



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



IMPACTO DE LA VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CULTIVO DE FRIJOL

2017



Ph.D. Ken Takahashi Guevara
Presidente Ejecutivo del SENAMHI

Ing. Constantino Alarcón Velazco
Director de Agrometeorología del SENAMHI

Ing. Carmen Rosa Reyes Bravo
Directora de la Subdirección de Predicción Agrometeorológica

Autores:

Colaboradores:

SENAMHI

Ing. Wilfredo Julián Yzarra Tito
Especialista en Agrometeorología
Subdirección de Predicción
Agrometeorológica - SENAMHI

Bach. Agr. José Antonio Franco
Villafuerte
Especialista en Agronomía
Subdirección de Predicción
Agrometeorológica - SENAMHI

Bach. Samy Carolina Falcón
Cáceres
Especialista en Meteorología
Subdirección de Predicción
Agrometeorológica - SENAMHI

INIA

Ing. Roberto Alvarado Rodríguez
Especialista en cultivos del INIA
Programa de Innovación Agraria del
INIA

Ing. Jonell Soto Jeri
Especialista en cultivos del INIA
Programa de Innovación Agraria del
INIA

ÍNDICE

I. Introducción	1
II. Objetivos	4
2.1 Objetivo General	4
2.2 Objetivos Específicos	4
III. Revisión Bibliográfica	5
3.1 Información estadística nacional del cultivo de frijol	5
3.2 Variabilidad Climática	6
3.2.1 Variabilidad estacional e interanual	7
3.3 Impacto de la variabilidad climática en frijol	9
3.4 Cambio Climático	10
3.5 Escenarios de Emisión para Cambio Climático	11
3.6 Modelos de Circulación General (GCM)	12
3.7 Impacto del Cambio Climático en el frijol	14
3.8 Modelo Agrometeorológico CROPGRO-Dry bean	15
IV. Materiales y Métodos	17
4.1 Ubicación del campo experimental	17
4.2 Descripción de las variedades de frijol	18
4.2.1 Variedad Canario 2000	18
4.2.2 Variedad INIA 404 - CIFAC 90105	18
4.2.3 Variedad Larán Mejorado	19
4.3 Información Edáfica	20
4.4 Diseño experimental	22
4.5 Distribución de las parcelas experimentales	23
4.6 Conducción del ensayo experimental	25
4.7 Calibración del modelo CROGRO-Dry Bean	28
4.8 Validación del modelo CROPGRO-Dry Bean	30
4.9 Variabilidad climática en el cultivo de frijol	31
4.10 Generación de escenarios de cambio climático	32
4.11 Generación de rendimientos futuros en el cultivo de frijol	34

V. Resultados y discusión	36
5.1 Calibración del modelo CROPGRO – Dry Bean	36
5.2 Validación del modelo CROGRO – Dry Bean	43
5.2.1 Validación del Índice de Área Foliar (IAF)	44
5.2.2 Validación de la Biomasa Aérea	45
5.3 Variabilidad climática en el frijol	49
5.4 Cambio climático en el frijol	55
VI. Conclusiones	60
VII. Recomendaciones	61
VIII. Referencia bibliográfica	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características morfológicas y de importancia agronómica del frijol	19
Tabla 2: Análisis de caracterización de suelo de la parcela experimental de frijol	21
Tabla 3: Riegos realizados en las parcelas experimentales validación, calibración 1, 2 y 3	27
Tabla 4: Fertilizaciones realizados en las parcelas de validación, calibración 1, 2 y 3	28
Tabla 5: Coeficientes genéticos para calibrar el CROPGRO	29
Tabla 6: Clasificación del evento ENSO según la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)	32
Tabla 7: Coeficientes genéticos utilizados para la calibración de CROPGRO-Dry bean para tres variedades de frijol (Canario 2000, CIFAC 90105 y Laran Mejorado) en la estación experimental del INIA-La Molina. Campaña Agrícola 2015-2016.	37
Tabla 8: Calibración del modelo CROPGRO-Dry bean para determinar los coeficientes genéticos en la variedad Canario 2000, en alta densidad (13.3 plantas/m ²) y baja densidad (8 plantas/m ²), en la estación experimental del INIA-La Molina. Campaña Agrícola 2016-2017.	40
Tabla 9: Calibración del modelo CROPGRO-Dry bean para determinar los coeficientes genéticos en la variedad CIFAC 90105, en alta densidad (13.3 plantas/m ²) y baja densidad (8 plantas/m ²), en la estación experimental del INIA-La Molina. Campaña Agrícola 2016-2017.	41
Tabla 10: Calibración del modelo CROPGRO-Dry bean para determinar los coeficientes genéticos en la variedad Laran mejorado, en alta densidad (13.3 plantas/m ²) y baja densidad (8 plantas/m ²), en la estación experimental del INIA-La Molina. Campaña Agrícola 2016-2017.	42
Tabla 11: Validación del modelo CROPGRO-Dry bean durante la campaña agrícola 2016-2017 con los coeficientes previamente calibrados para tres variedades de frijol en la EEA-La Molina.	46
Tabla 12: Proyecciones futuras de los rendimientos del frijol variedad Canario 2000 en la EEA-La Molina, para tres periodos futuros (2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099) con el uso de tres modelos de circulación global y en dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero medio (RCP 4.5) y alto (RCP 8.5).	57
Tabla 13: Proyecciones futuras de los rendimientos del frijol variedad CIFAC 90105 en la EEA-La Molina, para tres periodos futuros (2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099) con el uso de tres modelos de circulación global y en dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero medio (RCP 4.5) y alto (RCP 8.5).	58

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico de comparación de los rendimientos (kg/ha) de frijol grano sedo en el departamento de Lima con el Total Nacional.	6
Figura 2: Esquema de los de los Modelos Climáticos de Circulación General (GCM)	13
Figura 3. Localización del área de investigación y de la estación meteorológica MAP-Alexander Von Humboldt	17
Figura 4: Esquema de aleatorización de los tratamientos de Parcela de Validación (Split Plot)	24
Figura 5. Gráfico de correlación del índice de área foliar observada y simulada con el modelo CROPGRO-Dry bean para tres variedades de frijol (Canario 2000, CIFAC 90105 y Laran Mejorado) bajo tres niveles de fertilización nitrogenada (N1: 30 kg/ha, N2: 60 kg/ha y N3: 100 kg/ha) en la EEA-La Molina.	47
Figura 6. Gráfico de correlación de la biomasa observada y simulada con el modelo CROPGRO-Dry bean para tres variedades de frijol (Canario 2000, CIFAC 90105 y Laran Mejorado) bajo tres niveles de fertilización nitrogenada (N1: 30 kg/ha, N2: 60 kg/ha y N3: 100 kg/ha) en la EEA-La Molina.	48
Figura 7. Diagrama de cajas y bigotes de los rendimientos simulados para el frijol variedad Canario 2000, en la EEA-La Molina, para la serie histórica 1930-2016 y las fases extremas del ENSO (27 años Niño y 23 años Niña). La línea negra dentro de la caja representa la mediana.	52
Figura 8. Diagrama de cajas y bigotes de los rendimientos simulados para el frijol variedad CIFAC 90105, en la EEA-La Molina, para la serie histórica 1930-2016 y las fases extremas del ENSO (27 años Niño y 23 años Niña). La línea negra dentro de la caja representa la mediana.	53
Figura 9. Diagrama de cajas y bigotes de los rendimientos simulados para el frijol variedad Laran Mejorado, en la EEA-La Molina, para la serie histórica 1930-2016 y las fases extremas del ENSO (27 años Niño y 23 años Niña). La línea negra dentro de la caja representa la mediana.	54

Impacto de la variabilidad y cambio climático en la producción del cultivo de frijol en condiciones de costa central

I. Introducción

El frijol es una leguminosa de rápido crecimiento y considerada en los países en vías de desarrollo, como la leguminosa alimenticia de mayor consumo es la principal fuente proteica para la población de menores recursos económicos, cuyos niveles de proteína oscilan entre el 18 y 25%. Es la especie más importante y la de mayor consumo en nuestro país, pues aporta el 36% de la producción nacional, seguido de arveja con 20% y haba 18% (Ramírez, 1988).

Camarena et al. (2002), indicaron que en el caso del Perú la mayor área sembrada se encuentra en la sierra (46%), seguido por la costa (36%) y luego la selva (18%). La costa ocupa el primer lugar en cuanto la producción (47,4%) esto debido a sus rendimientos unitarios, la sierra ocupa el segundo lugar (34,4%) y la selva el tercer lugar con 18% de la producción nacional. Una parte de la producción de la sierra se destina al consumo y el resto se envía a los centros urbanos de la costa; en el caso de la selva el total de la producción se destina para el autoconsumo de la región.

En las plantas de frijol, el primer producto de la fotosíntesis es un compuesto de tres carbonos, este tipo de mecanismo suele llamarse metabolismo fotosintético C₃, mediante el cual, la fijación de CO₂ depende de una serie de reacciones que implican la pérdida de carbono y energía; este proceso se denomina fotorespiración. Bajo condiciones de alta temperatura (mayor a 30°C) y baja disponibilidad de agua, las plantas de frijol son menos eficientes en términos fotosintéticos, que especies tropicales como el maíz, la caña de azúcar o el sorgo, que producen compuestos de cuatro carbonos (C₄), y usan mecanismos de fijación del CO₂ que evitan la fotorespiración. Se reporta que los mayores rendimientos de esta leguminosa se obtienen en zonas con temperaturas entre 18 y 24°C. Temperaturas mayores de 27°C producen caída de flores y reducen el número de granos en la vaina (White, 1985).

Dado que una de los objetivos de la agroclimatología es analizar las interacciones del sistema atmosfera- planta-agua-suelo, así como detectar y definir los factores del clima que limitan la producción agropecuaria, también lo es la predicción del rendimiento de los cultivos y los posibles futuros comportamientos de las variables que pueden afectar positiva o negativamente a la planta, dando así una herramienta a los agricultores para la toma de decisiones en las diferentes etapas del cultivo y evitar pérdidas en su producción. Teniendo en cuenta la complejidad del sistema mencionado, el uso de los modelos de simulación tienen varias aplicaciones actuales y potenciales en respuesta a temas relacionados con la investigación, el manejo de cultivos y la planificación. Estos constituyen un elemento importante para tomar decisiones en la agricultura al cuantificar, interpretar y predecir las necesidades hídricas de los cultivos, el desarrollo de estos y sus rendimientos (Ruíz, 2005). Sin embargo, según Guevara (2007) la experimentación y las observaciones no pueden ser reemplazadas por los modelos, pero existe una estrecha relación entre ambos enfoques que hacen que tanto la experimentación y la investigación puedan enriquecer la comprensión y el conocimiento sobre el funcionamiento del sistema del cultivo. En varios países el sector agrícola viene incorporando el uso de modelación desde los Servicios Meteorológicos, gremios productores y centros de investigación agrícola, impulsando a una mejor organización, planeación y producción como al fortalecimiento de estrategias de respuesta ante la emergencia causada por eventos extremos climáticos que impactan de manera significativa el sector.

Esto aunado al incremento generalizado de la temperatura del aire asociado con el calentamiento global podría representar múltiples impactos sobre los sistemas productivos y ambientales, como el aumento en el consumo de agua por plantas y animales, la alteración de ciclos biológicos de diferentes organismos y cambios en la distribución potencial de nichos ecológicos, entre otros. Otro problema serio que tendría que enfrentar la agricultura es el aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos extremos, muchos de ellos asociados a ciclos de variabilidad climática que se están haciendo progresivamente más recurrentes y agresivos (IPCC, 2001).

Para evaluar estos impactos del clima en el cultivo de frijol, el Servicio nacional de Meteorología (SENAMHI) cuenta con el modelo de simulación de crecimiento CROPGRO-Dry Bean, el cual forma parte de un Sistema de Soporte de Decisiones para la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT). El DSSAT es un programa para microcomputadoras que combina bases de datos de suelos, cultivos y climas, con programas de aplicación que simulan el crecimiento y desarrollo de varios cultivos, permitiendo establecer estrategias de manejo y comparar las salidas del modelo con los datos observados. El sistema contempla un programa de manejo de bases de datos, modelos de cultivos, análisis de estrategias y un simulador climático. Este último, le permite al usuario realizar cambios climáticos para simular la respuesta del cultivo a diferentes escenarios (IBSNAT, 1989).

El presente trabajo de investigación intenta dar un primer paso en el estudio para evaluar los impactos de variabilidad y cambio climático en el cultivo de frijol usando el modelo CROPGRO-Dry bean, en donde se evalúa estos impactos bajo diversos escenarios climáticos en condiciones de la costa central del Perú y deben constituir en punto de partida para los tomadores de decisiones, razón por lo cual, se pretende concretar a través de este estudio, analizar los posibles impactos de las variaciones climáticas sobre el rendimiento y sugerir medidas de mitigación, y que podría servir de base para implementar a futuro el impacto socioeconómico, producto de estas variaciones climáticas sobre la actividad frijolera nacional.

II. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar el impacto de la variabilidad y cambio climático en la producción del cultivo del frijol en condiciones de costa central.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el clima actual y generar escenarios futuros con los Modelos de Circulación General (CanESM2; CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR) y dos escenarios de emisión (RCP 4.5 y RCP 8.5) para la zona en estudio.
- Calibrar y validar el modelo CROPGRO-Dry Bean para tres variedades comerciales de frijol (Canario 2000, CIFAC 90105 y Laran Mejorado).
- Evaluar los impactos del ENSO (El Niño y La Niña) en los rendimientos de tres variedades comerciales de frijol.
- Estimar los rendimientos futuros de las tres variedades de frijol con los tres Modelos de Circulación General (CanESM2; CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR) y dos escenarios de emisión (RCP 4.5 y RCP 8.5).

III. Revisión Bibliográfica

3.1 Información estadística nacional del cultivo de frijol

En el Perú se cultivan diversas especies de legumbres como el frijol, el haba, la arveja y el pallar, que son las más importantes y suman una superficie cosechada conjunta de 211 000 hectáreas al cierre del 2015, según el Ministerio de Agricultura y Riego-MINAGRI. La producción de frijol grano seco (incluye principalmente a las variedades canario, panamito y castilla) creció a una tasa promedio anual de 2.4% desde el 2001 al 2015, así la producción se elevó de 86 600 toneladas a 107 100 toneladas. Esto como resultado del incremento de áreas cosechadas (92 900 ha al 2015) y rendimientos (1,200 t/ha), cuyas tasas de crecimiento promedio anual fueron de 1,3% y 1,1%, respectivamente. Las regiones que registraron un mayor ritmo de crecimiento de la producción fueron Huancavelica (15,2%), Huánuco (6,7%), Junín (5,4%) y Piura (4,9%), debido principalmente al incremento de áreas cosechadas. (GESTION, 2015).

En el 2015, este cultivo ocupó el octavo lugar dentro del ranking de cultivos transitorios, según su superficie cosechada. No obstante, el valor de producción de esta legumbre, a precios del 2007, alcanzó la suma de S/ 179 millones, que representó cerca del 1% del VBP Agrícola. La principal región productora en el 2015 fue Cajamarca, con 14,5% del total de la producción nacional. Luego se ubicaron Piura (8,9%), Loreto (7,8%), Huánuco (7,5%), Amazonas (6,8%), Apurímac (6,1%) y Huancavelica (6%). (GESTION, 2015).

La producción acumulada al mes de mayo del 2016 fue de 36 094 t; es decir un 20,4% más, que el mismo mes del 2015. Esto se debió esencialmente al incremento significativo de la producción de frijol castilla, concretamente, en la región Piura durante los meses de abril y mayo, y en menor proporción en la región Lima. (GESTION, 2015).

Según la serie de estadísticas de producción agrícola del Ministerio de Agricultura (SEPA, 2017), durante el 2016 el Perú produjo a nivel nacional 80 887 toneladas de frijol, cosechado en 70 946 hectáreas. El rendimiento promedio nacional llegó a 1 140 kg/ha, aunque algunos departamentos se registraron niveles significativamente más altos: Lima (2 496 kg/ha), Moquegua (2 416 kg/ha), Arequipa (1 883 kg/ha), Ica (1 704 kg/ha), Cusco (1 588 kg/ha), Huancavelica (1 546 kg/ha), Huánuco (1 217 kg/ha), La Libertad (1 462 kg/ha), Lambayeque (1 257 kg/ha), Ancash (1 217 kg/ha), San Martín (994 kg/ha) y Piura (786 kg/ha).

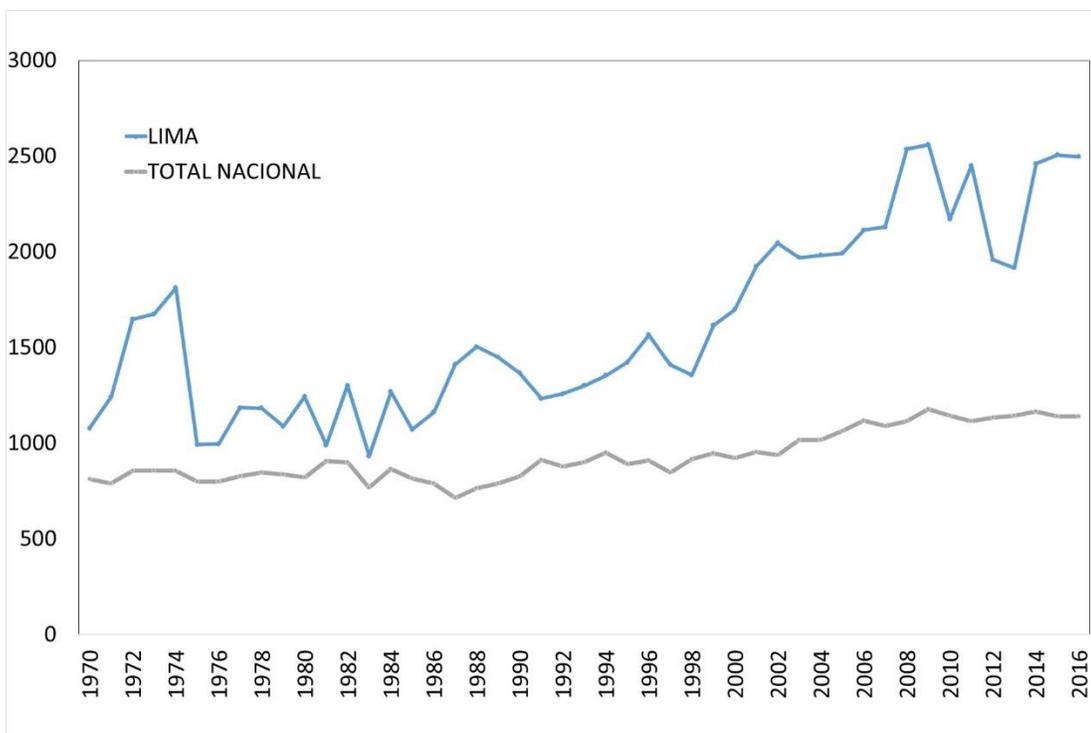


Figura 1. Gráfico de comparación de los rendimientos (kg/ha) de frijol grano seco en el departamento de Lima con el Total Nacional.

