



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente



# Impacto de la variabilidad y cambio climático en el cultivo de maíz amarillo duro en condiciones de costa central





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**

**INIA**

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

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

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

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

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

Dr. Edgardo Guevara  
Especialista en modelamiento de  
cultivos  
INTA - Argentina

**2017**

## INDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	OBJETIVOS.....	3
2.1.	Objetivo General.....	3
2.2.	Objetivos Específicos.....	3
III.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1.	Variabilidad Climática .....	4
3.1.1.	Variabilidad estacional e interanual .....	5
3.2.	Impacto de la variabilidad climática en maíz.....	6
3.3.	Cambio Climático .....	7
3.3.1.	Causas del cambio climático .....	8
3.3.2.	Escenarios climáticos futuros.....	11
3.3.3.	Escenarios de concentraciones.....	12
3.3.4.	Proyección climática futura y cascada de incertidumbres .....	14
3.4.	Modelos Climáticos.....	15
3.4.1.	Modelos Climáticos Globales.....	17
3.4.2.	Variabilidad del Clima y MCG.....	18
3.4.3.	Submodelos climáticos regionales acoplados a modelos de vegetación .....	19
3.5.	Impacto del cambio climático en el maíz.....	21
3.6.	Descripción de modelos.....	25
3.7.	Modelos de simulación de cultivo .....	26
3.7.1.	Análisis de sistemas y modelos de simulación.....	27
3.7.2.	El modelo de simulación del crecimiento del maíz: CERES-Maize.....	31
3.7.3.	Calibración y validación del modelo CERES-Maize .....	33
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	35
4.1.	Ubicación del campo experimental .....	35
4.2.	Descripción de los híbridos de maíz amarillo duro.....	37
4.2.1.	Híbrido de maíz amarillo duro Dekalb 7088 .....	37
4.2.2.	Híbrido de maíz amarillo duro Dow 2B688.....	37
4.2.3.	Híbrido de maíz amarillo duro INIA 619.....	38
4.2.4.	Híbrido de maíz amarillo duro ADV 9559.....	40
4.2.5.	Híbrido de maíz amarillo duro INIA 611.....	41

4.3.	Información Edáfica .....	42
4.3.1.	Ensayo Experimental en la EEA-La Molina .....	42
4.3.2.	Ensayo Experimental en la EEA-Donoso .....	45
4.4.	Diseño experimental EEA – La Molina y EEA-Donoso .....	47
4.5.	Distribución de las parcelas experimentales .....	48
4.5.1.	Distribución de las parcelas del ensayo Experimental en la EEA-La Molina .....	48
4.5.2.	Distribución de las parcelas del ensayo Experimental en la EEA-.....	51
4.6.	Conducción del ensayo experimental .....	53
4.6.1.	Conducción de las parcelas Experimentales de la EEA-La Molina .....	53
4.6.2.	Conducción de las parcelas Experimentales de la EEA-Donoso.....	56
4.7.	Calibración del modelo CERES Maize.....	59
4.7.1.	Proceso de calibración .....	60
4.8.	Validación del modelo CERES Maize.....	61
4.9.	Variabilidad climática en el cultivo de maíz amarillo duro .....	62
4.10.	Generación de escenarios de cambio climático .....	63
4.11.	Generación de rendimientos futuros en el cultivo de maíz amarillo duro .....	64
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	66
5.1.	Calibración del modelo CERES Maize.....	66
5.2.	Validación del modelo CERES Maize.....	69
5.2.1.	Días a la emergencia .....	72
5.2.2.	Días a la antesis.....	73
5.2.3.	Maduración fisiológica.....	74
5.2.4.	Número final de hojas.....	76
5.2.5.	Índice de área foliar máximo .....	77
5.2.6.	Peso seco de la parte aérea a la maduración fisiológica .....	79
5.2.7.	Número de granos por planta.....	80
5.2.8.	Peso seco de grano .....	81
5.2.9.	Rendimiento.....	82
5.2.10.	Índice de área foliar .....	83
5.2.11.	Materia seca de la parte aérea de la planta .....	87
5.3.	Variabilidad climática en el maíz amarillo duro.....	90
5.4.	Cambio climático en el maíz amarillo duro.....	97
VI.	CONCLUSIONES.....	104
VII.	RECOMENDACIONES.....	106
VIII.	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	107

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coeficientes genéticos de CERES-Maize que deben ser calibrados experimentalmente .....	32
Tabla 2: Principales características del híbrido Dekalb 7088 .....	38
Tabla 3: Principales características del híbrido Dow 2B688.....	39
Tabla 4: Principales características del híbrido INIA 619 .....	40
Tabla 5: Principales características del híbrido INIA 611 .....	41
Tabla 6: Análisis del perfil de suelo de la parcela experimental en EEAA – La Molina.....	44
Tabla 7: Análisis del perfil de suelo de la parcela experimental en EEA-Donoso .....	45
Tabla 8: Fertilizaciones realizadas en las parcelas experimentales de la EEA – La Molina.....	54
Tabla 9: Riegos realizados en las parcelas experimentales de la EEA – La Molina.....	55
Tabla 10: Fertilizaciones realizadas en las parcelas experimentales de la EEA – Donoso .....	57
Tabla 11: Riegos realizados en las parcelas experimentales de la EEA – Donoso .....	58
Tabla 12: Calibración del modelo CERES-Maize para determinar los coeficientes genéticos en tres híbridos de maíz amarillo duro en la estación experimental del INIA-La Molina. Campaña Agrícola 2015-2016. ....	70
Tabla 13: Calibración del modelo CERES-Maize para determinar los coeficientes genéticos en tres híbridos de maíz amarillo duro en la estación experimental del INIA-Donoso Huaral. 2016-2017 .....	71
Tabla 14: Valores medios de los días a la emergencia observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro .....	72
Tabla 15: Valores medios de los días a la floración masculina observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro.....	74
Tabla 16: Valores medios de maduración fisiológica observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro. ....	76
Tabla 17: Valores medios de número final de hojas observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro. ....	77
Tabla 18: Valores medios del índice de área foliar máximo observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro.....	78
Tabla 19: Valores medios de los pesos secos de la parte aérea a la maduración fisiológica observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro.....	80
Tabla 20: Valores medios de los números de granos por planta observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro.....	81
Tabla 21: Valores medios de los pesos secos de granos observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro. ....	82
Tabla 22: Valores medios de los rendimientos observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro. ....	83
Tabla 23. Proyecciones futuras de los rendimientos de maíz amarillo duro Dekalb 7088 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). ..... 99

Tabla 24. Proyecciones futuras de los rendimientos de maíz amarillo duro Dekalb 7088 en la EEA-Donoso, 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). ..... 100

Tabla 25. Proyecciones futuras de los rendimientos de maíz amarillo duro ADV 9559 en la EEA-Donoso, 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). ..... 101

Tabla 26 Proyecciones futuras de los rendimientos de maíz amarillo duro INIA 611 en la EEA-Donoso, 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). ..... 103

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Balance de radiación. (Adaptado de Castillo-Marín (2006)).	10
Figura 2: Escenarios de emisiones de GEI. (Extraída del “Informe especial del IPCC. Escenarios de emisiones, 2000”).	12
Figura 3: Escenarios de concentración de CO <sub>2</sub> . (Extraída del “Informe especial del IPCC. Escenarios de emisiones, 2000”).	13
Figura 4: Cascada de incertidumbres (Extraída del IPCC, 2001).	15
Figura 5: Localización del área del proyecto de investigación: Impacto de la variabilidad y cambio climático en la producción del cultivo de maíz amarillo duro en condiciones de Costa Central	36
Figura 6: Esquema de aleatorización de los tratamientos de parcela de validación en la EEA- La Molina (Split Plot).	49
Figura 7: Distribución de tratamientos en las parcelas de calibración 1 y 2 en la EEA-La Molina.	50
Figura 8: Esquema de aleatorización de los tratamientos de parcela de validación en la EEA-Donoso (Split Plot).	51
Figura 9: Distribución de tratamientos en las parcelas de calibración 1 y 2 en la EEA-Donoso.	52
Figura 10: Gráfico de correlación del índice de área foliar observada y simulada con el modelo CERES-Maize para Dekalb 7088, bajo tres niveles de fertilización nitrogenada (N1: 120 kg/ha, N2: 200 kg/ha y N3: 240 kg/ha).	85
Figura 11: Índice de área foliar observada y simulada con el modelo CERES-Maize de cuatro híbridos de maíz amarillo duro (Dow 2B 288, INIA 619, ADV 9559 y INIA 611) fertilizadas con tres niveles de nitrógeno (EEA-La Molina: N1: 120 Kg N; N2: 200 Kg N y N3: 240 Kg N).	86
Figura 12: Gráfico de correlación de la biomasa observada y simulada con el modelo CERES-Maize para Dekalb 7088, bajo tres niveles de fertilización nitrogenada (N1: 120 kg/ha, N2: 200 kg/ha y N3: 240 kg/ha).	88
Figura 13: Índice de área foliar observada y simulada con el modelo CERES-Maize de cuatro híbridos de maíz amarillo duro (Dow 2B 288, INIA 619, ADV 9559 y INIA 611) fertilizadas con tres niveles de nitrógeno (EEA-La Molina: N1: 120 Kg N; N2: 200 Kg N y N3: 240 Kg N).	89
Figura 14. Diagrama de cajas y bigotes de los rendimientos simulados para el maíz híbrido Dekalb 7080, en la EEA-La Molina, para la serie histórica 1930-2016 y las fases extremas del ENSO ( 20 años Niño y 18 años Niña). La línea negra dentro de la caja representa la mediana. El extremo superior (inferior) de la caja representa el percentil 75(25). El bigote (inferior) representa el percentil 95(5).	91
Figura 15. Diagrama de cajas y bigotes de los rendimientos simulados para el maíz híbrido Dekalb 7080, en la EEA-Donoso, para la serie histórica 1984-2016 y las fases extremas del ENSO (10 años Niño y 6 años Niña). La línea negra dentro de la caja representa la mediana. El extremo superior (inferior) de la caja representa el percentil 75(25). El bigote (inferior) representa el percentil 95(5).	93
Figura 16. Diagrama de cajas y bigotes de los rendimientos simulados para el maíz híbrido ADV 9559, en la EEA-Donoso, para la serie histórica 1984-2016 y las fases extremas del ENSO (10 años Niño y 6 años Niña). La línea negra dentro de la caja representa la mediana. El extremo superior (inferior) de la caja representa el percentil 75(25). El bigote (inferior) representa el percentil 95(5).	95
Figura 17. Diagrama de cajas y bigotes de los rendimientos simulados para el maíz híbrido INIA 611, en la EEA-Donoso, para la serie histórica 1984-2016 y las fases extremas del ENSO (10 años Niño y 6 años Niña). La línea negra dentro de la caja representa la mediana. El extremo superior (inferior) de la caja representa el percentil 75(25). El bigote (inferior) representa el percentil 95(5).	96

# **IMPACTO DE LA VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCIÓN DEL CULTIVO DE MAÍZ AMARILLO DURO EN CONDICIONES DE COSTA CENTRAL**

## **I. INTRODUCCIÓN**

La producción nacional de maíz amarillo presenta una alta competitividad en términos agronómicos, sin embargo desde 1991 el volumen de producción no abastece la demanda interna, en los últimos seis años se ha incrementado las importaciones, en el 2014 se importó 2 135 894 toneladas a un precio FOB de \$ 540 560 (miles US\$) para cubrir la demanda, siendo la producción nacional el 49,7% de la demanda (SIEA, 2014). Esta baja producción puede ser atribuida al inadecuado manejo del sistema de producción y al desconocimiento de la influencia del clima en la producción y productividad del cultivo.

Además es conocido que el fenómeno El Niño 1997-1998, tuvo un impacto negativo en la agricultura afectando el rendimiento de los principales cultivos producto del desarrollo de plagas y enfermedades, así como por daños en la infraestructura de riego e inundaciones, perdiéndose durante la campaña agrícola 97-98 a nivel nacional 73 047 hectáreas; en el caso del maíz a nivel nacional se redujeron en un 46% (CONAM, 1999).

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 son más recurrentes y agresivos (IPCC, 2001).



En este contexto existen dos tipos de respuestas posibles frente a la variabilidad y al cambio climático, las de mitigación, que atacan directamente a las causas de la problemática y las de adaptación que apuntan fundamentalmente a minimizar los impactos negativos del cambio en el clima y a evitarlos, de ser posible.

El presente trabajo de investigación intenta dar un primer paso en el estudio de la vulnerabilidad y adaptación de los cultivos a la variabilidad y cambio climático en nuestra región; para ello se usará el modelo CERES-Maize, que tiene varias aplicaciones actuales y potenciales en respuesta a temas relacionados con investigación, manejo de cultivos y planificación. Estos pueden ayudar a la comprensión de las interacciones genético-fisiológico-ambientales, permitiendo integrar el suelo, clima y cultivo con la finalidad de analizar distintas situaciones para el mejor aprovechamiento de los recursos naturales.

## **II. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

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

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar el clima actual y regionalizar escenarios de clima futuro para la zona piloto.
- Calibrar y validar el modelo CERES-Maize para el maíz amarillo duro.
- Evaluar el impacto de la variabilidad climática y cambio climático en la producción del maíz amarillo duro.

### III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. 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). 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.

### **3.1.1. Variabilidad estacional e interanual**

En varias partes del mundo, el fenómeno de El Niño Oscilación del SUR (ENOS) 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 ENOS 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 El 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 superficiales del mar TSM en el Pacífico Oriental y los sistemas convectivos se desplazan hacia ese sector. Durante La Niña, ocurre un patrón anómalo inverso al observado durante El Niño: intensificación de los alisios y el gradiente térmico, TSM 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 ENOS se puede categorizar en base a las anomalías en la TSM o por diferencias de presión entre puntos de la cuenca del Pacífico Índice de Oscilación del Sur - IOS; Trenberth, 1997). Asimismo, puede utilizarse un índice multivariado que involucra diferentes variables climáticas (e.g. temperatura del aire, presión, nubosidad, etc.).

Los cambios inducidos por el fenómeno ENOS 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).

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 (Montua 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 1982-1983 (pérdidas por US\$ 3 283 millones) y El Niño 1997-1998 (causó daños estimados en US\$ 3 500 millones), pérdidas equivalentes al 11,6% y 6,2% del PBI anual de 1983 y 1998, respectivamente (SENAMHI, 2003).

### **3.2. Impacto de la variabilidad climática en maíz**

Estudios previos han mostrado asociaciones entre la variabilidad climática ocasionada por el ENOS y los resultados de los sistemas agrícolas en varias regiones agrícolas del mundo (Dilley, 1997).

Asimismo, se ha realizado estudios sobre la relación entre las fases del ENOS, la variabilidad climática asociada y el rendimiento de los cultivos. Entre ellos a nivel de Sudamérica, en el Brasil, Fontana y Berlato (1996) analizaron la influencia del ENOS sobre la precipitación y el rendimiento de maíz en Rio Grande do Sul; asimismo, RAO et al. (1997), citado por Cunha, et al. 2001, encontraron una fuerte

correlación positiva entre el IOS y el rendimiento de maíz en siete Estados Brasileños del Nordeste.

Yzarra et al. (2015) observaron los cambios de los rendimientos correspondientes a las diferentes fases de ENOS. En los años caracterizados como El Niño, el 35% de las cosechas de maíz amarillo duro fueron catalogadas como de rendimientos bajos; el 42% como rendimientos medios y el 23% se consideraron como rendimientos altos. En los eventos La Niña se observaron que el 23% de las cosechas fueron considerados como rendimientos bajos, el 41% como rendimientos medios y el 36% como rendimientos altos. En los años catalogados como neutrales los rendimientos altos, medios y bajos fueron muy similares entre sí, y oscilaron en torno a 25%.

### **3.3. 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 CO<sub>2</sub> solo absorbe la radiación infrarroja en una parte muy pequeña de su espectro, por lo que dudan si el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, 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.

### **3.3.1. Causas del cambio climático**

El cambio del clima puede deberse a procesos naturales internos o factores externos: naturales o antropógenos, generalmente vinculados a cambios en el forzamiento radiativo.

El forzamiento radiativo es una medida de la influencia que un factor ejerce en la modificación del equilibrio entre la energía entrante y saliente en el sistema Tierra-atmósfera, y es un índice de la importancia del factor como mecanismo potencial de generación de un proceso de cambio climático.

Un forzamiento radiativo positivo, como el que se produce por las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero producto de las actividades humanas, tiende a calentar la superficie terrestre. Estos gases son los componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja. En la atmósfera de la Tierra, los principales gases de efecto invernadero (GEI) son el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>).

Un forzamiento radiativo negativo, que puede deberse al aumento de ciertos tipos de aerosoles (partículas microscópicas suspendidas en el aire), tiende a enfriar la superficie terrestre. Los factores naturales, como los cambios en la actividad solar o volcánica, también pueden producir un forzamiento radiativo.

Es necesario caracterizar estos agentes de forzamiento, así como sus cambios con el tiempo, con el fin de comprender el proceso de cambio climático diferenciándolo de las variaciones naturales propias del sistema climático (Castillo-Marin, 2006).

Las actividades humanas aumentan la concentración de gases atmosféricos de efecto invernadero generando un forzamiento radiativo positivo (calentamiento). Los factores naturales han intervenido poco en el forzamiento radiativo del siglo pasado.

El Segundo informe de evaluación del IPCC concluyó: “El balance de las pruebas indica una influencia humana apreciable en el clima mundial”.

La mayor parte del calentamiento observado en los últimos 50 años se debe a las actividades humanas. La reconstrucción de los datos climáticos de los últimos mil años también indica que este calentamiento es inhabitual y es improbable que sea totalmente de origen natural. Las simulaciones de la respuesta a los forzamientos naturales únicamente, por ejemplo, la respuesta a la variabilidad en la irradiancia solar y en las erupciones volcánicas, no explican el calentamiento en la segunda mitad del siglo XX. No obstante, las simulaciones indican que los forzamientos naturales pueden haber contribuido al calentamiento observado en la primera mitad del siglo XX.

Los gases de efecto invernadero absorben radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera debido a los mismos gases, y por las nubes. La atmósfera emite radiación en todas direcciones, incluyendo hacia la superficie de la Tierra. De esta manera, los gases de efecto invernadero atrapan el calor dentro del sistema troposfera-superficie. A esto se le llama efecto invernadero natural. La radiación atmosférica está estrechamente vinculada a la temperatura del nivel desde el cual se emite. En la tropósfera, la temperatura tiende a disminuir con la altura. En efecto, la radiación infrarroja emitida hacia el espacio se origina a una altitud en que la temperatura es de  $-19^{\circ}\text{C}$  como promedio, en equilibrio con la radiación solar incidente neta, mientras que la superficie de la tierra se mantiene a una temperatura mucho más alta, de  $+14^{\circ}\text{C}$  como promedio.

Cuando aumenta la concentración de los gases de efecto invernadero, se acentúa la opacidad infrarroja de la atmósfera, lo que a su vez genera una



radiación efectiva hacia el espacio desde una altitud mayor, a una temperatura más baja. Esto causa un forzamiento radiativo, un desequilibrio que sólo puede compensarse con un aumento de la temperatura del sistema superficie-troposfera. Este es el llamado efecto invernadero acentuado.

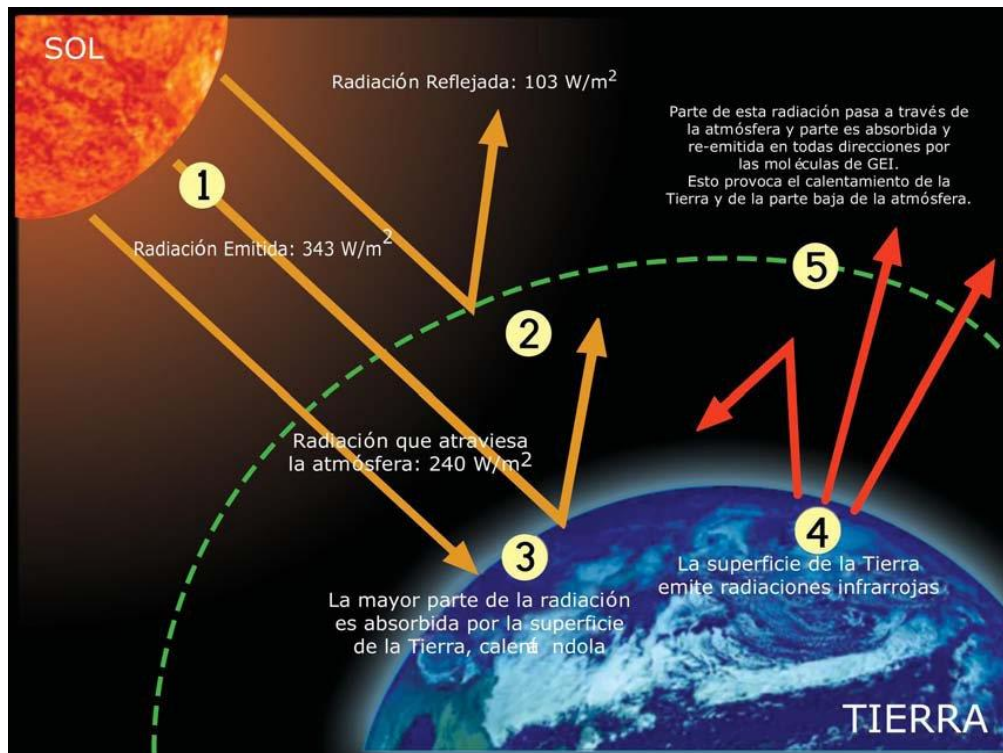


Figura 1: Balance de radiación. (Adaptado de Castillo-Marín (2006)).

Un conjunto de observaciones cada vez mayor describe la imagen global de un mundo en fase de calentamiento y de otros cambios en el sistema climático:

- la temperatura media mundial de la superficie ha aumentado de  $0,6^\circ\text{C}$  aproximadamente en el siglo XX.
- la extensión del hielo y de la capa de nieve ha disminuido.

El nivel medio del mar en todo el mundo ha subido y la temperatura de los océanos se ha incrementado.

### **3.3.2. Escenarios climáticos futuros**

La proyección de escenarios climáticos futuros requiere considerar escenarios de: a) progreso económico b) emisión de GEIs y aerosoles c) concentración atmosférica de GEIs.

En la elaboración de cada uno de estos escenarios existe un grado mayor o menor de incertidumbre que limita nuestra capacidad de detectar, atribuir y comprender el cambio climático actual y proyectar los cambios climáticos que podrían ocurrir en el futuro.

Un escenario de emisiones constituye una representación verosímil de la evolución futura de las emisiones sobre la base de una serie homogénea e intrínsecamente coherente de hipótesis sobre las fuerzas determinantes - crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico y el cambio tecnológico- y las relaciones fundamentales entre ellas.

El IPCC elaboró primero una serie de escenarios conocidos como IS92 que después fueron actualizados y descritos en el Informe especial de este organismo sobre escenarios de emisiones, IE-EE, (Figura 2). A fin de describir de manera coherente las relaciones entre las fuerzas determinantes de las emisiones y su evolución, y para añadir un contexto a la cuantificación de los escenarios, se desarrollaron cuatro líneas evolutivas diferentes. Los 40 escenarios resultantes (35 de los cuales contienen datos sobre toda la gama de gases necesarios para forzar los modelos climáticos) abarcan las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas que determinarán las emisiones futuras de GEI y azufre. Cada escenario representa una interpretación cuantitativa específica de una de las cuatro líneas evolutivas. El conjunto de escenarios basados en una misma línea evolutiva constituye una “familia” de escenarios.

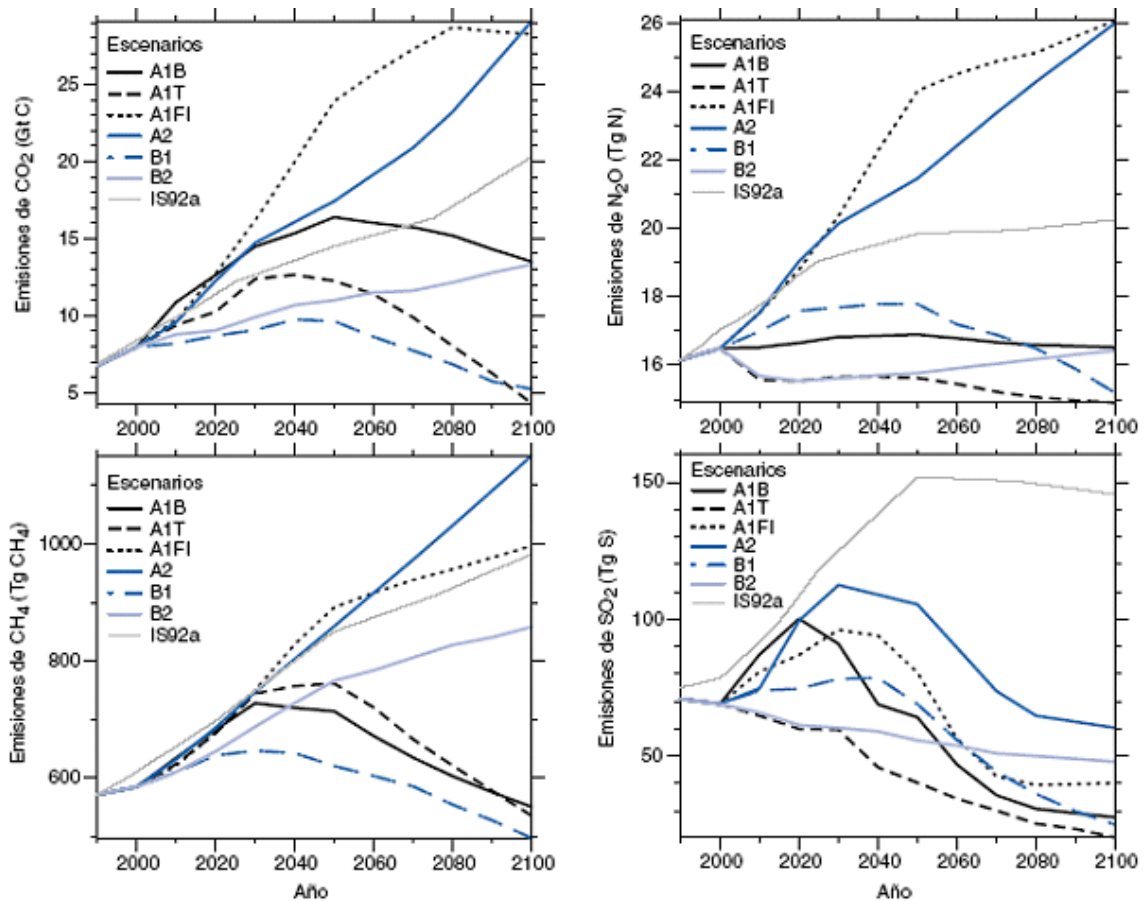


Figura 2: Escenarios de emisiones de GEI. (Extraída del “Informe especial del IPCC. Escenarios de emisiones, 2000”)

### 3.3.3. Escenarios de concentraciones

Según Castillo-Marin (2006) los escenarios de concentraciones surgen a partir de modelos del ciclo del carbono que hacen proyecciones de las concentraciones atmosféricas de los GEI (agregadas y expresadas como CO<sub>2</sub> equivalente) y de los aerosoles basándose en los escenarios de emisiones descritos previamente. Estos modelos tienen en cuenta, entre otras, que la biosfera y los océanos tienen la capacidad de secuestrar y almacenar dióxido de carbono atmosférico. Para el año 2100, los modelos del ciclo del carbono proyectan concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> entre 540 y 970 ppm (Figura 3) para los escenarios ilustrativos del IE-EE (entre 90% y 250% mayor que la concentración de 280 ppm en 1750).

El efecto neto de las retroacciones climáticas terrestres y oceánicas, según indican los modelos, es un aumento aún mayor de las concentraciones atmosféricas proyectadas, que se produce como consecuencia de una menor absorción de CO<sub>2</sub> tanto por los océanos como por los continentes.

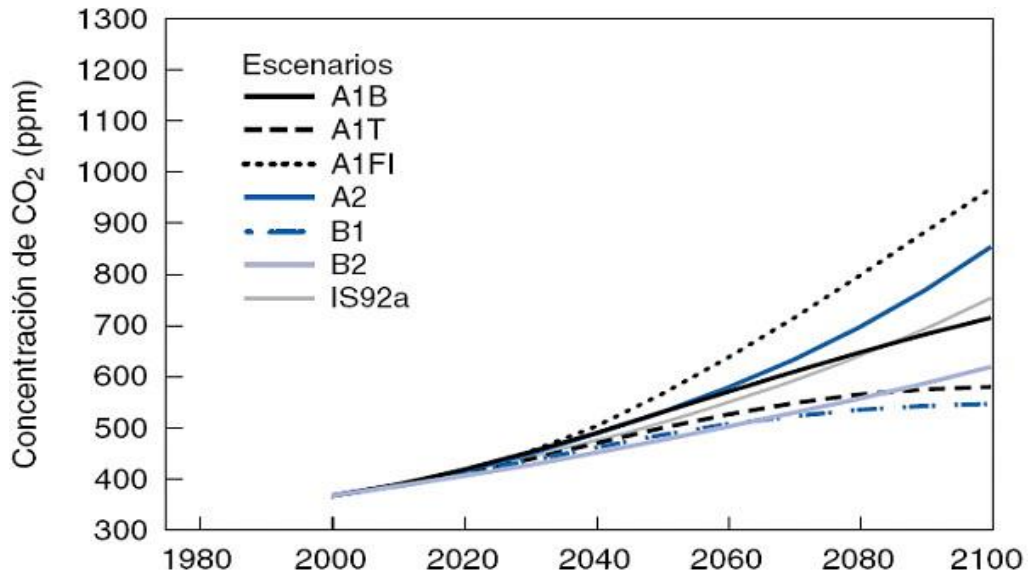


Figura 3: Escenarios de concentración de CO<sub>2</sub>. (Extraída del “Informe especial del IPCC. Escenarios de emisiones, 2000”)

Los modelos climáticos se utilizan para investigar la reacción del clima, ante perturbaciones naturales y/o provocadas por el hombre. Utilizan los escenarios de concentración derivados de los escenarios de emisiones para el cálculo de proyecciones climáticas.

Las simulaciones de modelos climáticos, respecto de una serie de escenarios para cuantificar el cambio climático medio, indican que para fines del siglo XXI (2071 hasta 2100), el cambio de la temperatura media del aire en la superficie mundial, en relación con el período comprendido entre 1961 y 1990, será de 3,0°C como promedio (con un margen de variación de entre 1,3 y 4,5°C) en el escenario de referencia preliminar A2, y de 2,2°C (con un margen de variación

de entre 0,9 y 3,4°C) en el escenario de referencia preliminar B2. En el escenario B2 se produce un calentamiento más leve, acorde con su menor ritmo de aumento de la concentración de CO<sub>2</sub>. Estos cambios de temperatura afectarían notablemente al ciclo hidrológico, causando un aumento de precipitaciones en algunas zonas y un decremento en otras.

#### **3.3.4. Proyección climática futura y cascada de incertidumbres**

La cadena de pasos necesarios para realizar proyecciones climáticas presenta incertidumbres (Figura 4) en todos sus eslabones, desde las emisiones de GEI y aerosoles, hasta los efectos que éstos producen en el sistema climático y en la sociedad.

