

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

## EVALUACION DEL RIESGO AGROCLIMÁTICO POR SECTORES

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







---

<b>INTRODUCCION</b>	<b>10</b>
<b>1. LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECTOR AGRÍCOLA</b>	<b>11</b>
1.1 Efectos en la agricultura por la concentración de CO2 y aumento de temperatura del aire	11
1.2 Sector agrícola en Colombia	14
<b>2. MODELO DE SIMULACION AQUACROP</b>	<b>18</b>
2.1. Descripción del modelo de Simulación AQUACROP	18
2.2. Descripción del Modelo Et0 Calculator	26
<b>3. SELECCIÓN DE CULTIVOS Y REGIONES PARA IMPLEMENTAR EL MODELO DE SIMULACION AQUACROP</b>	<b>28</b>
<b>4. CARACTERIZACION DE LOS CULTIVOS SELECCIONADOS</b>	<b>31</b>
4.1 Cultivo de maíz	31
4.2 Cultivo de papa	52
4.3 Cultivo de arroz	62
<b>5. IMPLEMENTACION DEL MODELO AQUACROP V. 3.2. Y 4.0</b>	<b>68</b>
5.1 Zonas, estaciones y materiales seleccionadas	68
5.2 Variables de entrada del modelo	70
5.3 Metodología	70
<b>6. SIMULACION DE RENDIMIENTOS DE CULTIVOS BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO</b>	<b>84</b>
6.1 Escenarios de cambio climático	84
6.2 Posibles cambios en la precipitación las estaciones seleccionadas	85
Cambios de precipitación en estaciones del altiplano cundiboyacense	86



---

<b>Cambios de temperatura del aire</b>	<b>87</b>
<b>6.3 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de maíz tecnificado en Tolima ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop</b>	<b>88</b>
<b>6.4 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de maíz tecnificado en Meta ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop</b>	<b>90</b>
<b>6.5 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de Arroz riego en Tolima ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop</b>	<b>91</b>
<b>6.6 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de Arroz riego en Meta ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop</b>	<b>93</b>
<b>6.7 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de papa en Cundinamarca ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop</b>	<b>95</b>
<b>6.8 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de papa en Boyacá ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop</b>	<b>97</b>
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>98</b>
<b>8. RECOMENDACIONES</b>	<b>100</b>
<b>9. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>101</b>



## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones utilizadas para insumo en AquaCrop.....	29
Tabla 2. Áreas de rendimiento y producción de Maíz para Colombia (1950-2012). Fuente FENALCE.....	34
Tabla 3. Escala descriptiva de los estadios de crecimiento del maíz (Zea Mays L).....	41
Tabla 4. Rendimientos de maíz amarillo tecnificado por departamentos y semestres del 2004 al 2012. Fuente. Fenalce. Indicadores Cerealista 2012.....	49
Tabla 5. Base de evaluaciones agropecuarias 2004- 2012. Ministerios de Agricultura y Desarrollo Rural.....	49
Tabla 6. Etapas fenológicas para el cultivo de maíz, bajo las condiciones de Villavicencio -Meta en el primer semestre agrícola de 2008. Fuente: Semilla del Valle ( <a href="http://www.semillasvalle.com/">http://www.semillasvalle.com/</a> ).....	51
Tabla 7. Características físicas del perfil modal del suelo en cultivo de maíz tecnificado.....	51
Tabla 8. Parámetros utilizados en el módulo de cultivo para MAIZ PAC 105. (Fuente. Méndez, 2012).....	51
Tabla 9. Distribución del área sembrada de variedades de papa en Cundinamarca y Boyacá. Fuente: Núñez C.E. 2011. Universidad Nacional de Colombia.....	59
Tabla 10. Distribución porcentual de parámetros químicos en suelos paperos de las principales zonas de Colombia.....	60
Tabla 11. Fases fisiológicas del arroz.....	65
Tabla 12. Estaciones seleccionadas inicialmente.....	69
Tabla 13. Estaciones meteorológicas finales.....	69
Tabla 14. Zonas y materiales para insumo en AquaCrop.....	69
Tabla 15. Variables de entrada al modelo AquaCrop.....	70
Tabla 16. Evapotranspiración de referencia (mm / día) en las estaciones meteorológicas seleccionadas para el periodo 1980-2010.....	75
Tabla 17. Información de suelos de Tolima usados en InfoCrop.....	76
Tabla 18. Suelo de Tibaitatá, Mosquera.....	76
Tabla 19. Características se los suelos de Tunja, Boyacá según el IGAC.....	77
Tabla 20. Parámetros del cultivo requeridos en AquaCrop.....	79
Tabla 21. Resultado del rendimiento del cultivo de maíz tecnificado en Tolima.....	89
Tabla 22. Resultado del rendimiento del cultivo de maíz tecnificado en Meta.....	90
Tabla 23. Resultado del rendimiento del cultivo de arroz riego en Tolima.....	93
Tabla 24. Resultado del rendimiento del cultivo de arroz riego en Meta.....	94
Tabla 25. Resultado del rendimiento del cultivo de papa Pastusa Suprema en Cundinamarca.....	96
Tabla 26. Resultado del rendimiento del cultivo de papa Pastusa Suprema en Boyacá.....	97



## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Crecimiento anual del Producto Interno Bruto en el periodo 2001 – 2011. Fuente: DANE, 2012 .....	14
Figura 2. Comportamiento trimestral PIB Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca. Fuente: DANE, 2012. ....	15
Figura 3. Relación entre la disminución del rendimiento relativo ( $1-Y/Y_m$ ) y relativa déficit de evapotranspiración ( $1-ET/ET_c$ ) durante el período de crecimiento total de para diversos factor de respuesta del rendimiento ( $K_y$ ) .....	19
Figura 4. Esquema de AquaCrop. Fuente: FAO , 2011. Cropwater productivity model to simulate yield response to water. ....	21
Figura 5. Productividad del agua ajustada a la concentración de CO <sub>2</sub> considerando el tipo y desempeño del cultivo. ....	24
Figura 6. Muestra de la entrada de datos a AquaCrop.....	28
Figura 7. Producción y área cosechada de cultivos transitorios en Colombia en el 2012. Fuente: DANE. Encuesta Nacional Agropecuaria, 2012.....	28
Figura 8. Mapa de la localización de las zonas de producción de arroz en Meta y Tolima. Fuente: MADR e IDEAM.....	30
Figura 9. Mapa de la localización de las zonas de producción de maíz en Tolima. Fuente: MADR e IDEAM.....	30
Figura 10. Mapa de la localización de las zonas de producción de papa en Cundinamarca y Boyacá. Fuente: MADR e IDEAM.....	31
Figura 11. Consumo y producción de maíz a nivel mundial. Fuente: International Grains Council. <a href="http://www.igc.int/">http://www.igc.int/</a> .....	32
Figura 12. Departamentos más productores de maíz en Colombia. Fuente: Superintendencia de Industria y Comercio. Cadena Productiva. ....	33
Figura 13. Histórico de área sembrada de maíz de 1970 a 2012. Fuente: (FENALCE, Índice Cerealistas, 2012) .....	35
Figura 14. Fuente: FAO, 2010. Basado en Ritchie, 1984.....	38
Figura 15. Esquema de crecimiento del maíz ( <i>Zea Mays L</i> ) Fuente: How a Corn Plant Develops, S.W. Ritchie y J.J. Hanway, Special Report No.48, Cooperative Extension Service, Ames, Iowa, 1984. Citado por Díaz, 2012. ....	41
Figura 16. Factores Abióticos que afectan el cultivo de maíz. Fuente: Sánchez, Nicholaides y Couto, 1977.	
Figura 17. Distribución porcentual de fechas de siembra y cosecha de maíz en Colombia. Fuente: DANE. ....	50
Figura 18. Indicadores de área sembrada y rendimiento por departamentos en el 2012. Fuente: Revista Papa. FEDEPAPA, 2012.....	52
Figura 19. Municipios con mayor producción en Cundinamarca y Boyacá de 2006-2012.....	53
Figura 20. Rendimiento de papa en t/h en Cundinamarca y Boyacá por encima de 20 t/ha. ...	53



---

Figura 21. Ciclo vegetativo de la papa. Fuente: Universidad Austral de Chile, Escuela de Agronomía .....	56
Figura 22. Estados fenológicos de Desarrollo para la variedad parda pastusa. Fuente:Santos & Segura, 2005. ....	57
Figura 23. Escala descriptiva de los estados fenológicos de papa según la BBCH.....	58
Figura 24. Variedades mejoradas de papa. Fuente: CEVIPAPA. ....	59
Figura 25. Participación departamental del cultivo de arroz riego, Año 2010 Fuente: DANE. ....	63
Figura 26. Área de arroz mecanizado.....	63
Figura 27. Etapas de crecimiento y fases de desarrollo del cultivo del arroz. ....	65
Figura 28. Etapas de crecimiento y fases de desarrollo del cultivo del arroz. Fuente: Chillan. 2007.....	66
Figura 29. Esquema conceptual para la implementación del modelo AquaCrop.....	68
Figura 30. Ejemplo de selección de grados días en AquaCrop.....	73
Figura 31. Ejemplo de grados día en AquaCrop.....	74
Figura 32. Perfiles de suelos de Meta. Fuente: IGAC. Anexo Perfiles, Descripción de los perfiles de suelos.....	77
Figura 33. Parámetros No conservativos para desarrollo del canopy cover para arroz en Tolima.....	78
Figura 34. Distribución espacial y temporal de la precipitación en Purificación y Chicoral, Tolima.....	80
Figura 35. Distribución espacial y temporal de la precipitación en Villavicencio, Meta.....	81
Figura 36. Distribución espacial y temporal de la precipitación en Mosquera y Chocontá, Cundinamarca. ....	82
Figura 37. Distribución espacial y temporal de la precipitación en UPTC, Tunja-Boyacá.....	83
Figura 38. 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.....	86
Figura 39. Precipitación para los escenarios A2 y B2 para décadas 2031-2040, 2041-2050 y 2061-2070 comparado con la media climática 1981-2010.....	87
Figura 40. Temperatura Máxima para los escenarios A2 y B2 para décadas 2031-2040, 2041-2050 y 2061-2070 comparado con la media climática 1981-2010.....	88



## **EVALUACION DEL RIESGO AGROCLIMÁTICO POR SECTORES**

### **EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCION Y RENDIMIENTO DE CULTIVOS POR SECTORES MEDIANTE EL MODELO DE SIMULACION AquaCrop V. 3.1**

**Informe final**

**CONTRATO DE COOPERACIÓN TÉCNICA CO-T1150**

**CONTRATO FONADE DE PRESTACION DE SERVICIOS No. 2130628**

**MERY ESPERANZA FERNANDEZ PORRAS**

**JUNIO DE 2013**



## **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. 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 compila el trabajo completo realizado para el presente contrato. Este informe 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. El cuarto capítulo presenta la implementación del modelo y resultados de los rendimientos de los cultivos frente a dos escenarios de cambio climático (A2 y B2); y por último se mencionarán las conclusiones y recomendaciones.



## **EVALUACION DEL RIESGO AGROCLIMÁTICO POR SECTORES**

### **DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO DE CULTIVOS AGRÍCOLAS SELECCIONADOS, MEDIANTE UTILIZACIÓN DE MODELOS AGROCLIMÁTICOS**

#### **Objetivo general**

Determinar los efectos del cambio climático en la producción y rendimientos de cultivos agrícolas seleccionados, mediante la utilización de modelos agroclimáticos.

#### **Objetivos específicos**

1. Estudiar y analizar varios modelos agroclimáticos de simulación de rendimientos.
2. Establecer bases de datos con información climática y agrícola, adecuada para alimentar los modelos seleccionados.
3. Implementar y dejar operando los modelos en diferentes equipos de la subdirección de Meteorología.
4. Establecer los impactos del cambio climático en la producción o rendimientos de al menos 3 cultivos seleccionados.

## 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. En varios países el sector agrícola ha venido incorporando el uso de modelación desde los servicios Meteorológicos, gremios productores y centros de investigación agrícola, impulsando a una mejor organización, planeación y producción como al fortalecimiento de estrategias de respuesta ante la emergencia causada por eventos extremos climáticos que impactan de manera significativa el sector.

En el informe número dos, se describieron doce modelos de simulación de cultivos utilizados en diferentes países, indicando sus ventajas y limitaciones, en aras de seleccionar el modelo que mejor involucre y represente a través de variables climáticas edáficas y agronómicas, el rendimiento en algunos sectores agrícolas de Colombia. En reunión con el grupo de agrometeorología del IDEAM se explicaron las características de cada modelo para hacer elección de uno que sirva como herramienta para determinar los efectos del cambio climático frente a los futuros escenarios. Parta esta selección se tuvo en cuenta los precedentes del uso del modelo de simulación AquaCrop en Colombia, en la que se utilizó el modelo AQUACROP para estimar rendimientos agrícolas en Colombia en el marco del Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático. El presente informe corresponde a la descripción del modelo AquaCrop V 3.1 y su aplicación en la simulación de cultivos de papa, maíz y arroz en los diferentes sectores productores de Colombia, como los resultados de los rendimientos en los escenarios A2 y B2.