3.2 Variabilidad climática

La variabilidad climática es uno de los principales factores de incertidumbre y riesgo en muchos sistemas agrícolas alrededor del mundo; en este sentido, la agricultura ha sido descrita como la actividad humana más dependiente del clima (Oram, 1989).

La vulnerabilidad de los sistemas agrícolas al clima se debe tanto a la variabilidad temporal del clima, como también a la imposibilidad de predecir completamente su comportamiento (Hansen, 2002). Si bien los sistemas agrícolas han evolucionado en el largo plazo en respuesta a las variaciones del clima, ese proceso no necesariamente condujo a sistemas óptimamente adaptados para superar los efectos de la variabilidad climática (Stern y Easterling, 1999; Meinke y Stone, 2005). Comúnmente se emplean estrategias conservativas de manejo del riesgo que reducen los impactos negativos a expensas de reducir la productividad y rentabilidad (Hardaker et al., 1997; Hansen, 2002). Por ejemplo, la diversificación de actividades en el espacio y tiempo contribuye a incrementar la estabilidad de los sistemas de producción frente a perturbaciones externas como la variabilidad climática, aunque usualmente afectando negativamente la productividad (Viglizzo et al., 1989).

Existe un gran número de fenómenos climáticos variando en un rango amplio de escalas de tiempo que determinan la variabilidad climática (Meinke y Stone, 2005). De esta manera es posible observar fluctuaciones climáticas a nivel intra-estacional (e.g. Madden y Julian, 1972), estacional e interanual (Trenberth y Stepaniak, 2001), inter y multi-decadal (Allan, 2000), e incluso en escalas que superan una centuria (Timmermann et al., 1999). Dentro de estos extremos, este proyecto de investigación se centró en dos escalas de variabilidad climática que influyen el manejo de los recursos y resultados en los sistemas de producción agrícola: variabilidad climática interanual y variedad climática interdecadal.

3.2.1 Variabilidad estacional e interanual

En varias partes del mundo, el fenómeno del ENSO (El Niño Southern Oscillation) es una de las mayores fuentes de variabilidad climática en escalas temporales estacionales a interanuales (Trenberth y Stepaniak, 2001). Este fenómeno resulta de la interacción entre el océano y la atmósfera en el océano pacífico tropical. El fenómeno ENSO involucra tres fases: “Niños” o “Cálidas”, “Niñas” o “frías” y

neutrales. Bajo condiciones normales (neutrales) los vientos alisios soplan en dirección oeste, desplazando el vapor y agua caliente que se encuentra en la porción oriental del pacífico ecuatorial. Como consecuencia, se produce surgencia de aguas frías en el pacífico oriental y el desarrollo de sistemas convectivos en el sector occidental. La fase Niño se origina cuándo se produce una disminución en la intensidad (e incluso un cambio en la dirección) de los vientos alisios, o en el gradiente zonal de temperatura del Pacífico. La disminución del contraste térmico afecta los campos de presión que retroalimenta el debilitamiento de vientos y con ello el transporte de vapor y agua caliente hacia el oeste del Pacífico. En consecuencia, se incrementan las temperaturas de la superficie del mar (SST [Sea Surface Temperatura]) en el Pacífico oriental y los sistemas convectivos se desplazan hacia ese sector. Durante las Niñas, ocurre un patrón anómalo inverso al observado en los Niños: intensificación de los alisios y el gradiente térmico, SST menores (superiores) a los valores normales en el Pacífico oriental (occidental) y desplazamiento de las zonas de convección hacia el occidente. Por su naturaleza, el fenómeno ENSO se puede categorizar en base a las anomalías en la SST o por diferencias de presión entre puntos de la cuenca del Pacífico (SOI [Southern Oscillation Index]; Trenberth, 1997). Asimismo, puede utilizarse un índice multivariado que involucra diferentes variables climáticas (temperatura del aire, presión, nubosidad, entre otros).

Los cambios inducidos por el fenómeno ENSO en la circulación general de la atmósfera (posición de la zona de convergencia de los vientos, de los anticiclones y los vientos en altura) afectan el clima en regiones tropicales y, menor medida y de manera más variable, en algunas zonas extratropicales (Ropelewski y Halpert; 1987; Trenberth; 1997).

En la región del Perú, durante el desarrollo de un episodio El Niño, dependiendo de su intensidad y temporalidad, el comportamiento de las condiciones meteorológicas en el territorio nacional se alteran, provocando anomalías en el comportamiento de las lluvias y temperaturas del aire, principalmente en la vertiente occidental y el

Altiplano, tal como se puede apreciar mediante datos observados por el SENAMHI durante los dos grandes episodios extraordinarios de El Niño ocurridos en los años 1982/1983 y 1997/1998 (Mantua y Here, 2002).

El Perú muestra una gran vulnerabilidad ante las variaciones climáticas drásticas, como los episodios extremos de lluvia y las altas temperaturas asociadas a El Niño. Es una evidencia de ello las pérdidas económicas que implicaron eventos como El Niño 1982/83 (pérdidas por US\$ 3283 millones) y El Niño 1997/98 (causó daños estimados en US\$ 3500 millones), pérdidas equivalentes al 11,6% y 6,2% del PBI anual de 1983 y 1998, respectivamente (SENAMHI, 2003).

3.3 Impacto de la variabilidad climática en frijol

Varios estudios previos han mostrado asociaciones entre la variabilidad climática ocasionada por el ENSO y los resultados de los sistemas agrícolas en varias regiones agrícolas del mundo (Dilley, 1997; Hammer et al., 2001; Hansen et al., 2002).

El sector agrícola de Costa Rica es muy vulnerable al impacto producido por la variabilidad climática. Una importante fuente de variación en las condiciones del clima la provee el fenómeno ENSO. Para el caso de frijol no se encontró ninguna relación estadística entre los parámetros meteorológicos y las fases ENSO, aunque si existe alguna relación entre años con fase cálida fuerte y bajos rendimientos de frijol. Villalobos (2001).

Las señales climáticas del ENSO se manifiestan en cambios en el rendimiento de los cultivos. Un estudio realizado por Podestá et al. (1999) sobre registros de rendimientos a nivel nacional muestra para el cultivo de soja reducciones de rendimiento durante los años La Niña y leves incrementos en El Niño.

3.4 Cambio Climático

Es la variación estadísticamente significativa, ya sea de las condiciones climáticas medias o de su variabilidad, que se mantiene durante un período prolongado, generalmente durante decenios o periodos de tiempo superiores.

Existe un gran debate sobre el calentamiento global en marcha, desde los ambientalistas escépticos que, aunque no niegan la existencia de acciones antropogénicas en el mecanismo de efecto invernadero, están en desacuerdo con las explicaciones actuales sobre el mecanismo de efecto invernadero, al sostener que el CO₂ solo absorbe la radiación infrarroja en una parte muy pequeña de su espectro, por lo que dudan si el aumento de la concentración de CO₂ podría tener un impacto significativo en el balance de calor de la tierra (Labohm et al., 2004), hasta la posición más generalizada del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change), que sostiene que el fenómeno del cambio climático está caracterizado por el incremento de la concentración de diversos gases como CO₂, CH₄, N₂O, etc., que se ha intensificado desde el inicio de la era industrial (fines del siglo XVIII) como consecuencia del creciente uso de combustibles fósiles y de la destrucción de las selvas tropicales húmedas. Esto podría llevar a incrementos en la temperatura y cambios en los regímenes hídricos, alterando las condiciones ambientales que afectan el desarrollo y crecimiento de los cultivos.

Las proyecciones de los cambios en el sistema climático se elaboran empleando una jerarquía de modelos climáticos, que van desde modelos climáticos sencillos a otros integrales. Estos modelos climáticos son simuladores del sistema climático (Atmósfera, Hidrósfera, Criósfera, Biósfera y Litósfera) mediante la resolución de las ecuaciones de las leyes y principios de la física que gobiernan los procesos en cada

componente del sistema y los intercambios de energía y masa entre sí, SENAMHI (2015).

3.5 Escenarios de emisión para cambio climático

Un escenario climático futuro es una representación plausible que indica cómo posiblemente se comportará el clima en una región en una cierta cantidad de años, tomando en cuenta datos históricos y usando modelos matemáticos de proyección, generalmente para precipitación y temperatura (IPCC, 2007). El uso de múltiples escenarios y modelos climáticos han permitido describir una amplia gama de posibles evoluciones futuras del clima de la Tierra. Para las nuevas simulaciones de modelos climáticos, realizados en el marco de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, se ha utilizado un nuevo conjunto de escenarios: las rutas representativas de concentración (RCP, de sus siglas en inglés), cabe señalar que algunos nuevos RPC pueden contemplar efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI, a diferencia de los escenarios de emisión utilizados en el AR4 (denominados SRES, de sus siglas en inglés). En todas las RCP, las concentraciones atmosféricas de CO₂ son más elevadas en el 2100 respecto al día de hoy, como resultado de un mayor aumento de las emisiones de CO₂ acumuladas en la atmósfera durante el siglo XXI. En este nuevo tipo de escenarios se han definido fijar los niveles de forzantes radiativas hacia el año 2100, en vez de considerarse ciertos niveles futuros de emisión de GEI. La forzante radiativa (FR) se define como la diferencia entre la radiación entrante a la Tierra versus la radiación que se entrega de vuelta al espacio, lo que implica que si la diferencia es positiva se tendrá calentamiento, producto de la acumulación de energía en la superficie terrestre. La FR total para el año 2100 varía desde 2,6 a 8,5 W/m², tal como se aprecia en la Tabla 2. De igual modo se observa según el tipo de RCP un cambio de temperatura superficial media muy significativa, con rangos desde 0.4°C hasta 2.6°C para el periodo de 2046 -2065 y de 0.3°C hasta 4.8°C para el periodo de 2081-2100. Según el Quinto informe de evaluación del IPPC (2013), cada RCP tiene asociada

una base de datos de alta resolución espacial de emisiones de sustancias contaminantes (clasificadas por sectores), de emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero y de usos de suelo hasta el año 2100, basada en una combinación de modelos de distinta complejidad de la química atmosférica y del ciclo del carbono. En la Figura 9, se visualiza los cuatro escenarios que comprenden las RCP, uno donde los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP 2.6), dos escenarios de estabilización (RCP 4.5 y RCP 6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP 8.5).

3.6 Modelos de Circulación General (GCM)

Según la definición del IPCC (2007), los modelos de circulación general (GCM, de sus siglas en inglés) constituyen una simplificación e idealización del sistema climático, por lo que es considerada como la herramienta más avanzada disponible en la simulación de la respuesta global a las concentraciones de gases de efecto invernadero cada vez mayores.

Estos modelos tienen como resultados series de tiempo de variables meteorológicas como temperatura y precipitación. Para ello, los GCM representan procesos físicos en la atmósfera, criósfera y superficie terrestre; utilizando una grilla tridimensional del globo, con resoluciones horizontales típicas del orden de 250 a 600 km y de 10 a 20 capas verticales en la atmósfera, llegando incluso a 30 capas en el océano (ver Figura 1). La grilla es por tanto bastante gruesa, siendo imposible de modelar los procesos que ocurren a menores escalas (como formación de nubes y procesos hidrológicos a nivel de cuenca).

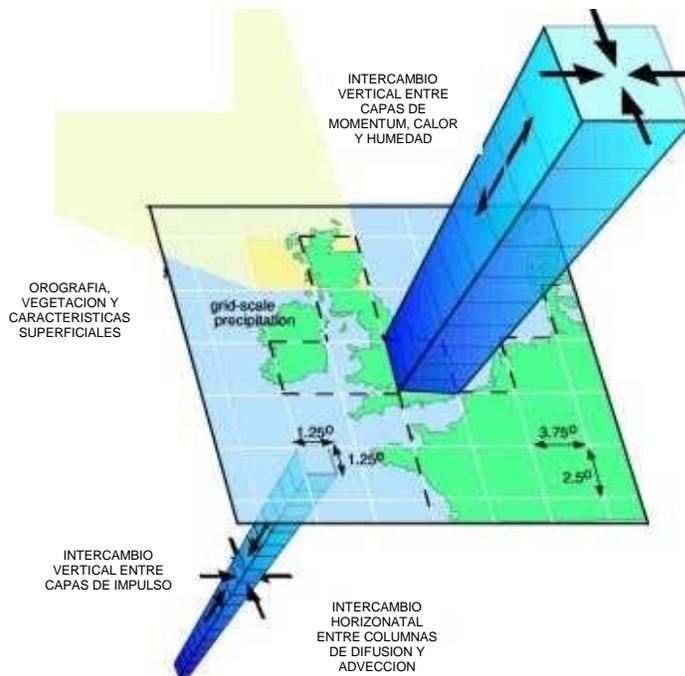


Figura 2: Esquema de los de los Modelos Climáticos de Circulación General (GCM)

Fuente: IPCC (2013)

Entonces los GCM muestran buena habilidad para simular la evolución de las circulaciones de escala global, esta bondad no es muy útil para el estudio de impactos locales debido a que la resolución espacial de esos modelos está por encima de la escala de los impactos locales que se desean analizar. Existen dos aproximaciones para lidiar con esta diferencia de escala e información: los métodos de reducción de escala estadística y dinámica (Amador, et al. 2008).

La regionalización estadística asume una relación entre las variables a una gran escala espacial y el clima local, como precipitación y temperatura. Se utiliza la ecuación de transferencia (por ejemplo regresión lineal) para determinar esa relación. Por otra parte con respecto al segundo método, la regionalización dinámica usa la información de modelos globales pero se ejecuta con una mayor resolución espacial en un proceso llamado anidación (SENAMHI, 2015).

3.6 Impacto del cambio climático en el frijol

Según Sánchez et al. (2000) encontraron que los cambios en la duración del ciclo, muchas veces llegan a extremos de hasta 20 días, la razón principal de este cambio es la duplicación efectiva de la concentración de CO₂, existen estudios que demuestran el aceleramiento de los ciclos de producción por esta variable. La biomasa en frijol se puede incrementar entre 18 y 25% y el rendimiento un 20 % debiéndose este incremento al mayor número de vainas por planta y no al mayor peso o tamaño de las semillas.

Gijena (2004) encontró que debido al cambio climático en todas las localidades en estudio en donde se sembraron frijol presentaron una reducción en la duración del ciclo de producción, la razón primordial de este fenómeno es el aumento de la temperatura y de la concentración de CO₂ en la atmósfera, además se le sumaron variables como el aumento de las temperaturas y la distribución óptima de la precipitación en algunos casos. Por estas razones se recomendó experimentar con variedades de ciclos más cortos y más largos para poder definir cual podría aumentar la eficiencia en la producción, inclusive con el manejo apropiado y los insumos requeridos se podrían producir más de un ciclo al año.

Esquivel et al. (2014) encontraron que los escenarios climáticos regionales derivados para la región agrícola de los Llanos- Durango muestran que no hay diferencia entre los escenarios de A2 y A1B planteados en su estudio. Sin embargo, comparados con los datos históricos, la temperatura máxima indica un aumento de 0,8°C, la temperatura mínima de 0,9 °C, y la precipitación una reducción de 56 mm para el escenario A2 y de 11 mm para el escenario A1B. estas diferencias se ven reflejadas en la productividad del cultivo de frijol con base en las simulaciones realizadas mediante el modelo del cultivo, ya que generan incremento y decrementos que se mantienen dentro de los rendimientos históricos de producción, la cual oscila en los 0,5 t/ha. Por lo tanto, con base en el generador estocástico de tiempo meteorológico utilizado (Magaña, 2010) y

las simulaciones mediante el modelo EPIC, se espera que en las próximas tres décadas se siga obteniendo el mismo rendimiento del cultivo en la región, si se mantienen las labores de cultivo convencionales.

3.7 Modelos agrometeorológico CROPGRO-Dry Bean

El modelo CROPGRO (Boote, et al. 1998) incluido en el paquete DSSAT V4.5 (Hoogenboom, et al. 2012) permite la unificación de los formatos de datos de entrada y salida con los modelos de diferentes cultivos. Los datos requeridos son los relacionados con:

- a) El clima (temperatura máxima y mínima, radiación global, precipitación) que conforman el archivo climático estándar (*.WTH), cargado con datos meteorológicos de la estación meteorológica instalado en la EEA-La Molina.
- b) El suelo (propiedades físicas y químicas de cada horizonte del perfil) que conforman el archivo de suelo estándar (*.SOIL), cargado con perfiles de suelos realizados en la parcela experimental ubicado en la EEA-La Molina.
- c) El manejo (residuos, fechas de siembra, fertilización, riego) considerados en el archivo (*.X).
- d) Los coeficientes genéticos de los cultivares.

Cabe señalar que en estudios de cambio climático, el modelo debe trabajar con los valores previstos de concentración de CO₂, y no con los valores que usa por defecto.

El modelo CROPGRO-Dry bean está compuesto por cuatro módulos que interactúan: desarrollo, balance de carbono, balance de agua y balance de nitrógeno. Aunque el modelo es de paso diario, algunos procesos como la fotosíntesis o la evolución fenológica utilizan un paso horario. Para ello, el modelo estima temperaturas horarias a partir de las temperaturas máximas y mínimas diarias.

Todas las variables de estado del modelo son calculadas diariamente y se visualizan en las salidas de las simulaciones (*.OUT). Además, el modelo simula los componentes del rendimiento, cuantificando y graficando el crecimiento diario del cultivo hasta el estadio de madurez fisiológica y de cosecha. La subrutina de desarrollo del cultivo utiliza diferentes ecuaciones así como diferentes valores de temperaturas base, óptima y máxima en función del subperíodo fenológico considerado. Esta subrutina genérica funciona para diferentes especies y cultivares.

Las características genéticas de un cultivo están consideradas en los parámetros o coeficientes genéticos contenidos en tres archivos: especie (*.SPE), ecotipo (*.ECO) y cultivar (*.CUL). El lenguaje de programación del actual módulo y del modelo CROPGRO es el Fortran y el paso de cálculo principal es el diario; la descripción de las tasas de cambio de materia seca, acumulación y removilización de proteínas y cambios en el número de vainas y semillas se realiza con ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden (Hoogenboom, et al. 2012).

