



**UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO**

**FACULTAD CIENCIAS DE LA INGENIERIA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERO INDUSTRIAL**

**PROPUESTA PRÁCTICA DEL EXAMEN COMPLEXIVO**

**TEMA: DETERMINAR LA CAPACIDAD C4 EN LA CAÑA DE  
AZÚCAR DE LOS INGENIOS UBICADOS EN LA PROVINCIA DEL  
GUAYAS.**

**Autores:**

**FREIRE MURILLO KLÉBER ADRIÁN**

**MORALES LÓPEZ EDISON JOEL**

**Acompañante:**

**ING. JAVIER ALEXANDER ALCAZAR ESPINOZA**

**Milagro, Agosto 2017**

**Universidad Estatal de Milagro**

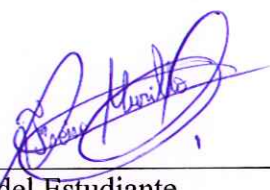
Presente.

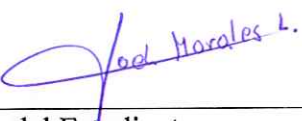
Nosotros, Freire Murillo Kléber Adrián, Morales López Edison Joel; en calidad de autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de la propuesta práctica de la alternativa de Titulación - Examen Complexivo, modalidad presencial, mediante el presente documento, libre y voluntariamente procedo a hacer entrega de la Cesión de Derecho del Autor de la propuesta practica realizado como requisito previo para la obtención de nuestro Título de Grado, como aporte a la Temática “DETERMINAR LA CAPACIDAD C4 EN LA CAÑA DE AZÚCAR DE LOS INGENIOS UBICADOS EN LA PROVINCIA DEL GUAYAS.” del Grupo de Investigación MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍAS RENOVABLES (GIMER) de conformidad con el Art. 114 del Código Orgánico de la Economía Social De Los Conocimientos, Creatividad E Innovación, concedemos a favor de la Universidad Estatal de Milagro una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Conservamos a mi/nuestro favor todos los derechos de autor sobre la obra, establecidos en la normativa citada.

Así mismo, autorizo/autorizamos a la Universidad Estatal de Milagro para que realice la digitalización y publicación de esta propuesta practica en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Los autores declaran que la obra objeto de la presente autorización es original en su forma de expresión y no infringe el derecho de autor de terceros, asumiendo la responsabilidad por cualquier reclamación que pudiera presentarse por esta causa y liberando a la Universidad de toda responsabilidad.

Milagro, a los 25 días del mes de Septiembre del 2017

  
Firma del Estudiante  
Nombre: Kléber Adrián Freire Murillo  
CI: 0941342230

  
Firma del Estudiante  
Nombre: Edison Joel Morales López  
CI: 0927314518

## APROBACIÓN DEL ACOMPAÑANTE DE LA PROPUESTA PRÁCTICA

Yo, Alcázar Espinoza Javier Alexander en mi calidad de acompañante de la propuesta práctica del Examen Complexivo, modalidad presencial, elaborado por los estudiantes Freire Murillo Kléber Adrián, Morales López Edison Joel; cuyo tema es: DETERMINAR LA CAPACIDAD C4 EN LA CAÑA DE AZÚCAR DE LOS INGENIOS UBICADOS EN LA PROVINCIA DEL GUAYAS, que aporta a la Línea de Investigación “Modelos de desarrollo local ajustados a los enfoques de la economía popular y solidaria; y sostenibilidad” previo a la obtención del Grado de Ingeniero Industrial; considero que el mismo reúne los requisitos y méritos necesarios en el campo metodológico y epistemológico, para ser sometido a la evaluación por parte del tribunal calificador que se designe, por lo que lo APRUEBO, a fin de que el trabajo sea habilitado para continuar con el proceso de titulación de la alternativa de Examen Complexivo de la Universidad Estatal de Milagro.

En la ciudad de Milagro, a los 14 días del mes de septiembre de 2017.



Ing. Alcázar Espinoza Javier Alexander  
CI: 120340464-3

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL CALIFICADOR

El tribunal calificador constituido por:

Alozar Espinoza Javier Alexander ; Hernandez Dominguez  
Carmen Sagorrio ; Denny William Moreno Castro.

Luego de realizar la revisión de la propuesta práctica del Examen Complexivo, previo a la obtención del título de INGENIERO INDUSTRIAL presentado por los señores FREIRE MURILLO KLÉBER ADRIÁN y MORALES LÓPEZ EDISON JOEL

Con el título:

“DETERMINAR LA CAPACIDAD C4 EN LA CAÑA DE AZÚCAR DE LOS INGENIOS UBICADOS EN LA PROVINCIA DEL GUAYAS.”


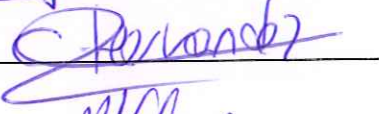

Otorga al presente la propuesta práctica del Examen Complexivo, las siguientes calificaciones:

MEMORIA CIENTÍFICA	[95]
DEFENSA ORAL	[ 5 ]
TOTAL	[100]
EQUIVALENTE	[50]

Emite el siguiente veredicto: (aprobado/reprobado) Aprobado.

Fecha: 25 de septiembre del 2017.

Para constancia de lo actuado firman:

	Nombres y Apellidos	Firma
Presidente	<u>JAVIER ALCAZAR ESPINOZA</u>	
Vocal 1	<u>CARMEN HERNANDEZ DOMINGUEZ</u>	
Vocal 2	<u>DENNY MORENO CASTRO</u>	

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto de investigación a mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo ellos los pilares fundamentales en mi vida, depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba han hecho que vea en ellos un ejemplo a seguir y destacar, no solo para mí, sino para mi hermano. También dedico este proyecto a mi esposa, mi compañera inseparable de cada día. Siendo ella mi gran esfuerzo.

