

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



**EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RENDIMIENTO DE
FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.) VARIEDAD MESOAMÉRICA HÁBITO 2
& 3 PARA CUATRO REGIONES DEL ESTADO DE COAHUILA.**

POR:

ALEXIS EDUARDO LAYNES PÉREZ

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO

NOVIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RENDIMIENTO DE FRIJOL
(*Phaseolus vulgaris* L.) VARIEDAD MESOAMÉRICA HÁBITO 2 & 3
PARA CUATRO REGIONES DEL ESTADO DE COAHUILA.

POR:

ALEXIS EDUARDO LAYNES PÉREZ

TESIS

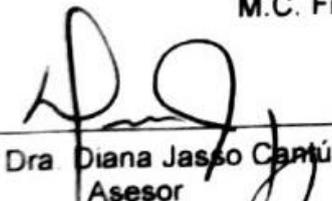
Que somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito
parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobada por:



M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos
Asesor Principal



Dra. Diana Jasso Cantú
Asesor

Universidad Autónoma Agraria
"Antonio Narro"



Coordinación de la División
de Ingeniería



Dr. Raúl Rodríguez García
Asesor Externo



Dr. Luis Samaniego Moreno
Coordinador de la División de Ingeniería



Ing. Carlos Rojas Peña
Asesor

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO

NOVIEMBRE DE 2017

AGRADECIMIENTOS

A **mi DIOS**, primeramente por haberme concedido el don de la vida, la cual está llena de grandes bendiciones. Gracias por siempre alentarme cuando más lo necesito, por esas fuerzas que pones en mí para poder superar las barreras que me impiden llegar a mis sueños, gracias señor por poner grandes personas en mi camino, ya que gracias a ellos soy feliz.

A mi **Alma Mater**, por guiarme a un sueño más. Gracias por haberme acogido y ayudarme a crecer en conocimientos, por enseñarme a darme cuenta que los sueños es posible conseguirlo con estudio y dedicación.

Al **Departamento de Riego y Drenaje**, por haberme brindado las herramientas necesarias para formarme como profesional, enseñándome actitudes de responsabilidad y de esfuerzo. Gracias por haberme dado la oportunidad de hacerme coincidir con compañeros, profesores, y todas las personas que hacen una gran labor dentro del departamento, que poco a poco se fueron convirtiendo en una familia más.

A mis **Profesores**, gracias por haberme dedicado parte de sus tiempos y conocimientos, pues esto fueron enseñanzas claves para mi formación académica y profesional, gracias por compartir algunos de sus consejos de vida y superación, pues esto me enseñó a nunca darme por vencido y seguir siempre motivado.

A mis **Asesores** por su apoyo, disponibilidad y paciencia brindada para realizar este proyecto, gracias por ayudarme a realizar una meta más en mi vida profesional.

Al **Dr. Raúl Rodríguez García**, primeramente por ser un gran profesor y una gran persona. Gracias por haberme brindado la confianza y aportarme gran parte de sus conocimientos y tiempo para realizar este proyecto de tesis.

Al **M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos**, por haberme brindado su amistad, pues además de ser un gran profesor es un gran amigo. Gracias por los consejos y ánimos brindados durante este proyecto, sobre todo por su paciencia y conocimientos.

A **mis Amigos**, Max, Bambi, Edgar, Arias, Jarocho, Lona, Diego, Irving quienes me brindaron su amistad y apoyo. Me siento grato de reconocerlos como mis grandes hermanos, pues los momentos vividos con cada uno de ellos han generado alegría en mi vida, gracias por sus consejos y por acompañarme en momentos buenos y malos. Agradezco a mis compañeros de generación por contribuir en mi formación y en especial a Fany por haberme brindado su confianza y por siempre tenderme la mano cuando más lo necesitaba y también por siempre creer en mí. A mis amigos que conocí y que han ido influenciando en mi crecimiento como persona Nayeli, Azucena, Víctor, Soé, Andrea, Xóchitl.

DEDICATORIA

Dios me ha permitido conseguir un logro más en esta vida, manteniéndome rodeado de grandes personas, que con el paso del tiempo se han convertido en mi más grande inspiración.

A mi Madre **Alba Pérez Díaz**, quien ha sido mi ejemplo a seguir durante toda mi vida, por tener ese gran corazón humilde y bondadoso, quien a pesar de grandes dificultades físicas y emocionales ha sabido levantarse como una gran guerrera. A ti madre quien me ha enseñado que el amor lo puede todo.

A mi Padre **Elpidio Laynes Ramírez**, quien me enseñó a nunca darse por vencido, que con tu esfuerzo y trabajo duro nos has inculcado a mis hermanos y a mí, valores increíbles. Te agradezco por aquellos días de exigencias y arduo trabajo tanto en el campo como en la casa, pues gracias a ello he aprendido que cada labor hecho con sacrificios tiene grandes recompensas.

A mis Hermanos, **Francisco, Ana, Judith, Santiago, Martin, Antonio y Carlos**, quienes son grandes ejemplos a seguir, porque cada uno tiene una cualidad extraordinaria y que con su carácter me han enseñado el verdadero amor en la familia. Gracias por siempre creer en mí, por aconsejarme y estar allí cada vez que me siento triste o mejor aun cuando me siento feliz.

A mis Abuelos, **Papá Nalo y Mamá Nala**, que con su sabiduría han sabido aconsejarme en algunas etapas de mi vida, porque siempre han creído en mí y han sabido ser los mejores viejitos que he conocido en mi vida. Gracias por cada relato de su vida que algún día me contaron, pues me ha enseñado que los mejores momentos se buscan y no se esperan.

A mis **Tíos**, aquellos que siempre pusieron su confianza en mí y que un día me brindaran sus consejos y conocimientos de la vida.

A mi cuñada **yessi**, quien con sus consejos ha venido formando en mí, otras formas distintas de luchar en la vida; agradezco por cada detalle y hospitalidad de mis demás cuñados, **María, Adriana, Juan**.

A mis Sobrinos, **Axel, Yohan, Marieth, Eimy, Fanny, Sughey, Cinthia, Karen**, quienes me han dado muchos momentos de felicidad, espero siempre estar allí para ustedes y apoyarlos cuando me necesiten, recuerden que los quiero mucho.

A **Mis Primos**, gracias por su apoyo y confianza que me han brindado, me han hecho saber que siempre podré contar con ustedes, espero que de igual manera cuenten conmigo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIA.....	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
RESUMEN.....	vii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1 Modelos de simulación	5
2.1.1 Antecedentes.....	5
2.1.2 Modelo.....	6
2.1.3 Tipos de Modelos	7
2.1.4 Simulación	9
2.1.5 Etapas de la Simulación	10
2.1.6 Uso de los Modelos de Simulación Agrícolas.....	12
2.2 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer).....	13
2.2.1 Componente DSSAT	14
2.2.2 Coeficientes Genéticos.....	15
2.2.3 Modelos de Simulación de Crecimientos de Leguminosas..	16
2.3 Cambio climático.....	18
2.3.1 El clima y el cambio climático	18
2.3.2 Escenario del cambio climático.....	20
2.3.3 El Cambio Climático en México	22
2.4 Cultivo de Frijol	23
2.4.1 Importancia.....	23
2.4.2 Antecedentes.....	23
2.4.3 Descripción general	25
2.4.4 Etapas fenológicas del cultivo.....	25
2.4.4.1 Etapa vegetativa.	25

2.4.4.2 Etapa de la fase reproductiva.....	27
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
3.1. Descripción de los sitios de estudio	30
3.1.1 Macro localización	30
3.1.2 Micro localización	30
3.1.3 Clima	31
3.1.4 Actividad Agrícola	33
3.2. Material Genético	34
3.3. Datos de Clima.....	35
3.4. Simulación de Escenarios	36
3.5. Evaluación de Escenarios	38
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
4.1 Rendimientos	39
4.2 Incrementos de Temperatura y Precipitación	39
4.3 Cambio de Rendimientos en diferentes escenarios.....	41
5. CONCLUSIONES.....	46
6. REFERENCIAS.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Representación esquemática de la estructura del modelo CROPGRO-Drybean.....	18
Figura 2. 2 Esquema de los componentes del cambio climático (IPCC, 1996) ...	19
Figura 2. 3 Etapa V0, germinación.	29
Figura 2. 4 Etapa V1, aparición de cotiledones de la planta a nivel del suelo	29
Figura 2. 5 Etapa V2, hojas primarias desplegadas	29
Figura 2. 6 Etapa V3, primeras hojas trifoliadas desplegadas.....	29
Figura 2. 7 Etapa V4, aparición de la tercera hoja trifoliada	29
Figura 2. 8 Etapa R5 iniciación de los primeros brotes florales	29
Figura 2. 9 Etapa R6, apertura de la primera flor.	29
Figura 2. 10 Etapa R7, la corola de la flor recién se ha desprendido	29
Figura 2. 11 Etapa R8, llenado de la vaina.....	29
Figura 2. 12 Etapa R9, iniciación de cambio de color de las vainas.....	29
Figura 3. 1 Mapa geográfico del Estado de Coahuila.....	30
Figura 3. 2 Puntos localizados para cada Región	31
Figura 3. 3 Localización geográfica de las regiones a estudio del estado de Coahuila	31
Figura 3. 4 Tamaño promedio de producción por producto en el estado de Coahuila	33
Figura 4. 1 Rendimiento de la línea base de las cuatro regiones para la fecha de siembra actual.	39
Figura 4. 2 Valores medios de incremento de temperatura para cada región durante el ciclo del cultivo de frijol, debido a diferentes escenarios.	40
Figura 4. 3 Valor porcentual medio de incremento (+) o decremento (-) de precipitación en el ciclo del cultivo de frijol, debido a diferentes escenarios.	40
Figura 4. 4 Porcentaje de cambio de rendimiento promedio de frijol de las diferentes fechas de siembra con respecto al rendimiento actual (línea base) para el año 2030.	43
Figura 4. 5 Porcentaje de cambio de rendimiento promedio de frijol de las diferentes fechas de siembra con respecto al rendimiento actual (línea base) para el año 2050	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1	Cuadro de líneas evolutivas y familias de escenarios.....	21
Tabla 2. 2	Clasificación del frijol para su venta en el mercado	24
Tabla 3. 1	Coordenadas Geográficas de las regiones a estudio.....	31
Tabla 3. 2	Coeficientes genéticos para el desarrollo del cultivo.....	34
Tabla 3. 3	Coeficientes genéticos para el crecimiento vegetativo.....	34
Tabla 3. 4	Coeficientes genéticos para el crecimiento reproductivo.	34
Tabla 3. 5	Unidades de las variables utilizadas para la elaboración de la base de datos climáticos.....	35
Tabla 3. 6	Manejo de fechas del frijol para cada Región	37
Tabla 4. 1	Por ciento de cambio de rendimiento de frijol en los diferentes escenarios, comparados con el rendimiento actual (Línea base) para la fecha de siembra actual.	41
Tabla 4. 2	Por ciento de cambio de rendimiento de frijol en los diferentes escenarios, comparados con el rendimiento actual (Línea base) para la fecha de siembra Adelantada.	42
Tabla 4. 3	Por ciento de cambio de rendimiento de frijol en los diferentes escenarios, comparados con el rendimiento actual (Línea base) para la fecha de siembra Atrasada.	43
Tabla 4. 4	Mitigación en por ciento del efecto de cambio de fecha de siembra en las cuatro regiones de estudio.....	45

**EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RENDIMIENTO DE FRIJOL
(*Phaseolus vulgaris L.*) VARIEDAD MESOAMÉRICA HÁBITO 2 & 3
PARA CUATRO REGIONES DEL ESTADO DE COAHUILA.**

Alexis Eduardo Laynes Pérez

RESUMEN

En la actualidad, el impacto del cambio climático está afectando seriamente nuestro planeta, principalmente en la agricultura. En México se han realizado diversos estudios donde aseguran que en un futuro habrá incrementos muy altos de temperatura afectando gravemente al rendimiento de los cultivos. El propósito de este trabajo es simular el rendimiento de frijol variedad Mesoamérica Hábito 2&3 para los años 2030 y 2050 en cuatro regiones (Sureste, Laguna, Centro y Norte) del Estado de Coahuila. En la simulación se usaron tres modelos de circulación general (MCG) las cuales fueron GFDL 2.0, UK-HADGEM1 Y MPIECHAM5, la razón del porque se usaron estos modelos es porque representan mejor el clima regional. La simulación se desarrolló a través del software DSSAT v4.5, en este se evaluaron los rendimientos para tres fechas de siembra, con el fin de analizar y buscar una alternativa que mitigue los efectos del cambio climático, ejecutándose primeramente para la fecha de siembra actual (línea base), donde los resultados fueron muy favorables para la región Sureste, teniendo un rendimiento de 2,722 kg/ha, mientras que en el Centro fue de 1031 kg/ha, siendo la región más baja en rendimientos. Para los años 2030 y 2050 el rango de reducción del rendimiento siguió siendo favorable para la región Sureste, pues tuvo una reducción de -11 a -14% para el 2030 y para el 2050 fue de -19 a -24%, en este caso la región más afectada fue Laguna, pues sus rangos de rendimiento fueron de -42 a -54% en el 2030 y de -54 a -70% en el 2050. Los resultados de la simulación al cambiar la fecha de siembra, muestra diferentes alternativas para una posible mitigación de los efectos del cambio climático, para la región sureste en los años 2030 y 2050 es más conveniente atrasar la fecha de siembra, mientras que para las demás regiones es conveniente adelantar la fecha de siembra.

Palabras Clave: Cambio Climático, Mitigación y Escenarios

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento exponencial de la población impulsó un vertiginoso incremento de la demanda global de todo tipo de recursos y modificó casi completamente la superficie del planeta. La base de la expansión del consumo fue el ritmo explosivo del desarrollo tecnológico, que hizo que por primera vez el género humano produjera impactos globales sobre el planeta. Unos de estos impactos son las crecientes emisiones de gases de efecto invernadero que durante los últimos 150 años han contribuido a un calentamiento totalmente inusual. Lo más probable es que este proceso se acelere en las próximas décadas; y si no se produce un cambio en el comportamiento de la humanidad, las consecuencias serán catastróficas durante el siglo XXII. (Barros, 2005).