IV. Materiales y Métodos

4.1 Ubicación del campo experimental

El trabajo de investigación fue realizado en el fundo del Instituto Nacional de Investigación Agraria de la Molina – INIA (Latitud 12°04'33" S, Longitud 76°56'41" W, altitud 253 msnm); en donde se sembraron tres variedades comerciales de frijol (Canario 2000, CIFAC 90195 y Laran Mejorado) en cuatro parcelas experimentales en épocas distintas: tres para los fines de calibración (30 de junio, 01 de agosto y 29 de agosto) y una para validación (30 de junio). En las parcelas de calibración se experimentó dos densidades de siembra: una alta (133 333 plantas/ha) y una baja (80 000 plantas/ha) para las tres variedades de frijol. Por otro lado, en la parcela de validación se experimentó estas variedades con tres niveles de fertilización nitrogenada: N1=30 kg/ha, N2=60 kg/ha y N3=100 kg/ha bajo un diseño experimental de parcelas divididas con tres bloques.

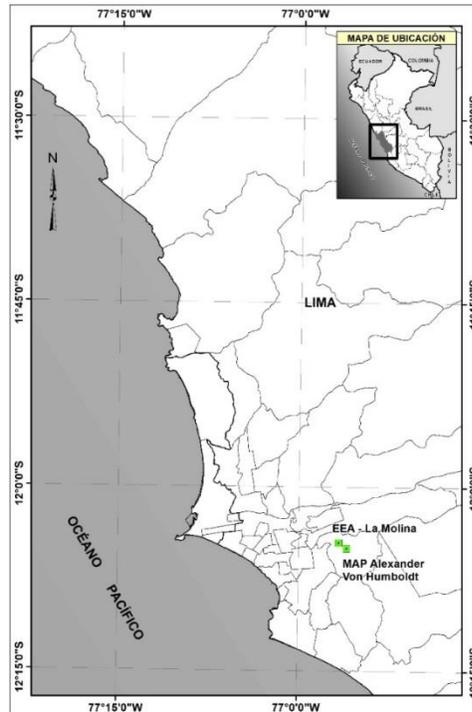


Fig. 3. Localización del área de investigación y de la estación meteorológica MAP-Alexander Von Humboldt

4.2 Descripción de las variedades de frijol

4.2.1 Variedad Canario 2000

Es una variedad de buen potencial de rendimiento que es altamente resistente al Virus del Mosaico Común (BCMV) y a la Roya (*Uromyces phaseoli* var. *typica*), las cuales han sido causante de pérdidas de rendimientos significativos.

El frijol Canario 2000 proviene de la cruce CIFAC 1233 x Canario Divex 8130, realizada en la Estación Experimental de Chincha en 1983 con el código CIFRI 4 (INIA, 2004). Esta variedad está disponible para su comercialización en el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Las características agronómicas más resaltantes de esta variedad se pueden apreciar en la Tabla 1.

4.2.2 Variedad INIA 404 - CIFAC 90105

La línea de frijol tipo canario CIFAC 90105, fue obtenido mediante hibridación y selecciones masales, iniciado en 1984 en la Estación Experimental de Chincha. Los progenitores fueron la línea CC07332 seleccionada por su resistencia a roya y virus procedente del CIAT y el cultivar local Canario Camanejo. La línea CIFAC 90105 fue seleccionada por sobresalir en pruebas de rendimiento y de evaluación de enfermedades. Su genealogía es como sigue:

Canario Camanejo x (CC07332 x Canario Camanejo/51-4)



CIFRI 690/-(143)-(6)-1-(18)- (105)

Esta variedad se adapta bien en las zonas productoras de frijol en la costa central y sur del país, pudiéndose sembrar hasta los 2000 m.s.n.m. Está disponible para su comercialización en el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Las características agronómicas más resaltantes de esta variedad se pueden apreciar en la Tabla 1.

4.2.3 Variedad Larán Mejorado

Esta variedad fue desarrollada en la Estación Experimental de Chincha entre 1981 y 1984, originándose de la línea CIFEM 691, que había sobresalido a diferentes pruebas de adaptación y rendimiento; a este cultivar se le denominó “Blanco Larán” sacándose al mercado en 1989 como una variedad resistente a la roya y virus del mosaico común. Posteriormente, en 1986 se obtuvo el cultivar “Larán Mejorado INIA”, mediante selecciones efectuadas a partir de la cruce “Blanco Larán y el cultivar americano “Nema SNAP”, desarrollando con ello resistencia a los nematodos. (Camarena et al., 2009). Desde 1993 hasta la actualidad se comercializa esta variedad en el INIA. Las características más resaltantes de esta variedad se pueden apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1: Características morfológicas y de importancia agronómica del frijol.

Características Agronómicas	Variedades Comerciales		
	Canario 2000	CIFAC 90105	Laran Mejorado
Hábito de crecimiento	Arbusto determinado Tipo I	Semipostrado Indeterminado Tipo III	Tipo II
Altura de promedio de planta	54 cm	90cm	56 cm
color de las alas de la flor	Lila claro	Blanco	Blanco
Días a la Floración	50	55	47
Días a la madurez fisiológica	90	98	98
Días a la cosecha	125	135	85 (verde) - 115 (seco)
Color de grano	Amarillo intenso	Amarillo	Blanco
Tamaño de grano	Grande	Grande	Grande
Peso promedio de 100 semillas	54 g	46g	50,8 g
Número de granos por vaina	4	5 a 6	5
Perfil predominante de la vaina	Curvada	Recto	Recto
Rendimiento promedio	1500 - 2000 kg/ha de Grano seco	2500 - 3000kg/ha. de Grano seco	1500 - 2500 kg/ha de Grano seco
Rendimiento máximo alcanzado	2595 kg/ha de grano seco	3500 kg/ha de grano seco	3000 kg/ha de grano seco
Aceptación comercial	Muy buena	Muy buena	Muy buena

Fuente: INIA (2004, 2009) y MINAGRI (2017)

4.3 Información Edáfica

Antes del establecimiento de las parcelas experimentales, se realizó una calicata representativa, en el cual se aprecia claramente 3 horizontes con longitudes de 0,37; 0,32 y 0,30 m en el horizonte 1, 2 y 3; respectivamente. Posteriormente, se sacaron muestras de suelo por cada horizonte para analizarlos en el Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) con el objetivo de conocer las condiciones físico-químicas del suelo.

En la Tabla 2 se muestra los resultados del análisis de caracterización donde se determina que el suelo del campo experimental posee una clase textural Franco en el horizonte 1 y una textura Franco arcilloso en los horizontes 2 y 3, las cuales se caracterizan en general por tener de moderada a alta capacidad de retención de humedad, adecuada permeabilidad y buena aireación.

Por lo que se refiere al pH del suelo, el primer horizonte presentó un valor neutro de 6,96; asimismo los siguientes horizontes (2 y 3) presentaron un valor ligeramente alcalino de 7,68 y 7,70; respectivamente. Esta condición alcalina se relaciona directamente con el porcentaje de carbonatos cuyos niveles son inexistentes (0 %). Por otro lado, los valores de conductividad eléctrica (C.E) a extracto de saturación fueron de 5,46; 1,54 y 1,40 dS/m respectivamente, lo cual indica que en el primer horizonte existe una moderada salinidad producto al alto contenido de nitratos y amonios en el suelo (8,17 y 2,88 ppm; respectivamente); en el caso de los horizontes 2 y 3 indican que son muy ligeramente salino. Estos tipos de sales no serán un factor limitante para el desarrollo del frijol ya que son aprovechados como nutrientes.

Tabla 2: Análisis de caracterización de suelo de la parcela experimental de frijol

Parámetros	Unidad de medida	Horizonte 1	Horizonte 2	Horizonte 3
Longitud de horizonte	m	0,37	0,32	0,30
Arena	%	49	28	38
Limo	%	28	33	33
Arcilla	%	23	39	29
Clase Textural	-	Fr.	Fr.Ar.	Fr.Ar.
Densidad aparente	g/cm ³	1,40	1,50	1,62
pH	-	6,96	7,68	7,70
C.E.	dS/m	2,78	0,77	0,70
M.O.	%	1,81	0,99	0,85
N orgánico	%	0,10	0,06	0,05
C orgánico	%	1,05	0,57	0,49
CaCO ₃	%	0,00	0,00	0,00
CaCO ₃	mg/kg	0,0	0,0	0,0
Nitratos	ppm	8,17	17,28	9,00
Amonio	ppm	2,88	2,88	2,16
Fósforo total	ppm	48,10	4,10	4,10
Potasio total	ppm	542,00	228,00	109,00
CIC total	meq/100 g	17,60	19,68	16,32
Ca ⁺²	meq/100 g	12,70	15,91	14,12
Mg ⁺²	meq/100 g	2,27	2,70	1,50
K ⁺	meq/100 g	1,32	0,63	0,35
Na ⁺	meq/100 g	0,36	0,44	0,35
Al ⁺³ + H ⁺	meq/100 g	0,00	0,00	0,00
Suma de cationes	meq/100 g	16,65	19,68	16,32
Suma de Bases	meq/100 g	16,65	19,68	16,32
% Saturación de Bases	%	95,0	100,0	100,0

Fuente: Laboratorio de Análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la UNALM.

Con respecto a la materia orgánica, los tres horizontes (1, 2 y 3) manifiestan niveles bajos con 1,81; 0,99 y 0,87 %, por consiguiente el porcentaje de nitrógeno y carbono calculado en base a las formulas propuestas por Demolon (1944) y Ribera et al. 2013, fueron 0,10; 0,06 y 0,05 % de nitrógeno orgánico, respectivamente; y 1,05; 0,57 y 0,49 % de carbono orgánico, respectivamente. Por otra parte, el nivel de fósforo disponible en el horizonte 1 fue muy alto con 48,10 ppm; los horizontes 2 y 3 presentaron niveles bajos de este elemento con 4,10 y 4,10 ppm; respectivamente. Por último, el nivel de potasio disponible en el horizonte 1 fue muy alto con 542 ppm; asimismo, los horizontes 2 y 3 presentaron niveles medios de este elemento con 228 y 109 ppm respectivamente.

En relación a los cationes intercambiables se puede apreciar una distribución catiónica de Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} y Na^{+} en 76,28; 13,63; 7,93 y 2,16 %, respectivamente para el horizonte 1; 80,84; 13,72; 3,20 y 2,24 % respectivamente, para el horizonte 2: y 86,52; 9,19; 2,15 y 2,15 %, respectivamente para el horizonte 3. Con respecto a las relaciones catiónicas, la relación $\text{K}^{+}/\text{Mg}^{+2}$ refleja una deficiencia de magnesio solamente en el primer horizonte. En cuanto a la relación de $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$, existe proporciones adecuadas en los tres horizontes.

4.4 Diseño Experimental

El diseño experimental empleado en esta investigación fue el de parcelas divididas (Split Plot), asignándose aleatoriamente a los niveles de nitrógeno como las parcelas dentro de cada bloque, y en el caso de los híbridos se le asignó el nivel de subparcela dentro de cada parcela completa. Se empleó 3 bloques, lo cual se tuvo 3 repeticiones por tratamiento.

A continuación se muestra el modelo aditivo lineal que representa matemáticamente las relaciones existentes entre los factores considerados en este experimento.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \rho_k + (\tau\rho)_{ik} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

Y_{ijk} : Es el valor observado de la variable respuesta en i-ésimo nivel de fertilización nitrogenada, j-ésimo nivel de híbrido en el k-ésimo bloque.

μ : Es el efecto de la media general de la variable respuesta.

τ_i : Es el efecto del i-ésimo nivel de fertilización nitrogenada.

β_j : Es el efecto del j-ésimo bloque

$(\tau\beta)_{ij}$: Es el efecto del error experimental del i-ésimo nivel de fertilización nitrogenada en el j-ésimo bloque, Error (a)

ρ_k : Es el efecto del k-ésimo nivel de híbrido de maíz amarillo duro.

$(\tau\rho)_{ik}$: Es el efecto de la interacción bajo el i-ésimo nivel de fertilización nitrogenada, k-ésimo nivel de híbrido de maíz amarillo duro.

ε_{ijk} : Es el efecto del error experimental bajo el i-ésimo nivel de fertilización nitrogenada, k-ésimo nivel de híbrido de maíz amarillo duro en el j-ésimo bloque, Error (b).

4.5 Distribución de las parcelas experimentales

Las parcelas experimentales que se usaron para este estudio fueron las siguientes: 1) validación, 2) calibración 1, 3) calibración 2 y 4) calibración 3. La parcela de validación estuvo conformado por 3 bloques con 9 tratamientos cada uno, es decir un total de 27 unidades experimentales (Figura 4). Las parcelas de calibración estuvieron conformadas por 6 tratamientos cada uno de idénticas características. Estas no tuvieron repeticiones, por lo lo cual la totalidad de unidades experimentales también fueron 6 para cada parcela (Figura 4). Cada unidad experimental estuvo conformada por tres hileras dobles de plantas (en el medio de ellos estaba una manguera para su riego); el largo de todas las unidades experimentales fueron de 6 m con un ancho de 3 m y 4,5 m para las parcelas de calibración y validación, respectivamente, determinándose de esta manera un área efectiva de 18 m² por unidad experimental de calibración y 27 m² para validación.

LEYENDA	
Variedades	Niveles de Nitrógeno
V1: Canario 2000	N1: 30
V2: CIFAC 90105	N2: 60
V3: Larán Mejorado	N3: 100
Densidades de Siembra	Otros
AD: Alta densidad (30 cm)	1: Lisímetro
BD: Baja densidad (50 cm)	2: Válvulas de riego

N°	Tratamiento	Randomización		
		I	II	III
1	V2N1	101	204	307
2	V1N1	102	205	309
3	V3N1	103	206	308
4	V2N2	104	209	305
5	V3N2	105	208	306
6	V1N2	106	207	304
7	V1N3	107	202	302
8	V2N3	108	201	303
9	V3N3	109	203	301

PARCELA DE CALIBRACIÓN
1,2 Y 3:

V1AD
V1BD
V2AD
V2BD
V3AD
V3BD

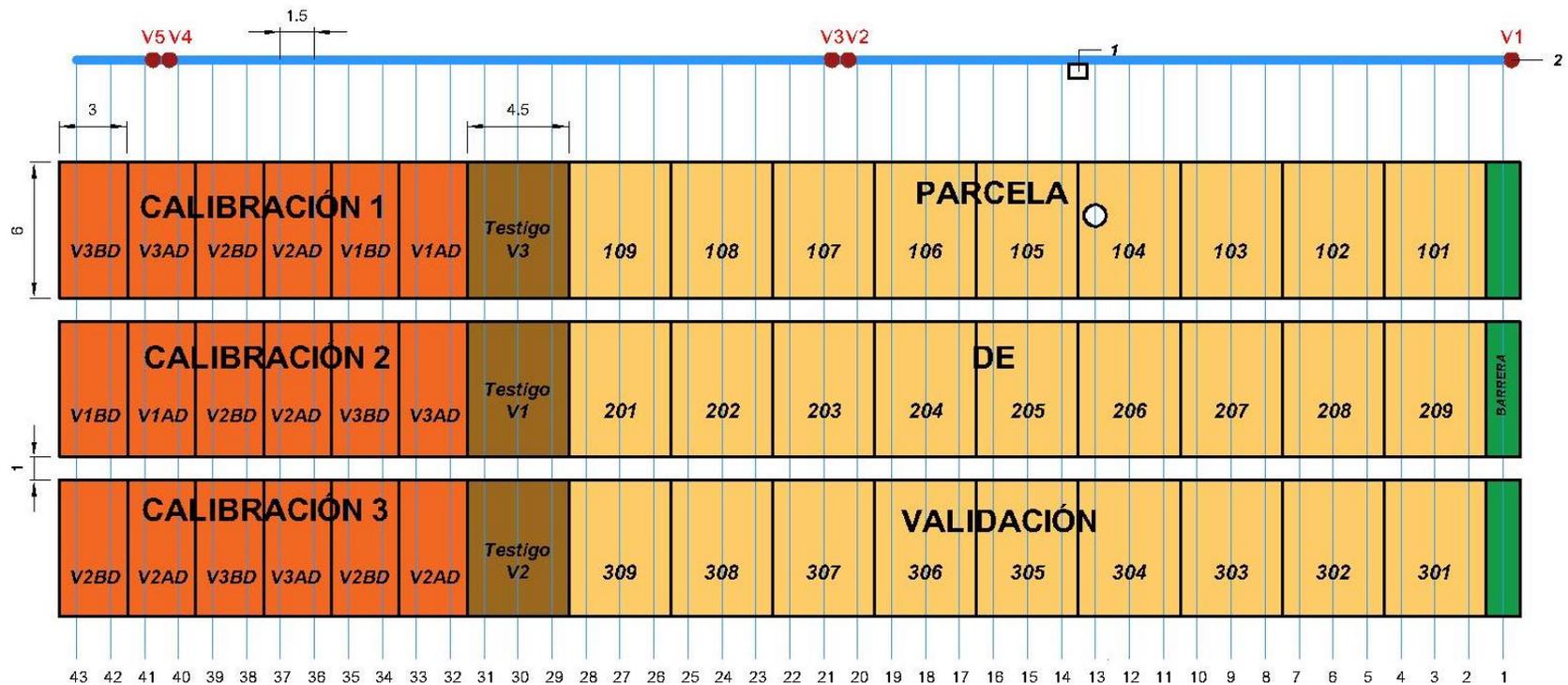
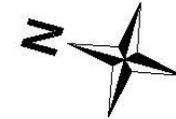


Figura 4: Esquema de aleatorización de los tratamientos de Parcela de Validación (Split Plot)

4.6 Conducción del ensayo experimental

El ensayo experimental se realizó en el lote 5 del Centro Experimental del INIA, conducido desde hace más de 5 años con riego tecnificado (sin goteos autocompensados). Se inició el acondicionamiento de las parcelas experimentales con un riego de machaco, para luego proceder con la preparación del terreno usándose maquinaria agrícola (arado, rastra y niveladora); posteriormente se procedió a la instalación de las cintas de riego, realizándose un riego suave para promover la germinación de malezas y ser eliminadas con el herbicida Gramoxone a (1,5 – 3,0 l/cilindro de 200 l). Una semana después se procedió a delimitar el campo y señalar los caminos con cal.

La primera época de siembra se realizó el 30 de junio del 2016 instalándose las parcelas de calibración 1 y validación. En la primera parcela se estudió la influencia de dos densidades de siembra (alta y baja) en las características agronómicas de las variedades Canario 2000, CIFAC 90105 y Larán Mejorado. La densidad alta estuvo determinada por 133 333 plantas/ha y la densidad baja por 80 000 plantas/ha. En el caso de la parcela de validación, constituida por 3 bloques, se estudió la influencia de tres niveles de fertilización nitrogenada en las características agronómicas de las variedades mencionadas. La primera dosis nitrogenada fue 30 kg/ha, la segunda fue 60 kg/ha y la tercera 100 kg/ha. Un mes después, el 01 de agosto del 2016 se sembró la parcela de calibración 2. Finalmente, el 29 de agosto del 2016 se sembró la parcela de calibración 3, con el mismo objetivo descrito de estudiar las densidades de siembra.