*Kléber Adrián Freire Murillo*

A Dios, por permitirme llegar a este momento tan especial de mi vida. Por los triunfos y momentos difíciles que me han enseñado a valorarlos cada día más, a mis padres por ser las personas que me han ilustrado durante toda la trayectoria estudiantil. A mi esposa que ha brindado su apoyo incondicional y por compartir buenos y malos momentos. A mis profesores, gracias por su tiempo, su soporte, así como la sabiduría y experiencia que transmitieron sus conocimiento para el desarrollo de mi formación académica.

*Edison Joel Morales López*

## **AGRADECIMIENTO**

Siendo este proyecto el resultado del esfuerzo en conjunto con mi compañero de investigación Sr. Joel Morales. Por eso agradezco a Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad hasta ahora, a nuestro tutor de proyecto Ing. Javier Alexander Alcázar Espinoza, quien a lo largo de este plan estratégico para la culminación de una etapa de vida al haber puesto a prueba nuestras capacidades y conocimientos. También agradezco a mis padres quienes a lo largo de toda mi vida me han apoyado y motivado en mi formación académica, a mi hermano y mi esposa que creyeron en mí en todo momento y no dudaron de mis habilidades. A mis profesores a quienes les debo gran parte de mis conocimientos, gracias a su paciencia y enseñanza y finalmente un eterno agradecimiento a esta prestigiosa universidad la cual abrió y abre sus puertas a jóvenes como nosotros, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

*Kléber Adrián Freire Murillo*

En primer lugar, doy gracias a Dios por protegerme durante todo el camino y darme fuerzas para superar los obstáculos y dificultades que se me han presentado en la vida.

Agradezco también la confianza y el apoyo brindado por parte de mis padres que sin duda alguna en el trayecto de mi existencia me han demostrado su amor, corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos.

A mi esposa, que durante todos estos años de carrera ha sabido apoyarme para continuar y nunca renunciar a mis metas.

Al Ing. Javier Alexander Alcázar Espinoza por toda la ayuda brindada, durante la elaboración de este proyecto.

*Edison Joel Morales López*

## ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN DEL ACOMPAÑANTE DE LA PROPUESTA PRÁCTICA.....	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL CALIFICADOR.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE GENERAL .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN .....	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN .....	1
MARCO TEÓRICO.....	3
DESARROLLO .....	9
CONCLUSIONES .....	12
BIBLIOGRAFÍA .....	14

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.</i> ....	6
<i>Análisis comparativo de las características de las plantas C3, C4 y CAM</i> .....	6



## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Anatomía foliar de las plantas C4</i> .....	5
<i>Figura 2. Estrategia fotosintética de las plantas C4</i> .....	7
<i>Figura 3. Ruta C4</i> .....	8
<i>Figura 4. Ruta C4</i> .....	10

**TEMA:** “DETERMINAR LA CAPACIDAD C4 EN LA CAÑA DE AZÚCAR DE LOS INGENIOS UBICADOS EN LA PROVINCIA DEL GUAYAS”

### **RESUMEN**

El presente artículo tiene como finalidad determinar la capacidad C4 en el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en los ingenios Valdez y San Carlos ubicados en la provincia del Guayas, donde la variación climática determina los elementos y factores necesarios para que se genere una diferenciación en relación a su capacidad de adaptación al medio circundante. Ante aquello, la investigación planteada se ajusta a un diseño cualitativo, donde se estima valores relativos a la capacidad de transformar la energía lúmica en energía química, así como la tasa de fijación máxima de fotosíntesis neta que mantiene el cultivo, adicionando un contraste de los niveles de fotorrespiración, temperatura óptima, capacidad de fijación del  $CO_2$  existente en la atmósfera, el proceso de saturación a la luz, así como la relación de transpiración donde existe más desgastes de las moléculas de agua. Los resultados obtenidos a través del análisis contribuyen de manera efectiva al conocimiento general del proceso evolutivo de las plantas, las mismas que se han visto obligadas a adaptarse a los factores generados por el cambio climático, demostrando de esta forma los avances en biogenética para proveer variedades de cultivos que estimen mejores rendimientos productivos, los mismos que son relevantes para la fabricación de azúcar. En términos ambientales, el estudio hace referencia a los elevados niveles de contaminación y el efecto invernadero como consecuencia de la concentración de  $CO_2$  en la atmósfera, lo que implica un calentamiento paulatino de la superficie terrestre, es decir que el proceso de fijación de este elemento químico requiere de una evolución en la estructura orgánica de la planta para lograr un uso eficiente de las moléculas de agua, especialmente en zonas donde la exposición solar es más intensa, así como lo árido del terreno, lo que genera un proceso de fotosíntesis diferenciado, en especial del intercambio neto de  $CO_2$  entre el ecosistema y la atmosfera (NEE).

**PALABRAS CLAVES:** Capacidad C4, fotosíntesis, caña de azúcar, fotorrespiración.

**TITTLE:** “DETERMINE THE CAPACITY C4 IN THE SUGAR CANE MILLS LOCATED IN THE PROVINCE OF GUAYAS”

### **ABSTRACT**

This article are intended to determine the capacity C4 in the cultivation of sugar cane (*Saccharum officinarum*) in the ingenios Valdez and San Carlos, located in the province of the Western Cape, where the climatic variation determinalos elements and factors necessary to make a distinction in relation to its capacity of adaptation to the surrounding environment. At that, the research fulfils a qualitative design, where it is estimated values relative to the capacity to transform solar energy into chemical energy lumica, as well as the maximum rate of net photosynthesis that keeps growing, adding a contrast of the levels of fotorrespiracion, optimum temperature, capacity C4 existing CO<sub>2</sub> in the atmosphere, the process of saturation in the light, as well as the relationship of perspiration where there is more wear of the water molecules. The results obtained through the analysis contribute effectively to the general knowledge of the evolutionary process of the plants, the same ones that have been forced to adapt to the factors generated by climate change, demonstrating in this way the advances in biogenetics to provide varieties of crops that they deem best productive yields, which are relevant for the manufacture of sugar. In environmental terms, the study makes reference to the high levels of pollution and the greenhouse effect as a result of the concentration of CO<sub>2</sub> in the atmosphere, which implies a gradual warming of the earth's surface, that is to say that the process of fixing this chemical element requires an evolution in the organizational structure of the plant to achieve an efficient use of the molecules of water, especially in areas where sun exposure is more intense, as well as arid terrain, which generates a process of photosynthesis differential treatment, in particular the net exchange of] [CO<sub>2</sub> between the ecosystem and the atmosphere (SEN).

