



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE LOS RECURSOS NATURALES**

**“ANÁLISIS DEL EFECTO DE FERTILIZACIÓN EN LA PIÑA  
DEBIDO AL INCREMENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN  
LA ATMÓSFERA”**

**TESIS**

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL  
GRADO DE:**

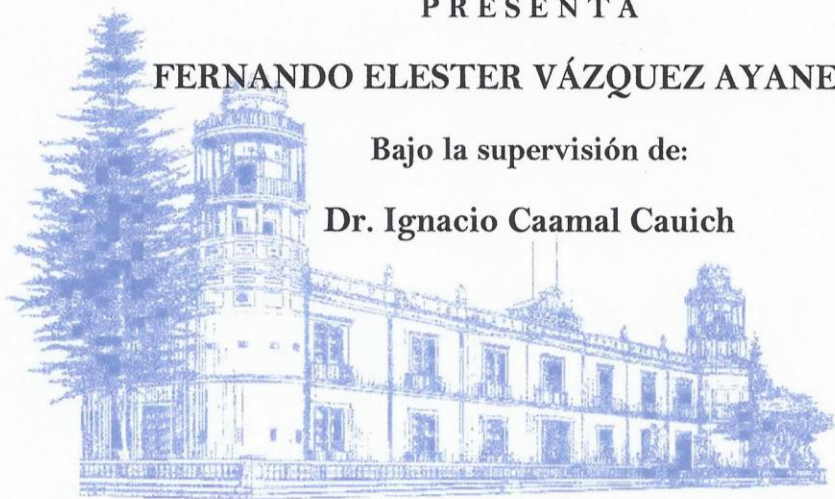
**MAESTRO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y  
DE LOS RECURSOS NATURALES**

**PRESENTA**

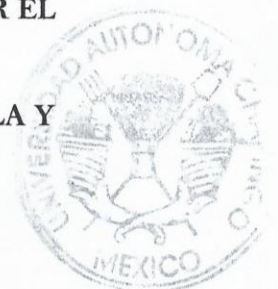
**FERNANDO ELESTER VÁZQUEZ AYANEGUI**

**Bajo la supervisión de:**

**Dr. Ignacio Caamal Cauich**



**CHAPINGO, EDO DE MÉXICO, DICIEMBRE DE 2019.**



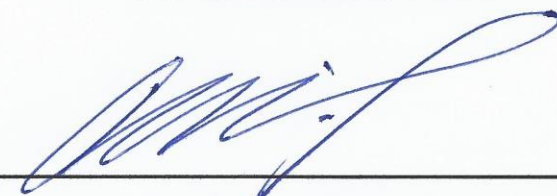
DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES  
SECRETARÍA DE EXÁMENES PROFESIONALES



**ANÁLISIS DEL EFECTO DE FERTILIZACIÓN EN LA PIÑA  
DEBIDO AL INCREMENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN LA  
ATMÓSFERA**

Tesis realizada por **FERNANDO ELESTER VÁZQUEZ AYANEGUI** bajo la supervisión del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE LOS  
RECURSOS NATURALES**



---

**DIRECTOR: DR. IGNACIO CAAMAL CAUICH**



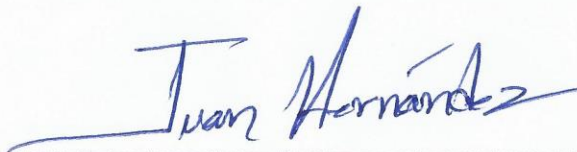
---

**ASESOR: DR. CRISTÓBAL MARTÍN CUEVAS ALVARADO**



---

**ASESOR: DRA. PAT FERNANDEZ VERNA**



---

**ASESOR: DR. JUAN HERNÁNDEZ ORTIZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, me gustaría agradecerle a ti Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porqué hiciste realidad este sueño tan anhelado.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por darme la oportunidad de estudiar y realizar un posgrado, gracias por la ayuda y confianza en mí depositada.

A mis profesores por el tiempo y esfuerzo que dedicaron a compartir sus conocimientos, sin su instrucción profesional no habría llegado a este nivel. Quienes brindaron dedicación al impartir su cátedra de tal forma que lo aprendido sea utilizado en la vida real, por el apoyo brindado, gracias.

A mi director de tesis, Dr. Ignacio Caamal Cauich por su esfuerzo y dedicación, quien, con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en mí que pueda concluir mis estudios con éxito.

A mi asesor, Dr. Cristóbal Cuevas Alvarado por su asesoría siempre dispuesta, sus ideas y recomendaciones respecto a esta investigación.

A mis compañeros de la maestría generación 2017-2019, Jesdel, Ilich, Ivan, Kryzthian, Salvador, Chuy, Angélica, Jonatan, David, Yira, Luz, Thalía, Rebeca, Miguel, Mayra, Andrea, Miriam, Brenda, Yolima, Vanesa, Verónica, Luévano y Victoria por su gran ayuda cuando me enfrentaba a ciertos problemas, a todos ellos les deseo el mejor de los éxitos.

Al personal administrativo del posgrado especialmente a las secretarías Rosario y Mirna, las cuales me han motivado durante mi formación profesional.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones, a todos ellos de verdad muchas gracias y que Dios me los bendiga.

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Abigail, mi hermosa esposa,  
por su apoyo incondicional en todas mis decisiones; su  
tiempo, aliento y cariño siempre presente,  
a Christopher Johann, mi amado hijo, con quien  
comparto la aventura de crecer y aprender todos los días.

A Dany, Liliana y Ulises, mis hermanos  
por su comprensión y cariño,  
a mi compadre Raúl y a mi padre Fernando,  
quienes de diferentes maneras plasmaron en mi  
la inquietud y el gusto por el conocer y hacerme preguntas,  
y sobre todo a Rosita, mi madre, por ser un gran  
ejemplo de esfuerzo y de lucha.

A mis amigos presentes y pasados, quienes sin  
esperar nada a cambio compartieron sus conocimientos,  
alegrías y tristezas.

Con todo mi afecto  
Fernando Elester Vázquez Ayanegui

## DATOS BIOGRÁFICOS

### Datos personales

**Nombre:** Fernando Elester Vázquez Ayanegui

**No. De cartilla militar:** C-8373884

**Curp:** VAAF860325HCSZYR03

**Profesión:** Ingeniero Agroindustrial

**Cédula Profesional:** 9999518



### Reseña personal

Fernando Vázquez nace el 25 de marzo de 1986 en Venustiano Carranza, Chiapas, hijo de Fernando Vázquez Ruíz y Rosita Ayanegui Méndez, ambos campesinos.

En el año 2001 tras terminar la secundaria, ingresa al CBTa 46 de su localidad en donde solamente cursa el primer año y se da de baja definitiva para así en 2002 ingresar a la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, posteriormente en 2005 ingresa a la licenciatura de la misma Universidad con especialidad en Ingeniería Agroindustrial y concluye sus estudios en 2009.

A lo largo de su vida académica siempre destacó como un líder y en numerosas ocasiones fue jefe de grupo, representante del CGR, Consejero Departamental y por último Consejo Universitario.

En 2010 es contratado por la Universidad Autónoma Chapingo como trabajador administrativo para desempeñar la función de responsable de control de calidad de los Comedores Universitarios, actividad que actualmente sigue desempeñando en el comedor campestre de la UACH.

# ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	2
1.3. HIPÓTESIS.....	2
1.4. ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
<b>CAPÍTULO II. SITUACIÓN DEL CULTIVO DE LA PIÑA EN MÉXICO Y MUNDO</b> .....	<b>4</b>
2.1. EL CULTIVO DE LA PIÑA EN EL MUNDO.....	4
2.2. ASPECTOS RELEVANTES DEL CULTIVO DE PIÑA EN MÉXICO .....	6
2.3. INDICADORES DE PRODUCCIÓN DE PIÑA POR RÉGIMEN DE RIEGO.....	7
2.4. INDICADORES DE PRODUCCIÓN DE PIÑA POR RÉGIMEN DE TEMPORAL .....	8
2.5. IMPORTANCIA DE LA PIÑA POR ENTIDAD FEDERATIVA .....	8
<b>CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>10</b>
3.1. RESPUESTA DE LOS CULTIVOS A CONCENTRACIONES ELEVADAS DE DIÓXIDO DE CARBONO Y ELEVADAS TEMPERATURAS .....	10
3.2. EFECTOS DE LA ALTA TEMPERATURA EN LOS CULTIVOS .....	17
3.3. EFECTOS INTERACTIVOS DEL DIÓXIDO DE CARBONO ELEVADO Y LA TEMPERATURA EN LOS CULTIVOS.....	19
3.4. EL EFECTO FERTILIZACIÓN EN CAMPO ABIERTO .....	22
3.5. LA MEDICIÓN DE LAS NORMALES CLIMATOLÓGICAS.....	23
3.6. MODELO ESTADÍSTICO DE ECUACIONES SIMULTÁNEAS .....	24
3.7. EL PROBLEMA DE LA IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA DE ECUACIONES SIMULTANEAS .....	26
3.7.1. <i>CONDICIONES DE ORDEN Y RANGO PARA LA IDENTIFICACIÓN</i> .....	26
<b>CAPÍTULO IV. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>28</b>
4.1 CRECIMIENTO Y MEJORA DE LA BIOMASA DE PLANTAS DE CAM BAJO CO <sub>2</sub> ELEVADO.....	35
<b>CAPÍTULO V. METODOLOGÍA</b> .....	<b>39</b>
5.1 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DEL MODELO EMPÍRICO.....	39
5.2 FORMAS FUNCIONALES PROPUESTAS Y SIGNOS ESPERADOS.....	40
5.3 IDENTIFICACIÓN DE LAS ECUACIONES DEL MODELO .....	41
5.3.1 <i>CONDICIÓN NECESARIA</i> .....	42
5.3.2 <i>CONDICIÓN DE RANGO</i> .....	43
5.3.3 <i>ESTIMACIÓN DEL MODELO</i> .....	44
<b>CAPÍTULO VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>45</b>
6.1 RESULTADOS ESTADÍSTICOS DEL MODELO ESTRUCTURAL .....	45
6.2 RESULTADOS DEL MODELO REDUCIDO .....	46
6.3 ELASTICIDADES DE LA FORMA REDUCIDA.....	47
<b>CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>49</b>
7.1. CONCLUSIONES.....	49
7.2. RECOMENDACIONES .....	51
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>53</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>57</b>
A. SERIE DE TIEMPO DE LA PIÑA EN EL MUNDO 1961–2017 .....	57

B. SERIE DE TIEMPO DE LA PIÑA EN MÉXICO 1961 – 2017.....	59
C. SERIE CRONOLÓGICA DE LAS NORMALES CLIMÁTICAS Y DEL CO <sub>2</sub> .....	61
D. SALIDA DEL PROCEDIMIENTO ETS/SYSLIN.....	63
D.1. FORMA ESTRUCTURAL DEL MODELO.....	63
D.2. FORMA REDUCIDA DEL MODELO.....	64
D.3. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LAS VARIABLES.....	64
E. ESTIMACIÓN DE LAS ELASTICIDADES EN LA FORMA REDUCIDA DEL MODELO.....	65
F. INDICADORES DE LA PIÑA POR ENTIDAD Y RÉGIMEN DE HUMEDAD 2017.....	66
G. ESTADÍSTICAS DE LA PIÑA POR RÉGIMEN DE HUMEDAD 1988-2017.....	67

## ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. SUPERFICIE SEMBRADA Y RENDIMIENTO DE LA PIÑA EN EL MUNDO.....	4
CUADRO 2. SUPERFICIE COSECHADA Y RENDIMIENTO DE LOS PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES DE PIÑA.....	5
CUADRO 3. PAÍSES CON LA MAYOR PRODUCTIVIDAD DE PIÑA.....	6
CUADRO 4. INDICADORES DE LA PIÑA EN MÉXICO.....	6
CUADRO 5. TASAS DE CRECIMIENTO DE LA PIÑA DE RIEGO.....	7
CUADRO 6. TASAS DE CRECIMIENTO DE LA PIÑA DE TEMPORAL.....	8
CUADRO 7. CULTIVO DE LA PIÑA POR ENTIDAD FEDERATIVA 2017.....	9
CUADRO 8. AUMENTO DE LA BIOMASA DE LAS CRASULÁCEAS BAJO 2-CO <sub>2</sub> .....	35
CUADRO 9. VARIABLES UTILIZADAS EN LA ESTIMACIÓN DEL MODELO EMPÍRICO DE LA PIÑA.....	39
CUADRO 10. FUENTES DE LAS VARIABLES UTILIZADAS EN EL MODELO EMPÍRICO.....	39
CUADRO 11. CONDICIONES DE ORDEN DEL MODELO DE ECUACIONES SIMULTÁNEAS.....	42
CUADRO 12. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LAS VARIABLES.....	45
CUADRO 13. EFECTO DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS SOBRE EL RENDIMIENTO DE LA PIÑA.....	45
CUADRO 14. PARÁMETROS ESTIMADOS DEL MODELO REDUCIDO.....	47
CUADRO 15. ELASTICIDADES EN EL MODELO REDUCIDO.....	48
CUADRO 16. ESTADÍSTICAS DE LA PIÑA EN EL MUNDO 1961 - 2017.....	57
CUADRO 17. ESTADÍSTICA DE LA PIÑA EN MÉXICO 1961-2017.....	58
CUADRO 18. SERIE DE TIEMPO DE LAS NORMALES CLIMATOLÓGICAS Y CO <sub>2</sub> .....	61
CUADRO 19. ESTADÍSTICAS DE LA PIÑA POR ENTIDAD FEDERATIVA Y RÉGIMEN DE HUMEDAD 2017.....	66
CUADRO 20. ESTADÍSTICAS DE LA PIÑA POR RÉGIMEN DE HUMEDAD 1988-2017.....	67

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1. CAMBIOS EN LA OFERTA VERSUS CAMBIOS EN LA CANTIDAD SUMINISTRADA.....	38
---	----

## SIGLAS, ABREVIATURAS Y PALABRAS CONTRACTAS

ABA	Ácido Abscísico
ACC	Amino Ciclopropano Carboxilato
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
2-CO <sub>2</sub>	Supuesto o escenario en el que se dobla la concentración, en partes por millón de la concentración, de dióxido de carbono en la atmósfera
C3	Grupo de plantas con fijación de carbono a través de la fotosíntesis de tres carbonos
C4	Grupo de plantas con fijación de carbono a través de la fotosíntesis de cuatro carbonos
CAM	Grupo de plantas con fijación de carbono por la vía del metabolismo ácido de las crasuláceas
DICEA	División de Ciencias Económico Administrativas
DSSAT	Decisión Support System for Agrotechnology
ESRL	Laboratorio de Investigación del Sistema Tierra de Estados Unidos
FACE	Método de Enriquecimiento de Dióxido de Carbono al Aire Libre
FAOSTAT	Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
IAA	Ácido Indol Acético
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
LAI	Índice de Área Foliar
MCEARN	Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PEPC	Fosfoenol Piruvato Carboxilasa
PIBa	Producto Interno Bruto Agrícola
PPM	Partes por Millón
PRECIS	Modelo Regional de Cambio Climático
SADER	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SAS	Statistical Analysis System
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
SLA	Área Foliar Específica Disminuida
TMCA	Tasa Media de Crecimiento Anual
UACH	Universidad Autónoma Chapingo
URSS	Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas
WUE	Eficiencia del Uso del Agua



# ANÁLISIS DEL EFECTO DE FERTILIZACIÓN EN LA PIÑA DEBIDO AL INCREMENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN LA ATMÓSFERA

Fernando Elester Vázquez Ayanegui<sup>1</sup>, Ignacio Caamal Cauich<sup>2</sup>

## RESUMEN

La presente investigación busca cuantificar el efecto fertilización en la piña derivado del incremento del dióxido de carbono atmosférico (CO<sub>2</sub>) de 1961 a 2017. La piña es importante en México con una vía de fijación de carbono a través del llamado metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM). Los impactos del cambio climático sobre la agricultura están documentados y son negativos. El llamado efecto fertilización causado por el incremento del CO<sub>2</sub> en el largo plazo, ha recibido poca atención. El CO<sub>2</sub> es el alimento principal de las plantas y un incremento de la misma causa que la biomasa aumente en un rango de 15% a 45%. Se ha utilizado un sistema de ecuaciones simultáneas para modelar la transmisión del efecto de incremento del CO<sub>2</sub>, a través de la temperatura, sobre el rendimiento de la piña. El modelo reducido mostró que en el largo plazo el efecto marginal de un incremento de una parte por millón en la concentración de CO<sub>2</sub> incrementará el rendimiento de la piña en 0.18 toneladas por hectárea y el incremento de un milímetro en la precipitación lo incrementará en 0.0362 toneladas por hectárea. Como elasticidades esto significa que si el CO<sub>2</sub> aumenta en 1.0%, el rendimiento de la piña aumentara en 1.64%. La modelación se ha realizado sin la inclusión de variables como son plagas y enfermedades, malas hierbas y varias más. La conclusión es que el efecto fertilización mostró ser positivo para la piña y puede traer beneficios económicos para los productores.

**Palabras clave:** metabolismo ácido de las crasuláceas, modelo estructural de ecuaciones simultáneas, seguridad alimentaria, cambio climático.

---

<sup>1</sup>Alumno de Posgrado Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y Recursos Naturaleza (MCEARN) de la División de Ciencias en Economía Agrícola (DICEA) de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH).

<sup>2</sup>Profesor investigador Posgrado DICEA – UACH.

# ANALYSIS OF THE FERTILIZATION EFFECT IN THE PINEAPPLE DUE TO THE RISE OF CARBON DIOXIDE IN THE ATMOSPHERE

Fernando Elester Vázquez Ayanegui<sup>1</sup>, Ignacio Caamal Cauich<sup>2</sup>

## ABSTRACT

This research seeks to quantify the effect of pineapple fertilization derived from the increase in atmospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) from 1961 to 2017. Pineapple is important in Mexico with a carbon fixation pathway through the so-called acidic metabolism of the crassulaceae (CAM). The impacts of climate change on agriculture are documented and negative. The so-called fertilization effect caused by the increase in CO<sub>2</sub> over the long term has received little attention. The CO<sub>2</sub> is the main food of the plants and that an increase of the same causes that the biomass increases in a range of 15% to 45%. A system of simultaneous equations has been used to model the transmission of the effect of increasing CO<sub>2</sub>, through temperature, on pineapple yield. The reduced model showed that in the long term the marginal effect of an increase of one part per million in the CO<sub>2</sub> concentration will increase the yield of pineapple by 0.18 tons per hectare and the increase of one millimeter in precipitation will increase it by 0.0362 tons. As elasticities, this means that if CO<sub>2</sub> increases by 1%, pineapple yield will increase by 1.64%. The modeling has been carried out without the inclusion of variables such as pests and diseases, weeds and several others. The conclusion is that the fertilization effect proved positive for pineapple and can bring economic benefits to producers.