En nuestro país se están presentando señales muy notorias referentes al cambio climático; una de ellas es el aumento extremo de temperatura, pues solo en la Ciudad de México, en los últimos años, la temperatura se ha incrementado 4 °C. En las regiones del norte del país, tal es el caso de Coahuila, las épocas de calor comienzan de manera anticipada y terminan después del tiempo habitual, esto comparado con años anteriores y debido a eso algunas regiones se están convirtiendo en terrenos estériles, lo que significa desecamiento de ríos, muerte de especies animales y vegetales e impacto en los mantos freáticos. (SEMARNAT, 2016).

Los escenarios climáticos proyectados para el Estado de Coahuila no son nada favorables, puesto que será un Estado en donde las sequías, los incendios forestales y las inundaciones serán eventos cotidianos, presentándose temperaturas altas de hasta los 45 °C y heladas de hasta los -22 °C en zonas donde nunca se habían presentado temperaturas tan extremas como estas. El sector agrícola será uno de los más afectados por el cambio climático, se calcula que la superficie con buenas condiciones para cultivos se reducirá hasta un 50%; esto claramente afectará la posibilidad de alimentar a una población creciente y demandante de recursos. (SEMA, 2013)

La temperatura es importante para una serie de procesos fisiológicos de los cultivos, tal como: polinización, llenado del grano y la fotosíntesis. Las altas temperaturas ocasionan serios impactos negativos sobre estos procesos, con consecuencias posteriores para el rendimiento de los cultivos. (Araus *et al.*, 2008; Semenov and Halford 2009).

De acuerdo a investigaciones que se han realizado del impacto del cambio climático en la agricultura, México se verá afectado en la productividad de alimentos básicos como es el maíz, frijol, soya, trigo, entre otros. (Greenpeace, 2009)

En México el frijol es base de la alimentación, ocupa el cuarto lugar de superficie sembrada, después del maíz (grano), pastos y el sorgo (grano). Se cultiva en promedio 238,170.15 ha, con una producción anual de 349,064.31 ton; el 18% de la superficie se siembra bajo riego, con rendimiento promedio de 1490 Kg ha⁻¹ y 82% en seco, con promedio de 640 kg/ ha. (Barrios-Gómez *et al.*, 2010)

En el estado de Coahuila, la superficie sembrada anualmente con frijol durante los últimos años ha sido de 17,247 ha, de las cuales 6,282 fueron sembradas bajo riego y las 10,965 restantes en temporal. El rendimiento estatal promedio es de 432 y de 1,135 kg/ha en riego y temporal. (INIFAP, 2001). Sin embargo, en los últimos 15 años se ha reducido el rendimiento. Esto implica estudiar procesos fisiológicos del cultivo de manera integral con el clima y suelo, la alternativa es usar modelos de simulación como herramientas de análisis para explicar los componentes del rendimiento, ya que en su sistema de predicción existen relaciones complejas que permiten experimentar y apoyar decisiones de planificación en actividades de investigación.

Por otra parte, permiten predecir escenarios para el uso del suelo, explorar oportunidades de uso de distintas alternativas, identificar instrumentos de política para realizar intervenciones, y desarrollar sistemas de apoyo a la toma de decisiones en la investigación. (Bouma, 1998). El sistema computacional DSSAT (Sistema de Apoyo para la Toma de Decisiones en la Transferencia Agro tecnológica) ha demostrado alta confiabilidad para la modelación, ya que cuenta con nueve modelos para simular el crecimiento,

desarrollo y rendimiento de 28 cultivos, bajo diferentes condiciones de clima y suelo.

Actualmente el uso de las nuevas tecnologías ayuda a favorecer la producción agrícola.

El modelo CROPGRO de DSSAT, ayudará a simular diferentes procesos de crecimiento total y desarrollo de las diferentes etapas vegetativas y reproductivas, así como el rendimiento final, además simula otros procesos, como contenido de agua y nitrógeno en el suelo. (Hoogenboom *et al.*, 2010)

.Considerando esto, es necesario estudiar el posible cambio en la producción de frijol a través del modelo DSSAT, para tomar las mejores decisiones y así poder contrarrestar el impacto climático en las cosechas. En regiones del estado de Coahuila, el cambio climático seguramente afectará el proceso fisiológico del frijol. Este problema obliga a simular escenarios y buscar las mejores estrategias para mitigar el impacto, estableciendo estrategias de manejo. Por lo anterior, esta investigación se centra en los siguientes objetivos.

OBJETIVOS

- Evaluar el efecto que produce el cambio climático en el rendimiento de frijol variedad Mesoamérica Hábito 2 & 3 en cuatro regiones del Estado de Coahuila, para los años 2030 y 2050, utilizando tres modelos de circulación general.
- Evaluar el cambio de fecha de siembra como una estrategia para mitigar el efecto del cambio climático.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Modelos de simulación

2.1.1 Antecedentes

El modelado de cultivos tuvo sus orígenes con científicos tales como: C. T. de Wit (1965), J. L. Monteith (1965), W. G. Duncan (Duncan, 1971, Duncan *et al.*, 1967) y R.S. Loomis (Loomis *et al.*, 1979).

En la década de los 80's tuvo relevancia el estadístico William Sealy Gosset, que trabajaba en la destilería de Arthur Guinness, ya aplicaba sus conocimientos estadísticos en la destilería y en su propia explotación agrícola. El especial interés de Gosset en el cultivo de la cebada le llevó a especular que el diseño de experimentos debería dirigirse no solo a mejorar la producción media, sino también a desarrollar variedades de la cebada cuya mayor robustez permitiese que la producción no se viese afectada por las variaciones en el suelo y clima. Este hito histórico abrió las puertas a la aplicación de la simulación en el campo del proceso de control industrial así como las sinergias que generaba esta simulación basada en la experimentación y técnicas de análisis para descubrir soluciones exactas a problemas clásicos de la industria y la ingeniería.

Durante el periodo de 1970-1981 se desarrollaron avanzadas herramientas de modelado y de análisis de resultados. Gracias también a los desarrollos obtenidos en la generación de datos y a las técnicas de optimización y representación de datos, la simulación llega a su fase de expansión donde comienza a aplicarse en múltiples campos.

Los primeros modelos se centraron en el dosel (*canopia*), con énfasis en la intercepción de la luz y en su estructura misma. Posteriormente progresaron a desarrollar modelos de cultivos enteros, donde fueron enfatizados, la predicción del ciclo de vida y el desarrollo (Hesketh, Baker y Duncan 1972). Para 1974, Duncan había desarrollado modelos de cultivos de algodón, cacahuate, soja y el maíz.

La aparición a mediados de los 90 de la tecnología informática permitió una mayor utilización de estos modelos para el estudio y resolución de

problemas específicos como: desarrollo y crecimiento de los cultivos, evaluación de respuesta a la fertilización, estrategias de riego, situaciones de estrés, predicción de pérdidas por erosión, lixiviación de pesticidas, contaminación del ambiente, calentamiento global de la atmósfera, entre otros (Guevara, 2007).

En esta última década aparecen los primeros modelos de simulación para los cultivos de maíz, soja, trigo y arroz, incluidos en el paquete DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) “**Sistema de apoyo para las decisiones de transferencia tecnológica**”. La simulación de sistemas agrícolas empezó entonces a ser una herramienta para la integración de los diferentes componentes productivos dentro de los sistemas agrícolas. Los avances en el conocimiento de las interacciones dentro del ecosistema, influenciado por el ambiente y por las prácticas de manejo, expandió la potencialidad de uso de esta herramienta como ayuda para la toma de decisiones (Hernández *et al.*, 2009).

2.1.2 Modelo

En general un modelo es un bosquejo que representa un conjunto real con cierto grado de precisión y en la forma más completa posible, pero sin pretender aportar una réplica de lo que existe en la realidad. Los modelos son muy útiles para describir, explicar o comprender mejor la realidad, cuando es imposible trabajar directamente en la realidad en sí.

Un modelo es una representación simplificada de un sistema y un sistema es una parte bien delimitada del mundo real. Por ejemplo, un cultivo con todos sus órganos (raíz, tallo, hojas), procesos y mecanismos (crecimiento, desarrollo, fotosíntesis, transpiración, etc.) constituyen un sistema. (Bandi, 2003)

La modelación comenzó a tener importancia en la agronomía y en otras áreas biológicas, dada su capacidad de suministrar información en un enfoque sistemático de todo el sistema biológico o de una parte, como es el sistema de producción agrícola.

En la actualidad el aumento de la producción de alimentos depende de la utilización prudente de los recursos. Además, cuestiones como el cambio climático, la variabilidad del clima, el suelo y el secuestro de carbono a largo plazo, efectos en la seguridad alimentaria y sostenibilidad del medio ambiente, se han convertido en aspectos importantes.

Los modelos servirán para identificar aspectos donde falta información y donde se debe hacer investigación.

2.1.3 Tipos de Modelos

Diferentes autores han elaborado esquemas para clasificar modelos; por ejemplo. Innis, (1975) divide modelos entre abstractos y físicos, y después subdivide estos tipos entre dinámicos y estáticos, lineal y no lineal, estable y no estable, etc. Al combinar estos tipos de características, se produce un esquema de clasificación; muchos de estos tipos de modelos no serán de utilidad en la investigación con sistemas agrícolas en el futuro próximo, y por lo tanto solo serán discutidos los necesarios.

a) Abstractos o físicos

Los modelos físicos son fenómenos reales. Por ejemplo, mucha de la investigación aerodinámica y diseño de aviones se basa en los resultados obtenidos de avioncitos pequeños. Estos son modelos físicos de aviones grandes. En vez de conducir experimentos costosos con aviones grandes, los investigadores usan los aviones modelos.

En la investigación agrícola es muy común usar modelos físicos. La parcela experimental es una simplificación (un modelo) de un campo real dentro de una finca. A pesar de que la parcela experimental en muchos sentidos es diferente a un campo real, se supone que es suficientemente similar a la realidad que los resultados obtenidos con el modelo (la parcela experimental) son extrapolables a fincas reales.

Los modelos abstractos son muy diferentes a los modelos físicos. Los modelos abstractos son representaciones conceptuales. Pueden ser de tipos dibujos, gráficos, diagramas y ecuaciones. Como los modelos abstractos no

tienen características físicas o bióticas, son mucho más manejables y flexibles que los modelos físicos.

Las siguientes características de modelos, en general, están relacionadas con los modelos abstractos:

b) Cualitativo o cuantitativo

Estos modelos son conjuntos de hipótesis. Un sistema es un arreglo de componentes que funcionan como una unidad; un modelo de un sistema es, por lo tanto, un conjunto de hipótesis sobre la relación entre el arreglo de los componentes y el desempeño del sistema.

Los modelos que describen esta relación pueden ser hipótesis que plantean la existencia o no existencia de una relación entre los componentes (un modelo cualitativo) o puede ir más allá de la simple existencia o no existencia de una relación, y cuantificar esta relación (modelo cuantitativo). La diferencia entre estos dos tipos de modelos se explica con los siguientes ejemplos:

Si un sistema de cultivos (un arreglo espacial y cronológico de cultivos que funcionan como unidad) incluye dos cultivos (por ejemplo maíz y frijol); se puede elaborar un modelo (una hipótesis) relacionando la fecha de siembra relativa de los cultivos y producción del sistema. Un ejemplo de un modelo cualitativo de esta relación sería: “la producción máxima del sistema maíz y frijol intercalado ocurre cuando los dos cultivos se siembran en la misma fecha; al cambiar este arreglo cronológico, sembrado cualquiera de los cultivos antes o después, reduce la producción al sistema”. Esta descripción escrita o descrita con un gráfico o diagrama, es un modelo cualitativo, porque no cuantifica la relación. Un ejemplo del modelo cuantitativo pudiera ser: “para cada 10 días de diferencia entre la siembra de los cultivos, la producción del sistema es reducido al 5%”. (Hart, 1979)

c) Estadístico o Dinámico

Los modelos estadísticos no toman en cuenta el factor tiempo. Los Modelos estadísticos, como **modelos de regresión** son ejemplos de este tipo

de modelos, si se elabora una ecuación de regresión relacionando un nivel de fertilizante y rendimiento en un cultivo, el modelo producido es un modelo estático por que no toman en cuenta el desempeño del cultivo y uso de fertilizante en el tiempo. De lo contrario un modelo dinámico, describe el desempeño de un sistema, en este caso describe el crecimiento del cultivo en el tiempo, no solamente el rendimiento en un instante del tiempo. Matemáticamente, estos modelos son ecuaciones diferenciales.

2.1.4 Simulación

Para Shannon (1974), simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con él para entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias para la operación del sistema. Mientras que Shubink (1973), manifiesta que “Simulación de un sistema (o un organismo) es la operación de un modelo (simulador), el cual es una representación del sistema. Este modelo puede sujetarse a manipulaciones que serían imposibles de realizar, demasiado costosas o imprácticas. La operación de un modelo puede estudiarse y con ello, inferirse las propiedades concernientes al comportamiento del sistema o subsistema real”.

Estos conceptos si bien se acomodaron a la época en que la tecnología no tenía mayores avances, a partir de los años 70 con el apareamiento de las computadoras toman un nuevo rumbo y es así que; según Naylor (1973), simulación; es una técnica numérica para construir experimentos en una computadora digital, los cuales requieren ciertos tipos de modelos lógicos y matemáticos, que describen el comportamiento de un sistema (o algún componente de ellos) en periodos extensos de tiempo real.

a) Funciones de la Simulación

Elmaghraby (1974), manifiesta que las funciones más comunes son las siguientes:

1. Una ayuda para el pensamiento.
2. Una ayuda para la comunicación.
3. Para entrenamiento e instrucción.
4. Una herramienta de predicción.