La siembra en general se realizó bajo un sistema de doble hilera por manguera (del sistema del riego), las cuales tenían un distanciamiento de 1,5 m. La siembra fue realizada manualmente estableciéndose tres plantas por golpe a cada 40 cm para la parcela de validación, lo cual equivale a una densidad comercial de 100 000 plantas/ha; las parcelas de calibración fueron sembrado cada 30 cm y 50 cm (alta y

baja densidad, respectivamente). El manejo integrado de plagas, enfermedades y malezas se efectuó eficazmente para que el potencial de crecimiento y desarrollo de los tratamientos se expresen adecuadamente sin interferencias de este tipo. El riego de las parcelas experimentales fue mediante sistema de goteo tecnología INIA (sin goteros autocompensados), en el cual se proporcionó constantemente un alto nivel de humedad a la zona radical de las plantas de maíz amarillo duro. En total para la parcela de validación, calibración 1, 2 y 3 se realizaron 22, 24, 21 y 21 riegos respectivamente, usándose 184,17; 207,5; 186,67 y 175,83 mm de lámina de riego correspondientemente. Los detalles de estos riegos se aprecian en la Tabla 3.

La fertilización de las parcelas experimentales se caracterizaron por el fraccionamiento del nitrógeno en dos partes iguales según el tratamiento de las parcelas, teniendo todas en común el nivel de fertilización de fósforo y potasio que fue 80 kg/ha y 60 kg/ha, respectivamente. En el caso de las parcelas de calibración, se fertilizaron con la máxima dosis de nitrógeno, es decir 100 kg/ha; para las parcelas de validación las dosis fueron 30, 60 y 100 kg/ha. Las fechas de fertilización de las parcelas experimentales se aprecian en la Tabla 4.

Tabla 3: Riegos realizados en las parcelas experimentales validación, calibración 1, 2 y 3.

VALIDACIÓN				CALIBRACIÓN 1			
N° de riego	Fecha de riego	Días después de la Siembra	Lamina de riego en 1 ha (mm)	N° de riego	Fecha de riego	Días después de la Siembra	Lamina de riego en 1 ha (mm)
			V1N1/V1N2/V1N3				V1AD/V1BD/V2AD/V2BD/V3AD/V3BD
1	01/07/2016	1	6,11	1	01/07/2016	1	6,11
2	06/07/2016	6	5,00	2	06/07/2016	6	5,00
3	13/07/2016	13	8,33	3	13/07/2016	13	8,33
4	21/07/2016	21	8,33	4	21/07/2016	21	8,33
5	27/07/2016	27	7,22	5	27/07/2016	27	7,22
6	03/08/2016	35	10,00	6	03/08/2016	35	10,00
7	10/08/2016	42	9,17	7	10/08/2016	42	9,17
8	17/08/2016	48	8,33	8	17/08/2016	48	8,33
9	26/08/2016	57	11,67	9	26/08/2016	57	11,67
10	02/09/2016	64	8,33	10	02/09/2016	64	8,33
11	09/09/2016	71	8,33	11	09/09/2016	71	8,33
12	16/09/2016	78	10,00	12	16/09/2016	78	10,00
13	19/09/2016	81	5,00	13	19/09/2016	81	5,00
14	20/09/2016	82	6,67	14	20/09/2016	82	6,67
15	29/09/2016	91	6,67	15	29/09/2016	91	6,67
16	03/10/2016	95	8,33	16	03/10/2016	95	8,33
17	07/10/2016	99	10,00	17	07/10/2016	99	10,00
18	11/10/2016	103	10,00	18	11/10/2016	103	10,00
19	14/10/2016	106	8,33	19	14/10/2016	106	8,33
20	18/10/2016	110	8,33	20	18/10/2016	110	8,33
21	20/10/2016	112	10,00	21	20/10/2016	112	10,00
22	24/10/2016	116	10,00	22	24/10/2016	116	10,00
				23	28/10/2016	120	11,67
				24	07/11/2016	130	11,67
TOTAL			184,17	TOTAL			207,50
CALIBRACIÓN 2				CALIBRACIÓN 3			
N° de riego	Fecha de riego	Días después de la Siembra	Lamina de riego en 1 ha (mm)	N° de riego	Fecha de riego	Días después de la Siembra	Lamina de riego en 1 ha (mm)
			V1AD/V1BD/V2AD/V2BD/V3AD/V3BD				V1AD/V1BD/V2AD/V2BD/V3AD/V3BD
1	03/08/2016	2	10,00	1	02/09/2016	4	8,33
2	10/08/2016	9	9,17	2	09/09/2016	11	8,33
3	17/08/2016	16	8,33	3	16/09/2016	18	10,00
4	26/08/2016	25	11,67	4	19/09/2016	21	5,00
5	02/09/2016	32	8,33	5	20/09/2016	22	6,67
6	09/09/2016	39	8,33	6	29/09/2016	31	6,67
7	16/09/2016	46	10,00	7	03/10/2016	35	8,33
8	19/09/2016	49	5,00	8	07/10/2016	39	10,00
9	20/09/2016	50	6,67	9	11/10/2016	43	10,00
10	29/09/2016	59	6,67	10	14/10/2016	46	8,33
11	03/10/2016	63	8,33	11	18/10/2016	50	8,33
12	07/10/2016	67	10,00	12	20/10/2016	52	10,00
13	11/10/2016	71	10,00	13	24/10/2016	56	10,00
14	14/10/2016	74	8,33	14	28/10/2016	60	11,67
15	18/10/2016	78	8,33	15	07/11/2016	70	11,67
16	20/10/2016	80	10,00	16	08/11/2016	71	5,83
17	24/10/2016	84	10,00	17	14/11/2016	77	8,33
18	28/10/2016	88	11,67	18	15/11/2016	78	8,33
19	07/11/2016	98	11,67	19	22/11/2016	85	11,67
20	08/11/2016	99	5,83	20	27/11/2016	90	5,56
21	14/11/2016	105	8,33	21	04/12/2016	97	5,56
TOTAL			186,67	TOTAL			178,61

Elaboración Propia

Tabla 4: Fertilizaciones realizados en las parcelas de validación, calibración 1, 2 y 3.

Fecha de Fertilización	Días después de la Siembra	Tipo de Fertilizante	N (kg/ha)	P2O5 (kg/ha)	K2O (kg/ha)	S (kg/ha)
Calibración 1 (V1AD, V1DB, V2AD, V2BD, V3AD y V3BD)			100	80	60	0,0
20/07/2016	20	Fosfato Diamónico	31,3	80	0	0
20/07/2016	20	Sulfato de Amonio	18,7	0	0	21,4
20/07/2016	20	Sulfato de Potasio	0	0	60	21,6
04/08/2016	35	Sulfato de Amonio	50	0	0	0
Calibración 2 (V1AD, V1DB, V2AD, V2BD, V3AD y V3BD)			100	80	60	0,0
19/08/2016	18	Fosfato Diamónico	31,3	80	0	0
19/08/2016	18	Sulfato de Amonio	18,7	0	0	21,4
19/08/2016	18	Sulfato de Potasio	0	0	60	21,6
06/09/2016	36	Sulfato de Amonio	50	0	0	0
Calibración 3 (V1AD, V1DB, V2AD, V2BD, V3AD y V3BD)			100	80	60	0,0
16/09/2016	18	Fosfato Diamónico	31,3	80	0	0
16/09/2016	18	Sulfato de Amonio	18,7	0	0	21,4
16/09/2016	18	Sulfato de Potasio	0	0	60	21,6
03/10/2016	35	Sulfato de Amonio	50	0	0	0
Validación (V1N1, V2N1 y V3N1)			30	80	60	0
20/07/2016	20	Fosfato Diamónico	30	80	0	0
20/07/2016	20	Sulfato de Potasio	0	0	60	21,6
Validación (V1N2, V2N2 y V3N2)			60	80	60	0,0
20/07/2016	20	Fosfato Diamónico	31,3	80	0	0
20/07/2016	20	Sulfato de Amonio	14,35	0	0	16,4
20/07/2016	20	Sulfato de Potasio	0	0	60	21,6
04/08/2016	35	Sulfato de Amonio	14,35	0	0	0
Validación (V1N3, V2N3 y V3N3)			100	80	60	0,0
20/07/2016	20	Fosfato Diamónico	31,3	80	0	0
20/07/2016	20	Sulfato de Amonio	18,7	0	0	21,4
20/07/2016	20	Sulfato de Potasio	0	0	60	21,6
04/08/2016	35	Sulfato de Amonio	50	0	0	0

4.7 Calibración del modelo CROPGRO-Dry bean

La calibración es el proceso iterativo de búsqueda de los valores de los coeficientes genéticos que produzcan la menor discrepancia entre resultados simulados por el modelo y observados en el experimento, lo cual requiere la medición, estimación o ajuste de sus valores para mejorar la precisión predictiva del modelo con respecto de algunas variables.

Con los coeficientes ajustados para el CROPCRO-Dry bean, el modelo se transforma en una herramienta más efectiva para ser utilizada en planificación, manejo de

cultivos y sus consecuencias, así como diseñar distintas estrategias ante el cambio climático y el pronóstico de rendimiento.

La lista de los coeficientes genéticos se puede ver en la Tabla 5.

Tabla 5. Coeficientes genéticos para calibrar el CROPGRO-Dry bean.

Código Genético	Observación
CSDL	Fotoperiodo crítico (horas) por debajo del cual el desarrollo reproductivo no es afectado por la longitud del día.
PPSEN	Pendiente de la tasa relativa (1/horas) de desarrollo para longitudes del día superiores a CSDL o sensibilidad fotoperiódica.
EM-FL	Tiempo (días fototermales) desde el final de la fase juvenil a la primera flor (R1), duración mínima con temperatura y fotoperiodos óptimos.
FL-SH	Tiempo (días fototermales) desde la primera flor a la primera vaina (R3).
FL-SD	Tiempo (días fototermales) desde la primera flor a la primera vaina con semillas (R5).
SD-PM	Tiempo (días fototermales) desde la primera vaina (R5) conteniendo semillas a madurez fisiológica (R7).
FL-LF	Tiempo (días fototermales) desde la primera flor (R1) al final del crecimiento de hojas.
LFMAX	Tasa fotosintética máxima (mg CO ₂ /m ² .s) con saturación lumínica y temperatura óptima.
SLAVR	Área foliar específica (cm ² /g) en condiciones de crecimiento estándar.
SIZLF	Tamaño máximo de hoja completa (tres folíolos) (cm ²)
XFRT	Fracción máxima de la fotosíntesis bruta diaria disponible para semillas y vainas.
WTPSD	Peso máximo de semilla (g) bajo condiciones no limitantes de sustrato.
SFDUR	Duración (días fisiológicos) de llenado de semilla.
SDPDV	Número de semillas promedio por vaina.
PODUR	Tiempo (días fisiológicos) para que el cultivo alcance la carga completa de vainas en condiciones óptimas.

4.8 Validación del modelo CROPGRO-Dry bean

El modelo CROPGRO-Dry bean se validó comparando los datos observados con los obtenidos de la simulación de cada uno de los tratamientos, utilizando el paquete de coeficientes genéticos que se hallaron en la etapa de calibración para cada variedad. De esta forma se pudo cuantificar el grado de predicción del modelo de algunas variables como emergencia, día de la anthesis, días a la maduración fisiológica, peso seco a la madurez fisiológica, índice de área foliar máximo, índice de cosecha y rendimiento de grano seco. Por otro lado, la materia seca aérea y el índice de área foliar se consideraron para una evaluación general del modelo.

Para validar el modelo se utilizaron diferentes índices estadísticos como la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) (Ecuación 2), el índice de concordancia (D-index) (Ecuación 3) y el coeficiente de determinación (r^2).

$$RMSE = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \times \frac{100}{M} \quad (2)$$

En las ecuaciones de RMSE e índice de concordancia, “n” representa el número de observaciones, “Pi” es la observación predicha, “Oi” es la observación medida, donde $P'_i = P_i - M$ y $O'_i = O_i - M$, siendo “M” la media de la variable observada.

RMSE normalizado entrega una medida en porcentaje de la diferencia relativa de los datos simulados en comparación con los observados. La simulación se considera como excelente, con un RMSE normalizado menor de 10%, es bueno cuando el RMSE normalizado es superior a 10% pero menor que 20%, es justo si el RMSE normalizado es mayor que 20% y menor 30% y deficiente si es mayor a 30%.

El índice de concordancia (D-index) propuesto por Willmott et al. (1985), se estimó de acuerdo estadístico d, en donde si este índice es cercano a uno, mejor será la comparación entre las dos variables (simulada y observada).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right] \quad (3)$$

Finalmente, para hallar el coeficiente de determinación (r^2) se realizó un análisis de regresión.

4.9 Variabilidad climática en el cultivo de frijol

A partir de la serie histórica climatológica (1930-2017) y de producción agrícola, se simuló la producción para las tres variedades de frijol previamente calibrados, obteniéndose como resultado ensambles de récords históricos de cosechas para las variedades de frijol. Estos fueron divididos para las diferentes fases del evento ENSO (El Niño, La Niña y Neutral, por tratarse del principal evento océano – atmosférico que impacta significativamente la costa peruana). Para ello, se evaluó previamente las características climatológicas de las zonas de estudio, en función de los eventos de las fases ENSO (El Niño, Neutral y la Niña), y asimismo se recopiló toda la información histórica de producción agrícola registrada para la zona de estudio. Seguidamente, a partir de los resultados obtenidos en la validación de los modelos, se simularon los rendimientos para toda la información histórica, separándolos para cada una de las fases extremas del evento ENSO.

Para el análisis de la variabilidad climática, durante el período considerado, los años fueron clasificados en relación a las fases del evento ENSO (NOAA, 2018).

Según la NOAA (2017), los años se determinan a partir de los valores de diciembre-enero-febrero (DEF) del índice PSD MEI.ext. el evento ENSO se definen más claramente en el invierno septentrional (DEF), tanto en términos de impacto como de robustez con respecto al índice ENSO utilizado. Otras temporadas también tienen impactos, pero no necesariamente coinciden con las temporadas de invierno. Tal como lo muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación del evento ENSO según la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)

DEF-AÑO	Clasificación								
1930-1931	El Niño	1950-1951	Neutral	1970-1971	La Niña	1990-1991	Neutral	2010-2011	La Niña
1931-1932	Neutral	1951-1952	El Niño	1971-1972	La Niña	1991-1992	El Niño	2011-2012	La Niña
1932-1933	Neutral	1952-1953	El Niño	1972-1973	El Niño	1992-1993	Neutral	2012-2013	Neutral
1933-1934	La Niña	1953-1954	El Niño	1973-1974	La Niña	1993-1994	Neutral	2013-2014	Neutral
1934-1935	Neutral	1954-1955	La Niña	1974-1975	La Niña	1994-1995	El Niño	2014-2015	Neutral
1935-1936	Neutral	1955-1956	La Niña	1975-1976	La Niña	1995-1996	La Niña	2015-2016	El Niño
1936-1937	Neutral	1956-1957	Neutral	1976-1977	El Niño	1996-1997	Neutral	2016-2017	La Niña
1937-1938	Neutral	1957-1958	El Niño	1977-1978	El Niño	1997-1998	El Niño		
1938-1939	La Niña	1958-1959	El Niño	1978-1979	Neutral	1998-1999	Neutral		
1939-1940	Neutral	1959-1960	Neutral	1979-1980	El Niño	1999-2000	La Niña		
1940-1941	El Niño	1960-1961	Neutral	1980-1981	Neutral	2000-2001	La Niña		
1941-1942	El Niño	1961-1962	Neutral	1981-1982	Neutral	2001-2002	Neutral		
1942-1943	La Niña	1962-1963	Neutral	1982-1983	El Niño	2002-2003	El Niño		
1943-1944	Neutral	1963-1964	El Niño	1983-1984	La Niña	2003-2004	Neutral		
1944-1945	Neutral	1964-1965	La Niña	1984-1985	La Niña	2004-2005	El Niño		
1945-1946	Neutral	1965-1966	El Niño	1985-1986	Neutral	2005-2006	La Niña		
1946-1947	Neutral	1966-1967	Neutral	1986-1987	El Niño	2006-2007	El Niño		
1947-1948	Neutral	1967-1968	Neutral	1987-1988	El Niño	2007-2008	La Niña		
1948-1949	Neutral	1968-1969	El Niño	1988-1989	La Niña	2008-2009	La Niña		
1949-1950	La Niña	1969-1970	El Niño	1989-1990	Neutral	2009-2010	El Niño		

Fuente: Para datos de 1930-1950; NOAA-ESRL (2017)
Para datos de 1950-2017; NOAA-CPC (2017)

4.10 Generación de escenarios de cambio climático

a) Control de calidad de los datos diarios

Esto se realiza considerando los siguientes criterios:

- Recopilar datos diarios de lluvia, temperatura máxima y mínima, radiación solar, magnitud del viento, temperatura de rocío, presión de vapor y humedad relativa.
- Identificar valores extremos considerando: coherencia espacial (estaciones cercanas muestren similares valores extremos); consistencia física (la temperatura mínima no debe exceder a la máxima) y luego se define los valores vacíos y dudosos.

b) Extracción de datos del AgMERRA

Se extraen datos diarios del punto de grilla de AgMERRA más cercano al punto de la estación observada, como mínimo para las variables lluvia, temperatura máxima y mínima.

c) Completar la información observada de precipitación y temperaturas máximas y mínimas con datos del AgMERRA

Los datos vacíos pueden ser completados mediante información de las bases históricas grilladas del AgMERRA, que contienen datos diarios de lluvia, temperatura máxima y mínima, radiación solar, magnitud del viento y humedad relativa para el período de 1980 al 2010.

d) Construir archivos en formato AgMIP con la información de datos observados y completados (paso 3), para las variables arriba mencionadas

Para construir archivos en el formato AgMIP se utiliza un archivo de Excel.

e) Construcción de “Escenarios Climáticos” mediante el uso de un script para la estación de importancia, considerando el periodo de Línea Base 1980 – 2010. Adicionalmente, se considerarán tres modelos del CMIP5:

- CanESM2 (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis)
- MPI-ESM-MR (Max Planck Institute for Meteorology)
- CNRM-CM5 (Centre National de Recherches Meteorologiques/Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique).

Dos escenarios de emisión (RCP 4.5 y RCP 8.5) y tres periodos futuros (2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099).

4.11 Generación de rendimientos futuros en el cultivo de frijol

Después de haber calibrado y validado el modelo para las diferentes variedades de frijol se utilizó el modelo CROPGRO-Dry bean con los datos de los escenarios climáticos y se realizó las simulaciones para comparar los rendimientos previstos en la línea de base climática actual y futura de producción.