Una predicción adecuada sobre el desarrollo climático del futuro es complicado dado la complejidad de los sistemas climáticos (Lomborg, 1998). Según Parry y Carter (1998) un escenario es una descripción coherente, internamente consistente y plausible de un posible estado futuro del mundo. No obstante la estimación de los efectos cuantitativos del calentamiento global sobre el clima del futuro implica la utilización de datos que no pueden conocerse actualmente con exactitud, debido a que no se sabe con precisión la tasa de emisión de gases invernadero y todavía no es posible calcular con certeza cuál será la respuesta del sistema climático a variaciones en la composición de la atmósfera. Además, la tasa de emisión de estos gases en el futuro no está totalmente determinada, ya que en alguna medida depende de los comportamientos humanos que definirán las elecciones que la sociedad realice en el futuro con relación a temas tales como la utilización de combustibles fósiles. Teniendo en cuenta esto, en vez de una única estimación acerca de la tasa de emisión de gases invernadero, se ha propuesto un conjunto de hipótesis sobre los factores que afectan la futura composición de la atmósfera que se denominan escenarios de emisión de CO<sub>2</sub>.

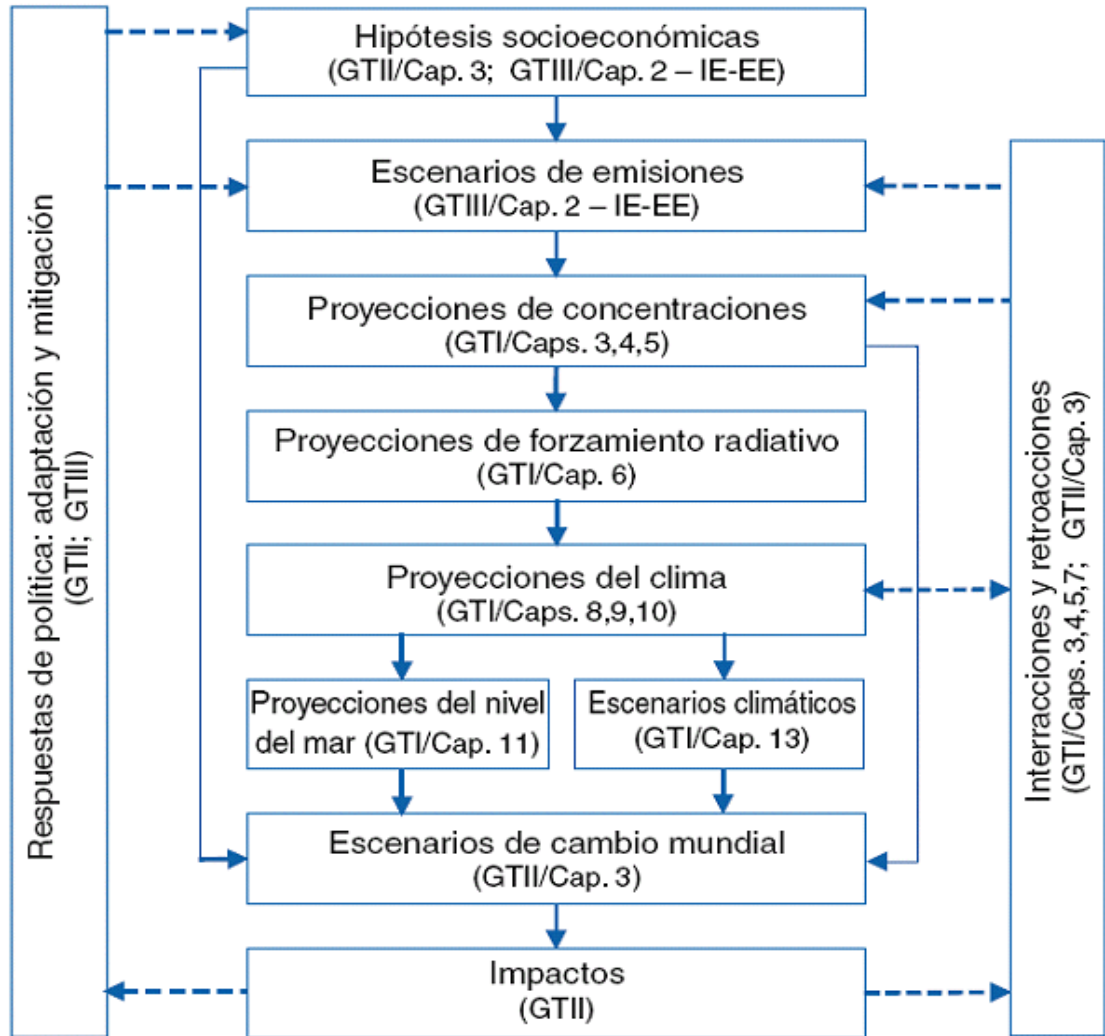


Figura 4: Cascada de incertidumbres (Extraída del IPCC, 2001).

### 3.4. Modelos Climáticos

Los modelos climáticos generales se basan en leyes de la física representadas por ecuaciones matemáticas que se resuelven utilizando una rejilla tridimensional sobre el globo terráqueo. A fin de simular el clima, los principales componentes del sistema climático deben representarse en submodelos (la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre, la criósfera y la biosfera), junto con los procesos que ocurren entre ellos y dentro de cada uno de ellos.

Los procesos que rigen el sistema climático determinan su variabilidad natural y su respuesta a perturbaciones como el aumento de la concentración de GEIs en la atmósfera. Algunos de los procesos más importantes simulados por los modelos están vinculados al vapor de agua en la atmósfera, las nubes, los océanos, la criósfera, el dióxido de carbono en la atmósfera y la superficie terrestre.

El aumento de la temperatura, los cambios en las precipitaciones, las alteraciones en el calentamiento radiativo neto y los efectos directos del CO<sub>2</sub>, influyen en el estado de la superficie terrestre y la vegetación presente. A su vez, los cambios en ciertas propiedades de la vegetación –coeficiente de reflectividad, rugosidad, etc.- tienen un efecto sobre el clima. Los intercambios de energía, agua, calor y carbono entre la superficie terrestre y la atmósfera pueden definirse en los modelos como funciones de tipo y densidad de la vegetación local y las características físicas del suelo.

Los adelantos logrados en la comprensión de la fotosíntesis de la vegetación y el uso del agua se han utilizado para combinar los ciclos de la energía terrestre, del agua y del carbono dentro de una nueva generación de parametrizaciones de la superficie terrestre, que se han verificado mediante su comparación con las observaciones sobre el terreno y se han aplicado en algunos modelos climáticos. Eso ha permitido mejorar en forma comprobable la simulación de los intercambios entre la superficie terrestre y la atmósfera. Sin embargo, aún quedan por resolver problemas importantes en lo que respecta a los procesos de humedad del suelo, la predicción del escurrimiento y los cambios en el uso de la tierra.

Los cambios en la cubierta vegetal de la superficie terrestre pueden afectar el clima mundial de varias maneras, entre otras, cambiando el albedo, los perfiles verticales de temperatura y humedad en la atmósfera (Diffenbaugh and Sloan, 2002; Diffenbaugh, 2005). El efecto directo del aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico en la fisiología de las plantas podría conducir a una disminución relativa de la evapotranspiración en las regiones tropicales, junto con un

calentamiento regional y una desecación superior a lo pronosticado convencionalmente como efectos de calentamiento de los GEI.

La deforestación, en especial en las zonas tropicales húmedas, ha sido señalada como uno de los ejemplos más claros donde el cambio en la cobertura de la superficie tiene implicancias directas sobre el patrón climático regional (Shukla et al., 1990) reduciendo la evaporación y aumentando la temperatura en la superficie.

### **3.4.1. Modelos Climáticos Globales**

Una de las herramientas más confiables para investigar la posible respuesta del clima a futuras variaciones en la composición de la atmósfera son los llamados Modelos Climáticos Globales (MCG). Estos modelos matemáticos incorporan en sus ecuaciones la descripción de los procesos físicos y las interacciones fundamentales entre las componentes más importantes del sistema climático - atmósfera, hidrosfera, litosfera y biosfera (Labraga, 1998).

El sistema climático puede representarse con modelos de distinta complejidad, de manera que para cada componente o combinación de componentes, se puede identificar una jerarquía de modelos que difieren entre sí en aspectos como el número de dimensiones espaciales, el grado de detalle con que se representan los procesos físicos, químicos o biológicos, o el grado de utilización de parametrizaciones empíricas. Alrededor de una decena de modelos numéricos de circulación general de la atmósfera y de los océanos han sido desarrollados y aplicados con el propósito de evaluar los cambios climáticos a nivel global (CONAMA, 2006).

Los modelos climáticos mundiales en los que se han acoplado los componentes atmosféricos y oceánicos se conocen también con el nombre de Modelos de la Circulación General Atmósfera–Océano (MCGAO). La resolución horizontal de los MCG está en el orden de los 300 km. Muchos procesos físicos, como los que



están relacionados con las nubes o la convección oceánica, ocurren en escalas espaciales mucho más pequeñas que la rejilla de los modelos y en consecuencia no pueden modelarse y resolverse en forma explícita. Sus efectos medios se incluyen en forma aproximada con un método simple, aprovechando sus relaciones basadas en la física con las variables a mayor escala. Esta técnica se conoce con el nombre de parametrización.

Los modelos climáticos se han perfeccionado en los últimos decenios gracias al desarrollo de las computadoras. Durante ese período se crearon modelos separados de cada uno de los componentes principales, la atmósfera, la superficie terrestre, los océanos, el hielo marino, el ciclo del carbono, la química atmosférica, que luego se fueron integrando gradualmente. Además se desarrollaron diferentes técnicas de regionalización que permitieron mejorar la representación regional, en escalas más finas, de los modelos.

### **3.4.2. Variabilidad del Clima y MCG**

La variabilidad del clima se refiere a variaciones en las condiciones climáticas medias y otras estadísticas del clima (como las desviaciones típicas, los fenómenos extremos, etc.) en todas las escalas temporales y espaciales que se extienden más allá de la escala de un fenómeno meteorológico en particular. La variabilidad puede deberse a procesos naturales internos que ocurren dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en el forzamiento externo natural o antropógeno (variabilidad externa).

Las series meteorológicas observadas no son lo suficientemente largas como para dar una idea adecuada de la variabilidad interna del sistema climático. Además estas mediciones están probablemente influenciadas por los cambios en la forzante radiativa producto del cambio en la concentración de GEIs que comienza a acontecer con la revolución industrial.

En este contexto, una alternativa para estudiar la variabilidad interna del sistema climático y diferenciarla de procesos de cambio en el clima consiste en realizar corridas de modelos climáticos de larga duración, manteniendo constante la composición de la atmósfera y otros factores externos al sistema como la radiación solar.

### **3.4.3. Submodelos climáticos regionales acoplados a modelos de vegetación**

Lo que es comúnmente referido como “nested regional climate modelling” consiste en anidar un modelo climático regional (MCR) en un modelo de circulación general. En este esquema las salidas del MCG (componentes del viento, temperatura, vapor de agua y presión de superficie) proveen las condiciones iniciales y las condiciones meteorológicas de borde para poder correr el MCR. A pesar de que los MCG son las mejores herramientas con las que contamos para estimar escenarios futuros, su empleo presenta algunas limitaciones. Por ejemplo, la resolución espacial de las grillas sobre las cuales se realizan las simulaciones y se ofrecen los resultados, es muy baja. A escala regional, los modelos muestran desviaciones medias por zona que varían enormemente de una región a otra y de un modelo a otro. Por las razones anteriores se han elaborado metodologías que, utilizando los resultados de los MCG, permiten solucionar las dificultades expresadas. Así por ejemplo, mediante el empleo de relaciones estadísticas se han desarrollado técnicas de reducción de escala para reproducir las características climáticas regionales (Solman y Nuñez, 1999). Con este mismo fin, se han usado las salidas de los MCG para alimentar modelos de escala más pequeña, conocidos como modelos de área limitada o modelos climáticos regionales (IPCC, 2003).

A partir de la información provista por MCG y utilizando modelos climáticos regionales es posible realizar un proceso denominado "downscaling dinámico" que permite aumentar la resolución espacial de los escenarios climáticos. De

esta forma, la información detallada acerca de los cambios proyectados para las próximas décadas es valiosa para el diseño de políticas de adaptación y mitigación del cambio climático (AABA, 2010).

Los modelos climáticos globales no son capaces de capturar explícitamente la estructura de escala menor que caracteriza las variables climáticas en muchas regiones del mundo. Esta dificultad, se debe a su baja resolución espacial y a los errores en simular características regionales importantes como topografía, lagos, cobertura de suelo, etc.

Los modelos climáticos regionales (MCR) tienen una resolución más fina (30 a 50 km). Al cubrir un área limitada, en lugar de todo el globo, son capaces de representar más detalladamente las características regionales y por lo tanto de simular más adecuadamente la respuesta a los forzantes locales (Cabre et al., 2002 y 2003).

Los MCR necesitan condiciones iniciales, como todos los modelos, pero también necesitan condiciones de borde (laterales al dominio de trabajo). Las condiciones de borde suelen surgir de corridas de modelos de circulación general. El desempeño del MCR depende de la información provista por las condiciones de borde laterales así como también de la física y dinámica interna del modelo. Los patrones de circulación de gran escala de los MCR generalmente no se desvían demasiado de los campos conducentes que proveen las condiciones de borde, especialmente para las regiones medias y superiores de la atmósfera. Los MCR representan los procesos físicos y dinámicos del sistema climático de una manera realista y pueden resolver mejor características climáticas regionales como la topografía, lagos, tipo de suelo, etc. Por otro lado, son computacionalmente costosos y altamente dependientes de la calidad de las condiciones de borde lateral. Los MCR pueden ser computacionalmente muy demandantes ya que entre otras, suelen requerir datos generados por los MCG en una muy alta frecuencia temporal

(por ejemplo, cada 6 horas). Un MCR considerando un dominio de 90x110x14 y resolución de 50 Km. corrido en una Pentium III 1 Ghz PC tarda aproximadamente 10 horas para simular un mes o cerca de 8 días para simular un año. Los recursos computacionales para correr un MCR se incrementan linealmente con el tamaño del dominio y al menos cuadráticamente con la resolución.

La sensibilidad de un modelo se define como el cambio en la temperatura global promedio de superficie resultante de un incremento en la concentración de GEIs en la atmósfera equivalente a una atmósfera duplicada en dióxido de carbono. A mayor sensibilidad, mayor es el impacto de la perturbación antropogénica sobre el clima simulado. Diferentes modelos climáticos presentan índices de sensibilidad diferentes.

Muchos aspectos del sistema climático de la Tierra son caóticos - su evolución es sensible a pequeñas perturbaciones de las condiciones iniciales. Esta sensibilidad limita la posibilidad de predecir la evolución detallada del tiempo más allá de un lapso de aproximadamente dos semanas. No obstante, la posibilidad de predecir el clima no está tan limitada por las influencias sistemáticas en la atmósfera de los componentes del sistema climático que varían más lentamente. Sin embargo, para poder hacer pronósticos fiables, teniendo en cuenta tanto las incertidumbres en las condiciones iniciales como las debidas a los modelos, es conveniente repetir la predicción muchas veces a partir de distintos estados de perturbación iniciales generando una salida promedio de las corridas realizadas denominada "ensamble".

### **3.5. Impacto del cambio climático en el maíz**

Según Parry et al. (1990), los principales efectos se dan por incremento en la concentración de dióxido de carbono, llevando a cambios en la longitud del ciclo productivo y en el rendimiento del cultivo, junto con alteraciones en los patrones de

desarrollo. Por su parte, Goudriaan y Unsworth (1990), plantean que para plantas C4 como el maíz, y otras semillas tropicales como sorgo y caña de azúcar, además de presentar una mayor afinidad y eficiencia en la captura de CO<sub>2</sub>, a diferencia de plantas como las de tipo C3, su respuesta fotosintética al CO<sub>2</sub> es muy alta hasta alcanzar niveles de concentración levemente más bajos a los que se registra hoy en día (330 ppm). Más aún, la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> no cambia, inclusive ante escenarios de alta intensidad lumínica (Wolf y van Diepen, 1994).

Wolf y van Diepen (1994) plantean que un aumento de la radiación solar genera un incremento en la producción potencial de maíz para ensilaje, además, si existen incrementos de temperatura, estos llevarían a aumentar los rendimientos en Europa del norte y a disminuir los rendimientos en Europa del sur. Cuando se utilizan escenarios en que la concentración de CO<sub>2</sub> es el doble de la actual, los rendimientos disminuyen tanto para simulación sin estrés hídrico como con estrés hídrico, concluyendo que el efecto del aumento del CO<sub>2</sub> por sí sólo parece ser mayor al del cambio climático. Por último, los autores plantean que cultivares de mayor suma térmica durante el crecimiento vegetativo y/o en el llenado de grano se ven menos afectados, logrando los mejores pero aun menores, rendimientos. Sólo en condiciones extremas de déficit hídrico, los cultivares de corto período de crecimiento se ven beneficiados.

En tanto, Davies et al. (1996), asumiendo un escenario con aumento de 2 °C en la temperatura y de un 10% en las precipitaciones, concluyen que el rendimiento en materia seca aumenta entre 3 y 5%. Este resultado se explica debido a que, siendo Gales e Inglaterra localidades en las que la temperatura es un factor limitante, incrementos en dicha variable a consecuencia del cambio climático benefician el desarrollo y crecimiento del cultivo.

Hansen (1991) citado por Ozkan y Akcaoz, (2002), examinó el impacto de los factores climáticos sobre la producción de maíz en 10 estados productores de Estados Unidos y encontró que la temperatura en julio era el factor más importante

en el rendimiento del maíz. Así también Ozkan y Akcaoz (2002) encontraron que la variabilidad de la producción de maíz en Turquía se explicaba en un 53% por los factores climáticos, especialmente por las variables temperaturas máximas y mínimas.

En tanto, en Grecia los escenarios de cambio climático evaluados generalmente resultaron en una reducción del rendimiento, debido a la reducción del período de crecimiento (Kapetanaki y Rosenweig, 1997). Dadas las similitudes climáticas con Chile, este resultado entrega una primera estimación, puesto que ambos sistemas productivos presentan un clima mediterráneo con veranos cálidos y secos, con precipitaciones que bordean los 430 mm anuales y rendimientos de maíz cercanos a 100 qq há<sup>-1</sup>. Este estudio resolvió que ante aumentos en la temperatura máxima y mínima, los rendimientos decrecen. Cuando se agrupa este efecto con el del aumento del CO<sub>2</sub>, los rendimientos también decrecen. En otras palabras, el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> no compensa el efecto negativo de la temperatura. Evaluaciones hechas considerando sólo cambios en la radiación solar, generan incrementos en el rendimiento y cuando se mezclan todos los factores se observa que no existen interacciones significativas. Por tanto, se concluye que los rendimientos decrecen dado que la etapa de llenado de granos se reduce debido a una existencia en la mayor acumulación de grados días, ante lo cual mejoras genéticas podrían llevar a solucionar este problema.

La producción en Bulgaria fue evaluada bajo los niveles actuales de CO<sub>2</sub> (330 ppm), donde los escenarios de los GCM proyectados muestran una disminución del rendimiento del maíz, nuevamente causado por una disminución de la estación de crecimiento debido a las mayores temperaturas y a la disminución en el monto de las precipitaciones (Alexandrov y Hoogenboom, 2000). Jones y Thornton (2003), estudiaron los impactos en Latinoamérica proyectados al año "2055". El estudio se basa en pequeños agricultores, en general agricultura de subsistencia, pero sin incluir a Chile. Sus resultados indican una reducción de 10% en la producción de maíz en términos generales. Un inconveniente en este tipo de estudio de mayor

escala continental (la evaluación también se hace para África), es la variabilidad escondida tras los datos. Se plantea que a pesar de la reducción general del 10 %, existirán zonas que incrementarán su producción y otras que decaerán, ante lo cual los resultados pierden efectividad para la toma de decisiones a nivel local.

Un trabajo de relevancia para las condiciones Chilenas, es el estudio realizado por Magrin et al. (1997) en Argentina. Enfocado en la región pampeana, principal zona maicera de Argentina, los resultados de esta investigación muestran que para el año "2055", ante escenarios de 330 y 550 ppm de CO<sub>2</sub> se observa una disminución en el rendimiento de alrededor de 16,5%. Este resultado se explica principalmente por la reducción del ciclo de crecimiento. En sus resultados los autores observaron que la etapa siembra-antésis se reduce en promedio 15 días y que la etapa antésis-madurez se disminuye en 10 días. Por último, el peso del grano sufriría una disminución del 10%, aproximadamente.

Como se puede apreciar, los estudios sobre los impactos del cambio climático en la producción de maíz a nivel mundial, demuestran que, de cumplirse los escenarios pronosticados por los GCM, es probable que ocurra una disminución en las producciones locales de maíz, en donde uno de los principales efectos aparenta ser el acortamiento del ciclo productivo debido al aumento de la temperatura, afectando etapas cruciales como el llenado de grano que determinan finalmente los resultados productivos. A su vez el CO<sub>2</sub> no parece contrarrestar el efecto del alza en la temperatura. A pesar que se espera que una planta C<sub>4</sub> ante condiciones de mayor concentración de CO<sub>2</sub> utilice el recurso en forma eficiente y genere mayores rendimientos. Por último, las principales zonas beneficiadas parecen ser aquellas en que las temperaturas son relativamente bajas, es decir zonas de latitudes altas, en donde los nuevos escenarios juegan a favor, alargando la suma térmica disponible para esas localidades.

Si bien todos estos resultados llevan a comprender lo que pudiese suceder en el futuro, es preciso señalar que todos estos trabajos tienen un alto grado de

incertidumbre dado que se trabaja con escenarios potenciales y con software de modelación. En general, el software de modelación, es una herramienta computacional que permite ahorrar recursos y tiempo, ya que de otra manera el trabajo se vuelve inviable, pero que presenta algunas limitaciones por lo que los cambios pronosticados deben interpretarse en términos relativos más que a sus valores absolutos.

De este modo, el trabajo a realizar busca complementar la información global en torno al tema de la productividad del maíz y los efectos sobre ésta ante posibles nuevos escenarios climáticos. Se pretende continuar aportando en la senda explicativa que tiene el efecto de la temperatura sobre los rendimientos, así como el efecto que se genera de manera combinada entre la temperatura y el CO<sub>2</sub> sobre los rendimientos del cultivo de maíz.

### **3.6. Descripción de modelos**

El modelo PRECIS (Providing REgional Climates for Im-pacts Studies) forma parte de la versión del modelo de circulación regional británico HadRM3P (Jones et al. 2004), que posee 19 niveles verticales y dos posibles resoluciones horizontales, 25 y 50 km.

Tal como se describió anteriormente, en los modelos climáticos las características de la resolución de las ecuaciones de desenvolvimiento atmosférico suelen dividirse en dos partes, una "dinámica" y otra "física". En cuanto a la dinámica, éste modelo es hidrostático, por lo que no considera de manera explícita los procesos convectivos que generan nubes y por lo tanto no determina de manera directa la precipitación. En cuanto a la física del modelo, se recurren a parametrizaciones. Este proceso se logra utilizando funciones determinísticas simples. Para los procesos como la formación de nubes y precipitación se utilizan parametrizaciones de acuerdo a Gregory y Morris (1996). La radiación sigue el esquema desarrollado por Edwards y Slingo (1996) y modificado por Cusack et al., (1999). Estos esquemas son fijos independientemente de las características geográficas sobre



las que se corre el modelo. Para fines de la solución de las ecuaciones, los años son de 360 días y cada mes consta de 30 días.

Este modelo atmosférico y de suelo de área limitada y de alta resolución, utilizable para cualquier región de la Tierra, puede ser usado para estudios de vulnerabilidad y adaptación, como así también generar escenarios propios de cambio climático para un país o grupo de países.

### **3.7. Modelos de simulación de cultivo**

Las interacciones entre los cultivos y su ambiente integran procesos físicos, químicos y biológicos, cuyo estudio y comprensión son extremadamente complejos. Los sistemas biológicos, objeto de estudio de la Agronomía son sistemas jerárquicos, caracterizados por sus múltiples niveles de organización (Thornley y Jonson, 1990) y entendemos por modelo a la representación simplificada de un objeto o de un sistema (Forrester, 1972).

El aumento de la demanda de productos agrícolas y la mayor presión ejercida sobre la tierra, agua y otros recursos naturales han provocado un incremento en la información necesaria para la toma de decisiones en la agricultura; además, la generación de nuevos datos por medio de los métodos agronómicos tradicionales y su posterior publicación, no son suficientes para cubrir las nuevas necesidades ya que la experimentación agronómica tradicional se lleva a cabo en un punto particular del tiempo y el espacio, con resultados de un sitio y estación específicos, con alta demanda de tiempo, esfuerzo y medios económicos. Así, en la actualidad, en que se busca una productividad cada vez mayor de los cultivos agrícolas comerciales, pero al mismo tiempo se busca también la sustentabilidad de los sistemas de producción agrícola, los modelos de crecimiento de cultivos constituyen una de las más importantes herramientas utilizadas, en busca del entendimiento de los diversos procesos comprendidos en dichos sistemas y sus interrelaciones (Jones, et al., 2003).

Los modelos de simulación de cultivos tienen varias aplicaciones actuales y potenciales en respuesta a temas relacionados con investigación, manejo de cultivos, y planificación. Pueden ayudar a la comprensión de las interacciones genético-fisiológico-ambientales, con una integración interdisciplinaria. Permiten definir estrategias de producción en la etapa de planificación de un cultivo futuro o bien ayudar a tomar decisiones tácticas durante el ciclo del cultivo tales como: prácticas culturales, fertilización, irrigación y uso de pesticidas. Como herramienta de planificación permiten cuantificar a través de la predicción, el impacto de los procesos de erosión, contaminación por agroquímicos, distintas estrategias ante el cambio climático y el pronóstico de rendimiento a nivel regional (Boote et al., 1996). Los modelos de cultivo son útiles para optimizar prácticas de manejo tales como época de siembra, espaciamiento, uso del agua y planificación de riego. Modificando la escala de espacio y tiempo, los modelos nos permiten abordar fenómenos climáticos como el ENOS (El Niño Oscilación Sur) analizando en forma interactiva el impacto de la variabilidad climática y las decisiones de manejo sobre la productividad de los cultivos, resultado difícil de obtener a partir de análisis estadísticos clásicos o experimentos agronómicos tradicionales (Royce et al., 1998). Por otra parte, estos modelos tienen una gran potencialidad como herramienta para evaluar factores genéticos que determinan la acumulación y ubicación de la materia seca producida para distintos ambientes y para diferentes prácticas de manejo, permitiendo entonces evaluar características genéticas para incrementar el rendimiento potencial mediante, por ejemplo, una mejora en: fotosíntesis, reparto de asimilados, translocación desde las partes vegetativas y mayor duración del período de llenado de grano (Boote y Tollenaar, 1994; Jones et al., 2003).

### **3.7.1. Análisis de sistemas y modelos de simulación**

Han transcurrido más de 80 años de estudios de los efectos cuantitativos de los elementos agrometeorológicos sobre el crecimiento y la productividad de diversos cultivos; durante este largo tiempo se han empleado diferentes métodos

para describir el crecimiento y la productividad en respuesta al manejo y las variaciones ambientales. Inicialmente, esos modelos eran simplemente un ajuste de curva entre tiempo y materia seca aérea acumulada; más tarde, con los avances de la fisiología de cultivos y la estadística, sumado al aumento de la capacidad y la disponibilidad de los ordenadores, se desarrollaron métodos más complejos y sofisticados (Blackman, 1919; Goudrian y Monteith, 1990).

Un avance importante para el estudio de la relación entre el cultivo y las variables ambientales fue la introducción de modelos mecanicistas de simulación de crecimiento de los cultivos (De Wit et al., 1965, Duncan et al., 1967). Estos modelos, de los más simples a los más complejos buscan explicar, apoyándose en la fisiología de cultivos, el sistema que se pretende modelizar; de esta forma, sus parámetros deben tratar de tener un significado fisiológico y permitir estimar el incremento de biomasa diario ( $dw/dt$ ) así como su reparto entre los diferentes órganos de la planta.

Forrester (1972) clasifica los modelos en: (1) físicos y abstractos; (2) estáticos y dinámicos; (3) lineales y no lineales; (4) estables e inestables. Los modelos físicos suelen ser réplicas físicas a escala reducida del sistema estudiado (maqueta), mientras que los modelos abstractos están constituidos por símbolos que pueden ser un lenguaje o un pensamiento. Mientras un modelo estático representa una relación que no varía con el tiempo, un modelo dinámico trata las interrelaciones que varían con el tiempo en el interior del sistema estudiado. Al ser los procesos biológicos dinámicos por naturaleza, su representación suele requerir el uso de modelos dinámicos. Los modelos lineales o no lineales representan sistemas similares, pero se considera lineal todo modelo en el que los parámetros son independientes de las variables de estado. Los modelos dinámicos pueden dividirse en estables e inestables según el sistema que representan. Mientras un sistema estable tiende a volver a su condición inicial después de haber sido alterado, un sistema inestable conoce un crecimiento u

oscilación de amplitud variable en función de la magnitud de la alteración inicial. Los modelos de los sistemas agrícolas suelen ser inestables.

Entre los modelos abstractos, los modelos matemáticos constituyen una categoría especial. Estos se pueden dividir en: (1) mecanicistas o empíricos; (2) estocásticos o deterministas; (3) de optimización o de simulación. Se diferencian por el método de análisis de sistemas (mecanicistas o empíricos), por el tipo de relación matemática empleada (estocásticas o deterministas), o en función de los objetivos perseguidos (simulación y optimización).

Charles-Edwards y Thornley (1974) definen los modelos mecanicistas como aquellos empleados para comprender el funcionamiento de un sistema en términos de los mecanismos que actúan sobre él. Pueden ser construidos dividiéndolo y tratando de comprender su comportamiento de acuerdo con la evolución de sus componentes y de sus interacciones. Estos modelos suelen contener un número elevado de ecuaciones y parámetros, presentando la desventaja de ser generalmente muy complejos y precisar, en consecuencia de numerosas estimaciones. Para estos mismos autores, los modelos empíricos son aquellos construidos a partir de observaciones de un sistema real, obteniendo una ecuación o un grupo de ecuaciones que representan los datos experimentales ya que en muchas ocasiones se trata de la única solución disponible para resolver un problema. Estos modelos son más fáciles de construir que los modelos mecanicistas pero tienen la desventaja de no representar los principales procesos subyacentes que tienen lugar en el interior del sistema, y de utilizar parámetros frecuentemente sin significado biológico. Además, estos modelos presentan una gran dependencia respecto de las condiciones del medio en el que han sido desarrolladas sus ecuaciones empíricas.

Por otro lado, Milthorpe y Moorby (1979) indican que los modelos estocásticos describen los eventos de un modo estadístico, mientras que los modelos

deterministas están esencialmente más definidos, aunque muchas de las relaciones empleadas sean originalmente empíricas o estadísticas.

Se suele considerar que la modelización matemática de sistemas consta de tres etapas características: la conceptualización, la formulación y la evaluación. La conceptualización sería la comprensión mental del fenómeno que se pretende modelizar. Puede resumirse en un diagrama o esquema. La formulación es la conexión entre el modelo mental o esquema creado en la conceptualización y el modelo matemático formulado en un programa de ordenador. Finalmente, durante la evaluación se verifica que los resultados obtenidos por el modelo son coherentes con el sistema real que se pretende representar.

En la evaluación del modelo podemos distinguir entre la calibración, que se realiza habitualmente buscando el valor de los parámetros que minimizan las discrepancias entre el modelo y una serie de datos experimentales, y la validación, en la que se determina la bondad del modelo calibrado contrastando los resultados del modelo con datos experimentales diferentes (independientes) de los empleados en la fase de calibración (Jones y Luyten, 1998).

