

# Efectos del cambio climático en el rendimiento de tres cultivos mediante el uso del Modelo AquaCrop

## Informe Ejecutivo

Junio de 2013

FONDO FINANCIERO DE PROYECTOS DE DESARROLLO – FONADE E INSTITUTO DE  
HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM.  
BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO - BID

Mery Esperanza Fernández

CONTRATO DE COOPERACIÓN TÉCNICA CO-T1150  
CONTRATO FONADE DE PRESTACION DE SERVICIOS No. 2130628



## CONTENIDO

<b>INTRODUCCION</b>	<b>3</b>
<b>1. LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECTOR AGRÍCOLA</b>	<b>4</b>
1.1 Efectos en la agricultura por la concentración de CO2 y aumento de temperatura del aire	4
1.2 Sector agrícola en Colombia	6
<b>2. MODELO DE SIMULACION AQUACROP</b>	<b>9</b>
2.1. Descripción del modelo de Simulación AQUACROP	9
2.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO ET0 CALCULATOR	13
<b>3. SELECCIÓN DE CULTIVOS Y REGIONES PARA IMPLEMENTAR EL MODELO DE SIMULACION AQUACROP</b>	<b>14</b>
<b>4. IMPLEMENTACION DEL MODELO AQUACROP V. 3.2. Y 4.0</b>	<b>15</b>
5.1 Zonas, estaciones y materiales seleccionadas	16
5.2 Variables de entrada del modelo	16
5.3 Metodología	17
<b>5. SIMULACION DE RENDIMIENTOS DE CULTIVOS BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO</b>	<b>23</b>
6.1 Posibles cambios en la precipitación las estaciones seleccionadas	24
6.2 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de maíz tecnificado en Tolima y Metas ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop	26
6.3 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de Arroz riego en Tolima ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop	28
6.4 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de papa en Boyacá y Cundinamarca ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop	30
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>32</b>
<b>7. RECOMENDACIONES</b>	<b>33</b>

## **EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCION Y RENDIMIENTO DE CULTIVOS POR SECTORES**

En el marco de la agenda colombiana de adaptación al cambio climático se suscribió un acuerdo de cooperación entre FONADE y el IDEAM cuyo objetivo es la evaluación del riesgo agroclimático por sectores el cual asocia su objetivo al componente 4 de la mencionada agenda, que se orienta a la elaboración y uso de modelos para pronósticos de rendimiento de cosechas y a la elaboración de estudios sobre la determinación del riesgo del clima para sectores representativos. La justificación de la ejecución de este contrato obedece a que actualmente se trabaja en la generación de escenarios futuros de precipitación y temperatura, pero son escasos los estudios sobre la influencia de estos escenarios en actividades como la agricultura. En el mundo existen modelos capaces de simular los rendimientos futuros a partir de especificaciones de cultivos en particular en función de escenarios de cambio climático. Es por eso que se plantea desde el convenio que el objetivo del contrato se centre en la alimentación de un modelo agroclimático a través de escenarios de cambio climático para establecer posibles cambios en la producción y rendimiento de los cultivos seleccionados, en este caso, arroz riego, maíz tecnificado y papa.

Dicho acuerdo se ampara bajo el contrato No. 2130628 cuyo objetivo es determinar los efectos del cambio climático en la producción y rendimientos de cultivos agrícolas seleccionados, mediante la utilización de modelos agroclimáticos.

El presente informe resume el trabajo completo realizado para el presente contrato, el cual consta de cuatro partes, la primera menciona generalidades de los impactos del cambio climático en el sector agrícola, la segunda detalla la funcionalidad, bondades y limitantes del modelo de simulación AquaCrop. En el tercer aparte se indican características de los cultivos seleccionados y por último se indica la implementación del modelo y resultados de los rendimientos de los cultivos frente a dos escenarios de cambio climático (A2 y B2); además de las conclusiones y recomendaciones.

### **INTRODUCCION**

Uno de los objetivos de la agroclimatología es analizar las interacciones del sistema atmosfera-planta-agua-suelo, así como detectar y definir los factores del clima que limitan la producción agropecuaria también lo es la predicción del rendimiento de los cultivos y los posibles futuros comportamientos de las variables que pueden afectar positiva o negativamente a la planta, dando así una herramienta a los agricultores para la toma de decisiones en las diferentes etapas del cultivo y evitar pérdidas en su producción. Teniendo en cuenta la complejidad del sistema mencionado, el uso de los modelos de simulación tienen varias aplicaciones actuales y potenciales en respuesta a temas relacionados con la investigación, el manejo de cultivos y la planificación. Estos constituyen un elemento importante para tomar decisiones en la agricultura al cuantificar, interpretar y predecir las necesidades hídricas de los cultivos, el desarrollo de estos y sus rendimientos (Ruíz, 2005. Citado por Hernández & Soto, (2009). Sin embargo como indica (Guevara), la experimentación y las observaciones no pueden ser reemplazadas por los modelos, pero existe una estrecha relación entre ambos enfoques que hacen que tanto la experimentación y la investigación puedan enriquecer la comprensión y el conocimiento sobre el funcionamiento del sistema del cultivo.

Como parte de los objetivos propuestos en el informe del segundo mes se describieron doce modelos de simulación de cultivos utilizados en diferentes países, allí se indican sus ventajas y limitaciones, con el fin de seleccionar el modelo más funcional para calcular el rendimiento de diversos cultivos en función de escenarios de cambio climático. Del total de los modelos de simulación expuestos solo dos incorporaban escenarios de cambio climático en su estructura: DSSAT y AquaCrop. Por esta razón en reunión con el grupo de agrometeorología del IDEAM se tuvo en cuenta los antecedentes del uso del modelo de simulación AquaCrop en Colombia para su elección al igual que se decidió trabajar con los cultivos de maíz tecnificado en Meta y Tolima, arroz riego en Meta y Tolima y papa en el altiplano Cundiboyacense.

A continuación se presenta una proyección de los impactos causados por cambio climático en términos de rendimientos de los cultivos de maíz tecnificado, arroz riego y papa en la zonas ya mencionadas, para las siguientes décadas del siglo XXI: década de 2030-2040; 2040-5050 y 2060-2070 realizada para dos escenarios: A2 y B2, previstos por el IPCC y la comparación con el clima actual teniendo en cuenta el periodo de referencia 1980-2010. El escenario B2 corresponde a un escenario más benigno, donde el dióxido de carbono crece en forma sostenida pero no muy acentuadamente. En cambio, en el escenario A2, el dióxido de carbono tiene un crecimiento que se acelera hacia fines del siglo alcanzando niveles muchos mayores.

## **1. LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECTOR AGRÍCOLA**

Conociendo los impactos del Cambio climático de los efectos físicos y atmosféricos investigados por la comunidad científica, es preciso aquí mencionar cuales son los efectos directos sobre los cultivos y plantas en base a los escenarios climáticos que proyectan modificaciones en el los patrones de precipitación y de temperatura del aire. En términos generales, los rendimientos de muchos cultivos, podrían disminuir significativamente por las mayores temperaturas, como consecuencia, por ejemplo, del estrés térmico e hídrico, del acortamiento de la estación de crecimiento y de la mayor presencia de plagas y enfermedades. Las producciones animales también se verían afectadas, por el impacto del cambio climático en la productividad de las pasturas y forrajes y según sus requerimientos específicos. (PROCISUR). De otra parte, los efectos directos sobre los procesos fisiológicos en las plantas, debido al aumento en la concentración de CO<sub>2</sub>, han sido demostrados y sus consecuencias sobre el crecimiento, desarrollo y producción vegetal han sido evaluadas con diferentes modelos (Rabbinge et al., 1993).

### **1.1 Efectos en la agricultura por la concentración de CO<sub>2</sub> y aumento de temperatura del aire**

Según Tubiello un incremento en el Dióxido de Carbono elevaría la tasa fotosintética de las plantas y por consiguiente incrementaría el rendimiento. El incremento directo de la tasa de fotosíntesis de las plantas C<sub>3</sub> (trigo, arroz, papa, soya, frijol) resulta de dos propiedades de la enzima Rubisco (ribulosa 1,5-difosfato carboxylasa) que fija el CO<sub>2</sub> en esos cultivos. La enzima no se satura con la concentración actual de CO<sub>2</sub>, por lo que un incremento en su concentración incrementará la velocidad de carboxylación (fijación de CO<sub>2</sub>) y la fotosíntesis neta (Long et al., 2005). Además el CO<sub>2</sub> es un inhibidor competitivo de la reacción de oxigenación, la cual conduce a la fotorrespiración, ésta comúnmente libera 20 a 40% de los productos de la fotosíntesis como CO<sub>2</sub>.

Altas temperaturas del aire pueden detener la fotosíntesis, evitar la fertilización de los óvulos de las plantas e inducir a una deshidratación; en las plantas C3 la tasa máxima de fotosíntesis está entre temperaturas de 20 y 32°C, a temperaturas superiores la tasa muestra una declinación y al alcanzar los 40°C, cesa enteramente, a esta temperatura la planta se encuentra en shock térmico, buscando la manera de subsistir (Brown, 2003).

De otra parte el periodo más vulnerable del ciclo fenológico es cuando ocurre la fertilización; el Instituto Internacional de Investigación del Arroz de México reporta que la fertilidad del arroz cae de 100% a 0% de 34% a 40°C; en el caso del maíz cuando hay temperaturas mayores de 36 °C se presenta reducción en la viabilidad del polen<sup>1</sup>.

Según (Peng et al. (2004) para el cultivo del arroz, para el cual se ha determinado que un aumento de un grado centígrado en la temperatura entre 30 y 40°C, durante la floración, reduce la fertilidad y la formación de grano en 10%.

Sin embargo las consecuencias del enriquecimiento de CO<sub>2</sub> y el aumento de la temperatura son positivas solamente bajo condiciones óptimas de crecimiento y considerando que la mayoría de los cultivos raramente se encuentran bajo condiciones óptimas de crecimiento, los beneficios por el enriquecimiento de CO<sub>2</sub> y aumento en la temperatura son mínimos (Rabbinge et al., 1993).

Tubiello et al. (2000) concluyó que el incremento en la temperatura del aire, ocasionaría un aumento en la tasa de desarrollo fenológico, reduciendo el periodo de desarrollo y crecimiento que a su vez reduciría el rendimiento total del cultivo.

El cambio climático también ocasionará la reducción de las interacciones ecológicas del tipo mutualista entre las plantas y los polinizadores naturales, debido a los posibles cambios fenológicos ocasionados por la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Estas alteraciones en los ciclos fenológicos disminuirían los recursos florales disponibles para las especies polinizadoras entre un 17 y un 50%. La reducción de la coincidencia temporal entre plantas y polinizadores, no sólo causará la reducción en la dieta disponible de los insectos polinizadores sino que originará tanto su extinción como la de diversas especies vegetales (Memmott et al, 2007).

De otra parte se calcula que sólo el 17% de los fertilizantes nitrogenados producidos en 2005 fueron asimilados por los cultivos, dispersándose el resto por los ecosistemas y provocando grandes problemas de contaminación y de emisiones (Erisman, JW., et al. (2008).

Recientemente se planteó que los cálculos del IPCC de emisiones de N<sub>2</sub>O de la agricultura podrían estar infravalorados de forma importante, habiendo subestimado unas 3-5 veces las emisiones de N<sub>2</sub>O procedentes de los cultivos. De resultar cierto este dato, el impacto de la agricultura industrial sobre el cambio climático sería mucho mayor (Crutzen, P.J., et al. (2007).

Otros efectos en la agricultura por cambio climático según la FAO<sup>2</sup>:

- Sería menos previsible el clima en general, lo que complicaría la planificación de las actividades agrícolas.
- Podría aumentar la variabilidad del clima, ejerciendo más presión en los sistemas agrícolas frágiles.
- Los extremos climáticos –que son casi imposibles de prever- podrían hacerse más frecuentes.
- Aumentaría el nivel del mar, lo que sería una amenaza para la valiosa agricultura de las costas, en particular en las islas pequeñas de tierras bajas.

---

<sup>1</sup> Salazar & Mejía. Efectos del cambio climático en el rendimiento de los cultivos. U. de Gto. México.

<sup>2</sup> FAO, 1997. La agricultura y los cambios climáticos la función de la FAO

- La diversidad biológica se reduciría en algunas de las zonas ecológicas más frágiles, como los manglares y las selvas tropicales.
- Las zonas climáticas y agroecológicas se modificarían, obligando a los agricultores a adaptarse, y poniendo en peligro la vegetación y la fauna.
- Empeoraría el actual desequilibrio que hay en la producción de alimentos entre las regiones templadas y frías y las tropicales y subtropicales.
- Se modificaría espectacularmente la distribución y cantidades de pescado y de otros productos del mar, creando un caos en las actividades pesqueras establecidas de los países.
- Avanzarían plagas y enfermedades portadas por vectores hacia zonas donde antes no existían.