Con esta metodología se procedió con las estimaciones de los rendimientos futuros de las diferentes variedades de frijol con los tres Modelos de Circulación General (CanESM2; CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR) y dos escenarios de emisión (RCP 4.5 y RCP 8.5).

Para las condiciones de la EEA-La Molina, las predicciones fueron analizadas comparando el rendimiento histórico modelado del periodo 1980-2010 (Rdto 1980-2010) con los rendimientos de los tres Modelos de Circulación General (Rdto CanESM2 (4.5 y 8.5); Rdto CNRM-CM5 (4.5 y 8.5) y Rdto MPI-ESM-MR (4.5 y 8.5) para tres periodos cercano (2010-2040), medio (2040-2070) y lejano (2070-2090).

Para observar el efecto del clima sobre los rendimientos futuros se realizó la diferencia entre los promedios de las estimaciones del futuro con los promedios de las estimaciones del pasado. Obteniéndose las siguientes variaciones (Δ) en los rendimientos:

- $\text{Rdto}_{\text{CanESM2 (4.5 y 8.5)}} - \text{Rdto}_{1980-2010} = \Delta \text{Rdto}_{\text{CanESM2 (4.5 y 8.5)}}$
- $\text{Rdto}_{\text{CNRM-CM5 (4.5 y 8.5)}} - \text{Rdto}_{1980-2010} = \Delta \text{Rdto}_{\text{CNRM-CM5 (4.5 y 8.5)}}$
- $\text{Rdto}_{\text{MPI-ESM-MR (4.5 y 8.5)}} - \text{Rdto}_{1980-2010} = \Delta \text{Rdto}_{\text{MPI-ESM-MR (4.5 y 8.5)}}$

Luego se analizó la significancia comparando la desviación estándar (DS) de los rendimientos en el periodo de las series históricas (EEA-La Molina: 1980-2010 y EEA-Donoso: 1984-2014) con las variaciones en los rendimientos en los diferentes escenarios de cambio climático:

- $\Delta R_{dto} > 2 \times DS$ Altamente significativo (**)
- $DS < \Delta R_{dto} < 2 \times DS$ Significativo (*)
- $\Delta R_{dto} < DS$ no significativo (n.s.)

V. Resultados y discusión

5.1. Calibración del modelo CROPGRO-Dry bean

La Tabla 7 presenta los coeficientes genéticos de las tres variedades de frijol para la calibración del modelo CROPGRO-Dry bean, a fin de estimar el crecimiento y desarrollo de las plantas en las condiciones del suelo y el clima de la Estación Experimental de La Molina. Seis coeficientes definen las características de desarrollo del ciclo de vida, y siete coeficientes definen las características de crecimiento (Boote et al., 2003). Con respecto al Coeficiente PPSEN, que define la sensibilidad al fotoperiodo, se observó que las tres variedades son insensibles a esta característica; tal como lo demuestra Didonet y Silva (2004), en donde observaron que algunos cultivares de frijol brasileño son insensibles al fotoperiodo ($PPSEN = 0$), es decir, su desarrollo y crecimiento están controlados solo por la temperatura del aire, con requerimientos térmicos en días fototérmicos.

En la Tabla 7, las tres variedades presentaron diferencias en los siguientes coeficientes genéticos que definen los parámetros de desarrollo: la duración del período entre la aparición de la emergencia y la aparición de la primera flor (EM-FL); la duración del período entre la aparición de la primera flor y la primera vaina (FL-SH); la duración del período entre la aparición de la primera flor y el inicio de formación de semillas (FL-SD); la duración del período entre el comienzo de la formación de semillas y madurez fisiológica (SD-PM), la duración del período entre la primera flor y final de crecimiento de hojas (FL-LF) y la tasa fotosintética máxima (LFMAX).

Así mismo, en esta Tabla los coeficientes genéticos que representan los parámetros de crecimiento también mostraron diferencias: el área foliar específica (SLAVR), tamaño máximo de la hoja (SIZLF), fracción máxima de la fotosíntesis para semillas y vainas (XFRT), peso máximo de semillas (WTPSD), duración en días de llenado de semilla (SFDUR), número semillas promedio por vaina (SDPDV) y duración en días en que el cultivo alcanza la carga completa de vainas (PODUR).

El modelo CROPGRO-Dry bean mostró alta sensibilidad a la variación en los coeficientes genéticos. Los rendimientos simulados variaron bajo el mismo clima y las condiciones del suelo. Del mismo modo, Dallacort et al. (2006) informaron que un análisis de sensibilidad el modelo CROPGRO mostró una respuesta marcada debido a cambios en los coeficientes genéticos de la cultivares de soja CD 202, CD 204, CD 206 y CD 210 para el municipio de Palotina, en el estado de Paraná-Brasil.

Tabla 7. Coeficientes genéticos utilizados para la calibración de CROPGRO-Dry bean para tres variedades de frijol (Canario 2000, CIFAC 90105 y Laran Mejorado) en la estación experimental del INIA-La Molina. Campaña Agrícola 2015-2016.

Coeficientes Genéticos	Variedades		
	Canario 2000	CIFAC 90105	Laran Mejorado
CDSL	12.17	12.17	12.17
PPSEN	0.02	0.00	0.04
Parámetros de desarrollo			
EM-FL	31.83	33.98	27.54
FL-SH	2.50	3.50	2.50
FL-SD	10.30	11.16	10.00
SD-PM	16.74	20.18	14.80
FL-LF	12.0	20.0	10.0
LFMAX	0.99	1.01	1.00
Parámetro de crecimiento			
SLAVR	263.7	305.3	283.9
SIZLF	140.0	174.8	179.5
XFRT	1.0	1.0	1.0
WTPSD	0.41	0.49	0.84
SFDUR	11.58	12.71	18.67
SDPDV	3.13	3.30	3.31
PODUR	14.0	5.9	10.0

En la Tabla 8, se muestra la combinación de los coeficientes genéticos que predicen la fenología y la morfología de la variedad Canario; con los coeficientes encontrados para esta variedad (Tabla 7) se muestra un buen ajuste para las fases fenológicas de antesis, de madurez fisiológica, maduración de cosecha, altura de planta, aparición de la primera vaina, aparición a la primera semilla, número de granos por

vaina, peso seco de un grano, porcentaje de desgrane e índice de cosecha; sin embargo los parámetros que alcanzaron un %RMSE considerado entre bueno a justo fueron: emergencia, número de hojas por rama, número de granos por metro cuadrado, peso seco a la maduración fisiológica, índice de área foliar máximo y rendimiento.

En los casos donde se encontró un porcentaje del cuadrado medio del error (%RMSE) muy bajo, a partir de los resultados observados y simulados para las dos densidades (13,3 plantas/m² y 8 plantas/m²), significa que el modelo predice muy bien como es el caso de las fechas de aparición de estas fases fenológicas; sin embargo para el periodo de emergencia el %RMSE fue muy alto, por lo que pudo estar influenciado por la toma de datos en el campo, la profundidad correcta de la siembra o simplemente no se llegó en forma oportuna a la aparición de esta fase. Por otro lado, la aparición de estas fases fenológicas está regulada por características genéticas de cada variedad y por la temperatura.

Para realizar la calibración se consideró necesario establecer parámetros de confiabilidad para determinar que los coeficientes obtenidos realmente se ajustaban los datos simulados, para esto se realizó una estadística descriptiva a fin de determinar la diferencia y el porcentaje del RMSE. Sin embargo, es necesario mencionar que los coeficientes genéticos no son fáciles de medir, ya que para ello se requiere de experimentación en cabinas de crecimiento con óptimas condiciones de temperatura, luminosidad y humedad, así como en la dotación de nutrientes. De esa forma, se escogió los códigos genéticos que presentaron menores diferencias entre los datos observados y simulados y el menor porcentaje del RMSE.

En la Tabla 9, se muestra la combinación de los coeficientes genéticos que predicen la fenología y la morfología de la variedad CIFAC; en donde se observa un buen ajuste para las fases fenológicas y morfológicas en estudio y en las dos densidades (13.3 plantas/m² y 8 plantas/m²); encontrándose bajos % RMSE lo cual significa que el modelo predice muy bien estas variables en estudio; sin embargo para la fase

emergencia existe un alto % RMSE, por lo que pudo estar influenciado por la evaluación realizada en esta fase fenológica.

En la Tabla 10, se observa que los parámetros que alcanzaron un menor %RMSE fueron: emergencia, antesis, maduración de cosecha, altura de planta, días a la aparición de la primera vaina, aparición a la primera semilla, número de granos por vaina, peso seco de un grano, peso seco a la maduración fisiológica, porcentaje de desgrane, índice de cosecha y rendimiento. Y los parámetros que alcanzaron un %RMSE considerado entre bueno a justo fueron: emergencia, número de hojas por rama, número de granos por metro cuadrado, índice de área foliar máximo.

En general, al igual que Leite et al. 2002 el proceso de calibración simuló satisfactoriamente la fenología, los rendimientos y sus componentes de las tres variedades, para los dos de distanciamiento entre plantas tratados (los que a partir de ellas configuran la densidad de siembra final) de 0,30 y 0,50 m. En el caso de Leite et al. 2002 probó el distanciamiento de 0,6 m logrando una buena calibración.

Tabla 8. Calibración del modelo CROPGRO-Dry bean para determinar los coeficientes genéticos en la variedad Canario 2000, en alta densidad (13.3 plantas/m²) y baja densidad (8 plantas/m²), en la estación experimental del INIA-La Molina. Campaña Agrícola 2016-2017.

Híbrido	Densidad (plantas/m ²)	Comparación	Emergencia (dds)	Antesis (dds)	Madurez fisiológica (dds)	Maduración de cosecha (dds)	Altura de planta (m)	Número de hojas por rama	Primera vaina (dds)	Primera Semilla (dds)	Número de granos por vaina	Número de granos (N°/m ²)	Peso seso de un grano (gr)	Peso seso maduración fisiológica (kg/ha)	Desgrane %	Índice de área foliar máximo	Índice de cosecha	Rendimiento (kg/ha)
Canario 2000	13.3	observado 1	5	62	102	118	0.7	8	66	80	3	710	0.44	6767.9	79.7	10.6	0.46	3130.3
		simulado 1	9	61	102	109	0.7	9	65	78	3	424	0.50	4038.0	80.2	2.7	0.52	2113.0
		Diferencia	-4.0	1.0	0.0	9.0	0.0	-1.3	1.0	2.0	0.2	285.7	-0.1	2729.9	-0.4	7.8	-0.1	1017.3
		%RMSE	56.6	1.1	0.0	5.4	2.1	11.2	1.1	1.8	3.8	28.5	9.3	28.5	0.4	52.5	9.2	23.0
		observado 2	5	58	94	104	0.6	5	63	76	3	543	0.43	4973.4	72.0	3.8	0.47	2353.8
		simulado 2	10	60	99	106	0.6	9	64	75	3	558	0.43	4552.0	78.5	2.9	0.52	2371.0
		Diferencia	-5.0	-2.0	-5.0	-2.0	0.0	-4.1	-1.0	1.0	0.1	-14.9	0.0	421.4	-6.5	0.9	0.0	-17.2
		%RMSE	70.7	2.4	3.8	1.4	3.5	56.9	1.1	0.9	3.0	1.9	1.3	6.0	6.4	16.8	7.2	0.5
		observado 3	5	57	91	98	0.6	3	62	74	4	677	0.40	6802.2	66.5	2.6	0.40	2723.6
		simulado 3	9	56	91	98	0.7	9	59	71	3	430	0.39	3573.0	78.8	3.3	0.47	1680.0
		Diferencia	-4.0	1.0	0.0	0.0	-0.1	-5.9	3.0	3.0	0.4	246.7	0.0	3229.2	-12.3	-0.7	-0.1	1043.6
		%RMSE	56.6	1.2	0.0	0.0	7.3	123.3	3.4	2.9	7.7	25.8	2.1	33.6	13.1	18.7	12.4	27.1
	8	observado 1	5	62	107	123	1.0	17	68	82	3	225	0.47	2031.2	76.9	3.6	0.52	1056.8
		simulado 1	9	61	104	111	0.6	9	65	78	3	374	0.46	2954.0	79.5	1.3	0.58	1716.0
		Diferencia	-4.0	1.0	3.0	12.0	0.3	7.9	3.0	4.0	0.4	-149.3	0.0	-922.8	-2.7	2.4	-0.1	-659.2
		%RMSE	56.6	1.1	2.0	6.9	25.6	32.4	3.1	3.4	7.1	47.0	1.7	32.1	2.4	46.2	8.3	44.1
		observado 2	5	58	92	100	0.7	6	62	74	3	422	0.42	3797.8	70.8	3.3	0.47	1785.2
		simulado 2	10	60	99	106	0.6	9	64	75	3	525	0.41	4020.0	78.2	2.2	0.54	2170.0
		Diferencia	-5.0	-2.0	-7.0	-6.0	0.2	-3.6	-2.0	-1.0	0.3	-103.4	0.0	-222.2	-7.4	1.0	-0.1	-384.8
		%RMSE	70.7	2.4	5.4	4.2	15.5	46.0	2.3	1.0	5.8	17.3	1.6	4.1	7.4	22.2	10.5	15.2
		observado 3	5	57	90	97	0.6	3	61	74	4	519	0.42	4854.1	67.9	2.3	0.45	2184.0
		simulado 3	9	56	91	98	0.7	9	59	71	3	421	0.38	3270.0	78.2	2.6	0.49	1602.0
		Diferencia	-4.0	1.0	-1.0	-1.0	0.0	-6.5	2.0	3.0	0.4	98.3	0.0	1584.1	-10.3	-0.3	0.0	582.0
		%RMSE	56.6	1.2	0.8	0.7	3.4	162.1	2.3	2.9	8.4	13.4	6.7	23.1	10.8	7.6	6.3	18.8

Tabla 9. Calibración del modelo CROPGRO-Dry bean para determinar los coeficientes genéticos en la variedad CIFAC 90105, en alta densidad (13.3 plantas/m²) y baja densidad (8 plantas/m²), en la estación experimental del INIA-La Molina. Campaña Agrícola 2016-2017.

Híbrido	Densidad (plantas/m ²)	Densidad Comparación	Emergencia (dds)	Antesis (dds)	Madurez fisiológica (dds)	Maduración de cosecha (dds)	Altura de planta	Número de hojas por rama	Primera vaina (dds)	Primera Semilla (dds)	Número de granos por vaina	Número de granos (N ^o /m ²)	Peso seso de un grano (gr)	Peso seso maduración fisiológica (kg/ha)	Desgrane %	Índice de área foliar máximo	Índice de cosecha	Rendimiento (kg/ha)
CIFAC 90105	13.3	observado 1	5	63	109	117	1.7	6	67	80	3	483	0.52	4917.2	72.6	6.2	0.51	2513.9
		simulado 1	7	63	110	110	1.0	13	68	80	3	413	0.50	3612.0	73.8	2.7	0.58	2077.0
		Diferencia	-2.0	0.0	-1.0	7.0	0.7	-7.0	-1.0	0.0	0.0	69.8	0.0	1305.2	-1.2	3.5	-0.1	436.9
		%RMSE	28.3	0.0	0.6	4.2	29.3	80.2	1.1	0.0	1.1	10.2	2.4	18.8	1.2	40.3	8.9	12.3
		observado 2	5	58	97	105	1.2	5	63	79	3	568	0.47	4522.5	74.8	4.9	0.59	2676.6
		simulado 2	8	62	105	114	1.0	13	67	78	3	517	0.55	4809.0	75.5	3.9	0.59	2817.0
		Diferencia	-3.0	-4.0	-8.0	-9.0	0.2	-7.4	-4.0	1.0	0.0	51.1	-0.1	-286.5	-0.7	1.1	0.0	-140.4
		%RMSE	42.4	4.9	5.8	6.1	12.5	99.3	4.5	0.9	0.4	6.4	11.1	4.5	0.7	15.1	0.7	3.7
		observado 3	5	57	93	99	1.0	6	62	75	3	516	0.37	4318.2	73.9	3.4	0.44	1886.4
		simulado 3	8	58	96	105	0.9	13	63	74	3	449	0.37	3592.0	70.9	4.5	0.46	1663.0
		Diferencia	-3.0	-1.0	-3.0	-6.0	0.1	-7.1	-1.0	1.0	0.1	67.0	0.0	726.2	3.0	-1.1	0.0	223.4
		%RMSE	42.4	1.2	2.3	4.3	5.4	90.7	1.1	0.9	2.7	9.2	0.9	11.9	2.9	21.9	4.2	8.4
	observado 1	4	63	113	120	1.2	18	68	83	3	305	0.60	3874.8	72.6	3.7	0.47	1827.5	
	simulado 1	7	63	110	119	1.0	13	68	80	3	356	0.50	2999.0	73.4	1.9	0.59	1777.0	
	Diferencia	-3.0	0.0	3.0	1.0	0.2	4.6	0.0	3.0	-0.3	-51.0	0.1	875.8	-0.8	1.8	-0.1	50.5	
	%RMSE	53.0	0.0	1.9	0.6	13.1	18.4	0.0	2.6	6.3	11.8	11.8	16.0	0.8	34.2	18.0	2.0	
	observado 2	5	60	98	106	1.3	6	64	78	3	533	0.46	5261.1	73.6	7.1	0.46	2436.0	
	simulado 2	8	62	105	114	1.0	13	67	78	3	508	0.52	4463.0	74.8	3.2	0.59	2637.0	
	Diferencia	-3.0	-2.0	-7.0	-8.0	0.3	-6.6	-3.0	0.0	0.1	24.7	-0.1	798.1	-1.2	3.9	-0.1	-201.0	
	%RMSE	42.4	2.4	5.1	5.3	15.2	73.0	3.3	0.0	1.9	3.3	9.6	10.7	1.1	38.4	19.5	5.8	
	observado 3	5	56	91	98	1.2	7	61	74	4	438	0.34	3348.9	73.3	2.9	0.45	1505.8	
	simulado 3	8	58	96	105	0.9	13	63	74	3	451	0.35	3338.0	69.8	3.6	0.47	1572.0	
	Diferencia	-3.0	-2.0	-5.0	-7.0	0.3	-6.3	-2.0	0.0	0.3	-12.8	0.0	10.9	3.5	-0.8	0.0	-66.2	
	%RMSE	42.4	2.5	3.9	5.1	16.9	67.5	2.3	0.0	5.3	2.1	1.1	0.2	3.4	19.3	3.3	3.1	

Tabla 10. Calibración del modelo CROPGRO-Dry bean para determinar los coeficientes genéticos en la variedad Laran mejorado, en alta densidad (13.3 plantas/m²) y baja densidad (8 plantas/m²), en la estación experimental del INIA-La Molina. Campaña Agrícola 2016-2017.