**Keywords:** crassulacean acid metabolism, structural model of simultaneous equations, food security, climate change.

<sup>1</sup>Alumno de Posgrado Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y Recursos Naturaleza (MCEARN) de la División de Ciencias en Economía Agrícola (DICEA) de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH).

<sup>2</sup>Profesor investigador Posgrado DICEA – UACH

## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

La piña es una planta herbácea Liliopsida perenne tropical, de la familia de las Bromeliáceas, utiliza el Mecanismo Ácido de las Crasuláceas (CAM) para la fijación de Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En México es uno de los cultivos agroindustriales de importancia económica, en 2016 la producción de piña representó el 4.09% de la producción total de frutales. En términos monetarios dicho cultivo aportó el 0.48% del PIB agrícola. En el período de 2003 a 2016 la producción de piña creció 29.06% y las exportaciones pasaron de 20.8 mil a 86.3 mil toneladas. En el mismo año de 2016 se sembraron 42,802 hectáreas, de las cuales, el 94.2% de tal superficie se encuentra mecanizada, 88% cuenta con tecnología aplicada a la sanidad vegetal, y solo el 7.61% contó con asistencia técnica y el 83.14% de tal superficie sembrada es de temporal. México es el sexto productor mundial de piña (SIAP, 2017; SAGARPA-SIAP, 2018).

Por otro lado, es un hecho bien conocido que a partir de la Revolución Industrial de finales del siglo XVIII el crecimiento económico se basó en la quema de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo, por lo que las emisiones del dióxido de carbono a la atmósfera se incrementaron considerablemente. Antes de la Revolución Industrial la concentración de carbono estaba en el rango de los 180 y 260 partes por millón (PPM) en un metro cúbico de aire atmosférico normal. De acuerdo con los datos y registros realizados por NOAA en Mauna Loa, Hawái, desde 1958, la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera ha crecido de 315.97 ppm en 1959 a 408.52 ppm en 2017. Es decir, la concentración de CO<sub>2</sub> en dicho periodo ha sido de 1.56 ppm por año; dicho de otra forma, la concentración ha crecido 15.4% (Bowes, 1993; Ceusters & Borland, 2010).

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> han experimentado un gran crecimiento entre 1961 y 2017. Por otra parte, el efecto fertilización por CO<sub>2</sub> en las plantas con metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM) es un tema poco explorado debido principalmente a que estas plantas no forman parte del sustento alimenticio.

La piña es una crasulácea. Las crasuláceas tienen un metabolismo particular para fijar el dióxido de carbono atmosférico en forma de carbono orgánico que consiste en que la

fotosíntesis se realiza en dos fases separadas, una fotótrofa (lumínica) durante el día y la sintética (oscura) durante la noche. El nombre de fotosíntesis CAM se dio tras descubrir por primera vez este tipo de fotosíntesis en ellas. Estas plantas revisten especial interés ante el cambio climático precisamente por su forma de fijar carbono vía la fotosíntesis del CO<sub>2</sub> atmosférico<sup>1</sup> (Darwin & Kennedy,2000; López, Ramírez y Rojano (2005)).

En fisiología vegetal es un hecho conocido que un incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> y la temperatura asociada al efecto invernadero, pueden influenciar el mecanismo de la fotosíntesis en las plantas. En las concentraciones de CO<sub>2</sub> observadas antes de la revolución industrial de finales del siglo XVIII, en la mayoría de las plantas C3 la fotosíntesis estaba limitada por el CO<sub>2</sub>, pero esta situación cambia si la concentración de este gas aumenta, tal como efectivamente ha ocurrido en el período de estudio de la presente investigación, que es de 1961 a 2017, y por lo tanto hay cambios también en la tasa fotosintética (Taiz y Zeiger, 2006; Azcón *et al.*, 2013). De esta manera un cambio en la tasa fotosintética puede implicar una mejora en la producción de biomasa de las plantas y vegetales debido al aumento del carbono que es el “alimento” de las plantas; es decir al efecto fertilización de un incremento en las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera debido a la actividad antropogénica del hombre (Qaderi & Reid, 2009).

## 1.2. OBJETIVOS

- Cuantificar el efecto marginal del dióxido de carbono y las normales climatológicas (precipitación y temperatura) sobre el rendimiento del cultivo de la piña en México a través de un modelo de ecuaciones simultáneas.
- Determinar las elasticidades de largo plazo del dióxido de carbono y las normales climatológicas para cuantificar su efecto sobre el rendimiento de la piña.

## 1.3. HIPÓTESIS

Las hipótesis de trabajo de la presente investigación es la siguiente:

- Las normales climatológicas (precipitación y temperatura) son variables relevantes para explicar las fluctuaciones del rendimiento de la piña en el periodo analizado.

---

<sup>1</sup> Las normales climatológicas se definen como los valores medios de los elementos meteorológicos (temperatura, humedad, precipitación, evaporación, etc.) calculados con los datos recabados durante un periodo largo y relativamente uniformes, generalmente de 30 años (Trewin, 2007).

- El efecto marginal de las normales climatológicas sobre el rendimiento de la piña en el largo plazo es estadísticamente significativo y su elasticidad es mayor que uno.

#### **1.4. ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN**

La presente investigación se ha dividido en siete capítulos. El primer capítulo corresponde a la introducción en la que se describen datos generales del cultivo de la piña en cuanto a importancia económica, datos de superficie y se expone también el contexto general de cómo ha ido incrementándose las emisiones de dióxido de carbono. Se expone también el planteamiento del problema, se enuncian los objetivos y las hipótesis. En el segundo capítulo se expone la situación del cultivo de la piña en México y en el mundo destacándose el hecho que para poder cumplir con los objetivos propuestos es necesario disponer con series de datos de las variables de interés de al menos 30 años. En el tercer capítulo se exponen los principios teóricos que soportan el trabajo. Los principios que sustentan el llamado efecto fertilización del CO<sub>2</sub> sobre las plantas son el proceso de la fotosíntesis en las plantas a través del ciclo de Calvin y las formas en que las plantas, cultivadas y no cultivadas, fijan el CO<sub>2</sub> atmosférico a carbono orgánico en la planta y en el suelo a través de la fotosíntesis vía C<sub>3</sub>, vía C<sub>4</sub> y la vía del mecanismo ácido de las crasuláceas (CAM). En el capítulo cuatro se realiza la revisión de la literatura relevante para la investigación. Un punto en que coinciden la mayoría de las investigaciones revisadas es que el efecto fertilización si ésta siendo causado por el incremento del CO<sub>2</sub> en la atmosfera y que el incremento de la biomasa por el efecto fertilización es variable en el rango 15% a 45%. En capítulo cinco del escrito corresponde a la exposición de la metodología utilizada en el estudio. Se definen las variables utilizadas, se realiza la identificación del modelo de ecuaciones simultáneas del modelo propuesto. En el capítulo seis se enuncian los resultados y discusión de los mismos. En el capítulo siete se enuncian las conclusiones y recomendaciones. La parte final del documento corresponde al inciso de la bibliografía y a los Anexos, que contienen las series de datos utilizadas para las estadísticas descriptivas del escrito como para alimentar el modelo de ecuaciones simultaneas estimadas.

## CAPÍTULO II. SITUACIÓN DEL CULTIVO DE LA PIÑA EN MÉXICO Y MUNDO

En el ámbito de la climatología se considera que para poder analizar el efecto de las normales climatológicas en el cambio climático, calentamiento, ecosistemas, etc., se deben considerar al menos 30 años de observaciones de tales variables. Dado que la presente investigación analiza el efecto del incremento de la temperatura, precipitación e incremento del dióxido de carbono sobre el rendimiento de la piña en un periodo mayor a 30 años, a continuación, se expone la situación de los principales indicadores de la piña en el largo plazo (Organización Meteorológica Mundial – OMM; 2011).

### 2.1. EL CULTIVO DE LA PIÑA EN EL MUNDO

De acuerdo con FAOSTAT (2019) en el periodo 1961 a 2017 la tasa media de crecimiento anual (TMCA) de la superficie fue del 2.0% en el periodo de estudio de 57 años, mientras el rendimiento solo en 0.04% y la producción prácticamente del 0.0%. En el Cuadro 1 se presentan algunos años selectos del periodo de estudio (la serie cronológica completa está contenida en el Anexo A.)<sup>2</sup>.

CUADRO 1. SUPERFICIE SEMBRADA Y RENDIMIENTO DE LA PIÑA EN EL MUNDO

Años	Superficie (ha)	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)
1961	381,818	10.5	4,001,523
1965	414,198	11.4	4,708,797
1970	472,142	12.2	5,778,043
1975	508,712	14.8	7,540,318
1985	601,004	16.8	10,082,688
1990	639,906	19.6	12,534,229
1995	692,874	20.3	14,035,949
2000	770,747	21.4	16,504,636
2005	863,860	22.3	19,270,148
2010	1,011,962	22.9	23,150,393
2015	1,087,434	25.8	28,045,984
2017	1,176,850	25.1	29,524,271
Promedio	684,638	19.6	13,422,346
TMCA	2.0%	0.04%	0.0%

Fuente: Elaborado a partir del Anexo A.

<sup>2</sup> La fórmula para el cálculo de la tasa de crecimiento media anual fue  $TMCA = \left( \frac{V_f}{V_i} \right)^{\frac{1}{n-1}} - 1$  donde  $V_f$  es el valor final y  $V_i$  el valor inicial de la respectiva serie de tiempo y  $n$  es el número de periodos de tal serie.

Por países, los 20 productores principales de está en el periodo de estudio son los mostrados en el Cuadro 2. Utilizando el criterio de la superficie cultivada México ocupa el lugar 15 con un promedio de superficie cosechada de 11,634 hectáreas durante el periodo 1961-2017; es decir el 1.7%.

CUADRO 2. SUPERFICIE COSECHADA Y RENDIMIENTO DE LOS PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES DE PIÑA

País	Superficie ha	Rendimiento ton/ha	Producción Ton
Nigeria	110,770	7.4	814,915
Tailandia	78,937	20.7	1,632,000
India	61,638	14.0	860,309
Filipinas	44,980	27.2	1,223,611
Brasil	43,632	30.2	1,315,614
China, continental	35,967	22.7	817,569
Vietnam	28,240	11.1	313,449
China	27,128	18.7	506,444
Indonesia	23,086	24.6	567,070
Guinea	18,383	3.1	57,725
Estados Unidos	14,169	34.5	488,369
Bangladesh	13,095	11.1	145,688
Costa Rica	12,046	61.0	734,724
Malasia	11,693	22.0	257,202
México	11,634	39.9	464,353
Tanzania	9,288	12.4	115,413
Venezuela	9,025	19.8	178,907
Angola	8,868	11.7	103,838
Taiwán	8,840	35.2	311,125
Madagascar	8,738	5.6	49,139
Mundo	683,617	19.6	10,957,465

Fuente: Elaborado con base a FAOSTAT (2019).

En términos de productividad México es uno de los países con los más altos rendimientos por unidad de superficie pues de entre 87 países ocupa segundo lugar con 39.9 ton/ha, destacando el caso de Costa Rica que tiene el más alto rendimiento de con 61.0 ton/ha tal como se puede observar en el Cuadro 3.

**CUADRO 3. PAÍSES CON LA MAYOR PRODUCTIVIDAD DE PIÑA**

País	Superficie (ha)	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)
Costa Rica	12,046	61.0	734,724
México	11,634	39.9	464,353
Taiwán	8,840	35.2	311,125
Estados Unidos	14,169	34.5	488,369
Brasil	43,632	30.2	1,315,614
Filipinas	44,980	27.2	1,223,611
Indonesia	23,086	24.6	567,070
China	35,967	22.7	817,569
Malasia	11,693	22.0	257,202
Tailandia	78,937	20.7	1,632,000
Mundo	683,617	19.6	10,957,465

Fuente: Elaborado con base a FAOSTAT (2019).

En el referido cuadro destaca el caso de Costa Rica que tiene el más alto rendimiento de con 61.0 ton/ha. México y Costa Rica pertenecen a la región Centroamericana.

## 2.2. ASPECTOS RELEVANTES DEL CULTIVO DE PIÑA EN MÉXICO

Siguiendo un análisis análogo al del inciso anterior y utilizando exclusivamente la base de datos de FAOSTAT (2019), es posible observar que en el periodo de estudio la tasa media de crecimiento anual de la superficie cosechada de piña fue de 164.8%, el rendimiento de 125.8% y de la producción del 292.7%. En el Cuadro 4 se muestra varios años selectos del comportamiento de los indicadores de producción y productividad de la piña en México.

**CUADRO 4. INDICADORES DE LA PIÑA EN MÉXICO**

Año	Superficie (ha)	Rendimiento (ton)	Producción (ton/ha)
1961	7,753	22.9	177,376
1965	10,667	25.2	268,858
1970	9,838	25.3	248,772
1975	9,896	37.5	371,288
1980	14,754	42.2	622,729
1985	6,898	46.4	319,814
1990	8,748	52.0	454,668
1995	6,620	42.5	281,180
2000	12,050	43.4	522,422
2005	15,252	36.2	551,672
2010	16,604	42.3	701,746
2015	18,865	44.6	840,486
2017	20,006	47.2	945,210
TMCA	164.8%	125.8%	292.7%

Fuente: Elaborado con datos de SIAP – SAGARPA (2018).



Debe llamar la atención el incremento sostenido del rendimiento de esta crasulácea al pasar de 22.9 ton/ha en 1961 a 47.2 ton/ha en 2017. Dicho incremento como se ha planteado en la investigación puede deberse al cambio tecnológico, dado que es un cultivo comercial con alto valor en el mercado internacional, con potencial en la fabricación de productos agroindustriales y por lo tanto incorpora constantemente innovaciones tecnológicas.

### 2.3. INDICADORES DE PRODUCCIÓN DE PIÑA POR RÉGIMEN DE RIEGO

Las tasas medias de crecimiento por año de los indicadores de superficie cosechada, rendimiento y producción del cultivo de la piña, por régimen de riego, en un periodo de 30 años, se muestran en el Cuadro 5. Las TMCA se han dividido por subperiodos de cinco años.

CUADRO 5. TASAS DE CRECIMIENTO DE LA PIÑA DE RIEGO

Periodo	Superficie (%)	Rendimiento (%)	Producción (%)
1988-1992	74.0	-2.0	70.5
1993-1997	34.2	7.2	43.8
1998-2002	15.2	-15.2	-2.3
2003-2007	16.6	-1.7	14.6
2008-2012	30.0	6.2	38.0
2013-2017	7.2	5.7	13.2
1988-2017	20.3	3.9	25.0

Fuente: Elaborado con base a SIAP – SAGARPA (2018).

En el cuadro resalta el hecho de que la superficie cosechada de riego crece a tasas positivas en todos los subperiodos a diferencia del rendimiento en cuyo caso en tres de los seis subperiodos la tasa de crecimiento fue negativa, destacando el subperiodo 1998-2002, en cuyo caso el crecimiento del rendimiento es de -15.2. En el periodo de los 30 años las tres tasas de crecimiento son positivas, pero la producción es explicada por el crecimiento de la superficie.

## 2.4. INDICADORES DE PRODUCCIÓN DE PIÑA POR RÉGIMEN DE TEMPORAL

Los indicadores de la piña de temporal se muestran en el Cuadro 6.

CUADRO 6. TASAS DE CRECIMIENTO DE LA PIÑA DE TEMPORAL

Periodo	Superficie (%)	Rendimiento (%)	Producción (%)
1988-1992	-4.5	-5.1	-9.3
1993-1997	5.4	4.4	10.1
1998-2002	7.0	-12.4	-6.9
2003-2007	-1.2	0.6	-0.6
2008-2012	-0.8	-0.3	-1.1
2013-2017	2.3	1.4	3.8
1988-2017	2.4	0.1	2.4

Fuente: elaborado con base a SIAP – SAGARPA (2018).

A diferencia de la piña en riego, la superficie de temporal de esta crasulácea muestra que en tres subperiodos tiene tasas de crecimiento negativas. Lo mismo ocurre con el rendimiento. En tres periodos este indicador crece a tasas negativas. Análogamente a como ocurre con riego, es el crecimiento de la superficie lo que explica el crecimiento de la producción de piña en todo el periodo 1988-2017.

## 2.5. IMPORTANCIA DE LA PIÑA POR ENTIDAD FEDERATIVA

Para el año de 2017, la piña se cultivó en 12 entidades federativas. Veracruz ocupa la mayor superficie cosechada con el 65.4% y Oaxaca con el 10.0% (Cuadro 7).

CUADRO 7. CULTIVO DE LA PIÑA POR ENTIDAD FEDERATIVA 2017

Entidad	Superficie sembrada (ha)	Superficie cosechada (ha)	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)
Veracruz	34,926	13,082	46.2	604,929
Oaxaca	2,007	2,005	65.1	130,437
Tabasco	1,603	1,603	35.2	56,456
Nayarit	1,792	1,407	33.0	46,445
Q. Roo	1,005	595	61.4	36,521
Jalisco	468	468	71.5	33,490
Colima	410	386	69.9	26,960
Chiapas	344	344	22.3	7,667
Campeche	54	54	26.7	1,439
Guerrero	51	48	11.5	551
México	9	9	8.2	70
Tamaulipas	11	6	41.0	246
País	42,679	20,006	47.2	945,210

Fuente: elaborado con base a SIAP –SAGARPA (2018).

El análisis de la diferencia entre la superficie sembrada y la superficie cosechada utilizando las cifras de la SIAP – SAGARPA (2018) rara vez es realizado. Sin embargo, en el caso de la piña llama la atención la alta superficie siniestrada de este cultivo. La pérdida por siniestrabilidad en el 2017 fue de 53.1% en el país. En el caso de Veracruz la tasa de siniestrabilidad fue de 62.5%. En dicha entidad el cultivo de la piña es 100% de temporal. De acuerdo a la definición de superficie siniestrada las causas que la provocan son sequía, exceso de humedad, helada, bajas temperaturas, vientos, inundaciones, granizo, onda cálida, entre otros. Algunas de estas causas pueden ser atribuidas al calentamiento global y al cambio climático, no obstante, el objetivo de la investigación no es estudiar directamente este problema, pero es necesario tenerlo en consideración al argumentar los resultados de la misma.

## CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se presenta la teoría que sustenta la presente investigación. Los principios teóricos del efecto del dióxido de carbono sobre las plantas no cultivadas y las cultivadas son una concatenación de principios teóricos del efecto del cambio climático sobre la morfología, fisiología y bioquímica de las plantas. Esta división es solo para fines de exposición pues la cantidad de disciplinas unificadas en un marco teórico que explique la respuesta de los cultivos a concentraciones de dióxido y la temperatura son múltiples y como tal no es un cuerpo unificado de conocimientos.