**Keywords:** Capacity C4, photosynthesis, sugar cane, fotorrespiracion.

## INTRODUCCIÓN

El presente artículo tiene como finalidad analizar la capacidad C4 en la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) que poseen los cultivos de los ingenios azucareros pertenecientes a la provincia del Guayas, tomando en consideración, la relevancia que tiene su producción para el consumo nacional. Bajo este contexto, es importante mencionar la capacidad que tiene la planta para la biomasa y la producción de sacarosa, constituyéndose como un elemento significativo para las energías renovables y el cambio de la matriz productiva que forma parte de las políticas Estatales.

La demanda energética a nivel mundial se encuentra en los niveles más altos de consumo, cuya perspectiva continúa en ascenso, lo que implica, la necesidad de buscar fuentes de energías sostenibles que suplan el uso tradicional de combustibles fósiles, que para muchas zonas a nivel mundial están acabando con los últimos yacimientos, los mismos que han generado una serie de problemas de índole ecológico-ambiental.

En el Ecuador, son muchos los ingenios que mantienen una productividad efectiva del cultivo de la caña de azúcar, que gracias al nivel eficiente de sacarosa era destinada como materia prima para la elaboración de azúcar en primera instancia. Con el pasar de los años, la demanda energética y la constante incorporación de tecnología en sus procesos productivos exigieron una diversidad en su productividad, donde la materia prima era utilizada como fuente de bioelectricidad obtenida con la quema del bagazo, así como para la obtención de combustible líquido o etanol a partir de la melaza (Black, Verhoef, Cuadra, Osborne, & Van Den Hoof, 2012).

Ante aquello, la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es una planta inherente a las especies C4, la misma que refleja un metabolismo capaz de capturar  $CO_2$  muchos más eficiente que otros cultivos, así como su eficacia en el uso del agua. Debido a esto, es uno de los elementos a considerar es su capacidad de rendimiento productivo, los mismos que fluctúan entre las 80 y 120 t/ha y que depende de diversos factores ambientales, entre los que se encuentran el clima y la altura sobre el nivel del mar (Baldocchi, 2012).

En la provincia del Guayas, la productividad de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es de gran relevancia, no solo por el hecho de aportar positivamente al desarrollo eficiente del sector agroindustrial, sino por su intervención activa en la capacidad para generar empleo, así como los suplementos caloríficos que forman parte de la dieta humana, elaboración de alcohol, bioelectricidad, entre otras, lo que implica la necesidad de mejorar su rendimiento

productivo estimado en toneladas por hectáreas, por lo que el presente artículo estima el análisis de la capacidad y conversión fotosintética de la planta (C4) inducida a través del mejoramiento de carácter genético convencional.

Ante aquello, es preciso mencionar el mecanismo fotosintético tipo C4 que posee la planta para lograr una fijación eficiente del  $CO_2$  atmosférico, donde se estima una incidencia específica de las características del suelo en relación a la cantidad de Carbono que éste posee, por ejemplo, los suelos cultivados donde se realiza la quema de canteros poseen menores niveles de Carbono en comparación donde no se lleva a cabo esta actividad, lo que implica una concentración efectiva del suelo en relación a este componente, situación que repercute directamente en la productividad de sacarosa en la planta (Cadena Iñiguez, 2015).

Debido a esto, la planta de la caña de azúcar ha logrado adaptarse de manera paulatina a la naturaleza y los efectos del cambio climático, permitiéndole desarrollar de manera efectiva su capacidad para asimilar el  $CO_2$  de la atmósfera e incorporarlo a su metabolismo fotosintético como parte de la modificación del *genoma*. Cabe recalcar, que la planta de caña de azúcar tipo C4 logra utilizar el agua de manera más eficiente, conservando la humedad del suelo a una temperatura de 30° C, por lo que llega a perder alrededor de 277 moléculas de  $H_2O$  por cada  $CO_2$  fijada (Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador, 2016).

Por otro lado, el contenido del artículo demuestra la importancia del efecto invernadero para la dotación de la energía calorífica que emite la corteza terrestre, la misma que absorbida y transmitida por la variedad de gases que conforman la atmósfera terrestre, impidiendo de ésta manera el enfriamiento de carácter progresivo de la tierra, notándose un incremento paulatino de éstos gases en los últimos años limitando a la naturaleza a realizar una equiparación eficiente de éstos gases. Sin embargo, el  $CO_2$  mantiene una relevancia debido a su efecto generado sobre las condiciones climáticas presentadas en la naturaleza por su larga permanencia en el medio (Chueca Sancho, 2014).

La capacidad C4 que poseen las plantas para captar el  $CO_2$  de la atmósfera a través de los procesos fotosintéticos, permite el incremento de los niveles de sacarosa necesarios para su normal desarrollo, lo que demuestra el proceso transformativo del  $CO_2$  inherente en la atmósfera en biomasa, de ahí la importancia del presente artículo como aporte al conocimiento práctico en temas relacionados a la agroindustria.

