Soil CO_2 emission in sugarcane management systems. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science, 65(8), 755-762.

Tejera, N. A., Rodés, R., Ortega, E., Campos, R., & Lluch, C. (2007). Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. Field Crops Research, 102(1), 64-72.

Tofanello, V. R., Andrade, L. M., Flores-Borges, D. N., Kiyota, E., Mayer, J. L., Creste, S., ... & Ribeiro, R. V. (2021). Role of bundle sheath conductance in sustaining photosynthesis competence in sugarcane plants under nitrogen deficiency. Photosynthesis Research, 149, 275-287.

Toreti, A. et al., 2020: Narrowing uncertainties in the effects of elevated CO_2 on crops. Nat. Food, 1(12), 8 775-782, doi:10.1038/s43016-020-00195-4.

Trivelin P, Victoria RL , Rodrigues JCS (1995) Utilização por soqueira de cana-de-açúcar de início de safra do nitrogênio da aquamônia- 15 N e uréia- 15 N aplicado ao solo em complemento à vinhaça . Pesquisa Agropecuária Brasileira , 31 , 89 – 99 .

Urban, J., Ingwers, M., McGuire, MA y Teskey, RO (2017). La conductancia estomática aumenta con el aumento de la temperatura. Señalización y comportamiento de plantas , 12 (8), e1356534.

Valladares, F., Torres, I., Hernández, L., Montolaván, J., & Padrón, M. (2015). Producción de materia seca en tallos y hojas de caña de azúcar, según épocas de plantación y edades de corte. Agrisost, 21(2), 1-11.

Van Acker R, Vanholme R, Storme V, Mortimer JC, Dupree P, Boerjan W (2013) Lignin biosynthesis perturbations affect secondary cell wall composition and saccharification yield in Arabidopsis thaliana. Biotechnol Biofuels.

van Heerden, P.D.R., G. Eggleston, and R.A. Donaldson. (2014). Ripening and post-harvest deterioration. In Sugarcane physiology, biochemistry and functional biology, ed. F.C. Botha and P.H. Moore, 55–84. New York: Wiley-Blackwell.

Vanegas, C. V., & Rodríguez, J. G. (2018). Aislamiento e identificación molecular de microrganismos asociados a la caña de azúcar (Saccharum officinarum) variedad CP 722086. Nexo, 31(01), 64-73.

Vasantha, S., Kumar, R. A., Tayade, A. S., Krishnapriya, V., Ram, B., & Solomon, S. (2021). Physiology of sucrose productivity and implications of ripeners in sugarcane. Sugar Tech, 1-17.

Vasantha, S., Shekinah, D. E., Gupta, C., & Rakkiyappan, P. (2012). Tiller production, regulation and senescence in sugarcane (Saccharum species hybrid) genotypes. Sugar Tech, 14, 156-160.

Velásquez Bustos, W. Y. (2017). Estudio comparativo de la producción artesanal e industrial de caña de azúcar en la vereda La Masata (Municipio de Villeta-Cundinamarca) y el Municipio de Corinto (Cauca).

Verma, I., Roopendra, K., Sharma, A., Jain, R., Singh, R. K., & Chandra, A. (2017). Expression analysis of genes associated with sucrose accumulation in sugarcane under normal and GA 3-induced source–sink perturbed conditions. Acta Physiologiae Plantarum, 39, 1-12.

Verma, K. K., Song, X. P., Verma, C. L., Malviya, M. K., Guo, D. J., Rajput, V. D., ... & Li, Y. R. (2021). Predication of photosynthetic leaf gas exchange of sugarcane (Saccharum spp) leaves in response to leaf positions to foliar spray of potassium salt of active phosphorus under limited water irrigation. ACS omega, 6(3), 2396-2409.

Walker BJ, Drewry DT, Slattery RA, VanLoocke A, Cho YB, Ort DR (2018) Chlorophyll can be reduced in crop canopies with Little penalty to photosynthesis. Plant Physiol 176(2):1215–1232.

Villegas, F., & Larrahondo, J. E. (2018). Control y características de maduración.

Vu, J. y Allen Jr.,(2009). “El crecimiento a niveles elevados de CO 2 retrasa los efectos adversos del estrés por sequía en la fotosíntesis de las hojas de la caña de azúcar C4”, Journal of Plant Physiology , vol. 166, núm. 2, págs. 107 y 116.

Wang, J., Nayak, S., Koch, K. y Ming, R. (2013). Partición de carbono en caña de azúcar (especies Saccharum). Frente. ciencia de las plantas 4:201. doi: 10.3389/fpls.2013.00201

Wang, Y., Bräutigam, A., Weber, A. P., & Zhu, X. G. (2014). Three distinct biochemical subtypes of C4 photosynthesis? A modelling analysis. Journal of experimental botany, 65(13), 3567-3578.

Wang, Y., Chan, K. X., & Long, S. P. (2021). Towards a dynamic photosynthesis model to guide yield improvement in C4 crops. The Plant Journal, 107(2), 343-359.

Wang LM, Shen BR, Li BD, Zhang CL, Lin M, Tong PP, Peng XX (2020) A synthetic photorespiratory shortcut enhances photosynthesis to boost biomass and grain yield in rice. Mol Plant 13(12):1802–1815.

Wang D, Gartung J (2010) Infrared canopy temperature of earlyripening peach trees under postharvest deficit irrigation. Agr Water Manage. 97:1.787–1.794.

Xu, F., Wang, Z., Lu, G., Zeng, R., & Que, Y. (2021). Sugarcane ratooning ability: research status, shortcomings, and prospects. Biology, 10(10), 1052.

Yokoyama, G., Ono, S., Yasutake, D., Hidaka, K. e Hirota, T. (2023) Cambios diurnos en las limitaciones estomáticas, mesófilas y bioquímicas de la fotosíntesis en fresas cultivadas en invernadero bien regadas Photosynthetica , 61 (1), 12-23.

Zhao, D., Glynn, N. C., Glaz, B., Comstock, J. C., & Sood, S. (2011). Orange rust effects on leaf photosynthesis and related characters of sugarcane. Plant Disease, 95(6), 640-647.

Zhao, D., & Li, Y. R. (2015). Climate change and sugarcane production: potential impact and mitigation strategies. International Journal of Agronomy, 2015.

Zhao, D., G. Barry y JC Comstock. (2013). Fotosíntesis de la hoja de caña de azúcar y caracteres de crecimiento durante el desarrollo del estrés por déficit de agua. Ciencia de cultivos 52: 1066–1075. https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.2135/cropsci2012.09.0554

Zhu, X. G., Long, S. P., & Ort, D. R. (2008). What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass?. Current opinion in biotechnology, 19(2), 153-159.

Zhu, X. G., Long, S. P., & Ort, D. R. (2010). Improving photosynthetic efficiency for greater yield. Annual review of plant biology, 61, 235-26.