5. Una ayuda para la experimentación.

De todos estos quizá el más importante, práctica e históricamente, es la predicción de las características de la entidad modelada.

Para este estudio es importante considerar el término sistema, desde el punto de vista de Salvador (1997), quien manifiesta, que un sistema de producción agrícola se constituye de una serie de componentes o procesos llamados subsistemas, los cuales destacan su propia conducta, y los cuales reaccionan en sus formas particulares a los varios estímulos de su medio ambiente. Concordando de esta forma con Barrera (1996), quien menciona que un sistema agropecuario, en un lugar geográfico específico es un “sistema real” propio y único en esa zona, que presenta la influencia de factores endógenos y exógenos los que afectan en menor y mayor grado la sostenibilidad de ese sistema de producción.

Por lo tanto, la simulación hace posible estudiar y experimentar con las complejas interacciones que ocurren en el interior de un sistema dado y la observación detallada del mismo, conduce a un mejor entendimiento del sistema que está simulando y proporciona sugerencias para mejorarlo. (Naylor, 1973).

En general al experimentar con un modelo de un sistema complejo se puede aprender más acerca de sus interacciones internas y de sus elementos, de lo que se podría aprender por medio de la manipulación del mismo sistema del mundo real, debido a un control de la estructura organizacional del modelo, su mensurabilidad, sus políticas y la factibilidad de variación de sus parámetros.

2.1.5 Etapas de la Simulación

En el esquema básico para el desarrollo de un modelo de simulación distinguen las siguientes etapas (Aguilar, 1997):

a) Definición de objetivos

Se refiere a tener una definición previa del propósito que persigue el estudio.

b) Análisis del sistema

El análisis del sistema comprende la tarea de entender las partes del sistema real y sus relaciones. En este pueden detectarse aquellos factores más relevantes que afectan al problema bajo estudio y que influyen en el objetivo específico.

c) Síntesis del sistema

La síntesis del sistema se refiere a la organización o abstracción de los componentes relevantes del sistema, en un sistema lógico.

d) Verificación

Es una etapa esencialmente racional, en que se da interpretación a las funciones matemáticas calculadas de acuerdo al fenómeno real investigado.

e) Validación del modelo

Para Mertens (1996), la validación consiste básicamente en comparar los resultados que entrega el modelo respecto a los resultados obtenidos en un experimento físico.

La validación es una de las etapas más importantes y más difíciles de llevar a cabo en la modelación. Para ello es necesario contar con experimentos que permitan colocar al modelo en la situación en que se llevaron a efecto con los resultados obtenidos en los diferentes niveles de manejo. (Arce, 1996).

f) Experimentación

Se refiere a la ejecución del modelo de simulación para generar la información deseada. La etapa de experimentación comprende varias actividades:

1. Diseño y planificación de los experimentos que proporcionarán la información que se desea.

2. Planeamiento táctico de la información y características necesarias para ejecutar el modelo con el diseño experimental adecuado.
3. Análisis de sensibilidad, entendida como la cuantificación de la variación producida en los datos de entrada o en los parámetros del modelo.
4. Inferencias.

Los objetivos generales de la experimentación esta dirigidos a encontrar los valores de algunos parámetros, que maximizan o minimizan una variable de salida o producto, o a explicar y determinar las relaciones entre variables de salida y factores controlables del sistema (Aguilar y Cañas, 1996).

g) Documentación.

Se refiere a la constancia escrita de todas las etapas del proyecto de tal modo que un usuario que no intervino en su desarrollo pueda entender, teniendo a la vista los objetivos del estudio, la lógica del modelo, validaciones e inferencias.

2.1.6 Uso de los Modelos de Simulación Agrícolas

En el mundo industrializado tanto se han cometido errores graves en el manejo de los recursos naturales, como también se han establecido ciertas bases científicas y tecnológicas comunes a toda investigación agrícola. Aprovechando selectiva e inteligentemente la experiencia y el conocimiento de tal forma generados, los países en vías de desarrollo tienen a su disposición una alternativa para abreviar el camino hacia el desarrollo sustentable del agro, (Salvador, 1997). Consecuentemente, los modelos de simulación de sistemas de suelo y de plantas se han convertido en valiosos instrumentos para asimilar el conocimiento que se obtiene de la experimentación, su uso dentro de un programa de investigación tiene el potencial para incrementar la eficiencia, mediante el énfasis en la investigación basada en los procesos más que en estudiar los efectos netos en un sitio específico (CIP, 1997).

Hesketh y Jones (1976); Whisler *et al.*, (1986), manifiestan que, el historial de los grandes simuladores de cultivos que para estas fechas ya se ha utilizado durante largos periodos, demuestra que estos modelos son valiosos

no tan solo como integradores de los datos experimentales disponibles, sino también como herramientas que enfocan la atención del investigador sobre aquellos aspectos críticos de la investigación que se conocen imperfectamente, y que por lo tanto requieren seguimiento más profundo, por el cual el modelo sirve como bosquejo para estructurar las observaciones y apoyar al investigador en el esclarecimiento de las preguntas más relevantes.

2.2 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)

DSSAT es el principal producto de un proyecto multi-institucional y multidisciplinario, financiado por la Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (USAID) durante el periodo de 1983 a 1993, con sede en la universidad de Hawaii, e involucrando universidades e institutos de investigación de varias partes del mundo.

Originalmente fue desarrollado por el Proyecto Internacional Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT, 1993; Jones *et al.*, 1998) para facilitar la aplicación de los modelos de cultivos en la investigación agronómica. Este desarrollo fue motivado por la necesidad de integrar conocimientos acerca del suelo, clima, cultivos y manejo de los cultivos con el fin de facilitar la toma de decisiones para transferir la producción tecnológica desde un lugar a otro, en donde los suelos y climas son diferentes (IBSNAT, 1993).

El sistema DSSAT V3 originalmente contenía 5 modelos separados, desarrollados por diferentes grupos de investigadores e instituciones, los mismos que coordinaron esfuerzos para estandarizar un formato para ingreso, salida y para implementar el mismo suelo, agua y balance de nitrógeno en cada modelo. Posteriormente desarrollaron el Sistema incluyendo 16 modelos de cultivos en la versión V3.5:

Cereales: Cebada, Maíz, Mijo, Arroz, Sorgo, Trigo.

Leguminosas: Frijol, Soya, Maní, Garbanzo.

Tuberosas: Yuca, Papa.

Otros: Caña de azúcar, Tomate, Girasol.

Actualmente se ha desarrollado el DSSAT V4.5, donde permite simulaciones de 28 cultivos diferentes, con nuevas herramientas que facilitan la creación y el manejo de diversos experimentos, permitiendo manipular por ejemplo los perfiles de suelos y datos meteorológicos.

El “Sistema de Apoyo para la Toma de Decisiones en la Transferencia de Agro tecnología” (DSSAT) consiste de un conjunto de programas de computación accesibles bajo un programa de enlaces (software Shell) diseñado para:

- a. Acceder, organizar y almacenar datos sobre cultivos, suelos, clima y precios.
- b. Retraer, analizar, y desplegar datos
- c. Validar y calibrar modelos de crecimiento de cultivos
- d. Evaluar diferentes estrategias de producción en un lugar dado o dentro de una región.
- e. Analizar el riesgo asociado con la variabilidad del clima.

(Aguilar, 2016) Afirma actualmente DSSAT, ha incluido mejoras para aplicaciones estacionales y análisis de secuencias para evaluar los riesgos económicos y ambientales asociados con el cultivo, como el riego, la fertilización, la disponibilidad de nutrientes del suelo, el cambio climático, la captación de carbono del suelo, la variabilidad del clima y la precisión de las estrategias de manejo del cultivo.

2.2.1 Componente DSSAT

Según Bowen (1997), todos los modelos para cultivos en DSSAT tienen en común el mismo formato para acceso-salida (input-output), y son similares en su nivel de detalle, constituido por módulos renovables e intercambiables de aquellas rutinas biológicas que todos los cultivos tienen en común, lo cual elimina la duplicación de esfuerzos, ya que el mejoramiento de algún conocimiento o rutina biológica puede propagarse rápidamente a todos los modelos que dependan de los mismo.

DSSAT, presenta componentes que permiten el ingreso de datos de clima, suelo y coeficientes genéticos; así como otra serie de opciones:

- **Weather Data** (Pronosticador del Tiempo): Utilizado para importar datos diarios del tiempo en cualquier formato, exportar datos hacia el formato de acceso del modelo, revisión del llenado y error de datos, y para la generación estadística del tiempo.
- **Soil Data** (Datos del Suelo): En este componente, el usuario puede acceder a la base de datos del servicio de conservación de suelos con cientos de perfiles de suelo de todo el mundo, o manualmente capturar la información del perfil del suelo a utilizarse con el modelo de cultivo.

El perfil de suelo debe contener coeficientes relacionados con el drenaje, la escorrentía, la evaporación, la reflexión de la radiación solar y un factor de crecimiento radical, que fueron definidos de acuerdo a las condiciones descritas por el IGAC (2000).

- **X-Build** (Crea X): Permite crear archivos de datos experimentales, bien sea para guardarlos o para correr los modelos de cultivo.
- **Genotype Data** (Datos del Genotipo): Es la opción donde el usuario puede estimar los coeficientes específicos del cultivar, los cuales describen la sensibilidad de cada variedad a la temperatura, fotoperiodo y definen los valores de inicio para la emergencia, floración, primeras vainas, primeras semillas y maduración fisiológica relacionado con el modelo a partir de los datos tomados de experimentos de campo con condiciones óptimas.

2.2.2 Coeficientes Genéticos

En el modelo para el cultivo de frijol (CROPGRO-Drybean) del sistema DSSAT, se estiman los siguientes coeficientes genéticos de acuerdo a las etapas y rendimientos:

Para desarrollo del Cultivo:

- **CSDL**: Longitud crítica del día más corto, bajo la cual no existe progreso en el desarrollo reproductivo, sin efecto (para la planta de días cortos) (1/hora).
- **PPSEN**: Pendiente de la respuesta relativa al fotoperiodo en el desarrollo (positivo para plantas de día corto) (1/hora).

- **EM-FL:** Tiempo entre emergencia de plantas y la aparición de flores (R1) (días fototérmicos).
- **FL-SH:** Tiempo entre la primera flor y la primera vaina (R3) (días fototérmicos).
- **FL-SD:** Tiempo entre la primera flor y las primeras semillas (R5) (días fototérmicos).
- **SD-PM:** Tiempo entre (R5) y la madurez fisiológica (R7) (días fototérmicos).
- **FL-LF:** Tiempo entre la primera flor (R1) y fin de la expansión foliar (días fototérmicos).

Para Crecimiento Vegetativo:

- **LFMAX:** Máxima fotosíntesis foliar.
- **SLAVR:** Específica área foliar del cultivar bajo condiciones estándares de crecimiento (cm^2/g).
- **SIZLF:** Máximo tamaño del llenado de hojas (tres hojas permitido) (cm^2)

Para rendimiento y sus componentes:

- **XFRT:** Máxima fracción de crecimiento diario que es dividido para semillas y valvas.
- **WTPSD:** Máximo peso por semilla (g).
- **SFDUR:** Duración de llenado de semilla por vaina en condiciones estándares de crecimiento (días fototérmicos).
- **SDPDV:** Promedio de semillas por vaina en condiciones estándares de crecimiento (No./vaina).
- **PODUR:** Tiempo requerido por el cultivar para alcanzar la carga final de vainas bajo óptimas condiciones (días fototérmicos).

2.2.3 Modelos de Simulación de Crecimientos de Leguminosas

El desarrollo de modelos de simulación para leguminosas data desde 1980 con la construcción de modelos para soya y maní.

BEANGRO nace de la preocupación de los investigadores, con un incipiente desarrollo a partir de 1985, debido a los bajos rendimientos de variedades de frijol de semillas largas, por ser de mayor demanda en los

mercados de países desarrollados, las mismas que producen de 300 a 500 kg/ha; rendimientos inferiores que los registrados en variedades de semillas pequeñas (Whrite y González, 1990).

El uso potencial del modelo para frijol está soportado por los amplios sucesos de modelos como SOYGRO Y PNUTGRO, y predice el crecimiento vegetativo y desarrollo reproductivo. Para esto, los creadores separaron las rutinas del modelo las cuales calculan fotosíntesis, respiración, acumulación de materia seca, crecimiento de hojas, tallos, raíces, floración, crecimiento de vainas y semillas; el modelo también calcula infiltración de lluvia y la irrigación dentro del perfil del suelo saturado y no saturado, la cantidad de agua que fluye por las diferentes capas de suelo, evaporación del suelo y la transpiración. Para lo cual el modelo requiere el ingreso de datos de clima diario desde la radiación total, temperatura máxima y mínima, precipitación total; además necesita prácticas de manejo de cultivos tales como espacio entre surcos y plantas, fecha de plantación, variedad, regímenes de riego y fertilización; finalmente información del perfil del suelo y condiciones de agua en el suelo son requeridas, (IBSNAT, 1988).

El modelo CROPGRO fue desarrollado bajo la supervisión del proyecto IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer) de la Universidad de Georgia, con la contribución de científicos en el Centro de Agricultura Tropical, Cali, Colombia, Centro Internacional de Desarrollo de Fertilizantes (IFDC), y otras Universidades de Estados Unidos. Este es una integración de modelos existentes para soya, frijol, y maní, al que se incorporó nuevas capacidades y características, el cual fue calibrado y validado con un conjunto de datos representativos de varias condiciones de medioambientes y estrategias de manejo. El modelo CROPGRO tiene la capacidad de simular crecimiento, desarrollo y rendimiento de leguminosas de grano como una función de clima, suelo y otras variables medioambientales y prácticas de manejo (IBSNAT, 1990).