Los primeros modelos de cultivo se enfocaron hacia la producción potencial, sin considerar limitaciones de agua, nutrientes, plagas, enfermedades ni malas hierbas, ya que en principio es la situación más sencilla de modelizar. En las últimas décadas se ha producido un importante avance, tanto desde el punto de vista de la mejora y disponibilidad de los equipos informáticos, como de la comprensión de los procesos fisiológicos de los cultivos lo que ha permitido obtener una mejor descripción de los mecanismos de crecimiento y la posterior evaluación de los modelos de crecimiento disponibles (Boote et al., 1998).

Los modelos de simulación disponibles en la actualidad abarcan prácticamente todos los cultivos herbáceos con cierto interés económico. Gran número de ellos han revelado ser de gran utilidad en programas de investigación. De cara al

futuro es de prever que los modelos jueguen un papel cada vez más importante en la agricultura comercial (especialmente en la denominada agricultura de precisión) en aspectos como la planificación y optimización de rendimientos y recursos, no sólo desde el punto de vista productivo o económico, sino también de la sostenibilidad de las producciones y el mantenimiento de los equilibrios ambientales (Jacobson et al., 1995).

### **3.7.2. El modelo de simulación del crecimiento del maíz: CERES-Maize**

Los modelos de simulación pueden convertirse en herramientas de predicción sobre el desarrollo y productividad frente a los escenarios climáticos futuros (Egli y Bruening, 1992; Curry et al., 1995), permitiendo simular la adopción de diferentes prácticas agronómicas y estrategias más adecuadas que minimicen el impacto climático futuro.

Entre los modelos de cultivos que están incorporados al DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer-Cropping system model) se encuentra el CERES-Maize (“Crop Environmental Resource Syntesis”). CERES-Maize es un modelo dinámico usado en todo el mundo, con algunas partes mecanicistas y otras empíricas, que simula el desarrollo, el crecimiento y el rendimiento del maíz. Desde la primera versión de este modelo (Jones y Kiniry, 1986), ha pasado por múltiples procesos de modificaciones realizados por diferentes grupos de investigación que se han ido incorporando en las sucesivas versiones del DSSAT (Boote et al., 1996; Kiniry et al., 1997; Kiniry y Bockholt, 1998; Jones et al., 2003).

CERES -Maize calcula cada día el avance de la fenología, la tasa de crecimiento y el reparto de la biomasa entre los órganos en fase de crecimiento. Cuando el agua y el nitrógeno no limitan el crecimiento, los procesos simulados se ven afectados por la principales variables ambientales (radiación solar diaria y temperatura máxima y mínima diaria), factores específicos del cultivar (cv)

empleado (coeficientes genéticos) y las prácticas de cultivo (v.g. fecha de siembra, densidad de plantas, y distancia entre líneas).

Este modelo de cultivo, como todos los incluidos en el software del DSSAT, (<http://www.icasa.net/dssat/index.html>; Jones et al., 2003), permite también simular el desarrollo y crecimiento del cultivo en entornos donde el agua y el nitrógeno son limitantes, cuando las opciones de balance de agua y nitrógeno están activadas. En estas circunstancias, el modelo realiza a diario un balance hídrico y de nitrógeno del cual deriva unos factores de déficit hídrico y de nitrógeno que permiten modular el crecimiento respecto del potencial.

Tabla 1: Coeficientes genéticos de CERES-Maize que deben ser calibrados experimentalmente

---

P1	Grados día con base 8 °C (°Cd) desde emergencia hasta el final de la fase juvenil
P2	Sensibilidad al fotoperíodo (días de retraso en la iniciación de la flor masculina por hora de incremento del fotoperíodo. 0 para cultivares no sensibles al fotoperíodo)
P5	Grados día con base 8 °C desde 75% de emisión de floración hasta madurez fisiológica (°Cd)
G2	Número potencial de granos por planta
G3	Tasa potencial de crecimiento de los granos (mg grano <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )

---

El modelo CERES ha sido ampliamente empleado y sus simulaciones contrastadas con datos experimentales gracias a la simulación detallada de numerosos procesos físicos y biológicos implicados en el mismo. No obstante, antes de utilizarlo para cualquiera de sus múltiples usos es preciso calibrarlo (a éste y cualquier modelo mecanicista) con datos experimentales obtenidos in situ, entendiéndose por calibración al proceso iterativo de búsqueda de los valores de

los coeficientes que produzcan la menor discrepancia entre resultados simulados y observados, lo cual significa la medición, estimación o ajuste de sus valores para mejorar la precisión predictiva del modelo con respecto a algunas variables o a una(s) población(es) o escenario(s) agrícola(s) en particular (Boote et al., 1998). Una vez calibrados, los modelos pueden ser utilizados con series agrometeorológicas históricas para evaluar la respuesta del cultivo en su ambiente a determinada práctica y condición inicial, y hasta su impacto económico (Mavromatis et al., 2001). Este modelo fue calibrado para las condiciones agroambientales de la zona centro del Partido de Azul para dos fechas de siembra 16 de octubre y 18 de noviembre (Confalone, et al., 2010).

La aplicación de dicho modelo permitirá una mejor comprensión del comportamiento del agroecosistema de maíz, ante el impacto del cambio climático, bajo una óptica sustentable. Sustentabilidad, en el sentido estricto, es una medida de la capacidad del sistema para mantener la potencialidad productiva indefinidamente; que puede ser analizada a partir de la tendencia de la productividad media en el largo plazo (Requesens, 2008), entre otros parámetros de crecimiento y desarrollo que serán objeto de este estudio.

### **3.7.3. Calibración y validación del modelo CERES-Maize**

Las funciones de temperatura (y derivadas) en los modelos CERES influyen directamente en el desarrollo fásico, crecimiento, temperatura del suelo, balance del agua del suelo y las transformaciones de nitrógeno. Las funciones usadas en el modelo CERES están basadas en el entendimiento de estos procesos. Como es de esperarse, algunas simplificaciones han hecho que la calibración y validación de un modelo sean por lo tanto pasos esenciales (Wilkins y Singh, 2001).



En la evaluación del modelo podemos distinguir entre la calibración, que se realiza habitualmente buscando el valor de los parámetros que minimizan las discrepancias entre el modelo y una serie de datos experimentales, y la validación, en la que se determina la bondad del modelo calibrado contrastando sus resultados con datos experimentales diferentes (independientes) de los empleados en la fase de calibración (Jones y Luiten, 1998).

Popova y Kercheva (2005) explican que el objetivo de la calibración no es sólo proporcionar al modelo los parámetros de entrada necesarios, sino también ajustar los parámetros inexactos comparando las predicciones del modelo con sus respectivos valores observados.

En un estudio realizado por Popova y Kercheva (2005), la habilidad del modelo CERES-Maize, después de la calibración, para hacer predicciones sobre una gama de N-divisiones sin más ajustes en los parámetros fue comparado con la información independiente recolectada en el mismo campo pero en otro lisímetro y en los siguientes dos años (prueba de extrapolación). La buena calidad de las predicciones del modelo fue evaluada con métodos gráficos y estadísticos (regresión lineal, coeficiente de determinación  $R^2$  y el error cuadrático medio RMSE). Las pruebas gráficas compararon los simulados y medidos de los mismos tratamientos en un cierto periodo.

Durante la validación del modelo CERES-Maize en un estudio realizado en un ambiente mediterráneo, Mastrorilli et al. (2003) graficaron las variaciones de algunas variables relevantes (tales como índice de área foliar, rendimiento de grano y biomasa aérea acumulada) como una función del número de días después de la siembra para tener una mejor descripción de las dinámicas simuladas.

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Ubicación del campo experimental

El trabajo de investigación fue realizado en los terrenos del Instituto Nacional de Innovación Agraria en donde se desarrollaron dos experimentos durante las campañas agrícolas 2015-2016 y 2016-2017. El primer ensayo experimental se realizó durante la campaña agrícola 2015-2016 en la Estación Experimental del INIA-La Molina, en el departamento de Lima, provincia de Lima, distrito La Molina (Latitud 12°04'33" S, Longitud 76°56'41" O, Altitud 253 msnm); en donde se sembraron tres híbridos comerciales (Dekalb 7088, Dow 2B688 e INIA 619) en tres parcelas experimentales en épocas distintas: dos para los fines de calibración (20 de agosto y 19 de octubre) y una para validación (18 de setiembre). En las parcelas de calibración se experimentaron dos densidades de siembra: una alta (66 666 plantas/ha) y una baja (33 333 plantas/ha) para los tres híbridos de maíz. Por otro lado, en la parcela de validación se experimentó estos híbridos con tres niveles de fertilización nitrogenada: N1=120 kg/ha, N2=200 kg/ha y N3=240 kg/ha bajo un diseño experimental de parcelas divididas con tres bloques. Las cosechas de estos tratamientos en la parcela de calibración 1 y 2; y la parcela de validación fueron realizadas el 22 de enero, 17 de marzo y 25 de febrero del 2016; respectivamente.

El segundo ensayo experimental se sembró durante la campaña agrícola 2016-2017 en la Estación Experimental del INIA-Donoso, departamento de Lima, provincia de Huaral, distrito de Huaral (Latitud 11°28' S, Longitud 77°14', Altitud 180 msnm); en donde también se sembraron tres híbridos comerciales (Dekalb 7088, ADV 9559 e INIA 611) en cuatro parcelas experimentales en épocas distintas: tres para los fines de calibración (10 de agosto, 12 de setiembre y 10 de octubre) y una para validación (10 de agosto). En las parcelas de calibración se experimentó dos densidades de siembra: una alta (71 400 plantas/ha) y una baja (50 000 plantas/ha) para los tres híbridos de maíz. Por otro lado, en la parcela de validación se experimentó estos híbridos con tres niveles de fertilización nitrogenada: N1=200

kg/ha, N2=240 kg/ha y N3=280 kg/ha bajo un diseño experimental de parcelas divididas con tres bloques. Las cosechas de estos tratamientos en la parcela de calibración 1; 2 y 3 y de la parcela de validación fueron realizadas el 8 de marzo. Esta cosecha se realizó en un solo día por cuestiones logísticas.

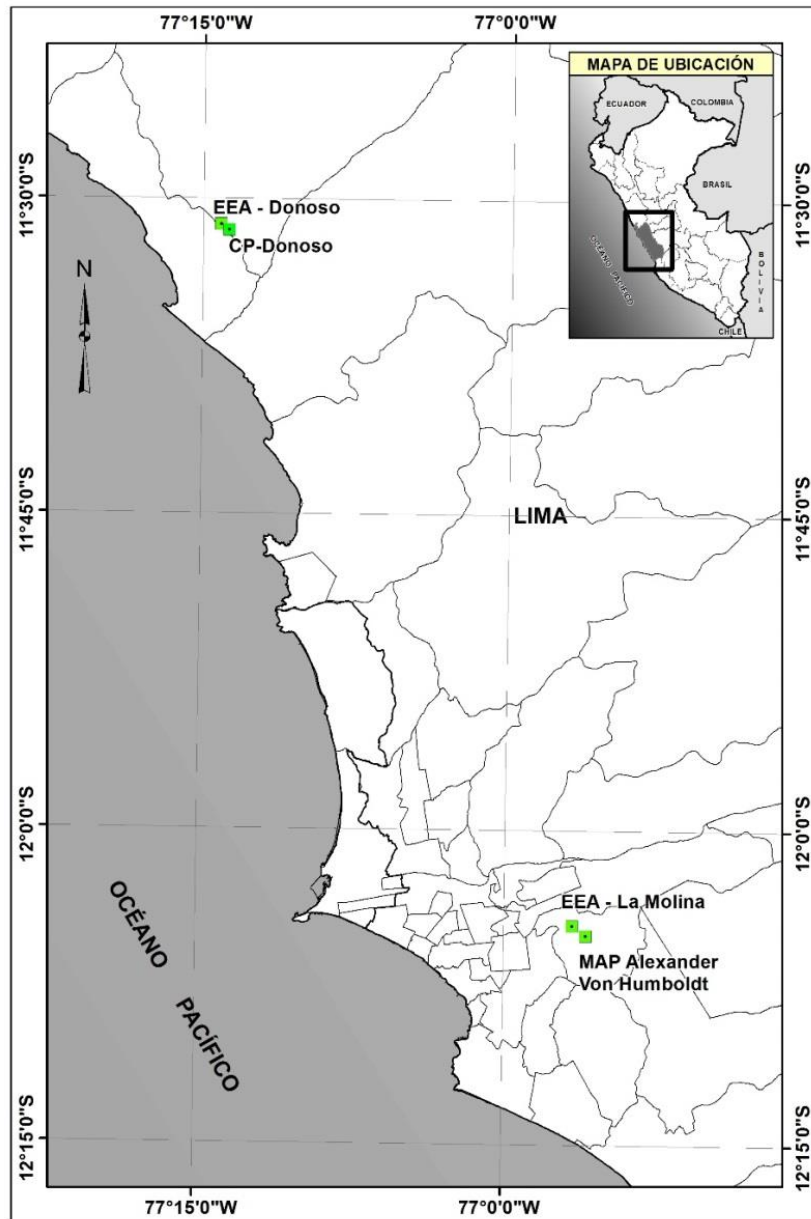


Figura 5: Localización del área del proyecto de investigación: Impacto de la variabilidad y cambio climático en la producción del cultivo de maíz amarillo duro en condiciones de Costa Central

## **4.2. Descripción de los híbridos de maíz amarillo duro**

### **4.2.1. Híbrido de maíz amarillo duro Dekalb 7088**

Este híbrido fue desarrollado por la multinacional “Monsanto” para climas de tipo tropical. Es producido en Brasil y distribuido en el Perú por la empresa de agroquímicos “Hortus”, mediante bolsas con 60 000 semillas.

Este híbrido es de tipo simple, rústico y de alto potencial de rendimiento. Tiene una arquitectura de planta de hojas semi erectas, permitiendo una mayor entrada de luz y aire. Posee además una excelente calidad de grano y cobertura de mazorca. Es un material muy estable, que se adapta a diferentes valles y zonas agroclimáticas (Hortus, 2017). Bajo condiciones adecuadas de nutrición, clima y manejo puede llegar a producir hasta 12,72 t/ha, además según Ecuaquímica (2017) tiene tolerancia a enfermedades como: Helminthosporium (*Helminthosporium maydis*), mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*), cinta roja (*Spiroplasma kunkelii*) y roya (*Puccinia polysora*). Las características agronómicas más resaltantes de este híbrido se pueden apreciar en la Tabla 2.

### **4.2.2. Híbrido de maíz amarillo duro Dow 2B688**

El DOW 2B688 proviene de una hibridación tipo triple desarrollado por la multinacional “Dow AgroSciences” y distribuido en el Perú por la empresa de agroquímicos “Aris Industrial”, mediante bolsas con 60 000 semillas.

Este híbrido de maíz amarillo posee un excelente potencial de rendimiento, tolerante al estrés hídrico y a las dosis comerciales de herbicidas pre y postemergentes. Posee un buen sistema radical que logra que los índices de quiebre o acame sean bajos; además, son tolerantes a enfermedades como la *mancha de asfalto* y *punta loca* en ambientes con alta incidencia de estas (Aris, 2014). Las características agronómicas más resaltantes de este híbrido se pueden apreciar en la Tabla 3.

Tabla 2: Principales características del híbrido Dekalb 7088

<b>Características</b>	<b>Valor o Calificación</b>
Días a floración	54
Día a la cosecha	135
Altura de planta	2,32
Altura de inserción a mazorca	1,45
Cobertura a Mazorca	Buena
<i>Helminthosporium</i>	Tolerante
Cinta roja	Muy tolerante
Mancha de Asfalto	Tolerante
Pudrición de Mazorcas	Muy tolerante
Números de hileras por mazorca	16 - 20
Color de grano	Amarillo aranjado
Textura de grano	Cristalino ligera capa harino
Relación Tuza/grano	81/19
Potencial de Rendimiento (t/ha)	12,72

Fuente: Ecuaquímica (2017)

#### 4.2.3. Híbrido de maíz amarillo duro INIA 619

El maíz amarillo duro INIA 619, llamado comercialmente como el “Megahíbrido”, está formado por dos líneas tropicales con alto nivel de endogamia provenientes del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) - México. Se desarrolló en la Estación Experimental Agraria Vista Florida - Chiclayo del INIA a partir del año 2006 hasta el 2009. Actualmente es distribuido y comercializado por INIA. Este híbrido tiene buena adaptación en la costa y selva peruana. En general no registra presencia significativa de ataque de enfermedades foliares causadas por hongos y virus, muestra alta tolerancia a mancha de asfalto; y no presenta problemas de

tumbado de plantas. (INIA, 2012). Las características agronómicas más resaltantes de este híbrido se pueden apreciar en la Tabla 4.

Tabla 3: Principales características del híbrido Dow 2B688

<b>Características</b>	<b>Valor o Calificación</b>
Tipo de Híbrido	Triple 2B688
Altura de planta (m)	1,90 – 2,10
Altura de inserción de mazorca (m)	0,90 – 1,10
Número de hojas totales en planta	14
Número de hojas por encima de la mazorca	7
Número de nudos por encima de la mazorca	7
Días a la floración masculina	75 - 90
Días a la floración femenina	76 - 91
Peso de 1000 granos	325
Forma de hojas	Lanceolada
Longitud de la lámina (cm)	93
Ancho de la lámina (cm)	10,5
Área foliar (cm <sup>2</sup> )	976
Color de la nervadura central	Crema
Color del estigma	Crema
Forma de la mazorca	Cilíndrica
Número de hileras	18 - 22
Número de granos/hilera	36
Diámetro de mazorca (cm)	5,5
Diámetro de coronta (cm)	3,2
Color de brácteas	Pajizo-morado
Prolificidad	1,1
Días a cosecha (Costa)	135 - 160

Fuente: Aris (2014)

#### 4.2.4. Híbrido de maíz amarillo duro ADV 9559

Actualmente este híbrido se encuentra en fase preliminar a su comercialización, por ello se han estado realizando varios experimentos comerciales a fin de describir su comportamiento agronómico en las zonas de la Costa central (Ancash, Lima e Ica) y Costa norte (Lambayeque). Por el momento, según Antúnez (2017), Jefe de Línea de Semillas de Farmagro S.A, este híbrido es promisorio por tener una avanzada genética para lograr rendimientos altos con características deseables para el mercado como son la buena estabilidad y uniformidad en la producción, resaltándose también su alta tolerancia a las sequías agrícolas.

Tabla 4: Principales características del híbrido INIA 619

Características	Valor o Calificación
Altura de planta (cm)	230 ± 10
Altura de mazorca (cm)	102 ± 5
Forma de mazorca	Cilindro cónica
Número de hileras (promedio)	16
Longitud de mazorca (cm)	22 ± 2
Diámetro de mazorca (cm)	7
Peso de mazorca (g)	310 ± 2
Número de mazorca/planta	1.2
Número de granos/hilera	40
Peso del grano/mazorca (g)	230
Peso de 1000 granos (g)	404
Color del grano	Amarillo oscuro
Textura del grano	Cristalino
Longitud del grano (mm)	15
Ancho del grano (mm)	8
Espesor del grano (mm)	5

Fuente: INIA (2012)

#### 4.2.5. Híbrido de maíz amarillo duro INIA 611

El maíz amarillo duro INIA 611, conocido también como “NUTRI PERÚ”, proviene de una hibridación simple conformado por dos líneas de alta endogamia desarrolladas por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). Su principal característica desarrollada fue el incremento del contenido de los aminoácidos esenciales lisina y triptófano, el cual duplica a los maíces de endosperma normal. Esto se logró con la incorporación del alelo recesivo  $o_2$  a través de métodos tradicionales de mejoramiento. Este híbrido simple tiene gran potencial de rendimiento debido a su alto porcentaje de prolificidad (1,7 %). Actualmente es distribuido y comercializado por INIA.

Tabla 5: Principales características del híbrido INIA 611

<b>Características</b>	<b>Valor o Calificación</b>
Tipo de híbrido	Simple
Altura de planta (cm)	256
Número de hojas	14
Ángulo de hojas (°)	45°
Mazorcas por planta	1 – 1,7
Forma de mazorca	Cilíndrica
Número de hileras/mazorca	12 - 16
Porcentaje de desgrane (%)	16
Número de granos/hilera	31
Longitud de mazorca (cm)	16
Diámetro de mazorca (cm)	5
Cobertura de mazorca	Buena
Días a floración masculina	80 (Costa) 55 (Selva)
Color de grano	Naranja intenso
Textura del grano	Semi cristalino
Peso de 1000 granos (g)	430 - 450

Fuente: INIA (2007)



En la Costa, en lotes comerciales, se ha obtenido más de 12 t/ha de grano; en la selva, el rendimiento del híbrido es mayor que los cultivares que se producen en la región. Las características agronómicas más resaltantes de este híbrido se pueden apreciar en la Tabla 5.

### **4.3. Información Edáfica**

#### **4.3.1. Ensayo Experimental en la EEA-La Molina**

En el primer ensayo experimental se realizó el análisis de caracterización de suelo en el Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la UNALM con el objetivo de conocer las condiciones físico-químicas del suelo. Para ello se realizó una calicata representativa de la parcela experimental, manifestándose claramente 3 horizontes, en donde el primero posee una longitud de 0.36 m, el segundo 0.58 m y el tercero 0.26 m.

En la Tabla 6 se muestra los resultados del análisis de caracterización donde se determina que el suelo del campo experimental posee una clase textural franco arcilloso arenoso en los dos primeros horizontes y una clase textural franco en el tercer horizonte, 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, los tres horizontes (1, 2 y 3) presentan un valor ligeramente alcalino con 7.35, 7.68 y 7.62; respectivamente. Esta condición alcalina se relaciona directamente con el porcentaje de carbonatos cuyos niveles también son bajos a inexistentes 0.1, 0.0 y 0.0 %, respectivamente. Por otro lado, los valores de conductividad eléctrica a extracto de saturación de 2.1, 1.0 y 1.08 dS/m respectivamente indican que existe una

baja salinidad, por tanto no será un factor limitante para el desarrollo del maíz amarillo duro.

Con respecto a la materia orgánica los tres horizontes (1, 2 y 3) manifiestan niveles bajos con 1,54; 0,97 y 0,47 %, por consiguiente el porcentaje de nitrógeno y carbono calculado en base a las formulas propuestas por Demolon (1944) y Ribera et al. 2013, fueron 0,09; 0,06 y 0,03 %; respectivamente, para el nitrógeno orgánico y 0,89; 0,56 y 0,27 %; respectivamente, para el carbono orgánico. Por otra parte, el nivel de fósforo disponible en el horizonte 1 fue muy alto con 42,30 ppm. Los horizontes 2 y 3 presentaron niveles bajos de este elemento con 4,20 y 3,40 ppm respectivamente. Por último, el nivel de potasio disponible en el horizonte 1 es de nivel medio con 215 ppm; asimismo, los horizontes 2 y 3 presentaron bajos niveles de este elemento 98 y 71 ppm respectivamente.

En relación a los cationes intercambiables se puede apreciar una distribución catiónica de  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^{+}$  y  $\text{Na}^{+}$  en 86,31; 10,42; 2,74 y 0,54 %, respectivamente para el horizonte 1; 87,10; 10,44; 1,80; 0,66 % respectivamente, para el horizonte 2: y 89,72; 8,19; 1,25 y 0,83 %, respectivamente para el horizonte 3. Con respecto a las relaciones catiónicas, la relación  $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$  en los tres horizontes determina que existe deficiencia de magnesio creciente conforme aumenta a la profundidad del perfil del suelo. En cuanto a la relación de  $\text{Mg}^{+2}/\text{K}^{+}$  existe en los tres horizontes proporciones adecuadas. Finalmente, la relación entre  $\text{Ca}^{+2}/\text{K}^{+}$  determina que existe una deficiencia creciente del catión potasio conforme aumenta la profundidad del perfil de suelo.

Tabla 6: Análisis del perfil de suelo de la parcela experimental en EEAA – La Molina

Parámetros	Unidad de medida	Horizonte 1	Horizonte 2	Horizonte 3
Longitud de horizonte	m	0,36	0,58	0,26
Arena	%	49	51	47
Limo	%	27	25	31
Arcilla	%	24	24	22
Clase Textural	-	Fr.Ar.A	Fr.Ar.A	Fr.
Densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	1,64	1,72	1,83
pH	-	7,35	7,68	7,62
C.E.	dS/m	2,10	1,00	1,08
CaCO <sub>3</sub>	%	0,10	0,00	0,00
M.O.	%	1,54	0,97	0,47
N orgánico	%	0,09	0,06	0,03
C orgánico	%	0,89	0,56	0,27
Nitratos	ppm	67,78	7,11	7,61
Amonio	ppm	1,08	1,44	1,80
Fósforo total	ppm	42,30	4,20	3,40
Potasio total	ppm	215,00	98,00	71,00
CIC total	meq/100 g	16,80	15,04	14,32
Ca <sup>+2</sup>	meq/100 g	14,50	13,10	12,92
Mg <sup>+2</sup>	meq/100 g	1,75	1,57	1,10
K <sup>+</sup>	meq/100 g	0,46	0,27	0,18
Na <sup>+</sup>	meq/100 g	0,09	0,10	0,12
Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup>	meq/100 g	0,00	0,00	0,00
Suma de cationes	meq/100 g	16,80	15,04	14,32
Suma de Bases	meq/100 g	16,80	15,04	14,32
% Saturación de Bases	%	100,0	100,0	100,0
CaCO <sub>3</sub>	%	0,10	0,00	0,00
CaCO <sub>3</sub>	mg/kg	1000,00	0,00	0,00

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

### 4.3.2. Ensayo Experimental en la EEA-Donoso

El análisis de caracterización de suelo realizado en la EEA – Donoso a las muestras obtenidas de una calicata representativa de la parcela experimental, manifestándose también claramente 3 horizontes, en donde el primero posee una longitud de 0.30 m, el segundo 0.12 m y el tercero 0.38 m.

Tabla 7: Análisis del perfil de suelo de la parcela experimental en EEA-Donoso

Parámetros	Unidad de medida	Horizonte 1	Horizonte 2	Horizonte 3
Longitud de horizonte	m	0,30	0,12	0,38
Arena	%	50	38	34
Limo	%	27	39	43
Arcilla	%	23	23	23
Clase Textural	-	Fr.Ar.A	Fr	Fr.
Densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	0,97	0,89	1,13
pH	-	8,28	8,21	8,47
C.E.	dS/m	0,74	0,97	0,37
M.O.	%	2,95	0,66	0,44
N orgánico	%	0,17	0,04	0,03
C orgánico	%	1,71	0,38	0,26
CaCO <sub>3</sub>	%	27,20	15,70	20,50
CaCO <sub>3</sub>	mg/kg	272,000,0	157,000,0	205,000,0
Nitratos	ppm	38,33	61,11	5,11
Amonio	ppm	2,70	2,52	2,88
Fósforo total	ppm	12,10	3,40	2,30
Potasio total	ppm	171,00	139,00	63,00
CIC total	meq/100 g	14,72	14,40	13,92
Ca <sup>+2</sup>	meq/100 g	9,60	8,89	10,62
Mg <sup>+2</sup>	meq/100 g	4,22	4,88	2,85
K <sup>+</sup>	meq/100 g	0,69	0,43	0,22
Na <sup>+</sup>	meq/100 g	0,21	0,20	0,23
Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup>	meq/100 g	0,00	0,00	0,00
Suma de cationes	meq/100 g	14,72	14,40	13,92
Suma de Bases	meq/100 g	14,72	14,40	13,92
% Saturación de Bases	%	100,0	100,0	100,0

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

En la Tabla 7 se muestra los resultados del análisis de caracterización donde se determina que el suelo del campo experimental posee una clase textural franco arcilloso arenoso en el primer horizonte y una clase textural franco en el segundo y tercer horizonte, 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, los tres horizontes (1, 2 y 3) presentan un valor moderadamente alcalino con 8,28; 8,21 y 8,47; respectivamente. Esta condición alcalina se relaciona directamente con el porcentaje de carbonatos cuyos niveles también son medios a altos 27,2; 15,70 y 20,5 %, respectivamente. Por otro lado, los valores de conductividad eléctrica a extracto de saturación de 1,48; 1,94 y 0,74 dS/m respectivamente indican que existe una baja salinidad, por tanto no será un factor limitante para el desarrollo del maíz amarillo duro.

Con respecto a la materia orgánica, el horizonte 1 presenta un porcentaje medio de este contenido (2,95%), seguidos de porcentajes bajos para los horizontes 2 y 3 (0,66 y 0,44 % respectivamente). A partir de estos valores, se calcula que el porcentaje de nitrógeno orgánico fueron 0,17; 0,04 y 0,03 % respectivamente; y el porcentaje de carbono orgánico fueron 1,71; 0,38 y 0,26 % respectivamente (Demolon, 1944; y Ribera et al. 2013). Por otra parte, el nivel de fósforo disponible en el horizonte 1 fue medio con 12,1 ppm. Los horizontes 2 y 3 presentaron niveles bajos de este elemento con 3,40 y 2,30 ppm respectivamente. Por último, el nivel de potasio disponible en los horizontes 1 y 2 fueron medios con 171 y 139 ppm respectivamente; en el caso del horizonte 3 fue el que presentó bajo nivel de este elemento con 63 ppm.

En relación a los cationes intercambiables se puede apreciar una distribución catiónica de  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^{+}$  y  $\text{Na}^{+}$  en 65,22; 28,67; 4,69 y 0,05 %, respectivamente para el horizonte 1; 61,74; 33,89; 2,99; 1,39 %

respectivamente, para el horizonte 2: y 76,29; 20,47; 1,58 y 1,65 %, respectivamente para el horizonte 3. Con respecto a las relaciones catiónicas, la relación  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  en los tres horizontes determina que existe un exceso de calcio en los tres horizontes. Finalmente, la relación  $K^+/Mg^{2+}$  existe un déficit de potasio en los tres horizontes.

#### 4.4. Diseño experimental EEA – La Molina y EEA-Donoso

El diseño experimental empleado para las investigaciones en la EEA - La Molina y EAA - Donoso 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, donde se realizaron matemáticamente las relaciones existentes entre los factores considerados en este experimento.

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

Donde:

$Y_{ijk}$ : 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.

$\mu$ : Es el efecto de la media general de la variable respuesta.

$\tau_i$ : Es el efecto del i-ésimo nivel de fertilización nitrogenada.

$\beta_j$ : 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)

$\rho_k$ : 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.

$\varepsilon_{ijk}$ : 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**

### **4.5.1. Distribución de las parcelas del ensayo Experimental en la EEA-La Molina**

Las parcelas experimentales empleadas en este estudio fueron las siguientes: 1) validación, 2) calibración 1 y 3) calibración 3. La parcela de validación estuvo conformada por 3 bloques con 9 tratamientos cada uno; es decir, un total de 27 unidades experimentales (Figura 6). Las parcelas de calibración estuvieron conformadas por 6 tratamientos cada uno de idénticas características. Estas no tuvieron repeticiones lo cual la totalidad de unidades experimentales también fueron 6 para cada parcela (Figura 7).