## 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).

Una de las actividades económicas sobre la que más se resentirán los efectos del calentamiento global es la agricultura. Adams y otros (1988) destacan entre los efectos principales: la modificación en los cultivos debido a un incremento atmosférico en la concentración de CO<sub>2</sub>; mayor probabilidad de un incremento en la población de plagas, y ajustes en las demandas y ofertas de agua para irrigación. Como resultado se espera que la productividad de algunos cultivos importantes disminuya. (CEPAL, Costa Rica, 2010).

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>.

Salazar & Mejía indican que según (Peng et. al. (2004) para el cultivo del arroz para el cual se ha determinado que durante la floración un aumento de un grado centígrado en la temperatura entre 30 y 40°C, 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) concluyeron 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>:

<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

- 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.
- 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.

Varios autores coinciden en que los efectos del CC pueden ser más graves especialmente para las economías campesinas o para los agricultores de subsistencia ubicados en ambientes frágiles que por lo general se ubican en países en vías de desarrollo, donde se esperan grandes cambios en productividad. Hay preocupación por áreas donde la agricultura de subsistencia es la norma, porque la disminución de tan solo una tonelada de productividad podría llevar a grandes desequilibrios en la vida rural (Jones y Thornton 2003)

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 CO<sub>2</sub> no son considerados, los cereales podrían reducir hasta un 30% de su productividad en el 2080. Sin embargo, si se incluyen los efectos del CO<sub>2</sub>, 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).

De un modo general, los estudios específicos por país y por cultivo muestran importantes diferencias en las predicciones, asociadas a los MCG, o escenarios incrementales utilizados, el período y el escenario socioeconómico considerado, la inclusión del efecto CO<sub>2</sub> y la localidad. Otras incertidumbres derivan de la inexactitud de los modelos y de procesos no modelados. A pesar de la variabilidad de las proyecciones de rendimiento, aparecen comportamientos.

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>.

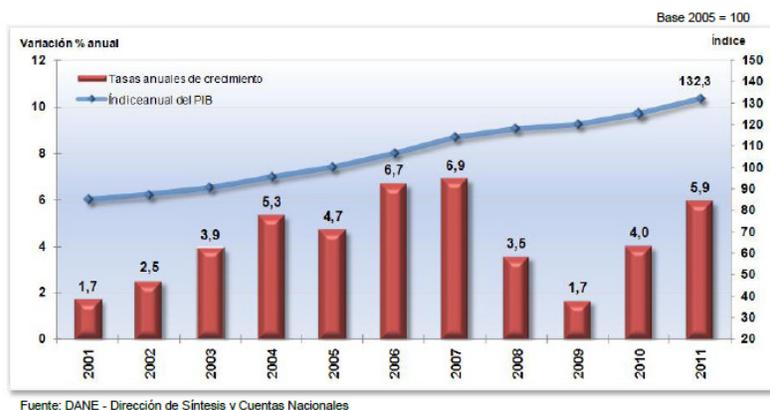


Figura 1. Crecimiento anual del Producto Interno Bruto en el periodo 2001 - 2011. Fuente: DANE, 2012

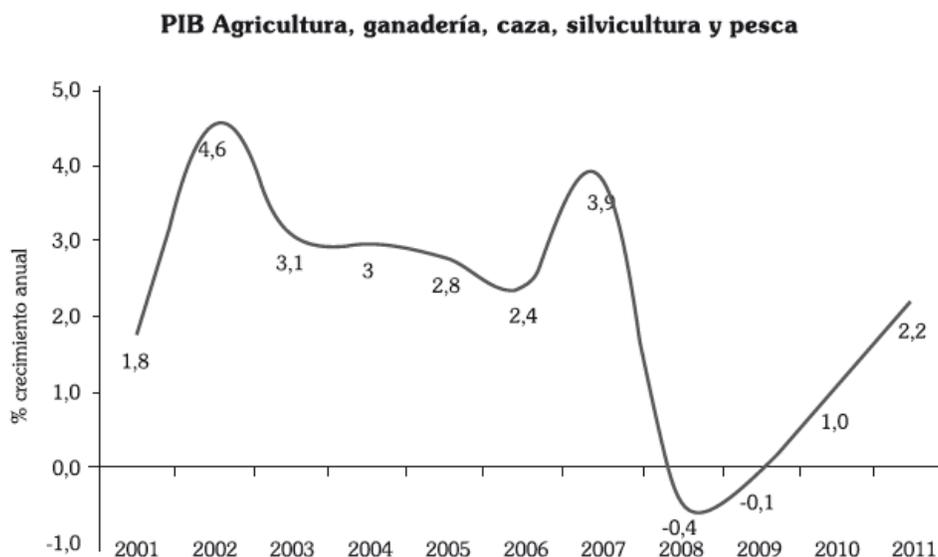
El Ministerio de Agricultura indica que el crecimiento del sector agropecuario durante el 2002 al 2010<sup>5</sup>, ha permitido ampliar las áreas sembradas del país, aumentar la producción en toneladas de alimentos y ha disminuido el desempleo en el sector rural, es así que el sector mantuvo un crecimiento promedio anual de 3%, jalonado principalmente por el grupo de otros agrícolas, 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%

<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.

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

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 en convocatoria en el 2008, incluyó el tema Agricultura y Cambio Climático, en la cual, de los 38 proyectos que se presentaron por valor de \$5.285 millones, el MADR cofinanció 14 proyectos (6 en manejo sanitario y fitosanitario y 8 en manejo de suelos y aguas), cuyo valor total asciende a \$11.269 millones (MADR, 2010). Estos proyectos 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 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).

Respecto a la obtención de semillas entre 2006 y 2010 la producción de semillas certificadas alcanzó 224.224 toneladas, entre semilla de algodón (826 toneladas), maíz (13.247 toneladas), fríjol (123 toneladas), arroz (164.078 toneladas), papa (30.128 toneladas), sorgo (1.850 toneladas) y soya (14.172 toneladas) (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 persistente 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).

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

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



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.

#### Escenarios de cambio climático y modelación agroclimática

Los escenarios de cambio climático han permitido determinar impactos y proyecciones en diferentes sectores económicos como el energético, el ecosistémico y agrícola. Aunque en Colombia existen estudios relacionados con cambio climático y agricultura utilizando escenarios de cambio climático, la mayoría se han ejecutado en el marco de la primera y segunda comunicación ante la convención marco de Naciones Unidas ante el Cambio Climático y la Dirección Nacional de Planeación, el resto de investigaciones se elaboran en el marco de tesis de maestría y doctorados en universidades colombianas, especialmente en el tema de variabilidad climática con el Fenómeno el Niño y la Niña, eventos que han afectado seriamente el sector agrícola colombiano.

Cabe resaltar que en Colombia algunos sistemas agrarios están más consolidados en materia de investigación agrometeorológica y red de observaciones meteorológicas por lo que tienen mayor acceso a pronósticos y predicciones. Sistemas agrarios como el de café (FEDECAFE), Palma (CENIPALMA), Caña de azúcar (CENICANA), Cereales (FENALCE) y arroz (FEDEARROZ) han tenido más avance en el tema de agrometeorología con el uso de diversos modelos que permiten simular disponibilidad hídrica, rendimientos potenciales, simulación de crecimiento de cultivo así como respuesta de determinados cultivos a diversas alternativas de manejo. De otra parte se encuentran los pequeños agricultores quienes tienen poco o ningún acceso a la información agroclimática. Es por esto que la incidencia negativa del comportamiento climático en Colombia particularmente en la producción y rendimiento agrícola de los diversos cultivos, dificulta la toma decisiones para el periodo de siembra y seguimiento en el ciclo fenológico en los cultivos de los pequeños agricultores o de las economías campesinas.



## 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. Este modelo fue desarrollado por la División de Tierra y Agua de la FAO, 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.

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 capacidad de diversos lugares, las estaciones y el clima, incluidos los futuros escenarios climáticos;
- El número relativamente bajo de los parámetros;
- Datos de entrada que requiere 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 involucrado en productividad de los cultivos y en las respuestas a los déficit de agua, tanto desde el punto de vista fisiológico y agronómico.

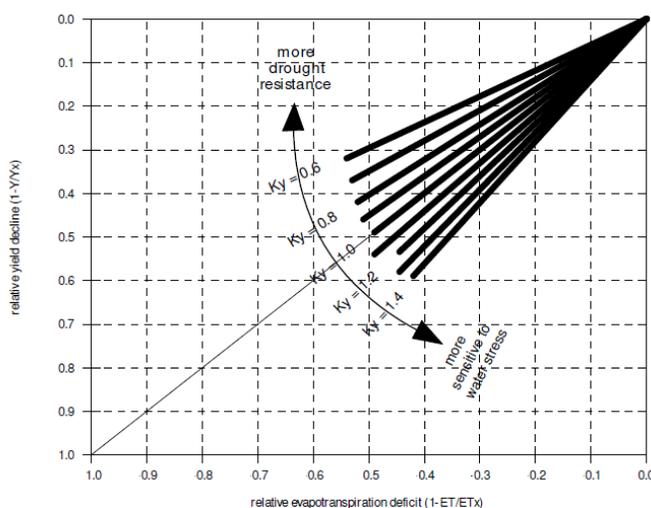
Según la FAO, AquaCrop separa la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo; desarrolla un modelo de crecimiento y senescencia de follaje (Canopy cover) como base para la estimación de la transpiración; donde el rendimiento final es una función de la Biomasa y el índice de cosecha.

### 2.1.2 Enfoque del modelo AquaCrop desde el factor de respuesta de rendimiento

Rendimiento respuesta al agua describe la relación entre el rendimiento de los cultivos y la escasez de agua como consecuencia del suministro insuficiente de agua por la lluvia o el riego durante el crecimiento período. En la FAO: Riego y Drenaje Papel n. 33 (Doorenbos y Kassam, 1979) una función de producción empírica se utiliza para evaluar la respuesta de rendimiento al agua:

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right) \quad (\text{Ec.1.1a})$$

Donde,  $Y_x$  y  $Y$  son el máximo rendimiento y la real,  $(1 - Y/Y_x)$  la disminución del rendimiento relativo,  $ET_x$  y  $ET$  la evapotranspiración máxima y actual,  $(1 - ET / ET_x)$  el estrés hídrico relativo, y  $K_y$  el factor de proporcionalidad entre la disminución del rendimiento relativo y relativo la reducción relativa de la evapotranspiración como se ve en la figura de abajo.



**Figura 3. Relación entre la disminución del rendimiento relativo (1-Y/Ym) y relativa déficit de evapotranspiración (1-ET/ETc) durante el período de crecimiento total de para diversos factor de respuesta del rendimiento (Ky)**



AquaCrop (Steduto et al, 2007;. Raes et al, 2007;.. Hsiao et al, 2007) se desarrolla a partir del Ky enfoque mediante la separación:

- (i) la actual evapotranspiración (ET) en la evaporación del suelo (E) y la transpiración del cultivo (Tr):  $ET = E + tR$  |||| (Ec. 1.1b)

La separación de las ET en la evaporación del suelo y transpiración del cultivo evita la efecto de confusión del uso consuntivo no productivos del agua (suelo evaporación). Esto es importante especialmente cuando la cobertura del suelo es baja a principios de la temporada o como el resultado de la escasa plantación.

- (ii) el rendimiento final (Y) en la biomasa (B) y el índice de cosecha (HI, por sus siglas en inglés):

$$Y = HI (B) \quad \text{(Ec. 1.1c)}$$

La separación de rendimiento en la biomasa y el índice de cosecha permite la partición de las relaciones funcionales correspondientes como respuesta a las condiciones ambientales. Estas respuestas son de hecho fundamentalmente diferentes y su separación evita los efectos de confusión de la escasez de agua en B y en HI.

Los cambios descritos conducen a la siguiente ecuación en el núcleo de la AquaCrop motor de crecimiento:

$$B = WP \cdot \Sigma Tr \quad \text{(Ec. 1.1d)}$$

Donde Tr es la transpiración del cultivo (en mm) y WP (Por sus siglas en inglés) es el parámetro de la productividad del agua (kg de biomasa por m<sup>2</sup> y por mm de agua acumulada transpirada ocurrido durante el período de tiempo en el que se produce la biomasa). Este elevador de la ecuación. (1.1a) a la ecuación. (1.1d) tiene una implicación fundamental para la solidez del modelo debido al comportamiento conservador de WP (Steduto et al., 2007). Es digno de notar, sin embargo, que ambas ecuaciones tienen el agua como fuerza motriz para el crecimiento.