Respecto a las tendencias en los escenarios de cambio climático un estudio global (Parry et al., 2004) indica que bajo el escenario de mayor calentamiento (HadCM3 SRES A1 F1) y si los efectos del CO2 no son considerados, los cereales podrían reducir hasta un 30% de su productividad en el 2080. Sin embargo, si se incluyen los efectos del CO2, los cambios de rendimientos podrían variar entre reducciones del 30% en México e incrementos del 5% en Argentina.

Otro estudio (Jones y Thornton, 2003) indica que los pequeños productores de maíz podrían esperar reducciones promedio del rendimiento del orden del 10 %, con fuertes variaciones regionales. Otro impacto negativo del cambio climático, en este caso sobre el cultivo del café, sería la disminución de las zonas aptas para su cultivo en Brasil. Por su parte, la productividad de las pasturas en zonas templadas (región pampeana de Argentina y Uruguay) se incrementaría entre un 1 y un 9% (Giménez, 2006). Para algunos expertos aumentar la habilidad del pronóstico no es la panacea, particularmente porque los pronósticos tienen asociados ineludiblemente incertidumbres, difíciles de comunicar y que dificultan su inclusión en la toma de decisiones por parte de los productores. Además, la situación de los costos de las semillas, créditos, situación del mercado y competencia, para citar algunos factores, pueden influir de manera determinante en la toma de decisiones, aun cuando se emitiera un pronóstico excelente. Conde C., Ferrer R. Gay C. & Araujo R.<sup>3</sup>

## 1.2 Sector agrícola en Colombia

Según el comunicado de prensa del DANE sobre el Producto Interno Bruto - Cuatro Trimestre y Total Anual 2011, durante el año 2011 la economía colombiana creció en 5,9% con relación al año 2010. De igual forma, el PIB creció en 6,1% en el cuarto trimestre de 2011 comparado con el mismo trimestre del año anterior<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> Conde C., Ferrer R. Gay C. & Araujo R. Impacto del cambio climático en la agricultura de México.

<sup>4</sup> DANE, 2012. comunicado de prensa del DANE sobre el Producto Interno Bruto - Cuatro Trimestre y Total Anual 2011. Bogotá.

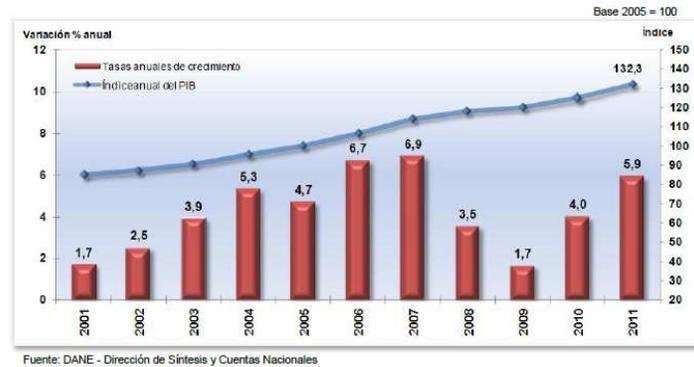


Figura 1. Crecimiento anual del Producto Interno Bruto en el periodo 2001 - 2011. Fuente: DANE, 2012

El Ministerio de Agricultura indica que el crecimiento del sector agropecuario durante el 2002 al 2010<sup>5</sup>, ha permitido ampliar las áreas sembradas del país, aumentar la producción en toneladas de alimentos y ha disminuido el desempleo en el sector rural, es así que el sector mantuvo un crecimiento promedio anual de 3%, jalonado principalmente por el sector pecuario y la pesca. En 2006 y 2007 con la entrada en vigencia del programa Agro, Ingreso Seguro, MADR logró las tasas de crecimiento más altas de la última década que alcanzaron niveles de 4%, reflejando la mayor inversión en el campo mediante el desarrollo de obras de infraestructura, riego y drenaje y un mayor acceso a recursos de financiamiento que estimularon el crecimiento de la producción. En 2009 el crecimiento fue inferior al promedio, apenas con un 1,0%, asociado a eventos de variabilidad climática (MADR, 2010). Según el DANE el comportamiento del sector en el último trimestre de 2011 registró una caída de -2,0% explicada por la disminución de café (-27,2%), flores (-25%), banano (-5,9%) y palma de aceite (-1,9%). Los anteriores sectores mostraron reducciones significativas debido a las afectaciones de los rendimientos de cultivo por afectaciones sanitarias y caídas en las exportaciones.

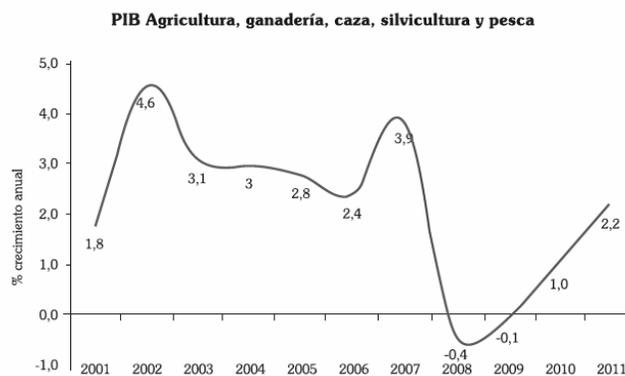


Figura 2. Comportamiento trimestral PIB Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca. Fuente: DANE, 2012.

El MADR desde el 2008 ha cofinanciado varios proyectos de manejo sanitario y fitosanitario, como de suelo y aguas, los cuales buscan investigar los efectos del cambio climático, la posibilidad de mitigación de sus efectos mediante la reducción de emisiones de GEI en el sector ganadero, sistemas de monitoreo y alerta temprana, evaluación de la compactación, riego con

<sup>5</sup> Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2010. Balance de Gobierno Logros y Retos del Sector Agropecuario 2002 - 2010.

caudales reducidos y análisis energético de la cadena de la caña. Adicional a la anterior inversión el MADR impulsó la conformación de la Red de Cambio Climático y Seguridad Alimentaria, en los que se incluye facilitar el intercambio de información y el uso de metodologías para generar escenarios de impacto del clima y evaluar sus implicaciones sobre los factores de producción y conservación ecosistémica además de promover el desarrollo de sistemas de alerta temprana para anticipar el efecto de variaciones climáticas extremas, tendencias de cambio climático e implementar medidas de adaptación (MADR, 2010).

Sin embargo los análisis del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de la República de Colombia desde el segundo semestre del 2009, indican que el sector agropecuario colombiano viene padeciendo graves afectaciones por causas de índole climático. La intensidad del Fenómeno de El Niño hacia finales del 2009 e inicios del 2010 y de La Niña, la cual fue considerada como muy fuerte en los últimos 30 años e impactó a finales del 2010 e inicios del 2011, ocasionó pérdidas económicas importantes en el país. (MADR, 2011).

Según el documento de Perspectivas Agropecuarias Primer semestre 2011 "...se estima que a causa del Fenómeno de La Niña a febrero de 2011 se tenga en todo el país más de 1.000.000 hectáreas agropecuarias afectadas, de las cuales 800.287 hectáreas corresponden a área agropecuarias inundadas en todo el país, y alrededor de 200.000 hectáreas consideradas con afectaciones por exceso de humedad. Las mayores afectaciones se tuvieron en arroz, plátano, yuca, café maíz, palma africana y algodón". (MADR, 2011).

Según las estadísticas Del MADR el invierno, que inició a mediados de 2010, tuvo efectos negativos sobre la agricultura reflejada en una caída de la producción a comienzos de 2011. Las inundaciones y el exceso de humedad incrementaron los problemas fitosanitarios, que en el caso de la palma y el café propiciaron la propagación de la pudrición del cogollo y de la roya respectivamente<sup>6</sup>.

Los cultivos agrícolas se vieron afectados a causa de las inundaciones o los deslizamientos de tierra. El sector acuícola presentó daños en la infraestructura con la consecuente pérdida de millones de alevinos. El sector pecuario resultó afectado con la muerte de bovinos y las dificultades para la alimentación del ganado.

Respecto al cultivo del café, la caída en la producción cafetera se dio a partir del segundo trimestre de 2011 como consecuencia del Fenómeno de El Niño, la baja fertilización por encarecimiento de los abonos, y de la renovación de cafetales que suman 300.000 hectáreas en los últimos 3 años, que no están en etapa productiva (MADR, 2012).

Los efectos del invierno en términos de daños a la infraestructura de producción, deslizamientos en zonas de ladera, exceso de humedad que retarda la floración de los cafetales, y dispersión de plagas y enfermedades como la roya, hicieron que la producción de 2011 cerrara en 7,8 millones de sacos, 18% por debajo de lo proyectado a principio del año (MADR, 2012). Según el MADR, en los cultivos de ciclo corto, resalta el aumento en la producción de hortalizas (13%), papa (6,5%), y maíz (62,8%), tendencia que persiste desde 2010, debido a la percepción de buenos precios por parte de los productores y a programas de apoyo como el Plan País Maíz. La producción de arroz creció 0,9%, presentando una caída en los rendimientos hasta del 35% en la costa Atlántica y los Llanos Orientales, debido a la baja luminosidad en las áreas sembradas (MADR, 2012).

---

<sup>6</sup> MADR. 2012. Perspectivas agropecuarias, primer semestre de 2012.

La sabana de Bogotá se vio gravemente afectada por inundaciones. La producción de leche disminuyó 3,8% por los efectos del invierno en algunas cuencas lecheras de Cundinamarca y Boyacá. Los ganaderos de Ubaté y Chiquinquirá tuvieron que buscar tierras altas, debido a los desbordamientos de la laguna de Fúquene y del río Suárez, que inundaron más de 5.000 hectáreas (MADR, 2012).

Al parecer está ocurriendo lo que la comunidad científica proyectó en años anteriores, Mendelsohn mencionó en el 2000 que “se ha estimado que un incremento de 2°C en la temperatura representaría una pérdida del 1.3% del PBI del sector productivo de América Latina” (Mendelsohn et al., 2000). En Colombia el sector agrícola particularmente viene perdiendo participación en el PIB total de la economía.

## 2. MODELO DE SIMULACION AquaCrop

### 2.1. Descripción del modelo de Simulación AQUACROP

AquaCrop es un modelo descriptivo que simula la biomasa y el rendimiento potencial cosechable de un cultivo en respuesta a la disponibilidad de agua. AquaCrop es un modelo que estima el rendimiento de cultivos herbáceos donde se incluyen forrajes, vegetales, frutas, aceite, raíces y tubérculos. Este modelo fue desarrollado por la División de Tierra y Agua de la FAO y simula la respuesta en el rendimiento de acuerdo al agua transpirada por el cultivo, según el volumen de agua disponible en el suelo, estimado a partir de datos de lluvia y/o riego en el suelo; este modelo es muy útil cuando el agua es el factor limitante. Adicionalmente permite determinar épocas de siembra óptimas de acuerdo a condiciones de clima, suelos, cultivo y manejo agronómico. El motor del este modelo es el agua en donde la transpiración es trasladada dentro de la biomasa por medio de un parámetro denominado la productividad de agua que es la relación entre la biomasa producida en un metro cuadrado por un milímetro transpirado.

#### 2.1.1 Sustento Teórico del Modelo AquaCrop

Aquacrop es un modelo que estima el rendimiento de cultivos herbáceos. Las características particulares que distinguen AquaCrop de otros modelos de cultivos son:

- Su enfoque sobre el agua;

- El uso de la cobertura del dosel en lugar de índice de área foliar;
- La utilización de la productividad del agua (WP) valores normalizados de la atmósfera por evaporación la demanda y la concentración de CO<sub>2</sub> que confieren al modelo una extrapolación ampliada de diversos lugares, las estaciones y el clima, incluidos los futuros escenarios climáticos;
- El número relativamente bajo de los parámetros;
- Datos de entrada que requieren parámetros y variables sólo explícitas y casi intuitiva;
- Una interfaz de usuario bien desarrollado;
- Su gran equilibrio entre la precisión, simplicidad y robustez;
- Su aplicabilidad a ser utilizado en diversos sistemas agrícolas que existen en todo el mundo.

- Aunque el modelo es relativamente simple, se hace hincapié en los procesos fundamentales involucrados en productividad de los cultivos y en las respuestas al déficit de agua, tanto desde el punto de vista fisiológico como agronómico.

Según la FAO, AquaCrop separa la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo; desarrolla un modelo de crecimiento y senescencia de follaje (Canopy cover) como base para la estimación de la transpiración; donde el rendimiento final es una función de la Biomasa y el índice de cosecha.

### 2.1.2 Esquema de AquaCrop

En el esquema se están indicando los componentes principales del continuo suelo-planta-atmósfera y los parámetros de conducción fenología, cobertura del dosel, transpiración, producción de biomasa y el rendimiento final. [I, riego;  $T_n$ , temperatura mínima del aire;  $T_x$ , temperatura máxima del aire;  $E_{To}$ , la evapotranspiración de referencia;  $E$ , la evaporación del suelo;  $Tr$ , transpiración del dosel;  $g_s$ , conductancia estomática;  $WP$ , la productividad del agua;  $HI$ , índice de cosecha; el  $CO_2$ , el carbono atmosférico- concentración de dióxido; (1), (2), (3), (4) como se ve en la figura 3, el estrés hídrico, funciones de respuesta para la expansión de las hojas, la senescencia, la conductancia estomática y el índice de cosecha, respectivamente]. Las líneas continuas indican relaciones directas entre variables y procesos. Las líneas discontinuas indican retroalimentación.