Actualmente CROPGRO simula el crecimiento de diez cultivos, incluidos siete leguminosas de grano: (soja max L. Merr.); cacahuete o maní (*Arachis hypogaea* L.); judía, frijol (*Phaseolus vulgaris* L.); garbanzo (*Cicer arietinum* L.),

caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp), mucuna o frijol terciopelo (*Mucuna pruriens* L.) y haba (*Vicia faba* L.), así como cultivos de otras familias botánicas, como tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.); pasto braquiaria (*Brachiaria decumbens* Sapf.) y yuca, mandioca o casabe (*Manihot esculenta* Crantz). (Hoogenboom, *et al.*, 2010)

En la versión más reciente de CROPGRO-Drybean V4.5 está incorporada al sistema DSSAT-CSM actualmente DSSAT V4.5 en la figura 2.1 se puede ver la representación esquemática de este modelo.

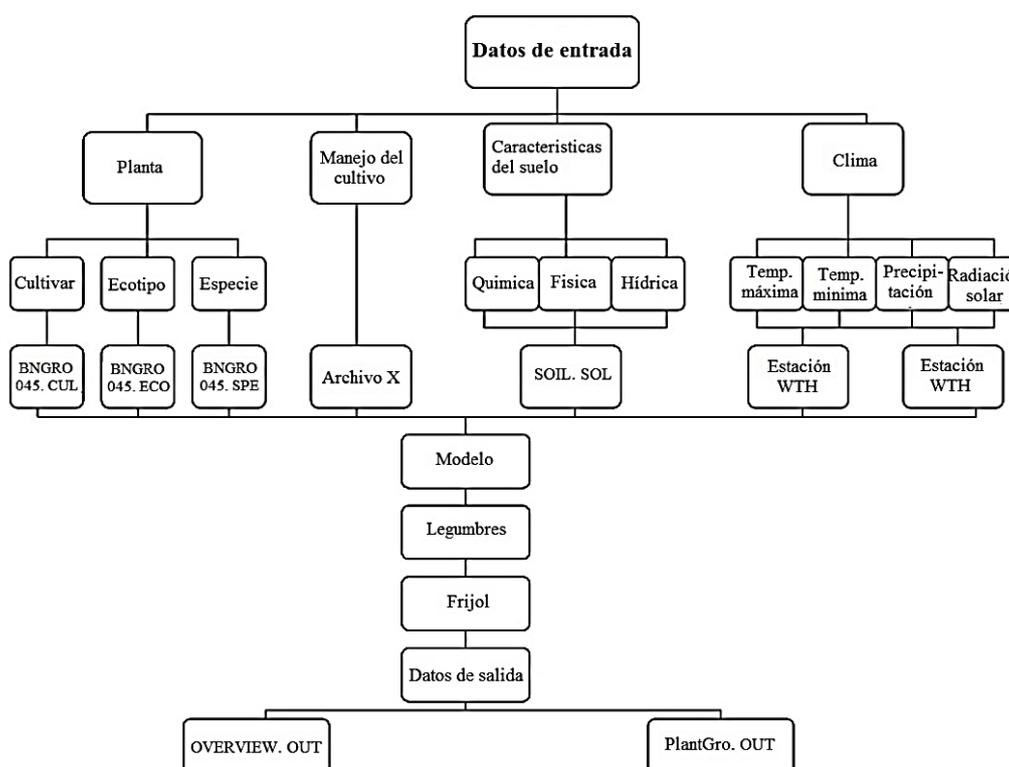


Figura 2. 1 Representación esquemática de la estructura del modelo CROPGRO-Drybean

2.3 Cambio climático

2.3.1 El clima y el cambio climático

El cambio climático es un problema con características únicas, ya que es de naturaleza global, sus impactos mayores serán en el largo plazo e involucra interacciones complejas entre procesos naturales (fenómenos ecológicos y climáticos) y procesos sociales, económicos y políticos a escala mundial.

El estudio del clima es un campo de investigación complejo y en rápida evolución, debido a la gran cantidad de factores que intervienen. El clima de la Tierra nunca ha sido estático. Como consecuencia de alteraciones en el balance energético, está sometido a variaciones en todas las escalas temporales, desde hace millones de años. El clima es un estado cambiante de la atmosfera, mediante sus interacciones con el mar y el continente, en diversas escalas de tiempo y espacio (Martínez & Bremauntz, 2004). (Figura 2.2).

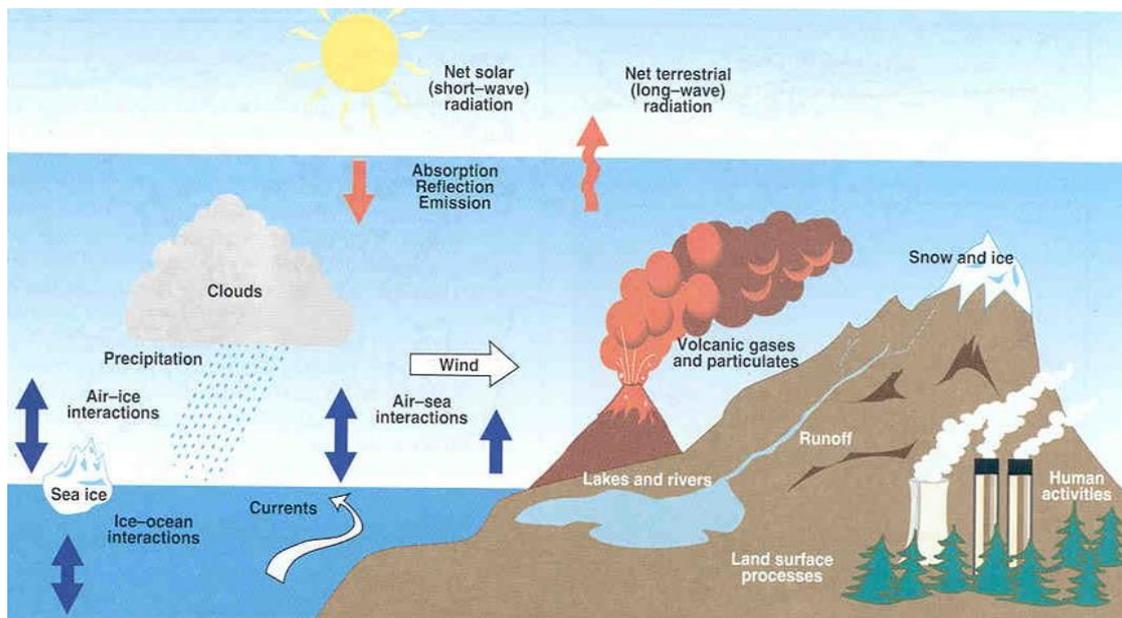


Figura 2. 2 Esquema de los componentes del cambio climático (IPCC, 1996)

El cambio climático es la variación global del clima de la Tierra. Es debido a causas naturales y también a la acción del hombre y se producen a muy diversas escalas de tiempo y sobre todos los parámetros climáticos: temperatura, precipitaciones, nubosidad, etc. El "efecto de invernadero" se refiere es la retención del calor del Sol en la atmósfera de la Tierra por parte de una capa de gases en la atmósfera. Sin ellos la vida tal como la conocemos no sería posible, ya que el planeta sería demasiado frío. Entre estos gases se encuentran el dióxido de carbono, el óxido nítrico y el metano, que son liberados por la industria, la agricultura y la combustión de combustibles fósiles. El mundo industrializado ha conseguido que la concentración de estos gases haya aumentado un 30% desde el siglo pasado, cuando, sin la actuación humana, la naturaleza se encargaba de equilibrar las emisiones. (Martínez & Bremauntz, 2004)

2.3.2 Escenario del cambio climático

Los escenarios de cambio climático son una representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basados en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construyen para ser utilizados de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico, y que sirven a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos. Estos escenarios no son pronósticos climáticos, ya que cada escenario es una alternativa de cómo se puede comportar el clima futuro. Se realizó un análisis para evaluar el desempeño regional de los Modelos de Circulación General (MCG), usando un período histórico específico, el cual brinda elementos para observar la reproducción de procesos atmosféricos de importancia para México. El desempeño de los modelos debe evaluarse ya que un MCG puede representar bien una región y tener un mal desempeño en otra. (INECC, 2015).

Los escenarios pueden ser contruidos como lo ha hecho el IPCC (Panel intergubernamental sobre el cambio climático) en el informe Especial de Escenarios de Emisiones (SRES). Estos escenarios se realizaron para explorar el desarrollo del futuro del medio ambiente global, con especial énfasis en la producción de gases de efecto invernadero. A continuación se describen algunas terminologías para comprender mejor los escenarios:

Línea evolutiva: Descripción narrativa de un escenario que resalta sus principales características, las relaciones entre las fuerzas determinantes fundamentales y la dinámica de su evolución.

Escenario: Proyecciones de un futuro potencial, con base en una lógica clara y una línea evolutiva cuantificada.

Familia de escenarios: escenarios que tienen una línea evolutiva similar en lo que respecta a sus características demográficas, sociales, económicas y de cambio tecnológico. La serie de escenarios del SRES consta de cuatro familias A1, A2, B1 y B2.

Estas últimas cuatro familias describen las fuerzas determinantes en las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles, así como su evolución

durante el siglo XXI. Cada línea evolutiva representa un nivel de desarrollo divergente en cuestiones demográficas, sociales, económicas y tecnológicas.

En el siguiente cuadro muestran las líneas y familia de escenarios:

Tabla 2. 1 Cuadro de líneas evolutivas y familias de escenarios

FAMILIA DE ESCENARIOS	DESCRIPCIÓN DE LAS LÍNEAS EVOLUTIVAS
A1	Presenta un mundo futuro con crecimiento económico muy rápido; la población mundial llega a su punto máximo. Se asume una rápida introducción de tecnología nueva y más eficiente.
A2	Supone un mundo muy heterogéneo, con la población global en constante aumento y el crecimiento económico orientado regionalmente; éste es más lento y fragmentado que las otras líneas evolutivas.
B1	Muestra un mundo convergente con los mismos patrones de población que la familia A1, pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de servicios e información.
B2	Plantea un mundo en donde el énfasis se concentra en soluciones locales para la sustentabilidad económica, social y ambiental.

Fuente: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2015)

Se puede decir, en un resumen, que los escenarios del SRES consideran diferentes condiciones del desarrollo global para los próximos cien años y son, en un sentido más amplio escenarios del estado, y crecimiento de la población y la economía. Las dos grandes familias de escenarios conllevan a estimar las misiones globales de gases de efecto invernadero. Los escenarios “A” describen un mundo futuro con alto crecimiento económico, mientras que en los “B” el crecimiento es más moderado. Los escenarios A1 y B1 suponen que habrá una globalización tal que las economías convergerán en su desarrollo. En los A2 y B2 se considera que el desarrollo se dará más en un nivel regional

2.3.3 El Cambio Climático en México

El cambio climático es un problema con características únicas por su naturaleza global, porque sus impactos mayores se verán a largo plazo y por ser resultado de interacciones complejas entre procesos naturales (fenómenos ecológicos y climáticos) y procesos sociales, económicos y políticos a escala mundial.

México, por una parte, es participe en causas del problema pues emite 1.5% de los gases que generan al fenómeno. De acuerdo a las cifras de la Agencia Internacional de Energía en 2004, México se ubica entre los 15 países con mayores emisiones por quema de combustibles fósiles a nivel mundial. Por otra parte, el país es especialmente vulnerable a los efectos del cambio climático, al situarse en zonas que serán impactadas por sequías (Noroeste); por inundaciones (Sureste); por fenómenos meteorológicos extremos en ambos litorales, cuya intensidad seguramente se incrementará; así como, por tener debilidades en sus estructuras sociales y económicas, que de mantenerse la tendencia, se verían acentuadas las hoy latentes desigualdades en amplias porciones de nuestra población (Sanchez & Urbina, 2015).

El sector agropecuario en México ha sufrido una serie de cambios y adaptaciones a lo largo de los años, tanto por modificaciones en las condiciones de la tierra, las variaciones en el clima y los cambios en las demandas de la sociedad. En ocasiones esto se ha hecho al modificar las prácticas de manejo de las unidades agropecuarias y por la sustitución de cultivos o razas, entre otras causas.

Entre los efectos del cambio climático se tiene el incremento en la temperatura, lo cual tiene efectos negativos en el desarrollo vegetativo de los cultivos y provoca la proliferación de malas hierbas e insectos dañinos, así como la aparición o reemergencia de enfermedades. Diversos organismos como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el Fondo Monetario Internacional (FMI) y el Banco Mundial (BM) han expresado su especial preocupación respecto al tema alimentario, en particular por sus efectos sobre la población bajo condiciones de pobreza. Sin embargo, los estudios realizados también mencionan cierta incertidumbre en

cuanto a los impactos esperados por países y por regiones. A nivel nacional, en las investigaciones realizadas para medir las posibles consecuencias del cambio climático en México es posible encontrar una variedad de estudios que abordan el problema desde distintas perspectivas y sobre diversos sectores prioritarios para el país. De acuerdo a Villers y Trejo (1997) más de la mitad del territorio del país (entre el 50% y el 57%) cambiará sus condiciones de temperatura y precipitación, de manera que el clima actual podría ser clasificado en otro subtipo y los habitantes de los ecosistemas, incluida la población humana, deberán cambiar para adaptarse a las nuevas condiciones. (SAGARPA, 2012)

2.4 Cultivo de Frijol

2.4.1 Importancia

En México y un gran número de países del mundo, el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es un cultivo importante por la superficie sembrada y por ser un componente primordial en la alimentación humana. En la primera década del presente siglo, Brasil con el 16 % de la producción total, India con el 15.9%, Myanmar 10.5%, China 8.9% y México con el 5.8%, se situaron como los 5 países de mayor producción de la leguminosa. En nuestro país el frijol ocupa el segundo lugar por superficie cosechada, después del maíz. En los últimos 12 años, la información estadística registra una producción nacional de 1.12 millones de toneladas en promedio anual, con fluctuaciones a la alza en 2002, 2003 y 2006, con una producción promedio anual de 1, 400,000 toneladas de grano y a la baja en 2006 y 2011, años en que la cosecha promedio anual fue de 697,335 toneladas. Estas diferencias significativas en la producción anual, se deben a las variaciones de la precipitación, ya que el 80% de la superficie cosechada se obtiene bajo condiciones de temporal (Lépiz Ildefonso,R., S. Sánchez P., E. López A., J. J. López A., I. E. Chavarín E. Y K. E. Meza V., 2015).