También es propósito de este capítulo es exponer los resultados de algunos de los experimentos realizados para evaluar los efectos separados y combinados del aumento de CO<sub>2</sub> y la temperatura en el crecimiento y la fisiología de los cultivos. También se discutirán las implicaciones de dichos estudios en la productividad de los cultivos y el suministro de alimentos en el futuro. En esta revisión, se han utilizado datos relevantes de diversos estudios que consideran el CO<sub>2</sub>, la temperatura u otros factores ambientales, independientemente de los sistemas experimentales, que incluyen cámaras de crecimiento en ambientes controlados, invernaderos, cámaras de campo de planta abierta e instalaciones de enriquecimiento de CO<sub>2</sub> al aire libre (FACE)<sup>3</sup>.

### 3.1. RESPUESTA DE LOS CULTIVOS A CONCENTRACIONES ELEVADAS DE DIÓXIDO DE CARBONO Y ELEVADAS TEMPERATURAS

El presente inciso se basa en Qaderi y Reid (2009) quienes hacen una revisión del efecto del carbono y temperaturas altas sobre las plantas cultivadas y silvestres basados en 132 referencias relacionadas con el tema. El desarrollo del tema no es en sí misma una teoría,

---

<sup>3</sup> El acrónimo FACE se refiere a la expresión en inglés “**Free-Air Carbon dioxide Enrichment**” que se traduce como “**Enriquecimiento de Dióxido de Carbono al Aire Libre**”. El FACE Se requieren experimentos con FACE porque la mayoría de los estudios que analizan el efecto de las concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> se han realizado en laboratorios y donde hay muchos factores faltantes, incluida la competencia de la planta. Los experimentos FACE son requeridos porque la mayoría de los estudios que analizan el efecto de las concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> se han realizado en laboratorios y por lo tanto hay muchos factores excluidos, incluida la competencia de la planta. La medición del CO<sub>2</sub> utilizando la técnica FACE es la forma más natural de estimar cómo cambiará el crecimiento de las plantas en el futuro a medida que la concentración de CO<sub>2</sub> aumente en la atmósfera. También permite medir el efecto del CO<sub>2</sub> elevado en plantas que no se pueden cultivar en espacios pequeños (árboles, por ejemplo). Su desventaja es que conllevan costos significativamente más altos en relación con los experimentos en invernadero (McLeod & Long, 1999).

sino que es un cuerpo de principios que la regularidad empírica ha venido confirmando en la multitud de estudios experimentales revisados por los mencionados investigadores, por lo que puede considerarse válidos para predecir cuál será el resultado de altas concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera y de altas temperaturas sobre las plantas no cultivadas como aquellas de importancia económica e imprescindibles en la seguridad alimentaria.

El propósito del documento es discutir los resultados de algunos de los experimentos realizados para evaluar los efectos separados y combinados del aumento de CO<sub>2</sub> y la temperatura en el crecimiento y la fisiología de los cultivos, así como discutir las implicaciones de dichos estudios en la productividad de los cultivos y el suministro de alimentos en el futuro. En su exhaustiva esta revisión los investigadores han utilizado datos relevantes de diversos estudios que consideran el dióxido de carbono, la temperatura u otros factores ambientales, independientemente de los sistemas experimentales, que incluyen cámaras de crecimiento en ambientes controlados, invernaderos, cámaras de campo de planta abierta e instalaciones de enriquecimiento de dióxido de carbono al aire libre (FACE).

En su exposición teórica Qaderi y Reid (2009) se inicia afirmando que tanto las plantas silvestres como las cultivadas son afectadas por las altas concentraciones de dióxido de carbono y las altas temperaturas. No obstante, la concentración elevada de dióxido de carbono atmosférico tiene efectos positivos sobre el crecimiento de los cultivos y la productividad, tanto en términos de cantidad como de calidad, al incrementar la fotosíntesis la eficiencia del uso del agua y reducir la transpiración a través de reducir la conductancia estomática. Las especies cultivadas son directamente afectadas por el incremento del dióxido de carbono atmosférico, lo cual cambia las estructuras físicas de la planta y el balance carbón/nitrógeno. Y a su vez esto afecta el crecimiento, el rendimiento, la tolerancia al estrés por sequía y la susceptibilidad a plagas y herbívoros. Las respuestas de los cultivos al cambio climático están cercanamente relacionadas a la variabilidad del clima local más que a los patrones del clima global y, por lo tanto, las respuestas de los cultivos al cambio climático varían por región y especies de plantas. Existe además la expectativa de que los rendimientos de cultivos de climas templados aumentaran con los niveles elevados de

dióxido de carbono, pero la temperatura alta puede compensar este efecto positivo en determinados cultivos.

Con el cambio climático, probablemente se producirá un cambio en las áreas de crecimiento de cultivo en el mundo debido al calentamiento global y, como resultado, la productividad de los cultivos aumentará en algunas áreas, especialmente en las regiones templadas con una estación de crecimiento extendida, pero en otras, como las regiones ecuatoriales los rendimientos decrecerán drásticamente. Además, en algunas regiones donde actualmente crece un cultivo en particular puede en el futuro volverse inadecuadas para el crecimiento de esa especie, debido a condiciones más cálidas y secas. En tales condiciones, se tendrá que hacer un cambio para producir otro cultivo, así como cambios en la dieta humana (McLeod & Long, 1999; Cline, 2007)

El potencial para la productividad del cultivo debería aumentar con el aumento de la temperatura promedio local en un rango de 1 - 3 °C, pero disminuir por encima de este rango, probablemente debido a una mala vernalización, etapas fenológicas más cortas, disminución de la fotosíntesis y aumento de la transpiración y conductancia estomática. Como se indicó, se proyecta que los aumentos en la frecuencia de sequías e inundaciones afecten negativamente la producción local de cultivos, lo que puede tener un gran impacto en los suministros de alimentos locales, regionales y mundiales. Obviamente, las predicciones basadas en el supuesto de que la mejora de la productividad de los cultivos sería mayor en ecosistemas más secos o en años más secos tienen un apoyo limitado<sup>4</sup> (Darwin and Kennedy, 2000; Azcón, Fleck, Aranda y Gómez, 2013).

Los efectos separados y combinados del aumento de dióxido de carbono y la alta temperatura en las plantas se han estudiado, ya sea en cámaras de crecimiento, en invernaderos o en el campo. Durante las últimas dos décadas, ha habido un interés creciente en estudiar los efectos del dióxido de carbono en las plantas en condiciones de campo, utilizando instalaciones de enriquecimiento de dióxido de carbono en aire libre (FACE). La principal razón para usar FACE ha sido que los resultados obtenidos de los estudios de cerramiento no siempre pueden representar con precisión la respuesta de las

---

<sup>4</sup> La vernalización es la condición natural física a periodos variables de frío de algunas plantas herbáceas para que se produzca la apertura de sus flores. La vernalización o cantidad mínima de horas de frío requeridas, varía con las distintas especies y genotipos.

plantas al entorno natural debido a la limitación de tamaño en estos sistemas (por ejemplo, usar macetas, que limitan el crecimiento de las raíces) y centrarse en las etapas tempranas del crecimiento de las plantas en lugar del ciclo de vida completo de las plantas. Existe un argumento en curso entre los científicos de plantas que predicen que la elevación concomitante del dióxido de carbono atmosférico y la temperatura del aire mejorará la producción de cultivos y aumentará el suministro de alimentos para la creciente población humana en todo el mundo y para aquellos que están preocupados por los impactos negativos de las altas temperaturas, lo que compensa los efectos positivos del aumento de dióxido en los cultivos en el futuro y, a su vez, pueden llevar a la escasez de alimentos (Ziska, Hogan, Smith & Drake, 1991).

Al analizar el efecto particular del dióxido de carbono en las plantas se han examinado los efectos del dióxido de carbono atmosférico elevado en varios cultivos en los que las respuestas estaban relacionadas con otros factores ambientales, que incluyen luz, temperatura, agua, salinidad y nutrientes, especialmente nitrato y fosfato. Además, se han estudiado las respuestas fisiológicas y bioquímicas de las plantas con diferentes vías fotosintéticas, principalmente en especies C3 y también en plantas C4 y las plantas con vía fotosintética CAM (Rasineni & Reddy, 2013; Qaderi and Reid, 2009; Hendrey & Kimball, 1994),

En la actualidad, la concentración ambiental de dióxido de carbono es un factor limitante para las plantas con la vía fotosintética C3, y la duplicación del dióxido de carbono atmosférico será beneficiosa para este grupo de plantas, debido a que la enzima ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa/oxigenasa (Rubisco) puede fijar más dióxido de carbono debido al aumento de la relación dióxido de carbono/oxígeno y eso resulta en una reducción de la fotorrespiración. Se ha indicado que las plantas pueden detectar la concentración de dióxido de carbono, pero los mecanismos de dicha señalización de dióxido de carbono son poco conocidos (Woodward, 2002; Taiz & Zeiger, 2006).

El enriquecimiento de la atmosfera con dióxido de carbono afecta la estructura de la planta, mejora de manera transitoria la tasa de crecimiento relativo (RGR) de las plantas y aumenta la biomasa y el rendimiento. Altera la sincronización de las etapas de desarrollo de las

plantas, pero acelera el crecimiento y, como resultado, induce una senescencia foliar más temprana (Erda, Wei, Hui, Yinlong, Yue, Liping y Liyong, 2005; McLeod & Long, 1999).

Cultivar plantas con una concentración elevada de dióxido de carbono conduce a un aumento del área foliar, índice de área foliar (LAI), duración del área foliar y grosor de la hoja, como lo indica el área foliar específica disminuida (SLA), que está relacionada en parte con la acumulación de carbohidratos no estructurales (Ceusters J. and Borland, 2010; Bowes, 1993).

El dióxido de carbono elevado hace que las plantas produzcan más células mesófilas y cloroplastos, así como tallos más largos y grandes raíces extendidas con patrones de ramificación alterados. La alta ganancia de carbono podría aumentar la longitud, el diámetro y el número de las raíces, y estimular la producción de raíces laterales en plantas cultivadas con dióxido de carbono elevado. Un cambio en la asignación de biomasa de las hojas a las raíces puede ocurrir bajo el enriquecimiento de dióxido de carbono. Sobre la base de los experimentos FACE se ha reportado que, en algunos cultivos agrícolas, el aumento del dióxido de carbono estimuló el crecimiento de las raíces más que el de los brotes (Bowes, 1993; Qaderi & Reid, 2009).

El dióxido de carbono elevado puede aumentar el número de flores, frutos y semillas, lo que da como resultado una mayor masa individual de semillas y una masa total de semillas, pero una menor concentración de nitrógeno en las semillas. También aumenta el rendimiento de la semilla, pero disminuye la proteína de grano y flor, como se muestra en varios cultivares de trigo. La calidad de la semilla de algunas especies, cultivadas bajo dióxido de carbono elevado, puede verse afectada por cambios en el metabolismo de los lípidos. Por ejemplo, los lípidos de grano de trigo alterados con dióxido de carbono elevado y duplicaron el número de mitocondrias en las hojas de trigo, en comparación con el nivel de dióxido de carbono ambiental.

El dióxido de carbono elevado afecta el crecimiento a través de cambios en la composición química de las plantas, como se muestra en veintisiete especies C3, incluyendo nueve cultivos. El aumento del dióxido de carbono causa una acumulación de carbohidratos no estructurales, una disminución de los compuestos orgánicos de nitrógeno y minerales y una mayor concentración de compuestos fenólicos solubles en las hojas.



El dióxido de carbono elevado estimula la fotosíntesis en varias intensidades durante diferentes fases fenológicas, y su consecuencia directa es un aumento en la producción de materia seca. Muchos estudios que indican que la estimulación inicial de las tasas de fotosíntesis disminuye con la exposición a una concentración alta de dióxido de carbono lo cual es la llamada aclimatación de las plantas.

Una disminución en la fotosíntesis puede ir acompañada de una reducción en el contenido de Rubisco y un ajuste en la señalización de carbohidratos en las hojas, como un aumento en el contenido de almidón y una disminución en la concentración de nitrógeno. Algunas de estas alteraciones que conducen a una disminución de la fotosíntesis pueden ser causadas por la restricción del crecimiento de la raíz debido al espacio limitado de enraizamiento físico en macetas, aunque los resultados de diferentes estudios han sido hasta hoy inconsistentes. En tales situaciones, dos factores reguladores importantes son: (1) disponibilidad reducida de nutrientes, particularmente nitrógeno y fósforo, y (2) detección y señalización de azúcar. En este último caso, bajo niveles elevados de dióxido de carbono, los niveles altos de sacarosa pueden actuar como señales que modifican las actividades de las fuentes y los sumideros y regulan a la baja la actividad biosintética. La fotosíntesis reducida también puede estar relacionada con la capacidad de utilización de las plantas para el fotosintato adicional, que se produce bajo enriquecimiento con dióxido de carbono (Zhu, Goldstein & Bartholomew, 1999).

El dióxido de carbono elevado reduce la transpiración cerrando parcialmente los estomas y disminuyendo la conductancia estomática, lo que disminuye la capacidad de las plantas para disipar la carga térmica a través de mecanismos no fotoquímicos en eventos de temperatura extrema. Por otro lado, el nivel de dióxido de carbono por debajo del ambiente estimula la apertura del estoma o inhibe el cierre del estoma (Tans, Fung & Takahashi, T. (1990).

La reducción de la apertura estomática conduce a una mayor eficiencia en el uso del agua y, como resultado, reduce el estrés hídrico en las plantas. Algunos estudios han informado que tanto la temperatura de la hoja como la diferencia de presión de vapor de la hoja al aire desempeñaron un papel en la reducción de la conductancia estomática en la soja. La mejora del estado hídrico de las plantas, debido al cierre parcial de las estomas, provoca una mayor

presión de turgencia, lo que estimula la expansión de la hoja. Además, la eficiencia del uso del agua en la planta se ve fuertemente afectada por la densidad estomática. Tanto la densidad estomática como el índice estomático de las hojas, que están correlacionados negativamente con el aumento de dióxido de carbono, han disminuido en los últimos 100 años (Rasineni & Reddy, 2013).

La disminución de la transpiración a un nivel elevado de dióxido de carbono sin aumentar el potencial hídrico de las hojas en el suelo húmedo indica una disminución de la conductancia hidráulica. En algunos cultivos (por ejemplo, maíz y soya), cultivados a un nivel elevado de dióxido de carbono, se produjeron disminuciones reversibles e irreversibles en la conductancia hidráulica, lo que podría haberse relacionado con una disminución de la transpiración. También se ha demostrado que la conductancia hidráulica disminuyó notablemente en las plantas de cebada cultivadas bajo dióxido de carbono elevado que las cultivadas bajo el nivel de dióxido de carbono ambiente (Rasineni & Reddy, 2013).

En respuesta al aumento de dióxido de carbono, la tasa de respiración aumenta en algunas especies, pero disminuye en otras. Como se mostró anteriormente, el dióxido de carbono atmosférico elevado conduce a una reducción de la respiración mitocondrial y la duplicación del nivel actual de dióxido de carbono reducirá la tasa de respiración en un 15-18% por unidad de peso seco.

El dióxido de carbono elevado puede afectar las hormonas de las plantas y su efecto promotor sobre la producción de etileno al aumentar la cantidad de la enzima 1-amino-ciclopropano-1-carboxilato (ACC) se ha demostrado que oxidasa en diferentes especies de plantas, incluido el girasol. También se ha informado que el crecimiento prolongado bajo dióxido de carbono elevado incrementó la producción de etileno endógeno en las hojas de las plantas de tomate, en comparación con las hojas de aquellas plantas que crecen a niveles más bajos de dióxido de carbono (Rasineni & Reddy, 2013).

El etileno puede afectar muchos aspectos del crecimiento y desarrollo de las plantas, incluida la orientación de las hojas y la partición del carbono, como se muestra en el tomate. También influye en el crecimiento de la raíz de girasol, que se ve afectado por la concentración de dióxido de carbono. Otro estudio sobre el arroz cultivado bajo dióxido de carbono elevado ha permitido llegar a la conclusión de que el aumento de la producción de

etileno es fundamental para promover el desarrollo acelerado, lo que coincide con la liberación de brotes auxiliares que conducen a un aumento del rendimiento de grano con enriquecimiento con dióxido de carbono.

En general, los cultivos se beneficiarán de la duplicación del dióxido de carbono atmosférico, que afecta a varios aspectos del metabolismo de las plantas al actuar como activador y sustrato para Rubisco, promoviendo el cierre del estoma e influyendo en la respiración y los niveles hormonales. Todas estas alteraciones pueden llevar a un mayor crecimiento y rendimiento de los cultivos. Sin embargo, no hay que olvidar los efectos de confusión de temperaturas más altas y otros factores, como el suministro de agua y nutrientes minerales.

### **3.2. EFECTOS DE LA ALTA TEMPERATURA EN LOS CULTIVOS**

La temperatura del aire elevada acelera varios aspectos del metabolismo de la planta y puede afectar a los cultivos al cambiar el tiempo y la velocidad de los procesos fisiológicos, incluida la tasa de desarrollo de los órganos, la respiración, la senescencia y sus relaciones fuente-sumidero. El desarrollo de la planta puede acelerarse a altas temperaturas, lo que lleva a cambios más tempranos a la siguiente etapa ontogenética (Erda, Wei, Hui, Yinlong, Yue, Liping & Liyong, 2005).

Las respuestas de los cultivos a la temperatura dependen de la temperatura óptima específica para la fotosíntesis, el crecimiento y el rendimiento. Si la temperatura es inferior a la óptima para la fotosíntesis, un ligero aumento de la temperatura puede aumentar el crecimiento y el desarrollo de la planta, pero si la temperatura es casi máxima, un pequeño aumento de la temperatura puede afectar negativamente el crecimiento del cultivo y, a su vez, disminuir el rendimiento. Además, el carácter del aumento de temperatura y la etapa de desarrollo del cultivo determinan las respuestas del cultivo a temperaturas más altas.

Las altas temperaturas reducen la biomasa de las plantas y afectan negativamente los esfuerzos de reproducción del cultivo, en particular la floración y la fertilización. Como se muestra en varias especies, incluyendo frijol, linaza, tomate, maíz, trigo y canola, el estrés por alta temperatura redujo los rendimientos de las semillas. Además, las plantas herbáceas que tienen un crecimiento vigoroso entre 10 ° C y 30 ° C, con la temperatura óptima de

aproximadamente 20 ° C, son muy sensibles a las altas temperaturas en el momento de la floración, incluso con una amplia disponibilidad de humedad (Cline, 2005).