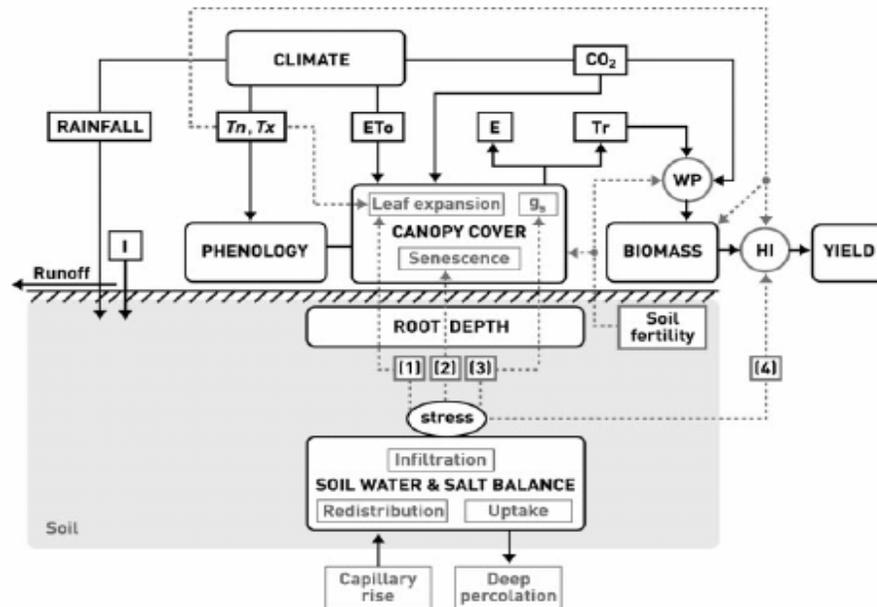


Figura 3. Esquema de AquaCrop. Fuente: FAO , 2011. Cropwater productivity model to simulate yield response to water.

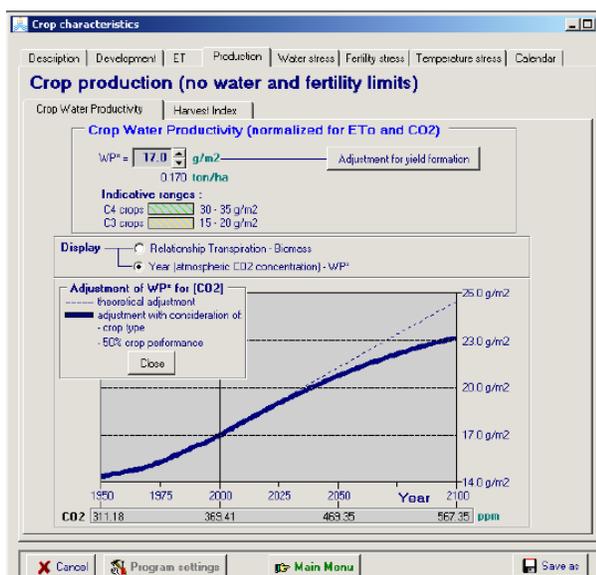
### 2.1.3 Simulación de WP y CO2

En el modelo AquaCrop, durante la simulación, el WP (Water productivity) normalizado puede ser ajustado y tiene en cuenta lo siguiente (FAO, 2011):

- La concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera es diferente de su valor de referencia de 369,41 ppm (es decir, la concentración en el año 2000 en el Observatorio Mauna Loa en Hawaii). Esto se simula multiplicando WP \* con un factor de corrección. El factor de corrección es mayor que 1 para las concentraciones de CO<sub>2</sub> por encima de 369,41 ppm y menor de 1 para las concentraciones de CO<sub>2</sub> por debajo del valor de referencia;

### 2.1.4 Media Anual del CO2 Atmosférico

AquaCrop considera 369.47 partes por millón por volumen como referencia. Es un promedio de CO<sub>2</sub> atmosférico para el año 2000 medido en el Observatorio de Mauna Loa en Hawaii. Otras concentraciones de CO<sub>2</sub> alterarían la expansión del dosel y la productividad del cultivo. En la figura de abajo se observa la salida del resultado Productividad del agua ajustada a la concentración de CO<sub>2</sub>.



Productividad del agua ajustada a la concentración de CO<sub>2</sub> considerando el tipo y desempeño del cultivo.

### 2.1.5 Experiencias con AquaCrop en Colombia

La FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) en el 2012 estableció un acuerdo con el DNP, MADR (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural) e IDEAM con el fin de realizar la adecuación del modelo Aquacrop desarrollado por FAO a las condiciones y características propias de Colombia para identificar los cambios en el rendimiento agrícola en función de la variabilidad climática y de los niveles de CO<sub>2</sub> estimados para el futuro para los cultivos de arroz riego en la zona norte y meseta de Tolima y en Meta, caña de azúcar en el Valle del Cauca, maíz tecnificado en Córdoba y Meta, papa Diacol Capiro en el altiplano cundiboyacense y maíz amarillo tecnificado en el Tolima y el Valle del Cauca. Los autores (Díaz, Méndez y Bernal) analizaron las respuestas de los mencionados cultivos ante escenarios de

cambio climático según el modelo AquaCrop además de comparar los resultados con el modelo DSSAT<sup>7</sup>.

#### 2.1.6 Aplicaciones de AquaCrop

El Modelo AquaCrop puede ser usado como herramienta de planificación o para la asistencia en la toma de decisiones para agricultura de riego o de lluvia<sup>8</sup>. Este modelo es útil particularmente en los siguientes aspectos.

- Para el desarrollo de estrategias de irrigación bajo condiciones de déficit hídrico.
- Para estudiar el efecto del rendimiento del cultivo en un lugar, el tipo de suelo, la fecha de siembra.
- Para estudiar el efecto del rendimiento del cultivo de varias técnicas de manejo de tierras.
- Para comparar la disponibilidad contra los rendimientos actuales en un campo, granja o una región, identificar las restricciones que limitan la producción del cultivo y la productividad del agua.
- Para predecir impacto del cambio climático en la producción de un cultivo.
- Para escenarios de simulación y propósitos de planificación de los economistas, administradores y gerentes del sector hídrico.

#### 2.1.7 Ventajas de AquaCrop

- Este modelo se puede calibrar y validar en Colombia lo cual se ha hecho en varias zonas piloto, es útil para determinar fechas de siembra y puede establecer láminas de riego óptimas para el cultivo.
- El modelo AquaCrop facilita los análisis del rendimiento del cultivo con base en las condiciones hídricas en determinados periodos de tiempo; ya sea en condiciones de secano ó con la lluvia estimada futura.
- Otra bondad del modelo es la de comparar los rendimientos reales de un año determinado en relación con lo esperado, bajo condiciones óptimas de humedad en el perfil del suelo. AquaCrop es útil como herramienta para diseñar, optimizar sistemas de riego estimando el aumento del rendimiento debido al agua adicional y su consecuente variación de rentabilidad en relación a la inversión requerida<sup>9</sup>.
- Según Méndez quien utilizó el modelo para los cultivos de papa y maíz, el modelo AquaCrop es útil para definir fechas de siembra, dar un manejo racional y eficiente del agua, diseñar calendarios de siembra y de riego óptimos para el cultivo en cada zona<sup>10</sup>.

---

<sup>7</sup> (Díaz, Méndez y Bernal) 2012. Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos agrícolas en Colombia, en el marco del estudio de impactos económicos del cambio climático (EIECC). FAO, IDEAM, MDVR, DNP.

<sup>8</sup> Dirk RAES, Pasquale STEDUTO, 2011, FAO.

<sup>9</sup> (Díaz, Méndez y Bernal) 2012. Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos agrícolas en Colombia, en el marco del estudio de impactos económicos del cambio climático (EIECC). FAO, IDEAM, MDVR, DNP.

<sup>10</sup> Méndez J. 2012. Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos agrícolas en Colombia, en el marco del estudio de impactos económicos del cambio climático (EIECC). FAO, IDEAM, MDVR, DNP.

- El modelo AquaCrop es sumamente sensible al agua que ingresa al perfil del suelo, dado que esta se convierte en transpiración y luego por el parámetro de productividad de agua (WP\*) se convierte en biomasa, el vacío de información de precipitación diaria puede disminuir considerablemente la biomasa y rendimientos esperados<sup>11</sup>.

### 2.1.8 Limitaciones del Modelo AquaCrop

Las principales limitaciones del modelo son:

- Su evaluación es puntual, no permitiendo realizar análisis de distribución geográficos.
- No incluye muchos tipos de cultivos, además que solo es para cultivos de tipo herbáceo.
- No incluye módulos de plagas y enfermedades.

## 2.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO ETO CALCULATOR

ET0 calculadora es un software desarrollado por la División de Tierras y Aguas de la FAO. Su función principal es la de calcular la evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>) de acuerdo con las normas de la FAO. ET<sub>0</sub> representa la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, a la cual no le falta el agua. Un campo de pasto grande y uniforme se considera en todo el mundo como la superficie de referencia. El cultivo de referencia cubre completamente el suelo, se mantiene corto, bien regado y está creciendo activamente en óptimas condiciones agronómicas<sup>12</sup>. Fundamentalmente Eto es un complemento del modelo de simulación de AquaCrop.

El software evalúa ET<sub>0</sub> a partir de datos meteorológicos por medio de la ecuación Penman-Monteith FAO. El método FAO Penman-Monteith fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial de 70 s.m<sup>-1</sup> y un albedo de 0.23 y que representa la evapotranspiración de una superficie de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado (Allen, Luis S., Raes, & Smith, 2006).

### 2.2.1 Entrada de datos

El programa puede manejar datos climáticos diarios, decadales y mensuales. Los datos se pueden administrar en una amplia variedad de unidades y los datos específicos en los parámetros climáticos comúnmente utilizados pueden ser procesados. Para este modelo datos de temperatura del aire, velocidad del viento, humedad de aire, brillo solar y radiación son requeridos para correr el modelo. Cuando no hay datos de algunas variables meteorológicas, se usan procedimientos para estimar datos faltantes a partir de los datos de temperatura o de condiciones climáticas específicas de acuerdo a las metodologías descritas en el informe de FAO N° 56; " Evapotranspiración del cultivo" (FAO; 2006). Incluso cuando el conjunto de datos

<sup>11</sup> Méndez J. 2012. Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos agrícolas en Colombia, en el marco del estudio de impactos económicos del cambio climático (EIECC). FAO, IDEAM, MDVR, DNP.

<sup>12</sup> Ibíd.

contiene solamente la temperatura del aire máxima y mínima, aún es posible obtener estimaciones razonables de la ETo. Para el presente estudio se usaron datos mensuales de temperatura mínima media y temperatura máxima media para el periodo de normal climatológica de 1981-2010 y los escenarios de cambio climático A2 y B2 de las décadas 2031-2040, 2050-2050 y 2060-2070 con el fin de encontrar el dato de ETo.

### 3. SELECCIÓN DE CULTIVOS Y REGIONES PARA IMPLEMENTAR EL MODELO DE SIMULACION AQUACROP

Teniendo en cuenta que en el IDEAM ya se ha venido trabajando sobre riesgo agroclimático en cultivos de papa, arroz y maíz, a través de la aplicación de un modelo de riesgo agrícola en el marco del proyecto de “Información climática aplicada a la gestión del riesgo agrícola en los países andinos” del Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN), en conceso se decidió implementar el modelo para estos tres cultivos. Este modelo comprende productos o capas de información que definen la amenaza climática, la exposición, la capacidad de recuperación, la vulnerabilidad de los cultivos y el desarrollo socioeconómico de la zona de producción del cultivo.

Dado que los tres cultivos tienen una participación significativa en el sector agrícola colombiano, especialmente por su extensión y que han tenido afectaciones importantes durante los eventos extremos causados por los fenómenos el Niño y La Niña, en conceso con el grupo de Agrometeorología del Ideam se decidió analizar los rendimientos de estos cultivos ante escenarios de cambio climático. Es así que se aplicará el modelo AquaCrop en los cultivos de maíz en Tolima, arroz en Meta y Tolima y papa en Boyacá y Cundinamarca.

El segundo criterio para seleccionar los cultivos y las zonas para usar AquaCrop, se relaciona con la validación y calibración del modelo de simulación en esos cultivos y en las zonas mencionadas hechas en el marco de un convenio de la FAO en el 2012.

En las figuras 4, 5 y 6 se indican los mapas de la distribución espacial de los cultivos seleccionados, los mapas son elaborados a partir de información de las evaluaciones agropecuarias del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de los municipios productores y de la cobertura de Corine LandCover del Ideam.