## MARCO TEÓRICO

### Antecedentes del cultivo

La producción de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en el Ecuador representa el 1,4% del Producto Interno Bruto (PIB), lo que genera alrededor de 30.000 empleos de carácter directo y, miles de empleos indirectos especialmente en temporada de cosecha comprendida entre los meses de julio a diciembre. Ante aquello, el producto final obtenido del procesamiento efectivo de la caña de azúcar es utilizado como un endulzante de origen natural conocido como azúcar, el mismo que se encuentra acumulado en su tallo y es determinado como el nivel de sacarosa que posee la planta (Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador, 2016).

Según Davidse, Sousa Sánchez, & Chate A. (2016) manifiesta que:

El cultivo de la caña de azúcar es favorable en zonas tropicales o subtropicales, cuyas necesidades germinativas y reproductivas requiere de agua y suelos adecuados para su crecimiento, donde una de sus principales características lo marca su capacidad para asimilar de manera eficiente la radiación solar marcada en un 2% a la conversión de la energía incidente en biomasa (p. 123)

Ante aquello, dentro de los parámetros productivos, la estimación de los cultivos se encuentra establecida en una producción estimada entre las 100-150 toneladas métricas de caña por hectáreas anual, cuyo nivel de sacarosa fluctúa entre el 14 a 17%, mientras que su fibra se fija en 14 a 16% y el 2% para otros productos solubles (Procaña, 2013)

El cultivo de la caña requiere de un flujo constante de agua, donde el período de crecimiento se encuentra establecido entre los 11 a 17 meses, donde el factor variedad tiene un grado de significancia específico, ya sea para la producción o ciclo de cultivo. En el Ecuador, aproximadamente existen 110.000 ha destinadas al cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), entre las cuales, 74.100 ha son destinadas a la producción de azúcar y el restante a la fabricación de panela, ya sea de manera artesanal o agroindustrial (Pilco Sarmiento, 2014, pág. 145).

Durante mucho tiempo, la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) se ha convertido en un cultivo de carácter Agroindustrial que ha sufrido múltiples transformaciones, adaptándose de manera paulatina y eficiente a los condicionamiento de carácter climático y social productivo, tal es así, que la producción a nivel nacional alcanza un indicador máximo de 10 millones de

sacos anuales, donde apenas el 10% de dicha productividad es destinada al consumo interno, convirtiéndose en un producto de exportación de gran relevancia, situación que ha obligado a las empresas productoras de azúcar y sus derivados a realizar estudios que permitan la eficiencia del cultivo en toneladas métricas (Dolman, Maximov, & Moors, 2013).

Bajo estas perspectivas, el análisis de la capacidad C4 en los cultivos de las plantas de caña de azúcar se convierte en un elemento importante a ser tratado con relativa prudencia dentro de los aspectos de biotecnologías y ciencias genómicas, constituyéndose en un desafío que permite el desarrollo de las estrategias orientadas al mejoramiento progresivo de la eficiencia en la complejidad del genoma, y que se relaciona con la cantidad de genes que posee la especie (Cadena Iñiguez, 2015, págs. 12,13).

De manera general, los cultivos de las plantas C4, entre las que se encuentra la caña de azúcar son muy utilizados para la obtención de biocombustibles, situación que genera una serie de factores de caracteres socio-económicos y medioambientales de gran significancia por la complejidad en cada uno de los procesos productivos. Ante aquello, este tipo de cultivo tiene la capacidad de asimilar grandes cantidades de  $CO_2$  de la atmósfera, para ser utilizado en su proceso de fotosíntesis (Davidse, Sousa Sánchez, & Chate A., 2016).

Bajo este contexto, el proceso de asimilación del  $CO_2$  atmosférico que realiza la planta de caña de azúcar beneficia en gran medida a disminuir los niveles de Dióxido de Carbono que se encuentra en el medio, producto de la contaminación ambiental y efecto invernadero que en la actualidad afecta al mundo entero en general. De ahí que, a través del proceso de fotosíntesis C, la planta logra hacer uso de *ribulosa-1,5- bisfosfato carboxilasa/oxigenasa*, considerándose necesarios cuando la temperatura del medio es elevada y la intensidad de la luz se encuentra fuera de los niveles normales, acompañado de un terreno árido y de condiciones ambientales hostiles, la *Rubisco* hace su intervención por su gran capacidad de distinguir el  $O_2$  del  $CO_2$  que da como resultado una mínima capacidad fotosimétrica y gasto de energía inútil como producto del proceso de fotorrespiración que normalmente realizan las plantas (Chueca Sancho, 2014).

El proceso evolutivo de la planta de caña de azúcar del  $C_3$  a  $C_4$  a través del tiempo, evidencia su capacidad de adaptación al medio, donde los factores de intensidad de la luz, los ambientes áridos, cuya temperatura es elevada les permite aprovechar de manera eficiente el uso del agua, así como del nitrógeno que han generado los cambios ambientales, situación que disminuye el aprovisionamiento del  $CO_2$  (Dunn & Wofsy, 2012).

Este tipo de planta con capacidad C4, tiene una capacidad muy marcada dentro del campo fotosintético, ya que puede trabajar a temperaturas que oscilan entre 30° C - 40°C, proceso mediante el cual se obtiene un mayor nivel de sacarosa, considerado como el producto final de la fotosíntesis (Foken, 2012).

Según (Black, Verhoef, Cuadra, Osborne, & Van Den Hoof, 2012) en su estudio sobre *Metabolismo Genético* menciona que: “la adecuada abertura de los estomas que se efectúa para el proceso de fijación del  $CO_2$  durante la fotosíntesis genera una pérdida paulatina de agua en la planta”, situación que se presentan especialmente en terrenos áridos. Ante este déficit las plantas han logrado desarrollar una serie de adaptaciones de carácter metabólico y anatómico que les ha permitido mejorar el uso eficiente del  $H_2O$ -EUA.