Híbrido	Densidad (plantas/m ²)	Densidad Comparación	Emergencia (dds)	Antesis (dds)	Madurez fisiológica (dds)	Maduración de cosecha (dds)	Altura de planta	Número de hojas por rama	Primera vaina (dds)	Primera Semilla (dds)	Número de granos por vaina	Número de granos (N°/m ²)	Peso seso de un grano (gr)	Peso seso maduración fisiológica (kg/ha)	Desgrane %	Índice de área foliar máximo	Índice de cosecha	Rendimiento (kg/ha)
Laran Mejorado	13.3	observado 1	5	55	96	108	0.6	3	59	72	3	215	0.59	2607.0	74.9	3.2	0.49	1267.0
		simulado 1	9	54	93	100	0.5	8	58	70	3	321	0.43	2592.0	70.5	1.6	0.53	1378.0
		Diferencia	-4.0	1.0	3.0	8.0	0.1	-5.2	1.0	2.0	0.0	-106.0	0.2	15.0	4.4	1.6	0.0	-111.0
		%RMSE	56.6	1.3	2.2	5.2	8.5	122.3	1.2	2.0	0.8	34.8	19.2	0.4	4.2	35.1	6.5	
		observado 2	5	54	89	97	0.7	3	57	68	3	450	0.59	5276.8	76.1	3.3	0.50	2653.6
		simulado 2	10	54	91	98	0.5	8	57	69	3	410	0.54	3860.0	76.2	2.4	0.57	2214.0
		Diferencia	-5.0	0.0	-2.0	-1.0	0.2	-4.9	0.0	-1.0	-0.2	39.8	0.0	1416.8	-0.1	0.9	-0.1	439.6
		%RMSE	70.7	0.0	1.6	0.7	20.8	106.3	0.0	1.0	4.8	6.3	5.9	19.0	0.1	19.9	10.0	11.7
		observado 3	5	49	82	89	0.6	4	53	69	3	538	0.41	5625.0	70.5	2.2	0.39	2188.8
		simulado 3	9	50	82	89	0.5	8	53	64	3	355	0.44	3184.0	73.1	2.9	0.49	1554.0
		Diferencia	-4.0	-1.0	0.0	0.0	0.1	-3.9	0.0	5.0	-0.2	183.0	0.0	2441.0	-2.5	-0.7	-0.1	634.8
		%RMSE	56.6	1.4	0.0	0.0	11.1	67.0	0.0	5.1	4.5	24.1	5.3	30.7	2.5	22.1	18.0	20.5
	observado 1	7	58	99	111	0.7	6	61	74	4	197	0.51	1951.3	76.4	3.7	0.52	1008.0	
	simulado 1	9	54	94	101	0.5	8	58	70	3	252	0.47	2094.0	71.9	1.1	0.56	1178.0	
	Diferencia	-2.0	4.0	5.0	10.0	0.1	-1.8	3.0	4.0	0.3	-55.5	0.0	-142.7	4.6	2.6	0.0	-170.0	
	%RMSE	20.2	4.9	3.6	6.4	15.2	19.7	3.5	3.8	6.4	20.0	6.3	5.2	4.2	50.0	6.3	11.9	
	observado 2	5	54	91	96	0.6	10	57	69	4	431	0.46	3854.0	71.4	3.0	0.52	1991.5	
	simulado 2	10	54	91	98	0.5	8	57	69	3	401	0.51	3536.0	75.0	1.9	0.58	2046.0	
	Diferencia	-5.0	0.0	0.0	-2.0	0.1	1.3	0.0	0.0	0.5	30.4	0.0	318.0	-3.6	1.1	-0.1	-54.5	
	%RMSE	70.7	0.0	0.0	1.5	8.8	9.7	0.0	0.0	9.4	5.0	7.4	5.8	3.5	25.8	8.3	1.9	
	observado 3	5	49	81	88	0.6	3	53	67	3	247	0.43	2410.7	72.3	1.9	0.45	1074.8	
	simulado 3	9	50	83	90	0.5	8	53	64	3	355	0.43	2950.0	72.9	2.2	0.51	1514.0	
	Diferencia	-4.0	-1.0	-2.0	-2.0	0.0	-4.8	0.0	3.0	0.2	-107.7	0.0	-539.3	-0.6	-0.3	-0.1	-439.3	
	%RMSE	56.6	1.4	1.7	1.6	5.0	98.7	0.0	3.2	3.1	30.8	1.3	15.8	0.6	11.9	10.6	28.9	

5.2. Validación del modelo CROPGRO-Dry bean

En la Tabla 11, se puede observar que las fechas de ocurrencia de las fases fenológicas a la emergencia, antesis y maduración fisiológica para las tres variedades de frijol con tres niveles de nitrógeno (N1 = 30 kg/ha, N2 = 60 kg/ha y N3 = 100 kg/ha) analizados presentan, como máximo, diferencias de 2 días entre los datos observados y simulados; con valores de RMSE bajos y el índice de concordancia (d) muy variado y un coeficiente de determinación (r^2) igual a 1, lo que podríamos decir que el modelo tiene una buena predicción entre los observado y simulado. Sin embargo, para la variedad Canario 2000 durante la fase de emergencia existe una diferencia de 3 días para los tres niveles de nitrógeno, el RMSE entre lo observado y simulado es de 50% por lo que la predicción del modelo para esta variedad se considera deficiente. Estos resultados muestran un buen desempeño del modelo CROPGRO - Dry bean para simular la fenología del frijol seco.

Para el caso de la biomasa seca total (sin incluir raíces), es un factor importante para la simulación adecuada de nutrientes y del ciclo del carbono; al igual que con el Índice de Área Foliar (IAF) se compararon los valores simulados y observados en la máxima acumulación de biomasa en madurez fisiológica para las 3 variedades de frijol.

En la Tabla 11, se puede observar que para la biomasa seca y el IAF el modelo subestima para estas variables y en los diferentes niveles de nitrógeno observándose un RMSE entre 28.8% y 43.8%, lo que significa que el modelo no predice satisfactoriamente para estas variables. Una mala medición del peso seco podría explicar por qué la simulación para esta variable resulta deficiente; así mismo se presentó fallas en el manejo de las plantas, de tal forma que no se consideró el follaje completo al momento de hacer las mediciones. Para el Índice de cosecha (IC) se observa para las tres variedades un RMSE entre 15,5% a 26,6% y un r^2 variable entre 0,04 a 0,98; lo que significa que el modelo predice de manera justa a deficiente el IC; así mismo el índice de concordancia (d) oscilo entre 0,15 a 0,25 el cual indica que no existe una buena comparación entre las dos variables (simulada y observada).

Además, a fin de contrastar los resultados del modelo calibrado con datos de los tres variedades de frijol, se realizó un test con datos de rendimiento provenientes de tres tratamientos con diferentes niveles de nitrógeno, hallándose un RMSE entre 8% y 22,6%, considerándose aceptable el modelo para predecir esta variable (Tabla 11).

El modelo CROPGRO-Dry Bean, después de calibrado y validado para las tres variedades de frijol, bajo tres niveles de nitrógeno, funcionó bien en la predicción de la fenología, componentes de rendimiento y rendimiento, lo que indica que se puede utilizar estos coeficientes genéticos para evaluar el impacto de la variabilidad y de cambio climático sobre el rendimiento del frijol.

5.2.1 Validación del Índice de área foliar

En la Figura 5, se observa el gráfico de correlación entre el índice de área foliar observada y simulada para tres variedades de frijol, en donde se realizaron 6 evaluaciones para las variedades el frijol Canario 2000 y Laran Mejorado; y 7 evaluaciones para la variedad CIFAC 90105; estas mediciones se hicieron a lo largo de la campaña de cada uno de los ensayos.

Para la variedad Canario 2000 se observó que para los diferentes niveles de fertilización de N1=30 kg N, N2=60 kg N y N3=100 kg N los coeficientes de determinación (r^2) fueron de 0,80; 0,91 y 0,89; respectivamente. En la cual podemos concluir que el modelo lineal es adecuado para describir la relación que existe entre lo observado y simulado (Figura 5).

Para la variedad CIFAC 90105 se observa que para los diferentes niveles de fertilización de N1=30 kg N, N2=60 kg N y N3=100 kg N los coeficientes de determinación (r^2) fueron bajos entre 0,49; 0,29 y 0,66; y para Laran Mejorado fue 0,73; 0,79 y 0,79, respectivamente. En la cual podemos concluir que el modelo lineal no es adecuado para describir la relación que existe entre lo observado y simulado (Figura 5).

5.2.2 Validación de la biomasa aérea

En la Figura 6, se observa el gráfico de correlación entre la biomasa aérea observada y simulada para tres variedades de frijol, en donde se realizaron 7 evaluaciones para las variedades el frijol Canario 2000 y Laran Mejorado; y 8 evaluaciones para la variedad CIFAC 90105; estas mediciones se hicieron a lo largo de la campaña de cada uno de los ensayos.

En la Figura 6, se observa la correlación entre la biomasa observada y simulada con el modelo CROPGRO-Dry bean para tres variedades de frijol y fertilizadas con tres niveles de nitrógeno (N1: 30 kg N; N2: 60 kg N y N3: 100 kg N) en donde las tres variedades mostraron altos coeficientes de determinación (r^2); así la variedad Canario alcanzó para los tres niveles de nitrógenos un r^2 de 0,94; 0,95 y 0,99, respectivamente. La variedad CIFAC 90105 alcanzó un r^2 0,90; 0,84 y 0,89; y el Laran Mejorado un r^2 0,87; 0,75 y 0,89, por lo cual podemos concluir que el modelo lineal es adecuado para describir la relación que existe entre lo observado y simulado (Figura 6).

Tabla 11. Validación del modelo CROPGRO-Dry bean durante la campaña agrícola 2016-2017 con los coeficientes previamente calibrados para tres variedades de frijol en la EEA-La Molina.

Variable	Variedades	Tratamientos	simulado	observado	PD (%)	RMSE	D index	R ²
Emergencia (dds)	Canario 2000	N1 = 30 kg/ha	9	6	50.0	50.00	0.00	1.00
		N2 = 60 kg/ha	9	6	50.0			
		N3 = 100 kg/ha	9	6	50.0			
	CIFAC 90105	N1 = 30 kg/ha	7	6	16.7			
		N2 = 60 kg/ha	7	7	0.0			
		N3 = 100 kg/ha	7	6	16.7			
	Laran Mejorado	N1 = 30 kg/ha	9	7	28.6			
		N2 = 60 kg/ha	9	7	28.6			
		N3 = 100 kg/ha	9	7	28.6			
Antesis (dds)	Canario 2000	N1 = 30 kg/ha	61	62	-1.6	1.32	0.47	1.00
		N2 = 60 kg/ha	61	61	0.0			
		N3 = 100 kg/ha	61	62	-1.6			
	CIFAC 90105	N1 = 30 kg/ha	63	62	1.6			
		N2 = 60 kg/ha	63	63	0.0			
		N3 = 100 kg/ha	63	63	0.0			
	Laran Mejorado	N1 = 30 kg/ha	54	55	-1.8			
		N2 = 60 kg/ha	54	56	-3.6			
		N3 = 100 kg/ha	54	57	-5.3			
Madurez Fisiológica (dds)	Canario 2000	N1 = 30 kg/ha	103	105	-1.9	2.06	0.36	1.00
		N2 = 60 kg/ha	103	104	-1.0			
		N3 = 100 kg/ha	103	106	-2.8			
	CIFAC 90105	N1 = 30 kg/ha	80	82	-2.4			
		N2 = 60 kg/ha	80	83	-3.6			
		N3 = 100 kg/ha	80	84	-4.8			
	Laran Mejorado	N1 = 30 kg/ha	93	96	-3.1			
		N2 = 60 kg/ha	93	97	-4.1			
		N3 = 100 kg/ha	93	93	0.0			
Peso de Biomasa seca (kg/ha)	Canario 2000	N1 = 30 kg/ha	3964.0	4526.0	-12.4	20.13	0.37	1.00
		N2 = 60 kg/ha	3956.0	4639.9	-14.7			
		N3 = 100 kg/ha	3871.0	5300.5	-27.0			
	CIFAC 90105	N1 = 30 kg/ha	4026.0	5778.6	-30.3			
		N2 = 60 kg/ha	4078.0	5279.6	-22.8			
		N3 = 100 kg/ha	4091.0	6401.1	-36.1			
	Laran Mejorado	N1 = 30 kg/ha	3073.0	3547.1	-13.4			
		N2 = 60 kg/ha	3013.0	3161.2	-4.7			
		N3 = 100 kg/ha	2933.0	4798.0	-38.9			
Índice de área Foliar máximo	Canario 2000	N1 = 30 kg/ha	2.4	4.4	-45.6	43.86	0.34	0.01
		N2 = 60 kg/ha	2.4	3.4	-29.9			
		N3 = 100 kg/ha	2.3	4.5	-47.8			
	CIFAC 90105	N1 = 30 kg/ha	3.5	4.7	-25.8			
		N2 = 60 kg/ha	3.4	4.2	-19.1			
		N3 = 100 kg/ha	3.4	5.2	-35.3			
	Laran Mejorado	N1 = 30 kg/ha	2.1	3.2	-32.5			
		N2 = 60 kg/ha	2.1	2.9	-28.3			
		N3 = 100 kg/ha	2.1	3.8	-44.6			
Índice de Cosecha	Canario 2000	N1 = 30 kg/ha	0.5	0.4	15.6	16.06	0.25	0.04
		N2 = 60 kg/ha	0.5	0.5	9.7			
		N3 = 100 kg/ha	0.5	0.4	21.4			
	CIFAC 90105	N1 = 30 kg/ha	0.5	0.5	14.2			
		N2 = 60 kg/ha	0.6	0.4	27.7			
		N3 = 100 kg/ha	0.6	0.4	35.7			
	Laran Mejorado	N1 = 30 kg/ha	0.5	0.5	14.2			
		N2 = 60 kg/ha	0.6	0.4	27.7			
		N3 = 100 kg/ha	0.6	0.4	35.7			
Rendimiento de granos seco (kg/ha)	Canario 2000	N1 = 30 kg/ha	2037.0	2012.8	1.2	8.09	0.56	0.99
		N2 = 60 kg/ha	2067.0	2216.4	-6.7			
		N3 = 100 kg/ha	2098.0	2366.3	-11.3			
	CIFAC 90105	N1 = 30 kg/ha	2143.0	2690.9	-20.4			
		N2 = 60 kg/ha	2259.0	2289.6	-1.3			
		N3 = 100 kg/ha	2301.0	2651.7	-13.2			
	Laran Mejorado	N1 = 30 kg/ha	1544.0	1552.0	-0.5			
		N2 = 60 kg/ha	1540.0	1380.6	11.5			
		N3 = 100 kg/ha	1511.0	2156.3	-29.9			

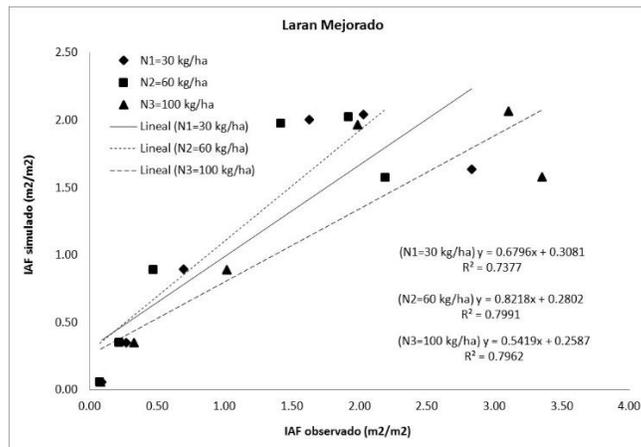
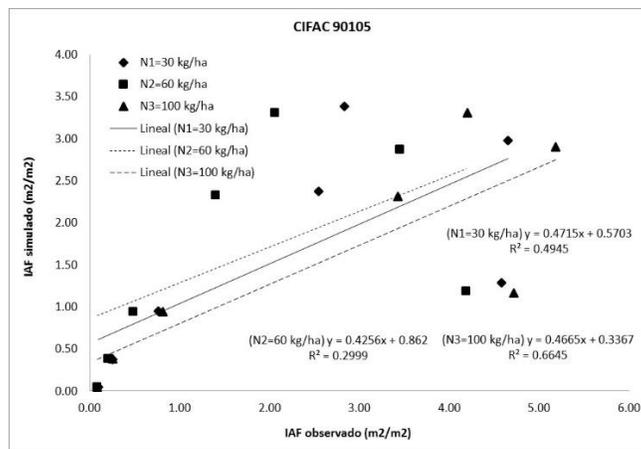
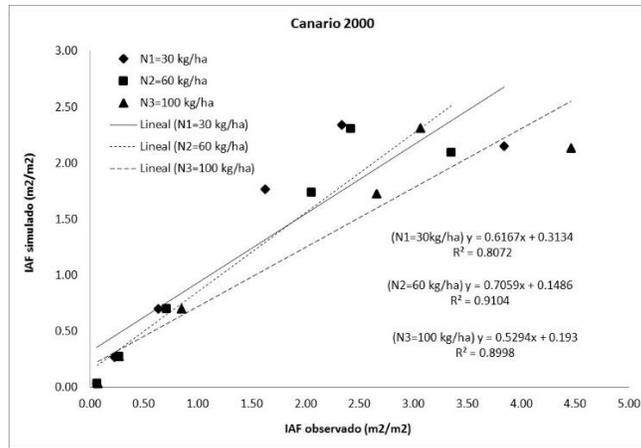


Figura 5. Gráfico de correlación del índice de área foliar observada y simulada con el modelo CROPGRO-Dry bean para tres variedades de frijol (Canario 2000, CIFAC 90105 y Laran Mejorado) bajo tres niveles de fertilización nitrogenada (N1: 30 kg/ha, N2: 60 kg/ha y N3: 100 kg/ha) en la EEA-La Molina.