Para ser funcional, la ecuación 1.1d se insertó en un conjunto completo de los componentes del modelo adicional a saber: el suelo, con su balance hídrico, la cosecha, con su desarrollo, procesos de crecimiento y el rendimiento, y la atmosfera, con su régimen térmico, las precipitaciones, la demanda evaporativa y la concentración de dióxido de carbono. Además, algunos aspectos de la gestión se consideran explícitamente (por ejemplo, riego, fertilización, etc), ya que afectarán el balance hídrico del suelo, desarrollo del cultivo y por tanto el rendimiento. AquaCrop también puede simular el crecimiento de los cultivos bajo escenarios de cambio climático (calentamiento global y la elevación de la concentración de dióxido de carbono), mientras que las plagas, enfermedades y malas hierbas no son consideradas. Las relaciones funcionales entre los diferentes componentes del modelo se representan en la figura siguiente

### 2.1.3 Esquema de AquaCrop

En el esquema se está indicando los componentes principales del continuo suelo-planta-atmósfera y los parámetros de conducción fenología, cobertura del dosel, la transpiración, la 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;  $T_r$ , 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), 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.

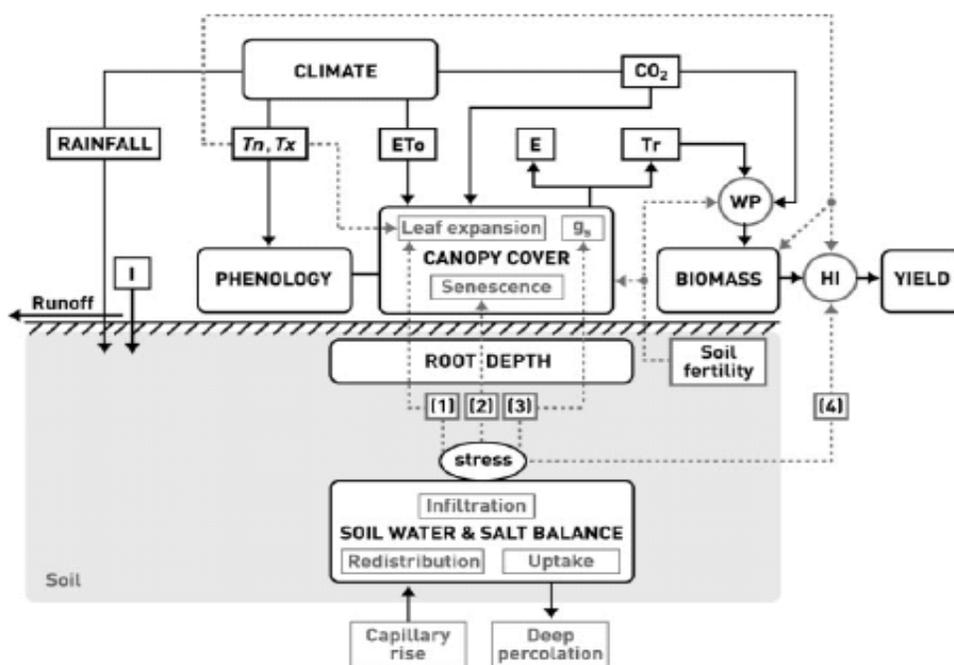


Figura 4. Esquema de AquaCrop. Fuente: FAO , 2011. Cropwater productivity model to simulate yield response to water.



#### 2.1.4 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):

- Concentración de CO2 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 Hawai). Esto se simula multiplicando WP \* con un factor de corrección. El factor de corrección es mayor que 1 para las concentraciones de CO2 por encima de 369,41 ppm y menor de 1 para las concentraciones de CO2 por debajo del valor de referencia;
- El tipo de producto que se sintetizan durante la formación de rendimiento. Si son ricos en lípidos o proteínas, se requiere una considerable mayor energía por unidad de peso seco, para la síntesis de hidratos de carbono. Como consecuencia, la productividad del agua durante la formación de rendimiento debe ser reducido. Esto se simula multiplicando WP \* con un coeficiente de reducción para los productos sintetizados;
- La fertilidad del suelo limitada. Dado que el estrés fertilidad del suelo podría disminuir la productividad del agua en los cultivos, el efecto del estrés se simula con la ayuda del coeficiente de esfuerzo fertilidad del suelo para la productividad del agua para cultivos (KsWP) que varía entre 1 y 0. Mientras la fertilidad del suelo no afecta el proceso, KsWP es 1 y WP \* no se ajusta.

#### 2.1.5 Datos de entrada de AquaCrop

AquaCrop requiere de datos de entrada para cuatro módulos<sup>7</sup>. El primero es el de clima (temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, vientos, radiación o brillo solar y humedad). El modulo del cultivo requiere datos de fenología, raíces, índice de cosecha, fecha de siembra, densidad de siembra y desarrollo de follaje. El módulo de manejo necesita información sobre irrigación y campo y por último, el módulo de suelos requiere datos de variables hidrofísicas. A continuación se indican más a fondo los datos y parámetros requeridos en cada uno de los módulos.

Módulo de clima: datos meteorológicos 
<ul style="list-style-type: none"><li>• Precipitación.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Temperatura máxima y mínima.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) Y/O</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Radiación solar</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Humedad relativa máxima y mínima</li></ul>

<sup>7</sup> Dirk RAES, Pasquale STEDUTO, Theodore C. HSIAO, and Elias FERERES. 2011. Reference Manual. FAO cropwater productivity model to simulate yield response to water. Italia.

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad media del viento.</li> </ul>
<b>Módulo del cultivo</b> 
Siembra
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fecha de siembra o trasplante</li> <li>• Densidad de siembra del cultivo (plantas/hectárea)</li> </ul>
<b>Crecimiento y Fenología</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre de la especie y la variedad.</li> <li>• Fechas de % de desarrollo de la cubierta vegetal (<i>canopy cover</i>) en las distintas etapas de crecimiento (emergencia, floración, madurez fisiológica, etc.) en días.</li> <li>• Duración del ciclo del cultivo en días.</li> <li>• Fecha de cosecha.</li> <li>• Cubierta vegetal máxima (en %) alcanzada por el cultivo.</li> <li>• Biomasa seca (en Kg m<sup>-2</sup>, a lo largo del ciclo de cultivo).</li> <li>• Rendimiento final.</li> <li>• Cubierta vegetal (en %) a lo largo del ciclo del cultivo incluyendo el valor inicial CCo, después de la germinación y el valor final CCx. Idealmente, las medidas de cubierta vegetal deben tomarse semanalmente midiendo la penetración de la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) usando un sensor lineal cuántico; si esto no es posible se pueden usar estimaciones de la superficie cubierta del suelo con fotos de los cultivos y con programas como Image J, GIMP 2.0, Sigmascan Pro, o estimaciones visuales). También se puede usar el índice de área foliar (IAF).</li> <li>• Índice de cosecha (IC).</li> </ul>
<b>Descripción del sistema radicular</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Profundidad máxima de la raíz.</li> <li>• Obstáculos para la penetración de la raíz en el suelo</li> </ul>
<b>Descripción del suelo</b> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Profundidades de los diferentes horizontes del suelo (generalmente de 1 a 3 horizontes, máximo 5).</li> <li>• Textura del suelo en cada horizonte (arcillosa, franca, arenosa en %)</li> <li>• Capacidad de campo en cada horizonte del suelo (en % volumétrico, o mm m<sup>-1</sup>)</li> <li>• Punto de marchitamiento permanente en cada horizonte del suelo (en % volumétrico, o mm m<sup>-1</sup>)</li> <li>• Contenido inicial del agua en el suelo según la profundidad (en % volumétrico, o mm m<sup>-1</sup>)</li> </ul>
<b>Otras Parámetros</b> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coordenadas geográficas de la parcela experimental (latitud, longitud y altitud)</li> <li>• Fechas, tipo y cantidad de fertilizantes aplicados (en Kg ha<sup>-1</sup>).</li> <li>• Descripción del método o sistema de riego (ejemplo: aspersión, mini-aspersión, surcos, goteo, etc.)</li> <li>• Fechas y cantidad de agua aplicada en cada riego (en m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> o mm).</li> <li>• Porcentaje de la superficie del suelo mojada al final de cada riego (%) y porcentaje de la</li> </ul>

superficie del suelo humedecida expuesta al sol a mediodía (%).
<ul style="list-style-type: none"> <li>Et<sub>c</sub> (ET real), en mm, y descripción del método usado para calcular la Et<sub>c</sub> (Balance del agua en el suelo, métodos micro-meteorológicos – Eddy covariance, el método Bowen, etc.)</li> </ul>

### 2.1.6 Media Anual del CO<sub>2</sub> 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>.

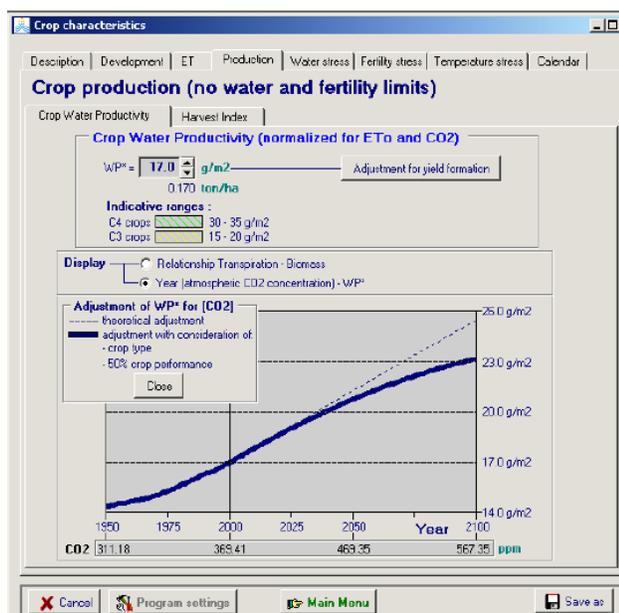


Figura 5. Productividad del agua ajustada a la concentración de CO<sub>2</sub> considerando el tipo y desempeño del cultivo.

### 2.1.7 Experiencias con AquaCrop en Colombia

La FAO (Organización de las 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>8</sup>.

#### 2.1.8 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>9</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.

#### 2.1.9 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>10</sup>.

---

<sup>8</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>9</sup> Dirk RAES, Pasquale STEDUTO, 2011, FAO.

<sup>10</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.



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>11</sup>.

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>12</sup>.

### 2.1.10 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, 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>13</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). La ecuación de FAO Penman-Monteith es la siguiente:

<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> 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>13</sup> *Ibíd.*

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

Donde:

$ET_o$ :	Evaporación de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ )
$R_n$ :	Radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )
$R_a$ :	Radiación extraterrestre ( $\text{mm día}^{-1}$ )
$G$ :	Flujo del calor de suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )
$T$ :	Temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ )
$u_2$ :	Velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ )
$e_s$ :	Presión de vapor de saturación (k Pa)
$e_a$ :	Presión real de vapor (k Pa)
$e_s - e_a$ :	Déficit de presión de vapor (k Pa)
$\Delta$ :	Pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{k Pa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
$\gamma$ :	Constante psicrométrica ( $\text{k Pa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

### 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 meteorológica, 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 contiene solamente la temperatura del aire máxima y mínima, aún es posible obtener estimaciones razonables de la  $ET_o$ . 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  $ET_o$ .

The screenshot shows the 'Data and ETo menu' in AquaCrop. It includes fields for Station (Naranjal), Country (Colombia), and File (Chinchina.DTA). The 'Input data description' tab is active, showing options for 'Air temperature' (Celsius/Fahrenheit), 'Air humidity' (Mean Relative Humidity, etc.), 'Psychrometric data' (Ventilated/Natural ventilated/Indoors), 'Wind speed' (Mean wind speed, height of measurement), 'Sunshine and Radiation' (Hours of bright sunshine, Solar radiation, Net radiation), and 'IF missing radiation' (coefficients for Angstrom equation).

Figura 6. Muestra de la entrada de datos a AquaCrop.

### 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. En la figura de abajo, la encuesta nacional agropecuaria del DANE, indica que los cultivos de maíz, papa y arroz tuvieron una participación significativa en el sector agrícola colombiano en el 2012.