Bajo este contexto, el EUA logra determinar el nivel de carbono implícito en cada unidad de  $H_2O$  que es obtenida a través de la transpiración, por consiguiente el metabolismo fotosintético C4 en determinadas plantas mejora su proceso de adaptación en ambientes áridos, cálidos y secos, donde el  $CO_2$  logra llegar a las células *mesófilas*, fijándose en la enzima *fosfoenolpiruvato* (PEP), cuya característica estima un nivel de afinidad por el  $CO_2$  que la enzima *Rubisco* (Jones, 2013).

Posterior a la fijación del  $CO_2$  esta logra convertirse en *malato* y *aspartato* que pasa a las células vaina donde son transformadas en  $CO_2$  como resultado de la secuencia de Calvin. Por consiguiente, estas plantas carecen del proceso de fotorrespiración o se efectúa en cantidades mínimas por su elevado nivel de concentración de  $CO_2$  en la células vaina, situación que requiere un mayor nivel de EUA, ya que se fija mayor C por molécula de  $CO_2$ . Resulta importante mencionar, que las plantas tipo C4 mantienen de manera frecuente un mayor desgaste energético como resultado de la producción extra de enzimas PEP, logrando una compensación efectiva con un mayor nivel de EUA, situación que favorece el crecimiento y eficacia al proceso fotosintético sujeto a temperaturas elevadas (Martens, 2014).

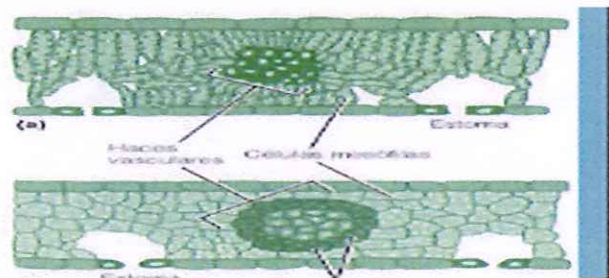


Figura 1. Anatomía foliar de las plantas C4.

Fuente: Introducción a la Botánica, (2013)



Cabe mencionar, que en las plantas tipo C4 el proceso de fijación  $CO_2$  se realiza en el día como parte de la fotosíntesis generada en la adquisición de los rayos solares y altas temperaturas por molécula de  $H_2O$  transpirada en contraste con las plantas que presentan una separación temporal del  $CO_2$  en vez de física, abriendo los estomas durante la noche, a la vez que permite la salida del agua, estableciendo características propias de las plantas C4 (Nieveen, 2013).

Tabla 1.

Análisis comparativo de las características de las plantas C3, C4 y CAM

Características	C3	C4	CAM
EUA (g $CO_2$ por kg $H_2O$ )	1-3	2-5	1-8
Frecuencias estomática (estomas $[mm]^2$ )	40-300	<160	10-40
Tasa transpiración ( $[g/g]^{-1} s^{-1}$ )	450-900	250-350	45-55
Tasa crecimiento relativo ( $[g/g]^{-1} d^{-1}$ )	5-20	30-50	0-0,5
Temperatura óptima ( $^{\circ}C$ )	15-25	25	>30
Fotorrespiración	Hasta 40%	Muy pequeña o inexistente	Difícil de estimar

Fuente: (Black, Verhoef, Cuadra, Osborne, & Van Den Hoof, 2012)

Desde las perspectivas alimentarias, el rendimiento de los cultivos se convierte en uno de los problemas que afronta la población a nivel mundial, debido al incremento en el consumo de alimentos, de ahí que los estudios en el ámbito del proceso fotosintético y biotecnología toma gran relevancia para generar un incremento paulatino en el rendimiento de los cultivos, especialmente en la caña de azúcar (Taiz & Zeiger, 2014).

Debido a esto, la idea de aumentar los niveles de la tasa de fotosíntesis cobra gran relevancia como estrategia en el incremento productivo en los cultivos, situación que genera una dependencia implícita de la fotosíntesis con los factores del entorno que inciden de manera negativa o positiva en su productividad. Debido a esto, los factores externos a considerar son la luz solar, el nivel de  $CO_2$  en el medio, la temperatura, nutrientes  $O_2$ , agua y humedad

relativa en el ambiente. Mientras que los factores internos abarcan la actividad de *rubisco*, contenido específico de clorofila, durabilidad del verde de la hoja, senescencia (Taiz & Zeiger, 2014).

Bajo este contexto, las plantas categorías C4 requieren mecanismos especializados que implica un costo elevado de energía que permite la adecuada concentración y transportación del  $CO_2$  donde se lleva a cabo la fijación de la enzima *rubisco*, donde la disponibilidad de agua es mínima. Ante aquello, el cultivo de caña de azúcar como categoría C4 ha generado una estrategia que logra minimizar el déficit de agua como resultado de la fotorrespiración.

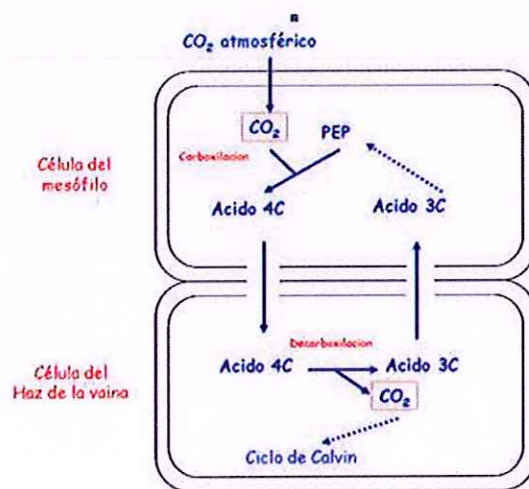


Figura 2. Estrategia fotosintética de las plantas C4.