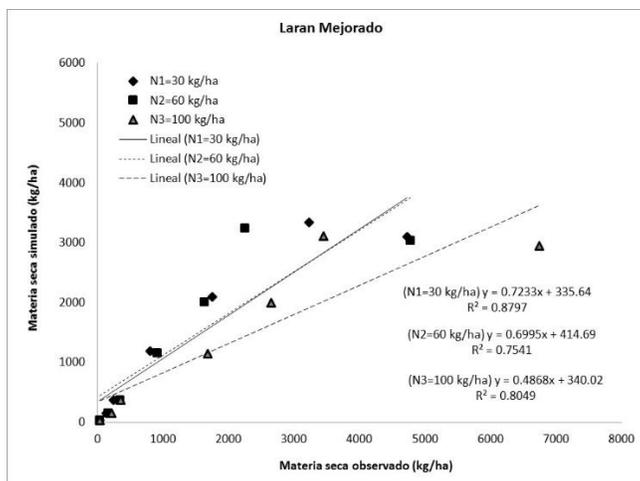
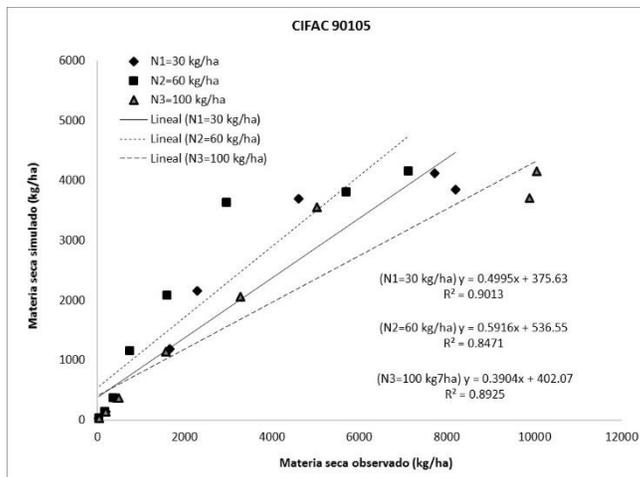
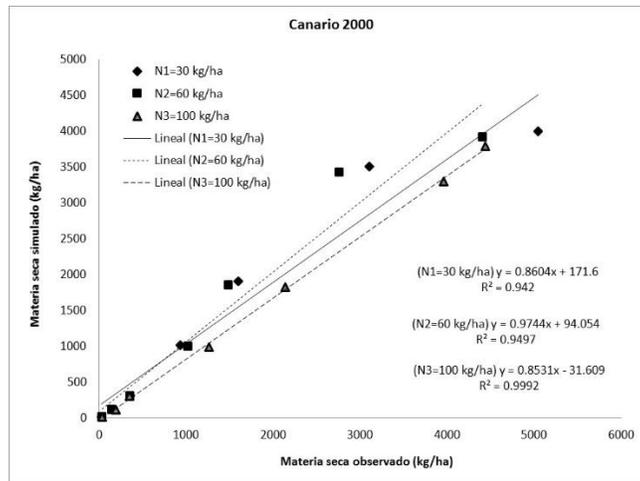


Figura 6. Gráfico de correlación de la biomasa observada y simulada con el modelo CROPGRO-Dry bean para tres variedades de frijol (Canario 2000, CIFAC 90105 y Laran Mejorado) bajo tres niveles de fertilización nitrogenada (N1: 30 kg/ha, N2: 60 kg/ha y N3: 100 kg/ha) en la EEA-La Molina.

5.3 Variabilidad climática en el frijol

En la Figura 7, se presentan los rendimientos simulados para el frijol Canario 2000, en las condiciones de la EEA-La Molina, durante la serie histórica 1930-2016 y las fases extremas del ENSO. Se presentaron los rendimientos del Canario 2000 en diferentes niveles de nitrógeno (N1: 30 Kg N, N2: 60 Kg N, N3: 100 Kg N) para cuatro escenarios climáticos: a) el conjunto de años del registro histórico (1930-2016), b) los eventos El Niño (27 en total de la serie histórica), c) los eventos La Niña (23 en total de la serie histórica y d) eventos de años neutrales (36 en total). Es importante mencionar que no existen diferencias estadísticas en los rendimientos obtenidos bajo el efecto de las 3 dosis nitrogenadas debido a que el suelo contenía suficiente nitrógeno (68,3 kg/ha, según el programa DSSAT) en forma de nitrato y amonio (producto a fertilizaciones pasadas y a la mineralización de la materia orgánica), lo cual esto se justifica mediante a la ley de fertilización de los “rendimientos decrecientes Mistcherlich”, el cual menciona: *a medida que se aumentan las dosis de un elemento fertilizante disminuye el incremento de cosecha que se consigue por cada unidad fertilizante suministrada, hasta llegar un momento en que los rendimientos no solo no aumentan sino que disminuyen* (MARM, 2009). Este mismo fenómeno sucedió en el experimento de validación con las tres variedades, concluyéndose que bajo esas condiciones edáficas bastaría aplicar la primera dosis de fertilización nitrogenada (30 kg/ha) para obtener buenos rendimientos, por lo cual se usará para el análisis el promedio de las 3 dosis de fertilización para las tres variedades.

La figura 7 presenta un diagrama de cajas y bigotes muestra en general una parecida distribución del 50% de los datos de rendimientos en las fases extremas del ENSO, tanto para los años de El Niño, La Niña y Neutrales, lo cual se induce que estos eventos extremos no afectan significativamente los rendimientos del frijol desde el punto de vista fisiológico. Asimismo, si lo evaluamos desde el punto de vista de los rendimientos promedios de la serie histórica y de las fases extremas ENSO, tampoco se aprecia diferencias significativas. Con todo lo visto se induce que las fases

extremas del ENSO no reflejaron una marcada variabilidad climática en la EEA – La Molina. A partir de estos resultados se concluiría que esta variedad de frijol produce la misma variabilidad de rendimientos en los cuatros escenarios de variabilidad climática; sin embargo con solo una campaña de siembras todavía no podríamos definir con exactitud estos impactos, por lo que es necesario realizar más siembra en otros ambientes.

En el caso del frijol CIFAC 90105, en las condiciones de la EEA-La Molina, durante la serie histórica 1930-2016 y las fases extremas del ENSO, también se presenta los rendimientos de tres niveles de nitrógeno (N1: 30 Kg N, N2: 60 Kg N, N3: 100 Kg N) para los mismos escenarios climáticos. Para esta variedad tampoco se logró expresar diferencias significativas de rendimientos con las 3 dosis de nitrógenos aplicados; la variación entre la dosis más alta (100 kg/ha) y más baja (30 kg/ha) fue 80,85 kg/ha, lo cual no es relevante estadísticamente.

La Figura 8, presenta una gráfica de cajas y bigotes, en el cual se aprecia una parecida distribución del 50% de los datos de rendimientos en las fases extremas del ENSO, tanto para los años de El Niño, La Niña y Neutrales, lo cual se induce que estos eventos extremos tampoco afectan significativamente los rendimientos de esta variedad de frijol desde el punto de vista fisiológico. Si se analiza a partir de rendimientos promedios tampoco se aprecia diferencias significativas de las fases extremas del ENSO con respecto a la serie climática (1930 – 2016). Es importante mencionar que las variaciones de los rendimientos del 50 % de datos centrales de esta variedad fue la mayor en las 3 variedades estudiadas, con 893 kg/ha.

Por otro lado, esta misma tendencia de estabilidad de los rendimientos (50% de los datos centrales) se aprecia también en la variedad Laran Mejorado (Figura 9), apreciándose que los rendimientos en las fases extremas del ENSO, tanto para los años de El Niño, La Niña y Neutrales, no varían significativamente lo cual se induce que estos eventos extremos en la EEA-La Molina tampoco afectan significativamente los rendimientos de esta variedad de frijol desde el punto de vista fisiológico.

Finalmente, la expresión de los rendimientos en estas fases extremas del ENSO para las tres variedades va depender de muchos factores. El impacto del ENSO puede variar en diferentes regiones de producción (Magrín et al. 1998). Las diferencias radican principalmente en que: (a) la señal climática del fenómeno no es homogénea a lo largo de las principales regiones del país, (b) existen diferencias importantes en las condiciones agroecológicas entre las regiones de producción y, (c) existen diferencias importantes en los planteos de producción (ej. siembra, momento de ocurrencia de periodos críticos, etc.) entre regiones de producción.

Figura 7. Diagrama de cajas y bigotes de los rendimientos simulados para el frijol variedad Canario 2000, en la EEA-La Molina, para la serie histórica 1930-2016 y las fases extremas del ENSO (27 años Niño y 23 años Niña). La línea negra dentro de la caja representa la mediana.

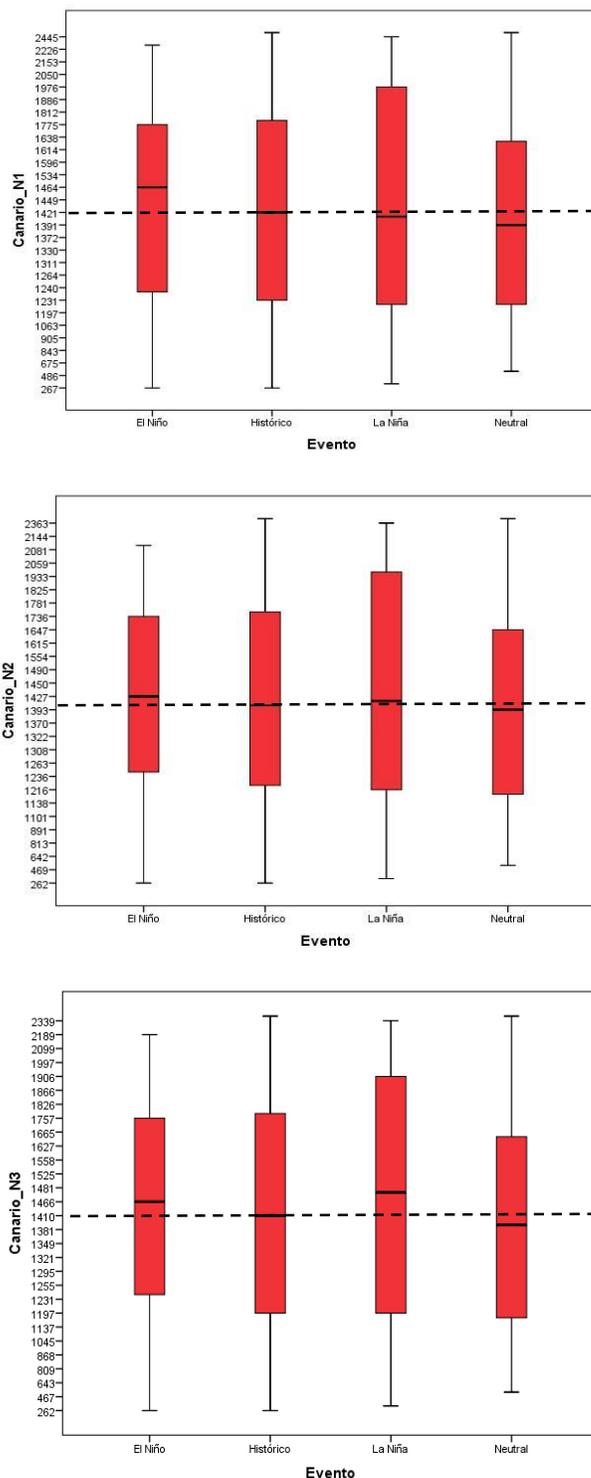


Figura 8. Diagrama de cajas y bigotes de los rendimientos simulados para el frijol variedad CIFAC 90105, en la EEA-La Molina, para la serie histórica 1930-2016 y las fases extremas del ENSO (27 años Niño y 23 años Niña). La línea negra dentro de la caja representa la mediana.

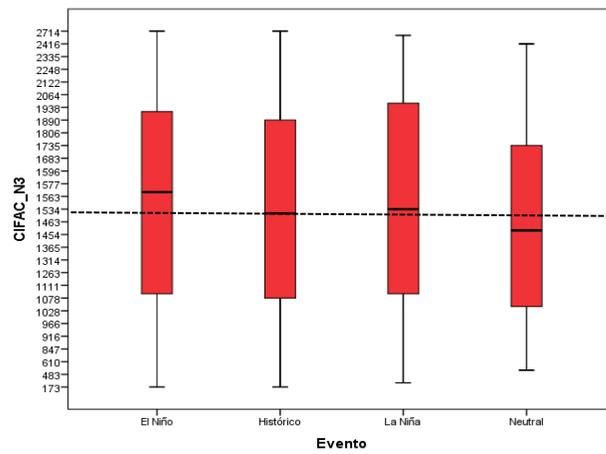
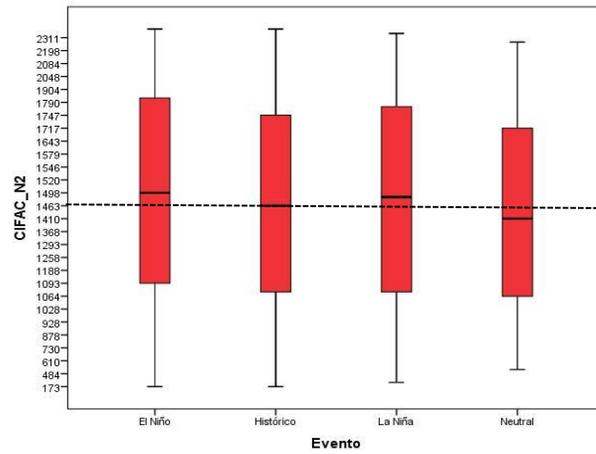
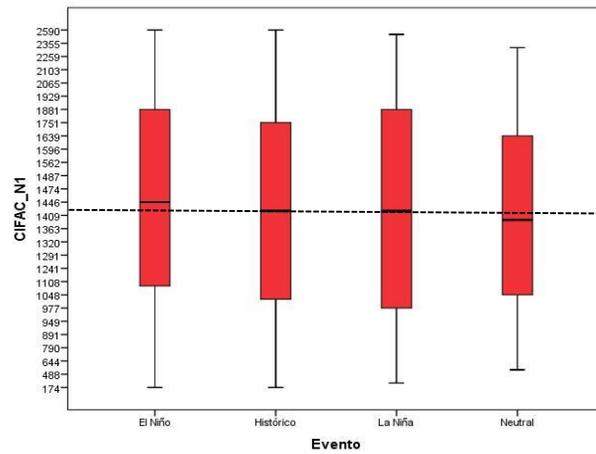
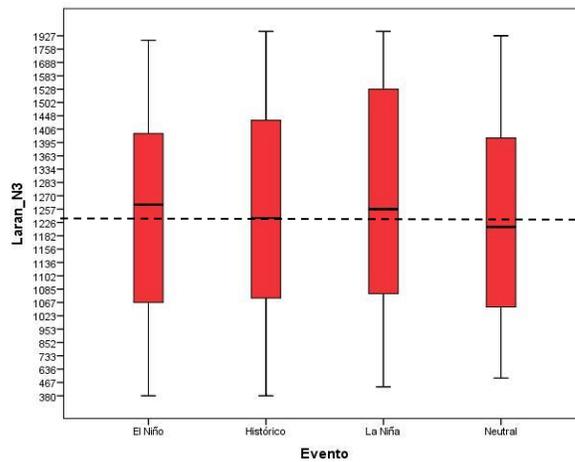
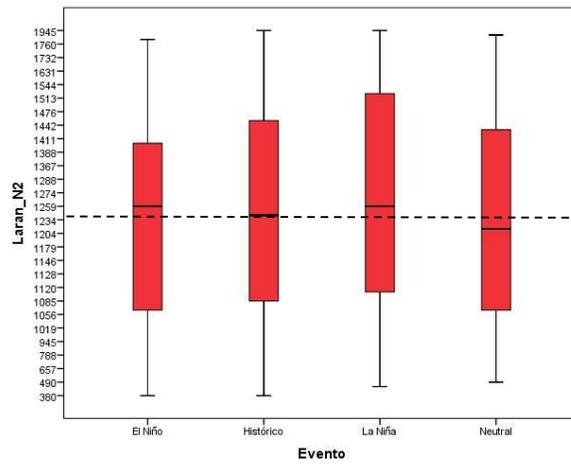
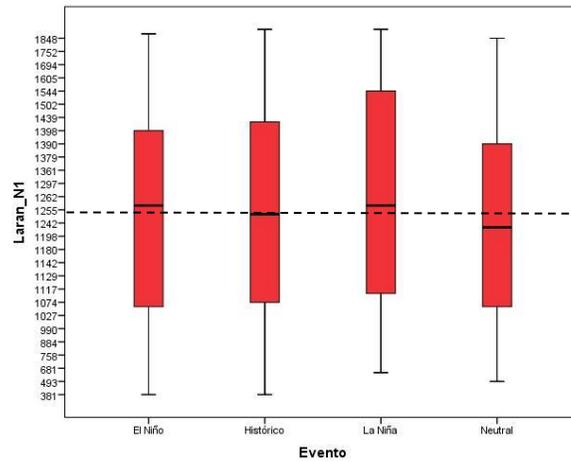


Figura 9. Diagrama de cajas y bigotes de los rendimientos simulados para el frijol variedad Laran Mejorado, en la EEA-La Molina, para la serie histórica 1930-2016 y las fases extremas del ENSO (27 años Niño y 23 años Niña). La línea negra dentro de la caja representa la mediana.



5.4 Cambio climático en el frijol

Con respecto a las proyecciones del rendimiento a futuro, en la Tabla 12 se muestran los resultados para los tres modelos CanESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR y los dos escenarios de emisiones RCP 4,5 y RCP 8,5 para la variedad Canario 2000 en la EEA-La Molina, manifestaría una disminución significativa de los rendimientos (maneándose con las tres dosis nitrogenadas) con el clima proyectado por el Modelo CanESM2 principalmente en el escenario pesimista (RCP 8,5) para los periodos intermedio (2040-2070) y lejano (2070-2099); así mismo para las condiciones meteorológicas resultantes del modelo CNRM-CM5 afectaría a una disminución significativa para los periodos cercanos (2010 – 2040), intermedio (2040-2070) y lejano (2070-2099), en los escenarios pesimista y conservador (RCP 4,5). Finalmente, el modelo MPI-ESM-MR proyecta que no habrá diferencias estadísticas en los rendimientos para los periodos cercano, intermedio y lejano, ya sea en el escenario conservador como el pesimista. Esta estabilidad en los rendimientos ante los escenarios del cambio climático apunta a que esta variedad deba seguirse utilizando en el futuro.

En el caso de la variedad CIFAC 90105 que se aprecia en la Tabla 13, que el modelo CanESM2 proyecta rendimientos similares estadísticamente a la actualidad en el escenario conservador (RPM 4,5) en los 3 periodos de estudio; por otro lado el clima proyectado por el modelo CNRM-CM5 favorecería a un aumento significativo de los rendimientos en el periodo cercano y en los dos tipos de escenarios; sin embargo, para un periodo intermedio los rendimientos aumentan pero de manera no significativa estadísticamente en los dos escenarios; para el periodo lejanos de los dos escenarios proyecta rendimientos superiores de manera significativa. Por último, el modelo MPI-ESM-MR estima condiciones meteorológicas para el desarrollo de rendimientos similares a la actualidad en los 3 periodos y 2 escenarios. Por consiguiente, se recomienda considerar a esta variedad para las futuras producciones hasta el 2 100.