2.4.2 Antecedentes

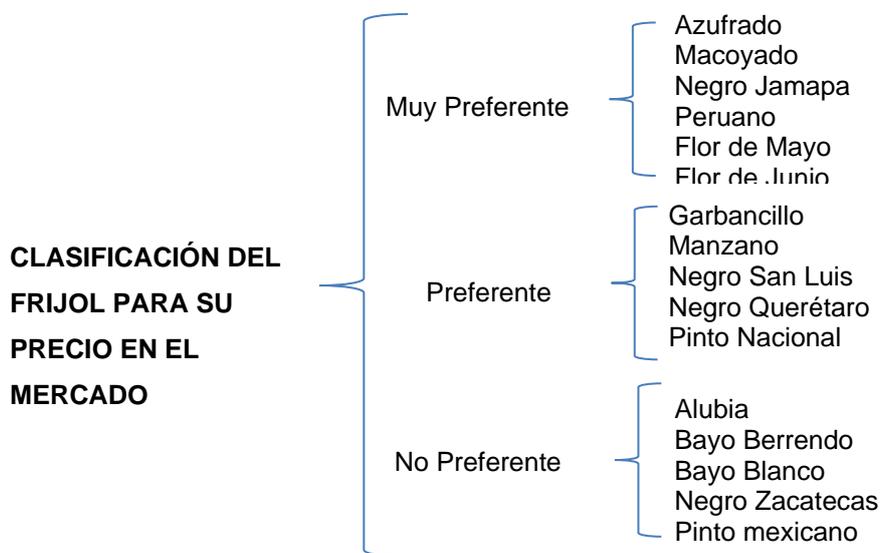
El frijol se originó y domesticó en América Latina con dos orígenes geográficos (Mesoamérica y los Andes) genéticamente diferenciables que derivan de un ancestro común de 100,000 años de antigüedad. (BITOCCHI, et

al. 2013). Se tienen registros de semillas cultivadas de frijol de 3,000 años de antigüedad (BROWN, 2006).

El frijol pertenece a la familia *Fabácea*, subfamilia *Papilionoideae*, tribu *Phaseolae*, y especie *Phaseolus vulgaris* L. Por su alto contenido proteico (20-25%) es, entre las leguminosas, el tercer cultivo más importante en el mundo, después de la soya y el cacahuate (SINGH *et al.*, 1999). Como la mayoría de las leguminosas, sus proteínas son deficientes en aminoácidos azufrados como la metionina y la cisteína, sin embargo, una ingesta regular de frijol favorece en la disminución de los niveles de colesterol y reduce los riesgos de padecer cáncer (ANDERSON and GUSTAFSON, 1989). Particularmente en México, el frijol es la leguminosa de mayor consumo humano y representa el 36% de la ingesta diaria de proteínas.

En México es considerado uno de los centros de origen del frijol y es uno de los principales países productores. Se considera que en el país existen cerca de 70 variedades nativas de frijol, los cuales se distribuyen en siete grupos: negros, amarillos, blancos, morados, bayos, pintos y moteados. Para su clasificación, según la Compañía Nacional de Subsistencias Populares (CONASUPO), dicha clasificación ha sido para establecer una diferenciación en el precio que se paga dependiendo de las variedades (FIRA, 2016). En el siguiente cuadro se presentan la clasificación en tres grandes grupos:

Tabla 2. 2 Clasificación del frijol para su venta en el mercado



Fuente: FIRA, 2016

2.4.3 Descripción general

El frijol es el cuarto cultivo en importancia por la superficie sembrada en México, después del maíz grano, pastos y el sorgo en grano. Por su amplia adaptación y por el número de variedades mejoradas disponibles, el cultivo de esta leguminosa se realiza prácticamente en todas las regiones, condiciones climáticas y tipos de suelos en el país. El clima y la disponibilidad de agua son los factores más importantes que determinan la productividad del cultivo, ya que las principales regiones productoras registran bajos niveles de precipitación pluvial y además con una distribución errática.

Durante el año agrícola 2015 se cosecharon 1.56 millones de ha de frijol en México, lo que significó una disminución de 7.5 por ciento con respecto a la superficie cosechada en el 2014. El 90.1 por ciento de la superficie cosechada fue de temporal; y el 87.4 por ciento correspondió al ciclo Primavera-Verano. En el 2016, se cosechó el 92.6 por ciento de las 1.68 millones de ha sembradas de frijol (FIRA, 2016).

Para el estado de Coahuila, la superficie sembrada anualmente en los últimos años ha sido de 17,247 ha, de las cuales 6,282 fueron sembradas bajo riego y las 10,965 restantes en temporal. El rendimiento estatal promedio es de 1,135 y 432 kg/ha en riego y temporal, en forma respectiva (Sánchez, 2001).

2.4.4 Etapas fenológicas del cultivo

Debido a la variabilidad en la duración de las etapas de desarrollo de la planta como secuencia a diferentes variaciones como, clima, precocidad y los hábitos de crecimientos, entre otros por mencionar. A continuación se presenta las etapas de desarrollo de la planta con base a sus características morfológicas, que puede ser usada en los todos los tipos de hábito de crecimiento y con todos los genotipos encontrados.

2.4.4.1 Etapa vegetativa.

a) Etapa V0: Germinación

La semilla se coloca en un ambiente favorable para su germinación, se toma como la iniciación de la etapa V0, cuando la semilla tiene humedad suficiente para su proceso de germinación o su primer riego. La semilla absorbe agua inicialmente y ocurren en ella los fenómenos de división celular y

las relaciones bioquímicas que liberan los nutrimentos de los cotiledones. Posteriormente emerge la radícula, luego esta se convierte en raíz primaria. El hipocotilo también crece quedando los cotiledones al nivel del suelo, en ese momento termina la etapa de germinación (Fernández *et al.*, 1982).

b) Etapa V1: Emergencia.

Se inicia cuando los cotiledones de la planta aparecen al nivel del suelo, se considera que el cultivo de frijol inicia en la etapa V1 cuando el 50% de la población esperada, presenta cotiledones al nivel del suelo. Después de la emergencia, el hipocotilo se endereza y crece hasta alcanzar su límite máximo y comienzan a separarse y después comienza el despliegue de las hojas primarias (Fernández *et al.*, 1982).

c) Etapa V2: Hojas primarias

Comienza cuando las hojas primarias de la planta están desplegadas. Las hojas primarias del frijol son unifoliadas y opuestas, están situadas en el segundo nudo del tallo principal y cuando están completamente desplegadas. Los cotiledones pierden su forma, arqueándose y arrugándose.

d) Etapa V3: Primera hoja trifoliada

Se inicia cuando la planta presenta la primera hoja trifoliada completamente abierta y plana. Se considera que la hoja está desplegada cuando las láminas de los folíolos se ubican en un plano. La hoja aún no ha alcanzado su tamaño máximo y son aún cortos tanto el entrenudo entre las hojas primarias y la primera hoja trifoliada (Fernández *et al.*, 1982).

e) Etapa V4: Tercera hoja trifoliada

Comienza cuando la tercera hoja trifoliada se encuentra desplegada. A partir de esta etapa que se hacen claramente diferenciables algunas estructuras vegetativas como el tallo, ramas, y otras hojas trifoliadas. El tipo de ramificación y el número y la longitud de las ramas dependen, entre otros factores, del genotipo y de las condiciones del cultivo. La primera rama comienza su desarrollo cuando la planta inicia la etapa V3. Cuando el tallo principal se encuentra en un promedio de tres o cuatro hojas trifoliadas desplegadas (Fernández *et al.*, 1982).

2.4.4.2 Etapa de la fase reproductiva

Cuando las yemas apicales de las plantas de hábito de crecimiento determinado se desarrollan en botones florales y en las yemas axilares se desarrolla el primer racimo, termina la fase vegetativa y comienza la reproductiva.

a) Etapa R5: Prefloración

Inicia cuando aparece el primer botón o racimo. En una variedad determinada, se nota el desarrollo de botones florales en el último tallo o rama. Al inicio de esta etapa, los racimos se observan en los nudos inferiores.

b) Etapa R6: Floración

Se inicia cuando la planta presenta la primera flor abierta. La primera flor abierta corresponde al primer botón floral. La floración en las ramas ocurre en el mismo orden que en el tallo; es decir, es descendente en el hábito determinado y ascendente en los tipos indeterminados. Dentro de cada racimo, la floración empieza en la primera inserción floral y continua en la siguiente. Una vez que la flor ha sido fecundada y se encuentra abierta, la corola se marchita y la vaina inicia su crecimiento; como consecuencia de la vaina (Fernández *et al.*, 1982).

c) Etapa R7: Formación de las vainas

Se inicia cuando la planta presenta la primera vaina con la corola de la flor colgada o desprendida. La formación de las vainas inicia durante los primeros 10 ó 15 días después de la floración ocurre un crecimiento longitudinal de la vaina y poco crecimiento de las semillas (Fernández *et al.*, 1982).

d) Etapa R8: Llenado de las vainas

Inicia cuando el 50% de las plantas empieza a llenar la primera vaina. Comienza el crecimiento de las semillas, las vainas presentan abultamientos que corresponden a las semillas en crecimiento. La vaina se alarga hasta los 10 o 12 días después de la floración. Al final de la etapa los granos pierden su color verde para adquirir las características de la variedad. En algunas

variedades, las valvas de las vainas también empiezan a pigmentarse (Fernández *et al.*, 1982).

e) Etapa R9: Maduración

Es la última escala, se caracteriza por la decoloración y secado de las vainas. Estos cambios en la decoloración son indicativo del inicio de la maduración de la planta; continúa el amarillamiento y caída de las hojas y todas las partes de la planta se secan; las vainas al secarse pierden pigmentación y su contenido de agua baja hasta un 15%, momento en el cual las semillas adquieren su coloración típica, según su variedad (Fernández *et al.*, 1982).

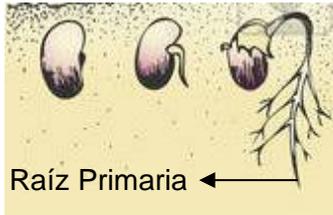


Figura 2. 3 Etapa V0, germinación



Figura 2. 4 Etapa V1, aparición de cotiledones de la planta a nivel del suelo.



Figura 2. 5 Etapa V2, hojas primarias desplegada



Figura 2. 6 Etapa V3, primeras hojas trifoliadas desplegadas



Figura 2. 7 Etapa V4, aparición de la tercera hoja trifoliada



Figura 2. 8 Etapa R5 iniciación de los primeros brotes florales



Figura 2. 9 Etapa R6, apertura de la primera flor.



Figura 2. 10 Etapa R7, la corola de la flor recién se ha desprendido



Figura 2. 11 Etapa R8, llenado de la vaina



Figura 2. 12 Etapa R9, iniciación de cambio de color de las vainas

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción de los sitios de estudio

El trabajo que se presenta, se desarrolló en el estado de Coahuila basándose en la evaluación del efecto del cambio climático en el rendimiento del cultivo de frijol variedad Mesoamérica Hábito 2 y 3 para cuatro regiones (Sureste, Laguna, Centro y Norte).

3.1.1 Macro localización

El estado de Coahuila de Zaragoza es una de las 32 entidades federativas de la República Mexicana. Se ubica en el norte del país, en la parte central de la frontera de los Estados Unidos de América. Es el tercer estado más extenso del país que representa un 7.73% de la superficie del país. La superficie estatal forma parte de las provincias: Sierras y llanuras del Norte, Sierra Madre Oriental y Grandes Llanuras de Norteamérica.



Figura 3. 1 Mapa geográfico del Estado de Coahuila

3.1.2 Micro localización

Para la evaluación de los efectos del cambio climático en el rendimiento del frijol variedad Mesoamérica Hábito 2 y 3, se estudiaron cuatro regiones que se mencionaron anteriormente: Sureste, Laguna, Centro y Norte. Para su evaluación, se eligieron puntos importantes de cada región, para analizar los cambios que se presentan en los diferentes escenarios y realizar comparaciones una vez realizado las simulaciones.

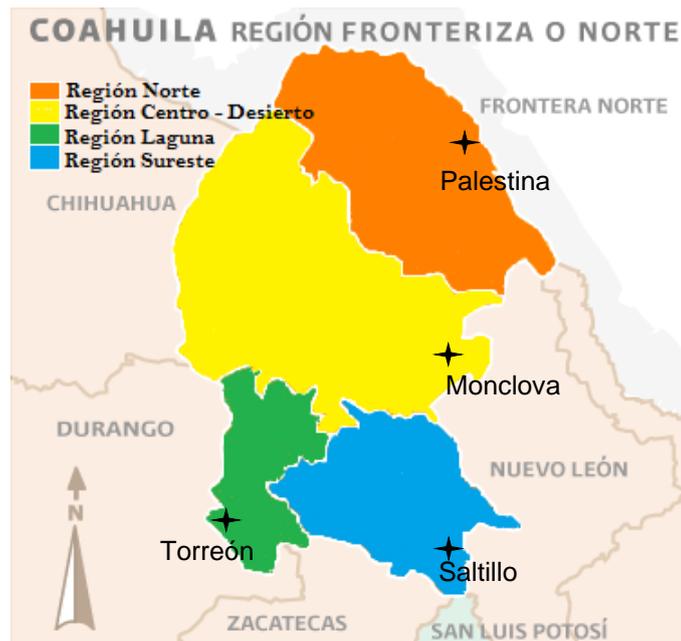


Figura 3. 2 Puntos localizados para cada Región

En la siguiente tabla se muestran las coordenadas geográficas de los principales lugares de cada región.