Fuente: Introducción a la Botánica, (2013)

Sin lugar a dudas, los factores generados por el cambio climático ha provocado un déficit en el aprovisionamiento de agua en las plantas, así como el aumento de la temperatura ambiental, situación que obliga a un proceso adaptativo de los cultivos, en especial de la caña de azúcar, por lo que estas condiciones climáticas incide en el cierre de los estomas que impide la pérdida de agua, situación que dificulta el proceso de fotosíntesis limitando la penetración del de  $CO_2$  en las hojas (Pereira, 2013).

Dentro del análisis del proceso fotosintético en las plantas C4, donde la caña de azúcar forma parte se establece la ruta C4 que enlaza al  $CO_2$  con compuestos de cuatro carbonos que logra un enlace con el dióxido de carbono perteneciente al ciclo Calvin que se produce en las células envoltantes inherentes al haz visible que encierra a cada nervio, por otro lado las

células del mesófilo son las encargadas de generar la ruta C<sub>4</sub>, cuyo aporte de carbono logra su incurción en el ciclo C<sub>4</sub>.

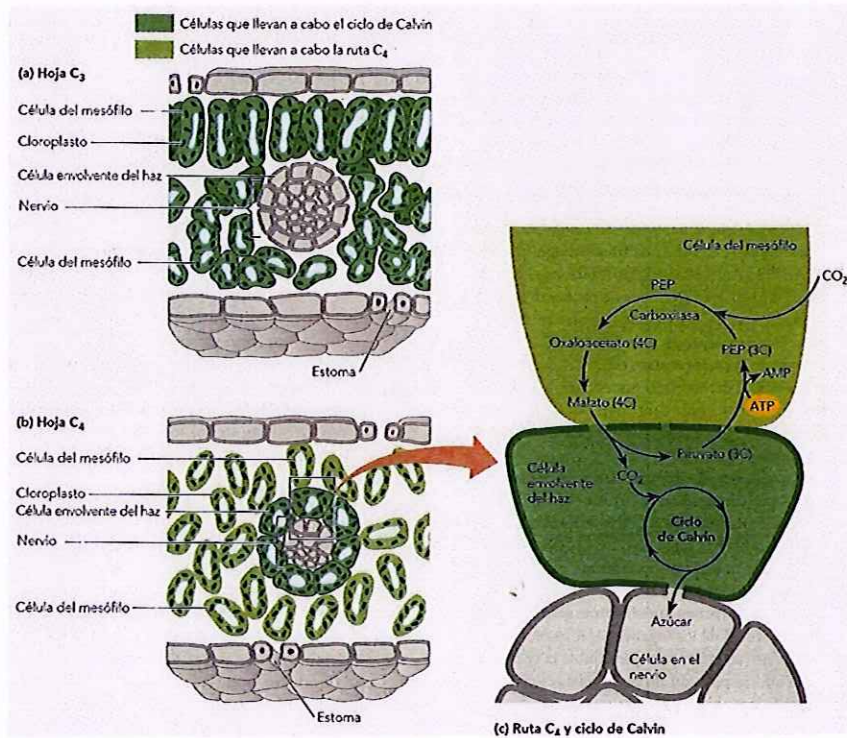


Figura 3. Ruta C<sub>4</sub>

Fuente: Introducción a la Botánica, (2013)

La ruta C<sub>4</sub>, se encuentra inmersa entre las 19 familias de plantas con flores, así como en diversos cereales y gramíneas a nivel mundial, lo que implica una posibilidad eficiente de estas plantas para fijar el CO<sub>2</sub> existente en el medio como resultado del efecto invernadero y los factores del cambio climático, lo que ha obligado a una evolución constante y adaptación al medio circundante.

## DESARROLLO

La planta de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) pertenece al grupo de plantas C4, la misma que es cultivada en gran medida por los Ingenios azucareros existentes en el Ecuador, tal es así, que en la provincia del Guayas, especialmente en el Cantón Milagro y Crnel. Marcelino Maridueña se cimentan como una fuente de empleo y productividad los Ingenios Valdez y San Carlos respectivamente, cuyo proceso agroindustrial para la obtención de quintales de azúcar tiende a variar en cada etapa de cosecha, conocida también como *Zafra* comprendida entre los meses de junio a diciembre.

La caña de azúcar, además de convertirse en materia prima para estas fábricas agroindustriales derivadas a la obtención de azúcar de consumo humano, es considerada como una fuente para la obtención de biocombustible y otras áreas de aplicación. Ante aquello, es imprescindible hacer énfasis en su capacidad para asimilar el carbono existente en el entorno a través del proceso de la fotosíntesis, situación que conlleva a incorporarlo en su estructura y generar grandes reservas que le permite afrontar las variantes del ecosistema actual, el mismo que está sometido a los cambios climáticos producto del calentamiento global.

Desde las perspectivas generales, el aporte de las plantas C4 por su gran capacidad para fijar el  $CO_2$  existente en el medio, contribuye a un balance global de este elemento químico que se encuentra en grandes cantidades como resultado de la contaminación ambiental, que de manera progresiva ha ido deteriorando el ecosistema, exigiendo de una adaptabilidad más efectiva de las plantas a su entorno natural en relación al déficit de agua.

Ante aquello, resulta importante realizar un análisis comparativo en la capacidad de retención de  $CO_2$  que mantienen los cultivos de ambas empresas agroindustriales y su proceso de intercambio neto de  $CO_2$  entre los elementos del ecosistema, donde se relaciona el suelo, la planta y atmósfera, conocido también como NEE debido a sus siglas en inglés.

Para aquello, es necesario considerar los factores climáticos en el que se encuentran ubicadas ambas fábricas; de ahí que, según el informe anual presentado por el laboratorio químico del consorcio Nobis, (2016), el cantón Milagro presenta una temperatura promedio de 25 a 29 °C, cuyo niveles de precipitación alcanza los 1.248  $mm^3$  de agua y su capacidad de evaporación anual se ubica en los 1256,7  $mm^3$ , por lo que existen etapas bien definidas durante el año, las mismas que determinan las épocas de invierno y verano, donde los factores antes mencionados tienden a variar.