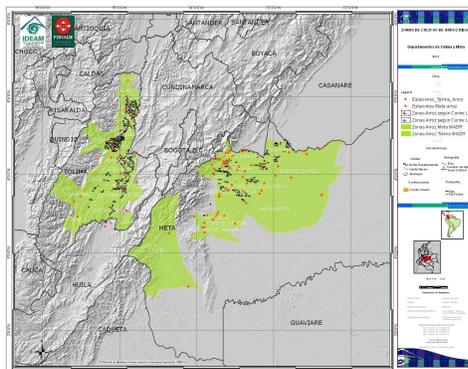


Figura 4. Mapa de la localización de las zonas de producción de arroz en Meta y Tolima. Fuente: MADR e IDEAM.

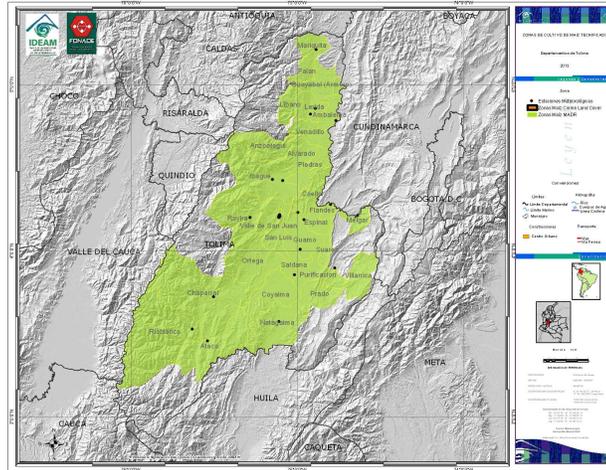


Figura 5. Mapa de la localización de las zonas de producción de maíz en Tolima. Fuente: MADR e IDEAM.

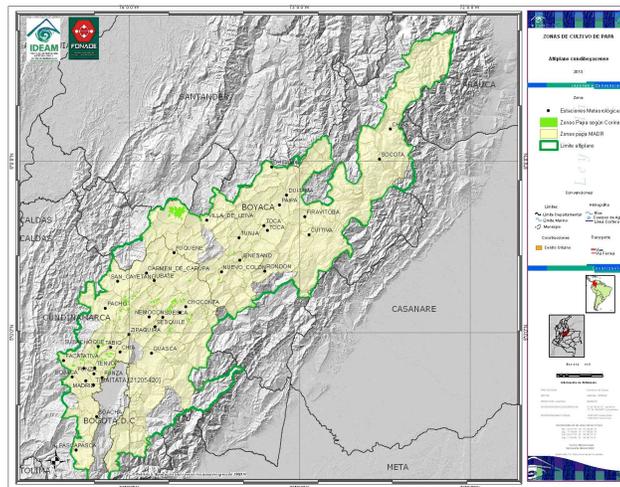


Figura 6. Mapa de la localización de las zonas de producción de papa en Cundinamarca y Boyacá. Fuente: MADR e IDEAM.

#### 4. IMPLEMENTACION DEL MODELO AquaCrop V. 3.2. y 4.0

Para llevar a cabo la implementación del modelo AquaCrop V. 3.2 y 4.0 fue necesario la recolección de información y datos de tipo edafológico, agronómico y meteorológico cuya fuente son datos experimentales resultantes de la calibración y validación de esta herramienta y fuentes secundarias obtenidas de investigadores del área agrícola nacional. En este caso específico se utilizó la información validada por consultores del MADR-FAO-IDEAM. Para conocer el esquema conceptual para la implementación del modelo AquaCrop, remitirse al informe final.

## 5.1 Zonas, estaciones y materiales seleccionadas

Se seleccionaron los departamentos de Meta, Tolima, Cundinamarca y Boyacá donde los cultivos de arroz riego, maíz tecnificado y papa representan un renglón importante en la economía regional. Se seleccionaron 6 estaciones con disponibilidad de datos de precipitación, temperatura máxima y mínima de la serie 1980-2010 y de escenarios de cambio climático. En la tabla 1 se relacionan las estaciones utilizadas.

**Tabla1. Estaciones meteorológicas finales**

Código	Categoría	Nombre	Municipio	Depto	Elev.	Longitud	Latitud
2121508	CO	Chicoral	Espinal	Tolima	475	74°59'42.3"W	4°13'53.1"N
2205503	CO	Sta Helena	Purificacion	Tolima	300	74°53'55.7"W	3°59'9.8"N
3502502	AM	Libertad La	Villavicencio	Meta	336	73°28'4.5"W	4°3'26.5"N
2120542	AM	Tibaitata	Mosquera	Cundinamarca	2543	74°12'32.4"W	4°41'29.1"N
2120574	CO	Silos	Choconta	Cundinamarca	2709	73°42'5.1"W	5°7'3.8"N
2403513	CP	U P T C	Tunja	Boyaca	2690	73°21'19.0"W	5°33'12.8"N

En cuanto los cultivos se optaron por utilizar aquellos materiales en donde ya fue validado el modelo AquaCrop, ya que se disponía de información agronómica y edafológica completa. Esta es una gran limitante al momento de querer utilizar esta información para otros cultivos, pues es poca la que está publicada y son diversos los materiales y variedades de cada cual. Los datos agronómicos requeridos por AquaCrop, exigen que sean específicos para cada variedad así como se indica en la tabla de variables de entrada del modelo, mencionado arriba, por lo tanto se trabajó con estas variedades. En la tabla siguiente se indican los materiales utilizados. Tabla 2.

**Tabla 2. Zonas y materiales para insumo en AquaCrop**

Zonas y materiales usos en el modelo AQUACROP		
CULTIVO	ZONA	MATERIAL
Papa	Mosquera-Cundinamarca	Diacol Capiro (R12) / Pastusa Suprema
	Tunja-Boyacá	
Maíz	Espinal-Tolima	PAC 105
	Villavicencio -Meta	
Arroz Riego	Espinal-Tolima	F174
	Villavicencio -Meta	

## 5.2 Variables de entrada del modelo

En la tabla 3 se indica la información que fue usada para la implementación del modelo, asociada a los cuatro grandes componentes de AquaCrop V.3.2.

Tabla 3. Variables de entrada al modelo AquaCrop

CLIMA	AGRONOMIA	SUELOS	RIEGOS	PRACTICAS
Precipitación	Fenología-Días Después de Siembra DDS (Emergencia, Cobertura Máxima de dosel, senescencia, inicio y duración de floración ó inicio y duración de tuberización, Madurez)	Textura	Método de irrigación	Grado de fertilidad del suelo respecto al cultivo
Temperaturas Máximas y Mínimas	Índice de Cosecha (HI)	Numero de Horizontes	Lamina Neta de Riego	
Humedad Relativa	Fecha de Siembra y Cosecha	Punto de Marchitez Permanente		
Velocidad del Viento	Método de Siembra	Capacidad de Campo	Lamina Bruta de Riego	Presencia de acolchados o residuos de cosecha
Radiación solar o heliofania	Temperatura Base y Máxima	Punto de Saturación		
Evapotranspiración	Raíces (Profundidad inicial y máxima- días a máxima después de siembra)	Conductividad Hidráulica Saturada	Fechas de Aplicación	Capa de agua permanente sobre el suelo
	Productividad de Agua (WP*)	Curva Numero (CN)		
	Cobertura de Dosel Inicial	Lamina rápidamente Evaporable (REW)	Eficiencia de Aplicación	
Concentraciones de CO <sub>2</sub>	Cobertura de Dosel Máxima	Profundidad de capa restrictiva		

## 5.3 Metodología

### 4.1.1 Parámetros Agroclimáticos

#### 4.1.1.1 Grados Día Acumulados (GDD)

La edad fisiológica se mide en grados día acumulados (GDD). Para la estimación de este valor se requiere conocer la temperatura media diaria del ambiente ( $\bar{T}$ ), y las temperaturas máximas ( $T_x$ ) y mínimas ( $T_b$ ) a las cuales el cultivo se desarrolla.

La temperatura media diaria se puede estimar como

$$\bar{T} = \frac{T_{max} - T_{min}}{2}$$

Así el tiempo termal es la suma de temperatura con respecto al tiempo, tiempo que dura el cultivo para alcanzar una etapa fenológica específica. Las unidades del tiempo termal (t) son grados-días y se calculan como la sumatoria de la diferencia entre la temperatura promedio diaria ( $T_x$ ) y la temperatura base para el cultivo ( $T_b$ ), iniciándose en una fecha dada; esto es:

$$t = \sum(Rx - T_b) \text{ para } T_x > T_b$$

El desarrollo del cultivo se puede especificar en el cultivo de días grado (GDD) o los días del calendario para este estudio se utilizaron grados días y no días para conocer el estado de cultivo en su ciclo vegetativo.

#### 4.1.2 Evapotranspiración del cultivo de referencia ETo

Como se había mencionado Eto Calculator es un módulo complementario del software AquaCrop, el cual calcula la evapotranspiración del cultivo de referencia de acuerdo a la disponibilidad de distintas variables climáticas de entrada, a la localización geográfica específicamente de la estación meteorológica seleccionada. En ETo Calculator permite el cálculo de ETo diariamente, decadal o mensualmente. Para el presente trabajo se seleccionó la salida a nivel mensual teniendo en cuenta que se van a analizar series de cambio climático por lo que no es necesario resolución temporal detallada. Se calculó evapotranspiración del cultivo de referencia para las 6 estaciones ya mencionadas.

En la tabla 4 se indican los resultados de la Evapotranspiración de transferencia del cultivo obtenidos a partir de datos de temperatura máxima y mínima mensual multianual y calculados a través del software ETo.

**Tabla 4. Evapotranspiración de referencia (mm / día) en las estaciones meteorológicas seleccionadas para el periodo 1980-2010.**

<b>Eto</b>	Chicoral	Purificac	la Libertad	Tibaitatá	Chocontá	UPTC
ene	4.2	4.3	4.4	3.8	3.3	3.5
feb	4.5	4.6	4.7	3.9	3.4	3.6
mar	4.5	4.4	4.5	3.9	3.4	3.7
abr	4.2	4.2	4.1	3.7	3.1	3.3
may	4.2	4.2	3.8	3.5	2.9	3
jun	4.3	4.3	3.5	3.4	2.6	2.8
jul	4.7	4.6	3.6	3.4	2.5	2.8
ago	5	5	4	3.6	2.7	3
sep	4.8	4.8	4.2	3.9	3	3.3
oct	4.3	4.3	4.1	3.7	3.1	3.2
nov	3.9	4	3.9	3.5	3	3.1
dic	3.9	4	4	3.6	3.1	3.2

#### 4.1.3 Parámetros características de Suelos

El parámetro de suelo es importante dentro del modelo de AquaCrop, ya que funciona como regulador de los aportes de agua externos para el normal crecimiento y desarrollo de las plantas. Dado que el enfoque del modelo AquaCrop es hídrico, los parámetros específicos del suelo como número de horizontes, tipo de suelo, textura, capacidad de campo, conductividad hidráulica, punto de marchitez permanente, son requeridos detalladamente para obtener mejores resultados en la simulación.

Según Bernal, 2012, el área de estudio debe poseer en lo posible datos de un análisis de perfil de suelo el cual dé cuenta de las características antes mencionadas. Si esta información no se encuentra disponible, se sugiere que a partir de revisión secundaria se pueda establecer un punto cercano con la información requerida. Si aún esto no genera confianza se puede realizar un análisis rápido de textura de suelo para derivar de ahí las características del suelo. Igualmente

Mendez, 2012 sugiere que para tener mayor certeza en la caracterización del suelo analizado, se recomienda el levantamiento de una calicata, donde se analicen estas características por perfiles encontrados. Si no se tienen esta información de forma directa, será necesario recurrir a estudios secundarios (p.e IGAC) que describan de forma general las características de los suelos de una zona.

Para este trabajo se usó la información de los suelos de las estaciones meteorológicas o de sitios cercanos. Para el caso de Tolima se incorporaron las características de los perfiles P-1 y PI-9 de Espinal y Purificación respectivamente. En Villavicencio, Meta se utilizó como referencia el perfil PV-5. Los suelos de Tabaitatá, Mosquera, corresponden a una textura Franco arcillosa, con una pendiente de 0- 3 %, pH de 5.6 a 6.5, con drenaje bueno a moderado, fertilidad moderada y profundidad de profundos a muy profundos, estas características fueran tomadas de la validación del estudio de Méndez, 2012. En Tunja, Boyacá se tuvo en cuenta el perfil RO2 del IGAC. Para mayor información de la características de los suelos usados en las simulaciones, remitirse al informe final.

El conocimiento de la disponibilidad hídrica en el suelo y su distribución en el tiempo, permite establecer las necesidades de riego y drenaje, ocasionadas por la componente climatológica. Además, establecer las fechas de siembra y las épocas más apropiadas para la realización de labores de campo. Para este estudio se utilizaron datos de calendario de riego para maíz y arroz, y datos de requerimientos de lámina de riego en el caso de papa, ya definidas por los productores.