Cultivos	Área cosechada Hectáreas	Participación (%)	Sitio de venta					
			En el sitio de la producción (en la UP)		En otro lugar (fuera de la UP)		No informa	
			Hectáreas	Participación (%)	Hectáreas	Participación (%)	Hectáreas	Participación (%)
Maíz amarillo	78.619	100,0	14.390	18,3	61.996	78,9	2.233	2,8
Maíz blanco	65.554	100,0	25.510	38,9	36.876	56,3	3.168	4,8
Papa	62.479	100,0	14.999	24,0	45.444	72,7	2.035	3,3
Frijol	26.656	100,0	2.418	9,1	23.520	88,2	718	2,7
Arroz tradicional	3.221	100,0	468	14,5	2.723	84,6	30	0,9
Tabaco	6.369	100,0	1.162	18,2	4.737	74,4	471	7,4
Trigo	3.184	100,0	1.570	49,3	1.554	48,8	60	1,9
Cebada	833	100,0	149	17,9	674	81,0	9	1,1
<b>Hortalizas</b>								
Aveja	13.411	100,0	4.197	31,3	8.897	66,3	318	2,4
Cebolla en rama	7.614	100,0	3.306	43,4	4.285	56,3	23	0,3
Cebolla en bulbo	6.490	100,0	679	10,5	5.590	86,1	221	3,4
Zanahoria	3.514	100,0	661	18,8	2.769	78,8	84	2,4
Tomate	4.102	100,0	370	9,0	3.494	85,2	238	5,8
Haba	1.525	100,0	229	15,0	1.282	84,1	14	0,9

Fuente: DANE - ENA 2012

Nota: Los productores que afirmaron que toda su producción era para autoconsumo, no participan en esta distribución

Figura 7. Producción y área cosechada de cultivos transitorios en Colombia en el 2012. Fuente: DANE. Encuesta Nacional Agropecuaria, 2012.



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. A continuación se relacionan las estaciones que se usaron para lograr el objetivo de este trabajo.

**Tabla 1. Estaciones utilizadas para insumo en AquaCrop.**

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
3207504	CO	Holanda La	Granada	Meta	360	73°42'57.7"W	3°30'58.8"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

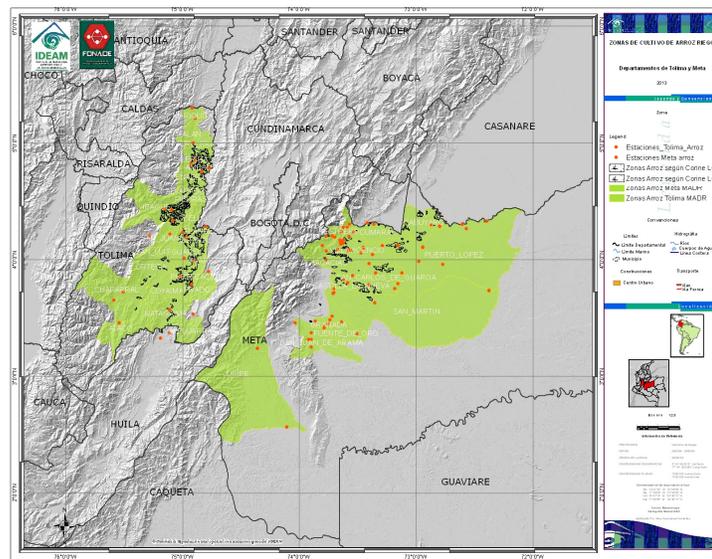
De otra parte es evidente que los eventos extremos causados por el cambio climático han afectado el cultivo del arroz. El comportamiento de las temperaturas en diferentes zonas arroceras del Tolima, demuestra que las temperaturas máximas han estado por encima de los 34 grados centígrados especialmente después del mes de junio de 2009 afectando la esterilidad del polen ocasionando un alto Vaneamiento en la panícula del arroz disminuyendo los rendimientos. Las mínimas estuvieron por encima de 22 grados centígrados afectando el llenado y peso del grano (Fedearroz, 2010) Boletín Nov-Dic, 2010.

El cultivo de papa está más propenso a ser afectado por el fenómeno de El Niño. La disminución en nubosidad sobre los cultivos de secano permite que la luz solar incida sobre ellos, incrementando la evapotranspiración, llegando a causar daños irreversibles en el ciclo vegetativo, además de incrementar la demanda hídrica y generar aumentos considerables en el ataque de plagas como la polilla guatemalteca. La superficie cosechada de cultivos transitorios se ve reducida ante la inminencia del fenómeno El Niño (MADR, 2009). Según las estadísticas del DANE entre 1994 y 2006 se importaron 73.974 toneladas netas de papa en diferente presentación (Papas frescas o refrigeradas para la siembra, las demás papas, frescas o refrigeradas, papas, secas incluso cortadas en trozos o en rodajas pero sin otra preparación y Copos, gránulos y "pellets" de papa). Cabe resaltar que se importaron 26.700 toneladas en 1997 y 1998, años de evento "El Niño" un volumen considerable respecto a los demás años (DANE, citado por Fernández, 2009).

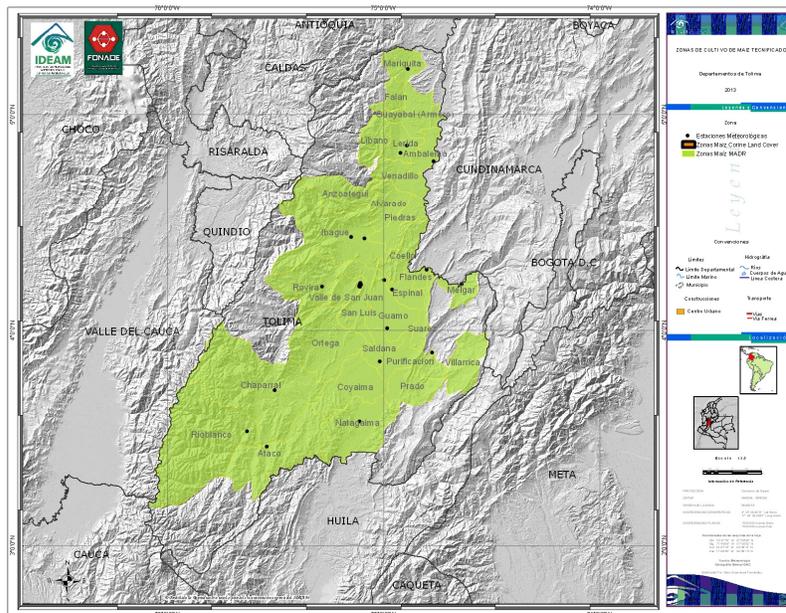
En el caso de la papa, la reducción de área sembrada para el evento de 1997-98 fue de alrededor del 4%. Según el Banco de la República, el cultivo de papa ocupó el sexto lugar entre los cultivos más afectados por el fenómeno del Niño entre los años 1970-1996 (Banco de la República, 2006).

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 siguientes figuras 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 8. Mapa de la localización de las zonas de producción de arroz en Meta y Tolima. Fuente: MADR e IDEAM.**



**Figura 9. Mapa de la localización de las zonas de producción de maíz en Tolima. Fuente: MADR e IDEAM.**

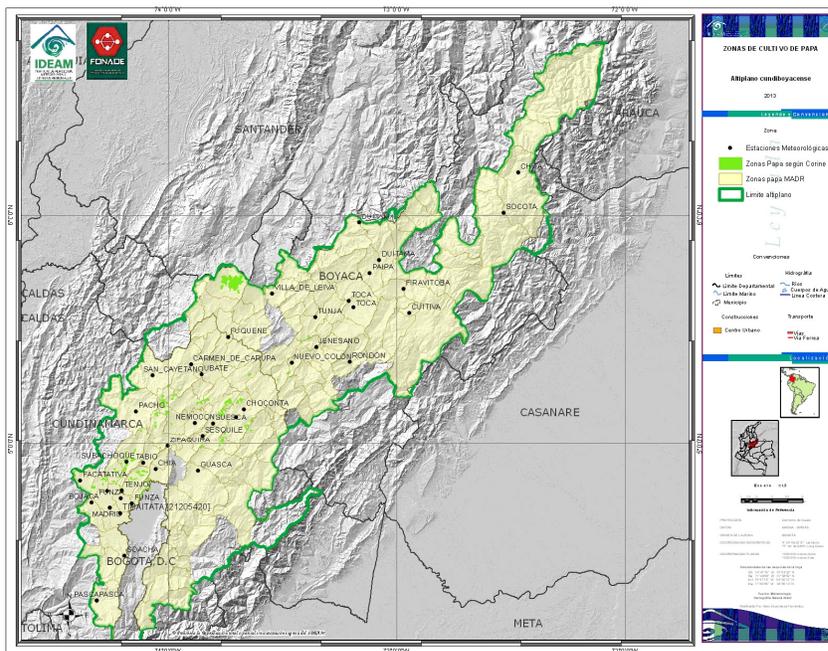


Figura 10. Mapa de la localización de las zonas de producción de papa en Cundinamarca y Boyacá. Fuente: MADR e IDEAM.

## 4. CARACTERIZACION DE LOS CULTIVOS SELECCIONADOS

### 4.1 Cultivo de maíz

#### 4.1.1 Importancia del maíz en el mundo

El maíz es uno de los cultivos de cereales más importantes a nivel mundial en materia de seguridad alimentaria y su uso se orienta al consumo humano, industria de alimentos para animales y biocombustibles, entre otros. Globalmente su producción correspondió a 795.935.000 toneladas, en la temporada 2009-2010, superando al trigo y al arroz, de las cuales el 90% son de maíz amarillo y el 10% restante de maíz blanco. El maíz ocupa el segundo lugar en área de siembra, con alrededor de 140.000.000 de has, se siembra en 135 países y se comercializan en el mercado internacional más de 90 millones de toneladas (Fenalce, 2010).

La producción mundial de maíz en el 2012/13 fue revisada al alza en 13 millones de toneladas métricas, a un récord de 913 millones, en reflejo del mejor panorama en Estados Unidos, China y Brasil (FAO 2012). En la figura se observa una tendencia positiva en la producción de maíz a nivel global.

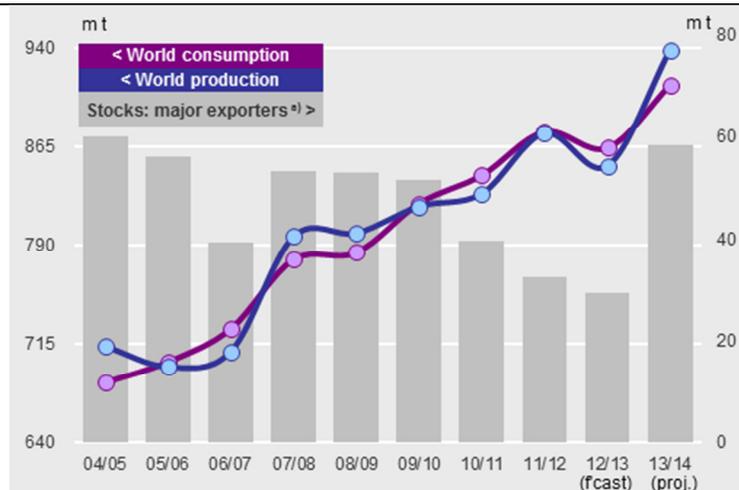


Figura 11. Consumo y producción de maíz a nivel mundial. Fuente: International Grains Council. <http://www.igc.int/>

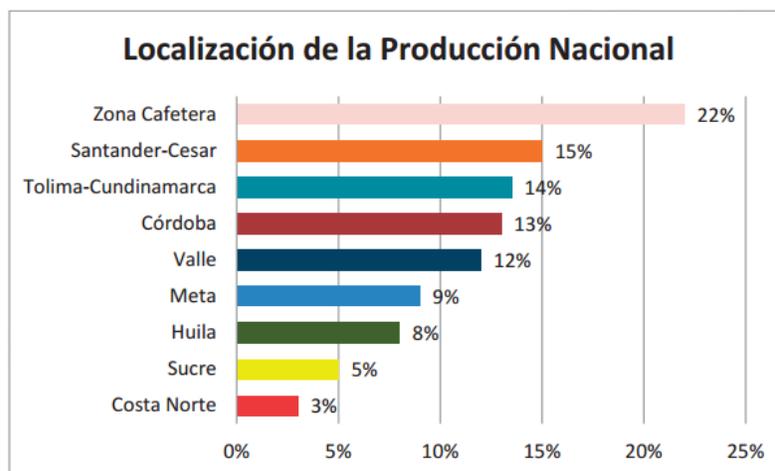
#### 4.1.2 Distribución geográfica del maíz en Colombia

Según FENALCE el maíz se encuentra ampliamente difundido en todas las regiones naturales del país, dada su especial adaptación a diversas condiciones agroclimáticas y socioeconómicas; por eso, este grano se cultiva desde la Guajira hasta el Amazonas y desde la Costa Pacífica hasta los Llanos Orientales; desde el nivel del mar hasta 3000 metros de altitud, en situaciones bien contrastantes y con precipitaciones desde 300 mm al año en la Guajira, hasta 10.000 mm, en el Chocó.