Los periodos prolongados de alta temperatura (más de 30 °C) pueden resultar en esterilidad severa y pérdidas de alto rendimiento, así como en un bajo contenido de aceite y una mala calidad de la semilla si esto ocurre durante el período de llenado de la semilla. También se ha mostrado que, en la canola, la alta temperatura reduce la viabilidad y germinabilidad del polen, el aborto inducido por flores y frutos y, como resultado, afecta negativamente la producción de semillas. En cultivos anuales, como el cacahuete y el trigo, incluso un breve período de alta temperatura cerca de la etapa de floración puede llevar a una severa reducción del rendimiento debido a la esterilización del polen. También se ha indicado que la reducción del rendimiento en el trigo podría deberse a etapas fenológicas más cortas y, a su vez, menos tiempo para la acumulación de recursos para la formación de grano. Las altas temperaturas también pueden afectar la calidad del rendimiento. Se ha encontrado que, en los granos de cereales, la alta temperatura reduce el contenido de proteínas y altera los tipos y proporciones de proteínas y lípidos (Ceusters & Borland, 2010).

Las altas temperaturas disminuyen la biomasa y el rendimiento de la planta al disminuir la fotosíntesis y al aumentar la transpiración y la conductancia estomática. Un fuerte aumento en la fluorescencia de la clorofila basal indica un bloqueo del centro de reacción fotoquímico del fotosistema II a alta temperatura que afecta la fotosíntesis (Ceusters & Borland, 2010).

Las plantas tienden a producir hojas más pequeñas y sistemas de raíces más extensos a temperaturas más altas para compensar la pérdida de agua de las hojas y aumentar la ingesta de agua. Además, las plantas mitigan el sobrecalentamiento mediante el enrollamiento y la caída de las hojas y la orientación vertical de las hojas o el marchitamiento transitorio. Tales mecanismos de adaptación probablemente reducen la exposición de las hojas a la luz incidente y, a su vez, pueden llevar a una disminución de la fotosíntesis. La reducción de la fotosíntesis neta debida al aumento de la temperatura puede estar relacionada en parte con la desactivación de Rubisco. En contraste con el aumento de dióxido de carbono, las altas temperaturas conducen a un aumento de la fotorrespiración al disminuir la afinidad de la enzima Rubisco al dióxido de en relación con el oxígeno (Ceusters & Borland, 2010).

Las hormonas vegetales, como el ácido abscísico (ABA), el ácido indol-3-acético (IAA) y el etileno, participan en las respuestas de las plantas a altas temperaturas al equilibrar la transpiración al afectar la conductancia estomática. Las altas temperaturas aumentan el ABA, pero disminuyen la IAA y la evolución del etileno. IAA es una hormona promotora del crecimiento y su concentración más baja a temperaturas más altas puede, en la canola, afectar negativamente el crecimiento de las plantas y, como resultado, la materia seca es menor (Ceusters & Borland, 2010).

### **3.3. EFECTOS INTERACTIVOS DEL DIÓXIDO DE CARBONO ELEVADO Y LA TEMPERATURA EN LOS CULTIVOS**

Las preocupaciones sobre el enriquecimiento del dióxido de carbono atmosférico y su asociación con el calentamiento global que probablemente tendrá impactos potenciales en la producción de cultivos, han llamado la atención de los científicos de plantas para estudiar los efectos combinados del aumento del dióxido de carbono y la alta temperatura en las plantas, especialmente en los cultivos. Como se mencionó anteriormente, los cultivos responden positivamente a las elevadas emisiones de dióxido de carbono y negativamente a las altas temperaturas, pero ¿qué sucede con los efectos interactivos de estos dos factores ambientales? La investigación en el área ha demostrado que el aumento de dióxido de carbono puede mejorar parcialmente algunos de los efectos adversos de las tensiones ambientales, como la alta temperatura, la salinidad y la radiación ultravioleta *B* en los cultivos. Si bien el dióxido de carbono elevado puede mitigar los efectos perjudiciales de las temperaturas por encima de las óptimas sobre el crecimiento y el rendimiento de los cultivos, ciertamente las temperaturas cercanas al límite superior de los cultivos, afectarán negativamente los rendimientos, independientemente de la concentración del dióxido de carbono (Ceusters & Borland, 2010; Azcón, B.J., Fleck, Aranda y Gómez, 2013).

Las respuestas de los cultivos al dióxido de carbono elevado están fuertemente relacionadas con la temperatura. Ambos de éstos factores ambientales afectan el rendimiento de los cultivos, en términos de cantidad y calidad de semilla. En un meta-análisis de los experimentos FACE, se ha demostrado que el rendimiento de los cultivos herbáceos aumentó en promedio en un 17% y la producción de materia seca en el suelo para árboles aumentó en un 28%. En contraste, una simulación con modelos estadísticos de cultivos,

utilizando resultados de múltiples modelos climáticos y considerando seis cultivos alimentarios perennes de California, se predijo que las disminuciones en los rendimientos de estos cultivos inducidas por la temperatura probablemente se produzcan para el año 2050. Además, se ha informado que el aumento del CO<sub>2</sub> puede aumentar los rendimientos de los cultivos de leguminosas de grano como la soya, el frijol y el cacahuate, pero este efecto beneficioso se ve contrarrestado por los efectos negativos de la temperatura óptima anterior, lo que conduce a una disminución del rendimiento de la semilla y calidad.

Se ha encontrado que las tasas elevadas de asimilación de dióxido de carbono fotosintéticas de la hoja aumentan con el dióxido de carbono, pero el enriquecimiento de CO<sub>2</sub> y la alta temperatura reducen el contenido de Rubisco para el caso del arroz y la soya. La variación en las respuestas de estas dos especies de cultivos a estos dos factores ambientales sugiere una variación interespecífica entre las plantas C3 en respuesta al futuro cambio climático global. También se ha estudiado la respuesta de 17 variedades de arroz al aumento de dióxido de carbono y la temperatura y se ha encontrado que, a un nivel elevado de dióxido de carbono, el crecimiento y el rendimiento de las plantas fueron mayores a temperaturas más bajas que bajo un régimen de temperaturas más altas y hubo variaciones entre las variedades de arroz (Ceusters & Borland, 2010; Azcón, B.J., Fleck, Aranda y Gómez, 2013).

Las alteraciones en la temperatura del aire y su interacción con el dióxido de carbono elevado pueden afectar la fotosíntesis. Sobre la base de los modelos bioquímicos de la fotosíntesis, se han desarrollado otros modelos que simulan esta interacción. También se ha postulado que la concentración elevada de dióxido de carbono en la atmósfera a temperaturas más altas aumenta la asimilación neta de dióxido de carbono y las reservas de carbono, lo que facilita la disipación del exceso de energía lumínica, lo que resulta en una disminución de la fotoinhibición y, por lo tanto, aumenta la productividad de la planta (Darwin & Kennedy, 2000).

En reportes de experimentos se ha informado de que bajo la duplicación de CO<sub>2</sub>, el rendimiento de la soya fue mayor para las plantas cultivadas en el rango de 26/20 °C que para aquellas cultivadas en los 22/16 °C o 18/12 °C de los regímenes de temperatura día/noche. Sin embargo, también ha demostrado que, en el frijol el aumento de CO<sub>2</sub> no

compensó los efectos perjudiciales de las altas temperaturas en los procesos reproductivos y el rendimiento. Además, no se encontraron efectos beneficiosos directos del aumento de CO<sub>2</sub> a alta temperatura en las líneas de caupí tanto sensibles al calor como tolerantes al calor. Es común decir que el enriquecimiento de CO<sub>2</sub> y el aumento de agua y nutrientes no mitigan los efectos adversos de las temperaturas por encima de las óptimas en la producción de alimentos y fibra (Bowes, 1993).

En respuesta al aumento de CO<sub>2</sub> y alta temperatura, algunos investigadores que trabajan en las mismas especies de cultivos han reportado resultados contradictorios. Estas diferencias pueden estar relacionadas con las diferencias en los enfoques experimentales, la etapa de desarrollo del cultivo y otros factores ambientales, que probablemente no se hayan tenido en cuenta durante los experimentos.

Si bien la elevación del CO<sub>2</sub> en la atmósfera y la temperatura del aire son componentes importantes del cambio climático global, existen otros factores que se correlacionan con estos dos factores. Por ejemplo, es probable que el calentamiento global afecte los patrones de precipitación en todo el mundo, de tal manera que haya una condición de sequía severa en una región e inundaciones en otra (Darwin, R. F., and D. Kennedy 2000).

Cuando la sequía no fue considerada como un factor, no se encontraron diferencias en el crecimiento entre las plantas cultivadas a temperaturas más altas con CO<sub>2</sub> elevado y las plantas cultivadas a temperaturas más bajas a CO<sub>2</sub> ambiente, porque el CO<sub>2</sub> elevado mitigó los efectos adversos de las altas temperaturas en la primera situación. Sin embargo, el estrés por sequía más el CO<sub>2</sub> elevado y la temperatura más alta disminuyeron el crecimiento, al igual que la temperatura más alta en la concentración de CO<sub>2</sub> en el ambiente. Además, independientemente del nivel de CO<sub>2</sub>, el estrés por sequía incrementó el contenido de ácido abscísico, pero la temperatura más alta inhibió la capacidad de las plantas para producir ácido abscísico en respuesta a la sequía

Sobre la base de este estudio, podríamos sugerir que los modelos de crecimiento de cultivos, que solo consideran el aumento de CO<sub>2</sub> y las altas temperaturas, simplemente no pueden responder a los cambios tan complicados que pueden ocurrir en el clima global que podrían afectar los cultivos en el futuro.

También es probable que el cambio climático aumente las infestaciones de insectos y brotes de enfermedades y altere la composición de los nutrientes del suelo. Muchos otros factores ambientales abióticos y bióticos, como la radiación ultravioleta “B”, la concentración de ozono, la humedad relativa y los contaminantes, así como la composición y actividad de los microorganismos del suelo y muchos otros, influirán en las respuestas de los cultivos al CO<sub>2</sub> y la temperatura elevados. Por lo tanto, algunos de estos factores deben incluirse en los modelos de crecimiento de cultivos.

### **3.4. EL EFECTO FERTILIZACIÓN EN CAMPO ABIERTO**

En las investigaciones que estudian el efecto del incremento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera un punto central es que tales estudios son mayoritariamente realizados en condiciones de laboratorio, cámaras abiertas o semiabiertas o invernaderos. Por lo tanto, algunos trabajos cuestionan los resultados arguyendo que los rendimientos son considerablemente de los estimados. La mayoría de los estudios en plantas C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> y crasuláceas señalan un rango amplio de entre 20% a 40% de incremento en los rendimientos de las plantas cultivadas debido al efecto fertilización. No obstante, se señala que, en condiciones de campo abierto, como se practica la agricultura en los países en desarrollo, los incrementos en los rendimientos corresponden solo una tercera parte de las estimaciones hechas en condiciones de laboratorio. Cline (2005) dice que la medida en que la fertilización con carbono podría aliviar los efectos adversos del calentamiento global en la agricultura ha sido un tema central en el análisis de la gravedad de éstos efectos. El dióxido de carbono es un insumo de la fotosíntesis, que utiliza la energía solar para combinar el agua y el dióxido de carbono para producir carbohidratos, con el oxígeno como producto de desecho. Además, las concentraciones más altas de dióxido de carbono en la atmósfera reducen las aberturas estomáticas (poros) de las plantas y, por lo tanto, la pérdida de agua para la respiración. Los llamados cultivos C<sub>3</sub>, que incluyen arroz, trigo, soya, granos finos, leguminosas y la mayoría de los árboles, se benefician sustancialmente del dióxido de carbono atmosférico adicional. Los beneficios para los cultivos C<sub>4</sub>, que incluyen maíz, mijo, sorgo y caña de azúcar, son mucho más limitados.

Investigaciones recientes basadas en experimentos con el método FACE, sugieren que las estimaciones anteriores del efecto de la fertilización con carbono se han exagerado sustancialmente como consecuencia de depender de estudios realizados dentro de



cámaras a pequeña escala, en lugar de cultivos en campo bajo condiciones al aire totalmente abiertas y en escala agronómica. En el estudio de Cline (2005) se menciona que, si el CO<sub>2</sub> se eleva entre 550 y 575 ppm, los experimentos FACE muestran que el aumento del rendimiento es del 11% para los cultivos C3 y del 7% para los cinco cultivos alimentarios principales, que lo que es una tercera a una cuarta parte del efecto directo del CO<sub>2</sub> modelado en la evaluación para Europa y los Estados Unidos realizada por Darwin y Kennedy (2000). Por ejemplo, Cline (2005) señala que Long (2005) en su investigación reporta que los estudios FACE indican que, en una concentración de dióxido de carbono de 550 ppm, el rendimiento aumenta un 13% para el trigo, en contraste con un 31% en estudios de laboratorio, un 14% en lugar del 32% para la soya y un 0% por ciento en lugar del 18% para los cultivos C4. Entre los cultivos principales, las especies C3 representan aproximadamente tres cuartas partes y C4 una cuarta parte del total de cultivos. Si el incremento del rendimiento en las plantas C3 se establece en 12% y se establece un margen de aumento del 3% en el rendimiento para cultivos C4, entonces el incremento promedio ponderado en el rendimiento de la fertilización con carbono sería del nueve por ciento a 550 ppm entre ambos grupos de cultivos.

### **3.5. LA MEDICIÓN DE LAS NORMALES CLIMATOLÓGICAS**

De acuerdo con el documento “Guía de prácticas climatológicas” de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2011, pp. 17-18) el uso de las normales climáticas tiene dos finalidades principales. Sirven de referencia para poder comparar las observaciones recientes o presentes y, en particular, para fundamentar muchos conjuntos de datos basados en anomalías (por ejemplo, las temperaturas medias mundiales) y también tienen un uso generalizado, implícito o explícito, para predecir las condiciones que muy probablemente se experimentarán en un lugar dado. En el documento se hace referencia a que las *prácticas históricas* referentes a las normales meteorológicas se remontan a la primera mitad del siglo XX y se menciona que:

“La referencia de un período de 30 años se estableció como norma sobre todo porque la primera vez que se hizo la recomendación, solo se disponía de datos correspondientes a 30 años que pudieran resumirse”.

En respecto al periodo de cálculo de las normales climáticas la OMM (2011) señala que las normales climatológicas reglamentarias son promedios de los datos climatológicos calculados para los siguientes períodos consecutivos de 30 años: 1 de enero de 1901 a 31 de diciembre de 1930, 1 de enero de 1931 a 31 de diciembre de 1960 y así sucesivamente.

Respecto a lo que podría considerarse como desventajas de las normales climatológicas se menciona que:

“30 años no suelen constituir un período de premediación óptimo para las normales utilizadas en la predicción. A menudo, el período óptimo para las temperaturas es mucho más corto que 30 años, pero, con frecuencia, el período óptimo para la precipitación excede ampliamente los 30 años.”

“Las tendencias seculares reducen la representatividad de los datos históricos como indicadores del clima del presente, y probablemente del futuro, en un determinado lugar. Además, la existencia de una variabilidad multidecenal en el sistema climático causa diferencias en las normales climáticas entre un período de referencia y el que le sigue de tal manera que se reduce la representatividad de cualquier normal dada con respecto al clima reinante.” (OMM, 2011; p. 17).

### **3.6. MODELO ESTADÍSTICO DE ECUACIONES SIMULTÁNEAS**

La modelación matemática de las relaciones del suelo, el agua, clima, genética, administración, etc., es compleja, no obstante softwares como el DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) que permite realizar simulaciones de los efectos del cambio climático sobre 42 cultivos. Pero dado que su utilización requiere una fuerte formación técnica y cantidad de datos, en el presente estudio se utilizó un sistema de ecuaciones simultáneas lineales que es un modelo menos demandante en cuanto a información y especialización por parte del analista e investigador. Las ecuaciones simultáneas en su forma estructural reflejan el mecanismo de interrelaciones entre las variables dependientes de un sistema; es decir, el mecanismo de transmisión de efectos de las variables endógenas al resto del sistema y, en su caso, las condiciones de cierre del modelo. La representación econométrica estructural del dicho modelo de acuerdo con Gujarati y Porter (2010) y Greene (2018) es el siguiente:

$$y_t^T \Gamma + x_t^T B + U_t^T = 0$$

con  $t = 1, 2, \dots, n$  y donde  $y_t$  es un vector correspondiente a la  $t$ -ésima observación de  $N$  variables endógenas,  $x_t$  el vector de las  $k$  variables predeterminadas correspondientes también a la observación  $t$ -ésima,  $U_t$  es el vector de  $n$  términos de perturbación y siendo  $\Gamma$  y  $B$  las matrices que contienen los coeficientes de las variables endógenas y predeterminadas, respectivamente (Greene, 2018).

Ahora bien, para poner las variables exógenas completamente en función de las variables predeterminadas, y donde realmente se realiza el análisis el efecto de la variable causante del calentamiento global que es el dióxido de carbono, es el llamado modelo reducido del modelo de ecuaciones simultáneas.

A partir de la forma estructural que es:

$$y_t^T \Gamma + x_t^T B + U_t^T = 0$$

se obtiene la expresión para el modelo reducido que tiene la siguiente forma:

$$y_t^T = x_t^T \Pi + v_t^T = 0$$

donde

$$\Pi = -B\Gamma^{-1}$$

Si se cumplen ciertas restricciones a partir de la estimación de los parámetros de la forma reducida es posible estimar los parámetros de la forma estructural, de ahí la importancia de la forma reducida (Carter *et al.*, 2011).

En la investigación aplicada es usual que a partir del modelo teórico de ecuaciones simultáneas se plantee el modelo empírico en la parte de exposición de la metodología de la correspondiente investigación donde se incluyen las variables observadas obtenidas a partir de registros administrativos o fuentes secundarias de información.

### **3.7. EL PROBLEMA DE LA IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA DE ECUACIONES SIMULTANEAS**

De acuerdo con Gujarati y Porter (2010) el problema de la identificación pretende establecer si las estimaciones numéricas de los parámetros de una ecuación estructural pueden obtenerse de los coeficientes estimados en la forma reducida. Si puede hacerse, se dice que la ecuación particular está identificada. En caso contrario, se dice que la ecuación bajo consideración está no identificada o subidentificada.