Tabla 3. 1 Coordenadas Geográficas de las regiones a estudio

REGIÓN	LOCALIDAD	LATITUD (NORTE)	LONGITUD (OESTE)	ELEVACIÓN (MSNM)
Sureste	Saltillo	25°25'58"	101°00'00"	1560
Laguna	Torreón	25°32'38"	103°26'31"	1125
Centro	Monclova	26° 53'59"	101°25'10"	600
Norte	Palestina	29°08'59"	100°58'58"	340

3.1.3 Clima

En el estado de Coahuila de Zaragoza, predomina el clima semicálido en verano y frío en invierno. La temperatura media anual es de 18 a 22°C, la temperatura más alta, mayor de 30°C, se presenta en los meses de mayo a agosto y la más baja, alrededor de 4°C, en enero. La precipitación total anual es 400 mm. El 46% del territorio es muy seco y el 49% semiseco. Solo en el 5% del territorio, localizado en las partes altas de las sierras del sur, se registra clima Templado subhúmedo (INEGI, 2016).

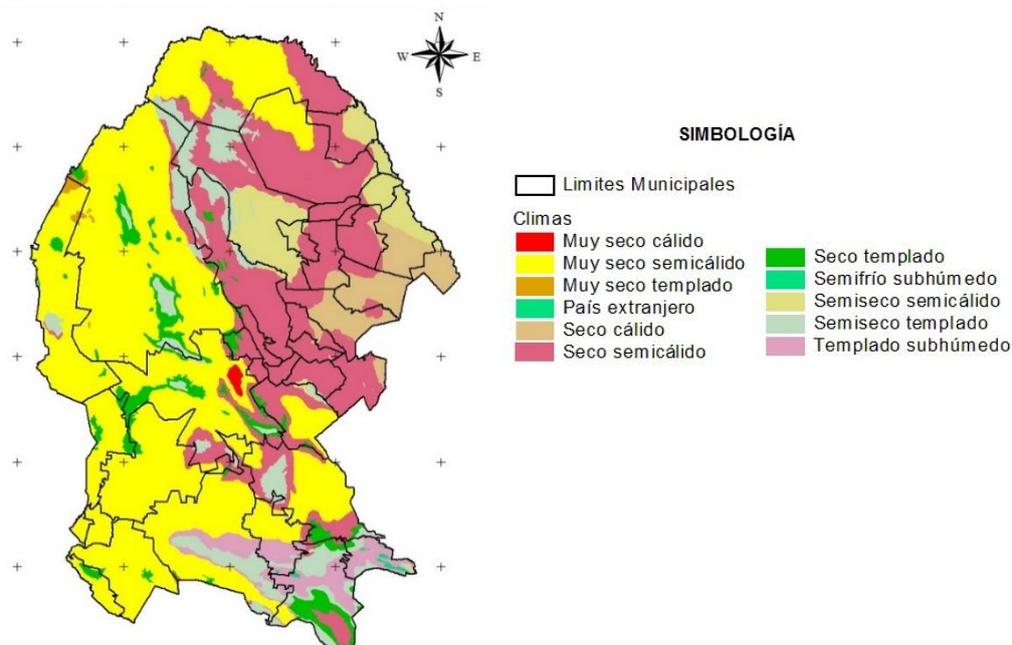


Figura 3. 3 Mapa Clima del Estado de Coahuila

Fuente: Elaborado con base a información a INEGI; Cartas de Climas

Tabla 3. 1 Clasificación de climas por Köppen-Geiger

MUNICIPIO	CLAVE	TIPO DE CLIMA	DESCRIPCIÓN
SURESTE	BS0kx	Seco Templado	Corresponde a templado con verano cálido, temperaturas medias, anual 12° a 18 °C, del mes más frío entre - 3° y 18 °C y del mes más cálido > 18 °C. Régimen de lluvia a escasa todo el año.
LAGUNA	BWhw	Muy Seco Semicálido	Semicálido, temperaturas medias, anual 18° a 22 °C y del mes más frío < 18 °C, con regímenes de lluvias en verano.
CENTRO	BS0Hx	Seco semicálido	Corresponde a semicálido con invierno fresco, temperaturas medias, anual 18° a 22 °C y del mes más frío < 18 °C. Régimen de lluvia al de escasa todo el año.
NORTE	BS1hx	Semiseco Semicálido	Semicálido con invierno fresco, temperaturas medias, anual 18° a 22 °C y del mes más frío < 18 °C. Régimen de lluvia al de escasa todo el año.

Fuente INEGI, 2010

3.1.4 Actividad Agrícola

Coahuila tiene una superficie de 15, 156,256 ha, es el tercer estado más grande de la República Mexicana. Se estima una población de 2.7 millones de habitantes, de los cuales el 68% se concentra en las ciudades de Saltillo, Torreón, Monclova, Piedras Negras y Acuña y el 32% restante en otras ciudades y comunidades del estado. La población rural, según cifras del INEGI (2012) es de aproximadamente el 10% de la población. De acuerdo a condiciones económicas propias, los municipios se agrupan en seis regiones: Norte, Carbonífera, Centro, Desierto, Sureste y la Laguna (Secretaria de Desarrollo Rural, 2012).

La superficie para la agricultura en el Estado es del 4.97% del territorio. Tradicionalmente se siembran en el Estado, poco más de 294 mil ha, de las cuales el 56% corresponden a cultivos de riego y el restante 44% a los cultivos de temporal. Del total de cultivos que se producen, el 63% corresponde a cultivos forrajeros como el sorgo, alfalfa, avena, maíz forrajero y zacates; el 16% de la producción corresponde a cultivos básicos como el maíz, frijol y trigo; el 8% a cultivos frutales como manzana, durazno y nogal; el 9% a cultivos industriales como el algodón, cártamo y sorgo escobero; y el 4% corresponde a hortalizas (INEGI, 2011; Secretaria de Desarrollo Rural, 2012).

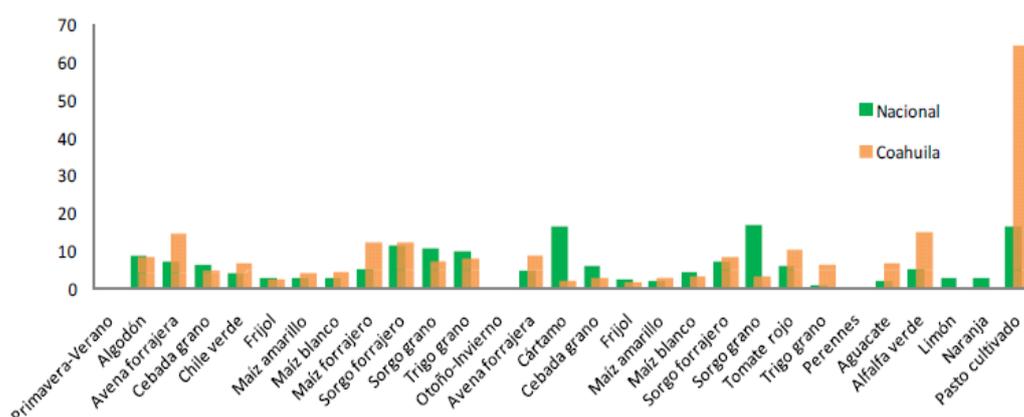


Figura 3. 4 Tamaño promedio de producción por producto en el estado de Coahuila

Fuente: INEGI, 2011

Según el INEGI, (2011) el estado Coahuila se encuentra en el lugar número 20 que produce 1.5 % de la producción agrícola nacional, el primer lugar lo ocupa Michoacán (11%), le sigue Jalisco (9.3%) y Sinaloa (8%) (Figura 3.4).

3.2. Material Genético

Para la simulación se utilizó una variedad de frijol conocida como Mesoamérica Hábito 2 & 3 es de ciclo biológico intermedio. Esta variedad está adaptada a regiones mesoamericanas como el occidente, costa del golfo, altiplano central y centro norte del país.

Para determinar la fenología, crecimiento vegetativo, y crecimiento reproductivo del cultivo en condiciones óptimas de manejo, es necesaria la obtención de los coeficientes genéticos, las cuales se presentan a continuación de acuerdo a las diferentes etapas (Estos datos fueron obtenidos en investigaciones previas):

Tabla 3. 2 Coeficientes genéticos para el desarrollo del cultivo

COEFICIENTES GENÉTICOS	
CSDL	12.17
PPSEN	0.000
EM-FL	31.0
FL-SH	3.5
FL-SD	10.0
SD-PM	22.00
FL-LF	21.00

Tabla 3. 3 Coeficientes genéticos para el crecimiento vegetativo.

COEFICIENTES GENÉTICOS	
LFMAX	1.00
SLAVR	320.0
SIZLF	133.0

Tabla 3. 4 Coeficientes genéticos para el crecimiento reproductivo.

COEFICIENTES GENÉTICOS	
XFRT	1.00
WTPSD	0.230
SFDUR	20.0
SDPDV	5.50
PODUR	10.0
THRSH	78.0
SDPRO	0.235
SDLIP	0.03

3.3. Datos de Clima

Para analizar las condiciones actuales del clima y las proyecciones futuras, se obtuvieron datos diarios de: radiación solar, temperatura máxima y mínima, precipitación, velocidad del viento, horas luz y humedad relativa. Para esto se creó una base de datos con información climática de cada región, nombrada como Línea Base, esta cuenta con un registro de 32 años, es decir que se obtuvo información de lecturas diarias desde el año de 1983 hasta el año 2015, lo anterior con la finalidad de tener un registro más amplio y tener un mejor resultado en la simulación.

Tabla 3. 5 Unidades de las variables utilizadas para la elaboración de la base de datos climáticos.

VARIABLES	UNIDADES
Radiación Solar (RS)	MJ/m ² /día
Temperatura Máxima (TMAX)	°C
Temperatura Mínima (TMIN)	°C
Precipitación (P)	Mm
Velocidad del Viento (VV)	m/s
Horas Luz (H)	h
Humedad Relativa (HR)	%

Arias (2016), elaboró una base datos para cada una de las regiones, utilizando fuentes rigurosamente seleccionadas, para así tener datos fiables y poder conseguir resultados aceptables. Las fuentes utilizadas fueron las siguientes:

- Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC Versión 3), este software facilita la extracción de la información contenida en la base de datos CLICOM (Base de Datos Climatológica Nacional), Servicio Meteorológicos Nacional (SMN) y de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (Aparicio, 2012).
- El sistema de la Universidad de Texas A & M y el Departamento de Agricultura, Servicio de Investigación Agrícola de Estado Unidos, cuenta

con un sitio en internet llamado AIMS Climatic que contiene una base de datos climática estimada (Wilson *et al.* 2007).

- La versión 6.0 Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) es un proyecto del The Atmospheric Science Data Center (ASDC) at NASA Langley Research este conjunto de datos esta formulado a partir de los satélites de la NASA derivando datos meteorológicos y de radiación solar, formando una rejilla de 1° de latitud por 1° de longitud sobre el globo (NASA, 2016).

3.4. Simulación de Escenarios

Para la simulación se utilizaron modelos de circulación general (MCG), las cuales se eligieron tres modelos para representar cada una de las regiones de estudio, las razones del porque se eligieron estos tres modelos, son por que estos se adaptan mejor al clima regional, además fueron ya utilizados por otros países con la misma región geográfica de México (Conde y Gay, 2008).

Modelos de Circulación General utilizados:

- GFDL 2.0
- UK-HADGEM 1
- MPIECHAM 5

El modelo GFDL 2.0 representa una condición menos extrema de cambio climático en temperatura, el modelo MPIECHAM5 muestra un mayor incremento y el modelo UK-HADGEM1 representa condición intermedia.

En este estudio, el manejo del cultivo se consideró bajo condiciones óptimas de disponibilidad de agua y nutrientes, la finalidad es analizar el comportamiento de las condiciones climatológicas de cada región y de cada escenario, que en este caso son las únicas variables que pueden afectar en el desarrollo biológico. Los incrementos promedio mensuales de temperatura y precipitación para los años 2030 y 2050 para las regiones; Sureste, Laguna, Centro y Norte se obtuvieron de la página del Grupo de Cambio Climático del Centro de Ciencias de la UNAM (Bravo-Cabrera *et al.*, 2009).

Las condiciones atmosféricas necesarias para la simulación fueron proporcionadas con la base de datos climática generada para las cuatro

regiones, conocida como línea base. Para las condiciones de cambio climático se consideraron los incrementos (negativos y positivos) de temperatura y los cambios en precipitación para cada uno de los escenarios proporcionados por los MCG en 2030 y 2050.

En la tabla 3.6 se presentan el manejo de cultivos para la región Sureste, Laguna, Centro y Norte.

Tabla 3. 6 Manejo de fechas del frijol para cada Región

REGIONES	CULTIVO	VARIEDAD	NF (N-P-K)	AHD (%)	FECHA DE SIEMBRA (día/mes)		
					Adelantada	Actual	Atrasada
Sureste	Frijol	Mesoamérica Hábito 2&3	80-60-00	60	01-may	01-jun	01-jul
Laguna	Frijol	Mesoamérica Hábito 2&3	80-60-00	60	01-mar	01-abr	01-may
Centro	Frijol	Mesoamérica Hábito 2&3	80-60-00	60	01-mar	01-abr	01-may
Norte	Frijol	Mesoamérica Hábito 2&3	80-60-00	60	01-mar	01-abr	01-may

*NF= Nivel de Fertilizante (Kg/Ha); AHD= Abatimiento de la Humedad en el Suelo

Para la siembra del cultivo de frijol se consideraron 3 fechas para cada región; se tomó la fecha actual que como la fecha óptima, se propuso también retrasar y adelantar la siembra, con el fin de evaluar la mitigación del efecto del cambio climático.