El maíz caracterizado por su gran dispersión, es cultivado en varios departamentos del país en forma tradicional y en más de 10 de manera tecnificada, lo anterior sumado a la diferencia de tecnología aplicada en las distintas regiones, hacen especialmente difícil su caracterización y la determinación de sus áreas y su producción (DANE, 2005).

El cultivo del maíz se maneja de acuerdo con las condiciones socioeconómica de cada zona agroecológica; se siembra principalmente como monocultivo y una menor parte en asocio con frijol, ñame y arveja, en relevo con frijol y papa e intercalado con yuca, caña, café y otros cultivos perennes en su etapa de instalación. Según FENALCE dentro de las diferentes formas de cultivo que existen en el país, se consideran dos grandes sistemas de producción: el tecnificado y el tradicional. El sector tecnificado, generalmente está localizado en zonas con buena oferta ambiental, hace uso de la mecanización, semillas mejoradas, fertilizantes y plaguicidas obteniendo rendimientos que van de 4.5 a 11 toneladas por hectárea. En varias zonas del Valle del Cauca, Córdoba, Meta, Huila, Tolima y la Zona Cafetera, los rendimientos superan con frecuencia las 7 toneladas. El sector de maíz tradicional, está localizado tanto en zona plana como de ladera, con suelos relativamente pobres y ambientes con déficit de precipitación. El agricultor cultiva menos de 10 hectáreas, y casi no usa semillas mejoradas ni fertilizantes, de ahí que su rendimiento sean muy bajos, del orden de 1,8 toneladas por hectárea (FENALCE, 2010)

A nivel nacional los departamentos con el área de maíz está distribuida en dos tipos: maíz blanco que ocupa el 33.2% de la superficie de cultivada y maíz amarillo con el 66.8%, el primero dedicado preferentemente al consumo humano y el segundo al consumo animal, ya sea de forma directa o como insumo para la fabricación de alimentos (DANE, 2005). Las mayores producciones de maíz están en los departamentos de Córdoba, Valle, Antioquia, Meta y el Cesar. La zona cafetera del país es la que tiene el mayor potencial para la producción de maíz por sus favorables condiciones agroecológicas (FENALCE, 2010).



**Figura 12. Departamentos más productores de maíz en Colombia. Fuente: Superintendencia de Industria y Comercio. Cadena Productiva.**

El maíz ocupó la segunda mayor extensión en Colombia con 538.569 hectáreas en 2004 con una producción cercana a 1,8 millones de toneladas, seguida de cerca por arroz por arroz con 494.928 ha. y 2,9 millones de toneladas, según los resultados de la Encuesta Nacional Agropecuaria del proyecto DANE – SISAC1 en primer lugar se encuentra el café con 753.471 ha. y 630.069 toneladas de pergamino (DANE, 2004).

#### 4.1.3 Producción y Rendimiento de maíz en Colombia

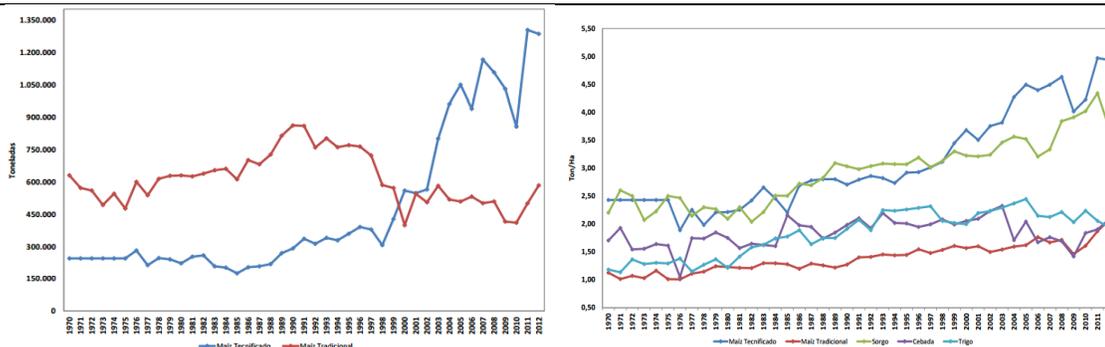
La producción nacional de maíz se estimó en 1.690.557 toneladas para el 2011, con un incremento del 9%, frente al volumen logrado en 2010 (1.544.54 toneladas), ante el crecimiento del área sembrada (6%) que pasó de 584.614 hectáreas en 2010 a 618.328 hectáreas en 2011 (MADR, 2012). Las estadísticas de FENALCE muestran valores un poco por encima que los presentados por el MADR, sin embargo la producción indica una ligera variación negativa de 2011 a 2012, aunque el rendimiento tiende a aumentar. (Tabla 2 )



**Tabla 2. Áreas de rendimiento y producción de Maíz para Colombia (1950-2012). Fuente FENALCE.**

AÑO	MAIZ TECNIFICADO			MAIZ TRADICIONAL			TOTAL DE MAIZ			Import de maíz blanco y amarillo Tons.
	Has	t/h	Ton	Has	t/h	Ton	Has	t/h	Ton	
1950							651.600	0,95	620.300	
1960							729.600		865.700	
1965							868.900	1,00	870.800	
1970	101.100	2,43	245.500	560.300	1,13	631.300	661.400	1,33	876.800	6.600
1971	101.100	2,43	245.500	565.400	1,01	573.000	666.500	1,23	818.500	47.300
1972	101.100	2,43	245.500	523.400	1,07	560.700	624.500	1,29	806.200	600
1973	101.100	2,43	245.500	479.200	1,03	493.600	580.300	1,27	739.100	97.300
1974	101.100	2,43	245.500	469.000	1,16	546.000	570.100	1,39	791.500	39.200
1975	101.100	2,43	245.500	471.600	1,01	477.100	572.700	1,26	722.600	
1976	113.400	1,89	282.500	534.100	1,01	601.200	647.500	1,36	883.700	16.200
1977	95.000	2,25	214.000	485.500	1,11	538.800	580.500	1,30	752.800	100.700
1978	121.700	1,98	247.000	549.200	1,15	615.200	670.900	1,29	862.200	66.200
1979	109.300	2,21	241.100	506.300	1,24	629.100	615.600	1,41	870.200	60.000
1980	100.600	2,21	222.600	513.800	1,23	631.000	614.400	1,39	853.600	192.600
1981	112.600	2,25	253.500	516.400	1,21	626.500	629.000	1,40	880.000	79.500
1982	107.200	2,42	259.400	528.800	1,21	639.100	636.000	1,41	898.500	119.600
1983	78.700	2,65	208.900	504.700	1,30	655.000	583.400	1,48	863.900	44.700
1984	82.500	2,45	202.500	510.600	1,30	661.800	593.100	1,46	864.300	
1985	80.000	2,20	176.200	479.410	1,28	612.830	559.410	1,41	789.030	60.250
1986	77.800	2,68	204.300	570.902	1,20	702.404	648.702	1,40	906.704	
1987	75.140	2,78	208.830	529.050	1,29	682.600	604.190	1,48	891.430	
1988	78.210	2,80	219.030	578.400	1,26	727.630	656.610	1,44	946.660	42.540
1989	96.383	2,80	269.953	669.497	1,22	815.397	765.880	1,42	1.085.350	
1990	107.949	2,70	291.713	678.851	1,27	863.287	786.800	1,47	1.155.000	14.000
1991	120.594	2,79	336.678	614.416	1,40	860.922	735.010	1,63	1.197.600	8.043
1992	109.729	2,86	313.527	539.958	1,41	760.869	649.687	1,65	1.074.396	505.901
1993	120.828	2,82	340.866	552.752	1,45	803.174	673.580	1,70	1.144.040	585.734
1994	120.565	2,73	329.344	529.792	1,44	761.937	650.357	1,68	1.091.281	1.052.941
1995	123.427	2,92	360.183	533.834	1,45	771.630	657.261	1,72	1.131.813	1.150.911
1996	133.766	2,93	391.517	494.603	1,55	765.132	628.369	1,84	1.156.649	1.703.692
1997	126.106	3,01	379.756	489.520	1,48	723.652	615.626	1,79	1.103.408	1.735.847
1998	98.715	3,11	307.142	382.048	1,54	586.487	480.763	1,86	893.629	2.010.010
1999	124.416	3,45	428.764	356.293	1,61	572.623	480.709	2,08	1.001.387	1.805.311
2000	152.309	3,68	560.469	255.210	1,57	399.640	407.519	2,36	960.109	1.918.489
2001	156.689	3,50	548.696	340.840	1,60	545.299	497.529	2,20	1.093.995	1.757.014
2002	150.848	3,75	565.815	338.189	1,50	506.247	489.037	2,19	1.072.062	2.086.179
2003	210.357	3,81	802.196	378.028	1,54	582.723	588.385	2,35	1.384.919	2.020.907
2004	225.378	4,27	962.669	325.779	1,59	519.340	551.157	2,69	1.482.009	2.260.440
2005	233.597	4,49	1.049.620	314.769	1,62	509.763	548.366	2,84	1.559.383	2.453.712
2006	214.106	4,39	940.515	301.925	1,76	532.512	516.031	2,85	1.473.027	3.224.582
2007	259.653	4,49	1.166.159	300.899	1,67	501.959	560.552	2,98	1.668.118	3.210.298
2008	239.012	4,63	1.106.763	297.554	1,71	510.146	536.566	3,01	1.616.909	3.306.322
2009	256.904	4,01	1.030.427	285.149	1,46	416.453	542.053	2,67	1.446.879	3.184.901
2010	202.934	4,22	857.360	255.720	1,61	411.404	458.654	2,77	1.268.764	3.599.185
2011	262.388	4,97	1.303.548	268.111	1,87	501.311	530.499	3,40	1.804.859	2.805.256
2012	260.528	4,93	1.285.307	281.603	2,08	584.663	542.131	3,45	1.869.970	3.188.048

En la figura de abajo se indica claramente que la producción de maíz tecnificado empieza a tener un ascenso significativo desde el 2001, contrario con el maíz tradicional que baja su producción en ese mismo año. Respecto al rendimiento del maíz tecnificado también asciende significativamente después del 2000, según los datos de FENALCE (Figura 13). Esta recuperación se dio como consecuencia de un mejoramiento en los precios internos y estímulos especiales que ofreció el gobierno a través del programa Proagro, con créditos especiales, y recursos para la asistencia técnica y transferencia de tecnología. Según FENALCE en el año 2002 en la zona cafetera se registraba un área sembrada en maíz de unas 10.000 has, con el convenio entre FENALCE, CIMMYT y Federación de Cafeteros se logró un incremento del área a 62.000 has en el 2009, que corresponde a un 25% del área tecnificada. (FENALCE, 2010).



Históricos de producción y rendimiento del maíz en Colombia desde 1970-2012.

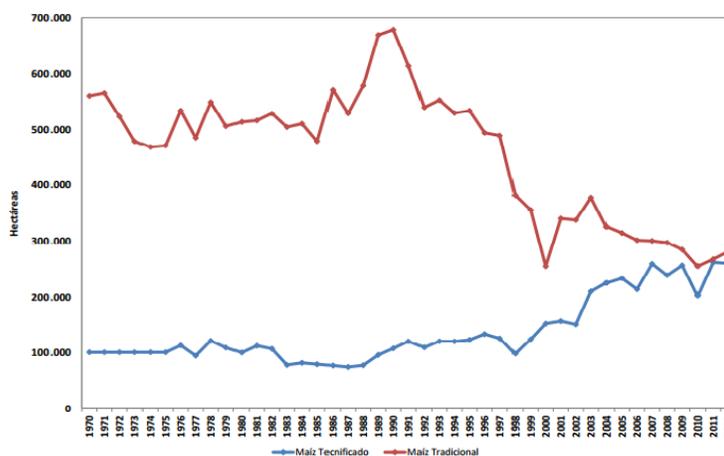


Figura 13. Histórico de área sembrada de maíz de 1970 a 2012. Fuente: (FENALCE, Índice Cerealistas, 2012)

El cultivo de maíz blanco que corresponden especialmente al tradicional ha tenido un descenso en su producción y el área de siembra a partir de 1997, aunque su rendimiento tiene una tendencia leve positiva, contrario a lo que ocurre con el maíz tecnificado que tiene mayor producción y un incremento en el rendimiento. Según la Superintendencia de Industria y Comercio en el 2011, indica que ante el déficit de la oferta del maíz interno (aproximadamente 3.4 millones de toneladas se deben importar) se incentiva a los productores a cambiarse de siembra tradicional a tecnificada para disminuir las importaciones el cual exige mayor productividad (Superintendencia de Industria y Comercio, 2011).