Para el caso de fertilización se asume que se mantiene la misma oferta tecnológica en la proyección de cambio climático, es decir se supone que el cultivo recibe una óptima fertilización, óptimo manejo de labores agrícolas y efectivo control fitosanitario.

#### **4.1.4 Parámetros características del Cultivo**

Aunque AquaCrop está basado en procesos biofísicos básicos y complejos, este modelo utiliza un número relativamente pequeño de parámetros de cultivo que describen las características de los cultivos. La FAO ha calibrado los parámetros de cultivo para los principales cultivos agrícolas, y les proporciona como valores por defecto en el modelo. Al seleccionar un cultivo se descargan los parámetros de cultivo que pueden ser conservativos o no conservativos como a continuación se explica.

Para la simulación de los cultivos seleccionados (maíz, arroz y papa) en este trabajo se tuvo en cuenta los parámetros NO CONSERVATIVOS (Limited Set), que dependen de las condiciones locales del entorno. Un caso específico es el del parámetro de Canopy Development usado en el ciclo fenológico del arroz, el cual fue ajustado en base de expertos de Fedearroz y Federriego con los consultores que calibraron el modelo durante el 2012.

Para las prácticas de superficie de suelo específicamente en el cultivo de arroz en Tolima por lo general debe haber una lámina de agua almacenada de 0.05 metros, valor que se seleccionó en el módulo de manejo de campo.

Los siguientes parámetros del cultivo son los requeridos, teniendo en claro que variedad de cultivo se va a utilizar: Maíz en Meta y Tolima, arroz en Meta y Tolima y papa en Cundinamarca y Boyacá.

**Tabla 5. Parámetros del cultivo requeridos en AquaCrop**

<b>ENTRADAS A AQUACROP</b>	<b>Maíz PAC 105 Meta y Tolima</b>	<b>Arroz Riego</b>	<b>Papa DIACOL CAPIRO</b>	<b>Papa PASTUSA SUPREMA</b>
Cobertura de dosel inicial - Cco(%)	0.46	8.9	0.25	0.25
Días a emergencia	6	10	15	15
Dosel máximo (%)	90	95	80	95
Días a dosel máximo	58	70	96	96
Días a senescencia	112	100	124	139
Duración ciclo	115	120	152	159
Días a floración o tuberización	52	80	51	55
Duración de floración o tuberización	12	12	101	104
Raíces (mts)	0.5	0.2	0.5	0.5
Días a máxima prof de raíces	58	70	59	59
Índice de cosecha- HI-(%)	42	50	85	72
Productividad hídrica (g/m <sup>2</sup> )	30	19	18	18
Tbase min (°C)	8	8	2	2
Tbase max (°C)	38	36	29	29

#### **4.1.5 Caracterización climática de las zonas del cultivo**

##### **4.3.12.1 Tolima**

El departamento de Tolima se caracteriza por tener un régimen bimodal de la precipitación, con dos temporadas de lluvias en el año, Abril-Mayo y Octubre-Noviembre y dos temporadas secas (Enero-Febrero y Julio-Agosto). En Purificación y Chicoral se presentan lluvias anuales entre 1000 y 1500 mm. La clasificación de la temperatura corresponde a cálida con un mínima promedio de 22°C y máxima promedio de 32 °C. El índice de disponibilidad hídrica determina el agua contenida en la capa superficial del suelo, en el gráfico se observa que de octubre a enero corresponde a seco y de febrero a mayo corresponde a húmedo.

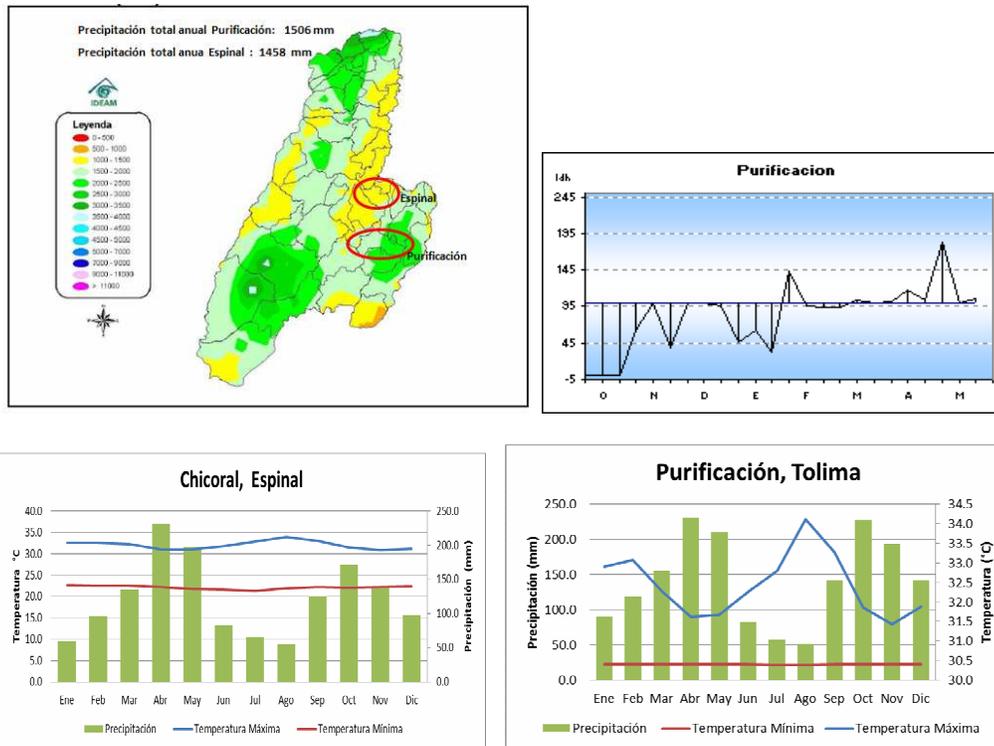
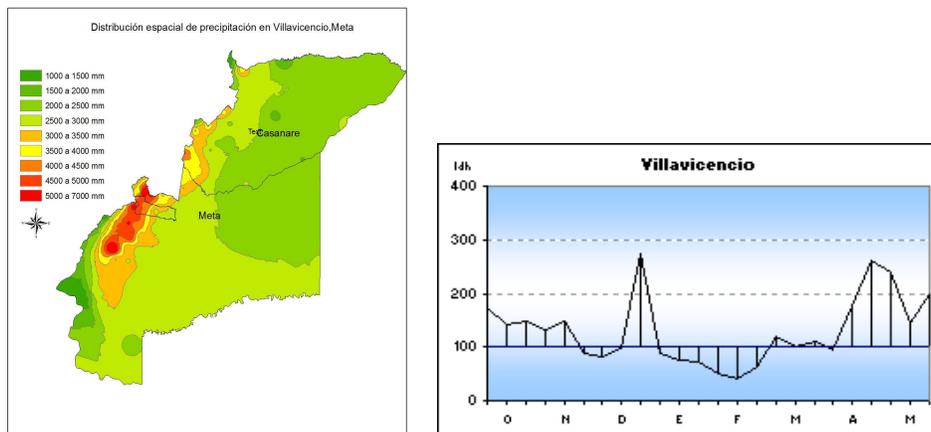


Figura 7. Distribución espacial y temporal de la precipitación en Purificación y Chicoral, Tolima. Fuente: IDEAM

#### 4.3.12.2 Meta

El departamento de Meta se caracteriza por tener un régimen monomodal de la precipitación, con una temporada de lluvias al año que se extiende de abril a octubre. En Villavicencio se presentan lluvias anuales de 2964 mm. La clasificación de la temperatura corresponde a cálido y cálido seco con un mínima promedio de 22°C y máxima promedio de 31°C. El índice de disponibilidad hídrica determina el agua contenida en la capa superficial del suelo, en el gráfico se observa que de octubre a febrero corresponde a seco y muy húmedo de abril a octubre.



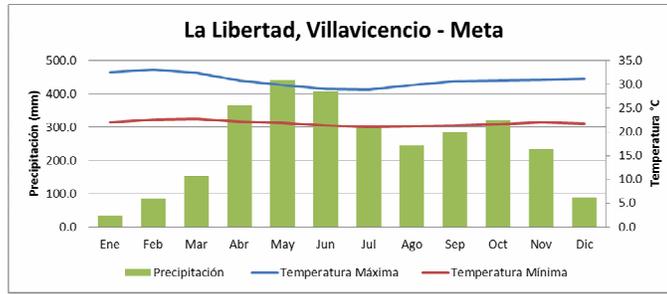
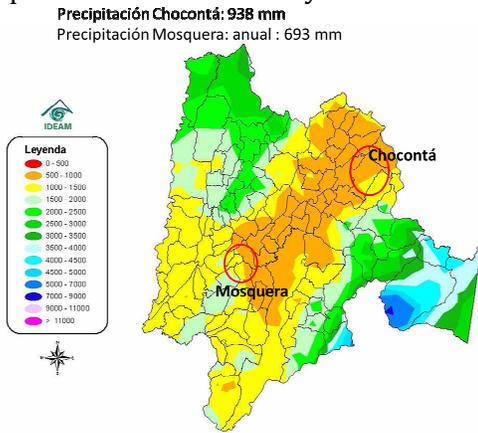


Figura 8. Distribución espacial y temporal de la precipitación en Villavicencio, Meta.

### 4.3.12.3 Cundinamarca

El departamento de Cundinamarca se caracteriza por tener un régimen bimodal de la precipitación hacia el centro y monomodal hacia la vertiente oriental de la cordillera oriental, con una temporada de lluvias al año que se extiende de abril a octubre especialmente en Chocontá.



En Mosquera se presentan lluvias anuales de 693 mm y en Chocontá se presentan 939 mm con un régimen bimodal. La clasificación de la temperatura corresponde a frío con un mínima promedio de 7 y 8 °C y máxima promedio de 19 °C. El índice de disponibilidad hídrica determina el agua contenida en la capa superficial del suelo, en el gráfico se observa que para Chocontá de diciembre a marzo corresponde a seco y húmedo el resto del año. En la estación de Tibaitatá gran parte del año corresponde a un índice seco.

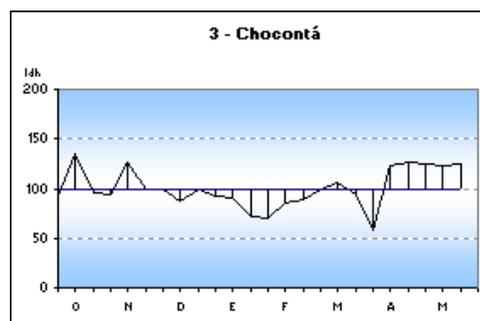
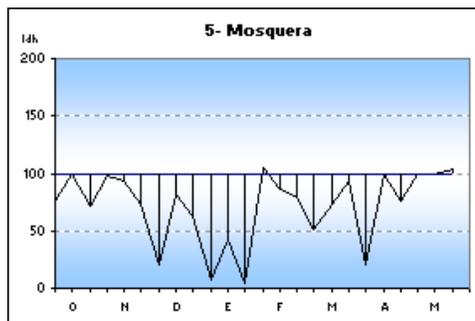
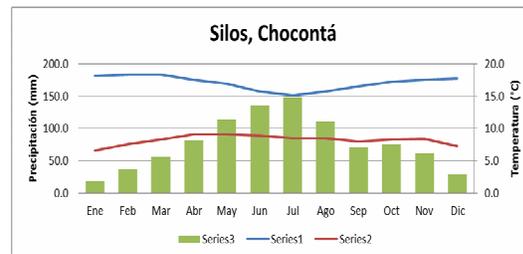
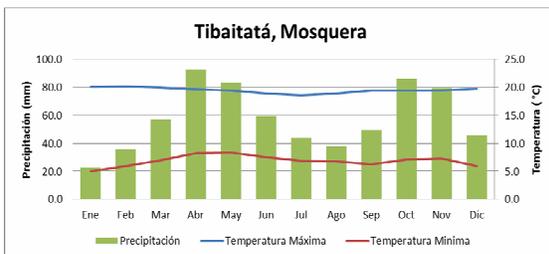


Figura 9. Distribución espacial y temporal de la precipitación en Mosquera y Chocontá, Cundinamarca.

#### 4.13.2.4. Tunja, Boyacá

El departamento de Boyacá se caracteriza por tener un régimen bimodal de la precipitación hacia el centro y norte y monomodal hacia la vertiente oriental de la cordillera oriental. En Tunja se presentan lluvias anuales de 653 mm. La clasificación de la temperatura corresponde a frío con un mínima promedio de 8.5 °C y máxima promedio de 18 °C. El índice de disponibilidad hídrica determina el agua contenida en la capa superficial del suelo, en el gráfico se observa que para Duitama, cerca de Tunja, corresponde a seco de noviembre a abril.