Por último, la variedad Larán Mejorado (Tabla 14), el modelo CanESM2 proyecta rendimientos similares estadísticamente a la actualidad en el periodo cercano y en el escenario conservador (RPM 4,5); para el escenario pesimista del periodo intermedio y lejano sí se presentaría disminuciones significativas en su rendimiento. En el caso de los dos restantes modelos CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR, no determina condiciones meteorológicas desfavorables para el cultivo de frijol, lo cual se mantendría los rendimientos actuales en los tres periodos y dos escenarios.

Hasta el momento se ha visto que algunos modelos climáticos proyectan condiciones favorables para mantener rendimientos aceptables durante las próximas 3 décadas, similar situación lo concluyó Magaña (2010) con el modelo climático EPIC, obviamente si se mantiene las labores de cultivo convencionales.

Tabla 12. Proyecciones futuras de los rendimientos del frijol variedad Canario 2000 en la EEA-La Molina, para tres periodos futuros (2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099) con el uso de tres modelos de circulación global y en dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero medio (RCP 4.5) y alto (RCP 8.5).

Variedad	GCM	Escenarios	Periodo	Variación Rendimiento						
				30 kg N/ha	Sig.	60 kg N/ha	Sig.	100 kg N/ha	Sig.	
Canario 2000	CanESM2	RCP 4.5	2010 - 2040	10	n.s	32	n.s	10	n.s	
		RCP 8.5		-26	n.s	-1	n.s	-18	n.s	
		DS		271		264		269		
		RCP 4.5	2040 - 2070	-282	*	-261	n.s	-294	*	
		RCP 8.5		-352	*	-338	*	-372	*	
		DS		271		264		269		
		RCP 4.5	2070 - 2099	-248	n.s	-225	n.s	-257	n.s	
		RCP 8.5		-555	**	-540	**	-574	**	
		DS		271		264		269		
		CNRM-CM5	RCP 4.5	2010 - 2040	319	*	332	*	318	*
			RCP 8.5		118	n.s	137	n.s	120	n.s
			DS		271		264		269	
	RCP 4.5		2040 - 2070	-14	n.s	0	n.s	-31	n.s	
	RCP 8.5			-39	n.s	-23	n.s	-67	n.s	
	DS			271		264		269		
	RCP 4.5		2070 - 2099	148	n.s	160	n.s	130	n.s	
	RCP 8.5			104	n.s	143	n.s	128	n.s	
	DS			271		264		269		
	MPI-ESM-MR		RCP 4.5	2010 - 2040	-51	n.s	-22	n.s	-49	n.s
			RCP 8.5		-40	n.s	-7	n.s	-30	n.s
			DS		271		264		269	
		RCP 4.5	2040 - 2070	-211	n.s	-192	n.s	-232	n.s	
		RCP 8.5		-252	n.s	-234	n.s	-273	*	
		DS		271		264		269		
RCP 4.5		2070 - 2099	-213	n.s	-194	n.s	-227	n.s		
RCP 8.5			-244	n.s	-228	n.s	-266	n.s		
DS			271		264		269			

DS : Desviación estándar

Sig: Significancia (n.s: no significativo; *: significativo; **: altamente significativo)

Tabla 13. Proyecciones futuras de los rendimientos del frijol variedad CIFAC 90105 en la EEA-La Molina, para tres periodos futuros (2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099) con el uso de tres modelos de circulación global y en dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero medio (RCP 4.5) y alto (RCP 8.5).

Variedad	GCM	Escenarios	Periodo	Variación Rendimiento						
				30 kg N/ha	Sig.	60 kg N/ha	Sig.	100 kg N/ha	Sig.	
CIFAC 90105	CanESM2	RCP 4.5	2010 - 2040	114	n.s	162	n.s	129	n.s	
		RCP 8.5		75	n.s	119	n.s	75	n.s	
		DS		277		258		288		
		RCP 4.5	2040 - 2070	-256	n.s	-239	n.s	-303	*	
		RCP 8.5		-368	*	-359	*	-429	*	
		DS		277		258		288		
		RCP 4.5	2070 - 2099	-248	n.s	-226	n.s	-288	*	
		RCP 8.5		-574	**	-573	**	-649	**	
		DS		277		258		288		
		CNRM-CM5	RCP 4.5	2010 - 2040	537	*	545	**	521	*
			RCP 8.5		293	*	337	*	303	*
			DS		277		258		288	
	RCP 4.5		2040 - 2070	154	n.s	162	n.s	108	n.s	
	RCP 8.5			84	n.s	92	n.s	25	n.s	
	DS			277		258		288		
	RCP 4.5		2070 - 2099	353	*	345	*	284	n.s	
	RCP 8.5			366	*	361	*	329	*	
	DS			277		258		288		
	MPI-ESM-MR		RCP 4.5	2010 - 2040	52	n.s	102	n.s	61	n.s
			RCP 8.5		73	n.s	124	n.s	75	n.s
			DS		277		258		288	
		RCP 4.5	2040 - 2070	-148	n.s	-134	n.s	-203	n.s	
		RCP 8.5		-220	n.s	-204	n.s	-274	n.s	
		DS		277		258		288		
RCP 4.5		2070 - 2099	-197	n.s	-164	n.s	-231	n.s		
RCP 8.5			-231	n.s	-219	n.s	-295	*		
DS			277		258		288			

DS : Desviación estándar

Sig: Significancia (n.s: no significativo; *: significativo; **: altamente significativo)

Tabla 14. Proyecciones futuras de los rendimientos del frijol variedad Laran Mejorado en la EEA-La Molina, para tres periodos futuros (2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099) con el uso de tres modelos de circulación global y en dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero medio (RCP 4.5) y alto (RCP 8.5).

Variedad	GCM	Escenarios	Periodo	Variación Rendimiento						
				30 kg N/ha	Sig.	60 kg N/ha	Sig.	100 kg N/ha	Sig.	
Laran Mejorado	CanESM2	RCP 4.5	2010 - 2040	70	n.s	69	n.s	66	n.s	
		RCP 8.5		59	n.s	55	n.s	51	n.s	
		DS		173		176		184		
		RCP 4.5	2040 - 2070	-154	n.s	-168	n.s	-175	n.s	
		RCP 8.5		-238	*	-258	*	-258	*	
		DS		173		176		184		
		RCP 4.5	2070 - 2099	-134	n.s	-142	n.s	-147	n.s	
		RCP 8.5		-443	**	-471	**	-470	**	
		DS		173		176		184		
		CNRM-CM5	RCP 4.5	2010 - 2040	277	*	276	*	277	*
			RCP 8.5		167	n.s	168	n.s	161	n.s
			DS		173		176		184	
	RCP 4.5		2040 - 2070	79	n.s	66	n.s	62	n.s	
	RCP 8.5			36	n.s	20	n.s	18	n.s	
	DS			173		176		184		
	RCP 4.5		2070 - 2099	213	*	214	*	205	*	
	RCP 8.5			160	n.s	153	n.s	146	n.s	
	DS			173		176		184		
	MPI-ESM-MR		RCP 4.5	2010 - 2040	27	n.s	23	n.s	18	n.s
			RCP 8.5		27	n.s	32	n.s	24	n.s
			DS		173		176		184	
		RCP 4.5	2040 - 2070	-96	n.s	-111	n.s	-120	n.s	
		RCP 8.5		-137	n.s	-150	n.s	-156	n.s	
		DS		173		176		184		
RCP 4.5		2070 - 2099	-92	n.s	-81	n.s	-98	n.s		
RCP 8.5			-199	*	-208	*	-215	*		
DS			173		176		184			

DS : Desviación estándar

Sig: Significancia (n.s: no significativo; *: significativo; **: altamente significativo)

VI. Conclusiones

- Los coeficientes genéticos determinados por el proceso de calibración del modelo CROPGRO-Dry Bean para la variedad Canario 2000 fueron **CDSL= 12,17; PPSEN=0,020; EM-FL=31,83; FL-SH=2,5; FL-SD=10,3; SD-PM=16,74; FL-LF=12; LFMAX=0,99; SLAVR=263,7; SIZLF=140; XFRT=1; WTPSD=0,408; SFDUR=11,58; SDPDV=3,134; PODUR=13,99; THRSH=80; SDPRO=0,235; SDLIP=0,030**; para la variedad CIFAC 90105 fueron **CDSL= 12,17; PPSEN=0,000; EM-FL=33,98; FL-SH=3,5; FL-SD=11,16; SD-PM=20,18; FL-LF=20; LFMAX=1,01; SLAVR=305,3; SIZLF=174,8; XFRT=1; WTPSD=0,490; SFDUR=12,71; SDPDV=3,3; PODUR=5,911; THRSH=75; SDPRO=0,235; SDLIP=0,030**; finalmente, para la variedad Larán Mejorado fueron **CDSL= 12,17; PPSEN=0,040; EM-FL=27,54; FL-SH=2,5; FL-SD=9,996; SD-PM=14,80; FL-LF=10; LFMAX=1; SLAVR=283,9; SIZLF=179,5; XFRT=1; WTPSD=0,839; SFDUR=18,67; SDPDV=3,31; PODUR=9,994; THRSH=85; SDPRO=0,235; SDLIP=0,030**.
- El proceso de validación mediante el uso del indicador estadístico RMSE determinaron que la predicción del modelo tiene un buen ajuste para las variables: antesis, de madurez fisiológica, maduración de cosecha, altura de planta, aparición de la primera vaina, aparición a la primera semilla, número de granos por vaina, peso seco de un grano, porcentaje de desgrane e índice de cosecha, para las 3 variedades. Entre bueno y justo resultaron las variables de emergencia, número de hojas por rama, número de granos por metro cuadrado, peso seco a la maduración fisiológica, índice de área foliar máximo y rendimiento.
- Los rendimientos estimados del modelo CROPGRO-Dry Bean usando la serie histórica (1930-2016) y los años de ocurrencia de las fases del fenómeno ENSO demuestran que no existe diferencias significativas en los rendimientos promedios

ni en la variabilidad de los posibles rendimientos durante las fases extremas del fenómeno ENSO.

- Los rendimientos que se obtuvieron durante las fases extremas del fenómeno ENSO, en la EEA-La Molina, dependió de las características climáticas presentadas en las respectivas fases; en el caso de esta estación se presentó una semejante variabilidad climática en dichas fases extremas, por lo cual influyo también en la obtención de rendimientos variados.
- Con el CROPGRO-Dry bean, calibrado y validado, se realizó el análisis del impacto del clima futuro, generado por los tres modelos CanESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR y los dos escenarios de emisiones RCP 4,5 y RCP 8,5, que proyectaron una disminución de los rendimientos con los modelos CanESM2 y MPI-ESM-MR, siendo más significativos para el periodo lejano; sin embargo con el modelo CNRM-CM5 se proyectaron aumentos en los rendimientos para la tres variedades sin significancia estadística. La estrategia de manejar épocas de siembra podría ser beneficiosa para aumentar los rendimientos; así mismo, aquellas variedades que presentaron estabilidad en los rendimientos ante los diferentes escenarios del cambio climático apuntan a seguir siendo utilizadas por nuestros agricultores, pero considerando el mismo manejo convencional del cultivo.
- El modelo CROPGRO-Dry bean ajustado para las condiciones locales, es una herramienta útil para simular el comportamiento de cultivos de frijol en condiciones reales. El modelo puede ser utilizado como herramienta de planificación, permitiendo cuantificar el impacto y formular distintas estrategias de manejo ante diversos escenarios climáticos.

VII. Recomendaciones

- Se recomienda replicar estos trabajos de investigación, usando las mismas variedades, en otras regiones del país con mayor variabilidad climática lo que va

a permitir reajustar los actuales coeficientes genéticos a fin de obtener pronósticos confiables. Las variedades más promisorias para nuestro país son el Canario 2000, CIFAC 90105 y Larán Mejorado.

- En vista de que estos proyectos de calibración y validación requieren calidad de datos obtenidos en campo, se requerirá mayor inversión en la compra de equipos que mejoren la eficacia y la eficiencia en las labores requeridas para estos trabajos, como por ejemplo: la obtención de una estufa de 2000 litros que servirá para obtener mejores resultados en el peso seco de biomasa; la obtención de un equipo que mida el área foliar y/o índice de área foliar, de esa forma se reduciría el tiempo en la obtención de este dato; por último, contar con mano de obra para el manejo óptimo del cultivo y la obtención de los datos en general.
- Así mismo, se recomienda que estos resultados sean presentados a las Direcciones Zonales para que vean la importancia de los resultados de este proyecto de investigación y con la finalidad de que sean incorporados dentro de su plan operativo institucional y que sirva como sustento para generar proyectos que pueden bien ser financiados por fuentes cooperantes como el CONCYTEC; y así poder comprometer a más instituciones (públicas y/o privadas) interesados en la evaluación de la vulnerabilidad, adaptación y mitigación de los impactos del cambio climático en cultivos de seguridad alimentaria.

VIII. Referencia bibliográfica

Allan, R.J. 2000. ENSO and climatic variability in the last 150 years. EN: Diaz HF, V Markgraf (Eds), El Niño and the Southern Oscillation: Multiscale variability and its impacts on natural ecosystems and society. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 55 p.

Boote, K.; Jones, J.; Hoogenboom, G. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model. En: Peart, R. M., Curry, R.B. (eds.). Agricultural systems modelling and simulation. Marcel Dekker, New York. p. 651-692.

Camarena, F.; Chiappe, L; Huaranga, A. y Mostacero, E. 2002. 128 Ficha Técnica de Frijol Común. Programa de Investigación en Leguminosas. UNALM. Lima- Perú. 12 p.

Confalone, A; Boote, K.; Lizaso Sau, F. 2011. Temperature and Photoperiod Effects on Vicia faba Phenology Simulated by CROPGRO-Fababean. Agronomy Journal. 103: 1036-1050.

Dilley, M. 1997. Climatic factor affecting annual maize yields in the Valley of Oaxaca, Mexico. International Journal of Climatology 17: 1549-1557.

Esquivel, G.A, Rivera, M. G, Velásquez, M, Muñoz, A, Macías, H, Sánchez, I. 2014 Modelación del rendimiento de frijol bajo escenarios regionales de cambio climático en la región sureste del estado de Durango. Centro nacional de Investigaciones Disciplinaria Agua-Suelos-Planta-Atmosfera. México. p: 97 - 105

GESTION. 2015. <https://gestion.pe/economia/legumbres-produce-peru-regiones-146863>

Gigena, R. 2004. Estudio del cambio climático y su efecto en la producción de granos básicos. Tesis de ingeniero Agrónomo. Universidad de Zamorano. Honduras. 60 p.

Guevara, E. 2007. La simulación del desarrollo, crecimiento y rendimiento en maíz. [Consultado: 18/10/17]. Disponible en:<<http://www.fertilizando.com/articulos/simulaciondesarrollocrecimiento-y-rendimientoenmaiz.asp>>.

Hammer G.L. Hansen JW, Philips J, Mjelde JW, Hill HSJ, Love A, Potgieter A. 2001. Advances in application of climate prediction in agriculture. Agricultural Systems 70: 515-533.

Hansen, J.W. 2002. Realizing the potential benefits of the climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. Agricultural Systems 74: 3009-330.

Hardaker, J.B., Huirne R.B.M, Anderson , J.R. 1997. Coping with risks in agriculture. CAB International, Wallingford, UK.

Hoogenboom, G.; Jones, J.; Wilkens, P.; Porter, C.; Boote, K.; Hunt, L.; Singh, U.; Lizaso, J.; White, J.; Uryasev, O.; Royce, F.; Ogoshi, R.; Gijsman, A.; Tsuji, G.; Koo, J. 2012. DSSAT. Decision Support System for Agrotechnology Transfer, version 4.5 [CD-ROM]. University of Hawaii. Honolulu.

IBSNAT. 1989. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT v2.1). Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Report of Working Group II. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza.

Labohm, H., Rozendaal, S., Thoenes, D. 2004. Man-made Global Warming: Unraveling a Dogma. Multi-Science, Essex, United Kingdom.

Leite, E; Pereira, A; Sentelhas, P; Stone, L; Pfeilsticker F. 2002. Calibration and Test of the CROPGRO-Dry Bean Model for edaphoclimatic conditions in the Savanas of Central Brazil. *Scientia Agricola* 59 (4): 723-729

Madden RA, Julian PR. 1972. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. *Jornal of the Atmospheric Sciences* 29: 1109-1123.

Meinke, H, Stone, R.C. 2005. Seasonal and interannual climate forecasting: the new toll for increasing preparedness to climate variability and change in agricultural planning and operations. *Climate Change* 70: 221-253.

Mantua, N, Hare, S. R., 2002. The Pacific Decadal Oscillation. *J. Oceanography* N° 58, pp. 35-44.

Oram, P.A. 1989. Sensivity of agricultural production to climate change, an update. EN: *Climate and Food Security*. IRRI Manila, The Philippines, pp: 25-44.

Ramírez, T. L.A. 1988. Ensayo de variedades elite de maíz con alta calidad de proteína en el valle de Cajamarca. Tesis para optar el Título de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Universidad Nacional de Cajamarca. 98 p.

Ropelewski, C.F., Halpert, M.S. 1987. Global and regional scale patterns associated with the El Niño Southern Oscillation. *Monthly Weather Review* 115: 1606-1626.

SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, PE). 2003. Atlas de energía solar del Perú. Lima, PE. 31 p.

SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). 2015. Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos en Perú. Lima.

SEPA. 2017, serie de estadísticas de producción agrícola del Ministerio de Agricultura. MINAGRI. Lima, Peru. Disponible en: http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult

Ruiz, M. E. Aliados de la agricultura. Periódico Granma Internacional. Año 11, no. 279, 14 de abril de 2005.

Sánchez, A. et al. 2000. Respuesta de plantas de maíz y frijol al enriquecimiento de dióxido de carbono. *Agrociencia* 34: 311-320.

Timmermann, A, Oberhuber, J, Bacher, A, Esch, M, Latif, M, Roekner, E. 1999. Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature* 398, 694-697.

Trenberth KE. 1997. Short-term climate variations: recent accomplishments and issues for future progress. *Bolletín of the American Meteorological Society* 78: 1081-1096.

Trenberth KE, Stepaniak DP. 2001. Indices of El Niño evolution. *Journal of Climate* 14: 1697-1701.

Viglizzo, E.F, Roberto, Z.E. 1989. Diversification, productivity and stability of agroecosystems in the semi-arid pampas of Argentina. *Agricultural Systems* 31: 279-290.

Villalobos. 2001. Impacto del fenómeno "El Niño" sobre la producción de arroz y frijol en dos regiones agrícolas de Costa Rica. *Gestión de Desarrollo*, Instituto Meteorológico Nacional San José, Costa Rica.

White, J. W. 1985. Conceptos básicos de fisiología del frijol. En: frijol, investigación y producción. Editado por Marcoliano López, Fernando Fernández y Aart van Schoonhoven. CIAT. 43-60.