HÍBRIDOS:		NIVELES DE NITRÓGENO:	
<b>H1</b>	Dekalb 7088	<b>N1:</b>	120 kg de N/ha
<b>H2</b>	Dow 2B688	<b>N2:</b>	200 kg de N/ha
<b>H3</b>	INIA 619	<b>N3:</b>	240 kg de N/ha

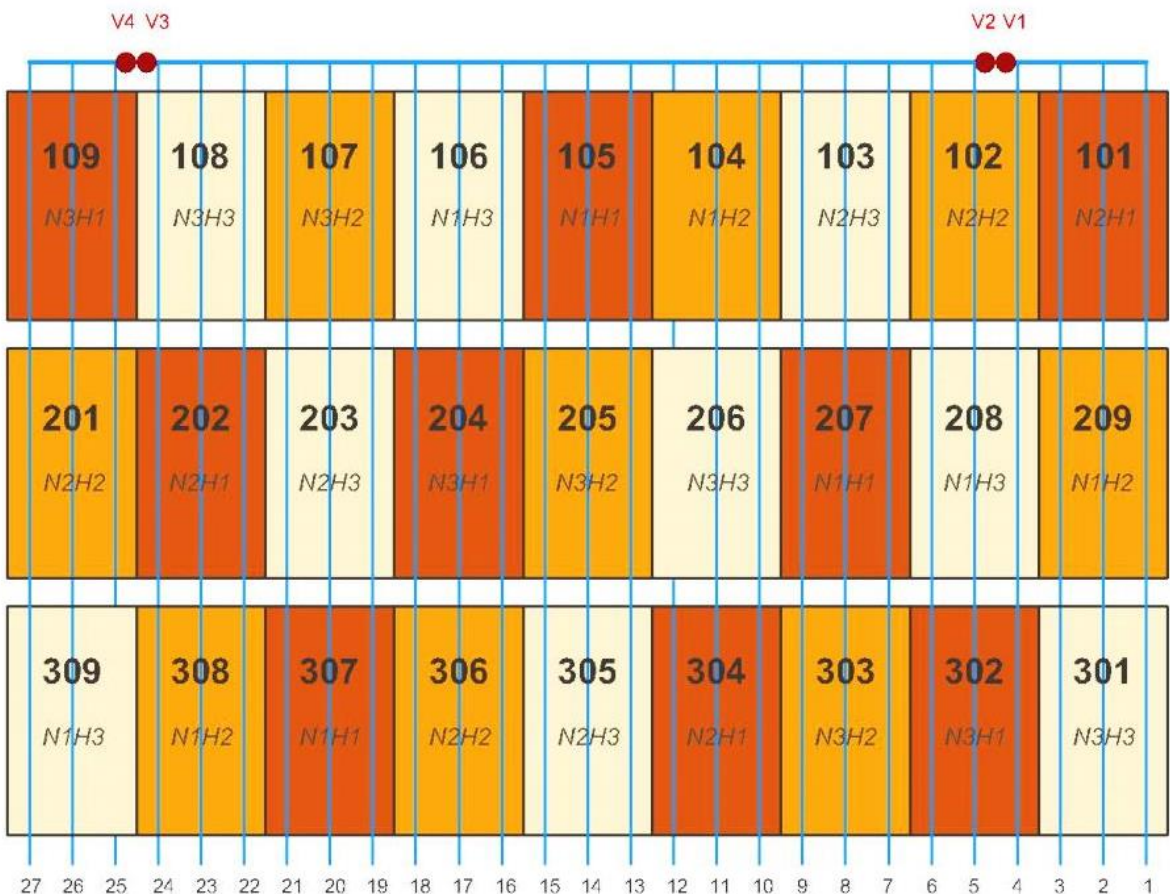
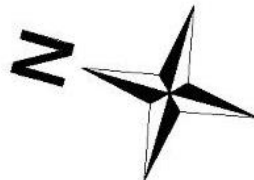


Figura 6: Esquema de aleatorización de los tratamientos de parcela de validación en la EEA- La Molina (Split Plot)

Cada unidad experimental estuvo conformado por tres mangueras de riego, las cuales cada una tenía una separación de 1,5 m, asimismo el largo fue de 8 m, determinándose de esta manera un área de 36 m<sup>2</sup> por unidad experimental. Por lo tanto, el área efectiva de la parcela de validación fue 972 m<sup>2</sup>, asimismo el área efectiva para cada parcela de calibración fue 216 m<sup>2</sup>.



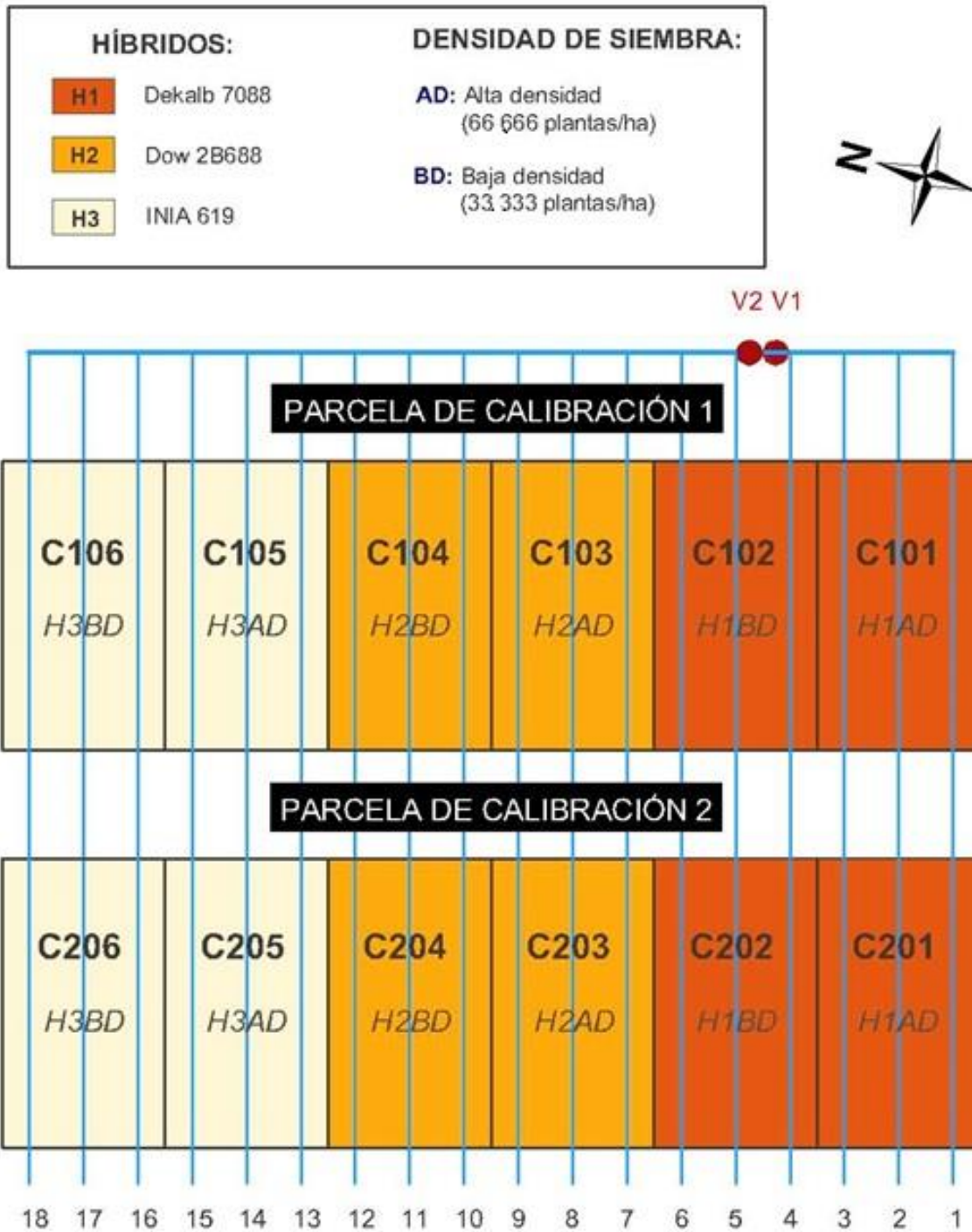


Figura 7: Distribución de tratamientos en las parcelas de calibración 1 y 2 en la EEA-La Molina

#### 4.5.2 Distribución de las parcelas del ensayo Experimental en la EEA-Donoso

Las parcelas experimentales empleados en este estudio fueron las siguientes: 1) validación, 2) calibración 1 y 3) calibración 2 y 4) calibración 3. La parcela de validación estuvo conformada por 3 bloques con 9 tratamientos cada uno; es decir, un total de 27 unidades experimentales (Figura 8). Las parcelas de calibración estuvieron conformadas por 6 tratamientos cada uno de idénticas características. Estas no tuvieron repeticiones lo cual la totalidad de unidades experimentales también fueron 6 para cada parcela (Figura 9).

HÍBRIDOS:		NIVELES DE NITRÓGENO:	
<b>H1</b>	Dekalb 7088	<b>N1:</b>	200 kg de N/ha
<b>H4</b>	ADV 9559	<b>N2:</b>	240 kg de N/ha
<b>H5</b>	INIA 611	<b>N3:</b>	280 kg de N/ha

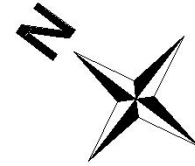
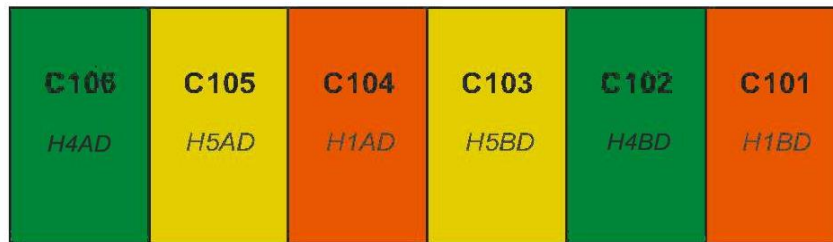


Figura 8: Esquema de aleatorización de los tratamientos de parcela de validación en la EEA-Donoso (Split Plot)

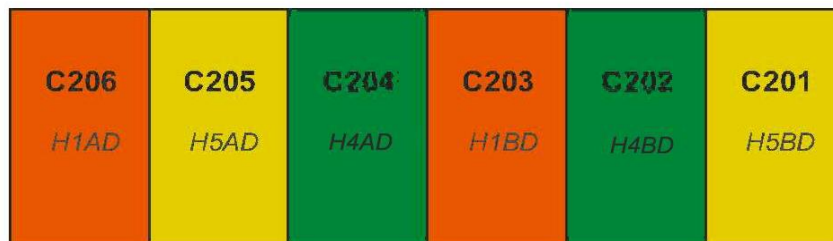
HÍBRIDOS:		DENSIDAD DE SIEMBRA:	
<b>H1</b>	Dekalb 7088	<b>AD:</b>	Alta densidad (71 429 plantas/ha)
<b>H4</b>	ADV 9559	<b>BD:</b>	Baja densidad (50 000 plantas/ha)
<b>H5</b>	INIA 611		



**PARCELA DE CALIBRACIÓN 1**



**PARCELA DE CALIBRACIÓN 2**



**PARCELA DE CALIBRACIÓN 3**

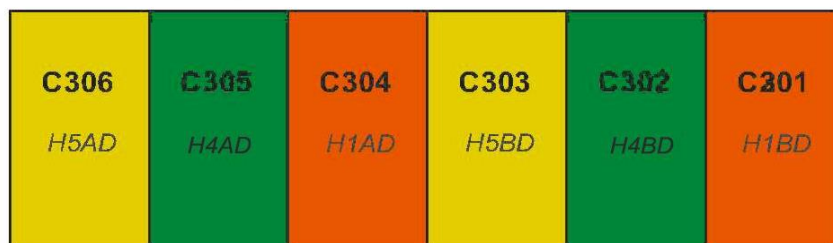


Figura 9: Distribución de tratamientos en las parcelas de calibración 1 y 2 en la EEA-Donoso

Cada unidad experimental estuvo conformada por cinco surcos, con 8 m de longitud y un ancho de 0,8 m entre surcos, determinándose de esta manera un área de 32 m<sup>2</sup> por unidad experimental. Por lo tanto, el área efectiva de la parcela de validación fue 864 m<sup>2</sup>, asimismo el área efectiva para cada parcela de calibración fue 192 m<sup>2</sup>.

## **4.6. Conducción del ensayo experimental**

### **4.6.1. Conducción de las parcelas Experimentales de la EEA-La Molina**

El ensayo experimental empezó con la siembra de la parcela de calibración 1 realizado el 20 de agosto del 2015. En esta parcela se estudió la influencia de dos densidades de siembra (alta y baja) en las características agronómicas de los híbridos Dekalb 7088, Dow 2B688 y INIA 619. La densidad alta estuvo determinada por 66 666 plantas/ha y la densidad baja por 33 333 plantas/ha. Un mes después, se sembró la parcela de validación el 18 de setiembre del 2015. En esta parcela de 3 bloques se estudió la influencia de tres niveles de fertilización nitrogenada en las características agronómicas de los mismos híbridos mencionados. La primera dosis nitrogenada fue 120 kg/ha, la segunda fue 200 kg/ha y la tercera 240 kg/ha. Finalmente, después de un mes aproximadamente se sembró la parcela de calibración 2 el 19 de octubre del 2015. En esta parcela se estudió lo mismo que en la calibración 1.

La siembra en general fue realizada manualmente estableciéndose dos plantas por golpe a cada 20 cm en la parcela de validación y calibración (1 y 2) estableciéndose la densidad comercial de 66 666 plantas/ha. Asimismo, a las parcelas de calibración se le asignó un distanciamiento adicional como tratamiento de 40 cm entre plantas con la finalidad de establecer 33 333 plantas/ha. Posterior a 40 días aproximadamente se realizó el desahije, en el cual se estableció una planta por golpe. 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 y 2 se realizaron 37, 39 y 31 riegos respectivamente, usándose 347,98; 325,89

y 290,27 mm de lámina de riego correspondientemente. Los detalles de estos riegos se aprecian en la Tabla 9. Es importante mencionar que cada manguera de riego regaba dos hileras de plantas.

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 100 kg/ha cada uno. En el caso de las parcelas de calibración, se fertilizaron con 240 kg/ha de nitrógeno; para las parcelas de validación las dosis fueron 120, 200 y 240 kg/ha. Las fechas de fertilización de las parcelas experimentales se aprecian en la Tabla 8.

Tabla 8: Fertilizaciones realizadas en las parcelas experimentales de la EEA – La Molina

Fecha de Fertilización	Días después de la Siembra	Tipo de Fertilizante	N (kg/ha)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ha)	K <sub>2</sub> O (kg/ha)
<b>Calibración 1 (H1AD, H1DB, H2AD, H2BD, H3AD y H3BD)</b>					
02/09/2015	13	Urea	120	0	0
02/09/2015	13	Sulfato de Potasio	0	0	100
02/09/2015	13	Superfosfato Triple de Calcio	0	100	0
06/11/2015	78	Urea	120	0	0
<b>Calibración 2 (H1AD, H1DB, H2AD, H2BD, H3AD y H3BD)</b>					
04/11/2015	16	Urea	120	0	0
04/11/2015	16	Sulfato de Potasio	0	0	100
04/11/2015	16	Superfosfato Triple de Calcio	0	100	0
21/12/2015	63	Urea	120	0	0
<b>Validación (H1N1, H2N1 y H3N1)</b>					
30/09/2015	12	Urea	60	0	0
30/09/2015	12	Sulfato de Potasio	0	0	100
30/09/2015	12	Superfosfato Triple de Calcio	0	100	0
28/10/2015	40	Urea	60	0	0
<b>Validación (H1N2, H2N2 y H3N2)</b>					
30/09/2015	12	Urea	100	0	0
30/09/2015	12	Sulfato de Potasio	0	0	100
30/09/2015	12	Superfosfato Triple de Calcio	0	100	0
28/10/2015	40	Urea	100	0	0
<b>Validación (H1N3, H2N3 y H3N3)</b>					
30/09/2015	12	Urea	120	0	0
30/09/2015	12	Sulfato de Potasio	0	0	100
30/09/2015	12	Superfosfato Triple de Calcio	0	100	0
28/10/2015	40	Urea	120	0	0

Tabla 9: Riegos realizados en las parcelas experimentales de la EEA – La Molina

CALIBRACIÓN 1									VALIDACIÓN					CALIBRACIÓN 2						
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)			N° de riego	Fecha de riego	Días después de la Siembra	Lamina de riego en 1 ha (mm)		
			H1AD	H1BD	H2AD	H2BD	H3AD	H3BD				H1N1/H1N2/H1N3/H2N1/H2N2/H2N3/H3N1/H3N2/H3N3	H1AD/H1BD/H2AD/H2BD/H3AD/H3BD							
1	21/08/2015	1	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80	1	18/09/2015	0	9,80			1	19/10/2015	0	5,60		
2	28/08/2015	8	7,47	7,47	7,47	7,47	7,47	7,47	2	21/09/2015	3	4,67			2	22/10/2015	3	5,60		
3	01/09/2015	12	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	3	25/09/2015	7	5,60			3	29/10/2015	10	11,20		
4	04/09/2015	15	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07	4	02/10/2015	14	4,98			4	30/10/2015	11	4,67		
5	11/09/2015	22	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80	5	07/10/2015	19	7,47			5	03/11/2015	15	8,40		
6	18/09/2015	29	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80	6	12/10/2015	24	4,98			6	06/11/2015	18	9,33		
7	21/09/2015	32	0,00	0,00	4,67	4,67	4,67	4,67	7	13/10/2015	25	8,40			7	10/11/2015	22	7,47		
8	25/09/2015	36	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	8	15/10/2015	27	7,47			8	12/11/2015	24	13,07		
9	02/10/2015	43	4,98	4,98	4,98	4,98	4,98	4,98	9	19/10/2015	31	5,60			9	20/11/2015	32	14,93		
10	07/10/2015	48	7,47	7,47	7,47	7,47	7,47	7,47	10	22/10/2015	34	5,60			10	24/11/2015	36	14,00		
11	12/10/2015	53	7,47	7,47	4,98	4,98	4,98	4,98	11	29/10/2015	41	11,20			11	26/11/2015	38	9,33		
12	13/10/2015	54	8,40	8,40	8,40	8,40	8,40	8,40	12	30/10/2015	42	4,67			12	04/12/2015	46	11,20		
13	15/10/2015	56	7,47	7,47	7,47	7,47	7,47	7,47	13	03/11/2015	46	8,40			13	09/12/2015	51	7,47		
14	19/10/2015	60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	14	06/11/2015	49	9,33			14	11/12/2015	53	7,47		
15	22/10/2015	63	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	15	10/11/2015	53	7,47			15	17/12/2015	59	7,47		
16	29/10/2015	70	11,20	11,20	11,20	11,20	11,20	11,20	16	12/11/2015	55	13,07			16	21/12/2015	63	18,67		
17	30/10/2015	71	14,00	14,00	4,67	4,67	4,67	4,67	17	20/11/2015	63	14,93			17	29/12/2015	70	5,60		
18	03/11/2015	75	5,60	5,60	8,40	8,40	8,40	8,40	18	24/11/2015	67	14,00			18	05/01/2016	78	9,33		
19	06/11/2015	78	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33	19	26/11/2015	69	9,33			19	11/01/2016	84	7,47		
20	10/11/2015	82	9,33	9,33	7,47	7,47	7,47	7,47	20	04/12/2015	77	11,20			20	12/01/2016	85	7,47		
21	12/11/2015	84	13,07	13,07	13,07	13,07	13,07	13,07	21	09/12/2015	82	10,58			21	15/01/2016	88	9,33		
22	20/11/2015	92	11,20	11,20	14,93	14,93	14,93	14,93	22	11/12/2015	84	10,58			22	20/01/2016	93	11,20		
23	23/11/2015	95	13,07	13,07	3,73	3,73	3,73	3,73	23	17/12/2015	90	10,58			23	25/01/2016	98	7,47		
24	24/11/2015	96	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	24	21/12/2015	94	18,67			24	27/01/2016	100	7,47		
25	26/11/2015	98	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33	25	29/12/2015	102	8,71			25	03/02/2016	106	9,33		
26	04/12/2015	106	11,20	11,20	11,20	11,20	11,20	11,20	26	05/01/2016	109	10,89			26	10/02/2016	114	11,20		
27	09/12/2015	111	7,47	7,47	7,47	7,47	7,47	7,47	27	11/01/2016	115	9,02			27	11/02/2016	115	11,20		
28	11/12/2015	113	9,33	9,33	7,47	7,47	7,47	7,47	28	12/01/2016	116	9,02			28	15/02/2016	119	7,47		
29	17/12/2015	119	7,47	7,47	7,47	7,47	7,47	7,47	29	15/01/2016	119	10,89			29	22/02/2016	126	9,33		
30	21/12/2015	123	18,67	18,67	18,67	18,67	18,67	18,67	30	20/01/2016	124	12,76			30	29/02/2016	133	11,20		
31	29/12/2015	131	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	31	25/01/2016	129	9,02			31	03/03/2016	136	9,33		
32	05/01/2016	138	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33	32	27/01/2016	131	9,02								
33	11/01/2016	144	7,47	7,47	7,47	7,47	7,47	7,47	33	03/02/2016	137	10,89								
34	12/01/2016	145	7,47	7,47	7,47	7,47	7,47	7,47	34	10/02/2016	145	11,20								
35	15/01/2016	148	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33	35	11/02/2016	146	11,20								
36	20/01/2016	153	11,20	11,20	11,20	11,20	11,20	11,20	36	15/02/2016	150	7,47								
37	25/01/2016	158	7,47	7,47	0,00	0,00	0,00	7,47	37	22/02/2016	157	9,33								
38	27/01/2016	160	7,47	7,47	0,00	0,00	0,00	7,47												
39	03/02/2016	167	9,33	9,33	0,00	0,00	0,00	9,33												
<b>TOTAL</b>			<b>339,58</b>	<b>339,58</b>	<b>301,62</b>	<b>301,62</b>	<b>325,89</b>	<b>325,89</b>	<b>TOTAL</b>			<b>347,98</b>	<b>TOTAL</b>			<b>290,27</b>				

La cosecha se realizó de forma manual llevándose a cabo el 22 de enero, el 08 de febrero y 17 de marzo del 2015 para la parcela de calibración 1, validación y calibración 2; respectivamente.

#### **4.6.2. Conducción de las parcelas Experimentales de la EEA-Donoso**

El ensayo experimental empezó con la siembra de la parcela de calibración 1 y validación realizado el 10 de agosto del 2016; luego de un mes aproximadamente (12 de setiembre del 2016) se sembró la parcela de calibración 2; y finalmente el 10 de octubre se sembró la tercera parcela de calibración. De igual forma al ensayo anterior, en las parcelas de calibración se estudió la influencia de dos densidades de siembra en los híbridos Dekalb 7088, ADV 9559 y INIA 611; la densidad alta estuvo determinado por 71 429 plantas/ha y la baja por 50 000 plantas/ha. Por otro lado la parcela de validación estuvo conformada de 3 bloques, estudiándose la influencia de tres niveles de fertilización nitrogenada en las características agronómicas de los híbridos mencionados. El primer dosis nitrogenada fue 120 kg/ha, el segundo fue 200 kg/ha y el tercero 240 kg/ha.

La siembra en general fue realizada manualmente estableciéndose hasta el final dos plantas por golpe a cada 35 cm en la parcela de validación y calibración (1, 2 y 3). Asimismo, a las parcelas de calibración se le asignó un distanciamiento adicional como tratamiento de 50 cm entre plantas con la finalidad de establecer 50 000 plantas/ha. 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.

La fertilización de las parcelas experimentales se caracterizó 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 120 kg/ha cada uno. Las parcelas de calibración fue fertilizado con el nivel más alto de nitrógeno de la parcela de validación, siendo 280 kg de N/ha.

Las otras dosis de nitrógeno evaluadas fueron 200 y 240 kg/ha. Las fechas de fertilización de las parcelas experimentales se aprecian en la Tabla 10.

Tabla 10: Fertilizaciones realizadas en las parcelas experimentales de la EEA – Donoso

Fecha de Fertilización	Días después de la Siembra	Tipo de Fertilizante	N (kg/ha)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ha)	K <sub>2</sub> O (kg/ha)
<b>Calibración 1 (H1AD, H1DB, H2AD, H2BD, H3AD y H3BD)</b>					
09/09/2016	30	Urea	73	0	0
09/09/2016	30	Sulfato de Potasio	0	0	120
09/09/2016	30	Fosfato diamónico	47	120	0
10/12/2015	63	Nitrato de Amonio	140	0	0
<b>Calibración 2 (H1AD, H1DB, H2AD, H2BD, H3AD y H3BD)</b>					
12/10/2016	30	Urea	73	0	0
12/10/2016	30	Sulfato de Potasio	0	0	120
12/10/2016	30	Fosfato diamónico	47	120	0
11/11/2016	60	Nitrato de Amonio	140	0	0
<b>Calibración 3 (H1AD, H1DB, H2AD, H2BD, H3AD y H3BD)</b>					
11/11/2016	32	Urea	73	0	0
11/11/2016	32	Sulfato de Potasio	0	0	120
11/11/2016	32	Fosfato diamónico	47	120	0
15/12/2016	66	Nitrato de Amonio	140	0	0
<b>Validación (H1N1, H2N1 y H3N1)</b>					
29/08/2016	19	Sulfato de Potasio	0	0	120
29/08/2016	19	Fosfato diamónico	47	120	0
23/09/2016	44	Urea	73	0	0
12/10/2016	63	Nitrato de Amonio	80	0	0
<b>Validación (H1N2, H2N2 y H3N2)</b>					
29/08/2016	19	Sulfato de Potasio	0	0	120
29/08/2016	19	Fosfato diamónico	47	120	0
23/09/2016	44	Urea	73	0	0
12/10/2016	63	Nitrato de Amonio	120	0	0
<b>Validación (H1N3, H2N3 y H3N3)</b>					
29/08/2016	19	Sulfato de Potasio	0	0	120
29/08/2016	19	Fosfato diamónico	47	120	0
23/09/2016	44	Urea	73	0	0
12/10/2016	63	Nitrato de Amonio	160	0	0

El riego de las parcelas experimentales fue por gravedad proporcionándole a los tratamientos un alto nivel de humedad a la zona radical. En total para las parcelas de validación, calibración 1 y 2 se realizaron 18 riegos, usándose aproximadamente 2285,4 mm de agua; por otro lado, la parcela de calibración 3



tuvo 17 riegos de 2158,4 de lámina de riego. Los detalles de estos riegos se aprecian en la Tabla 11.

La cosecha se realizó de forma manual llevándose a cabo el 01 de marzo del 2017 para todas las parcelas experimentales de la EEA – Donoso.

Tabla 11: Riegos realizados en las parcelas experimentales de la EEA – Donoso

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)
			H1N1/H1N2/H1N3/H4N1/H4N2/H4N3/H5N1/H5N2/H5N3				H1AD/H1BD/H4AD/H4BD/H5AD/H5BD
1	23/08/2016	13	126,96	1	23/08/2016	13	126,96
2	06/09/2016	27	126,96	2	06/09/2016	27	126,96
3	19/09/2016	40	126,96	3	19/09/2016	40	126,96
4	03/10/2016	54	126,96	4	03/10/2016	54	126,96
5	12/10/2016	63	126,96	5	12/10/2016	63	126,96
6	21/10/2016	72	126,96	6	21/10/2016	72	126,96
7	28/10/2016	79	126,96	7	28/10/2016	79	126,96
8	04/11/2016	86	126,96	8	04/11/2016	86	126,96
9	11/11/2016	93	126,96	9	11/11/2016	93	126,96
10	18/11/2016	100	126,96	10	18/11/2016	100	126,96
11	25/11/2016	107	126,96	11	25/11/2016	107	126,96
12	02/12/2016	114	126,96	12	02/12/2016	114	126,96
13	09/12/2016	121	126,96	13	09/12/2016	121	126,96
14	16/12/2016	128	126,96	14	16/12/2016	128	126,96
15	23/12/2016	135	126,96	15	23/12/2016	135	126,96
16	30/12/2016	142	126,96	16	30/12/2016	142	126,96
17	09/01/2017	152	126,96	17	09/01/2017	152	126,96
18	17/01/2017	160	126,96	18	17/01/2017	160	126,96
<b>TOTAL</b>			<b>2285,36</b>	<b>TOTAL</b>			<b>2285,36</b>
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)
			H1AD/H1BD/H4AD/H4BD/H5AD/H5BD				H1AD/H1BD/H4AD/H4BD/H5AD/H5BD
1	19/09/2016	7	126,96	1	12/10/2016	2	126,96
2	03/10/2016	21	126,96	2	21/10/2016	11	126,96
3	12/10/2016	30	126,96	3	28/10/2016	18	126,96
4	21/10/2016	39	126,96	4	04/11/2016	25	126,96
5	28/10/2016	46	126,96	5	11/11/2016	32	126,96
6	04/11/2016	53	126,96	6	18/11/2016	39	126,96
7	11/11/2016	60	126,96	7	25/11/2016	46	126,96
8	18/11/2016	67	126,96	8	02/12/2016	53	126,96
9	25/11/2016	74	126,96	9	09/12/2016	60	126,96
10	02/12/2016	81	126,96	10	16/12/2016	67	126,96
11	09/12/2016	88	126,96	11	23/12/2016	74	126,96
12	16/12/2016	95	126,96	12	30/12/2016	81	126,96
13	23/12/2016	102	126,96	13	09/01/2017	91	126,96
14	30/12/2016	109	126,96	14	17/01/2017	99	126,96
15	09/01/2017	119	126,96	15	25/01/2017	107	126,96
16	17/01/2017	127	126,96	16	01/02/2017	114	126,96
17	25/01/2017	135	126,96	17	06/02/2017	119	126,96
18	01/02/2017	142	126,96				
<b>TOTAL</b>			<b>2285,36</b>	<b>TOTAL</b>			<b>2158,39</b>

#### 4.7. Calibración del modelo CERES Maize

Un aspecto importante en el funcionamiento del modelo CERES-Maize constituye los denominados coeficientes genéticos, que según Bowen (1997), son constantes que describen la sensibilidad de cada cultivar a la temperatura y al fotoperiodo, definiendo la floración y la maduración fisiológica, principalmente. Este autor añade que estos coeficientes deben ser estimados a partir de información provenientes de ensayos con óptimas condiciones de desarrollo.

Para el cultivo de maíz según el modelo CERES-Maize se han definido los siguientes coeficientes genéticos, los cuales se detallan a continuación:

**P1:** es el tiempo térmico (expresado en grados día, superior a una temperatura base de 8°C), durante el cual la planta no es sensible a cambios en el fotoperiodo, y comprende desde la emergencia hasta el inicio de la floración.

**P2:** es la sensibilidad manifiesta de la planta al aumento o disminución del fotoperiodo. En nuestro medio este coeficiente es igual a cero, ya que los días tienen una duración más o menos equivalente a 12 horas durante todo el año.

**P5:** tiempo térmico (expresado en grados día, superior a una temperatura base de 8°C), desde la floración femenina hasta la maduración fisiológica.