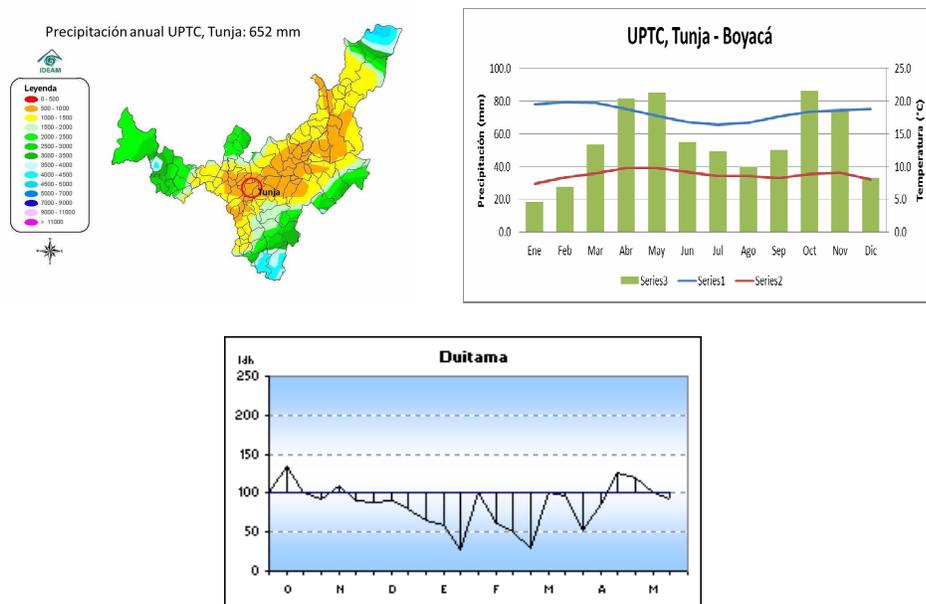


Figura 10. Distribución espacial y temporal de la precipitación en UPTC, Tunja-Boyacá.

## 5. SIMULACION DE RENDIMIENTOS DE CULTIVOS BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

### Escenarios del IEEE

SRES se refiere a los casos que se describen en el Informe especial del IPCC sobre escenarios de emisiones (IEEE, 2000). Los escenarios del IEEE son agrupados en cuatro familias de escenarios (A1, A2, B1 y B2) que exploran vías alternativas de desarrollo, que abarcan una amplia gama de demográfica, económica y las fuerzas impulsoras y las emisiones de gases de efecto invernadero tecnológico. Los escenarios del IEEE no incluyen adicionalmente políticas climáticas sobre las actuales. Las proyecciones de las emisiones son ampliamente utilizadas en las evaluaciones del futuro cambio climático y sus supuestos subyacentes con respecto a los cambios socioeconómicos, demográficos y tecnológicos sirven como insumos para muchos climáticos recientes cambiar la vulnerabilidad y evaluaciones de impacto. (IPCC, 2007).

## Características de los Escenarios

A2: Un mundo muy heterogéneo con aumento continuo de la población global; con crecimiento económico regionalmente orientado y más fragmentado y más lento que en otros escenarios (PESIMISTA)

B2: Un mundo en el cual el énfasis está sobre soluciones locales para la sostenibilidad económica, social, y ambiental, con la población continuamente creciente (menor que en A2) y con un desarrollo económico intermedio. (OPTIMISTA).

Para la proyección de cambio climático, se tomaron las condiciones iniciales de los Modelos Globales MPIECH5 (ECHAM5) y UKHADCM3, para los escenarios A2 y B2, en el periodo 2011-2100. El clima presente, de referencia, fue a partir de ERA 40 1981-2100. Las proyecciones fueron generadas por el grupo de modelación del IDEAM.

Para este trabajo el modelamiento de rendimientos potenciales fue evaluado para los dos escenarios de Cambio Climático, A2 y B2 para las décadas 2031 -2040, 2041 a 2050 y 2061 a 2070 puntualmente para las 6 estaciones ya mencionadas. En esta unidad se compiló la información climática y agrícola recolectada así como los resultados generados por los modelos de análisis. Esto, en virtud de la disponibilidad de información censal agrícola, así como la meteorológica.

## 6.1 Posibles cambios en la precipitación las estaciones seleccionadas

Se espera que las precipitaciones mantengan un régimen similar al actual en los escenarios de cambio climático, es decir que la distribución temporal se mantendrá con dos picos en el mes para las estaciones de Tolima, especialmente en mayo abril y octubre noviembre, al igual que para la estación de La Libertad en Villavicencio se proyecten los mayores volúmenes de precipitación de abril a agosto. Nótese que la estación de Purificación indica que en escenarios de cambio climático habría una disminución de las lluvias casi del 75 % respecto al periodo de referencia.

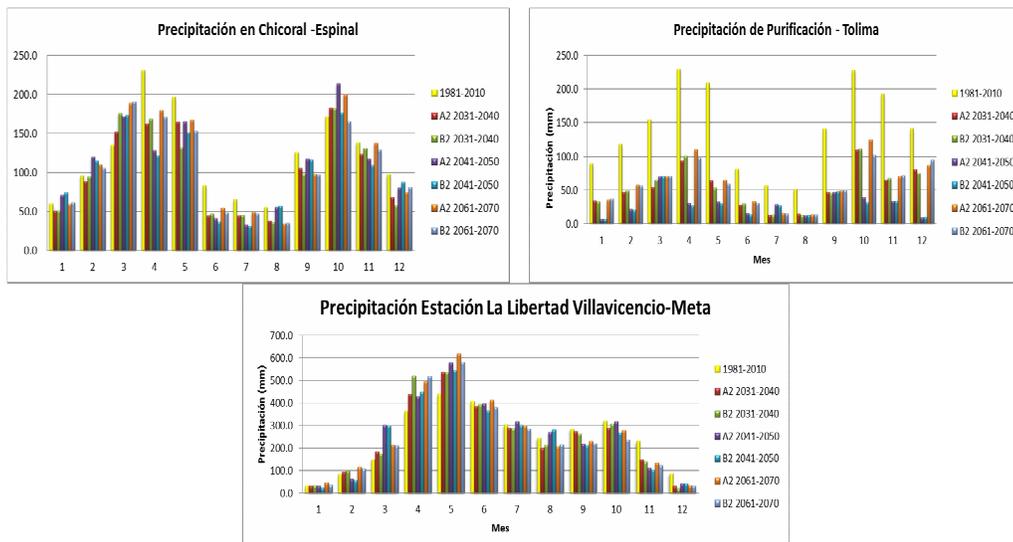


Figura 11. Precipitación para los escenarios A2 y B2 para décadas 2031-2040, 2041-2050 y 2061-2070 comparado con la media climática 1981-2010 en Meta y Tolima.

## Cambios de precipitación en estaciones del altiplano cundiboyacense

De acuerdo a los escenarios de cambio climático generados por el Ideam, se proyectan disminuciones en los valores de precipitación entre los meses de mayo a junio, y de noviembre a enero. Los meses más críticos son junio, noviembre y diciembre para un régimen bimodal. Las variaciones más dramáticas corresponden para la estación de UPTC en los meses de abril, mayo, junio, octubre y noviembre.

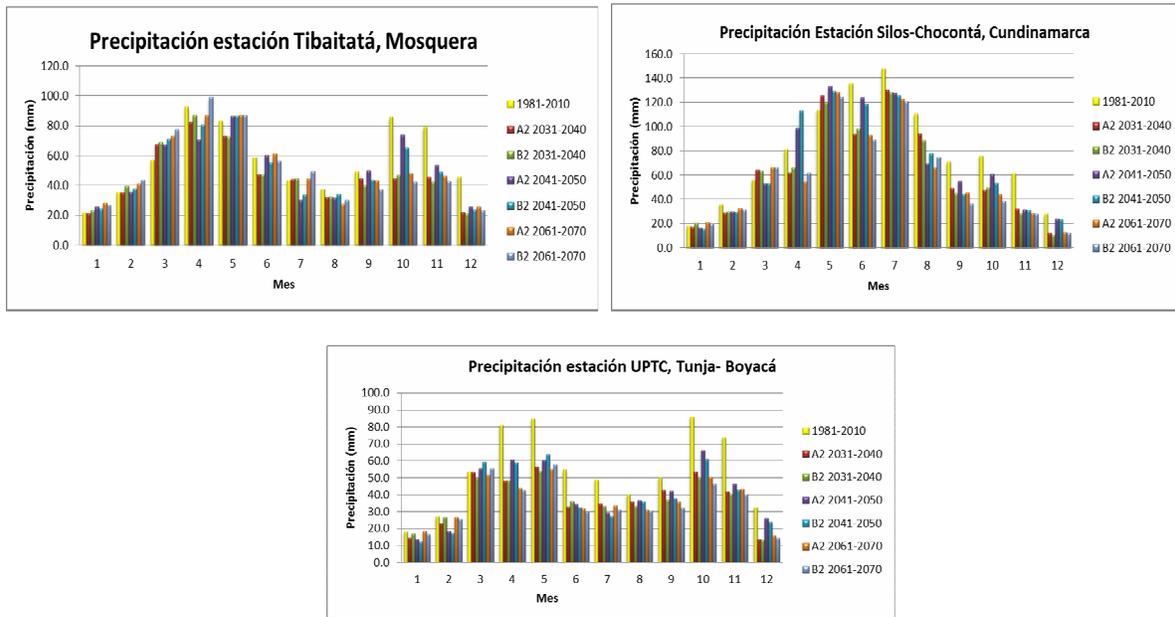


Figura 12. Precipitación para los escenarios A2 y B2 para décadas 2031-2040, 2041-2050 y 2061-2070 comparado con la media climática 1981-2010.

## Cambios de temperatura del aire

Se tomaron las temperaturas máximas para los escenarios A2 y B2 para décadas 2031-2040, 2041-2050 y 2061-2070 comparado con la media climática 1981-2010.

Para las estaciones de Tolima, los mayores incrementos de temperatura se esperan para los escenarios de las décadas de 2041-2050 y 2061-2070, con aumentos de hasta 5 °Celsius para el mes de agosto. Aumentos significativos se esperan para los meses de julio a octubre para la media de la década 2041-2050 y 2061-2070.

Para la estación de La Libertad en Villavicencio se observan aumentos en la temperatura, concentrándose en los meses de agosto a octubre con aumentos de hasta 2.0 y 5.0°Celsius para los escenarios 2041-2050 y 2061-2070.

En las estaciones del altiplano cundiboyacense se esperan aumentos significativos en los meses de enero, febrero y diciembre, con incrementos hasta de 2.0 y 3.0 ° Celsius.

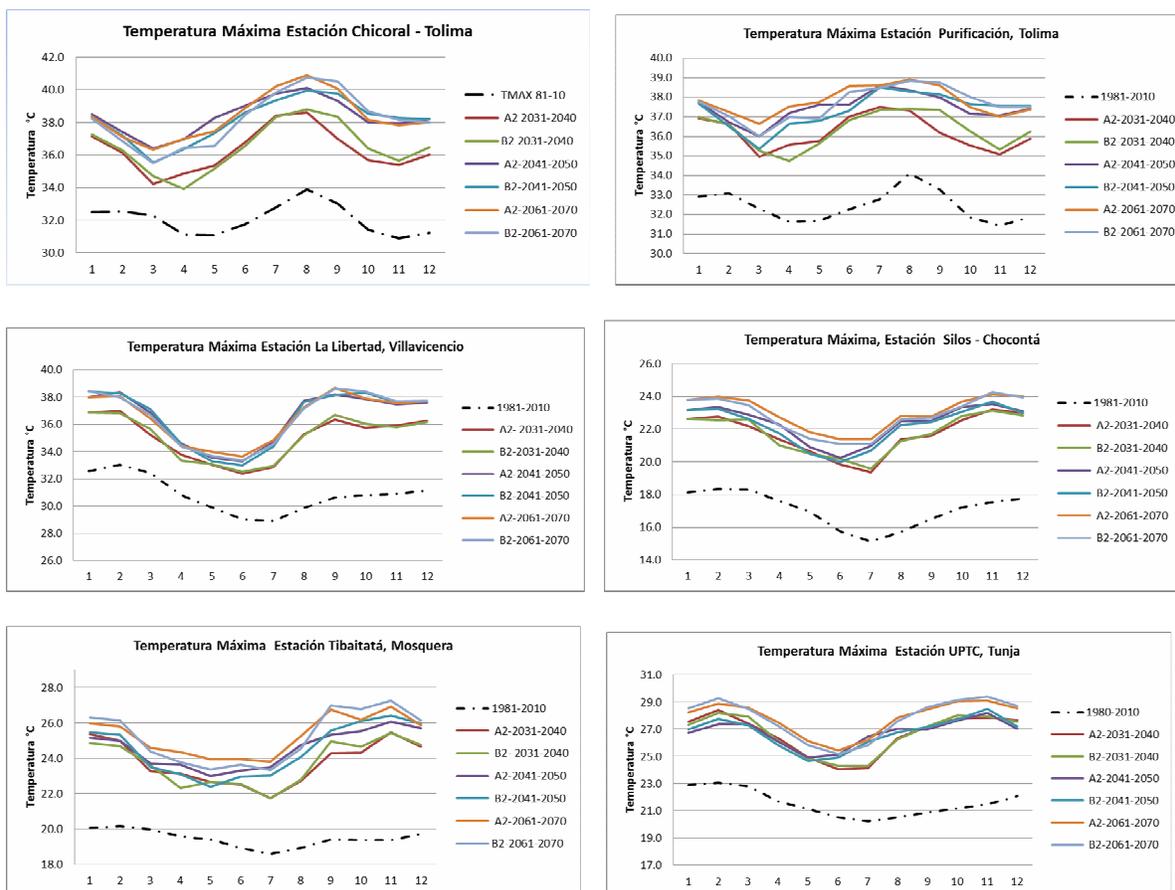


Figura 13. Temperatura Máxima para los escenarios A2 y B2 para décadas 2031-2040, 2041-2050 y 2061-2070 comparado con la media climática 1981-2010.