#### 4.1 Aspectos Morfológicos del maíz

El maíz es una planta C4 con una alta tasa de actividad fotosintética. Considerada individualmente, su tasa de multiplicación es de 1:600-1000 (Aldritch, Scott y Leng, 1975). El maíz tiene el más alto potencial para la producción de carbohidratos por unidad de superficie por día.

La planta de maíz (tipo C4) es alta, con abundantes hojas y sistema radical fibroso, normalmente con un solo tallo que tiene hasta 30 hojas. Algunas veces se desarrollan una o dos yemas laterales en la axila de las hojas en la mitad superior de la planta; estas terminan en una inflorescencia

femenina la cual se desarrolla en una mazorca cubierta por hojas que la envuelven; esta es la parte de la planta que almacena reservas. La parte superior de la planta termina en una inflorescencia masculina o panoja; esta tiene una espiga central prominente y varias ramificaciones laterales con flores masculinas, todas las que producen abundantes granos de polen (Paliwal, 2001).

Las características morfológicas del maíz corresponden a seis partes i) plántula; ii) sistema radicular; iii) sistema caulinar-vegetativo; iv) sistema caulinar-reproductivo; v) granos de polen y estigmas, y, vi) frutos y semillas (Paliwal, 2001)

- i) Plántula. El maíz se siembra normalmente a una profundidad de 5 a 8 cm si las condiciones de humedad son adecuadas. Esto da lugar a una emergencia de las plántulas rápida y uniforme, en cuatro o cinco días después de la siembra; este tiempo incrementa al aumentar la profundidad de siembra.
- ii) Sistema radicular. Las raíces seminales se desarrollan a partir de la radícula de la semilla a la profundidad a la que ha sido sembrada. El crecimiento de esas raíces disminuye después que la plúmula emerge por encima de la superficie del suelo y virtualmente detiene completamente su crecimiento en la etapa de tres hojas de la plántula. Las primeras raíces adventicias o de anclaje inician su desarrollo a partir del primer nudo en el extremo del mesocotilo. Esto ocurre por lo general a una profundidad uniforme, sin relación con la profundidad a que fue colocada la semilla. El sistema de raíces adventicias es el principal sistema de fijación de la planta y además absorbe agua y nutrimentos. La principal función de estas raíces es mantener la planta erecta y evitar su vuelco en condiciones normales. Se cree que estas raíces colaboran en la absorción de agua y nutrimentos (Feldman, 1994, citado por Paliwal, 2001).
- iii) Sistema caulinar-vegetativo. Las plántulas de maíz son visibles sobre la superficie cuando tienen tres hojas. En esta etapa la planta muestra un crecimiento vigoroso el cual se origina en un solo punto de crecimiento que es el meristemo apical; todas las partes del tallo del maíz, tanto vegetativas como reproductivas, se producen a partir de este meristemo. El maíz tropical es una planta alta, con muchas hojas y con un exceso de crecimiento vegetativo. La estructura general de la planta tiene un efecto importante sobre su productividad y el maíz tropical tiene un índice de cosecha mucho menor que el maíz de zona templada.
- iv) Sistema caulinar-reproductivo. El maíz es una planta monoica; desarrolla inflorescencias con flores de un solo sexo las que crecen siempre en lugares separados de la planta. La inflorescencia femenina o mazorca crece a partir de las yemas apicales en las axilas de las hojas y la inflorescencia masculina o panoja se desarrolla en el punto de crecimiento apical en el extremo superior de la planta. En esta fase el punto de crecimiento del tallo del maíz ya está por encima de la superficie de la tierra cuando la planta tiene seis hojas abiertas. El desarrollo de la panoja precede al de la mazorca y después que todos los primordios foliares se han iniciado, el meristemo apical se elonga y se transforma en un meristemo reproductivo masculino que se transformará a su vez en la panoja. La formación de la yema axilar que genera la mazorca está cubierta con 12 a 14 hojas modificadas. La formación que sostiene la mazorca se llama caña y tiene nudos e internudos cortos aunque varía en longitud según las diversas razas de maíz.
- v) Granos de polen y estigmas. El polen de maíz es una estructura trinuclear; tiene una célula vegetativa, dos gametas masculinas y numerosos granos de almidón; su gruesa

pared tiene dos capas, la exina y la intina y es bastante resistente. A causa de las diferencias de desarrollo entre las florecillas superiores e inferiores en las espiguillas masculinas y la maduración asincrónica de las espigas, el polen cae continuamente de cada espiga por un período de una semana o más.

- vi) Frutos y semillas. El grano o fruto del maíz es un cariopse. La pared del ovario o pericarpio está fundida con la cubierta de la semilla o testa y ambas están combinadas conjuntamente para conformar la pared del fruto. El fruto maduro consiste de tres partes principales: la pared, el embrión diploide y el endosperma triploide.

#### **4.2 Aspectos Fisiológicos del maíz**

El maíz es sensible al fotoperíodo, por esta razón, cuando proviene de latitudes altas con días largos, no prospera en nuestra zona tropical de días cortos. Se comporta mejor en el clima moderadamente cálido, con alta luminosidad y adecuada distribución de lluvias durante el ciclo vital de la planta (Ospina J. 1999, citado por Díaz, 2012).

La producción de los cultivos depende de la intercepción de la radiación solar y de su conversión en biomasa. La cantidad de radiación incidente que es interceptada por el cultivo está determinada por el área foliar, por la orientación de la hoja y por su duración. El índice del área foliar (LAI) es importante para determinar la intercepción de la radiación hasta un valor cercano a 4 en el caso del maíz; después de este valor, el área adicional tiene poco efecto en la intercepción de la luz. La densidad de siembra es un factor determinante del LAI y de la intercepción de la radiación. Los cultivares de ciclo corto producen menos hojas para interceptar la radiación y requieren una mayor densidad de plantas para llegar a un rendimiento óptimo comparados con los cultivares tardíos (H.R. Lafitte, 2001).

La cantidad total de radiación interceptada a lo largo de todo el período de cultivo depende del tiempo requerido para alcanzar la intercepción máxima (o LAI máxima, si el cultivo no cubre completamente la tierra) y también de la duración del área verde de la hoja. Los factores experimentales que reducen la expansión de la hoja son el déficit de agua y la baja disponibilidad de nutrimentos (H.R. Lafitte, 2001)

##### **4.2.1 Eficiencia de conversión**

La especie y el ambiente, tienen influencia directa sobre la eficiencia con la cual la radiación absorbida es utilizada (eficiencia de conversión, CE). 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. (H.R. Lafitte, 2001)

##### **4.2.2 Distribución de materiales asimilados**

El maíz tiende a mantener un equilibrio funcional entre la masa de raíces y la masa verde de tallos y hojas. Si uno de los recursos del suelo como el agua o los nutrimentos fuera un factor

limitante, más materias asimiladas se trasladarían al sistema radical y el crecimiento de las raíces sería favorecido frente al crecimiento del resto de la planta. Si la radiación es el factor limitante del crecimiento ya sea a causa de la sombra o de la nubosidad, más materias asimiladas se dedican al crecimiento de la parte aérea y la relación raíz-tallo decrece. El rendimiento del maíz depende de la cantidad de biomasa que se distribuye al grano. Esto se refleja en el índice de cosecha (HI) que es la masa de grano como proporción del total de biomasa que el cultivo tiene sobre la tierra. El principal proceso fisiológico que justifica las diferencias en HI entre los distintos cultivares parece ser la competencia por los materiales asimilados por los distintos órganos. El índice de cosecha es también altamente sensible a factores ambientales como la temperatura (cuyas razones son desconocidas) y a las condiciones que reducen la cantidad de materiales asimilados por la planta cuando se inicia el proceso reproductivo (alrededor de 10 días antes y después de la antesis) (H.R. Lafitte, 2001)

#### 4.2.3 Nutrientes

El elemento más importante para la producción de maíz es el nitrógeno, le siguen en importancia el potasio y el fósforo (FENALCE, 2010). Un cultivo de maíz que produce 4 000 kg/ha de grano requiere alrededor de 100 kg/ha de nitrógeno (N), 18 kg/ha de fósforo (P) y 68 kg/ha de potasio (K) (Sánchez, 1976, citado por Lafitte, 2001). El sistema radical del maíz es capaz de absorber nutrientes a través de toda la vida de la planta, pero la absorción declina durante la última parte del ciclo que corresponde al llenado del grano y a medida que comienza la senescencia de las hojas inferiores (Lafitte, 2001). En un estudio hecho en 2008 por FENALCE en Colombia se encontró que en la mayoría de las regiones, el maíz, en cultivos tecnificados, en suelos de buenas condiciones, con buen manejo y una humedad adecuada, responde bien a los siguientes niveles de fertilización: nitrógeno de 120 a 180 K/ha, fósforo de 50 a 90 kg y potasio de 60 a 100k/h (FENALCE, 2010). La tasa de acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio en el maíz ocurre en forma diferente a lo largo de las distintas etapas de crecimiento, como se muestra en la Figura siguiente.

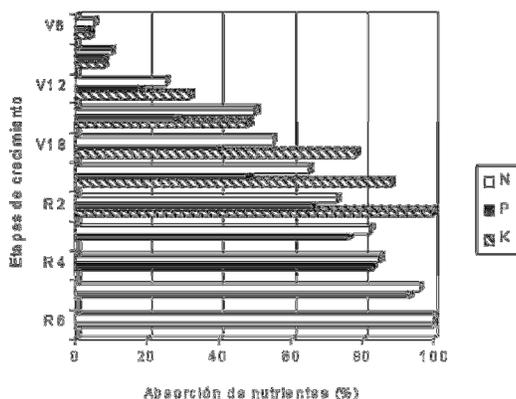


Figura 14. Fuente: FAO, 2010. Basado en Ritchie, 1984

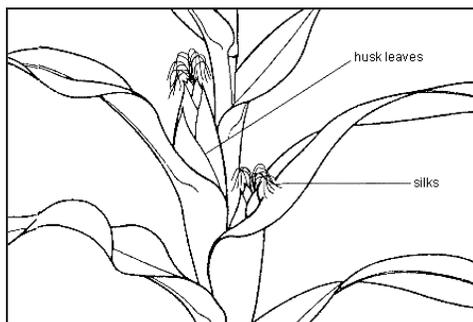
#### 4.2.4 Agua

Solo 3% de la radiación total que incide sobre el cultivo es usada para la fotosíntesis. Parte de la energía remanente calienta el follaje y este calor es disipado por medio de la transpiración y la evaporación de agua de las hojas. Un milímetro de cúbico de agua es evaporado por 2,4 Mj de radiación solar. Un cultivo de maíz bien irrigado transpira cerca de 350 gramos de agua por cada gramo de materia seca producida sobre la tierra (Hay y Walker, 1989, citado por Lafitte, 2010). En el campo hay pérdidas adicionales de agua por la evaporación del suelo. Solo una fracción de la materia seca producida forma el grano, lo que significa que un cultivo con buena disponibilidad de agua usa alrededor de 800 a 1 000 gramos de agua por cada gramo de grano producido. Un cultivo de maíz que transpire libremente, transpira alrededor del 80 al 90% de la evaporación potencial, la que ocurre a causa de la radiación, la temperatura y la humedad relativa. Bajo esas condiciones, la temperatura de la hoja es generalmente algo más baja que la temperatura del aire y el uso de agua por unidad de superficie de transpiración de la hoja es determinada por el balance de energía de la superficie del cultivo (Lafitte, 2001).

El agua es un elemento indispensable en todos los procesos fisiológicos de la planta, siendo mayor la demanda durante la época más crítica del período vegetativo, lo cual ocurre entre dos o tres semanas antes de la floración; la luz ejerce su principal papel en la fotosíntesis, pero también afecta la morfología de la planta por medio de reacciones de foto-período y elongación: además, a temperaturas altas se puede afectar la temperatura de la planta (Arrieta et al 1986 y Ospina J. 1999).

##### 4.1.3.1 Floración

La temperatura es el elemento primario que influye sobre el desarrollo del maíz. El tiempo térmico es una medida de la temperatura acumulada por encima de un mínimo y por debajo de un máximo adecuados para el desarrollo, sus unidades se expresan en grados-días. La floración se usa como el evento del desarrollo que caracteriza los cultivares como tempranos o tardíos. El rendimiento es seriamente afectado por la cantidad de radiación que el cultivo acumula por unidad de tiempo térmico. Un maíz tropical por lo general rinde menos que su homólogo de la zona templada porque las temperaturas en los trópicos son más altas y completa su ciclo vital en menos tiempo. Por la misma razón, los cultivares tempranos rinden menos que los tardíos (Lafitte, 2001).