3.5. Evaluación de Escenarios

Arias (2016), evaluó los efectos del cambio climático con escenarios. Lo anterior lo realizó con la metodología de Rodríguez-García *et al.*, (2014), la cual calcula el porcentaje de cambio del rendimiento promedio de los escenarios en relación al rendimiento promedio de la línea base (Ec. 1)

$$\Delta R = \left(\frac{R_{Esc} - R_{Ac}}{R_{Ac}} \right) * 100 \quad (1)$$

Dónde:

ΔR = Cambio del rendimiento promedio de los escenarios (%)

R_{Ac} = Rendimiento actual o de línea base (Kg/Ha)

R_{Esc} = Rendimiento del escenario correspondiente (Kg/Ha)

Para calcular la mitigación provocada por el cambio de fechas de siembra, se utilizaron las siguientes ecuaciones.

$$\text{Mitg 1} = \Delta R_{FSad} - \Delta R_{FSac} \quad (2)$$

$$\text{Mitg 2} = \Delta R_{FSat} - \Delta R_{FSad} \quad (3)$$

Dónde:

Mitg_1 = Mitigación por ciento debido al efecto de cambio de fecha adelantada.

Mitg_2 = Mitigación por ciento debido al efecto de cambio de fecha atrasada.

ΔR_{FSac} = Cambio del rendimiento promedio de los escenarios para la fecha de siembra actual (%).

ΔR_{FSad} = Cambio del rendimiento promedio de los escenarios para la fecha de siembra adelantada (%).

ΔR_{FSat} = Cambio del rendimiento promedio de los escenarios para la fecha de siembra atrasada (%).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Rendimientos

De acuerdo a la base de datos con lecturas diarias de clima de cada región, se realizó la simulación de rendimientos promedios de la fecha actual o línea base. Los resultados muestran que la región sureste tendrá un rendimiento de 2,722 kg/ha; la región Laguna 1,247 kg/ha; la región Centro 1,031 kg/ha; y 1,407 kg/ha para la región Norte.

En la Figura 4.1. Se muestra los diferentes rendimientos para cada región. De acuerdo a la simulación la región sureste presenta el mayor rendimiento y la región Centro el menor.

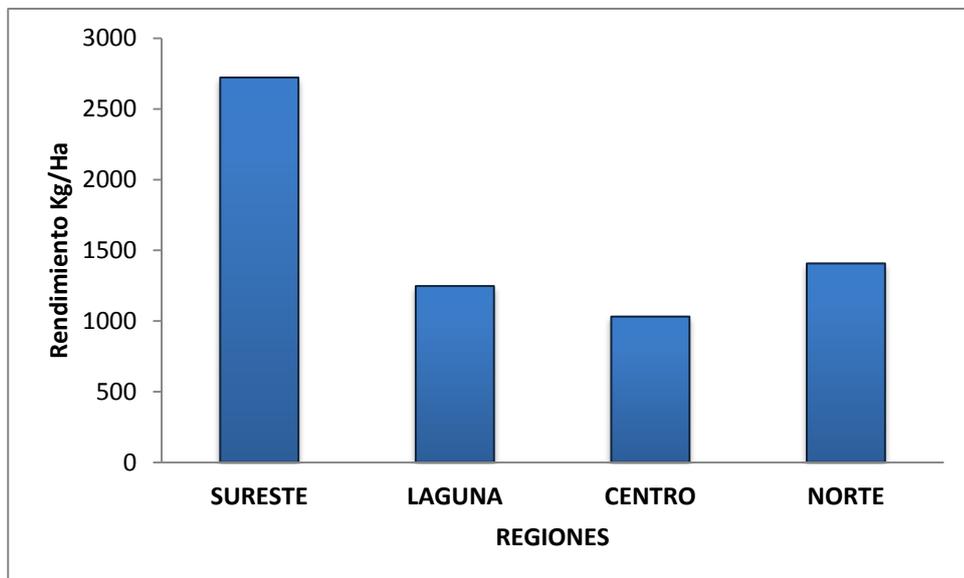


Figura 4. 1 Rendimiento de la línea base de las cuatro regiones para la fecha de siembra actual.

4.2 Incrementos de Temperatura y Precipitación

Los incrementos de temperatura y precipitación debido al cambio climático, fueron correspondientes al ciclo del cultivo del frijol, teniendo en cuenta que se tomaron datos de la fecha de siembra actual para cada una de las regiones.

En la Figura 4.2 se presentan los incrementos de temperatura promedio para las cuatro regiones, se observa que para el año 2030 los incrementos varían de 0.88 a 1.58 °C y para el año 2050 de 1.35 a 2.41 °C según los MCG.

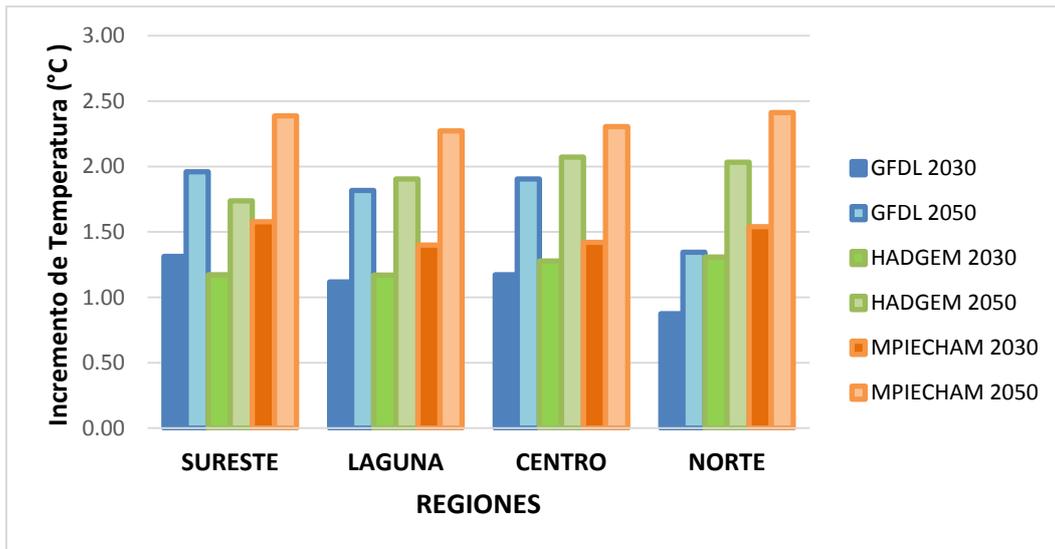


Figura 4. 2 Valores medios de incremento de temperatura para cada región durante el ciclo del cultivo de frijol, debido a diferentes escenarios.

En la Figura 4.3 observamos que a futuro, la precipitación se verá afectada, pues en casos como en la región Sureste la precipitación se reducirá hasta un -32%, la región Laguna se tendrá un -13%, en la región Centro en un -20% y mientras que en la región Norte se reducirá en un -14%. Sin embargo en algunas regiones, la precipitación aumentará bajo el modelo GFDL 2030 Y 2050, y levemente en el modelo HADGEM 2050.

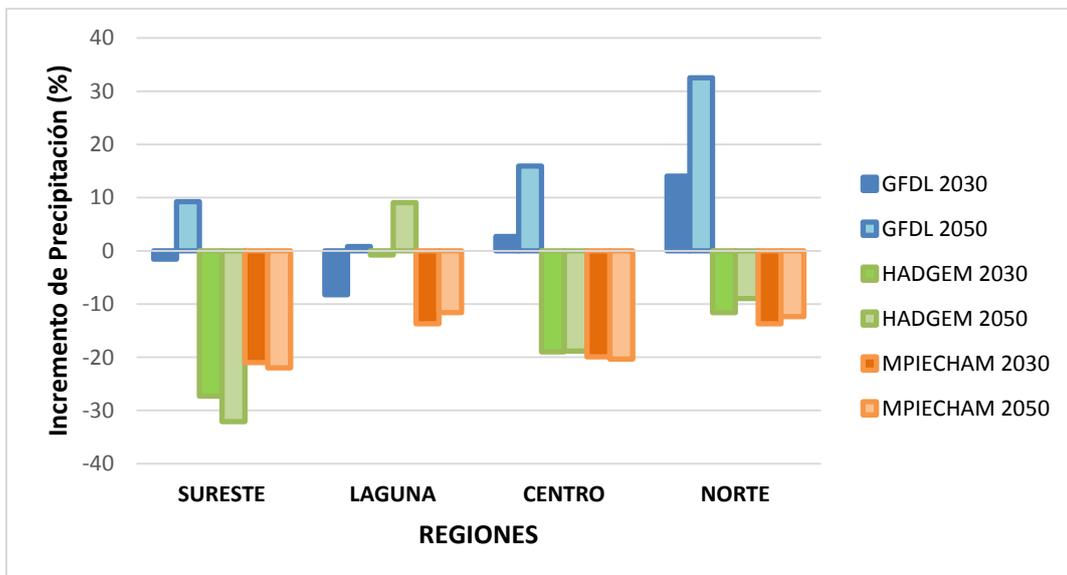


Figura 4. 3 Valor porcentual medio de incremento (+) o decremento (-) de precipitación en el ciclo del cultivo de frijol, debido a diferentes escenarios.

4.3 Cambio de Rendimientos en diferentes escenarios

De acuerdo a los diferentes escenarios de cambio climático, podemos observar que la reducción del rendimiento para cada región con respecto a la línea base varía en diferente proporción, teniendo para el año 2030 en la región Sureste un rango de -11 a -14% y para el 2050 de -19 a -24%; en la región Laguna se tendrá de -42 a -54% en el año 2030 y de -54 a -70% para el 2050; en la región Centro de -31 a -46% en 2030 y de -41 a -59% en 2050; y para la región Norte de -17 a -37% en 2030 y de -32 a -47% en 2050. (Tabla 4.1)

Tabla 4. 1 Porcentaje de cambio de rendimiento de frijol en los diferentes escenarios, comparados con el rendimiento actual (Línea base) para la fecha de siembra actual.

	SURESTE	LAGUNA	CENTRO	NORTE
	Δ RFSac	Δ RFSac	Δ RFSac	Δ RFSac
GFDL 2-2030	-12	-54	-45	-31
GFDL 2-2050	-21	-69	-59	-40
UKHGM1-2030	-11	-42	-31	-17
UKHGM1-2050	-19	-54	-41	-32
MPIECHAM5-2030	-14	-54	-46	-37
MPIECHAM5-2050	-24	-70	-59	-47

Respecto a los resultados, la región Sureste muestra ser la que tendrá un menor rango de reducción en los rendimientos. Esto debido a que cuenta con temperaturas mínimas y máximas dentro de las óptimas para el ciclo del cultivo. Sin embargo para las regiones Laguna, Centro y Norte, las condiciones serán muy alarmantes con rangos de reducción del rendimiento desde -17 a -54% para el año 2030 y de -32 a -70% para el 2050. Esto se debe a que durante el ciclo del cultivo se registran altas temperaturas, lo cual afecta el desarrollo vegetativo de la planta, ocasionando en algunas veces la muerte del cultivo. (Sau *et al.*, 2010)

Para los escenarios con la fecha de siembra adelantada, la región Sureste tendrá reducciones dentro de un rango de -12 a -18% en el año 2030 y de -18 a -31% en el 2050; en la región Laguna de -26 a -32% en el año 2030 y de -47 a -51% en el 2050; en la región Centro de -21 a -33% en el 2030 y de -

39 a -48% en el 2050; en la región Norte de -27 a 5% en el 2030 y de -17 a -32% en el 2050.

De acuerdo a los rangos, la región Sureste y Norte tendrán menor reducción de rendimiento respecto a las regiones Laguna y Centro. (Tabla 4.2)

Tabla 4. 2 Porcentaje de cambio de rendimiento de frijol en los diferentes escenarios, comparados con el rendimiento actual (Línea base) para la fecha de siembra Adelantada.

	SURESTE	LAGUNA	CENTRO	NORTE
	ΔRFSad	ΔRFSad	ΔRFSad	ΔRFSad
GFDL2-2030	-14	-32	-33	-26
GFDL2-2050	-24	-51	-48	-32
UKHGM1-2030	-12	-26	-21	5
UKHGM1-2050	-18	-47	-39	-17
MPIECHAM5-2030	-18	-31	-28	-27
MPIECHAM5-2050	-31	-50	-44	-31

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados de los escenarios con la fecha de siembra atrasada. En la región Sureste, las reducciones serán menor, tendrán un rango de -11 a -12% en el año 2030 y de -16 a -17% en 2050, mientras que en las regiones Laguna, Centro y Norte, los rangos de reducción serán aún mayores, comparados con los escenarios de las otras fechas de siembra, presentando un rango de -29 a -61% en el año 2030 y -38 a -78% en 2050.

Tabla 4. 3 Por ciento de cambio de rendimiento de frijol en los diferentes escenarios, comparados con el rendimiento actual (Línea base) para la fecha de siembra Atrasada.

	SURESTE	LAGUNA	CENTRO	NORTE
	Δ RFSat	Δ RFSat	Δ RFSat	Δ RFSat
GFDL 2-2030	-12	-49	-34	-29
GFDL 2-2050	-17	-65	-47	-38
UKHGM1-2030	-11	-52	-37	-37
UKHGM1-2050	-17	-67	-46	-61
MPIECHAM5-2030	-12	-61	-46	-49
MPIECHAM5-2050	-16	-78	-53	-64

En la Figura 4.4 se presentan las reducciones promedio del rendimiento en diferentes fechas de siembra para cada región en el año 2030. Se observa las regiones Laguna, Centro y Norte son las más afectadas, sin embargo al adelantar la fecha de siembra se mitiga el efecto de la disminución del rendimiento para estas regiones, mientras que en la región sureste esta alternativa agudiza el problema. Al cambiar la alternativa, retrasando la fecha de siembra solo empeora la situación en las regiones Laguna y Norte puesto que las reducciones del rendimiento son aún mayores comparado con la fecha actual. Sin embargo en las regiones Sureste y Centro mitiga muy levemente el efecto de la disminución del rendimiento.