La identificación a partir de la forma reducida, no obstante, presenta problemas porque diferentes conjuntos de ecuaciones estructurales pueden ser compatibles con el mismo conjunto de información. Es decir, una ecuación en una forma reducida dada puede ser compatible con diferentes ecuaciones estructurales o con diferentes modelos, por lo que puede ser difícil decir cuál modelo particular se está investigando. La explicación teórica al anterior hecho es altamente técnico (Greene, 2018; pp. 353 - 357) y una identificación empírica a través de ejemplos concretos de sistemas de ecuaciones simultaneas es demasiado engorroso y se pierde la claridad que la identificación debe tener y conducir a errores por la manipulación de expresiones algebraicas extensas que en caso de múltiples soluciones para el sistema simultaneo no es posible saber cuál solución es la indicada (Gujarati y Porter, 2010; pp. 692-297).

#### **3.7.1. CONDICIONES DE ORDEN Y RANGO PARA LA IDENTIFICACIÓN**

De acuerdo con Gujarati (2010), la utilización de las llamadas condiciones de orden y de rango aligeran la tarea de la identificación de las ecuaciones y proporcionan una forma sistemática de hacerlo.

Gujarati y Porter (2010) plantean el procedimiento que se sigue a continuación para identificar las ecuaciones. La notación es la siguiente:

M = número de variables endógenas en el modelo

m = número de variables endógenas en una ecuación dada

- K = número de variables predeterminadas en el modelo, incluyendo el intercepto
- k = número de variables predeterminadas en una ecuación dada

### 3.7.1.1. CONDICIÓN DE ORDEN

Una condición necesaria (pero no suficiente) para la identificación, conocida como la condición de orden, puede expresarse en dos formas diferentes pero equivalentes, de la siguiente manera

- En un modelo de  $M$  ecuaciones simultáneas, para que una ecuación esté identificada debe excluir al menos  $M - 1$  variables (endógenas y predeterminadas) que aparecen en el modelo. Si excluye exactamente  $M - 1$  variables, la ecuación está exactamente identificada. Si excluye más de  $M - 1$  variables, estará sobreidentificada.
- En un modelo de  $M$  ecuaciones simultáneas, para que una ecuación esté identificada, el número de variables predeterminadas excluidas de esa ecuación no debe ser menor que el número de variables endógenas incluidas en la ecuación menos 1, es decir:

$$K - k \geq m - 1$$

Si  $K - k = m - 1$ , la ecuación está exactamente identificada, pero  $K - k > m - 1$ , estará sobreidentificada.

### 3.7.1.2. CONDICIÓN DE RANGO

De acuerdo con Gujarati y Porter (2010) en un modelo conteniendo  $M$  ecuaciones en  $M$  variables endógenas, una ecuación está identificada si y solo si al menos un determinante diferente de cero de orden  $(M-1)$  puede ser obtenido a partir de los coeficientes de las variables (tanto endógenas como predeterminadas) excluidas de esa particular ecuación pero incluidas en las otras ecuaciones del modelo.

## **CAPÍTULO IV. REVISIÓN DE LITERATURA**

Erda *et al* (2005) en su trabajo hacen un resumen de los hallazgos clave de un proyecto exitoso realizado de 2001 a 2004 entre científicos del Reino Unido y China que tuvo como propósito desarrollar escenarios de cambio climático para china y examinar su impacto en la producción de arroz, maíz y trigo en el siglo XXI. El trabajo de modelación consideró: las variables climáticas, la irrigación, las variables del suelo y las más altas concentraciones de dióxido de carbono sobre el metabolismo de las plantas. En general, el cambio climático en sí mismo tiende a reducir el rendimiento de los cultivos, pero el efecto fertilización tiende a incrementarlo. El balance entre estos dos factores depende, en realidad, de factores tales como la disponibilidad de agua y nutrientes y la prevalencia de plagas y enfermedades, todos los cuales son afectados a su vez también por el cambio climático. El artículo también introduce material preliminar de estudios acerca del efecto fertilización del dióxido de carbono y su impacto en la calidad del cultivo.

El proyecto desarrollado por las partes cooperantes lleva el nombre de modelo regional de cambio climático (PRECIS), corre en una computadora personal de escritorio y se aplica a cualquier parte del mundo para generar predicciones detalladas sobre el cambio climático a una escala de 50x50 km o 25x25 km. Los modelos climáticos regionales son herramientas de reducción de escala, que agregan detalles a las simulaciones de modelos de circulación general elegidos y tienen una resolución mucho mayor que los modelos de circulación general y, por lo tanto, permiten una evaluación más detallada de la vulnerabilidad de un país al cambio climático.

El modelo PRECIS se utilizó para medir dos escenarios (A2 y B2) predecir los cambios en la precipitación promedio, las temperaturas diarias (mínimas y máximas) y la concentración de CO<sub>2</sub> para toda China durante el período 2070-2079. Los resultados de éstos tres parámetros para las décadas intermedias, 2040-2049 y 2010-2019, se obtuvieron mediante un método de escalado de patrón de interpolación no lineal según los niveles de concentración de CO<sub>2</sub>.

En el modelo se incluyeron las siguientes variables: a) clima (temperatura y precipitación); b) si el cultivo se riega (con un mayor rendimiento de referencia, suponiendo que no habrá límites en el suministro de agua en el futuro) o es de secano (con un rendimiento de

referencia más pequeño, sin suministro de riego en el futuro); c) efecto de la fertilización por CO<sub>2</sub>; d) variables del suelo. Los resultados de los escenarios simulados para los periodos 2010-2019, 2040-2049 y 2010-2019 en ambos modelos y enunciados en Erda *et al* (2005) fueron:

	Con fertilización de CO <sub>2</sub>	Sin fertilización de CO <sub>2</sub>
A2: Secano	Δ% rendimiento	Δ% rendimiento
A2: Irrigado	Δ% rendimiento	Δ% rendimiento
B2: Secano	Δ% rendimiento	Δ% rendimiento
B2: Irrigado	Δ% rendimiento	Δ% rendimiento

Respecto a los resultados de la modelación sobre los cultivos analizados los principales hallazgos son:

### 1) Arroz

Los promedios del cultivo a través de China se incrementaron en el escenario de simulación A2 y disminuyeron bajo el escenario B2 cuando se incluye el efecto directo del CO<sub>2</sub> en la simulación. Esto se debe a que la fertilización con CO<sub>2</sub> compensa efectivamente las disminuciones en el rendimiento causadas por una menor duración del crecimiento debido a temperaturas más altas. El efecto CO<sub>2</sub> es más evidente bajo A2 que B2. Sin el efecto directo del CO<sub>2</sub> y manteniendo las mismas fechas de siembra y variedades de arroz, es probable que los rendimientos promedio caigan bajo los escenarios de emisión A2 y B2.

### 2) Maiz

Si se incluye el efecto directo del CO<sub>2</sub>, se proyecta que los rendimientos promedio aumentarán para el maíz de secano y disminuirán para el maíz irrigado en los escenarios de emisiones A2 y B2 en la década de 2080. Sin el efecto de la fertilización con CO<sub>2</sub>, es probable que el rendimiento promedio de maíz de secano y de regadío disminuya para los escenarios de emisión A2 y B2 porque la temperatura más alta puede acortar el período de crecimiento entre 4 y 8 días. Estos resultados muestran un gran beneficio relativo para los rendimientos de maíz por el aumento de CO<sub>2</sub>. Esto contrasta con la mayoría de los experimentos de cultivos C4 que muestran cambios absolutos menores en el rendimiento debido al enriquecimiento con CO<sub>2</sub>.

### 3) Trigo

Si se incluye el efecto de la fertilización con CO<sub>2</sub>, los rendimientos promedio de trigo aumentarán en China en los años 2020, 2050 y 2080 en el escenario de emisiones A2 para el trigo de secano y el de regadío. La variabilidad espacial es de nuevo grande. La respuesta del trigo a futuros aumentos atmosféricos de CO<sub>2</sub> probablemente limitará significativamente los aumentos potenciales en el rendimiento. Pero para que el trigo irrigado se beneficie de los efectos de la fertilización con CO<sub>2</sub>, los nutrientes deben ser no limitativos. Sin la fertilización con CO<sub>2</sub>, se espera que los rendimientos de trigo sean aproximadamente 20% y 10% más bajos para 2080 en comparación con los rendimientos actuales para los escenarios de emisiones A2 y B2, respectivamente.

El artículo de Erda *et al* (2005) concluye que los modelos sugieren que el cambio climático sin la fertilización con CO<sub>2</sub> podría reducir los rendimientos de arroz, maíz y trigo hasta en un 18–37% en los próximos 20–80 años, no obstante los resultados fueron altamente variables a través del espacio. Las interacciones del CO<sub>2</sub> con factores limitantes, especialmente el agua y el nitrógeno, son cada vez mejor entendidas y capaces de modular fuertemente las respuestas de crecimiento observadas en los cultivos.

Hendrey & Kimball (1994) en su trabajo "The FACE program" también hacen un recuento del programa experimental, integrado, cooperativo y de gran escala denominado FACE (Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment) que consistió en la exposición de plantas a elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub>. El programa fue financiado por el Departamento de Agricultura y el Departamento de Energía de los Estados Unidos. El programa tuvo como metas: (1) evaluar los efectos del incremento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> sobre las plantas y ecosistemas; (2) contribuir a una evaluación de la regulación de la retroalimentación de la planta terrestre de la tasa de intercambio de CO<sub>2</sub> con la atmósfera. La primera meta está relacionada con la seguridad alimentaria en el futuro y producción de fibra. La segunda meta es a más largo plazo, se decía en aquel entonces, y relacionada a la predicción y la tasa de cambio climático global. Ambos temas son centrales para evaluar los cambios ecológicos globales que pueden resultar del uso de combustibles fósiles por el hombre.

De esta manera el artículo de Hendrey & Kimball (1994) tiene el propósito de presentar una sinopsis de los argumentos para realizar experimentos con el protocolo FACE y una



descripción general del mismo, estableciendo así el escenario para las otras investigaciones publicadas en el mismo número del journal.

En primer lugar se expone el “argumento” del incremento en el CO<sub>2</sub>. El fin del apartado es exponer puntualmente las concentraciones de carbono en distintas fechas. Basado en el IPCC (Panel Internacional contra el Cambio Climático) (1992) para las fechas en que se publicó el artículo la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera era de 335 ppm mientras que en la era preindustrial era menor a 280 ppm y se esperaba para aquellas fechas que la concentración de CO<sub>2</sub> se incrementara anualmente en 1.8 ppm. No obstante, se señala que dicha estimación no considera el escenario del potencial acelerado de secuestro de carbono por las plantas debido al efecto fertilización, lo cual se mencionaba es un área de gran incertidumbre.

En relación a la respuesta de las plantas al incremento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera se dice que éstas tienen el potencial de alterar el funcionamiento fisiológico y crecimiento de las plantas y la estructura de comunidades de plantas. Se han realizado cientos de experimentos sobre los efectos del enriquecimiento de CO<sub>2</sub> en muchas especies de plantas utilizando varios tipos de cámaras cerradas. En su mayor parte, estos estudios se han llevado a cabo en monocultivos ricos en nutrientes y bien regados y, en general, han encontrado que el aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera aumenta el rendimiento cuántico fotosintético, la fotosíntesis neta, la biomasa, el rendimiento de las semillas, la eficiencia del uso de la luz y el uso de nutrientes, potencial hídrico del agua y eficiencia de su uso. La fotosíntesis y el crecimiento se estimulan mucho más en las plantas C3 que en las plantas C4.

Respecto a la retroalimentación de la vegetación terrestre sobre la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> se señala que la biota terrestre del hemisferio norte desempeña un papel clave en la regulación de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>. Un sumidero de CO<sub>2</sub> atmosférico en el rango  $(2.0 - 3.4) \times 10^{15}$  g/año en la vegetación terrestre del hemisferio norte fue postulado por Tans *et al* (1990) sobre la base de datos de distribución de latitudes globales de CO<sub>2</sub> y un modelo de trazador atmosférico. El análisis de la oscilación anual en el CO<sub>2</sub> atmosférico ha demostrado que la amplitud anual está aumentando a un ritmo de aproximadamente 1% por año. Esto es atribuido por algunos analistas a la fertilización de la vegetación terrestre, particularmente los bosques de zonas templadas del hemisferio

norte, por el aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Si bien la deconvolución de los datos de concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se puede ver como un análisis "de arriba a abajo" de los efectos del enriquecimiento de CO<sub>2</sub> en las plantas terrestres, un análisis reciente de "abajo hacia arriba", basado en datos de volúmenes forestales regionales, en particular con datos nuevos de la extinta Unión Soviética, los datos de la antigua URSS indican que aproximadamente  $0.7 \times 10^{15}$  g de carbono se extraen anualmente de la atmósfera para el almacenamiento a largo plazo en bosques templados y boreales en todo el hemisferio norte. También hay pruebas limitadas de que los cambios en las comunidades de plantas naturales pueden ocurrir en respuesta al aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Se ha reportado un aumento en la abundancia de arbustos leñosos (vegetación C3) a expensas de los pastos (vegetación C4) en grandes extensiones de tierra en los cinco continentes.

Ceusters y Borland (2010) en su investigación analizan el impacto de las altas concentraciones de dióxido de carbono en el crecimiento y fisiología de las plantas con ácido crasuláceo. En la parte introductoria de su trabajo se señala que el metabolismo ácido de las crasuláceas es una forma especializada de asimilación del carbono fotosintético que se estima está presente en aproximadamente 7% de las especies de plantas vasculares, muchas de las cuales dominan la producción de biomasa vegetal de regiones áridas, marginales del mundo. El CAM facilita la captación de dióxido de carbono en la noche, mejorando así la eficiencia en el uso de agua de la asimilación de carbono, particularmente en hábitats limitados por el agua. Las especies de CAM de importancia agronómica incluyen la piña, el nopal, la pitahaya y varias de las especies de agaves que se cultivan para obtener fibra y alcohol. Otras especies de CAM con importancia económica incluyen las bromelias y las orquídeas tropicales epífitas y terrestres, que se cultivan como plantas ornamentales. El potencial de las especies CAM de alto rendimiento como materia prima para la producción de bioenergía en tierras marginales y degradadas se ha destacado recientemente y requiere un entendimiento de cómo el aumento del dióxido de carbono atmosférico asociado con el cambio climático global puede afectar el crecimiento y la productividad de las plantas CAM. Del mismo modo, la producción sostenible de cultivos de CAM ornamentales necesita información sobre cómo las diferentes especies y variedades responden al enriquecimiento con dióxido de carbono, un método que se usa ampliamente para reducir los costos de energía de la producción en invernaderos. El objetivo de esta revisión es describir las propiedades bioquímicas y fisiológicas de la CAM y considerar cómo se puede esperar que

las especies de CAM respondan a la vida en un mundo de CO<sub>2</sub> más alto, en términos de ganancia neta de carbono, crecimiento, anatomía, morfología y eficiencia en el uso del agua (WUE).

Ceusters y Borland (2010) afirman que la mayoría de los géneros de plantas modernas evolucionaron en el Terciario bajo CO<sub>2</sub> en una atmósfera con concentración de carbono de 180–240 ppm, por lo que el enriquecimiento antropogénico actual de dióxido de carbono representa un nuevo desafío para la vida vegetal, es decir, que enfrenta la abundancia repentina de un recurso tradicionalmente escaso. Los datos experimentales muestran de manera casi unívoca una estimulación de la fotosíntesis de la hoja C3 en condiciones de exposición elevada al CO<sub>2</sub>, que solo se satura a aproximadamente 1,000 ppm de CO<sub>2</sub>. La respuesta de C3 al CO<sub>2</sub> elevado se atribuye al hecho de que la ribulosa -1,5 - bisfosfato carboxilasa / oxigenasa (Rubisco) no está saturada en el CO<sub>2</sub> atmosférico actual y la fotorrespiración puede dar como resultado reducciones significativas en el rendimiento de la planta.

Los datos experimentales muestran de manera casi unívoca una estimulación de la fotosíntesis de la hoja C3 en condiciones de exposición elevada al CO<sub>2</sub>, que sólo se satura a aproximadamente 1,000 ppm de CO<sub>2</sub>. La respuesta de C3 al CO<sub>2</sub> elevado se atribuye al hecho de que la ribulosa -1,5-bisfosfato carboxilasa / oxigenasa (Rubisco) no está saturada en el CO<sub>2</sub> atmosférico actual y la fotorrespiración puede dar como resultado reducciones significativas en el rendimiento de la planta. El mecanismo de concentración de carbono C4 es una consecuencia de la captación previa de CO<sub>2</sub> mediado a través de la fosfoenol piruvato carboxilasa (PEPC), que resulta en una reducción efecto va del CO<sub>2</sub> en las células mesófilas y produce ácidos C4 que posteriormente se descarboxilan en las células de la vaina del haz.

Las plantas C4 evitan la fotorrespiración debido a la saturación de Rubisco con CO<sub>2</sub>, y en este contexto bioquímico, no se esperaría que las plantas C4 presenten mayores tasas de fotosíntesis en un entorno con más CO<sub>2</sub>. Sin embargo, debido a la reducción típica de la conductancia estomática en plantas expuestas a CO<sub>2</sub> atmosférico elevado, las mejoras en el rendimiento de las plantas C4 podrían ocurrir en un mundo con más CO<sub>2</sub> al mejorar el estrés por sequía a corto plazo mediante la conservación de la humedad del suelo.

Para las plantas CAM que usan tanto Rubisco como PEPC para absorber  $\text{CO}_2$ , y que son muy conservadoras en el uso del agua, la respuesta a la elevada cantidad de  $\text{CO}_2$  es menos fácil de predecir. Los procesos de carboxilación y las consecuencias de conservación de agua de la CAM se pueden describir en cuatro fases que ocurren durante un ciclo de luz / oscuridad de 24 h. La fase I representa el período de oscuridad cuando los estomas están abiertos y el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera y / o la respiración se fija en el citosol mediante PEPC, lo que da como resultado la formación de malato.

Para las plantas CAM que usan tanto Rubisco como PEPC para absorber  $\text{CO}_2$ , y que son muy conservadoras en el uso del agua, la respuesta a la elevada  $\text{CO}_2$  es menos fácil de predecir. Los procesos de carboxilación y las consecuencias de conservación de agua de la CAM se pueden describir en cuatro fases que ocurren durante un ciclo de luz / oscuridad de 24 horas. La fase I representa el período de oscuridad cuando los estomas están abiertos y el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera y / o la respiración se fija en el citosol mediante PEPC, lo que da como resultado la formación de malato.

El PEP aceptador de  $\text{CO}_2$  se forma a través de la descomposición glucolítica de los polisacáridos de almacenamiento (por ejemplo, almidón) o azúcares solubles (por ejemplo, glucosa, fructosa, sacarosa) ensamblados durante el día anterior. La fase II al amanecer indica que el cambio entre la carboxilación de C4 y C3 y la captación de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera todavía parece estar dominado en gran medida por PEPC. Rubisco permanece en un estado de activación bajo hasta que la PEPC se desactiva por desfosforilación. Durante la mitad del día (fase III), el intercambio de gases se reduce mediante el cierre del estoma como resultado de la alta presión parcial intercelular de  $\text{CO}_2$  generada por la descarboxilación del malato.