El fotoperíodo también puede afectar el tiempo requerido por la floración. El maíz es clasificado como una planta cuantitativa de día corto. Después de un período juvenil insensitivo al fotoperíodo, la floración es demorada por fotoperíodos largos de más de 12,5 horas (Kiniry, Ritchie y Musser, 1983, citado por Lafitte, 2010). El maíz es un cultivo particular dentro de los cereales porque presenta las flores masculinas y femeninas separadas en el espacio en la panoja terminal y en las mazorcas laterales. La panoja terminal completa la mayor

parte de su desarrollo antes del período de rápido desarrollo de la mazorca. Estudios han indicado que la disponibilidad de materia para asimilar en el período alrededor de la floración es



un factor crítico para determinar el rendimiento de grano. Esto puede ser difícil de entender porque la capacidad fotosintética real del maíz está por lo general en su capacidad máxima en el momento cercano a la floración y los carbohidratos a menudo se acumulan en los tejidos en este período (Goldsworthy, 1984, citado por Lafitte, 2001).

#### 4.1.3.2 Llenado del grano

Una vez que se ha establecido el número de los granos por mazorca, el rendimiento final depende de la disponibilidad de materiales asimilados corrientes y almacenados. El maíz no tiene una conexión vascular directa entre los granos y el olote. Los carbohidratos y otros nutrimentos se acumulan en el espacio libre debajo de los granos en desarrollo y se mueven hacia los granos siguiendo un gradiente de difusión (Lafitte, 2001).

#### 4.1.3.3 Secado del grano

En los trópicos, el maíz se cosecha generalmente con un contenido de humedad de 20%, sensiblemente menor a la humedad de 30-35% en la cual el maíz llega a su madurez fisiológica.

#### 4.1.4 Aspectos Fenológicos del maíz

El conocimiento de los diferentes estados del desarrollo del maíz y la manera como son afectados por los factores ambientales, es de suma utilidad para el manejo racional del cultivo (Larios, 1997, citado por Díaz, 2012). Investigadores de IITA- CIMMYT han elaborado una guía para identificar las diferentes etapas de crecimiento del maíz dado que no todas las plantas en el campo llegan a una etapa en particular al mismo tiempo. Esa guía se relaciona con una escala que diferencia los estados vegetativos (V) de los reproductivos (R) las cuales se agrupan de la siguiente manera:

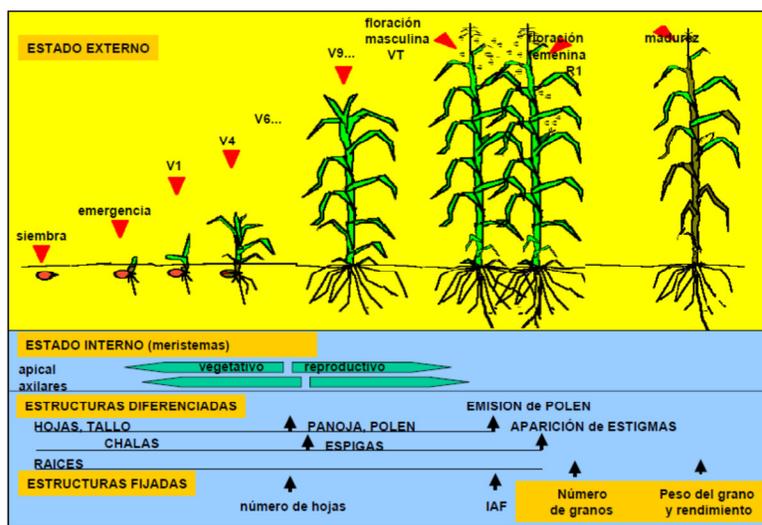
- **Crecimiento de las plántulas (etapas  $V_E$  y  $V_1$ ):** En esta fase el desarrollo vegetativo comprende desde la germinación hasta iniciación de la elongación del tallo.
- **Crecimiento vegetativo (etapas  $V_2$ ,  $V_3$ ... $V_n$ ):** En esta fase el desarrollo vegetativo comprende desde la elongación del tallo hasta la floración femenina. El cultivo necesita aproximadamente 150 mm de agua.}
- **Floración y la fecundación (etapas  $V_T$ ,  $R_0$ , y  $R_1$ ):** En esta fase comprende desde la floración femenina hasta cuando el crecimiento del grano se hace lento. Durante esta etapa el maíz necesita 100 mm de agua aproximadamente.
- **Llenado de grano y la madurez (etapas  $R_2$  a  $R_6$ ):** En esta fase comprende desde que el peso del grano aumenta rápidamente y el de las partes vegetativas sufre una pequeña disminución. Se llega a la madurez fisiológica. Durante esta etapa el cultivo de maíz necesita de 50 a 100 mm de agua.

En la tabla 3 se observa gráficamente las fases de crecimiento del cultivo de maíz.

**Tabla 3. Escala descriptiva de los estadios de crecimiento del maíz (Zea Mays L)**

CODIGO	D	DESCRIPCION
V <sub>E</sub>	5	Emergencia: El coleóptilo emerge de la superficie del suelo
V <sub>1</sub>	9	Es visible el cuello de la primera hoja.
V <sub>2</sub>	12	Es visible el cuello de la segunda hoja.
V <sub>n</sub>		Es visible el cuello de la hoja número "n". ("n" es igual al número definitivo de hojas que tiene la planta; "n" generalmente fluctúa entre 16 y 22, pero para la floración se habrán perdido las 4 a 5 hojas de más abajo.)
V <sub>T</sub>	55	Panoja: Es completamente visible la última rama de la panícula.
R <sub>0</sub>	57	Antesis o floración masculina. El polen se comienza a arrojar.
R <sub>1</sub>	59	Sedas: Son visibles los estigmas.
R <sub>2</sub>	71	Ampolla: Los núcleos son llenados con un fluido claro y se puede ver el embrión
R <sub>3</sub>	80	Etapa lechosa. Los granos se llenan con un líquido lechoso blanco.
R <sub>4</sub>	90	Etapa pastoso. Los granos se llenan con una pasta blanca. El embrión tiene aproximadamente la mitad del ancho del grano.
R <sub>5</sub>	102	Etapa dentada. La parte superior de los granos se llena con almidón sólido y, cuando el genotipo es dentado, los granos adquieren la forma dentada. En los tipos tanto cristalinos como dentados es visible una "línea de leche" cuando se observa el grano desde el costado.
R <sub>6</sub>	112	Madurez fisiológica. Una capa negra es visible en la base del grano. La humedad del grano es generalmente de alrededor del 35%.

\* d: Número aproximado de días después de la siembra en tierras bajas tropicales, donde las temperaturas máxima y mínima pueden ser de 33°C y 22°C, respectivamente. En los ambientes más fríos, se amplían estos tiempos.  
 Fuente: M. Fakorade & A. Adekunle. IITA Reserch Guide 9. Morphology and growth of maize



**Figura 15. Esquema de crecimiento del maíz (Zea Mays L)** Fuente: How a Corn Plant Develops, S.W. Ritchie y J.J. Hanway, Special Report No.48, Cooperative Extension Service, Ames, Iowa, 1984. Citado por Díaz, 2012.

#### 4.1.5 Factores agrometeorológicos en el cultivo de maíz

El microclima lo constituye un número de variables ambientales a las cuales las plantas están expuestas; entre las que se incluyen: la temperatura, precipitación, radiación, viento y humedad.



#### 4.1.5.1 Precipitación

La cantidad total de lluvia durante el período vegetativo y más aún, su distribución a lo largo del mismo, son fundamentales para el crecimiento y el rendimiento en grano del maíz. El agua es necesaria para los procesos fisiológicos de la planta que ocurren desde la siembra hasta la madurez fisiológica (Díaz, 2012). El agua, también, es responsable del mantenimiento de la rigidez (turgencia) de las células y por tanto de toda la planta; es el medio de transporte de las sustancias nutritivas, desde las raíces a las hojas y desde éstas a los órganos de utilización y reserva. Es el medio en el que se realiza la fecundación y participa en la diseminación de algunas esporas, frutos y semillas (INSMET, 2011). La demanda por agua aumenta con la relación al crecimiento, siendo la floración la etapa más crítica de la planta (dos o tres semanas antes y después) (Ospina J. 1999).

#### 4.1.5.2 Temperatura

La temperatura es una de las variables que tiene gran influencia en el proceso de desarrollo de las plantas, a su vez con la radiación solar. La relación que existe en el periodo de tiempo requerido para la maduración de los cultivos y la temperatura del aire, sirve como base para trabajar con temperaturas acumuladas (suma de calor) en esos periodos expresados como grados día. Por ejemplo, la fecha de inicio y fin del período de vegetación, el paso de la temperatura por encima y por debajo del cero biológico y del valor máximo de agotamiento son factores de temperatura importantes para evaluar las características de los cultivos (INSMET). La sensibilidad de las reacciones bioquímicas a la temperatura tiene influencia en procesos de crecimiento y desarrollo; así mismo las temperaturas extremas pueden dañar las células y tejidos al favorecer la disociación de las proteínas enzimáticas y las membranas celulares (CIAT, 1981, citado por Díaz, 2012).

En Colombia la temperatura ideal para el maíz está entre 23,9 y 29,4 °C, con mínimo de 12,8 °C y máximo de 35 °C. Las temperaturas altas aumenta la tasa de crecimiento de la planta de maíz, disminuyendo la relación de fotosíntesis, resultando una reducción en la producción de materia seca para la translocación al fruto. La temperatura mínima a la que crece el maíz es 13 °C; y si la temperatura es inferior a 10 °C el maíz no germina, y cuando son mayores de 29 °C las raíces absorben el agua con dificultad, provocando el marchitamiento de las plantas (Ospina, 1999). Para una buena productividad de maíz se requiere de días templados y soleados, seguidos de noches más frescas, ya que son las más benéficas para el crecimiento rápido del cultivo. Si las noches son cálidas, la planta consume demasiada energía en la respiración celular y sintetiza menos materia que en las noches frescas en que la respiración es menos intensa (Llanos M., 1984, citado por Díaz, 2012).

Temperaturas cálidas en el momento de sembrar permite un nacimiento rápido de la planta y elevados rendimientos finales. También en las últimas semanas del ciclo, las temperaturas cálidas resultan beneficiosas, pues propician una rápida maduración del grano. La relación entre el peso de las raíces y el de la parte aérea de la planta disminuye el crecer la temperatura dentro



de ciertos límites. Parece que con temperaturas más elevadas, las raíces pueden hacer un trabajo más eficaz siempre que cuenten con un adecuado suministro de agua y nutrientes. La temperatura tomada en el suelo a unos 10 cm de profundidad debe ser como mínimo de 8-10°C para que la semilla germine. Sin embargo, hasta que la temperatura en el suelo no sea superior a los 12°C, la germinación y el crecimiento de las plántulas es muy lento. Con temperaturas de 16-18°C, la emergencia de las plantitas es bastante rápido (10-12 días). Con 20°C, el período de emergencia se reduce a la mitad. Al principio del ciclo vegetativo, el crecimiento del maíz depende linealmente de la temperatura en el suelo si ésta varía entre 15 y 27°C. Temperaturas más altas reducen la velocidad del crecimiento de las plantas (Llanos M., 1984).

#### **4.1.5.3 Radiación Solar**

La fuente primaria de energía para la fotosíntesis y bioproductividad la constituye el sol. La energía solar, a través del balance de energía según sea el contenido de vapor de agua en el aire y la condición hídrica del suelo, determina la temperatura a la cual los procesos fisiológicos se desarrollan. Además de la fotosíntesis, la radiación solar influye en el crecimiento de las plantas y su desarrollo dependiendo de la respuesta de los cultivos a los procesos de fotomorfogénesis, fototropismo o fotoperiodismo (INSMET, 2011).

La luz solar intensa no suele dañar el cultivo a menos que éste también padezca estrés por temperatura o sequía. El cultivo es afectado cuando hay poca luz solar durante períodos prolongados de tiempo nublado, en particular si coinciden con la floración (Lafitte H., 1993). La luz afecta la fenología y morfología de la planta, fundamentalmente en la fotosíntesis, por medio de reacciones de fotoperiodo, elongación y otras, donde el fitocromo tiene importancia múltiple, a intensidades altas puede afectar la temperatura de la planta. Los periodos largos de sequía, sombrío y agua, causan rendimiento del área foliar y del rendimiento en grano de la planta del maíz (Ospina J. 1999).