Por su parte, el cantón Crnel. Marcelino Maridueña presenta una temperatura promedio que oscila entre los 24 a 28 °C, mientras que su precipitación anual se ubica en los 1700  $mm^3$  y su capacidad de evaporación fluctúa entre los 1100  $mm^3$ , factor primordial para la retención de la humedad en el medio, lo que implica dentro del análisis de la capacidad C4 que presentan los cultivos de ambas empresas, el Ingenio Valdez afronta una mayor exigencia para retener la humedad en sus cultivos debido a los elementos de precipitación de agua lluvias en relación al del Ingenio San Carlos, situación que exige de un proceso de fijación del  $CO_2$  en forma óptima por parte de las plantas de caña de azúcar, factor importante para la producción de sacarosa.

Sin lugar a dudas la capacidad C4 de la planta de caña de azúcar forma parte de las respuestas de los cultivos ante los factores ambientales como resultado del cambio climático, lo que implica mejorar de manera paulatina su proceso de fotosíntesis donde se lleva acabo el almacenamiento de energía. Bajo este contexto, el análisis de laboratorio presentado sobre la capacidad C4 de los cultivos de caña de azúcar en estas empresas demuestra una serie de procesos complejos que forman parte del fotosistema I (PSI) y fotosistema II (PSII) donde se origina el almacenamiento efectivo de la energía en las plantas.

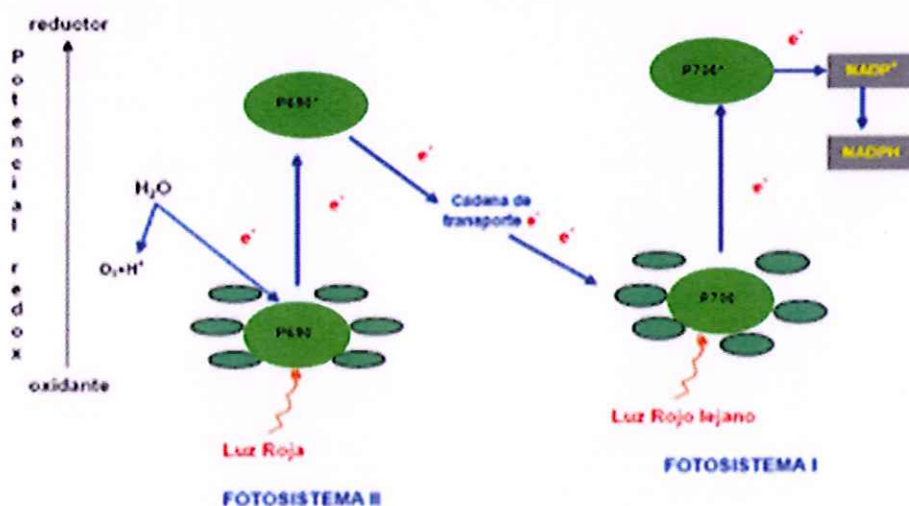


Figura 4. Ruta C4

Fuente: Análisis de la estructura básica y reacciones básicas de los fotosistemas I y II en el cultivo de la caña de azúcar.

Como es notorio, en la figura 4, el PSI logra una absorción de la luz del rojo lejano en un nivel de 700 nm, cuya longitud de onda es superior a los 680 nm que reduce el NADP y genera un oxidante muy débil, en comparación al PSII, donde la absorción del rojo lejano

alcanza los 680 nm, generando un oxidante mucho más fuerte. Debido a esto, la capacidad C4 que se presentan en las variedades de caña que poseen los ingenios demuestran una adaptación efectiva a su medio, ya que los niveles de concentración del  $CO_2$  en su entorno tiende a variar, así como la de los otros gases que provoca el calentamiento de la atmósfera, siendo más promisorio en el cantón Milagro.

Para el cálculo del proceso de fotosíntesis II, donde la planta de caña de azúcar logra aprovechar la energía lúmica y transformarla en energía química mejorando su proceso de fijación de carbono, es imprescindible aplicar la siguiente ecuación:



A partir de éste cálculo fotosintético se comprueba que la caña de azúcar del Ingenio Valdez como tipo C4 logra utilizar de manera más efectiva la energía y el proceso de fijación del  $CO_2$ , ya que hace uso mínimo de nitrógeno y agua debido a su capacidad evolutiva fotosintética en comparación a las plantaciones del Ingenio San Carlos, donde las condiciones climáticas representan un mayor grado de humedad, de ahí que la exigencia de fijación del  $CO_2$  es mínimo, así como en el uso del agua, situación que se ve reflejada en la productividad de sacarosa necesaria para la obtención del azúcar.

Para estimar el intercambio neto del  $CO_2$  (NEE) de la planta con el medio ambiente, es necesario aplicar la siguiente ecuación:

$$NEE = FCO_2 + \frac{\Delta\rho CO_2}{\Delta t} * \Delta t$$

Donde la aplicación efectiva del método de eddy logra determinar el flujo del  $CO_2$ , durante el ciclo fotosintético que determina la adecuada fijación del  $CO_2$  por parte de la planta y su eficiencia de adaptación al medio, teniendo que los intervalos obtenidos entre ambas plantaciones fue de  $26,23 \mu mol CO_2 m^{-2} S^{-1}$ , así como la capacidad de liberación en horarios de espiración nocturna alcanza los  $7,30 \mu mol CO_2 m^{-2} S^{-1}$ , por lo tanto el NEE en los cultivos de caña en horarios diurnos son más efectivos en el Ingenio Valdez, ya que no existe una precipitación constante de agua debido a su condición climática propia de la zona, notándose una mayor efectividad en su proceso de fotosíntesis y fijación del  $CO_2$  a su estructura orgánica, dando origen la ruta C4.