Durante esta fase IV, el  $\text{CO}_2$  se fija y se asimila principalmente a través del Rubisco, con una proporción importante del carbono fijado en particiones hacia la síntesis de azúcares para exportación y crecimiento. En la última parte de la fase IV, se puede detectar la carboxilación de C4 por PEPC. Las contribuciones relativas de la carboxilación de C3 y C4 a la ganancia neta de carbono de 24 horas se determinan mediante la interacción del control circadiano y del metabolito, asegurando una modulación flexible de la oferta y la demanda de carbono en diferentes condiciones ambientales. Como consecuencia de esta flexibilidad

metabólica, se ha informado un amplio y aparentemente contradictorio rango de respuestas fotosintéticas a las elevadas emisiones de CO<sub>2</sub> en las especies de CAM.

#### 4.1 CRECIMIENTO Y MEJORA DE LA BIOMASA DE PLANTAS DE CAM BAJO CO<sub>2</sub> ELEVADO

En comparación con las rutas C3 y C4, las plantas CAM aún no cuentan con suficientes estudios representativos bajo concentraciones de CO<sub>2</sub> altas en la atmósfera para permitir comparaciones sólidas de los potenciales de mejora de la biomasa entre diferentes rutas fotosintéticas en un mundo con más CO<sub>2</sub>. Sobre la base de los limitados datos disponibles (aproximadamente diez especies estudiadas). Se ha calculado que hay un aumento promedio en materia seca del 35% para las plantas de CAM al estar estas expuestas aproximadamente tres meses con concentraciones de dióxido de carbono de 650 - 750 ppm. Esto se puede ver en el Cuadro 9.

De acuerdo con Ceusters y Borland (2010, p. 175), la respuesta de la biomasa de las plantas CAM a la exposición a largo plazo (mayor a un mes) a concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de casi el doble como un aumento porcentual sobre los controles mantenidos en concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera durante el mismo período se muestra en el Cuadro 8.

#### CUADRO 8. AUMENTO DE LA BIOMASA DE LAS CRASULÁCEAS BAJO 2-CO<sub>2</sub>

Especie	Biomasa (incremento %)
<i>Agave deserti</i>	30 - 31
<i>Agave vilmoriniana</i>	28
<i>Aechmea fasciata</i> "Primera"	- 25
<i>Aechmea magdalenae</i>	36
<i>Aechmea</i> "Maya"	0
<i>Ananas comosus</i> (piña americana)	- 10
	23
<i>Ferrocactus acanthodes</i>	30
<i>Opuntia ficus-indica</i>	21 - 55
<i>Kalanchoë blossfeldiana</i>	37
<i>Kalanchoë pinnata</i>	42 - 51

Fuente: Ceusters y Borland (2010, p. 175)

Es importante remarcar el caso de la piña americana, que es la crasulacea de mayor importancia económica, y cuyo caso es variable. En el caso de una pérdida del 10% de

biomasa en la piña es mencionada en Ziska (1991) y el porcentaje de que se incrementa la biomasa en 23% es mencionado en Zhu *et al* (1999).

Del análisis de las relaciones de aumento de la biomasa (relación entre la masa total de plantas de plantas cultivadas con alto contenido de CO<sub>2</sub> y la de las plantas cultivadas en niveles de control) mostraron un incremento de la biomasa de 23% para CAM, que es intermedia entre la registrada para las plantas C3 y C4. No obstante esta es una generalización por lo que se debe tomar con reserva.

En la mayoría de las investigaciones del impacto de los aumentos del CO<sub>2</sub> en la atmosfera, el enfoque es a estudiar sus efectos sobre la fisiología y biología vegetal; relaciones suelo-planta-atmosfera, pero también, aunque en una menor cantidad, se estudian los impactos del efecto fertilización sobre los cultivos de importancia económica, los cuales a su vez afectan las economías de países y regiones. A continuación, se revisan algunas fuentes consultadas sobre estos tópicos.

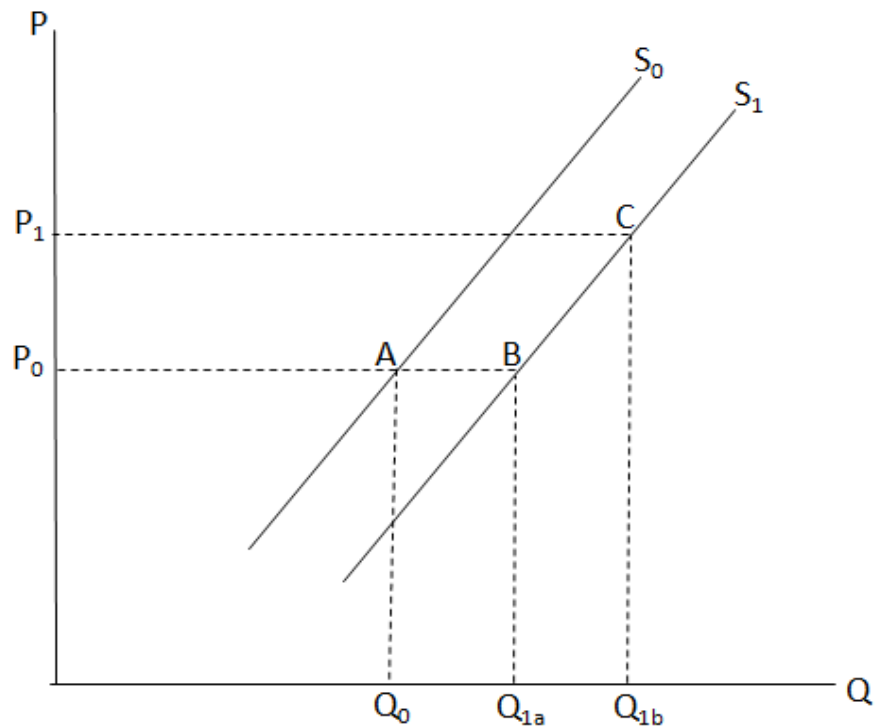
Darwin y Kennedy (2000) señalan que el incremento en el CO<sub>2</sub> atmosférico mejora el uso del agua en algunas plantas y como un fertilizante en otras, lo que significa que los incrementos de CO<sub>2</sub> pueden inducir a través del mundo incrementos en la productividad agrícola que tenderían a compensar algunas de las pérdidas económicas que podrían ser generadas en algunas áreas por los efectos climáticos del CO<sub>2</sub> atmosférica y otros gases de invernadero. Estos dos autores a su vez revisan dos estudios que citan en su investigación. Estos trabajos son Rosenzweig *et al* (1993) y Reilly and Hohmann (1993). Los aumentos de rendimiento utilizados en estos tres estudios se basan en un aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de 225 ppm. Estos aumentos de rendimiento forman la base para los cambios iniciales de la oferta en los modelos económicos. Los modelos económicos luego simulan ajustes adicionales, incluidos ajustes adicionales en los suministros de cultivos, ya que computan nuevos precios de equilibrio, cantidades y/o medidas de bienestar.

El supuesto básico que subyace a los cambios de oferta iniciales utilizados para simular la fertilización con CO<sub>2</sub> en estos estudios, es que los cambios porcentuales en la oferta son iguales a los cambios porcentuales en el rendimiento. Sin embargo, los cambios en el rendimiento mencionados en Rosenzweig *et al* (1993) se deben no solo a los aumentos en la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico, sino también a los aumentos de nutrientes y otros

insumos. El supuesto, por lo tanto, de que los cambios porcentuales en la oferta son iguales a estos cambios porcentuales en el rendimiento no es válido. Confunde los cambios en la oferta con los cambios en la cantidad ofrecida. Este error lleva a una sobreestimación de los beneficios económicos de la fertilización con CO<sub>2</sub>. El objetivo de Darwin y Kennedy (2000) en su investigación es proporcionar estimaciones del tamaño de esta sobreestimación. Ellos utilizan los mismos aumentos de rendimiento utilizados en estudios anteriores. Posteriormente estiman los beneficios económicos basados en el supuesto de que los cambios porcentuales en la oferta y los cambios porcentuales en el rendimiento son iguales. Además, también estiman los beneficios económicos basados en supuestos alternativos acerca de cómo los aumentos en la oferta y el rendimiento podrían estar relacionados entre sí. Las estimaciones de cómo asumir la igualdad entre los cambios porcentuales en la oferta y el rendimiento sobreestiman los beneficios son obtenidos comparando los beneficios de ese supuesto con los beneficios de los supuestos alternativos.

Para cumplir con su objetivo de su investigación el primer paso de Darwin y Kennedy (2000) comienzan por delinear la diferencia entre un cambio en la oferta y un cambio en la cantidad ofrecida para relacionar matemáticamente los cambios en las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> con los cambios en el suministro de cultivos. Finalmente, relacionan matemáticamente los cambios en el suministro de cultivos con los cambios en el rendimiento de los cultivos a partir de estudios agronómicos.

# GRÁFICA 1. CAMBIOS EN LA OFERTA VERSUS CAMBIOS EN LA CANTIDAD SUMINISTRADA



Fuente: Darwin y Kennedy (2000).

En primer lugar se expone el concepto de oferta económica utilizando la Gráfica 1. Señalan que como indican las curvas  $S_0$  y  $S_1$ , la oferta de una mercancía es la relación entre la cantidad producida y su precio. El precio, se dice, es equivalente al costo marginal de producir la mercancía. Como tal, cambios en la oferta están asociados con cambios en los costos de producción, que son típicamente causados por cambios en los precios de los insumos, tecnología o condiciones medioambientales. Así, un cambio en la oferta es representado por el cambio desde el punto A en la curva de oferta  $S_0$  al punto B en la curva de oferta  $S_1$ .

Los cambios en la cantidad suministrada, sin embargo, están asociadas con cambios en los costos de producción causados por cambios en las cantidades de los insumos. Un cambio en la cantidad suministrada es gráficamente representada por el movimiento desde el punto B al punto C en la curva de oferta  $S_1$ . El incremento en la producción desde  $Q_0$  a  $Q_{1b}$  en la Figura 1, por lo tanto, está compuesta tanto de un incremento en la oferta (de  $Q_0$  a  $Q_{1a}$ ) y un incremento en la cantidad suministrada (de  $Q_{1a}$  a  $Q_{1b}$ ).



## CAPÍTULO V. METODOLOGÍA

### 5.1 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DEL MODELO

Para realizar este análisis se han empleado datos estadísticos de la piña (FAOSTAT, 2019) y una serie de tiempo de las normales climatológicas y CO<sub>2</sub> (NOAA, 2018).

En el Cuadro 9 se reportan las variables utilizadas para la estimación del modelo empírico propuesto.

CUADRO 9. VARIABLES UTILIZADAS EN LA ESTIMACIÓN DEL MODELO EMPÍRICO DE LA PIÑA

Variable	Descripción	Escala	Unidades
RENPIN	Rendimiento de piña	Continua	ton/ha
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	Continua	ppm
PREC	Precipitación media anual	Continua	mm/año
TEMP	Temperatura media anual	Continua	grados centígrados

Nota: ppm = partes por millón; mm = milímetros.

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 10 se presentan las fuentes y detalles sobre las fuentes de las variables utilizadas y algunas precisiones sobre las mismas.

CUADRO 10. FUENTES DE LAS VARIABLES UTILIZADAS EN EL MODELO EMPÍRICO

Rendimiento de la piña (ton/ha)	Para todo el periodo de estudio esta variable se obtuvo a partir de la base de datos FAOSTAT en línea.
Dióxido de carbono (ppm)	Esta variable se obtuvo de los conjuntos de datos disponibles para descargar en la página del Laboratorio de Investigación del Sistema Tierra (ESRL) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos. El periodo corresponde a 1959 a 2017.
Precipitación media anual (mm)	Esta variable se obtuvo de los conjuntos de datos disponibles para descarga en la página del Banco Mundial. La serie corresponde al periodo 1959 a 2015 no encontrándose disponibles los años de 2016 y 2017 todavía.
Temperatura Media Anual (°C)	<i>Idem</i>

Fuente: Elaboración propia en base a FAOSTAT (2019) y Banco Mundial (2019).

Respecto a las variables utilizadas es necesario hacer algunas precisiones. No se utilizaron las estadísticas disponibles para en el micrositio del SIAP por inconsistencias en las cifras de 2001 y varios años más.

La precipitación anual y la temperatura anual corresponden a promedios, según se clara en la página electrónica del Banco Mundial (2018) de donde se descargaron las respectivas series de tiempo, de todo el territorio nacional. Los enlaces a dichas página se encuentran en la bibliografía.

Respecto a la variable de dióxido de carbono es necesario comentar que la misma corresponde a los registros que se llevan en el Monte Mauna, Hawaii, Estados Unidos, por parte del Earth System Research Laboratory (ESRL, 2019). Si bien es un registro global de esta variable, la misma se considera como una variable *proxi* a un registro que de este gas podría llevarse para México.

## 5.2 FORMAS FUNCIONALES PROPUESTAS Y SIGNOS ESPERADOS

De acuerdo con Gujarati y Porter (2005), Greene (2018) y Carter, Griffiths & Lim (2011) el sistema de ecuaciones simultáneas del modelo empírico para estimar el efecto de las normales climáticas y la concentración del dióxido de carbono sobre el rendimiento de la piña es el descrito por las dos siguientes formas funcionales<sup>5</sup>.

$$RENPIN = \beta_{11} + \beta_{12}PMA + \beta_{13}TEMP + \varepsilon_1$$

$$TEMP = \beta_{21} + \beta_{22}CO2 + \varepsilon_2$$

donde adicionalmente a las definiciones de las variables dadas en el Cuadro 10, en la respectiva ecuación se adiciona un término de error aleatorio  $\varepsilon$  que incorpora los efectos de errores de medición de las variables, choques aleatorios sobre las variables, otros (.

Los parámetros  $\beta_{11}$  y  $\beta_{21}$  corresponden a la ordenada origen (intercepto) de la respectiva ecuación y corresponden al valor que toma la respectiva variable dependiente cuando las variables independientes toman el valor de cero. Adicionalmente,  $\beta_{12}$ ,  $\beta_{13}$  y  $\beta_{22}$

---

<sup>5</sup> En el presente documento se utilizará indistintamente el concepto de intercepto o de ordenada al origen, que es el nombre para denotar al punto donde una curva corta el eje de las ordenadas (eje Y).

corresponden al efecto marginal de una unidad adicional de la respectiva variable independiente sobre la variable respuesta.

Los signos esperados de los parámetros de interés son los siguientes:

- Se espera una relación directa entre la precipitación media anual y el rendimiento de la piña por lo tanto el parámetro  $\beta_{12} > 0$
- Se espera una relación directa entre la temperatura media anual y el rendimiento de la piña y por lo tanto el parámetro  $\beta_{13} > 0$
- Se espera una relación directa entre la temperatura media anual y la concentración de dióxido de carbono y por lo tanto el parámetro  $\beta_{22} > 0$

La dirección de la relación causal es del dióxido de carbono hacia la temperatura y de la temperatura hacia el rendimiento de la piña. La determinación de la causalidad se estableció en base al análisis exploratorio de las relaciones entre variables. Al insertar directamente la variable de dióxido de carbono como variable exógena sobre el rendimiento de la piña como variable endógena, no se encontró significancia estadística del parámetro estimado asociado al dióxido de carbono; sin embargo, al analizar la relación la causalidad entre la temperatura como variable endógena y la concentración de dióxido de carbono como variable exógena se observó una alta significancia estadística del parámetro estimado como el porcentaje de variabilidad explicado por el dióxido de carbono en el modelo.

### 5.3 IDENTIFICACIÓN DE LAS ECUACIONES DEL MODELO

Como se ha mencionado en el marco teórico, una vez que se han definido las formas funcionales y enunciado el modelo empírico a estimar es necesario identificar las ecuaciones del modelo. Con dicho propósito se realiza la identificación de las ecuaciones aplicando las condiciones de orden y rango siguiendo a Gujarati y Porter (2010). A partir del modelo

$$\begin{aligned} RENPIN - \beta_{11} - \beta_{12}PMA - \beta_{13}TEMP &= \varepsilon_1 \\ TEMP - \beta_{21} - \beta_{22}CO2 &= \varepsilon_2 \end{aligned}$$

se procede de la forma que se expone a continuación empezando por disponer las ecuaciones como se muestra en el Cuadro 11.

CUADRO 11. CONDICIONES DE ORDEN DEL MODELO DE ECUACIONES SIMULTÁNEAS

Ecuación	1	<i>RENPIN</i>	<i>TEMP</i>	<i>PMA</i>	<i>CO2</i>
1	$-\beta_{11}$	-1	$-\beta_{13}$	$-\beta_{12}$	0
2	$-\beta_{21}$	0	-1	0	$-\beta_{22}$

Fuente: Elaboración con base a Gujarati y Porter (2010).

### 5.3.1 CONDICIÓN NECESARIA

Datos del modelo

- Número de ecuaciones: 2
- Número de variables endógenas:  $M= 2$  (*RENPIN*, *TEMP*)
- Numero de variables predeterminadas:  $K = 4$  (incluidos los interceptos)
- Número de variables exógenas:  $2$  (*PMA*, *CO2*)

#### 5.3.1.1 PRIMERA ECUACIÓN

- Numero de variables endógenas  $m = 2$
- Número de variables predeterminadas  $k = 2$

Por lo tanto:

- $K - k = 4 - 2$
- $M - m = 2 - 1$

Por lo tanto,  $K - k = 2 > m - 1 = 2 - 1 = 1$ ; es decir  $2 > 1$ , por lo que la primera ecuación esta sobre identificada.

#### 5.3.1.2 SEGUNDA ECUACIÓN

- Numero de variables endógenas  $m = 1$
- Número de variables predeterminadas  $k = 2$

Por lo tanto:

- $K - k = 4 - 2 = 2$
- $M - m = 2 - 1 = 1$

Por lo tanto,  $K - k = 2 > m - 1 = 2 - 1 = 1$ ; es decir  $2 > 1$ , por lo que la primera ecuación también está sobre identificada.

### 5.3.2 CONDICIÓN DE RANGO

Siguiendo a Gujarati y Porter (2010), se observa que en la primera ecuación la variable  $CO_2$  está excluida, por lo que sí es posible encontrar una matriz (2x2) cuyo determinante sea distinto de cero, luego entonces la ecuación estará identificada. El formar la siguiente matriz  $A$  y obtener su determinante se tiene que:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & \beta_{22} \end{bmatrix}$$

$$|A| = \beta_{22}$$

Como se observa el determinante de la matriz  $A$  es distinto de cero por lo que la ecuación está identificada.