Los resultados anteriores muestran que los escenarios A2 y B2 en el periodo 2041-2050 y 2061-2070 presentaran mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> que favorecerán el aumento de las temperaturas máximas y de temperaturas mínimas.

## 6.2 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de maíz tecnificado en Tolima y Metas ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop

Para este trabajo se tomaron el promedio mensual multianual de las variables de precipitación y temperatura máxima de las décadas 2031-2040, 2041-2050 y 2061-2070 en los escenarios A2 y B2. Así mismo se tomaron los escenarios de concentración de CO<sub>2</sub>, A2 y B2 del IPCC, correspondientes al año promedio, es decir, la concentración de CO<sub>2</sub> del año 2035 representaría la concentración de la década 2031-2040, la del año 2045 representaría la década de 2041 a 2050 y la del año 2065, representa del 2061 al 2070.

Las simulaciones realizadas en AquaCrop se realizaron para un ciclo vegetativo de 115 días es decir tres meses y medio aproximadamente, para los semestres agrícolas A y B. En las zonas de Tolima y Meta se usó la variedad PAC 105 para el módulo de cultivo y se seleccionó requerimiento de agua- con irrigación neta de 50% RAW y no fueron considerados efectos por condiciones de estrés por fertilidad para la producción de biomasa.

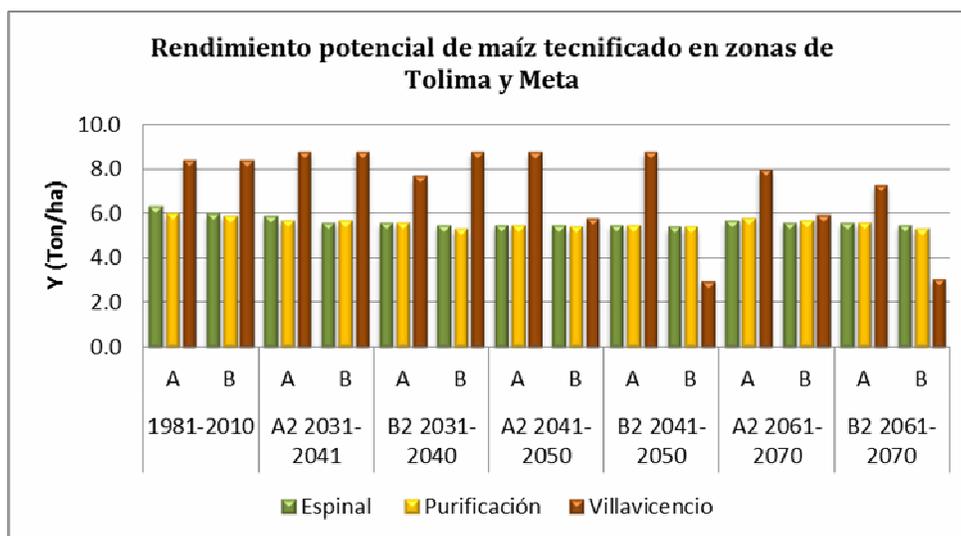


Figura 14. Rendimiento potencial de maíz tecnificado en las estaciones de las zonas de Tolima y Meta.

Como ya se había mencionado, AquaCrop ajusta los valores de la productividad hídrica (WP) con los contenidos de CO<sub>2</sub> de los escenarios A2 y B2, la cual se ve reflejada en los resultados de las corridas. Los resultados indicaron un mayor incremento de CO<sub>2</sub> para el escenario A2 respecto al B2, esto indica un potencial aumento en la acumulación de biomasa seca y por consiguiente en el rendimiento y productividad hídrica normalizada, de esta forma en escenarios futuros se espera un aumento en las producciones en un escenario A2 del cultivo de maíz asumiendo adecuadas prácticas agrícolas (rotación y recuperación de suelos, buen uso de técnicas de riego, fertilización, excelente control fitosanitario).

En Tolima cabe resaltar que en los semestres B del escenario B2, una posible caída en el rendimiento puede obedecer a altas tasas de evapotranspiración y menor grado día acumulados (GDD°C), asociado con el grado de concentración de CO<sub>2</sub> en las décadas 2031-2041, 2041-2050 y 2061-2070.

Según el régimen bimodal de las estaciones de Chicoral y Purificación, durante la primera temporada de lluvias, es decir en el primer semestre del año, se cuenta con mejor disponibilidad hídrica que permite una mayor producción del cultivo durante el periodo de referencia y los escenarios de cambio climático, de acuerdo con los resultados.

Las láminas de riego requeridas por el cultivo se van incrementando con un horizonte de tiempo más lejano y son mayores para el segundo semestre del año, especialmente para el escenario B2, dado que la precipitación disminuye y las tasas de evapotranspiración de referencia aumentan en lo que se refiere al balance hídrico. Para más información ver tabla en el informe final.

Respecto a las simulaciones realizadas en AquaCrop para el maíz en la estación La Libertad en Villavicencio, en el departamento del Meta, los resultados muestran poca variación en los rendimientos durante el periodo 1981-2010 y los escenarios A2 y B2 del 2031 a 2040, para las siguientes décadas, es decir para un horizonte de tiempo más lejano los valores de rendimiento disminuyen significativamente. Según las condiciones del escenario A2 el maíz presentaría un incremento del 4.76 % en la década de 2031-2040 respecto al periodo de referencia en el semestre agrícola A, e igualmente para el semestre B, las condiciones hídricas, térmicas y el incremento de CO<sub>2</sub> favorecerían el aumento del rendimiento del grano. Sin embargo las variaciones porcentuales de las siguientes décadas 2041-2050 y 2061-2070 indican disminución entre 4 y 13 % del rendimiento del maíz.

Cabe resaltar que las concentraciones de CO<sub>2</sub> son mayores para el escenario A2 que el B2 de allí que se vea reflejados mayores rendimientos en A2. Los volúmenes de precipitación seguirán siendo mayores para el primer semestre agrícola, se esperaría entonces que se mantenga un régimen monomodal con un periodo de mayores frecuencias entre mayo a octubre como sucede hasta ahora.

Para el caso de la proyección del rendimiento de maíz en Villavicencio se observó mayor incremento de CO<sub>2</sub> para el escenario A2 respecto al B2, y aunque se esperarían mayores volúmenes de precipitación y menos evapotranspiración en los semestres A que en los B, esto indica un posible aumento en la acumulación de biomasa seca y por consiguiente en el rendimiento y productividad hídrica asumiendo adecuadas prácticas agrícolas. Para los semestres B del escenario B2 de las décadas 2031-2041, 2041-2050 y 2061-2070 se espera menor rendimiento del cultivo de maíz asumiendo la disposición de la misma oferta tecnológica actual. La variación porcentual de una disminución del rendimiento es de 30 a 65 % especialmente para el semestre B en el que se presenta menor disponibilidad hídrica.

Respecto a la lámina de riego en los semestres A y B de ambos escenarios especialmente para los primeros semestres agrícolas, el resultado de agua aplicada para irrigación es de 0, se puede deducir que esta óptima disponibilidad de agua es por un alto volumen en las precipitaciones de este semestre.

Resulta evidente que se esperarían mejores rendimientos potenciales en Meta que en Tolima, esto podría obedecer a la oferta de disponibilidad hídrica y ambiental existente en Meta, dadas las condiciones de régimen monomodal y mayor volumen de lluvias que en Tolima.

### **6.3 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de Arroz riego en Tolima ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop**

Las simulaciones realizadas en AquaCrop se realizaron para un ciclo vegetativo de 120 días es decir tres meses y medio aproximadamente, para los semestres agrícolas A y B. En Tolima y Meta se usó la variedad F174 de Fedearroz para el módulo de cultivo y se seleccionó para el requerimiento de agua: calendario de riego de arroz en Tolima con método de riego de superficie (lámina de 3mm/día) y no fueron considerados efectos por condiciones de estrés por fertilidad para la producción de biomasa. En el caso de Meta se seleccionó para el requerimiento de agua: Requerimiento neto con 50% RAW. En ambos casos se mantuvo la oferta tecnológica.

Los rendimientos para el cultivo de maíz en el periodo de referencia como en el A2 en la década entre 2031-2040 sobreestima ligeramente los reportados por Fenalce los cuales están en un rango entre 4.5 y 6.5 ton/ha, aun presentándose altos valores de evapotranspiración de referencia y grados días acumulados, pero con disminución en las precipitaciones de la década 2031-2040, los resultados arrojados por el modelo son aceptables. La variación en los rendimientos entre el periodo de referencia, 1981-2010 y la década 2031-2040 de A2 fue del 11%.

Llama especial atención la disminución de los rendimientos para las décadas de 2041-2050 y 2061-2070 en las zonas de Tolima, en donde tasas de evapotranspiración y valores de grados día acumulados son similares a los arrojados para 1981-2010 y 2031-2040. Se consultó el índice de cosecha y efectivamente los porcentajes de HI oscilaron entre 5 y 26%, porcentajes bajos respecto al HI que se fijó por defecto para el arroz que es de 45%, al parecer ascensos importantes de temperatura y mayores concentraciones de CO2 en ambas estaciones, Chicoral y Purificación.

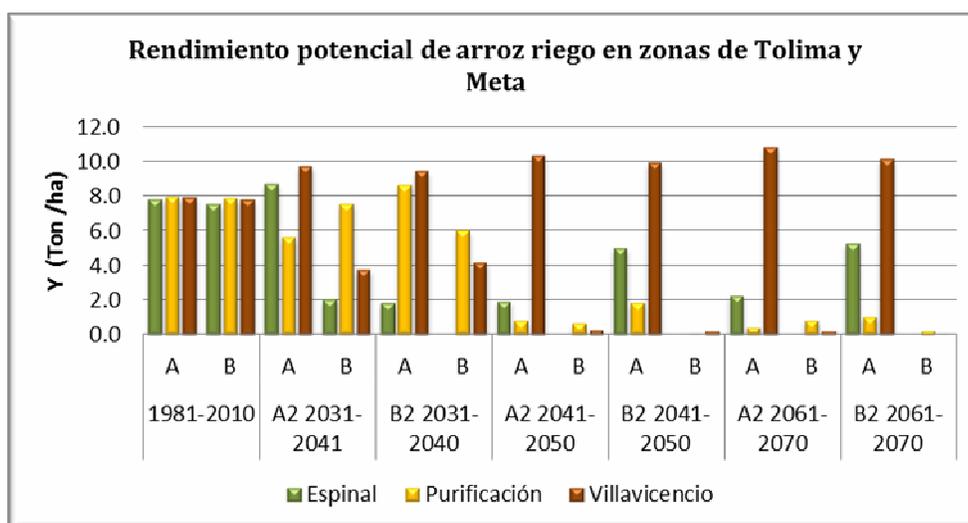


Figura 15. Rendimiento potencial de arroz riego en las estaciones de las zonas de Tolima y Meta.

Para las corridas en el escenario B2 de arroz en Tolima se tomó un ciclo de cultivo más temprano debido a los bajos valores de precipitación en febrero y marzo por lo que se fijó en enero.

Para este escenario en zonas de Tolima en las décadas 2041-2050 y 2061-2070 especialmente para el primer semestre agrícola se presenta mayor rendimiento respecto al segundo semestre. El aumento de los grados días acumulados en la estación Santa Helena en Purificación fue importante asociado a aumento de temperatura y altas tasas de evapotranspiración de referencia. En resumen se esperaría disminución del 60 al 90% del rendimiento de arroz riego en esta zona, teniendo en cuenta que la región del Tolima presenta un índice de disponibilidad hídrica muy bajo (Seco) desde octubre hasta enero según el IDEAM.

Para el caso de Meta, los rendimientos para el cultivo de arroz en el periodo de referencia como en el A2 en la década entre 2031-2040 sobreestima los reportados por FENALCE los cuales están en un rango entre 4.5 y 6 ton/ha.

Respecto al escenario A2 el rendimiento del cultivo de arroz riego aumentaría en un 22.5% en el primer semestre agrícola de la década 2031 a 2040 respecto al periodo de referencia y presentaría una disminución del 52 % en el segundo semestre agrícola. La disponibilidad hídrica, las condiciones de temperaturas y el incremento de CO2 en el horizonte del tiempo beneficiarían un incremento del rendimiento del grano en los primeros semestres agrícolas de todas las décadas de escenario, caso contrario ocurriría para los segundos semestres en donde se esperan disminuciones drásticas de rendimiento debido a un potencial estrés hídrico asociado a un aumento de temperaturas máximas lo cual afectarían el desarrollo del cultivo y la producción del grano de arroz.