## CONCLUSIONES

El contraste de fijación del  $CO_2$  por parte de las plantaciones de caña de azúcar entre los Ingenios Valdez y San Carlos tienden a variar debido a la humedad del medio, así como a las frecuencias de las precipitaciones atmosféricas, por lo que la capacidad C4 de esta es diferenciada ante el nivel de exigencia al uso de las moléculas de agua generadas por el proceso fotosintético y la exposición a la luz solar, situación que permite un adecuado almacenamiento de energía que genera una elevada producción de sacarosa, elemento primordial para la fabricación de azúcar.

En lo referente a la temperatura de fijación, el cultivo en el Ingenio Valdez se efectúa en un ambiente que oscila entre los 25-29 °C, mientras que en el Ingenio San Carlos se ubica entre los 24-26 °C como consecuencia de la humedad existente en la zona. De la misma forma, se estima un grado de saturación a la luz solar por su exposición directa en ambos cultivos, de ahí que su relajación de transpiración en el Ingenio Valdez alcanza los  $255-350 \frac{g \text{ de } H_2O}{g \text{ de MS}}$ , mientras que las plantaciones del Ingenio San Carlos se ubican en  $225-290 \frac{g \text{ de } H_2O}{g \text{ de MS}}$ .

Bajo este contexto, el análisis logra determinar que la producción de materia seca que generan los cultivos de caña de azúcar entre ambos ingenios como elementos de biomasa orientadas a la fuentes renovables se ubican en un 38,6 +- de productividad, es decir que la fibroicidad de las plantaciones C4 es óptima.

De la misma forma, los resultados demuestran que la caña de azúcar como elemento de las plantas tipo C4 no presentan un proceso de fotorrespiración muy marcado, lo que implica el uso eficiente del agua dentro del ciclo de calvin C4.

Por otro lado, los cultivos de las empresas agroindustriales estudiadas muestran una tasa máxima de fotosíntesis neta que se ubica entre los 40 a 70 mg de  $CO_2$  / dm hoja/hora.

Debido a los cambios climáticos, el proceso de fijación del  $CO_2$  es de gran relevancia para que las plantas de caña de azúcar logren adaptarse al medio hostil, donde el déficit de agua, así como la elevada temperatura atmosférica implica un proceso de fotosíntesis más riguroso.

Se estima que el proceso de fotorrespiración en los cultivos de ambos ingenios durante la noche es imperceptible, lo que genera una característica propia de las plantas capacidad C4,

cuyo valor integrado diurno promedia entre las 07:00 am hasta las 18:30 pm donde aún se reflejan los rayos solares como elemento necesario de fotosíntesis y transformación de energía lúmica en química.



## BIBLIOGRAFÍA

- Baldocchi, D. (2012). *Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems*. Global Change.
- Black, E. V., Verhoef, A., Cuadra, S. V., Osborne, T., & Van Den Hoof, C. (2012). *Cultivating C4 crops in a changing climate: Sugarcane in Ghana*. Bogota: Pearson.
- Cadena Iñiguez, J. (2015). Control en el cultivo de caña de azúcar. *Agro Productividad*, 12,13.
- Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador. (2016). *Informe Anual 2014*. El Triunfo: Ediciones CINCAE. Obtenido de Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador: <http://cincae.org/wp-content/uploads/2013/04/Informe-Anual-2014.pdf>
- Chueca Sancho, A. (2014). *C4 y CAM. Características generales y uso en programas de desarrollo*. Madrid: Ediciones Pearson.
- Davidse, G., Sousa Sánchez, M., & Chate A., O. (2016). *Catálogo taxonómico de especies*. México: Timber Press.
- Dolman, A., Maximov, E., & Moors, E. (2013). *Net ecosystem exchange of carbon dioxide and water of far eastern Siberian Larch (Larix cajanderii) on permafrost*. Biogeosciences .
- Dunn, A. L., & Wofsy, C. (2012). *A long-term record of carbon exchange in a boreal black spruce forest: means responses to interannual variability, and decadal trends*. Global Change Biol.
- Foken, T. (2012). *The energy balance closure problem: an overview*. Ecol. Appl.
- Ham, J. M., & Heilman, J. (2014). *Experimental test of density and energy-balance corrections on carbon dioxide flux as measured using open-path Eddy covariance*. Agron.
- Jones, H. G. (2013). *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Cambridge, University.

- Loescher, H. W. (2014). *Environmental controls on net ecosystem-level carbon exchange and productivity in a Central America tropical wet forest*. *Global Change Biol.*
- Martens, C. (2014). *Radon fluxes in tropical forest ecosystem of Brazilian Amazonia: night-time CO<sub>2</sub> net ecosystem exchange derived from random and eddy covariance methods*. *Global Change Biol.*
- Medrano, H. (2014). *Regulation of photosynthesis of C<sub>3</sub> plants in response to progressive drought: stomatal conductance as a reference parameter*. *Annals Bot.*
- Moureaux, C. (2015). *Annual net ecosystem carbon exchange by a sugar beet crop*. *Agric. For. Meteorol.*
- Nieveen, P. J. (2013). *Carbon exchange of grazed pasture on a drained peat soil*. *Global Change Biol.*
- Pereira, J. S. (2013). *Net ecosystem carbon exchange in three contrasting Mediterranean ecosystems—the effect of drought*. *Biogeosciences*.
- Pilco Sarmiento, J. (2014). *La caña de azúcar en Ecuador*. Loja: Ediciones del Agro.
- Procaña. (2013). *Historia de la Caña de Azúcar*. Obtenido de Procaña: <http://www.procana.org/new/estadisticas/historia-de-la-ca%C3%B1a-de-azucar.html>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2014). *Plant physiology*. Sunderland: Sinauer Associates.