De forma análoga, se observa que la segunda ecuación excluye a la variable PMA, por lo que es posible formar la siguiente matriz  $B$  y obtener su determinante:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & \beta_{12} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$|B| = \beta_{12}$$

El determinante de la matriz  $B$  es diferente de cero, por lo que la segunda ecuación también está identificada y por lo tanto es posible obtener una solución para el sistema de ecuaciones simultáneas estimando sus parámetros.

### **5.3.3 ESTIMACIÓN DEL MODELO**

Una vez que se realizó la identificación del modelo de ecuaciones simultáneas, este se corrió en el Sistema SAS 9.0. La salida en extenso generada por la corrida es la mostrada en el Anexo D.

## CAPÍTULO VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 RESULTADOS ESTADÍSTICOS DEL MODELO ESTRUCTURAL

Los estadísticos descriptivos de las variables utilizadas son los mostrados en el Cuadro 12. Las unidades para cada variable son las mismas que las descritas en la última columna del Cuadro 10 del capítulo anterior.

**CUADRO 12. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LAS VARIABLES**

Variable	Media	Desviación estándar	Valor máximo	Valor mínimo
RENPIN	38.82	7.86	52.10	22.10
CO <sub>2</sub>	352.87	24.95	400.88	317.64
PREC	747.33	62.67	912.73	631.86
TEMP	20.81	0.44	21.65	19.90

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del modelo estructural de ecuaciones simultáneas recursivo, estimado mediante mínimos cuadrados en dos etapas, se presentan en el Cuadro 13.

**CUADRO 13. EFECTO DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS SOBRE EL RENDIMIENTO DE LA PIÑA**

Variable	Intercepto.	PREC	TEMP	CO <sub>2</sub>	R <sup>2</sup> <sub>ajust</sub>	DW	F
<b>RENPIN</b>							
Coeficiente		0.03616			0.27407	0.3781	11.19
	-253.821	7	12.7618				
Error estándar	(62.5978)	(0.01684)	(2.87636)				
Razón de <i>t</i>	-4.05	2.15	4.44				
<b>TEMP</b>							
Coeficiente	15.83106			0.014119	0.63215	1.5867	93.80
Error estándar	(0.51569)			(0.00145)			
Razón de <i>t</i>	30.70			9.69			

Fuente: Elaboración propia.

Para probar la significancia global del modelo utilizamos el estadístico *F* para probar la hipótesis nula de que todas las pendientes del modelo son al mismo tiempo cero versus la hipótesis alternativa de que no todas las pendientes del modelo son cero. Para poder probar

la significancia global del modelo se calcula el valor crítico de la F de tablas con  $(k-1, n-k)$  grados de libertad y 95% de confiabilidad tenemos. De esta manera tenemos:

$$F_{(4-1, 55-4)} = F_{(3, 51)} = 3.15$$

Al comparar el F calculado con el F tablas se obtiene que

$$F_{cal} = 11.19 > F_{(3,51)} = 3.15$$

es decir:

$$F_{cal} > F_{tablas}$$

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y acepta la hipótesis alternativa por lo que se concluye que el modelo es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95%.

De acuerdo con el coeficiente de determinación del  $R^2$  se observa que en la primera ecuación éste toma un valor de 0.274; es decir que la precipitación y la temperatura explican el 27.4% de la varianza total de la variable explicada; es decir, del rendimiento de la piña. En la segunda ecuación, se observa que el  $R^2$  es 0.632, lo que implica que la variable concentración de dióxido de carbono en la atmosfera explica 63.2% de la varianza total de la temperatura.

El análisis estadístico permite observar que a nivel individual los parámetros de interés estimados son estadísticamente distintos de cero. Por ejemplo, en la ecuación del rendimiento, la razón de  $t$  asociado a la precipitación media anual es de 2.15, implicando que el mismo es estadísticamente distinto de cero. La razón de  $t$  asociado a la temperatura media anual es de 4.44, indicando que dicho parámetro es estadísticamente distinto de cero al 95% de significancia.

## 6.2 RESULTADOS DEL MODELO REDUCIDO

Ahora bien, no obstante, la utilidad del modelo estructural para estudiar la relación de las variables climáticas y del dióxido de carbono con el rendimiento de la piña, en el mismo no es posible observar directamente cual es el efecto del incremento de la concentración de carbono orgánico en la atmosfera sobre el rendimiento de la piña. Esto es posible a través del modelo reducido de ecuaciones simultáneas. Los parámetros estimados de este modelo son los indicados en el Cuadro 14.



CUADRO 14. PARÁMETROS ESTIMADOS DEL MODELO REDUCIDO

Variable exógena	Intercepto	PREC	CO <sub>2</sub>
RENPIN	-51.788	0.036167	0.180189
TEMP	15.83106		0.014119

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de los cambios marginales de los parámetros de la forma reducida permite observar lo siguiente en el largo plazo:

- El incremento de una parte por millón en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera incrementará en el largo plazo el rendimiento de la piña en aproximadamente 0.18 ton/ha.
- Este resultado es el de mayor relevancia pues muestra en cifra concretas que si en 57 años el CO<sub>2</sub> se ha incrementado en la atmosfera en 90.9 partes por millón, entonces el rendimiento de la piña se ha incrementado en 16.4 toneladas por hectárea.
- El incremento de un milímetro de precipitación incrementara en el largo plazo el rendimiento de la piña en 0.0362 ton/ha, lo que implica que en un periodo de 57 años el rendimiento de piña por hectárea se ha incrementado 3.3 toneladas por hectárea.
- El incremento de una parte por millón de concentración de CO<sub>2</sub> en la atmosfera incrementara en el largo plazo 0.014 grados centígrados la temperatura media.
- Este resultado implica que en 57 años la temperatura se ha incrementado en 1.3 grados centígrados.

### 6.3 ELASTICIDADES DE LA FORMA REDUCIDA

Una vez que se han estimado los parámetros del modelo reducido, el análisis meramente estadístico puede complementarse con el análisis de las elasticidades. El cálculo de las elasticidades en el modelo reducido se realiza como se muestra en el Anexo D y un resumen de las mismas se muestra en el Cuadro 15.

CUADRO 15. ELASTICIDADES EN EL MODELO REDUCIDO

Variable	PREC	CO <sub>2</sub>
RENPIN	0.69616292	1.63769896
TEMP		0.23937683

Fuente: Elaboración propia.

La interpretación de las elasticidades de la forma reducida se explica a continuación:

- Elasticidad de la precipitación media anual respecto del rendimiento de la piña:

Esta elasticidad resulto ser de 0.696; lo que en el largo plazo implica que sí la precipitación media anual se incrementa en un 1%, el rendimiento de la piña se incrementará en 0.696%.

- Elasticidad de la concentración de CO<sub>2</sub> respecto del rendimiento de la piña:

Esta elasticidad fue de 1.64; lo que implica que en el largo plazo sí la concentración de dióxido de carbono se incrementa en 1%, el rendimiento de la piña se incrementará 1.64%.

- Elasticidad de la concentración de CO<sub>2</sub> respecto de la temperatura

Esta elasticidad fue de 0.2394; esto significa que en el largo plazo que sí la concentración de CO<sub>2</sub> se incrementa en 1%, la temperatura se incrementara en 0.24%.

## **CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1. CONCLUSIONES**

El efecto-fertilización de CO<sub>2</sub> sobre el rendimiento es significativo y distinto de cero. En específico, encontramos que un aumento de un 1% en la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico acarrea un aumento en el rendimiento de piña de 1.64%.

El efecto de las normales climatológicas sobre el rendimiento es significativo y distinto de cero.

El paquete tecnológico (que atribuimos a los factores no contemplados en nuestro modelo estructural) explica la mayor parte de los cambios de rendimiento en el periodo analizado.

El dióxido de carbono se ha incrementado sostenidamente desde finales del siglo XIX y en los años del estudio 1961 a 2017 pasado de una concentración de 317.64 partes por millón a 408.52 partes por millón lo que implica una tasa de crecimiento media anual de 0.46%.

La temperatura promedio en México se ha incrementado de 20.52 grados centígrados en 1961 a 21.83 grados centígrados en 2017, lo que implica un incremento en 1.31 grados centígrados en 57 años.

Las consecuencias del incremento del dióxido de carbono sobre los tres grupos de plantas (C3, C4 y CAM) y en particular de los cultivos de interés económico y básicos es mejorar la eficiencia de la fotosíntesis y por lo tanto incrementar la producción de biomasa en rangos que pueden variar de 15% a 45% siendo este el llamado efecto fertilización causado por el aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera a causa de la quema de combustibles fósiles, incendios forestales, quema de pastos y acahuales para siembra, quema de cultivos como la caña de azúcar, entre otros.

El modelo estructural de ecuaciones simultáneas estimadas para analizar el efecto del incremento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera sobre el rendimiento de la piña resultó ser significativo estadísticamente ( $p < 0.0001$ ).

El coeficiente de determinación  $R^2$  de la primera ecuación, que expresa el rendimiento de la piña como función de la precipitación y la temperatura, resultó ser de 0.274; es decir la variabilidad explicada por estas dos variables en el rendimiento de la piña es del 27.4%.

El coeficiente de determinación  $R^2$  de la segunda ecuación, que expresa la temperatura como función de la concentración de carbono, fue de 0.632; es decir la variabilidad explicada por la concentración de carbono en la atmosfera sobre la temperatura es de 63.2%.

A nivel individual los parámetros estimados de cada ecuación resultaron ser también significativos según lo muestra el estadístico  $t$  cuyos valores resultaron ser mayores que 2.

- El principal resultado del estudio ha mostrado que el efecto fertilización del  $\text{CO}_2$  en el largo plazo ha incrementado el rendimiento de la piña en 16.4 toneladas por hectárea, lo que muestra que, para esta crasulácea de importancia económica en México, el cambio climático puede resultar positivo.

Este resultado es obtenido sin considerar otras variables que indudablemente intervienen en el proceso de crecimiento de la piña como son plagas y enfermedades, uso de un paquete tecnológico, entre otros.

- La otra normal meteorológica de importancia en el cambio climático es la precipitación, la cual en el periodo de estudio de 57 años mostró que el aumento de la temperatura en 1.3 grados centígrados ha incrementado el rendimiento de la piña 3.3 toneladas por hectárea, es decir un efecto positivo.

El análisis de las elasticidades en la forma reducida del modelo de ecuaciones simultáneas permitió mostrar que:

- La elasticidad de la precipitación media anual respecto del rendimiento de la piña fue de 0.696, lo que implica que la respuesta del rendimiento de ésta crasulácea es menos que proporcional al aumento de la precipitación; es decir, si la precipitación media anual se incrementa en 1%, el rendimiento se incrementara en 0.696%.

- La elasticidad del CO<sub>2</sub> respecto del rendimiento fue de 1.64; es decir que la respuesta del rendimiento de la piña es más que proporcional al aumento del CO<sub>2</sub> en la atmosfera pues si el CO<sub>2</sub> se incrementa en 1% el rendimiento aumentara en 1.64%.

## 7.2. RECOMENDACIONES

- Es necesario profundizar en el estudio de la biología y fisiología de las plantas cultivadas, de interés económico e importantes en la seguridad alimentaria del país, pues el conocimiento de las consecuencias del incremento del CO<sub>2</sub>, permite precisar sobre los impactos en los rendimientos de éstas y diseñar políticas que ayuden a mitigar las consecuencias sobre la producción de alimentos.
- En la medida que existan recursos para la investigación aplicada para la evaluación del impacto del cambio climático sobre los cultivos de importancia económica y seguridad alimentario es necesario agregar el análisis espacial mediante la incorporación de la percepción remota e imágenes satelitales al análisis para delimitar regiones específicas de los referidos impactos.
- La modelación del efecto de las variables climáticas y el CO<sub>2</sub> sobre el rendimiento de las plantas de interés económico a través de un modelo de ecuaciones simultáneas es solo una forma simple de realizar el análisis del impacto del cambio climático sobre plantas como las crasuláceas, no obstante la modelación a través de los llamados modelos de circulación general y modelos climáticos complejos que requieren información a nivel región climática tanto espacial como de series de tiempo si bien pueden ser de mayor precisión en los pronósticos, su implementación requiere recursos financieros y humanos considerables.
- Es necesario realizar un análisis de las series de tiempo de la precipitación media anual, CO<sub>2</sub>, y temperatura para detectar si tiene el problema de la raíz unitaria, pues de ser así ello puede invalidarlos resultados obtenidos del modelo de ecuaciones simultáneas, pues se estaría en presencia del llamado problema de la regresión espuria.

- Es altamente recomendable diseñar la metodología o procedimiento que permita descomponer el crecimiento de los rendimientos de las plantas como las crasuláceas, las C3 y las C4 en la parte correspondiente a variables climáticas y la correspondiente a la parte del cambio tecnológico propiciado por el uso de fertilizantes, riego, herbicidas, entre otros agentes para evaluar su efecto conjunto con el CO<sub>2</sub> en el rendimiento de la piña.

## BIBLIOGRAFÍA

Azcón, B.J., Fleck, J., Aranda, J., y Gómez, C.N. 2013. Fotosíntesis, factores ambientales y cambio climático. En: fundamentos de fisiología vegetal. Segunda edición. Joaquín Azcón Bieto y Manuel Talón (eds). Madrid: McGraw – Hill - Interamericana de España, S.L.

Bowes, G. 1993. Facing the inevitable. Plants and increasing atmospheric CO<sub>2</sub>. *Annu. Rev. Plant Physiol. Biol.* 44: 309 – 332. DOI: 10.1146/annurev.pp.44.060193.001

Carter, H. R., Griffiths, W. H. & Lim, G. C. (2011). *Principles of Econometrics*. USA: John Wiley & Sons, Inc

Ceusters J. & Borland A.M. 2010. Impacts of elevated CO<sub>2</sub> on the growth and physiology of plants with crassulacean acid metabolism. In: Lüttge U., Beyschlag W., Büdel B., Francis D. (eds) *Progress in Botany 72. Progress in Botany (Genetics - Physiology - Systematics - Ecology)*, vol 72. Springer, Berlin, Heidelberg

Climate Change 2007 Mitigation. In: Metz B, Davidson, OR, Bosch PR, Dave R, Meyer LA (eds.), *Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

Cline, W. R. 2005. Global warming and agriculture. Impact estimates by country. Center for Global Development. Peterson Institute for International Economics, Washington, DC, USA.

Darwin, R. F., and D. Kennedy. 2000. Economic Effects of CO<sub>2</sub> fertilization of crops: transforming changes in yield into changes in supply. *Environmental Modeling and Assessment* 5(3):157–68.

Erda, L., Wei, X., Hui, J. Yinlong X., Yue, L., Liping, B. y Liyong, X. 2005. Climate change impacts on crop yield and quality with CO<sub>2</sub> fertilization in China. *Phil. Trans. Royal Society B-360*: 2149–2154. Disponible en línea en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1569568/pdf/rstb20051743.pdfdoi:10.1098/rstb.2005.1743>

Greene, W. 2018. *Econometric analysis*. Ed. Pearson, eight edition, New York, NY, USA.

- Gujarati, D. N. y Porter, D. C. 2010. *Econometría*. Quinta edición, ed. McGraw Hill, México.
- Hendrey, G. R. & Kimball, B. A. 1994. The FACE program. *Agric. Forest Meteorology*. 70: 3–14. (doi:10.1016/0168-1923 (94)90044-2.).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1992. Scientific assessment of climate change. IPCC supplement. IPCC. World Meteorological Organization, Geneva.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate Change 2007 Mitigation. In: Metz B, Davidson, OR, Bosch PR, Dave R, Meyer LA (eds.), Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New
- López Cruz, I. L. Ramírez Arias, A. y Rojano Aguilar. 2005. Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 11(2): 257-267.
- McLeod, A. R. & Long, S. P. 1999. Free-air carbon dioxide enrichment (FACE) in global change research: a review. *Advances in Ecological Research*. Vol. 28: 1-56. doi: [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60028-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60028-8)
- Organización Meteorológica Mundial – OMM. 2011. Guía de prácticas meteorológicas. Publicación No. 100. Ginebra, Suiza.
- Qaderi, M. M. and Reid, D. M. 2009. Crop responses to elevated carbon dioxide and temperature. En S. N. Sing (Ed.) *Climate change and crops*. Capítulo 1. Springer – Verlag, Berlin- Heidelberg.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. & Fereres, E. 2018. Aquacrop. Version 6.1. Reference manual. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-br246e.pdf>.
- Rasineni, G. K. & Reddy A. R. 2013. Influence of elevated CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis and biomass yields in a tree species, *Gmelina Arborea* Roxb. In Tingyun Kuang, Congming Lu & Lixin Zhang (Editors) *Photosynthesis Research for Food, Fuel and the Future*, pp 781-785. Zhejiang University Press, Hangzhou and Springer-Verlag Berlin Heidelberg.



Reilly, J. & Hohmann.1993. Climate change and agriculture: the role of international trade. *American Economic Review* 83: 306-312.

Rosenzweig, C. Parry, M., Frohberg, K. and Fisher, G. 1993. Climate change and world food supply. Research report 3, Environmental Change Unit University of Oxford: Oxford.

Secretaría de Agricultura, ganadería, desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA – SIAP). 2018. Atlas agroalimentario 2012 – 2018. Disponible en [https://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018](https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018).

Taiz, L. & Zeiger, E. 2006. Plant physiology. 3rd edn. Sunderland: Sinauer Associates.

Tans, P.P., Fung, I.Y. and Takahashi, T. (1990). Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> budget. *Science* 247: 1431-1438.

Trewin, Blair C. 2007. Función de las normales climatológicas en un clima cambiante. National Climate Centre Australian Bureau of Meteorology. Disponible en: <http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcdmp/documents/TheRoleofclimatologicalnormalsinachangingclimateSp.pdf>.

Woodward, F.I. 2002. Potential impacts of global elevated CO<sub>2</sub> concentrations on plants. *Curr. Opin. Plant Biol.* 5: 2007-2011. DOI: 10.1016/s1369-5266(02)00253-4

York, USA. Recuperado de [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4\\_wg3\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4_wg3_full_report.pdf)

Zhu, J., Goldstein, G. and Bartholomew, D. P. 1999. Gas exchange and carbon isotope composition of Ananas comosus in response to elevated CO<sub>2</sub> and temperature. *Plant Cell Environ* 22:999–1007

Ziska, L. H., Hogan, K. P., Smith A. P., Drake, B. G.1991. Growth and photosynthetic response of nine tropical species with long-term exposure to doubled carbon dioxide. *Oecologia* 86:383–389

### **Sitios web consultados:**

Banco Mundial. Cambio climático 2018. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/tema/cambio-climatico>

Earth System Research Laboratory (ESLR) 2019. Global Greenhouse Gas Reference Network. Disponible en: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) 2019. Datos sobre alimentación y agricultura. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/es/#home>

Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) 2018. Estadísticas agrícolas. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap>

## ANEXOS

### A. SERIE DE TIEMPO DE LA PIÑA EN EL MUNDO 1961–2017

En el Cuadro 16 se muestran las estadísticas históricas de la piña para el periodo de estudio. Dichas estadísticas han sido elaboradas a partir de la información contenida en FAOSTAT (2019). La información corresponde al promedio de 87 países. Dado que se observan valores con grandes diferencias en el rendimiento entre países, esta variable es un promedio ponderado por la superficie, respectivamente.