Durante la década de 2041- 2050, el modelo arroja que para las zonas del Meta puede haber un incremento en los rendimientos del primer semestre con una variación del 30 % respecto al periodo de referencia y con aumento también en la producción de biomasa seca respecto a periodo 1981-2010.

Para el segundo semestre agrícola el modelo arrojó como resultado una crítica disminución en el rendimiento del grano del 97 %; y la biomasa seca total tendría un aumento del 20 % en Meta. Esta disminución se debe a la ocurrencia de estrés hídrico al final del ciclo vegetativo, pero el mayor responsable de la reducción es la presencia de altas temperaturas máximas, que afectaría la polinización de la planta.

Los rendimientos para el cultivo de arroz riego arrojados por el modelo supera a los reportados por FENALCE especialmente para el periodo de referencia, los cuales oscilan entre 4.5 y 6 ton/ha, pero se ajustan a los valores presentados para la década del 2031-2040. La variación en los rendimientos entre el periodo de referencia, 1981-2010 y la década 2031-2040 del escenario B2 fue del 19%, especialmente para los semestre A. Se destacan los bajos rendimientos especialmente para el semestre B de las décadas 2041-2050 y 2061-2070 con un diferencia porcentual casi del 98% frente al periodo 1981-2010, un aumento en las temperaturas y en las concentraciones de CO2 afectarían el óptimo desarrollo y producción del arroz.

Al igual que para el cultivo de maíz, se esperarían mejores rendimientos potenciales en Meta que en Tolima, esto podría obedecer a la oferta de disponibilidad hídrica y ambiental existente en Meta, dadas las condiciones de régimen monomodal y mayor volumen de lluvias que en Tolima.

## **6.4 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de papa en Boyacá y Cundinamarca ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop**

Las simulaciones realizadas en AquaCrop se realizaron para un ciclo vegetativo de 159 días es decir cinco meses y tres semanas aproximadamente, para los semestres agrícolas A y B. Se usó la variedad Pastusa Suprema y se seleccionó un requerimiento neto con 50% RAW y no fueron considerados efectos por condiciones de estrés por fertilidad para la producción de biomasa. Así mismo se mantuvo la oferta tecnológica.

Los resultados de los rendimientos para el cultivo de papa en el periodo de referencia como en el escenario A2 en todas las décadas son un poco más bajos que los registrados por el MADR, los cuales están en un rango entre 16 y 19 ton/ha. Sin embargo los resultados del modelo AquaCrop

muestran que los rendimientos se incrementan ligeramente entre un 10 y 20 % en ambas estaciones de Mosquera y Chocontá.

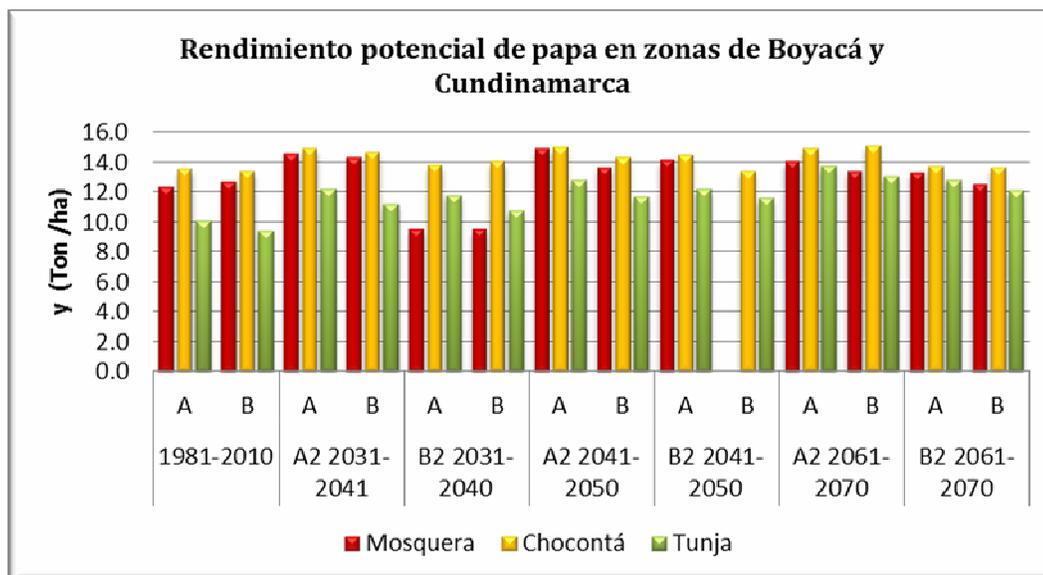


Figura 16. Rendimiento potencial de papa en las estaciones de las zonas de Boyacá y Cundinamarca.

En Cundinamarca, respecto al escenario A2 el rendimiento del cultivo de papa aumentaría en un 18% en el primer semestre agrícola de la década 2031 a 2040 respecto al periodo de referencia 1981-2010 y un aumento del 12 % en el segundo semestre agrícola. La disponibilidad hídrica, las condiciones de temperaturas y el incremento de CO2 en el horizonte del tiempo beneficiarían un incremento del rendimiento del grano en los semestres agrícolas A y B de todas las décadas de escenario, salvo el escenario B2 2031-2040 para ambos semestres donde disminuiría el rendimiento en un 23 y 25 % respectivamente debido a un potencial estrés hídrico asociado a altas tasas de evapotranspiración y poca lluvia lo cual afectarían el desarrollo del cultivo y el llenado del tubérculo.

En Boyacá, respecto al escenario A2 y B2 el rendimiento del cultivo de papa aumentaría en un 20 y 35% en ambos semestres agrícola de las tres décadas respecto al periodo de referencia 1981-2010. La disponibilidad hídrica, las condiciones de temperaturas y el incremento de CO2 en el horizonte del tiempo beneficiarían un incremento del rendimiento del grano en los semestres agrícolas A y B de todas las décadas de escenario. Se puede asumir que puede haber disminución en las precipitaciones y aumento de la evapotranspiración del cultivo. En los resultados arrojados por el modelo AquaCrop se observa un aumento en los valores de grados día a partir de la década de 2031 que se pueden consultar en la tabla de resultados en el informe final.

En resumen los rendimientos potenciales en el altiplano cundiboyacense parecen tener una tendencia positiva en los diferentes escenarios de cambio climático respecto a los rendimientos presentados en el periodo de referencia 1980-2010. Particularmente en la zona de Mosquera se esperaría una disminución en el rendimiento especialmente para la década 2031-2040 bajo los escenarios A2 y B2 pero en los otros escenarios la tendencia es positiva. En Tunja bajo todos los escenarios se tendría una tendencia positiva respecto al periodo de referencia. Chocontá no presenta cambios importantes en sus rendimientos potenciales.

## 6. CONCLUSIONES

- 6.1 En el caso del cultivo de arroz riego se encontró que el escenario más favorable para hallar un rendimiento del grano de arroz es el A2 en las décadas de 2031-2040 cuando se siembra en el primer semestre agrícola. Las décadas de 2041-2050 y 2061-2070 en escenario B2 no son favorables para cultivar arroz dado que un incremento en las temperaturas podría afectar el proceso de polinización del arroz obteniendo bajos o nulos rendimientos. Revisando literatura de Fedearroz, investigadores del gremio establecieron que las altas temperaturas máximas y mínimas (3°C por encima de los datos históricos), han ocasionado esterilidad del polen, alto porcentaje de vaneamiento y estrés a los cultivos, lo que ha favorecido el incremento de patógenos como *Pseudomonas fuscovaginae* y *Burkholderia glumae*, lo que lleva a daños más marcados. En el caso específico de Ambalema, Neiva y Purificación de enero a marzo de 2010, se presentaron temperaturas críticas para la producción de arroz, por encima de los 40°C en algunos días. En Ibagué se presentaron incrementos de la temperatura máxima por encima de 2 grados centígrados en comparación con los valores históricos (32°C), afectando los rendimientos del arroz. Caso similar ocurrió en Villavicencio, Granada y Yopal, donde se registraron temperaturas cercanas a 39°C entre enero y febrero. De acuerdo a los análisis efectuados, un alto grado de severidad de la bacteria *Burkholderia glumae* (>5) afecta significativamente los rendimientos del arroz (Federroz, 2010)
- 6.2 Las series de variables climáticas analizadas en el presente trabajo para arroz corrobora el hecho de que los mejores rendimientos se obtienen en el primer semestre debido a la óptima disponibilidad hídrica ya que el mayor porcentaje de lluvias se concentra en la primera temporada del año en Tolima además de temperaturas máximas y mínimas adecuadas para el desarrollo del cultivo.
- 6.3 Ante los mencionados escenarios de cambio climático se podría esperar un balance hídrico negativo especialmente en el segundo semestre, asociado con pocos aportes de precipitación en Tolima, aumento en las tasas de evapotranspiración de referencia e incremento de las temperaturas del aire máximas y mínimas. Por esta razón es conveniente la innovación de sistemas de riego, sistemas de almacenamiento de agua y una mejor planificación de la siembra del cultivo de arroz riego.
- 6.4 Con las corridas del modelo AquaCrop se evidenció que al haber un aumento de las temperaturas máxima y mínima, los grados día acumulados (GDD) aumentan hecho para la madurez fisiológica del cultivo se alcance en menor tiempo y por tanto se acorte el ciclo del cultivo especialmente de maíz tecnificado en Tolima.
- 6.5 Se puede esperar que los nuevos escenarios climáticos hagan que las precipitaciones se presenten anticipadamente lo que obligaría a los productores a desplazar los periodos de siembra y de cosecha. Realizando una comparación de los resultados en los rendimientos del cultivo de papa en Boyacá y Cundinamarca, se resalta una mejor producción en Chocontá, Cundinamarca, debido a una mejor oferta ambiental distribuida a lo largo del año que permite una mejor producción bajo condiciones de óptima humedad del suelo. Eso se puede corroborar con información secundaria de la alcaldía de Chocontá que afirma que el principal producto agrícola y de mayor área sembrada es el cultivo de papa con aproximadamente 850 Has, su rendimiento se estima entre 15 y 25 toneladas por hectárea, y disminuye su producción especialmente en épocas en que se presentan heladas y por infestación de enfermedades y plagas.
- 6.6 Un gran limitante para recopilar toda la información de entrada al modelo AquaCrop es la disponibilidad de datos agronómicos y edáficos, ya que esta la poseen solo los gremios y no es información pública.

- 6.7 De otra parte los datos de producción de los cultivos son deficientes y no están actualizados. Es necesario implementar un sistema de registro obligatorio ante el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de todos los productores del país con el fin de facilitar la recolección de datos como área, producción y rendimiento y la contabilización de lo producido.
- 6.8 Hay baja densidad de estaciones agrometeorológicas en Colombia. Es necesario además que se instalen nuevos sensores que permiten registrar datos como temperaturas del suelo, humedad del suelo, humedad de la hoja en la búsqueda de investigación para la mitigación de plagas enfermedades y adecuadas prácticas del suelo.
- 6.9 En caso de querer elaborar un estudio detallado de rendimientos de varios cultivos en el país frente a escenarios de cambio climáticos hay que tener en cuenta que hay poca información agronómica, edáfica, climática y de proyecciones de escenarios de cambio climático.
- 6.10 El uso de AquaCrop está desarrollado para el uso puntual con características precisas sobre el suelo, riego y prácticas, es decir no serviría como herramienta de interpolación geoespacial.

## 7. RECOMENDACIONES

- 7.1 Es necesario que los gremios agrícolas sigan validando y calibrando el modelo AquaCrop para otros cultivos y en diversas zonas de Colombia, con el fin de disponer de datos exactos de irrigación, suelos y cultivos y así poder elaborar diversos estudios orientados a la adaptación de la agricultura por efecto del cambio climático.
- 7.2 Es posible que emerja una externalidad positiva del acortamiento de los ciclos vegetativos por causa del cambio climático. Esto viabiliza la implementación de sistemas de producción basados en más de un cultivo por año y en policultivos, lo cual permitirá al productor mejorar la rentabilidad del plan actual de cultivos.
- 7.3 Implementar la reutilización de agua para riego en pequeñas parcelas como herramienta de mitigación para economías campesinas.
- 7.4 Generar planes de acción de mitigación en conjunto con la comunidad.
- 7.5 En caso de eventos extremos por sequía, es necesario realizar balance hidrológicos diarios en AquaCrop o Cropwat, para hacer seguimiento de los requerimientos hídricos del cultivo en particular a lo largo del ciclo vegetativo con el fin de definir umbrales de sequía.
- 7.6 Definir umbrales de la velocidad y dirección del viento para los cultivos vulnerables a esta variable.
- 7.7 Se hace hincapié en la necesidad de transferencia de conocimiento climático a los pequeños productores a través replicadores técnicos en cada municipio.
- 7.8 Establecer planes de mitigación de impacto en conjunto con los municipios.