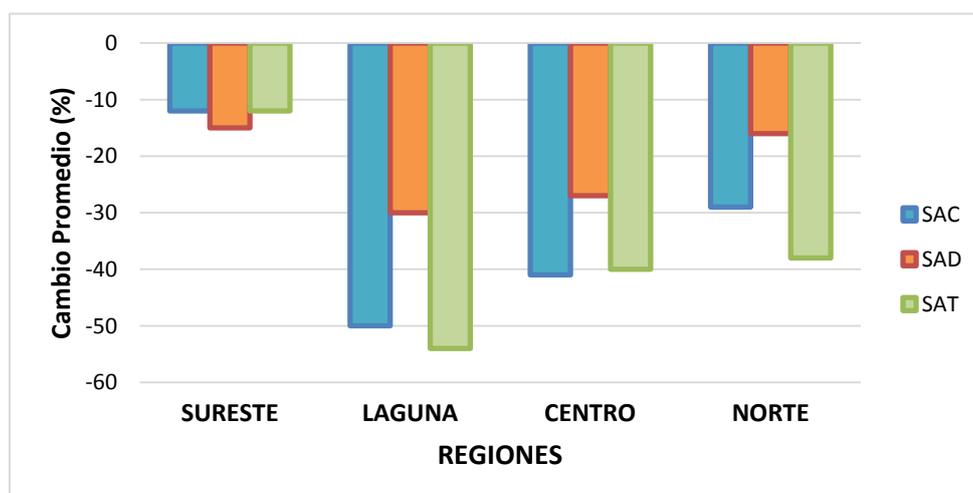


Figura 4. 4 Por ciento de cambio de rendimiento promedio de frijol de las diferentes fechas de siembra con respecto al rendimiento actual (línea base) para el año 2030.

En el año 2050 los rangos de las reducciones promedio de los rendimientos aumentaran más del doble en comparación con las reducciones promedio del año 2030, aunque los comportamientos siguen siendo similares en ambos años. Por lo tanto, se pueden emplear la misma alternativa de adelantar las fechas de siembra en las regiones Laguna, Centro y Norte, para mitigar el efecto de la reducción del rendimiento. Para la región sureste la el atrasar la fecha de siembra muestra una mitigación ligera en la reducción del rendimiento con respecto a fecha actual (Línea base). (Figura 4.5).

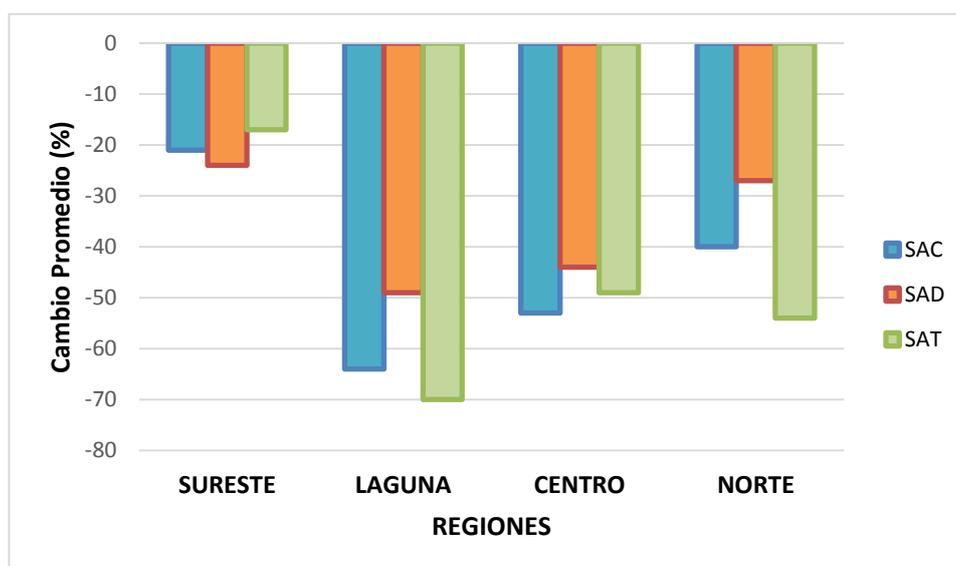


Figura 4. 5 Porcentaje de cambio de rendimiento promedio de frijol de las diferentes fechas de siembra con respecto al rendimiento actual (línea base) para el año 2050

En la tabla 4.4 se presentan los porcentajes de la mitigación para los diferentes escenarios por efecto del cambio de fecha de siembra. El valor de porcentaje negativo indica que la reducción de rendimiento por efecto de cambio de fecha fue mayor que la reducción en el año actual, en el caso de que el valor del porcentaje sea positivo indica que el efecto del cambio de fecha influyó en una menor reducción de rendimiento.

Para la mitigación por efecto de la fecha de siembra adelantada (Mit-1), se observa que la región Sureste no es favorecida con esta acción, provocando reducción del rendimiento aumente con respecto a la fecha de siembra actual. Sin embargo para la región Laguna, Centro y Norte, muestran resultados muy favorables que ayudan a mitigar la disminución del rendimiento.

La mitigación por efecto de la fecha de siembra atrasada (Mit-2), muestra que las regiones Laguna y Norte, tienen un aumento en la disminución del rendimiento con respecto a la fecha de siembra actual, lo cual nos dice que no puede ser una buena opción para afrontar el cambio climático. Para la región Centro tendrán un comportamiento aceptable para algunos escenarios y desfavorables para otros, por último la región Sureste muestra signos positivos en la mitigación, pero en menor proporción.

Tabla 4. 4 Mitigación en por ciento del efecto de cambio de fecha de siembra en las cuatro regiones de estudio

	SURESTE		LAGUNA		CENTRO		NORTE	
	Mit-1	Mit-2	Mit-1	Mit-2	Mit-1	Mit-2	Mit-1	Mit-2
GFDL 2-2030	-2	0	22	5	12	11	5	2
GFDL 2-2050	-3	4	18	4	11	12	8	2
UKHGM1-2030	-1	0	16	-10	10	-6	22	-20
UKHGM1-2050	1	2	7	-13	2	-5	15	-29
MPIECHAM5-2030	-4	2	23	-7	18	0	10	-12
MPIECHAM5-2050	-7	8	20	-8	15	6	16	-17

5. CONCLUSIONES

Los resultados de la simulación del rendimiento bajo los diferentes escenarios de cambio climático en los años 2030 y 2050, muestran que el cultivo de frijol variedad *Mesoamérica Hábito 2 & 3*, será impactado negativamente en el rendimiento en las cuatro regiones, este problema será más relevante para el año 2050 que en 2030. Según los MCG, las regiones más afectadas serán Laguna, Centro y Norte, mientras que la región Sureste será la menos afectada, debido a que cuenta con temperaturas óptimas en el ciclo del cultivo.

Al cambiar la fecha de siembra, los resultados de la simulación muestran que para las regiones Laguna, Centro y Norte el adelantar la fecha es una mejor estrategia para evitar los efectos adversos para el cultivo de las altas temperaturas de verano, debido a que la reducción del rendimiento será menor que la actual, esta estrategia no es adecuada para la región Sureste.

6. REFERENCIAS

- Ana M. S. y Javier U. S. 2014. Impactos Sociales del Cambio Climático en México. INE-PNUD. México. Pp 12-20.
- Aparicio, J. (2012). Bases de Datos Hidrológicas. México, DF. INEGI.
- Araus, José Luis, Gustavo A. Slafer, Conxita Royo, and M. Dolores Serret. 2008. Breeding for yield potential and stress adaption in cereals. *Critical Reviews in Plant Science* 27: 377-412.
- Bravo-Cabrera, J.L., Martínez-López, B., Conde-Álvarez, A.C., Villers-Ruiz, M.L., Gay-García, C., Luyando-López, Estrada-Porrúa, F., Sánchez, O. 2009. Centro de Ciencias de la Atmosfera, UNAM. <http://www.atmosfera.unam.mx/cclimat/index>.
- Conde-Álvarez, A.C., Gay-García, C., 2008. Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático de Escala Regional. Centro de Ciencias de la Atmosfera, UNAM.
- Cosgrove, B. 1994. La Atmosfera y el tiempo. México: Biblioteca Visual Altea.
- Enrique E. T. s/f. Teoría de Modelos y Simulación. Universidad Nacional de Jujuy. [http://www.econ.unicen.edu.ar/attachments/1051_TecnicasII Simulacion.pdf](http://www.econ.unicen.edu.ar/attachments/1051_TecnicasII%20Simulacion.pdf). (06, mayo, 2017)
- Esperanza F. P. 2013. Diagnóstico de Modelos Agroclimáticos (Evaluación del Riesgo Agroclimático por Sectores). 1º Edición. Pp 8-17.
- Esperanza F. P. 2013. Diagnóstico de Modelos Agroclimáticos (Evaluación del Riesgo Agroclimático por Sectores). Bogotá. Colombia. Pp 8-17.
- Gabriel A. H. 2016. Efecto del Cambio Climático en el Rendimiento de Maíz (Zea Mays) Variedad Jaguan para Cuatro Regiones de Estado de Coahuila. Tesis de Licenciatura. UAAAN. Saltillo. Coahuila. 41 p.

- Giraldo L.M.; Lizcano L.J.; Gisjman A.J.; Ribera B.; y Franco L.H.; s/f. Adaptación del Modelo DSSAT para simular la producción de *Brachiaria decumbens*. Pasturas Tropicales. Volumen (20). P 12.
- GREENPEACE. (2012). La agricultura mexicana y el cambio climático. http://www.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/report/2012/2/La_agricultura_mexicana_y_el_cambio_climatico_2012.pd (08, mayo, 2012).
- Hart, D.R. 1979. Control Integrado de Plagas en Sistemas de Producción de Cultivos para pequeños Agricultores. Ed. CATIE y OIRSA. Volumen 1. Turrialba. Costa Rica. Pp 86 – 94.
- Hernández, Naivi.; Soto, F.; Caballero, A.; (2009). MODELOS DE SIMULACIÓN DE CULTIVOS. CARACTERÍSTICAS Y USOS. Cultivos Tropicales. Pp 73-82.
- INIFAP. 2001. Pinto Saltillo: Nueva Variedad de Frijol para el Sureste del Estado de Coahuila. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. INIFAP. Coahuila. México. 4 p.
- J. Martínez, Fernández B. A. 2004. Cambio climático una visión desde México. 2° Edición. México. Pp 18 – 25.
- Javier U. S. y Julia M. F. 2006. Más allá del cambio climático: las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global. Editorial del Deporte Mexicano. D.F. México. Pp 15-43.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijzman, A.J., y Ritchie J.K. 2003. The DSSAT Cropping System Model. Eur. J. Agron.
- Julia Martínez y Adrián F. B. 2007. Cambio Climático: Una Visión desde México. México. Pp 46, Y 55-75.
- Kelvin L. A. 2016. Simulación del Crecimiento, Desarrollo y Balance de Agua en el Suelo en Frijol (*Phaseolus Vulgaris* L.) Variedad Flor de Mayo AN-05 con el Modelo CROPGRO. Tesis de Maestría. UAAAN. Saltillo. Coahuila. 73 p.

- LANDER. 2016. Historia de la Simulación. Obtenido de Lander simulation. <http://www.land simulation.com/formacion-con-simulacion/el-mundo-en-movimiento/historia-de-la-simulacion/>. (06, Mayo, 2017).
- Lépiz Ildfonso, R., S. Sánchez P., E. López A., J. J. López A., I. E. Chavarín E. y K. E. Meza V. 2015. El Cultivo del Frijol en Jalisco. Tecnología para los Altos Rendimientos. Universidad de Guadalajara. 54 p. [ISBN 978-607-8336-60-9].
- Mendoza-Hernández, J. María, Zermeño-González, Alejandro, Covarrubias-Ramírez, J. Manuel, Cortés-Bracho J. Jesús. 2013. Proyecciones climáticas para el estado de Coahuila usando el modelo preciso bajo dos escenarios de emisiones. Agro ciencia. Volumen 47 (6): 523-537 p.
- Miguel F.G. 2000. Validación del modelo de simulación CROPGRO, del sistema DSSAT para el cultivo de Frijol Arbustivo (*Phaseolus Vulgaris* L.) en las condiciones de clima y suelo del Cantón Mira Provincia del Carchi. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba. Ecuador. 82 p.
- Miguel, L. F. (2015). El Cultivo de Frijol en México. Revista UNAM. Volumen (16). 7 P.
- SAGARPA. 2012. México: El Sector Agropecuario Ante el Desafío del Cambio Climático. <http://www.sagarpa.gob.mx/programas2/evaluacionesExternas/Lists/Otros%20Estudios/Attachments/37/Cambio%20Climatico.pdf>. (18, mayo, 2017)
- Sau, F., López-Cedrón, F., Confalones. A., Lizaso, J. 2010. Modelos de simulación del cultivo de Maíz: Fundamentos y aplicaciones en España. Pastos, 40(10), 117-138.
- SEMA. (2013). Situación Actual de Coahuila. Subsecretaría Gestión Ambiental. <http://www.sema.gob.mx/SGA-CC-COAHUILA.htm> (17, Mayo, 2017).

SEMARNAT. (2016). Como afecta el cambio climático a México. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/como-afecta-el-cambio-climatico-a-mexico> (20, octubre, 2016).

Semenov, Mikhail A. and Nigel G. Halford. 2009. Identifying target traits and molecular mechanisms for wheat breeding under a changing climate. *Journal of Experimental Botany* 60, no. 10: 279-804.

Singh, S. P. y Voysest, O. (eds.). 1997. Taller de Mejoramiento de Frijol para el Siglo XXI: Bases para una Estrategia para América Latina. CIAT, Cali, Colombia. Pp 559.