**G2:** es el potencial número de granos por planta.

**G3:** tasa de crecimiento de los granos, bajo óptimas condiciones, expresada en mg/día.

**PHINT:** es el intervalo en tiempo térmico (grados día), entre las apariciones de los extremos de hojas sucesivas.

#### 4.7.1. Proceso de calibración

1. Durante el proceso de calibración se llevó a cabo el paso enumerado en (a) si la duración del fotoperiodo fue menos de 14 h, los de (b) si la duración del fotoperiodo fue entre 14 h y 16 h, o los de (c) si la duración del fotoperiodo fue mayor que 16 h (Bowen, 1997).
  - a. Examinar y observar la concordancia entre la fecha de floración masculina predicha y observada. Si la fecha predicha de floración fuera posterior (o anterior) que el observado, disminuir (o aumentar) el valor de P1 (la primera variable) en el archivo genético. El cambio necesario puede aproximarse a muchas condiciones al restar el valor predicho del observado y multiplicando por 7. Repita hasta que se obtenga un ajuste razonable.
  - b. Examinar y observar la concordancia entre la fecha de floración predicha y observada. Si la fecha predicha de floración fuera posterior (o anterior) que el observado disminuir (o aumentar) el valor de P2 (la primera variable) en el archivo genético. Repita los pasos 3 y 4 hasta obtener un ajuste razonable, o hasta que P2 varíe por 0,2 unidades de la suposición inicial. Si lo último ocurre, aumentar (o disminuir) P1 (la primera variable en el archivo genético) hasta obtener un ajuste razonable, o hasta que P1 difiera por 100 unidades de la suposición inicial. Regrese a P2 si fuera necesario.
  - c. Examinar y observar la concordancia entre la fecha de floración predicha y observada. Si la fecha predicha de floración fuera posterior (o anterior) que el observado, disminuir (o aumentar) el valor de P2 (la segunda variable) en el archivo genético. Repita hasta que se obtenga un ajuste razonable.
2. Examinar y observar la concordancia entre los días predichos y actuales a la madurez fisiológica. Si no es satisfactorio, aumentar (o disminuir según convenga) P5 (la tercera variable en el archivo genético). El cambio necesario puede aproximarse a muchas condiciones al restar el valor predicho del

observado y multiplicando por 10. Repetir y recambiar el coeficiente hasta que se obtenga un ajuste satisfactorio.

3. Examinar y observar la concordancia entre predicho y un número real de granos por  $m^2$ . Cambiar G2 (la cuarta variable en el archivo genético) a un valor obtenido por la multiplicación del cociente de granos ( $m^2$ ) observado y predicho, repetir y re-comparar según se considere necesario.
4. Examinar y observar la concordancia entre el peso del grano predicho y observado. Ajustar G3 (la quinta variable), a un valor obtenido por la multiplicación del cociente del peso del grano observado y predicho, repetir y re-comparar según sea considerado necesario.

Para el presente ensayo se utilizó el paso “a.” Para concluir ello se analizó la ubicación geográfica de la localidad de La Molina y se determinó que el fotoperiodo en dicho lugar es menor de 14 horas por tener latitud de  $12^\circ$  (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, 2002. Citado por SENAMHI, 2003).

#### **4.8. Validación del modelo CERES Maize**

El modelo CERES-Maize 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 híbrido. De esta forma se pudo cuantificar el grado de predicción del modelo de algunas variables como emergencia, día de la antesis, número final de hojas, índice de área foliar, número de granos por planta, peso seco a la madurez fisiológica, número final de hojas, entre otros. 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=Pi-M y O’i=Oi-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 maíz amarillo duro**

A partir de la serie histórica climatológica y de producción agrícola, se simuló la producción para los híbridos previamente calibrados, obteniéndose como resultado ensambles de récords históricos de cosechas para los híbridos experimentados. 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, 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 características climatológicas de las zonas de estudio 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 los eventos del ENSO.

#### **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 que es compatible con versiones de Excel 2003.

**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 maíz amarillo duro**

Después de haber calibrado y validado el modelo para los diferentes cultivares de maíz amarillo duro se utilizó el modelo CERES-Maize 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 los diferentes híbridos de maíz amarillo en estudio 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 las condiciones de la EEA-Donoso, las predicciones fueron analizadas comparando el rendimiento histórico modelado del periodo 1984 - 2014, con los mismos modelos y escenarios descritos anteriormente.

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 ( $\Delta$ ) 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:

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



## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Calibración del modelo CERES Maize

La calibración del modelo CERES-Maize fue efectuada con los datos de dos parcelas experimentales sembradas durante la campaña agrícola 2015-2016 y 2016-2017; el primer ensayo experimental fue sembrado durante la campaña agrícola 2015-2016 en las instalaciones de la Estación Experimental Agraria del INIA-La Molina (EEA-La Molina), donde fue conducido bajo riego por goteo, y se sembraron 01 parcela de validación (18-09-2015) y 02 parcelas de calibración (20-08-2015 y 19-10-2015). Las siembras de las parcelas de calibración se hicieron con un distanciamiento de 30 días con respecto a la parcela de validación, con la finalidad de identificar la variabilidad de los parámetros agronómicos con respecto al clima.

El otro ensayo experimental fue sembrado durante la campaña agrícola 2016-2017 en las instalaciones de la Estación Experimental Agraria del INIA-Donoso (EEA-Donoso), el cual fue conducido bajo riego por gravedad, y se sembraron 01 parcela de validación (10-10-2016) y 03 parcelas de calibración (10-08-2016; 12-09-2016 y 10-10-2015). Las siembras de las parcelas de calibración se hicieron con un distanciamiento de 30 días con respecto a la parcela de validación, esto es con la finalidad de evidenciar la variabilidad de todos los parámetros agronómicos con respecto al clima de la zona.

En la Tabla 12, se observa en el ensayo experimental realizado en la EEA-La Molina para los tres híbridos de Dekalb 7088; Dow 2B688 e INIA 619 el coeficiente genético P2 fue atribuido los valores de 1,1; 1,73 y 1,07, respectivamente; este es un valor predeterminado para híbridos tropicales y representa la sensibilidad manifiesta de la planta al aumento o disminución del fotoperiodo (Jones y Kiniry, 1986). En la Tabla 13, en el ensayo experimental realizado en la EEA-Donoso se observó el coeficiente genético P2 en los tres híbridos de Dekalb 7088; ADV 9559 e INIA 611 los siguientes valores de 1,1; 1,13 y 1,22.

Los coeficientes genéticos de P1; PHINT y P5 fueron ajustados por el método comparativo entre los datos observados en el campo y datos simulados. Se calibraron simultáneamente el P1 y PHINT con las variables de número final de hojas y día de la floración masculina, mientras que el P5 con el día de maduración fisiológica. 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 tal como fue sugerido por el especialista del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Edgardo Guevara.

Los coeficientes G2 y G3 se determinaron a partir de las variables: número de granos por planta, rendimiento y peso seco de grano. Las parcelas de experimentación fueron cultivadas a baja densidad y alta densidad, sin deficiencias de agua y nutrientes, cuando las temperaturas diarias medias oscilan entre 20°C a 30°C. Los sets de coeficientes genéticos fueron elegidos de las parcelas comparando los datos de alta densidad y baja densidad, tal como lo menciona Jones y Kiniry (1986).

Para realizar las calibraciones de los híbridos de maíz amarillo duro es recomendable trabajar con distintas fechas de siembra y densidades diferentes, ya que los modelos con los nuevos coeficientes calibrados deben ser capaces de captar las diferencias en fechas y densidades, es decir debemos trabajar en el ajuste hasta lograr un único juego de coeficientes por cada material genético y/o híbrido. En un estudio llevado a cabo al noreste de China, Liu et al. (2012) concluyeron que calibrar los 6 coeficientes de maíz no es suficiente para simular correctamente la biomasa aérea, el rendimiento y la absorción de nitrógeno, ya que

es necesario calibrar adicionalmente la eficiencia de uso de radiación (RUE), los grados día para la emergencia (GDDE), el coeficiente de estrés por nitrógeno (CTCNP2) y el factor de fertilidad del suelo (SLPF).

En las Tablas 12 y 13, se observan las variables (número final de hojas, rendimiento, número de granos, pesos seco de grano, emergencia, anthesis y maduración fisiológica, peso seco a la maduración fisiológica) que fueron usadas para realizar las comparaciones entre lo observado en el campo y lo simulado por el modelo, y los valores de los coeficientes genéticos para cada híbrido.

En la Tabla 12 se observa los coeficientes genéticos de los híbridos de maíz amarillo duro Dekalb 7088; Dow 2B688 e INIA 619, encontrándose para P1 valores entre 237,5; 236,4 y 258,9 y de PHINT valores entre 36,4; 34,4 y 42,2, respectivamente. Para el coeficiente genético P5 se encontraron valores entre 888,5; 910,5 y 853,2 y para G2 valores entre 1600; 1450 y 1125, respectivamente; también se observaron valores diferentes para G3 en Dekalb 7088=8,7; Dow 2B688=6,7 y INIA 619=9,6

En la Tabla 12, los valores de P1 y P5 encontrados en el experimento concuerdan con los hallados experimentalmente por Kiniry et al. (1997) los cuales encontraron valores para P1 entre 110 a 360 y para P5 entre 685 a 900, y que además fueron medidos para una gran variedad de cultivares que crecieron en ambientes controlados. Los valores de coeficientes genéticos fueron elegidos de las parcelas con alta y baja densidad y fueron similares a los diferentes experimentos de cultivares de maíz realizados por Jones y Kiniry (1986) que encontraron para G2 valores que oscilaron entre 520 a 834 y G3 entre 5.6 a 10.5. La tasa de crecimiento de los granos se estimó muestreando los granos del tercio medio de cada mazorca, comenzando 10 días después de la emisión del estigma y continuando hasta justo antes del inicio de la maduración fisiológica (Duncan y Hatfield, 1964).

En la Tabla 13, se observa los coeficientes genéticos para los híbridos Dekalb 7088; ADV 9559 e INIA 611 en donde se observa para P1 valores de 237,5; 255,7 y 281,8, respectivamente; y valores para PHINT de 36,4; 36,4 y 34,4; para el

coeficiente genético P5 valores diferentes de 882,5; 922,8 y 848,5. Para G2 se observaron valores diferentes de 1600; 525 y 750; estos coeficientes genéticos fueron similares con los observados en los diferentes experimentos de cultivares de maíz realizados por Jones y Kiniry (1986).

## **5.2. Validación del modelo CERES Maize**

La validación del modelo CERES-Maize propuesta en este estudio consiste en una comparación de los valores estimados (usando los códigos genéticos obtenidos en la calibración) con los observados en los experimentos realizados en las parcelas de experimentación de la EEA-La Molina y EEA-Donoso, donde se experimentaron diferentes niveles de nitrógeno; sin embargo, consideramos que sólo dos campañas agrícolas (2015-2016 y 2016-2017) no son suficientes para definir óptimamente esta comparación. Cuando se realiza la validación con experimentos de diferentes años, los resultados indican buena capacidad predictiva del modelo.

Con estos ensayos se pretendió determinar la capacidad de predicción del modelo en cuanto se refiere a diferentes niveles de nitrógeno establecidas para un sistema productivo de maíz amarillo duro en la costa central, ya que dentro de la validación de un modelo siempre es necesario realizar un análisis de sensibilidad a cambios bruscos que se puedan dar en el desarrollo normal de un cultivo, con el propósito de verificar cuan efectivas resultarían las predicciones del modelo en circunstancias no previstas para los términos de normalidad.

Tabla 12: Calibración del modelo CERES-Maize para determinar los coeficientes genéticos en tres híbridos de maíz amarillo duro en la estación experimental del INIA-La Molina. Campaña Agrícola 2015-2016.

Híbrido	Densidad (plantas/m <sup>2</sup> )	Comparación	Número final de hojas	Rendimiento (kg/ha)	Índice de cosecha	Número de granos (Nº granos/planta)	Peso seco de grano (gr)	Emergencia (dds)	Antesis (dds)	Madurez fisiológica (dds)	Peso seco maduración fisiológica (kg/ha)	Nitrogeno grano en maduración (%)	Coeficientes genéticos					
													P1	P2	P5	G2	G3	PHINT
Dekalb 7088	6,66	Observado 1	22,0	12418,4	0,7	668,7	0,3	11,0	83,0	146,0	18759,8	1,62	237,5	1,10	882,5	1600,0	8,7	36,43
		Simulado 1	21,8	10726,0	0,6	568,8	0,3	9,0	83,0	149,0	17206,0	1,70						
		Diferencia	0,2	1692,4	0,0	99,9	0,0	2,0	0,0	-3,0	1553,8	-0,08						
		%RMSE	0,5	9,6	4,2	10,6	0,7	12,9	0,0	1,5	5,9	3,49						
		Observado 2	24,0	7293,0	0,3	421,2	0,3	6,0	75,0	138,0	22562,0	2,10						
		Simulado 2	22,8	7029,0	0,5	414,7	0,3	8,0	74,0	128,0	13020,0	1,80						
	Diferencia	1,2	264,0	-0,2	6,5	0,0	-2,0	1,0	10,0	9542,0	0,30							
	%RMSE	3,5	2,6	47,5	1,1	1,8	23,6	0,9	5,1	29,9	10,10							
	Observado 1	22,0	10888,9	0,7	1187,5	0,3	11,0	83,0	146,0	15682,1	1,65							
	Simulado 1	21,8	9341,0	0,7	916,2	0,3	9,0	83,0	149,0	13598,0	1,70							
	Diferencia	0,2	1547,9	0,0	271,3	0,0	2,0	0,0	-3,0	2084,1	-0,05							
	%RMSE	0,5	10,1	0,7	16,2	8,7	12,9	0,0	1,5	9,4	2,14							
Observado 2	24,0	6281,1	0,3	693,4	0,3	6,0	75,0	137,0	18939,8	1,90								
Simulado 2	22,8	6654,0	0,6	799,6	0,3	8,0	74,0	128,0	10909,0	1,80								
Diferencia	1,2	-372,9	-0,3	-106,2	0,0	-2,0	1,0	9,0	8030,8	0,10								
%RMSE	3,5	4,2	59,2	10,8	5,1	23,6	0,9	4,6	30,0	3,72								
Dow 2B688	6,66	Observado 1	20,0	10064,9	0,5	537,4	0,3	12,0	84,0	144,0	20202,0	2,35	236,4	1,73	910,5	1450,0	6,7	34,4
		Simulado 1	23,0	10020,0	0,6	550,3	0,3	9,0	82,0	150,0	16852,0	1,70						
		Diferencia	-3,0	44,9	-0,1	-12,9	0,0	3,0	2,0	-6,0	3350,0	0,65						
		%RMSE	10,5	0,3	13,8	1,7	2,3	17,7	1,7	2,9	11,7	19,56						
		Observado 2	20,0	6492,5	0,3	330,8	0,3	5,0	74,0	131,0	22990,9	1,90						
		Simulado 2	24,0	5371,0	0,4	357,6	0,2	8,0	73,0	128,0	12306,0	1,80						
	Diferencia	-4,0	1121,5	-0,2	-26,8	0,1	-3,0	1,0	3,0	10684,9	0,10							
	%RMSE	14,2	12,2	38,6	5,7	16,9	42,4	1,0	1,6	32,9	3,72							
	Observado 1	20,0	8779,0	0,6	900,4	0,3	12,0	83,0	143,0	14133,2	2,13							
	Simulado 1	23,0	8896,0	0,7	910,7	0,3	9,0	82,0	150,0	13605,0	1,70							
	Diferencia	-3,0	-117,0	0,0	-10,3	0,0	3,0	1,0	-7,0	528,2	0,43							
	%RMSE	10,5	0,9	3,8	0,8	0,8	17,7	0,9	3,5	2,6	14,27							
Observado 2	20,0	4726,5	0,3	484,7	0,3	5,0	74,0	130,0	13743,2	2,24								
Simulado 2	24,0	5349,0	0,5	700,5	0,2	8,0	73,0	128,0	10484,0	1,80								
Diferencia	-4,0	-622,5	-0,2	-215,8	0,1	-3,0	1,0	2,0	3259,2	0,44								
%RMSE	14,2	9,3	34,1	31,5	14,8	42,4	1,0	1,1	16,8	13,89								
INIA 619	6,66	Observado 1	22,0	10060,7	0,4	476,5	0,3	14,0	88,0	146,0	24710,9	2,32	258,9	1,07	853,2	1125,0	9,6	42,2
		Simulado 1	20,5	8907,0	0,6	411,1	0,3	9,0	88,0	151,0	15375,0	1,70						
		Diferencia	1,5	1153,7	-0,2	65,4	0,0	5,0	0,0	-5,0	9335,9	0,62						
		%RMSE	4,9	8,1	29,9	9,7	1,5	25,3	0,0	2,4	26,7	18,90						
		Observado 2	22,0	5850,9	0,3	285,4	0,3	6,0	82,0	131,0	21710,9	2,13						
		Simulado 2	21,8	6003,0	0,5	362,5	0,2	8,0	80,0	130,0	12210,0	1,80						
	Diferencia	0,3	-152,1	-0,2	-77,1	0,1	-2,0	2,0	1,0	9500,9	0,33							
	%RMSE	0,8	1,8	58,6	19,1	13,9	23,6	1,7	0,5	30,9	10,96							
	Observado 1	22,0	7481,0	0,5	684,3	0,3	14,0	89,0	143,0	15756,5	1,97							
	Simulado 1	20,5	7876,0	0,7	624,6	0,4	9,0	88,0	151,0	11894,0	1,70							
	Diferencia	1,5	-395,0	-0,2	59,7	-0,1	5,0	1,0	-8,0	3862,5	0,27							
	%RMSE	4,9	3,7	27,8	6,2	11,7	25,3	0,8	4,0	17,3	9,69							
Observado 2	22,0	5157,0	0,4	503,8	0,3	6,0	82,0	131,0	14298,7	1,85								
Simulado 2	21,8	5738,0	0,6	632,9	0,3	8,0	80,0	130,0	10046,0	1,80								
Diferencia	0,3	-581,1	-0,2	-129,1	0,0	-2,0	2,0	1,0	4252,7	0,05								
%RMSE	0,8	8,0	41,1	18,1	7,4	23,6	1,7	0,5	21,0	1,91								

Tabla 13: Calibración del modelo CERES-Maize para determinar los coeficientes genéticos en tres híbridos de maíz amarillo duro en la estación experimental del INIA-Donoso Huaral. 2016-2017

Híbrido	Densidad	Comparación	Número final de hojas	Rendimiento (kg/ha)	Índice de cosecha	Número de granos (Nº granos/planta)	Peso seco de grano (gr)	Emergencia (dds)	Antes (dds)	Madurez fisiológica (dds)	Peso seco maduración fisiológica (kg/ha)	Índice de área foliar	Coeficientes genéticos					
													P1	P2	P5	G2	G3	PHINT
7,14	Observado 1	20,7	11635,4	0,6	698,6	0,2	9,0	86,0	153,0	18804,3	6,56	237,5	1,10	882,5	1600	8,7	36,4	
		Simulado 1	21,7	11727,0	0,5	517,4	0,3	10,0	86,0	151,0	25621,0							4,98
		Diferencia	-1,1	-91,6	0,2	181,2	-0,1	-1,0	0,0	2,0	-6816,7							1,58
	%RMSE	3,7	0,6	18,4	18,3	26,1	7,9	0,0	0,9	25,6	17,0							
	Observado 2	19,5	8774,4	0,6	449,3	0,3	9,0	84,0	135,0	15555,4	6,69							
		Simulado 2	21,7	8596,0	0,4	436,1	0,3	9,0	81,0	136,0	21703,0							5,11
		Diferencia	-3,2	178,4	0,2	13,2	0,0	0,0	3,0	-1,0	-6147,6							1,58
	%RMSE	12,2	1,4	21,1	2,1	1,1	0,0	2,5	0,5	27,9	16,7							
	Observado 3	19,0	8382,1	0,6	342,0	0,3	9,0	81,0	118,0	14285,8	6,61							
		Simulado 3	22,7	8535,0	0,4	481,3	0,2	8,0	76,0	126,0	21015,0							4,69
		Diferencia	-3,7	-152,9	0,2	-139,3	0,1	1,0	5,0	-8,0	-6729,2							1,92
	%RMSE	13,6	1,3	21,8	28,8	19,2	7,9	4,4	4,8	33,3	20,5							
5	Observado 1	21,3	8751,4	0,6	681,6	0,3	9,0	92,0	158,0	15080,0	4,8							
		Simulado 1	21,7	10615,0	0,5	686,4	0,3	10,0	86,0	151,0	21509,0	3,93						
		Diferencia	-0,4	-1863,6	0,1	-4,8	-0,1	-1,0	6,0	7,0	-6429,0	0,87						
	%RMSE	1,4	15,1	8,7	0,5	17,1	7,9	4,6	3,1	30,1	12,8							
	Observado 2	19,5	7328,4	0,5	465,2	0,3	9,0	88,0	135,0	14218,4	4,55							
		Simulado 2	21,7	8019,0	0,4	577,7	0,3	9,0	81,0	136,0	18299,0	4,07						
		Diferencia	-2,2	-690,6	0,1	-112,5	0,0	0,0	7,0	-1,0	-4080,6	0,48						
	%RMSE	8,0	6,7	10,6	17,1	8,4	0,0	5,6	0,5	20,3	7,5							
	Observado 3	18,0	5820,8	0,4	354,5	0,3	9,0	83,0	118,0	13211,2	4,04							
		Simulado 3	22,7	8058,0	0,4	645,3	0,2	8,0	76,0	126,0	18588,0	3,92						
		Diferencia	-4,7	-2237,2	0,0	-290,8	0,1	1,0	7,0	-8,0	-5376,8	0,12						
	%RMSE	18,3	27,2	1,1	58,0	16,9	7,9	6,0	4,8	28,8	2,1							
7,14	Observado 1	18,3	8232,2	0,4	349,3	0,3	9,0	92,0	162,0	19207,8	4,44							
		Simulado 1	22,9	8620,0	0,4	342,3	0,4	10,0	90,0	160,0	23674,0	5,16						
		Diferencia	-4,5	-387,8	0,1	7,0	0,0	-1,0	2,0	2,0	-4466,2	-0,72						
	%RMSE	17,5	3,3	10,7	1,4	5,3	7,9	1,5	0,9	16,4	11,5							
	Observado 2	19,0	8597,4	0,5	385,8	0,3	9,0	85,0	142,0	16577,4	5,59							
		Simulado 2	23,0	6324,0	0,3	290,3	0,3	9,0	84,0	144,0	20152,0	5,32						
		Diferencia	-4,0	2273,4	0,2	95,5	0,0	0,0	1,0	-2,0	-3574,6	0,27						
	%RMSE	14,9	18,7	27,9	17,5	1,2	0,0	0,8	1,0	15,2	3,4							
	Observado 3	18,0	5700,3	0,4	304,1	0,3	9,0	79,0	121,0	15161,4	4,77							
		Simulado 3	23,8	6325,0	0,3	318,7	0,3	8,0	79,0	135,0	19756,0	4,99						
		Diferencia	-5,8	-624,7	0,1	-14,6	0,0	1,0	0,0	-14,0	-4594,6	-0,22						
	%RMSE	22,8	7,7	10,5	3,4	4,6	7,9	0,0	8,2	21,4	3,3							
5	Observado 1	19,0	7572,0	0,5	440,6	0,3	9,0	94,0	162,0	14311,0	4,34							
		Simulado 1	22,9	8045,0	0,4	453,7	0,4	10,0	90,0	160,0	20455,0	4,24						
		Diferencia	-3,9	-473,0	0,1	-13,1	0,0	-1,0	4,0	2,0	-6144,0	0,1						
	%RMSE	14,4	4,4	18,2	2,1	2,2	7,9	3,0	0,9	30,4	1,6							
	Observado 2	19,0	7974,8	0,6	644,3	0,2	9,0	90,0	142,0	13160,8	4,29							
		Simulado 2	23,0	5872,0	0,3	382,8	0,3	9,0	84,0	144,0	16968,0	4,36						
		Diferencia	-4,0	2102,8	0,3	261,5	-0,1	0,0	6,0	-2,0	-3807,2	-0,07						
	%RMSE	14,9	18,6	30,3	28,7	16,9	0,0	4,7	1,0	20,5	1,2							
	Observado 3	19,0	4964,7	0,4	481,4	0,2	9,0	82,0	121,0	12645,3	3,33							
		Simulado 3	23,8	5940,0	0,3	425,0	0,3	8,0	79,0	135,0	17335,0	4,28						
		Diferencia	-4,8	-975,3	0,1	56,4	-0,1	1,0	3,0	-14,0	-4689,7	-0,95						
	%RMSE	17,9	13,9	9,0	8,3	25,1	7,9	2,6	8,2	26,2	20,2							
7,14	Observado 1	19,0	10369,4	0,7	448,2	0,3	9,0	93,0	164,0	15803,7	6,63							
		Simulado 1	25,5	9427,0	0,4	465,4	0,3	10,0	95,0	158,0	26111,0	5,49						
		Diferencia	-6,5	942,4	0,3	-17,2	0,0	-1,0	-2,0	6,0	-10307,3	1,14						
	%RMSE	24,1	6,4	31,8	2,7	8,4	7,9	1,5	2,6	46,1	12,2							
	Observado 2	21,0	9274,5	0,5	522,8	0,2	9,0	86,0	143,0	19443,0	7,7							
		Simulado 2	25,5	6986,0	0,3	405,4	0,2	9,0	87,0	142,0	22070,0	5,52						
		Diferencia	-4,5	2288,5	0,2	117,4	0,0	0,0	-1,0	1,0	-2627,0	2,13						
	%RMSE	15,1	17,4	23,7	15,9	1,6	0,0	0,8	0,5	9,6	19,7							
	Observado 3	20,0	6994,5	0,4	425,2	0,2	9,0	82,0	121,0	16989,7	6,26							
		Simulado 3	26,2	6911,0	0,3	433,6	0,2	8,0	81,0	132,0	21164,0	5,21						
		Diferencia	-6,2	-16,5	0,1	-8,4	0,0	1,0	1,0	-11,0	-4174,3	1,05						
	%RMSE	22,1	0,2	13,8	1,4	0,8	7,9	0,9	6,4	17,4	11,9							
5	Observado 1	18,7	7813,5	0,6	471,1	0,3	9,0	94,0	164,0	12999,5	4,36							
		Simulado 1	25,5	9042,0	0,4	633,9	0,3	10,0	95,0	158,0	22738,0	4,73						
		Diferencia	-6,8	-1228,6	0,2	-162,8	0,0	-1,0	-1,0	6,0	-9738,5	-0,37						
	%RMSE	25,8	11,1	23,9	24,4	9,9	7,9	0,8	2,6	53,0	6,0							
	Observado 2	19,0	6526,1	0,4	432,3	0,3	9,0	89,0	143,0	15258,0	3,98							
		Simulado 2	25,5	6748,0	0,3	566,0	0,2	9,0	87,0	142,0	19556,0	4,77						
		Diferencia	-6,5	-221,9	0,1	-133,7	0,0	0,0	2,0	1,0	-4098,0	-0,79						
	%RMSE	24,1	2,4	13,1	20,2	13,9	0,0	1,6	0,5	18,0	14,0							
	Observado 3	22,5	5827,5	0,5	562,1	0,2	9,0	81,0	121,0	12300,7	5,11							
		Simulado 3	26,2	6632,0	0,3	590,8	0,2	8,0	81,0	132,0	19077,0	4,64						
		Diferencia	-3,7	-804,5	0,1	-28,7	0,0	1,0	0,0	-11,0	-6776,3	0,47						
	%RMSE	11,8	9,8	18,8	3,6	5,9	7,9	0,0	6,4	39,0	6,5							

Tabla 14: Valores medios de los días a la emergencia observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro

Variable	Híbrido	Ensayo Experimental	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE	d	R <sup>2</sup>				
Emergencia (dds)	Dekalb 7088	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	7	9	28.6	19.8	0.62	1.00				
			N2 = 200 kg/ha	7	9	28.6							
			N3 = 240 kg/ha	7	9	28.6							
		EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	9	10	11.1							
			N2 = 240 kg/ha	9	10	11.1							
			N3 = 280 kg/ha	9	10	11.1							
	Dow 2B688	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	6	9	50.0	50.0	0.00	1.00				
			N2 = 200 kg/ha	6	9	50.0							
			N3 = 240 kg/ha	6	9	50.0							
	INIA 619	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	9	9	0.0	0.0	0.00	1.00				
			N2 = 200 kg/ha	9	9	0.0							
			N3 = 240 kg/ha	9	9	0.0							
		ADV 9559	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	9	10				11.1	11.1	0.00	1.00
				N2 = 240 kg/ha	9	10				11.1			
				N3 = 280 kg/ha	9	10				11.1			
INIA 611	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	9	10	11.1	11.1	0.00	1.00					
		N2 = 240 kg/ha	9	10	11.1								
		N3 = 280 kg/ha	9	10	11.1								

### 5.2.1. Días a la emergencia

En la Tabla 14, se observa para los cinco híbridos Dekalb 7088, Dow 2B688 e INIA 619 con niveles de fertilización de N1= 120 kg N/ha, N2= 200 kg N/ha, N3= 200 kg N/ha y Dekalb 7088, ADV 9559 e INIA 611 con niveles de fertilización de N1= 200 kg N/ha, N2= 240 kg N/ha, N3= 280 kg N/ha; valores observados y simulados iguales y con un porcentaje de desviación (PD) entre 0% a 50% lo que muestra una variabilidad moderada con las fechas de emergencia en cada tratamiento. Además hay que puntualizar que esta observación puede estar sujeta a varios errores de observación en el campo. Para el híbrido Dekalb 7088, en las dos parcelas experimentales, el RMSE entre lo observado y simulado por el modelo para cada tratamiento fue de 19.8%, por lo que la predicción del modelo para esta variable se considera buena; el índice de concordancia (d) y el coeficiente de determinación (r<sup>2</sup>) fueron de 0,62 y 1; respectivamente; considerados estadísticamente altos. Para el híbrido Dow 2B688, el RMSE entre lo observado y simulado por el modelo para cada tratamiento fue de 50 % y el índice de concordancia (d) es 0; por lo que la predicción del modelo para esta variable se considera deficiente; lo cual hace prever que la falla puede ser por las mediciones de campo o por las ecuaciones involucradas, así como los supuestos que toma en consideración el modelo; y el

coeficiente de determinación ( $r^2$ ) fue 1, considerado estadísticamente alto. Para los híbridos INIA 619, ADV 9559 e INIA 611 el RMSE entre lo observado y simulado por el modelo para cada tratamiento fue entre 0 a 11 % por lo que la predicción del modelo para esta variable se considera excelente; y el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) fue 1, considerado estadísticamente alto y el índice de concordancia (d) es 0.

### **5.2.2. Días a la antesis**

La fecha de la antesis depende del número total de hojas producidas por el meristemo apical; esta, a su vez, depende de la fecha de iniciación de la flor masculina. Por consiguiente, la exactitud con que el modelo predice la fecha de la antesis depende de su habilidad en simular el número total de hojas y la fecha de iniciación de la flor masculina. De igual forma, el intervalo de la época de la antesis hasta madurez fisiológica depende de la duración del retraso de la fase entre la antesis y el inicio del periodo de llenado del grano, así como también de la duración del ciclo efectivo de llenado. Para la predicción aproximada de la fecha de la antesis se requirió de la introducción de datos meteorológicos precisos, además de un correcto ajuste de los coeficientes genéticos P1 y P2.

La fecha de la antesis es una de las variables más importantes que se toman en cuenta, tanto mejoradores como productores de maíz, ya que es un indicador de la precocidad que tiene determinada variedad. Por lo tanto, resulta necesario establecer la predicción del modelo con respecto a esta variable. En la Tabla 15, podemos observar los datos observados y simulados de días a la floración en 5 híbridos de maíz amarillo duro, en donde la desviación porcentual (PD) es baja para todos los tratamientos. Ello nos indica que la predicción del modelo es aceptable; sin embargo, es necesario mencionar que el bajo número de muestras constituye una limitación.

En la Tabla 15, se observa para los híbridos Dekalb 7088, Dow 2B688, INIA 619, ADV 9559 e INIA 611, que los valores observados y simulados son casi similares y



con bajos un porcentaje de desviación (PD) de 0% lo que significa que la predicción de esta variable por parte del modelo es exacto.