CUADRO 16. ESTADÍSTICAS DE LA PIÑA EN EL MUNDO 1961 - 2017

Año	Superficie (ha)	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)
1961	381,818	10.5	4,001,523
1962	370,240	10.9	4,040,841
1963	382,982	10.9	4,162,224
1964	386,875	11.2	4,345,293
1965	414,198	11.4	4,708,797
1966	428,038	11.8	5,033,383
1967	437,664	12.2	5,317,753
1968	441,200	12.1	5,355,823
1969	459,324	12.1	5,544,541
1970	472,142	12.2	5,778,043
1971	498,498	12.2	6,070,579
1972	480,009	12.6	6,033,934
1973	528,710	11.7	6,175,058
1974	552,787	11.8	6,546,072
1975	508,712	14.8	7,540,318
1976	512,274	16.3	8,367,111
1977	525,176	16.0	8,410,777
1978	543,591	16.0	8,714,804
1979	591,200	16.5	9,775,456
1980	613,878	18.1	11,110,756
1981	571,383	16.2	9,264,457
1982	612,195	14.7	8,969,150
1983	615,090	14.5	8,913,589
1984	593,351	15.9	9,455,545
1985	601,004	16.8	10,082,688
1986	623,232	17.4	10,816,212
1987	616,691	18.1	11,154,264
1988	635,401	18.7	11,858,502

1989	642,210	19.2	12,301,916
1990	639,906	19.6	12,534,229
1991	637,195	19.6	12,458,523
1992	625,506	21.0	13,140,438
1993	643,046	21.8	14,016,826
1994	661,352	21.0	13,859,343
1995	692,874	20.3	14,035,949
1996	678,630	20.5	13,896,543
1997	683,391	20.9	14,304,523
1998	684,885	20.9	14,348,159
1999	750,512	21.7	16,312,475
2000	770,747	21.4	16,504,636
2001	821,846	20.8	17,092,826
2002	819,536	21.0	17,220,412
2003	819,381	21.5	17,587,141
2004	825,643	22.0	18,200,803
2005	863,860	22.3	19,270,148
2006	894,638	23.9	21,414,880
2007	917,989	23.6	21,675,666
2008	909,671	23.5	21,342,203
2009	940,803	23.4	22,057,059
2010	1,011,962	22.9	23,150,393
2011	1,045,079	23.7	24,735,309
2012	1,082,200	24.0	26,024,745
2013	1,075,785	24.8	26,684,857
2014	1,097,782	25.1	27,520,527
2015	1,087,434	25.8	28,045,984
2016	1,125,985	25.1	28,265,440
2017	1,176,850	25.1	29,524,271

Fuente: Elaborado en base a FAOSTAT (2019).

## B. Serie de tiempo de la piña en México 1961 – 2017

En el Cuadro 17 se muestra la información correspondiente a México para el periodo 1961 - 2017.

**CUADRO 17. ESTADÍSTICAS DE LA PIÑA EN MÉXICO 1961 - 2017**

Años	Superficie cosechada (ha)	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)
1961	7,753	22.9	177,376
1962	7,908	22.5	177,903
1963	8,731	22.1	193,330
1964	8,930	22.1	197,759
1965	10,667	25.2	268,858
1966	10,443	25.7	268,175
1967	10,252	25.3	259,423
1968	10,397	24.6	256,030
1969	9,166	26.2	240,589
1970	9,838	25.3	248,772
1971	8,460	35.1	297,251
1972	6,070	35.9	218,164
1973	7,169	37.4	268,314
1974	10,215	38.9	397,781
1975	9,896	37.5	371,288
1976	11,593	38.1	441,564
1977	12,950	39.4	510,003
1978	14,496	39.2	568,344
1979	12,751	39.7	505,686
1980	14,754	42.2	622,729
1981	9,836	48.1	473,031
1982	9,828	45.2	444,286
1983	9,023	47.6	429,624
1984	9,676	46.8	453,260
1985	6,898	46.4	319,814
1986	7,793	40.9	318,368
1987	8,553	42.8	366,240
1988	8,876	43.5	385,866
1989	8,345	52.1	434,822
1990	8,748	52.0	454,668
1991	6,519	45.8	298,526
1992	7,496	35.2	264,147
1993	6,025	35.3	212,402

---

1994	6,173	37.0	228,580
1995	6,620	42.5	281,180
1996	7,690	39.2	301,406
1997	9,104	43.0	391,491
1998	11,509	41.8	480,856
1999	11,555	43.6	504,339
2000	12,050	43.4	522,422
2001	14,159	44.2	625,957
2002	15,243	43.3	659,817
2003	16,432	41.3	678,603
2004	15,749	42.5	669,225
2005	15,252	36.2	551,672
2006	14,781	42.9	633,747
2007	15,918	42.2	671,131
2008	17,080	42.1	718,292
2009	17,009	44.1	749,396
2010	16,604	42.3	701,746
2011	17,296	43.0	742,926
2012	17,708	42.9	759,976
2013	17,858	43.2	771,942
2014	18,961	43.1	817,463
2015	18,865	44.6	840,486
2016	19,489	44.9	875,839
2017	20,006	47.2	945,210

---

Fuente: FAOSTAT (2019).

### C. SERIE CRONOLÓGICA DE LAS NORMALES CLIMÁTICAS Y DEL CO<sub>2</sub>

Las series de tiempo de las llamadas normales climatológicas (temperatura y precipitación) y del dióxido de carbono son las que se presentan en el Cuadro 18. Debe comentarse que las primeras solo están disponibles hasta el 2015 mientras la segunda hasta 2017.

**CUADRO 18. SERIE DE TIEMPO DE LAS NORMALES CLIMATOLÓGICAS Y CO<sub>2</sub>**

Año	CO <sub>2</sub> (ppm)	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)
1961	317.64	731.84	20.52
1962	318.45	660.58	20.83
1963	318.99	713.75	20.72
1964	319.61	665.67	20.37
1965	320.03	702.90	20.59
1966	321.36	791.60	20.17
1967	322.18	785.34	20.46
1968	323.05	784.25	20.12
1969	324.62	754.89	20.68
1970	325.68	733.63	20.33
1971	326.31	753.32	20.39
1972	327.46	761.40	20.84
1973	329.67	800.33	20.39
1974	330.24	696.56	20.40
1975	331.15	688.56	20.24
1976	332.15	802.35	19.90
1977	333.90	644.50	20.56
1978	335.50	811.41	20.39
1979	336.85	667.19	20.13
1980	338.68	698.95	20.63
1981	339.93	868.18	20.45
1982	341.13	648.82	20.81
1983	342.78	806.14	20.54
1984	344.42	890.55	20.37
1985	345.90	781.64	20.42
1986	347.15	747.92	20.72
1987	348.93	669.50	20.33
1988	351.48	761.70	20.39
1989	352.90	723.01	20.81
1990	354.18	824.14	20.95
1991	355.59	763.50	21.02
1992	356.37	764.33	20.90

---

1993	357.03	764.46	21.18
1994	358.88	631.86	21.36
1995	360.87	717.04	21.32
1996	362.64	703.37	21.22
1997	363.76	703.73	21.04
1998	366.62	760.36	21.46
1999	368.31	766.24	20.95
2000	369.47	724.77	21.15
2001	371.01	678.76	20.92
2002	373.09	726.50	21.10
2003	375.63	759.20	21.17
2004	377.36	844.53	20.95
2005	379.60	726.26	21.30
2006	381.80	786.40	21.45
2007	383.59	772.36	21.03
2008	385.45	785.05	21.02
2009	387.35	663.02	21.53
2010	389.89	807.81	20.75
2011	391.64	682.08	21.54
2012	393.87	704.76	21.59
2013	396.56	912.73	21.18
2014	398.61	841.61	21.51
2015	400.88	742.04	21.65
2016	406.55		
2017	408.52		

---

Fuente: Banco Mundial (2018).



## D. SALIDA DEL PROCEDIMIENTO ETS/SYSLIN

### D.1. FORMA ESTRUCTURAL DEL MODELO

En este anexo se presenta la salida de la corrida en SAS/ETS con el procedimiento PROC SYSLIN del modelo de ecuaciones simultáneas empírico analizado para estimar el efecto de las variables de estado y el CO<sub>2</sub> sobre el rendimiento de la piña.

#### Two-Stage Least Squares Estimation

Model  
Dependent Variable      RENDIPRO  
renpin

#### Análisis de varianza

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Model	2	1328.293	664.1464	11.19	<.0001
Error	52	3085.320	59.33307		
Corrected Total	54	3340.924			

Root MSE      7.70280      R-Square      0.30095  
Dependent Mean      38.82545      Adj R-Sq      0.27407  
Coeff Var      19.83955

#### Estimadores de parámetros

Variable	DF	Estimadores de parámetros	Error estándar	Valor t	Pr >  t
Intercept	1	-253.821	62.59773	-4.05	0.0002
prec	1	0.036167	0.016838	2.15	0.0364
temp	1	12.76181	2.876361	4.44	<.0001

Durbin-Watson      0.37806  
Number of Observations      55  
First-Order Autocorrelation      0.785493

#### The SYSLIN Procedure Two-Stage Least Squares Estimation

Model  
Dependent Variable      TEMPERAT  
temp

#### Análisis de varianza

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Model	1	6.705697	6.705697	93.80	<.0001
Error	53	3.788747	0.071486		
Corrected Total	54	10.49444			

Root MSE      0.26737      R-Square      0.63898  
Dependent Mean      20.81345      Adj R-Sq      0.63216  
Coeff Var      1.28459

#### Estimadores de parámetros

Variable	DF	Estimadores de parámetros	Error estándar	Valor t	Pr >  t
Intercept	1	15.83106	0.515691	30.70	<.0001
co2	1	0.014119	0.001458	9.69	<.0001

Durbin-Watson      1.586726  
Number of Observations      55  
First-Order Autocorrelation      0.197815

## D.2. FORMA REDUCIDA DEL MODELO

The SYSLIN Procedure  
Two-Stage Least Squares Estimation

Exogenous Variables

	Intercept	prec	co2
RENDIPRO	-253.821	0.036167	0
TEMPERAT	15.83106	0	0.014119

Inverse Endogenous Variables

	RENDIPRO	TEMPERAT
renpin	1	12.76181
temp	0	1

Reduced Form

	Intercept	prec	co2
renpin	-51.788	0.036167	0.180189
temp	15.83106	0	0.014119

## D.3. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LAS VARIABLES

Procedimiento MEANS

Variable	Número de observaciones	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
renpin	55	38.8254545	7.8656830	22.1000000	52.1000000
prec	55	747.3343636	62.6754513	631.8600000	912.7300000
temp	55	20.8134545	0.4408419	19.9000000	21.6500000
co2	55	352.8761818	24.9579893	317.6400000	400.8800000

## E. ESTIMACIÓN DE LAS ELASTICIDADES EN LA FORMA REDUCIDA DEL MODELO

Ahora bien, de acuerdo a la definición de elasticidad, las elasticidades de la forma reducida del modelo de ecuaciones simultáneas se obtienen de la forma que se expone a continuación. Se parte de las ecuaciones estimadas en la forma reducida:

$$RENPIN = -51.788 + 0.036167PREC + 0.180189CO2$$

$$TEMP = 15.83106 + 0.014119CO2$$

- Elasticidad de la precipitación media anual respecto del rendimiento de la piña:

$$\frac{\partial RENPIN}{\partial PREC} \frac{PREC}{RENPIN} = 0.036167 \frac{747.3343636}{38.8254545} = 0.69616292$$

- Elasticidad de la concentración de CO<sub>2</sub> respecto del rendimiento de la piña:

$$\frac{\partial RENPIN}{\partial CO2} \frac{CO2}{RENPIN} = 0.180189 \frac{352.8761818}{38.8254545} = 1.63769896$$

- Elasticidad de la concentración de CO<sub>2</sub> respecto de la temperatura

$$\frac{\partial TEMP}{\partial CO2} \frac{CO2}{TEMP} = 0.014119 \frac{352.8761818}{20.8134545} = 0.23937683$$

## F. INDICADORES DE LA PIÑA POR ENTIDAD Y RÉGIMEN DE HUMEDAD 2017

CUADRO 179. ESTADÍSTICAS DE LA PIÑA POR ENTIDAD FEDERATIVA Y RÉGIMEN DE HUMEDAD 2017

Entidad	Régimen de humedad	Superficie sembrada (ha)	Superficie Cosechada (ha)	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)
Campeche	Riego	54	54	26.7	1,439
	Temporal				
	Total	54	54	26.7	1,439
Colima	Riego	410	386	69.9	26,960
	Temporal				
	Total	410	386	69.9	26,960
Chiapas	Riego				
	Temporal	344	344	22.3	7,667
	Total	344	344	22.3	7,667
Guerrero	Riego				
	Temporal	51	48	11.5	551
	Total	51	48	11.5	551
Jalisco	Riego	455	455	73.2	33,295
	Temporal	13	13	14.7	195
	Total	468	468	71.5	33,490
México	Riego				
	Temporal	9	9	8.2	70
	Total	9	9	8.2	70
Nayarit	Riego	763	393	73.2	28,753
	Temporal	1,029	1,014	17.5	17,692
	Total	1,792	1,407	33.0	46,445
Oaxaca	Riego	840	840	70.7	59,416
	Temporal	1,167	1,165	61.0	71,021
	Total	2,007	2,005	65.1	130,437
Q. Roo	Riego				
	Temporal	1,005	595	61.4	36,521
	Total	1,005	595	61.4	36,521
Tabasco	Riego	402	402	47.8	19,198
	Temporal	1,201	1,201	31.0	37,258
	Total	1,603	1,603	35.2	56,456
Tamaulipas	Riego				
	Temporal	11	6	41.0	246
	Total	11	6	41.0	246
Veracruz	Riego				
	Temporal	34,926	13,082	46.2	604,929
	Total	34,926	13,082	46.2	604,929

Fuente: Elaborado con datos de SIAP (2018).

## G. ESTADÍSTICAS DE LA PIÑA POR RÉGIMEN DE HUMEDAD 1988-2017

CUADRO 18. ESTADÍSTICAS DE LA PIÑA POR RÉGIMEN DE HUMEDAD 1988-2017

Años	Régimen de humedad	Superficie cosechada (ha)	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)
1988	Riego	12	22.0	264
	Temporal	8,833	43.6	385,470
	Total	8,845	43.6	385,734
1989	Riego	61	28.4	1,732
	Temporal	8,373	41.0	343,276
	Total	8,434	40.9	345,008
1990	Riego	68	34.8	2,363
	Temporal	8,508	40.6	345,308
	Total	8,576	40.5	347,671
1991	Riego	82	21.7	1,781
	Temporal	6,434	46.1	296,730
	Total	6,516	45.8	298,511
1992	Riego	110	20.3	2,232
	Temporal	7,351	35.5	260,676
	Total	7,461	35.2	262,908
1993	Riego	90	27.7	2,496
	Temporal	7,082	36.4	257,556
	Total	7,172	36.3	260,052
1994	Riego	65	34.3	2,230
	Temporal	7,007	35.8	250,863
	Total	7,072	35.8	253,093
1995	Riego	79	38.8	3,062
	Temporal	7,588	39.3	298,341
	Total	7,667	39.3	301,403
1996	Riego	38	40.3	1,532
	Temporal	8,046	38.7	311,238
	Total	8,084	38.7	312,770
1997	Riego	292	36.6	10,682
	Temporal	8,742	43.3	378,359
	Total	9,034	43.1	389,041
1998	Riego	300	24.3	7,280
	Temporal	11,209	42.3	473,576
	Total	11,509	41.8	480,856
1999	Riego	88	39.8	3,506
	Temporal	11,467	43.7	500,833
	Total	11,555	43.6	504,339

2000	Riego	76	43.8	3,330
	Temporal	11,974	43.4	519,092
	Total	12,050	43.4	522,422
2001	Riego	160	15.8	2,531
	Temporal	13,999	10.3	144,120
	Total	14,159	10.4	146,651
2002	Riego	529	12.5	750,365
	Temporal	14,715	24.8	356,040
	Total	15,243	24.4	1,106,405
2003	Riego	299	42.6	12,745
	Temporal	16,133	41.3	665,858
	Total	16,432	41.3	678,603
2004	Riego	293	45.1	13,180
	Temporal	15,456	42.4	656,046
	Total	15,749	42.5	669,225
2005	Riego	550	42.8	23,530
	Temporal	14,702	35.9	528,142
	Total	15,252	36.2	551,672
2006	Riego	422	35.7	15,068
	Temporal	14,360	43.1	618,679
	Total	14,782	42.9	633,747
2007	Riego	553	39.7	21,994
	Temporal	15,365	42.2	649,137
	Total	15,918	42.2	671,131
2008	Riego	611	44.1	26,922
	Temporal	16,469	42.0	691,370
	Total	17,080	42.1	718,292
2009	Riego	465	44.2	20,576
	Temporal	16,544	44.1	728,819
	Total	17,009	44.1	749,396
2010	Riego	1,202	56.3	67,656
	Temporal	15,403	41.2	634,084
	Total	16,605	42.3	701,740
2011	Riego	1,521	51.9	79,003
	Temporal	15,775	42.1	663,923
	Total	17,296	43.0	742,926
2012	Riego	1,743	56.1	97,738
	Temporal	15,965	41.5	662,238
	Total	17,708	42.9	759,976
2013	Riego	1,918	53.6	102,864
	Temporal	15,940	42.0	669,078
	Total	17,858	43.2	771,942

2014	Riego	2,116	59.7	126,306
	Temporal	16,845	41.0	691,156
	Total	18,961	43.1	817,463
2015	Riego	2,321	60.5	140,412
	Temporal	16,544	42.3	700,075
	Total	18,865	44.6	840,486
2016	Riego	2,453	60.2	147,672
	Temporal	17,036	42.7	728,167
	Total	19,489	44.9	875,839
2017	Riego	2,530	66.8	169,061
	Temporal	17,476	44.4	776,149
	Total	20,006	47.2	945,210

Fuente: elaboración propia en base a SIAP (2018).