Para el híbrido Dekalb 7088, se estimó un RMSE = 7,0 %, lo que significa que el modelo predice adecuadamente la fase de la antesis, aunado a los indicadores  $d=0.75$  y  $r^2=0.97$  considerados como altos. Para los híbridos Dow 2B688, INIA 619, ADV 959 e INIA 611 se halló un RMSE entre 1 a 3.6% y  $r^2$  igual 1, lo que significa que el modelo tiene una buena performance para la fase de la antesis; sin embargo el indicador  $d$  oscilo entre 0 a 0,47; lo que implica una mala comparación entre las dos variables (simulada y observada). Cabe señalar que esta observación puede realizado por más de un observador; por lo que es recomendable que una misma persona realice esta observación de principio a fin.

Tabla 15: Valores medios de los días a la floración masculina observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro.

Variable	Híbrido	Ensayo Experimental	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE	d	R <sup>2</sup>
Antesis (dds)	Dekalb 7088	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	81	79	-2.5	7.0	0.75	0.97
			N2 = 200 kg/ha	83	79	-4.8			
			N3 = 240 kg/ha	79	79	0.0			
		EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	95	86	-9.5			
			N2 = 240 kg/ha	94	86	-8.5			
			N3 = 280 kg/ha	94	86	-8.5			
	Dow 2B688	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	80	80	0.0	1.0	0.47	1.00
			N2 = 200 kg/ha	79	80	1.3			
			N3 = 240 kg/ha	79	80	1.3			
	INIA 619	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	84	84	0.0	1.0	0.00	1.00
			N2 = 200 kg/ha	85	84	-1.2			
			N3 = 240 kg/ha	83	84	1.2			
	ADV 9559	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	93	90	-3.2	3.6	0.21	1.00
			N2 = 240 kg/ha	94	90	-4.3			
			N3 = 280 kg/ha	93	90	-3.2			
INIA 611	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	92	95	3.3	2.6	0.27	1.00	
		N2 = 240 kg/ha	93	95	2.2				
		N3 = 280 kg/ha	93	95	2.2				

### 5.2.3. Maduración fisiológica

Para una predicción aproximada de esta variable se requiere de temperaturas máximas y mínimas, además de un correcto ajuste del coeficiente genético P5. Una consideración importante de modelo en relación a este dato es el hecho que el mismo puede resultar ser demasiado simple al predecir, en forma aproximada, la

fecha de madurez fisiológica a medida que las temperaturas mínimas se aproximen al punto de congelación.

Así mismo, se han identificado dos situaciones en las que el desarrollo fenológico considerado para el modelo parece ser inadecuado. Primero, la fecha de antesis y de la madurez fisiológica pueden ser sobre estimadas si los coeficientes genéticos son determinados en días largos en zonas templadas y que el cultivar se desarrolle en días cortos en los trópicos. Segundo, el modelo puede sobre estimar diferencias en el desarrollo fenológico entre las épocas de verano e invierno en los trópicos, especialmente si la diferencia en temperaturas medias entre las dos épocas es corta.

En la Tabla 16, podemos observar los datos observados y simulados de días a la maduración fisiológica en 5 híbridos de maíz amarillo duro en donde la desviación porcentual (PD) es baja para todos los tratamientos. Ello nos indica que la predicción del modelo en esta variable por parte del modelo es aceptable; así mismo es necesario mencionar que el bajo número de muestras constituye una limitación.

Para el híbrido Dekalb 7088, se halló un RMSE de 4,9 %, lo que significa que el modelo predice excelentemente la fase de maduración fisiológica, y con un índice de concordancia  $d=0.77$  y  $r^2=0.08197$  considerados como altos. Para los híbridos Dow 2B688, INIA 619, ADV 959 e INIA 611 se halló un RMSE entre 1,1 a 8,2% y  $r^2$  igual 1, lo que significa que el modelo predice excelentemente la fase de maduración fisiológica; sin embargo, el índice de concordancia  $d$  oscilo entre 0,43 a 0,48 no existe una buena comparación entre las dos variables (simulada y observada). Cabe señalar que esta observación puede estar sujeta a varios errores de observación en el campo.

Tabla 16: Valores medios de maduración fisiológica observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro.

Variable	Híbrido	Ensayo Experimental	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE	d	R <sup>2</sup>
Madurez Fisiológica (dds)	Dekalb 7088	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	149	138	-7.4	4.9	0.77	0.81
			N2 = 200 kg/ha	143	138	-3.5			
			N3 = 240 kg/ha	139	138	-0.7			
		EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	158	151	-4.4			
			N2 = 240 kg/ha	155	151	-2.6			
			N3 = 280 kg/ha	162	151	-6.8			
	Dow 2B688	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	160	140	-12.5	8.2	0.45	1.00
			N2 = 200 kg/ha	136	140	2.9			
			N3 = 240 kg/ha	145	140	-3.4			
	INIA 619	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	148	141	-4.7	3.5	0.48	1.00
			N2 = 200 kg/ha	140	141	0.7			
			N3 = 240 kg/ha	146	141	-3.4			
	ADV 9559	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	161	160	-0.6	1.1	0.47	1.00
			N2 = 240 kg/ha	160	160	0.0			
			N3 = 280 kg/ha	163	160	-1.8			
INIA 611	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	163	158	-3.1	2.6	0.43	1.00	
		N2 = 240 kg/ha	159	158	-0.6				
		N3 = 280 kg/ha	163	158	-3.1				

#### 5.2.4. Número final de hojas

Para el caso de la variable de número final de hojas, en la Tabla 17 se muestra los resultados obtenidos en campo y de la simulación, así como los indicadores estadísticos hallados. En cuanto a los híbridos Dekalb 7088 e INIA 619, la desviación tuvo un porcentaje bajo para los tratamientos en los que se probó los niveles de fertilización nitrogenada. Para estos híbridos el RMSE hallado fue entre 3,5% y 4,5%, y el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) entre 0,72 y 1,0; lo cual la simulación se considera como excelente el índice de concordancia (d) entre 0,08 y 0,44.

Para los híbridos Dow 2B688, ADV 959 e INIA 611 se halló un RMSE entre 18,8 a 37,1% y  $r^2$  entre 0,76 a 1,00, lo que significa que el modelo predice de manera justa y deficiente la fase de maduración fisiológica; esto puede ser por las mediciones de campo o por las ecuaciones involucradas, así como los supuestos que toma en consideración el modelo; así mismo el índice de concordancia **d** oscilo entre 0,01 a 0,06 no existe una buena comparación entre las dos variables (simulada y observada). Cabe señalar que esta observación puede estar sujeta a varios errores de observación en el campo.

Tabla 17: Valores medios de número final de hojas observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro.

Variable	Híbrido	Ensayo Experimental	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE	d	R <sup>2</sup>
Número final de hojas	Dekalb 7088	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	21.80	22.05	1.1	3.5	0.44	0.72
			N2 = 200 kg/ha	22.70	22.05	-2.9			
			N3 = 240 kg/ha	23.00	22.05	-4.1			
		EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	21.11	21.74	3.0			
			N2 = 240 kg/ha	21.44	21.74	1.4			
			N3 = 280 kg/ha	20.44	21.74	6.4			
	Dow 2B688	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	19.70	23.57	19.6			
			N2 = 200 kg/ha	19.70	23.57	19.6			
			N3 = 240 kg/ha	19.60	24.26	23.8			
	INIA 619	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	21.80	20.85	-4.4			
			N2 = 200 kg/ha	21.90	20.85	-4.8			
			N3 = 240 kg/ha	21.80	20.85	-4.4			
	ADV 9559	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	19.44	22.87	17.6			
			N2 = 240 kg/ha	19.11	22.87	19.7			
			N3 = 280 kg/ha	19.22	22.87	19.0			
INIA 611	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	18.66	25.48	36.5				
		N2 = 240 kg/ha	18.55	25.48	37.4				
		N3 = 280 kg/ha	18.55	25.48	37.4				

### 5.2.5. Índice de área foliar máximo

La tasa de fotosíntesis total es fuertemente dependiente del índice del área foliar (IAF). Esto es muy notable en valores de IAF inferiores a 2,0, donde la intercepción de la luz es una fuerte función del IAF. Por consiguiente, es importante para CERES-Maize simular de manera precisa el IAF.

Para el análisis de esta variable se comparó el máximo valor de área foliar observado y el máximo valor arrojado por la simulación (Tabla 18). El modelo DSSAT/CERES-Maize nos brinda resultados simulados de área foliar diarios, mientras que en la práctica el número de evaluaciones para obtener este dato es limitado, ya que resulta inviable realizar esta observación diariamente. Por esta razón, consideramos que existe la posibilidad de que el dato observado de máximo índice de área foliar no fuera exacto, pues el día preciso en el que la planta alcanzó esta condición podría no haber sido registrado. Ello podría explicar que los resultados del análisis estadístico no hayan sido satisfactorios, como se muestra en la Tabla 18.

En la Tabla 18, Para los híbridos Dekalb 7088, Dow 2B688, ADV 959 e INIA 619 se halló un RMSE entre 29,4% a 46,5% y un  $r^2$  variable entre 0,28 a 1,00; lo que

significa que el modelo predice de manera justa y deficiente el índice de área foliar máximo; así mismo el índice de concordancia (**d**) osciló entre 0,28 a 0,42 el cual indica que no existe una buena comparación entre las dos variables (simulada y observada). Para los híbridos ADV 9559 e INIA 611 se halló un RMSE de 15% y un  $r^2$  de 1.0, lo que significa que el modelo predice de manera justa el índice de área foliar máximo; el índice de concordancia (**d**) osciló entre 0,07 a 0,21.

En los híbridos en donde no existe asociación entre los valores observados y simulados del IAF es posible que estos resultados se hayan dado como consecuencia de errores en la toma de datos al momento de hacer las mediciones; no hubo una buena medición de las hojas inferiores de las plantas dado que se encontraban secas y frágiles, lo que en cierta forma complicaba su manejo y medición; y además el número de hojas observado en la mayoría de los casos fue de 20 hojas por planta, en tanto que el modelo simula para casi todos los tratamientos un número entre 20 a 25 hojas.

Tabla 18: Valores medios del índice de área foliar máximo observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro.

Variable	Híbrido	Ensayo Experimental	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE	d	R <sup>2</sup>
Índice de Área Foliar máximo	Dekalb 7088	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	5.25	3.40	-35.3	33.3	0.41	0.28
			N2 = 200 kg/ha	5.38	3.41	-36.6			
			N3 = 240 kg/ha	6.72	3.40	-49.4			
		EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	6.83	4.98	-27.0			
			N2 = 240 kg/ha	6.22	4.98	-19.9			
			N3 = 280 kg/ha	6.22	4.98	-19.9			
	Dow 2B688	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	4.26	3.82	-10.4	29.4	0.42	1.00
			N2 = 200 kg/ha	5.68	3.81	-32.9			
			N3 = 240 kg/ha	5.63	3.81	-32.3			
	INIA 619	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	5.42	3.45	-36.4	46.5	0.28	0.96
			N2 = 200 kg/ha	6.58	3.44	-47.8			
			N3 = 240 kg/ha	6.90	3.44	-50.2			
	ADV 9559	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	6.05	5.16	-14.7	15.0	0.07	1.00
			N2 = 240 kg/ha	6.03	5.16	-14.4			
			N3 = 280 kg/ha	6.12	5.16	-15.7			
INIA 611	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	6.45	5.49	-14.8	15.0	0.21	1.00	
		N2 = 240 kg/ha	6.25	5.49	-12.2				
		N3 = 280 kg/ha	6.64	5.49	-17.3				

### **5.2.6. Peso seco de la parte aérea a la maduración fisiológica**

La simulación aproximada 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 IAF se compararon los valores simulados y observados en la máxima acumulación de biomasa en madurez fisiológica para los 5 híbridos en estudio.

En la Tabla 19, para todos los híbridos Dekalb 7088, Dow 2B688, INIA 619, ADV 959 e INIA 619 se halló un RMSE entre 19,4% a 45,4% y un  $r^2$  variable entre 0,61 a 1,00; lo que significa que el modelo predice de manera justa y deficiente el peso seco de la parte aérea a la maduración fisiológica; así mismo el índice de concordancia (d) osciló entre 0,01 a 0,43 el cual no existe una buena comparación entre las dos variables (simulada y observada).

Durante esta fase fenológica no se contó con estufas en el tiempo previsto, por lo que las muestras de materia seca no se secaron homogéneamente, sobre todo en las últimas evaluaciones. 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.

Tabla 19: Valores medios de los pesos secos de la parte aérea a la maduración fisiológica observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro.

Variable	Híbrido	Ensayo Experimental	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE	d	R <sup>2</sup>
Peso seco de la parte aérea (kg/ha)	Dekalb 7088	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	20.430.38	17.361.00	-15.0	30.8	0.01	0.61
			N2 = 200 kg/ha	21.908.00	17.363.00	-20.7			
			N3 = 240 kg/ha	23.319.15	17.357.00	-25.6			
		EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	16.457.38	25.631.00	55.7			
			N2 = 240 kg/ha	18.418.28	25.635.00	39.2			
			N3 = 280 kg/ha	20.287.78	25.639.00	26.4			
	Dow 2B688	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	19.205.90	18.141.00	-5.5	19.4	0.43	0.95
			N2 = 200 kg/ha	22.926.70	18.122.00	-21.0			
			N3 = 240 kg/ha	23.579.80	18.124.00	-23.1			
	INIA 619	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	21.873.68	15.995.00	-26.9	33.3	0.24	0.64
			N2 = 200 kg/ha	24.877.64	15.986.00	-35.7			
			N3 = 240 kg/ha	24.591.45	15.976.00	-35.0			
	ADV 9559	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	16.070.85	23.674.00	47.3	45.4	0.04	1.00
			N2 = 240 kg/ha	16.247.27	23.674.00	45.7			
			N3 = 280 kg/ha	16.549.65	23.674.00	43.0			
INIA 611	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	17.315.19	26.115.00	50.8	42.5	0.27	1.00	
		N2 = 240 kg/ha	17.365.26	26.115.00	50.4				
		N3 = 280 kg/ha	20.638.73	26.115.00	26.5				

### 5.2.7. Número de granos por planta

La producción de grano es la variable más importante en todo experimento. Su predicción es afectada virtualmente por cada proceso simulado por el modelo. El parámetro número de granos por planta es crucial para determinar si el modelo predice óptimamente el rendimiento de un cultivar de maíz, ya que tiene incidencia directa en el cálculo del rendimiento. Así mismo, el número de grano es un componente importante en el rendimiento, siendo muy sensible al estrés ambiental cuando está cerca al inicio de la espiga. Cuando el número de granos es reducido como consecuencia del estrés, el tamaño disminuye y la producción potencial de grano se reduce.

En la Tabla 20, para todos los híbridos Dekalb 7088 e INIA 619, se halló un RMSE entre 31,1% a 33,5% y un  $r^2$  variable entre 0,37 a 0,90; lo que significa que el modelo predice de manera justa a deficiente el número de granos por planta; así mismo el índice de concordancia (d) oscilo entre 0,0 a 0,21 el cual no existe una buena comparación entre las dos variables (simulada y observada). Así mismo para el Dow 2B688 se halló un RMSE de 91,2%, lo que significa que el modelo

predice de manera deficiente el número de granos por planta; así mismo el índice de concordancia (d) fue de 0.09 y el  $r^2$  de 0 el cual no existe una buena comparación entre las dos variables (simulada y observada). Cabe señalar que esta observación pudo estar sujeta a varios errores de observación en el campo.

Para los híbridos ADV 9559 e INIA 611 se halló un RMSE entre 7,3% a 13,3% y un  $r^2$  de 1, lo que significa que el modelo predice de bueno a excelente el número de granos por planta; así mismo el índice de concordancia (d) oscilo entre 0,22 a 0,48 el cual no existe una buena comparación entre las dos variables (simulada y observada).

Tabla 20: Valores medios de los números de granos por planta observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro

Variable	Híbrido	Ensayo Experimental	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE	d	R <sup>2</sup>
Número de granos por planta	Dekalb 7088	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	485.10	669.90	38.1	31.1	0.00	0.90
			N2 = 200 kg/ha	459.70	669.70	45.7			
			N3 = 240 kg/ha	434.80	670.00	54.1			
		EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	642.67	517.40	-19.5			
			N2 = 240 kg/ha	642.67	517.40	-19.5			
			N3 = 280 kg/ha	577.64	514.40	-10.9			
	Dow 2B688	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	329.23	617.50	87.6	91.2	0.09	0.00
			N2 = 200 kg/ha	339.06	616.70	81.9			
			N3 = 240 kg/ha	300.59	616.90	105.2			
	INIA 619	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	313.27	400.90	28.0	33.5	0.21	0.37
			N2 = 200 kg/ha	281.09	400.80	42.6			
			N3 = 240 kg/ha	308.71	400.80	29.8			
	ADV 9559	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	404.99	342.30	-15.5	13.3	0.22	1.00
			N2 = 240 kg/ha	390.82	342.30	-12.4			
			N3 = 280 kg/ha	385.97	342.30	-11.3			
INIA 611	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	473.58	465.40	-1.7	7.3	0.48	1.00	
		N2 = 240 kg/ha	430.30	465.40	8.2				
		N3 = 280 kg/ha	423.03	465.40	10.0				

### 5.2.8. Peso seco de grano

Tal como el número de granos por planta, el peso seco de grano tiene una relación directamente proporcional con el rendimiento, por lo que su validación es crucial para la aceptación de un modelo de simulación.



En este caso, en la Tabla 21 se puede observar que el modelo CERES-Maize puede predecir forma adecuada el peso seco de grano para los híbridos de Dekalb 7088, Dow 2B688, INIA 619, ADV 959 e INIA 611, hallándose un RMSE entre 9,3% a 19,7%, lo que significa que el modelo predice de manera buena el peso seco de granos; así mismo, el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) fue variable entre 0,0 a 1,00; y el índice de concordancia (d) oscilo entre 0,17 a 0,40.

Tabla 21: Valores medios de los pesos secos de granos observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro.

Variable	Híbrido	Ensayo Experimental	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE	d	R <sup>2</sup>
Peso seco de granos (g)	Dekalb 7088	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	0.246	0.221	-10.0	19.7	0.32	0.00
			N2 = 200 kg/ha	0.271	0.221	-18.4			
			N3 = 240 kg/ha	0.270	0.221	-18.0			
		EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	0.241	0.319	32.3			
			N2 = 240 kg/ha	0.265	0.319	20.3			
			N3 = 280 kg/ha	0.280	0.319	14.1			
	Dow 2B688	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	0.294	0.247	-16.1	14.3	0.17	0.98
			N2 = 200 kg/ha	0.284	0.247	-13.0			
			N3 = 240 kg/ha	0.285	0.247	-13.5			
	INIA 619	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	0.297	0.334	12.6	9.3	0.31	0.11
			N2 = 200 kg/ha	0.313	0.334	6.9			
			N3 = 240 kg/ha	0.310	0.334	7.6			
	ADV 9559	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	0.304	0.355	16.8	11.0	0.40	1.00
			N2 = 240 kg/ha	0.322	0.355	10.1			
			N3 = 280 kg/ha	0.343	0.355	3.3			
INIA 611	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	0.302	0.285	-5.5	13.1	0.39	1.00	
		N2 = 240 kg/ha	0.327	0.285	-12.8				
		N3 = 280 kg/ha	0.343	0.285	-16.9				

### 5.2.9. Rendimiento

El rendimiento constituye la variable más importante en términos de predicción, ya que es la que en último término define la aceptación de determinada tecnología por parte de los agricultores. A pesar de que las pruebas estadísticas (Tabla 22) muestran que en algunos híbridos los valores simulados son cercanos a los reales, en otros se aprecian diferencias considerables entre estos.

En la Tabla 22 se puede observar que el modelo CERES-Maize puede predecir de adecuadamente el rendimiento para los híbridos Dekalb 7088, ADV 9559 e INIA 611 debido a que el RMSE entre 5,9 % a 14,2%, lo que significa que el modelo predice de manera buena a excelente los rendimientos; así mismo el coeficiente de

determinación ( $r^2$ ) fue entre 0.97 a 1.00, y el índice de concordancia (d) osciló entre 0,21 a 0,78.

Sin embargo, no se determinó un buen ajuste del modelo para los híbridos Dow 2B688, INIA 619 porque RMSE osciló entre 44.5 % a 65%, lo que significa que el modelo tiene una mala predicción para el rendimientos; así mismo el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) fue entre 0,22 a 0,89, y el índice de concordancia (d) osciló entre 0,08 a 0,14.

Tabla 22: Valores medios de los rendimientos observados y simulados con el modelo CERES-Maize para cinco híbridos de maíz amarillo duro.

Variable	Híbrido	Ensayo Experimental	Tratamientos	observado	simulado	PD (%)	RMSE	d	R <sup>2</sup>
Rendimiento (kg/ha)	Dekalb 7088	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	7.952.12	9.936.00	24.9	14.2	0.78	0.97
			N2 = 200 kg/ha	8.306.00	9.932.00	19.6			
			N3 = 240 kg/ha	7.819.68	9.925.00	26.9			
		EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	11.072.41	11.728.00	5.9			
			N2 = 240 kg/ha	12.027.18	11.728.00	-2.5			
			N3 = 280 kg/ha	11.542.49	11.728.00	1.6			
	Dow 2B688	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	6.455.03	10.212.00	58.2	65.0	0.14	0.22
			N2 = 200 kg/ha	6.408.47	10.193.00	59.1			
			N3 = 240 kg/ha	5.711.25	10.195.00	78.5			
	INIA 619	EEA La Molina	N1 = 120 kg/ha	6.201.17	8.979.00	44.8	44.5	0.08	0.89
			N2 = 200 kg/ha	6.058.26	8.980.00	48.2			
			N3 = 240 kg/ha	6.387.53	8.972.00	40.5			
	ADV 9559	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	8.782.64	8.620.00	-1.9	5.9	0.44	1.00
			N2 = 240 kg/ha	8.994.46	8.620.00	-4.2			
			N3 = 280 kg/ha	9.459.33	8.620.00	-8.9			
INIA 611	EEA Donoso	N1 = 200 kg/ha	10.213.06	9.427.00	-7.7	7.8	0.21	1.00	
		N2 = 240 kg/ha	10.059.96	9.427.00	-6.3				
		N3 = 280 kg/ha	10.379.12	9.427.00	-9.2				

### 5.2.10. Índice de área foliar

Para el híbrido Dekalb 7088, el índice de área foliar fue calculado en los dos ensayos experimentales de la EEA-La Molina y EEA-Donoso, en la EEA-La Molina se realizaron 18 evaluaciones y en la EEA-Donoso se llevó en 5 evaluaciones; en la EEA-Donoso no se contó con el soporte logístico deseado para realizar estas evaluaciones; estas mediciones se hicieron a lo largo de la campaña de cada uno de los ensayos. En el gráfico de correlación (Figura 10) se observa en las evaluaciones de la EEA-La Molina y en los diferentes niveles de fertilización un coeficiente de determinación cercano a 1.

En la EEA-La Molina, para los diferentes niveles de fertilización de N1=120 Kg N, N2=200 Kg N y N3=240 Kg N los coeficientes de determinación ( $r^2$ ) fueron de 0,97, 0,99 y 0,97; respectivamente; sin embargo en la EEA-Donoso, para los diferentes niveles de fertilización de N1=200 Kg N, N2=240 Kg N y N3=280 Kg N los coeficientes de determinación ( $r^2$ ) fueron de 0,79; 0,80 y 0,80; respectivamente. Podemos concluir que el modelo lineal es adecuado para describir la relación que existe entre lo observado y simulado; sin embargo, si añadimos a esta información cuantitativa sobre la que basamos nuestro análisis, la representación gráfica de los datos y la recta de regresión estimada para cada observación podríamos concluir que los datos de la EEA-La Molina son los que se asemejan a la realidad.

En la Figura 11, se observa la correlación entre Índice de área foliar observada y simulada con el modelo CERES-Maize de cuatro híbridos de maíz amarillo duro (Dow 2B 288, INIA 619, ADV 9559 y INIA 611) fertilizadas con tres niveles de nitrógeno (EEA-La Molina: N1: 120 Kg N; N2: 200 Kg N y N3: 240 Kg N y EEA-Donoso: N1: 200 Kg N; N2: 240 Kg N y N3: 280 Kg; en donde los híbridos sembrados en la EEA-La Molina (Dow 2B 688 y INIA 619) fueron los que obtuvieron los mayores coeficientes de determinación ( $r^2$ ) en comparación a los híbridos sembrados en la EEA-Donoso (ADV 9559 y INIA 611).

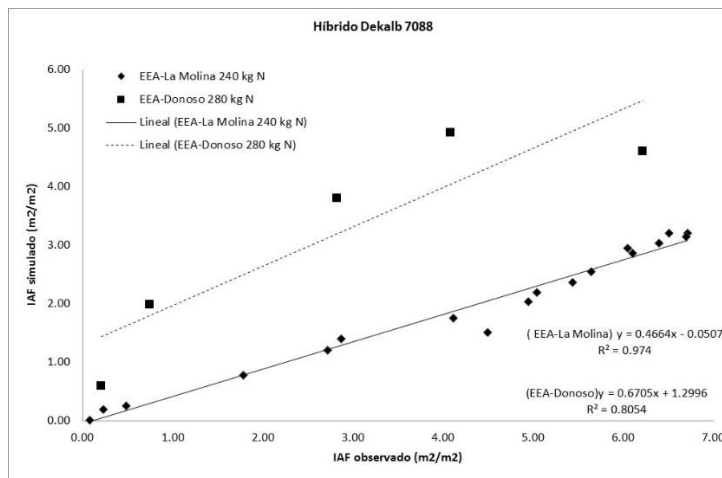
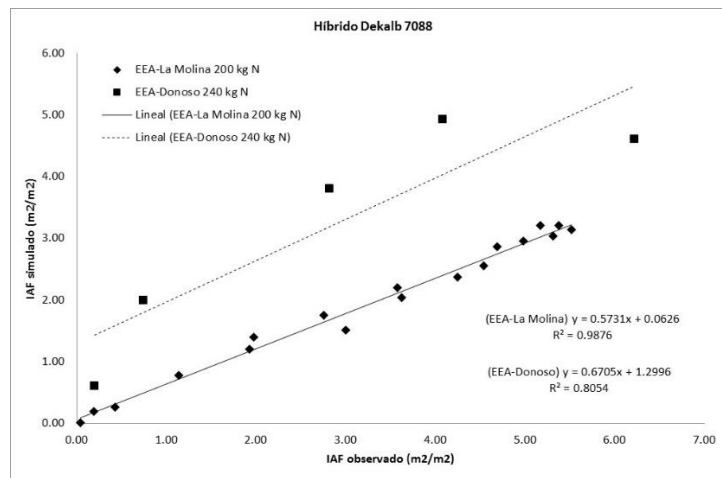
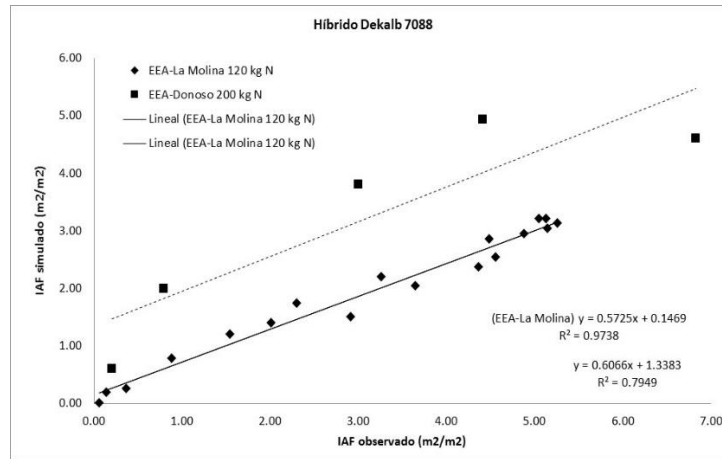


Figura 10: Gráfico de correlación del índice de área foliar observada y simulada con el modelo CERES-Maize para Dekalb 7088, bajo tres niveles de fertilización nitrogenada (N1: 120 kg/ha, N2: 200 kg/ha y N3: 240 kg/ha).

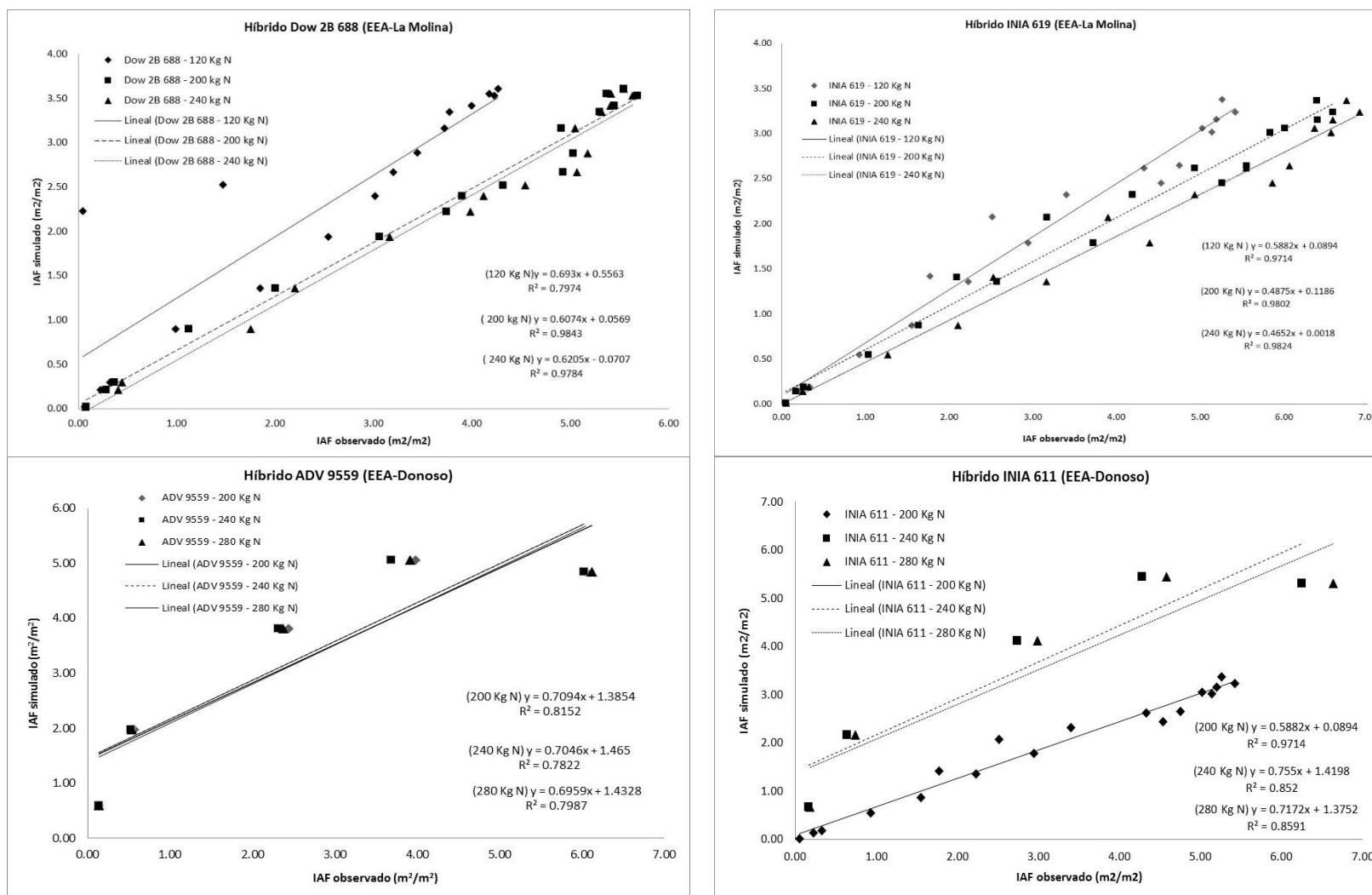


Figura 11: Índice de área foliar observada y simulada con el modelo CERES-Maize de cuatro híbridos de maíz amarillo duro (Dow 2B 288, INIA 619, ADV 9559 y INIA 611) fertilizadas con tres niveles de nitrógeno (EEA-La Molina: N1: 120 Kg N; N2: 200 Kg N y N3: 240 Kg N)

### **5.2.11. Materia seca de la parte aérea de la planta**

Para el híbrido Dekalb 7088, la materia seca de la parte aérea de la planta fue calculado en los dos ensayos experimentales de la EEA-La Molina y EEA-Donoso, en la EEA-La Molina se realizaron 9 evaluaciones y en la EEA-Donoso se llevó en 8 evaluaciones; igualmente en la EEA-Donoso no se contó con el soporte logístico para realizar estas evaluaciones. En el gráfico de correlación (Figura 12) se observa en las evaluaciones de la EEA-La Molina y la EEA-Donoso en los diferentes niveles de fertilización altos coeficiente de determinación ( $r^2$ ) cercano a 1.

En la Figura 13, se observa la correlación entre la biomasa observada y simulada con el modelo CERES-Maize de cuatro híbridos de maíz amarillo duro (Dow 2B 288, INIA 619, ADV 9559 y INIA 611) fertilizadas con tres niveles de nitrógeno (EEA-La Molina: N1: 120 Kg N; N2: 200 Kg N y N3: 240 Kg N y EEA-Donoso: N1: 200 Kg N; N2: 240 Kg N y N3: 280 Kg; en donde los híbridos sembrados en la EEA-La Molina (Dow 2B 688 y INIA 619) fueron los que obtuvieron los mayores coeficientes de determinación ( $r^2$ ) en comparación a los híbridos sembrados en la EEA-Donoso (ADV 9559 y INIA 611).

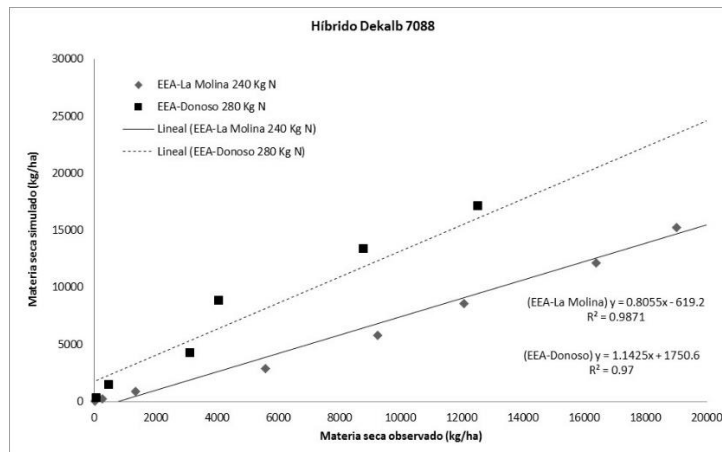
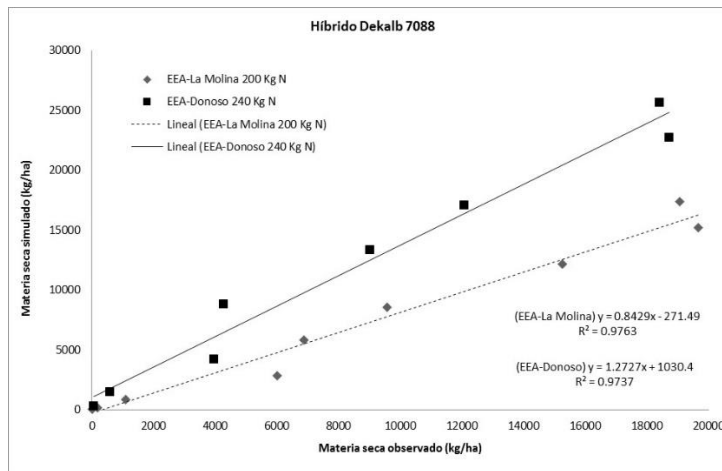
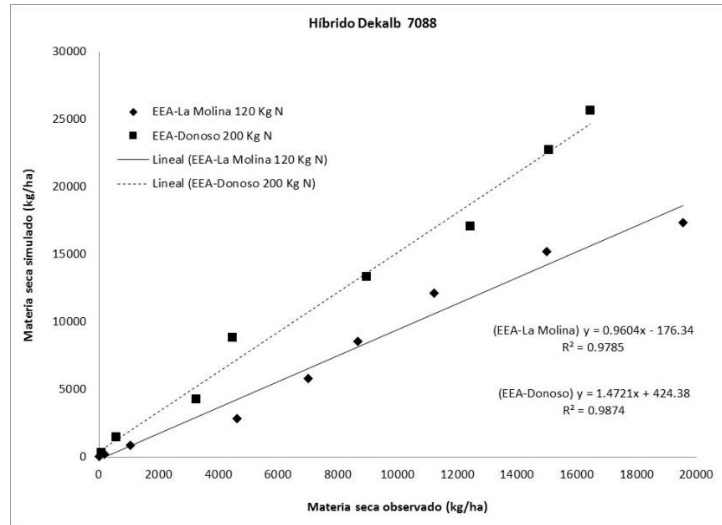


Figura 12: Gráfico de correlación de la biomasa observada y simulada con el modelo CERES-Maize para Dekalb 7088, bajo tres niveles de fertilización nitrogenada (N1: 120 kg/ha, N2: 200 kg/ha y N3: 240 kg/ha).

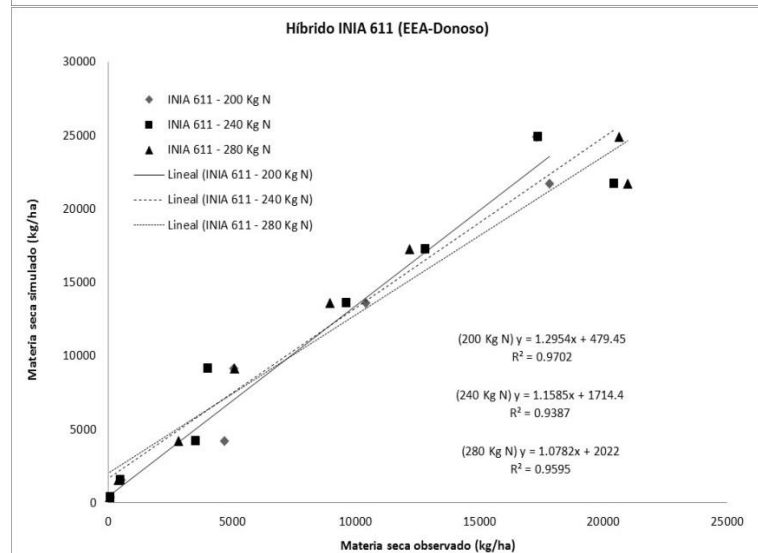
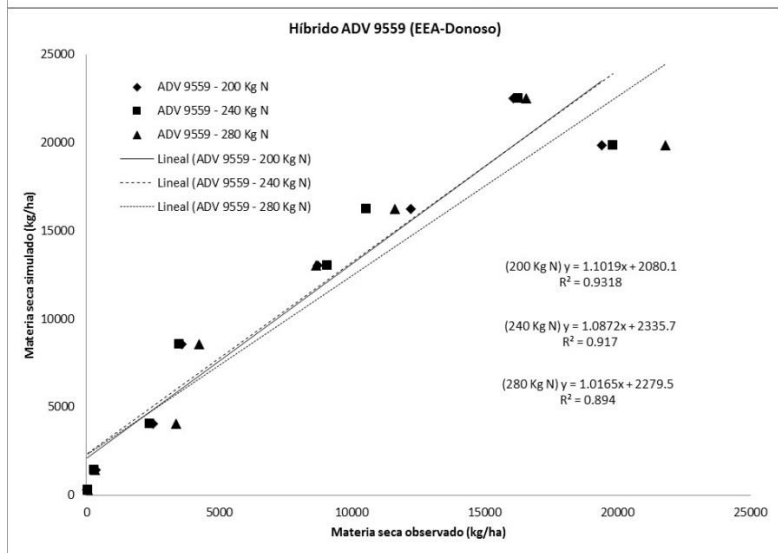
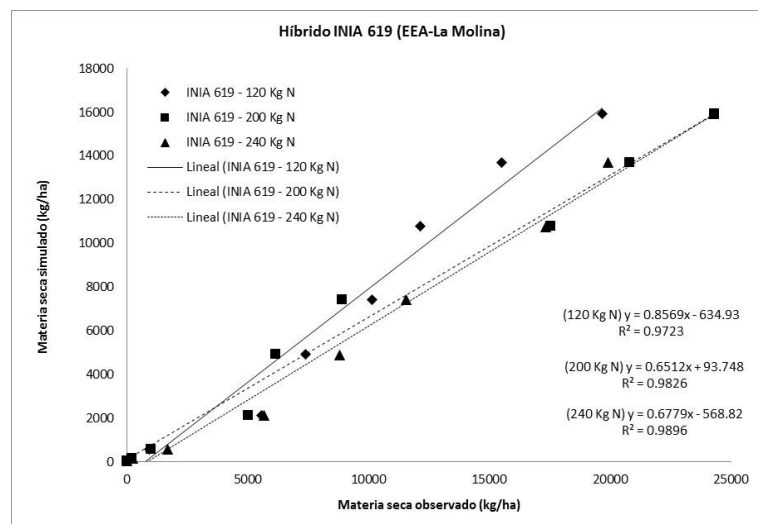
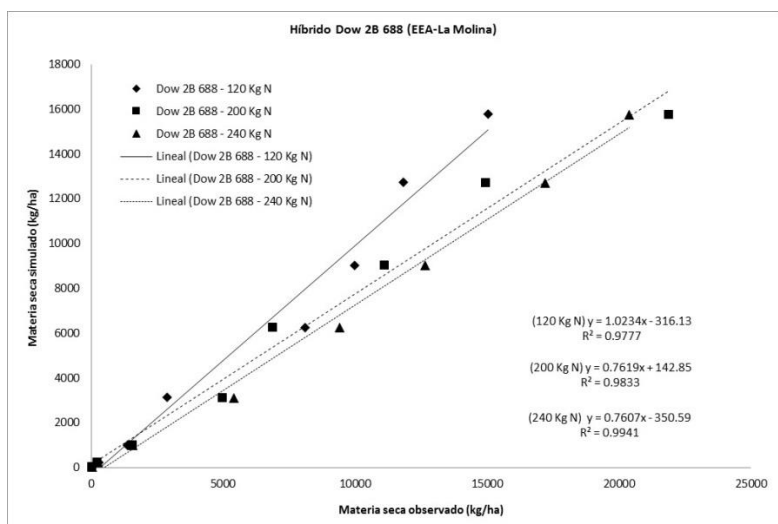


Figura 13: Índice de área foliar observada y simulada con el modelo CERES-Maize de cuatro híbridos de maíz amarillo duro (Dow 2B 288, INIA 619, ADV 9559 y INIA 611) fertilizadas con tres niveles de nitrógeno (EEA-La Molina: N1: 120 Kg N; N2: 200 Kg N y N3: 240 Kg N)



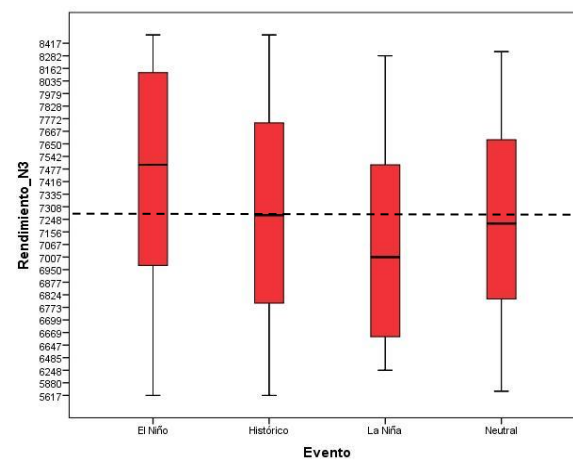
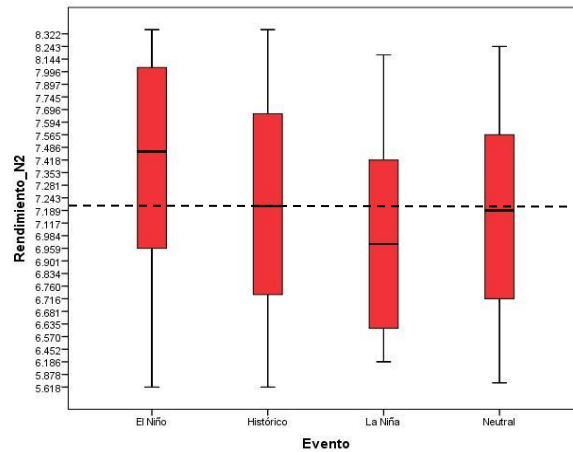
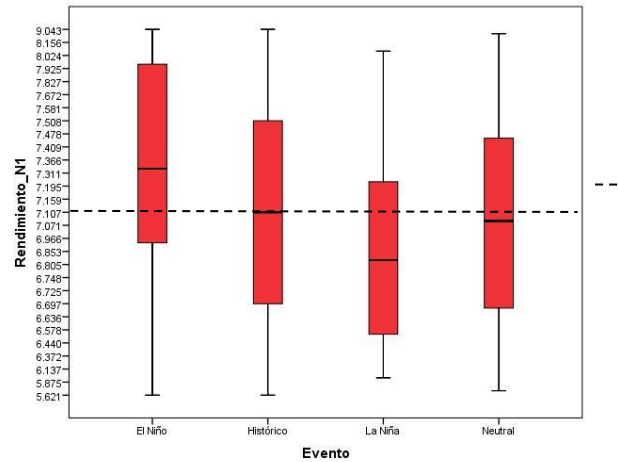
### **5.3. Variabilidad climática en el maíz amarillo duro**

En la Figura 14, se presentan los rendimientos simulados para el maíz híbrido Dekalb 7088, en las condiciones de la EEA-La Molina, durante la serie histórica 1930-2016 y las fases extremas del ENSO. Los resultados de las simulaciones fueron previamente analizados y organizados en un programa estadístico (IBM SPSS Statistics 22). Se presentaron los rendimientos del Dekalb 7088 en diferentes niveles de nitrógeno (N1: 120 Kg N, N2: 200 Kg N, N3: 240 Kg N) para cuatro escenarios climáticos: a) el conjunto de años del registro histórico (1930 – 2016), b) los eventos El Niño (20 en total de la serie histórica), c) los eventos La Niña (18 en total de la serie histórica y d) eventos de años neutrales (49 en total). Es importante mencionar que no existieron diferencias estadísticas en el rendimiento obtenido bajo el efecto de las 3 dosis nitrogenadas, lo cual se analizará el efecto de la variabilidad climática con el promedio de estos 3 rendimientos.

La Figura 14, muestra en los diferentes niveles de nitrógeno una leve disminución de los rendimientos (145,4 kg/ha) en los eventos La Niña respecto al promedio histórico que resultó 7178,5 kg/ha; así mismo los rendimientos se incrementaron levemente respecto al histórico para las fases El Niño en 263,7 kg/ha y para los años neutrales los rendimientos tuvieron un comportamiento similar al histórico.

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.

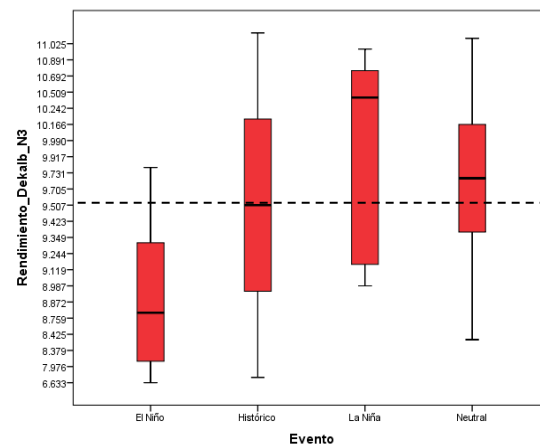
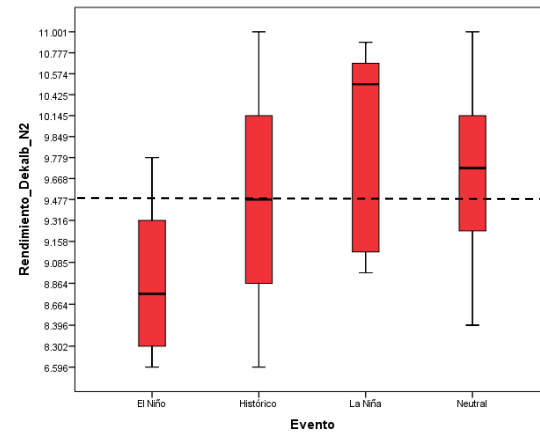
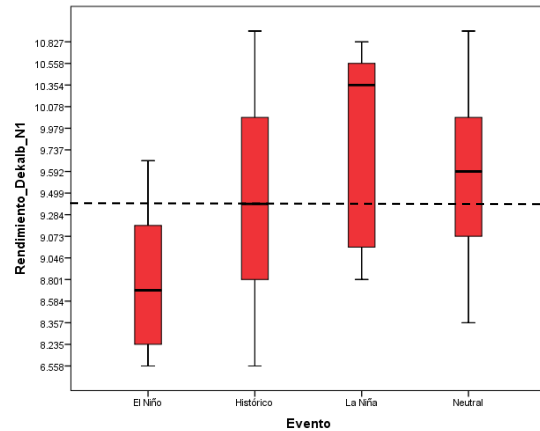
Figura 14. Diagrama de cajas y bigotes de los rendimientos simulados para el maíz híbrido Dekalb 7080, en la EEA-La Molina, para la serie histórica 1930-2016 y las fases extremas del ENSO ( 20 años Niño y 18 años Niña). La línea negra dentro de la caja representa la mediana. El extremo superior (inferior) de la caja representa el percentil 75(25). El bigote (inferior) representa el percentil 95(5).



En la Figura 15, se presentan los rendimientos simulados para el maíz híbrido Dekalb 7088, en las condiciones de la EEA-Donoso, durante la serie histórica 1930-2016 y las fases extremas del ENSO. Para este análisis de impacto de la variabilidad climática, se presentaron los rendimientos del Dekalb 7088 en 3 distintos niveles de nitrógeno (N1: 200 Kg N, N2: 240 Kg N, N3: 280 Kg N) para cuatro escenarios climáticos: a) el conjunto de años del registro histórico (1984-1916), b) los eventos El Niño (10 en total de la serie histórica), c) los eventos La Niña (6 en total de la serie histórica y d) eventos de años neutrales 17 en total).

En esa misma figura se puede apreciar en los diferentes niveles de nitrógeno una disminución significativa (-834,17 kg/ha) de los rendimientos en los eventos del Niño con respecto al histórico que resultó 9441,2 kg/ha; un aumento muy significativo (+616,9 kg/ha) en los eventos de La Niña; y en menor medida un aumento de los rendimientos en años neutros (+1873 kg/ha). Esta diferencia de los impactos en los rendimientos de la EEA - La Molina y EEA – Donoso se debe a las diferencias geográficas y topográficas de estos dos puntos, y a la respuesta ambiental ante los eventos del ENSO (Magrín et al. 1998). La producción de maíz en grano pudo haberse beneficiado de la disminución de los déficits de radiación y del aumento de las limitaciones de la temperatura de crecimiento (Holzkamper et al. 2015) en la EEA La Molina. Reforzando la idea de la variabilidad de los impactos en una zona, Yzarra et al (2015) estudió el efecto de los años ENSO en el rendimiento del cultivo de maíz amarillo duro (todos los híbridos en general) en la región de Lima, concluyendo que en los años de El Niño, el 35 % de las cosechas de maíz amarillo se consideraron como rendimientos bajos, el 42% como rendimientos medios y el 23% como rendimientos altos; en eventos de La Niña se observó que 23% de las cosechas fueron consideradas como de rendimientos bajos, el 41 % de rendimientos medios y el 36% de rendimientos altos. Estas diferencia de 12% en rendimientos altos tanto para el efecto de un Niño y una Niña no se puede considerar muy significativa, y se determinará en efecto negativo o positivo para una región.

Figura 15. Diagrama de cajas y bigotes de los rendimientos simulados para el maíz híbrido Dekalb 7080, en la EEA-Donoso, para la serie histórica 1984-2016 y las fases extremas del ENSO (10 años Niño y 6 años Niña). La línea negra dentro de la caja representa la mediana. El extremo superior (inferior) de la caja representa el percentil 75(25). El bigote (inferior) representa el percentil 95(5).



En la Figura 16, se presentan los rendimientos simulados para el maíz híbrido ADV 9559, en las condiciones de la EEA-Donoso, durante la serie histórica 1930 - 2016 y las fases extremas del ENSO. De igual forma al híbrido anterior, la Figura 16 presenta los rendimientos del ADV 9559 en 3 distintos niveles de nitrógeno (N1: 200 Kg N, N2: 240 Kg N, N3: 280 Kg N) para cuatro escenarios climáticos: a) el conjunto de años del registro histórico (1984 - 1916), b) los eventos El Niño (10 en total de la serie histórica), c) los eventos La Niña (6 en total de la serie histórica y d) eventos de años neutrales 17 en total).

Con respecto al potencial de rendimiento obtenido en estos escenarios climáticos, se puede apreciar la misma tendencia del híbrido Dekalb 7088 bajo estas condiciones agroclimáticas; un aumento significativo de los rendimientos en años de La Niña y años Neutrales (en menor medida) con respecto al promedio histórico que resultó de 6684,7 kg/ha; y una disminución de los rendimientos en años de El Niño (aproximadamente – 300 kg/ha). Esto se podría deber a que este híbrido tiene características de un mejor desarrollo bajo temperaturas semi cálidas (18 – 25° C), pero respaldado de una buena calidad de radiación fotosintética. Bajo condiciones de El Niño existen altas anomalías positivas en las temperaturas que afectarían la aceleración de las fases fenológicas de crecimiento y reproducción disminuyendo el tiempo necesario para el llenado de granos, dando como resultado rendimientos menores a lo normal.

Finalmente en la Figura 17, se presentan los rendimientos simulados para el maíz híbrido INIA 611, en las condiciones de la EEA-Donoso, durante la serie histórica 1930 - 2016 y las fases extremas del ENSO. Este híbrido a diferencia de los otros sembrados en Huaral, se aprecia una disminución leve de los rendimientos en los años de El Niño (-178,5 kg/ha); un leve aumento de los rendimientos en eventos de la Niña y años neutrales a comparación de los otros híbridos.

Finalmente en la Figura 17, se presentan los rendimientos simulados para el maíz híbrido INIA 611, en las condiciones de la EEA-Donoso, durante la serie histórica 1930 - 2016 y las fases extremas del ENSO. Este híbrido a diferencia de los otros sembrados en Huaral, se aprecia una disminución leve de los rendimientos en los

años de El Niño (-178,5 kg/ha); un leve aumento de los rendimientos en eventos de la Niña y años neutrales a comparación de los otros híbridos.

Figura 16. Diagrama de cajas y bigotes de los rendimientos simulados para el maíz híbrido ADV 9559, en la EEA-Donoso, para la serie histórica 1984-2016 y las fases extremas del ENSO (10 años Niño y 6 años Niña). La línea negra dentro de la caja representa la mediana. El extremo superior (inferior) de la caja representa el percentil 75(25). El bigote (inferior) representa el percentil 95(5).

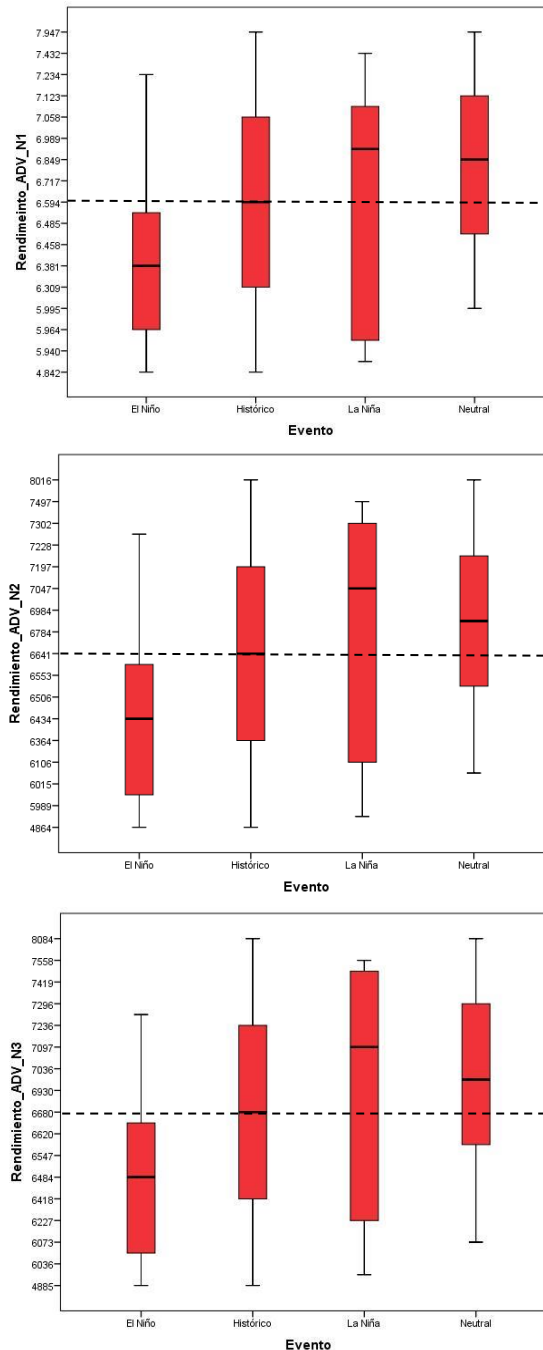
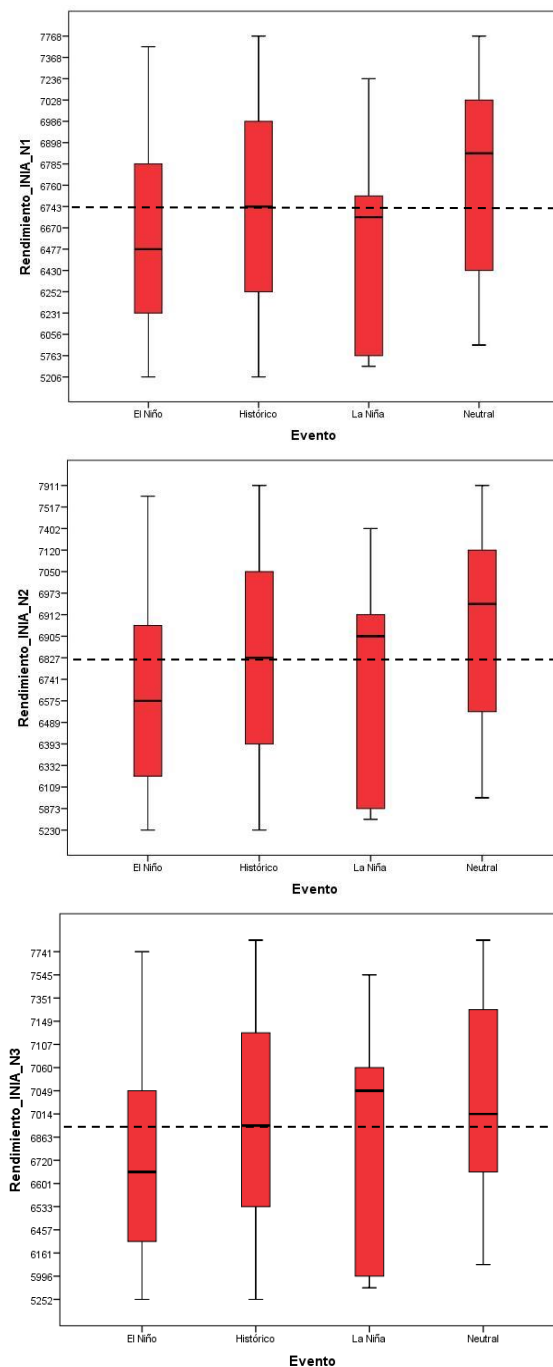


Figura 17. Diagrama de cajas y bigotes de los rendimientos simulados para el maíz híbrido INIA 611, en la EEA-Donoso, para la serie histórica 1984-2016 y las fases extremas del ENSO (10 años Niño y 6 años Niña). La línea negra dentro de la caja representa la mediana. El extremo superior (inferior) de la caja representa el percentil 75(25). El bigote (inferior) representa el percentil 95(5).



#### **5.4. Cambio climático en el maíz amarillo duro**

Con respecto a las proyecciones del rendimiento a futuro, en la Tabla 23 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 el híbrido Dekalb 7088 en la EEA-La Molina en donde se proyecta una disminución significativa para el Modelo CanESM2 en los diferentes periodos y especialmente para el escenario pesimista (RCP 8.5); así mismo para el modelo MPI-ESM-MR se mostró una disminución significativa para los periodos intermedio (2040-2070) y lejano (2070-2099). Esta disminución en los rendimientos podría obedecer a altas tasas de evapotranspiración y menor grado días acumulados y asociado con el aumento de grado de concentración de CO<sub>2</sub>. Según Lafitte (1994) el maíz presenta el proceso fotosintético C4 lo cual le proporciona una continua respuesta al incremento de la radiación hasta la plena luz con bajos niveles de foto-respiración. Estas características son muy adecuadas a las altas temperaturas y a las altas intensidades de luz que se encuentran en las zonas tropicales. Otros factores ambientales con influencia sobre la CE son el agua y la disponibilidad de nutrimentos.

Según Lopez (2015) el cambio climático ha generado efectos en el rendimiento de los cereales en América Latina, principalmente debido al aumento de las temperaturas a través de contaminantes como el metano, el dióxido de carbono y el óxido nitroso y de fertilizantes como el nitrógeno que son ampliamente utilizados en la región. El impacto del cambio climático se da principalmente por el aumento de temperatura, la cual afecta el rendimiento de todos los cereales evaluados, aunque las precipitaciones igualmente ocasionan efectos negativos únicamente sobre el arroz; entonces de acuerdo a esta investigación podríamos decir que los modelos CAnESM2 y MPI-ESM-MR son los que se asemejan a la realidad.

Sin embargo, para el modelo CNRM-CM5 se observó aumento significativos de los rendimientos para los tres niveles de fertilización (N1: 120 Kg N, N2: 200 Kg N y N3:



240 Kg N) especialmente para el escenario 8.5. Esto puede indicar un potencial aumento en la acumulación de biomasa seca y por consiguiente en el rendimiento, de esta forma en este escenarios futuro se espera un aumento en las producciones asumiendo adecuadas prácticas agrícolas (rotación, buen uso de técnicas de riego, fertilización, excelente control fitosanitario).

Schlenker y Roberts (2006) encuentran pequeños incrementos en el rendimiento de los cultivos (maíz, soya y algodón) ante altas temperaturas, pero a la vez, bruscos descensos a partir de ciertos límites que pueden llegar a alcanzarse después de mediados del presente siglo, similares a los escenarios mencionados por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático – IPCC, respecto a incrementos lentos y rápidos de temperatura (escenarios B1 y A1). Según el IPCC la temperatura media global entre 2016 - 2035 respecto a 1986-2005 aumente entre 0,3°C a 0,7°C y para finales del siglo XXI superara los 1,5°C respecto al periodo 1850 - 1900, con altas probabilidad de alcanzar los 2°C; por otro lado, las precipitaciones en las latitudes medias y regiones subtropicales y secas es posible que disminuyan. Para la contaminación por CO<sub>2</sub> las proyecciones entregan información para finales de siglo con una media de 1685 gigatoneladas de carbón (GtC) equivalentes una media de 6180 gigatoneladas de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2013).

Tabla 23. Proyecciones futuras de los rendimientos de maíz amarillo duro Dekalb 7088 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).

GCM	Escenarios	Periodo	Variación Rendimiento					
			120 kg N/ha	Sig.	200 kg N/ha	Sig.	240 kg N/ha	Sig.
CanESM2	RCP 4.5	2010 - 2040	-391	*	-417	*	-434	*
	RCP 8.5		-439	*	-481	*	-507	*
	DS		369		372		383	
	RCP 4.5	2040 - 2070	-283	n.s	-328	n.s	-358	n.s
	RCP 8.5		-1139	**	-1226	**	-1284	**
	DS		369		372		383	
	RCP 4.5	2070 - 2099	-477	*	-549	*	-590	*
	RCP 8.5		-1657	**	-1735	**	-1783	**
	DS		369		372		383	
CNRM-CM5	RCP 4.5	2010 - 2040	635	*	639	*	639	*
	RCP 8.5		1079	**	1094	**	1100	**
	DS		369		372		383	
	RCP 4.5	2040 - 2070	407	*	367	n.s	346	n.s
	RCP 8.5		1031	**	986	**	966	**
	DS		369		372		383	
	RCP 4.5	2070 - 2099	838	**	794	**	764	*
	RCP 8.5		1064	**	985	**	938	**
	DS		369		372		383	
MPI-ESM-MR	RCP 4.5	2010 - 2040	-33	n.s	-55	n.s	-72	n.s
	RCP 8.5		153	n.s	136	n.s	121	n.s
	DS		369		372		383	
	RCP 4.5	2040 - 2070	-33	n.s	-91	n.s	-125	n.s
	RCP 8.5		-291	n.s	-374	*	-419	*
	DS		369		372		383	
	RCP 4.5	2070 - 2099	-287	n.s	-361	n.s	-407	*
	RCP 8.5		-999	**	-1091	**	-1141	**
	DS		369		372		383	

DS : Desviación estándar

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

En el caso del Dekalb 7088 producido bajo condiciones climáticas de EEA-Donoso, los tres modelos reflejan disminuciones en el rendimiento entre significativas a altamente significativas en los periodos intermedio (2040-2070) y lejano (2070 – 2099), especialmente para el escenario pesimista de RCP 8,5 (Tabla 24).

Tabla 24. Proyecciones futuras de los rendimientos de maíz amarillo duro Dekalb 7088 en la EEA-Donoso, 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).

Híbrido	GCM	Escenarios	Periodo	Variación Rendimiento Kg/ha					
				200 kg N/ha	Sig.	240 kg N/ha	Sig.	280 kg N/ha	Sig.
Dekalb 7088 (EEA-Donoso)	CanESM2	RCP 4.5	2010 - 2040	-1195	*	-1221	*	-1244	*
		RCP 8.5		-1178	*	-1205	*	-1228	*
		DS		893		910		921	
		RCP 4.5	2040 - 2070	-1678	*	-1694	*	-1701	*
		RCP 8.5		-1661	*	-1661	*	-1657	*
		DS		893		910		921	
		RCP 4.5	2070 - 2099	-1264	*	-361	n.s	-407	*
		RCP 8.5		-2336	**	-1091	**	-1141	**
		DS		893		372		383	
Dekalb 7088 (EEA-Donoso)	CNRM-CM5	RCP 4.5	2010 - 2040	-259	n.s	-293	n.s	-317	n.s
		RCP 8.5		-330	n.s	-361	n.s	-386	n.s
		DS		893		910		921	
		RCP 4.5	2040 - 2070	-668	n.s	-702	n.s	-723	n.s
		RCP 8.5		-1111	*	-1129	*	-1146	*
		DS		893		910		921	
		RCP 4.5	2070 - 2099	-1197	*	-361	n.s	-407	*
		RCP 8.5		-2544	**	-1091	**	-1141	**
		DS		893		372		383	
Dekalb 7088 (EEA-Donoso)	MPI-ESM-MR	RCP 4.5	2010 - 2040	-333	n.s	-364	n.s	-390	n.s
		RCP 8.5		-433	n.s	-456	n.s	-480	n.s
		DS		893		910		921	
		RCP 4.5	2040 - 2070	-1347	*	-1369	*	-1386	*
		RCP 8.5		-1790	**	-1807	*	-1813	*
		DS		893		910		921	
		RCP 4.5	2070 - 2099	-1437	*	-361	n.s	-407	*
		RCP 8.5		-3086	**	-1091	**	-1141	**
		DS		893		372		383	

DS : Desviación estándar

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

Únicamente en los modelos CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR se observan que las variaciones de rendimientos para las tres dosis nitrogenadas no son significativas en el periodo cercano (2010 – 2040) para los escenarios RPC 4,5 y 8,5, por consiguiente la seguridad alimentaria para este periodo no estaría en riesgo ya que actualmente este híbrido está expresando óptimamente su potencial de rendimiento. Incluso bajo el modelo CNRM-CM5 se proyecta también variaciones de rendimientos no significativas en el periodo intermedio en el escenario RPC 4,5. Sin embargo, para lograr mantener el potencial de rendimiento de este híbrido es

importante cumplir con los otros factores de producción (labores culturales, fertilización, riego y manejo fitosanitario).

Tabla 25. Proyecciones futuras de los rendimientos de maíz amarillo duro ADV 9559 en la EEA-Donoso, 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)

GCM	Escenarios	Periodo	Variación Rendimiento Kg/ha					
			200 kg N/ha	Sig.	240 kg N/ha	Sig.	280 kg N/ha	Sig.
CanESM2	RCP 4.5	2010 - 2040	-519	n.s	-567	n.s	-608	*
	RCP 8.5		-521	n.s	-569	n.s	-612	*
	DS		586		597		604	
	RCP 4.5	2040 - 2070	-764	*	-807	*	-842	*
	RCP 8.5		-866	*	-899	*	-925	*
	DS		586		597		604	
	RCP 4.5	2070 - 2099	-545	n.s	-584	n.s	-618	*
	RCP 8.5		-923	*	-957	*	-981	*
	DS		586		597		604	
CNRM-CM5	RCP 4.5	2010 - 2040	37	n.s	1	n.s	-27	n.s
	RCP 8.5		18	n.s	-20	n.s	-49	n.s
	DS		586		597		604	
	RCP 4.5	2040 - 2070	-78	n.s	-123	n.s	-161	n.s
	RCP 8.5		-367	n.s	-412	n.s	-453	n.s
	DS		586		597		604	
	RCP 4.5	2070 - 2099	-434	n.s	-484	n.s	-528	n.s
	RCP 8.5		-1331	**	-1375	**	-1406	**
	DS		586		597		604	
MPI-ESM-MR	RCP 4.5	2010 - 2040	117	n.s	78	n.s	46	n.s
	RCP 8.5		65	n.s	22	n.s	-16	n.s
	DS		586		597		604	
	RCP 4.5	2040 - 2070	-520	n.s	-567	n.s	-607	*
	RCP 8.5		-864	*	-907	*	-940	*
	DS		586		597		604	
	RCP 4.5	2070 - 2099	-587	*	-631	*	-666	*
	RCP 8.5		-1622	**	-1659	**	-1688	**
	DS		586		597		604	

DS : Desviación estándar

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

Con respecto al posible comportamiento agronómico del híbrido ADV 9559 (Tabla 25); los tres modelos climáticos pronostican que en el periodo cercano (2010 – 2040) mantendrán condiciones meteorológicas adecuadas (en EEA-Donoso) para su óptima producción, tanto para un escenario conservador y pesimista. Sin

embargo esto se cumplirá manejando la fertilización nitrogenada hasta 240 kg/ha de dosis, ya que con dosis mayores a 280 kg/ha sí afectaría en la disminución de los rendimientos. Esto se puede explicar al posible daño de la salinidad que sería causada por la acumulación progresiva de nitratos (Martinez et al. 2011), además de una toxicidad por amonio, donde una excesiva acumulación en los maíces dañarían a las células de las plantas (Mattson, 2013).

Solamente, el modelo CNRM-CM5 sugiere que las condiciones climáticas en los tres periodos (cercano, intermedio y lejano) serán apropiadas para la producción del híbrido ADV 9559; sin embargo, para el escenario pesimista RCP 8,5 sí mostraría una disminución significativa en el periodo lejano.

Finalmente, las variaciones de los rendimientos del híbrido INIA 611 bajo las proyecciones climáticas de los tres modelos aplicados, serían no significativas para los distintos periodos y escenarios en evaluación (Tabla 26); lo cual sería importante tomar en cuenta la utilización de este híbrido en el futuro como herramienta genética de adaptación ante el cambio climático. Al igual que el híbrido anterior, se aprecia que en las proyecciones climáticas de los modelos CanESM2 y MPI-ESM-MR manejado a una fertilización nitrogenada de más de 280 kg/ha afectaría significativamente los rendimientos.

Tabla 26 Proyecciones futuras de los rendimientos de maíz amarillo duro INIA 611 en la EEA-Donoso, 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).

GCM	Escenarios	Periodo	Variación Rendimiento Kg/ha					
			200 kg N/ha	Sig.	240 kg N/ha	Sig.	280 kg N/ha	Sig.
CanESM2	RCP 4.5	2010 - 2040	-178	n.s	-239	n.s	-300	n.s
	RCP 8.5		-143	n.s	-206	n.s	-269	n.s
	DS		547		555		567	
	RCP 4.5	2040 - 2070	-442	n.s	-510	n.s	-576	*
	RCP 8.5		-529	n.s	-591	*	-652	*
	DS		547		555		567	
	RCP 4.5	2070 - 2099	-208	n.s	-275	n.s	-341	n.s
	RCP 8.5		-240	n.s	-295	n.s	-353	n.s
	DS		547		555		567	
CNRM-CM5	RCP 4.5	2010 - 2040	129	n.s	90	n.s	62	n.s
	RCP 8.5		136	n.s	106	n.s	66	n.s
	DS		547		555		567	
	RCP 4.5	2040 - 2070	204	n.s	145	n.s	90	n.s
	RCP 8.5		40	n.s	-22	n.s	-85	n.s
	DS		547		555		567	
	RCP 4.5	2070 - 2099	-22	n.s	-91	n.s	-157	n.s
	RCP 8.5		-810	*	-877	*	-944	*
	DS		547	0	555	0	567	0
MPI-ESM-MR	RCP 4.5	2010 - 2040	298	n.s	257	n.s	216	n.s
	RCP 8.5		374	n.s	321	n.s	266	n.s
	DS		547		555		567	
	RCP 4.5	2040 - 2070	-146	n.s	-216	n.s	-281	n.s
	RCP 8.5		-538	n.s	-610	*	-675	*
	DS		547		555		567	
	RCP 4.5	2070 - 2099	-271	n.s	-341	n.s	-407	n.s
	RCP 8.5		-1144	**	-1206	**	-1265	**
	DS		547		555		567	

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 CERES Maize para el híbrido Dekalb 7088 fueron **P1=237,5; P2=1,1; P5=882,5; G2=1600; G3=8,7 y PHINT=36,43**; para el híbrido Dow 2B688 fueron **P1=236,4; P2=1,73, P5=910,5; G2=1450, G3=6,7 y PHINT=34,40**; para el híbrido INIA 619 fueron **P1=258,9; P2=1,07; P5=853,2; G2=1125,0; G3=9,6 y PHINT=42,20**; para el híbrido ADV 9559 fueron **P1=236,4; P2=1,73; P5=910,5; G2=1450; G3=6,7 y PHINT=34,40**; y finalmente para el híbrido INIA 611 fueron **P1=258,9, P2=1,07; P5=853,2; G2=1125, G3=9,6 y PHINT=42,20**.
- El proceso de validación mediante el uso del indicador estadístico RMSE determinaron que la predicción del modelo fue bastante adecuada para las variables: día de la emergencia, día de antesis, maduración fisiológica en los 5 híbridos estudiados. Entre buena y excelente se tuvieron en las variables de peso seco de grano y rendimiento de granos en los híbridos Dekalb 7088, ADV 9559 e INIA 611. Finalmente, se presentó una validación entre justa y deficiente en las variables índice de área foliar máxima, peso seco de la parte aérea a la madurez fisiológica y número de granos, principalmente en los híbridos Dow 2B688 e INIA 619.
- El proceso de validación mediante el uso del indicador d – index, determinaron una buena comparación entre los resultados observados y simulados en las siguientes variables: día de la emergencia, día de la antesis, día de maduración fisiológica y rendimiento, principalmente en el híbrido Dekalb 7088.
- Las variables de índice de área foliar y materia seca de la parte aérea durante sus distintos fases fenológicas presentaron un alto coeficiente de determinación ( $r^2$ ).
- Los híbridos que superaron satisfactoriamente el proceso de calibración y validación fueron: Dekalb 7088, ADV 9559 e INIA 611, por lo cual fueron los híbridos que se usaron para determinar el efectos de la variabilidad y cambio climático.

- Los rendimientos obtenidos de los 3 híbridos calibrados y validados correctamente (Dekalb 7088, ADV 9559 e INIA 611) dentro de una serie histórica mostraron distintas respuestas en el tipo de impacto (positivo o negativo) y en la intensidad de ese impacto (poco o muy significativo).
- El impacto de la variabilidad climática en el híbrido ADV 9559 bajo condiciones de EEA- Donoso resultó en una disminución significativa de los rendimientos en años de El Niño, mientras que este mismo efecto negativo no fue tan significativo en el híbrido INIA 611; sin embargo, el híbrido Dekalb 7088 fue el que presentó una respuesta distinta a las fases extremas del ENSO en las condiciones agroclimáticas de la EEA-La Molina y EEA-Donoso, manifestando en la primera zona un mínimo efecto positivo en los rendimientos en años de El Niño y Neutrales y un mínimo efecto negativo para los años de la Niña; en cambio, en la EEA - Donoso manifestó un efecto significativamente negativo y positivo en los años de El Niño y La Niña; respectivamente.
- Las proyecciones del modelo climático CNRM-CM5 en comparación a los otros modelos estudiados, muestran mejores condiciones climáticas (temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y radiación) para el desarrollo normal de los híbridos Dekalb 7088, ADV 9559 e INIA 611 en las condiciones de EEA – Donoso; así mismo, el análisis del impacto del cambio climático determinó que el híbrido con mayor resistencia al cambio climático (en términos de rendimientos obtenidos) en los distintos periodos y escenarios climáticos es el INIA 611.
- El modelo CERES Maize es una herramienta útil en los pronósticos de variables agronómicas, y en la evaluación del impacto de la variabilidad y cambio climático para los híbridos de maíz amarillo duro Dekalb 7088, ADV 9559 e INIA 611.



## VII. RECOMENDACIONES

- Replicar estos trabajos de investigación (usando los mismos híbridos) en otras regiones del país con mayor variabilidad climática reajustando los actuales coeficientes genéticos a fin de obtener pronósticos confiables. Por lo general se debe trabajar principalmente con los híbridos más promisorios para nuestro país como es el caso del Dekalb 7088, ADV 9559 e INIA 611.
- 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.
- Es importante comprometer a más instituciones (públicas y/o privadas) interesados en los temas de modelamientos e impactos del cambio climático en los cultivos, principalmente los catalogados para la seguridad alimentaria.

## VIII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

AABA. 2010. Atlas Ambiental de Buenos Aires. Disponible en: <http://www.atlasdebuenosaires.gov.ar>. (On line, consultado el 16/09/2010).

Alexandrov V.A. and G. Hoogenboom, 2000. The impact of climate variability and change on crop yield in Bulgaria. *Agricultural and Forest Meteorology*. 104: 315-327.

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.

Antunez, Y. 2017. Características del híbrido ADV 9559 (Entrevista). Lima, PE, Empresa Farmagro S.A.

Aris. 2014. Ficha técnica de Dow 2B688. Consultado el 10 de feb. 2017. Disponible en <http://www.aris.com.pe/quimicos/wp-content/uploads/2014/04/HT-DOW-2B688-2014.pdf>

Baigorria G. 2005. Weather and seasonal climate forecast to support agricultural decision-making at different spatial and temporal scales In: Baigorria G. *Climate interpolation for land resource and land use studies in mountainous regions*. Phd. Thesis. Wageningen. Netherlands. 96p.

Blackman, V.H. 1919. The compound interest law and plant growth. *Annals of Botany*, 33: 353-360.

Boote, KJ; Jones, JW; Hoogenboom, G. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In Peart, RM; Curry, RB. eds. s.f. *Agricultural systems modelling and simulation*. Marcel Dekker, New York. p. 651-692.

Boote, KJ; Jones, JW; Pickering, NB. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal* 88: 704-716.

Boote, KJ; Tollenaar, DM. 1994. Modeling genetic yield potential. In Boote, KJ; Bennett, JM; Sinclair, TR; Paulsen, GM. eds. s.f. *Physiology and determination of crop yield*. ASA-CSSA-SSSA p. 533-565

Bowen, W. Experimentos de campo y el arte de los modelos. CIP-Circular VOI 22(3)/23(1), 1997. p 2-5.

Cabré M. F., Castillo N., Menéndez C. G., Núñez M.N., Solman S. 2003. The influence of land surface representation on the regional simulation of southern South America climate for January. 4° Meeting co-Principal Investigators of the Project IAI CRN-055. Cruzeiro, Brasil.

Cabré, M. F., Castillo, N., Cerne, B., Menendez, C., Nuñez, M., A. Rolla, Solman, S. 2002. Regional simulation of southern South America climate for summer. 3° Meeting co-Principal Investigators of the Project IAI CRN-055. Organizado por Inter American Institute for Global Change Research (IAI). Mardel Plata, Argentina.

Confalone, A., Vilatte, C., Aguas, L., Navarro, M. 2010. Modelos de crecimiento de soja y maíz incluidos en el DSSAT para su utilización en el agroclima de Azul, Provincia de Buenos Aires. Actas XIII Reunión Argentina y VI Latinoamericana de Agrometeorología. Asociación Argentina de Agrometeorología. Bahía Blanca. 18-22 de octubre. p. 352-353.

Castillo, M.N. 2006. Impactos del cambio climático sobre la vegetación en Argentina. Tesis doctoral Área Ciencias Biológicas. UBA. Buenos Aires. 173 p.

Concejo Nacional del Ambiente (CONAM). 1999. Vulnerabilidad frente al cambio climático. Aproximaciones a la experiencia con el fenómeno El Niño. Lima. Perú.

Comisión Nacional Del Medio Ambiente (CONAMA). 2006. Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Informe final realizado por el Departamento de Geofísica Facultad de Ciencias. Físicas y Matemáticas Universidad de Chile. 71 p

Cunha G., G. Dalmago, V. Estefanel, A. Pasinato y M. Moreira. 2001. El NINO – oscilación do Sul e seus impactos sobre a cultura de cevada no Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia. V. 9. Nº 1 p. 137-145.

Curry R, Jones J.W., Boote K.J., Peart R., Allen L., Pickering N. B. 1995. Response of soybean to predicted climate change in the USA. En Rosenzweig C, Jones J, Tsuji G, Hildebrand P (Eds.) Climate change and agriculture: Analysis of potential international impacts. ASA Special Publication Nº59. American Society of Agronomy. Madison, WI, EEUU. p. 163-182.

Cusack, S., Edwards, J.M., Crowther, J.M. 1999. Investigating k distribution methods for parameterizing gaseous absorption in the Hadley Centre Climate Model, J. Geophys. Res., 104: 2051-2057.

Davies, A., J. Shao, P. Brignall, R.D. Bardgett, M.L. Parry and C.J. Pollock, 1996. Specification of climatic sensitivity of forage maize to climate change. Grass and Forage Science. 51: 306-317.

Demolon. 1944. La dynamique du Sol. Dunod. Paris, FR. In: Sanz N., Heras L. y Montañez L. 1975. Índice de correlación entre el carbono orgánico y nitrógeno en suelos de la cuenca del Ebro. Zaragoza, ES. 141 p.

De Wit, C.T., Brouwer, R., de Vries, F.W.T.P. 1970. The simulation of photosynthetic systems. En : SETLIK, I. (ed.). Prediction and measurement of photosynthetic productivity. Wageningen. PUDOC. p. 47-70.

Diffenbaugh N.S., Sloan L.C. 2002. Global climate sensitivity to landsurface change: The Mid Holocene revisited. Geophysical Research Letters. 29: 1010-1029.

Diffenbaugh N. S. 2005. Atmosphere-land cover feedbacks alter the response of surface temperature to CO<sub>2</sub> forcing in the western United States. ClimateDynamics. 24: 237-251.

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

Duncan, WG; Loomis, RS; Williams, WA; Hanau, R. 1967. A model for simulating photosynthesis in plant communities 38: 181-205.

Duncan, W. G. & Hatfield, A. L. (1964). A method for measuring the daily growth of corn kernels. Crop Science, 4, 550-551.

Ecuacuímica. 2017. Maíz híbrido Dekalb 7088. Consultado el 10 de feb. 2017. Disponible en [http://www.ecuacuimica.com/pdf\\_semillas/DEKALB7088.pdf](http://www.ecuacuimica.com/pdf_semillas/DEKALB7088.pdf)

Edwards, J.M., Slingo, A. 1996: Studies with a flexible new radiation code: I: Choosing a configuration for a large-scale model. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 122: 689-720.

Egli, D.B., Bruening, W. 1992. Planting date and soybean yield: Evaluation of environmental effects with a crop simulation model: SOYGRO. Agric. Meteorol. 62: 19-29.

Forrester, J. W. 1972. Dinámica industrial. El Ateneo. Buenos Aires. 93p.

Stern, P.C, Easterling, W.E. 1999. Making climate forecast matter. National Academy Press, Washington, DC, USA, 174 pp.

Fontana, D.C. Berlato M.A. 1996. Relação entre El Nino Oscilação Sul (ENOS), precipitação e rendimento de milho no Estado de Rio Grande do Sul. Pesquisa Agropecuária Gaúcha. Porto Alegre. V2.n.1. 39-45.

Forrester, J. W. 1972. Dinámica industrial. El Ateneo. Buenos Aires. 93p.

Goudrian, J., Monteith, J.L. 1990. A mathematical function for crop growth based on and leaf area expansion. Annals of Botany. 66: 695-701.

Goudriaan, J. and M.H. Unsworth, 1990. Implication of increasing carbon dioxide and climate change for agricultural productivity and water resources. In: Impact of carbon dioxide, trace gases and climate change on global agriculture. ASA Special

Publication 53. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science of America, Madison, Wi, pp. 111-130.

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.

Hanse, 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.

Holzkämpera, A; Calanca, P; Hontib, M y Fuhreraa, J. 2015. Projecting climate change impacts on grain maize based on three different crop model approaches. Agrocospe, Institute for Sustainability Sciences, Climate and Air Pollution Group. Budapest, Hungary.

Hortus, PE. 2017. Maíz Dekalb-7088 (en línea). Lima, PE. Consultado el 10 de feb. 2017. Disponible en <http://www.hortus.com.pe/Hortus/productoA.php?nombre=MAIZ%20DK-7088>

Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). 2012. INIA 619 Megahíbrido. Lima, PE. Consultado 19 oct 2017. Disponible en: <http://www.inia.gob.pe/prod-servicios/publicaciones/publicacion/tripticos/item/196-05-2012-inia-619-megahibrido>

INIA. 2007. Maíz Amarillo Duro INIA 611 - Nutri Perú. Estación Experimental Agraria Donoso. Huaral, PE.

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

IPCC. Mearns L. O., Fgiorgi, F., Whetton, P., Pabon D., Hulme, M, Lal, M. 2003. Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments.

Jacobson, BM; Jones, JW; Welch, SW. 1995. Decision support system to assess agronomic, economic, and environmental impacts of soybean and corn management. ASAE no 952696. St. Joseph, MI, US. 17 p.

Jones, CA; Kiniry, JR. 1986. CERES-Maize: a simulation model of Maize growth and development. College Station, Texas A and M. University Press. 194 p.

Jones, CA; Luiten, JC. 1998. Simulation of biological processes. In Peart, R; Curry, R.B. (eds). Agricultural systems modelling and simulation. Marcel Dekker, Nueva York, US. p. 19-62.

Jones, JW; Hoogenboom, G; Porter, CH; Boote, KJ; Batchelor, WD; Hunt, LA; Wilkens, PW; Singh, U; Gijsman, AJ; Ritchie, JT. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18:235-265.

Jones, P.G. and P.K. Thornton, 2003. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in "2055". *Global Environmental Change*. 13: 51-59.

Jones, R.G., Noguera, M., Hassell, D.C., Hudson, D., Wilson, S.S., Jenkins, G.J., Mitchell, J.F.B. 2004. Generating High Resolution Climate Change Scenarios Using PRECIS. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK. 40 p.

Kapetanaki, G. and C. Rosenzweig, 1997. Impact of climate change on maize yield in central and northern Greece: a simulation study with Ceres-maize. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 1: 251-271.

Kiniry, JR; Bockholt, AJ. 1998. Maize and sorghum simulations in diverse Texas environments. *Agron. J.* 90: 682-687.

Kiniry, JR; Williams, JR; Vanderlip, RL; Atwood, JD; Reicosky, DC; Mulliken, J; Cox, WJ; Mascagni, HJ; Hollinger, JR; Wiebold, WJ. 1997. Evaluation of two maize models for nine U.S. locations. *Agron. J.* 89: 421-426.

Lafitte, H.R. y Edmeades, G.O. 1994. Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize. II. Grain yield, biomass accumulation, and N accumulation. *Field Crops Res.*, 39: 15-25.

Lafitte, H.R. & Edmeades, G.O. 1996. Temperature effects on radiation use and biomass partitioning in diverse tropical maize cultivars. *Field Crops Res.* (in press).

Liu, HL; Yang, JY; He, P; Bai, YL; Jin, JY; Drury, C F; Zhu, YP; Yang, XM; Li, WJ; Xie, JG; Yang, JM, Hoogenboom, G. 2012. Optimizing parameters of CSM-CERES-Maize model to improve simulation performance of maize growth and nitrogen uptake in northeast China. *Journal of Integrative Agriculture* 11(11): 1898-1913.

Labraga, J. C. 1998. Escenario de Cambio Climático para la Argentina. *Ciencia Hoy*. 8 - N°44.

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

Lomborg, B. 1998. The Skeptical Environmentalist - Measuring the Real State of the World. Cambridge University Press, United Kingdom, H24: Global Warming. 258-324.

Lopez, H. 2015. Efectos del cambio climatico en el rendimiento del trigo, el maiz y el arroz en America Latina. Facultad de Ciencias Economicas y Administrativas. Bogota. 42 p.

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

Magrin, GO., M.I. Travasso, R.A. Diaz, and R.O. Rodriguez, 1997. Vulnerability of the agricultural system of Argentina to climate change. Climate Research. 9: 31-36.

Magrín GO, Grondona MO, Travasso MI, Boullan DR, Rodriguez GR, Messina C D (1998) Impacto del fenómeno “El Niño” sobre la producción de cultivos en la región pampeana. Boletín del Instituto de Clima y Agua, INTA. Dirección de Comunicaciones, Buenos Aires, Argentina, 16 pp.

Martinez, F; Ojeda, DL; Hernández, A; Martínez, JJ y Quezada, G. 2011. Facultad de Ciencias Agrotecnológicas/Universidad Autónoma de Chihuahua, MX. 3-5 p.

Mastrorilli, M; Katerji, N; Ben Nouna, B. 2003. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment: validation of three revised versions. European Journal of Agronomy 19(2003): 125-134.

Mattson, N. 2013. Ammonium Toxicity: Avoid Getting Burned This Winter (Toxicidad de amonio: evite quemarse este invierno) In: Buechel, T. 2017. Toxicidad de amonio. Consultado 19 nov 2017. Disponible en: <http://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/toxicidad-de-amonio/>

Mavromatis, T., Boote, K.J., Jones, J.W., Irmak, A., Shinde, D., Hoogenboom, G. 2001. Developing genetic coefficients for crop simulation models with data from crop performance trials. Crop Sci. 41: 40 - 51.

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.

Milthorpe F.L., Moorby J. 1979. An introduction to crop physiology. Cambridge University Press. Cambridge.

- 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.
- Ozkan, B., and H. Akcaoz, 2002. Impacts of climate factor on yields for selected crops in southern Turkey. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 7: 367-380.
- Parry, M.L., 1990. *Climate Change and World Agriculture*. London Earthscan.
- Parry, M., Carter, T. 1998. *Climate Impact and Adaptation Assessment. A Guide to the IPCC Approach*. Earthscan Publ. Ltd, London, UK. 166 p.
- Popova, Z; Kercheva, M. 2005. CERES model application for increasing preparedness to climate variability in agricultural planning – calibration and validation test. *Physics and Chemistry of the Earth* 30 (1–3):125-133.
- Requesens, E. 2008. *Teoría ecológica y agroecológica: vínculos y proyecciones*. -1ª ed. – Tandil: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. 102 p.
- Ribera M., Trucios R., Estrada J., Delgado G. Macías H. 2013. La Materia orgánica y el nitrógeno mineralizado, para los suelos del territorio mexicano y áreas agrícolas de los distritos de riego. *Agrofaz* Vol 13 N° 2. MX. 108 p.
- Ropelewski, C.F., Halpert, M.S. 1987. Global and regional scale patterns associated witc the El Niño Southern Oscillation. *Monthly Weather Review* 115: 1606-1626.
- Royce, F.S., Jones, J.W., Hansen, J.W. 2001. Model-based optimization of crop management for climate forecast applications. *ASAE*. 44:1319-1327.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, PE). 2003. *Atlas de energía solar del Perú*. Lima, PE. 31 p.
- Schlenker, Wolfram y Roberts, Michael. Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Review of Agricultural Economics*. 2010.
- Sistema Integrado de Estadística Agraria - SIEA. 2014. Ministerio de Agricultura. Lima. Perú.
- Solman S., Nuñez M. 1999. Local estimates of global climate change: a statistical downscaling approach. *International Journal of climatology*. 19: 835-861.
- Shukla, J., Nobre, C., Sellers, P. 1990. Amazon deforestation and climate change. *Science*. 247: 1322-1325.



Thornley, JHM; Johnson, JR. 1990. Plant and crop modelling: a mathematical approach to plant and crop physiology. Clarendon Press. Oxford, UK.

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.

Wilkins, P; Singh U. 2001. A code- level analysis for temperature effects in the CERES models. In White, J W. ed. 2001. *Modeling Temperature Response in Wheat and Maize Workshop, proceedings*. CIMMYT (2001, El Batán, MX). México D.F; MX. p. 1-8.

Willmott,C.J.,Akleson,G.S.,Davis,R.E.,Feddema,J.J.,Klink,K.M.,Legates,D.R.,Odonnell, J., Rowe, C.M., 1985. Statistic for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*. 90, 8995–9005.

Wolf J., and C.A. Van Diepen, 1994. Effects of climate change on silage Maize production potential in the European Community. *Agricultural and Forest Meteorology* 71:33-60.

Yzarra, W.J, Trebejo, I., Noriega, V. 2015. Evaluación del efecto del clima en la producción y productividad del maíz amarillo duro en la Costa Central del Perú. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú-SENAMHI. Lima, Perú. 62 p.