#### **4.1.5.4 Viento**

El viento es el transporte a gran escala de las masas de aire debido a los cambios de presión atmosférica. Está directamente involucrado en el transporte de calor y de masa por convección forzada; además juega un papel muy importante influyendo en el intercambio de gas y calor a través de la capa límite de las plantas. A mayor velocidad del viento disminuye la resistencia de la capa límite del cultivo, esto tiende a aumentar la evaporación y acercar la temperatura de la hoja a la temperatura del aire. Además, el viento es importante porque dispersa el polen, semillas y contaminantes ambientales. Sin embargo, puede causar daños mecánicos a los cultivos deformándolos (INSMET, 2011).

#### **4.1.5.5 Humedad**

El contenido de agua en el aire se conoce como humedad absoluta y la densidad del vapor de agua en el aire se expresa en  $\text{g m}^{-3}$ . La importancia de la humedad para el funcionamiento de las plantas es doble ya que primero está determinada la tasa de pérdida de agua por la transpiración (E), porque:

$$E = g (e_{\text{aire}} - e_{\text{hoja}})$$

Donde  $g$  es la conductancia de la transferencia del vapor de agua entre la superficie de la hoja y el aire. Y segundo porque la humedad tiene un efecto directo sobre los estomas en la mayoría de los cultivos, por tanto el estoma tiende a cerrarse en condiciones de aire seco para proteger a la planta de pérdidas excesivas de agua, pero esto a la vez reduce la asimilación del dióxido de carbono (INSMET, 2011).

El mejor índice para evaluar el contenido de humedad de un área es la disponibilidad hídrica del suelo para los cultivos. Otros índices utilizados son las medias mensuales, decadales, estacionales o anuales de la precipitación y de la evaporación (teniendo en cuenta los valores máximos, mínimos y medios); el inicio, el fin y la duración de los períodos seco y de vegetación; número de días con precipitaciones de diferentes límites y el valor máximo diario de la lluvia, entre otros.

#### 4.1.6 Factores abióticos que causan estrés en el maíz

Existen varios factores adversos bióticos y abióticos en el que el cultivo de maíz puede verse expuesto a situaciones de estrés. Se pueden distinguir básicamente dos tipos de estrés: los originados por factores bióticos y los originados por factores abióticos. Un ejemplo de estrés biótico sería el que ejerce un conjunto de especies sobre otras especies (González J.A. ¿?).

Entre los principales tipos de estrés por factores abióticos se encuentran: i) Térmico (altas y bajas temperaturas (enfriamiento, congelamiento)) ii). Hídrico (agua en exceso (anegamiento y sequía) iii). Químico (sales, iones, gases, herbicidas) iv) Físico (vientos, presiones altas o bajas, sonidos, electricidad, magnetismo, gravedad alta o baja). v) Radiación (infrarroja, visible, UV, ionizante)

Unos de los factores abióticos más adverso en el cultivo es el hídrico, sin dejar de dar importancia al factor químico asociado a las características edáficas del lugar. La severidad del estrés de sequía puede ser cuantificada en base a la extensión del secado del suelo, de la reducción de la transpiración relacionada con el potencial de evapotranspiración o del estado de la planta. En la figura 16, Lafitte H.R. sintetiza los factores abióticos que pueden afectar el cultivo.

Factor	% aproximado de tierra tropical afectada <sup>a</sup>	Valor crítico para la reducción del crecimiento	Otros factores que influyen sobre el valor crítico	Referencias
Sequía	60	*Evapotranspiración real < 0.8 evapotranspiración potencial; *40-50% de la humedad del suelo agotada pH de 5.6	Estado de crecimiento cuando ocurre el estrés; demanda evaporativa	Doorenbos y Kassam, 1979
Acidez del suelo	43		Disponibilidad de nutrimentos; cultivares	Ver referencias en Duque-Vargas <i>et al.</i> , 1994
Toxicidad de aluminio	33	45% saturación de aluminio	Cultivares	Magnavaca y Bahia-Filho, 1993
Inundación	19	10 mg O <sub>2</sub> /suelo	Irradiación; temperatura	Meyer y Barrs, 1991
Salinidad	1	1.9 mS/cm	-	Cramer, 1994

**Figura 16.** Factores Abióticos que afectan el cultivo de maíz. Fuente: Sánchez, Nicholaides y Couto, 1977. <sup>a</sup> área total, no solo área sembrada con maíz. Citado por Lafitte H.R.



#### 4.1.6.1 Sequía

Se produce sequía o escasez de agua cuando el suministro es restringido por falta de lluvias o deficiencias, o bien porque la capacidad de almacenamiento del suelo no es buena. También puede haber pérdida de agua por demanda evaporativa de aire. El estrés hídrico se debe no sólo a la falta de agua sino también a las bajas temperaturas o alta salinidad (González J.A. ¿?).

La ausencia o disminución de las precipitaciones en las zonas donde se siembra maíz (secano) puede limitar el rendimiento y la producción del mismo. El maíz en la zona tropical raramente es cultivado bajo riego y la variabilidad natural en la cantidad y distribución de la lluvia significa que el estrés de sequía puede ocurrir en cualquier momento del ciclo de su cultivo. El maíz cultivado en las tierras bajas necesita al menos 500 mm de lluvia bien distribuida a lo largo de todo el ciclo de cultivo; en la práctica el cultivo se realiza, por lo general, en áreas que reciben de 750 a 1 750 mm anuales (Norman, Pearson y Searle, 1995).

El impacto de un período de restricción en la disponibilidad de agua sobre el crecimiento del cultivo es influenciado por numerosos factores, tales como la etapa de crecimiento del cultivo e historia del mismo, el área foliar, el volumen de las raíces, el déficit de la presión de vapor atmosférica, la temperatura y la radiación. Es difícil, por lo tanto, comparar los niveles de las sequías a través de los años, aún si el mismo nivel de estrés apareció en un momento particular del crecimiento del cultivo (Lafitte, 2001).

#### 4.1.7 Causas del Estrés hídrico

- Precipitación insuficiente, o una demanda ambiental muy grande provocada por altas temperaturas y baja humedad relativa.
- Suelos con poca capacidad de retener agua.
- El agua de lluvia se pierde por escurrimiento
- Suelos poco profundos o compactos
- Crecimiento radical restringido por las propiedades químicas del suelo
- La maleza o un cultivo intercalado usa el agua

##### 4.1.7.1 Baja fertilidad

Las necesidades de nitrógeno deben ser satisfechas por medio de la adición de fertilizantes orgánicos o inorgánicos para un mejor desarrollo de la planta. El maíz tiene una fuerte respuesta positiva al abastecimiento de nitrógeno y su déficit es el más importante, después del déficit del agua, en la producción de maíz tropical. Aun cuando haya nitrógeno disponible en el suelo la competencia de las malezas puede llevar a una deficiencia nitrogenada en el cultivo. El nitrógeno es necesario para la formación de proteínas estructurales y de proteínas enzimáticas, la falta de nitrógeno lleva inmediatamente a reducir el crecimiento de las hojas y del grano y también afecta la conversión a materia seca por la radiación interceptada. (Lafitte, 2001).



#### 4.1.7.2 Acidez en el suelo

Los suelos ácidos se caracterizan por la toxicidad de varios minerales como aluminio y manganeso y deficiencias de fósforo, calcio y magnesio. Una saturación del 60 % de aluminio reduce el crecimiento de las raíces y perjudica su funcionamiento, por lo que el cultivo sufre no solo del aumento del estrés de agua sino también de los efectos tóxicos directos de los minerales. En los suelos ácidos que no tienen altos niveles de aluminio, el principal efecto de la acidez del suelo es hacer que ciertos nutrimentos, en particular el fósforo, sean puestos en una situación indisponible para el cultivo. La deficiencia de fósforo da lugar a un menor crecimiento y a una pobre formación de mazorcas (FAO 2001).

#### 4.1.7.3 Altas temperaturas

Cuando las hojas transpiran libremente, la temperatura de las mismas estará 1°C ó 2°C por debajo de la temperatura del aire evitando el daño a los tejidos. Si la transpiración se reduce a causa de un cierre parcial de los estomas, la temperatura de la hoja puede llegar a ser de 3°C a 6°C superior a la temperatura del aire y si el cierre de los estomas es total, la temperatura de la hoja puede ser hasta 10°C más alta que la temperatura del aire (Squire, 1990, citado por Lafitte, 2001) La fotosíntesis disminuye a temperaturas de la hoja mayores de 40°C, a causa del daño de las membranas fotoinhibición y el daño es más severo en condiciones de alta radiación. En un principio esta fotoinhibición es reversible, pero los daños pueden ser irreversibles si la duración de las altas temperaturas es prolongada o si la temperatura de las hojas excede de 45°C, llegando así en los casos extremos a la muerte de los tejidos.

Las altas temperaturas después de la floración incrementan la tasa de llenado de los granos y acortan su duración de ese período. Lamentablemente, el efecto de las temperaturas elevadas es por lo general relativamente mayor para el desarrollo -duración del tiempo de llenado del grano- que para el crecimiento -tasa de llenado del grano- por lo que el rendimiento es, en general, reducido por las altas temperaturas después de la floración. En muchos casos, sin embargo, las altas temperaturas en el campo están asociadas con períodos de poca lluvia y sequía, por lo que los efectos de la temperatura se confunden con los del estrés de agua.

Las altas temperaturas tienen un efecto directo sobre la polinización del maíz ya que la viabilidad del polen se reduce en forma importante por encima de temperaturas de 35°C (Westgate, 1994, citado por FAO, 2001). En el caso en que el abastecimiento de polen viable descienda por debajo del 80%, la polinización puede ser una limitante del rendimiento.

Las altas temperaturas después de la floración incrementan la tasa de llenado de los granos y acortan su duración de ese período. Lamentablemente, el efecto de las temperaturas elevadas es relativamente mayor para el desarrollo -duración del tiempo de llenado del grano- que para el crecimiento -tasa de llenado del grano- por lo que el rendimiento es reducido por las altas temperaturas después de la floración. En muchos casos, las altas temperaturas están asociadas con períodos de poca lluvia y sequía, por lo que los efectos de la temperatura se confunden con los del estrés de agua. (Lafitte, 2001).



#### 4.1.7.4 Bajas temperaturas

Según Lafitte, 2001, el maíz es un cultivo sensible al frío y sufre daños a temperaturas entre 0° y 10° C si está expuesto a la luz normal, y a temperaturas entre 10° y 15°C cuando está expuesto a la luz intensa, dependiendo de los cultivares. Los efectos de las bajas temperaturas se manifiestan tanto sobre las funciones enzimáticas como sobre las propiedades de las membranas y se ponen en evidencia por la reducción de la fotosíntesis, del crecimiento, de la extensión de las hojas y por la absorción de agua y nutrimentos (Miedema, 1982). Las temperaturas entre 0° y 10°C pueden también resultar en un desarrollo radical anormal y en la pérdida de turgencia (Aloni y Griffith, 1991).

La fotosíntesis es seriamente afectada por las bajas temperaturas, especialmente en presencia de luz intensa. El umbral para un daño irreversible al sistema fotosintético es de 1,5 días a 10°C para el maíz de zona templada y con luz intensa (Miedema, 1982, citado por Lafitte, 2001).

#### 4.1.7.5 Inundación

El maíz soporta un exceso de humedad en las regiones en que el suelo está mantenido por encima de su capacidad de campo durante largos períodos, lo cual da lugar a un menor abastecimiento de oxígeno a las raíces, tal como ocurre en suelos pesados y mal drenados (FAO, 2001). Las inundaciones dan lugar al cierre de los estomas, a un crecimiento limitado, a clorosis, a un menor crecimiento de las raíces y a la muerte de la planta. La inundación parece reducir la conductividad hidráulica de las raíces y las altas temperaturas y la alta radiación exacerban el estrés sobre el cultivo, probable-mente al inducir un estrés de agua (Lafitte, 2001).

#### 4.1.7.6 Salinidad

El maíz es muy sensible a la salinidad, con una pérdida de 10% de rendimiento en los suelos en que la conductividad eléctrica supera 2,5 mS/cm. El primer síntoma de estrés de salinidad es el marchitamiento porque el cultivo sufre una sequía fisiológica ya que el agua no se puede mover del suelo a las raíces contra el gradiente de potencial osmótico. La salinidad también reduce la conductividad hidráulica de las raíces y un daño duradero puede originarse debido a la acumulación en la planta de niveles tóxicos de ciertos iones (Lafitte, 2001)

#### 4.1.8 Edafología

El maíz requiere suelos fértiles pero se adapta a una gran variedad de ellos, en general, prefiere suelos de texturas medias, bien drenados interna y externamente, con contenidos de materia orgánica superiores al 4% y un pH de 5.5 a 6.5 y con pendientes inferiores al 30%. (Corrales y Acevedo et al. 2004). El maíz se considera medianamente tolerante a los contenidos de sales en el suelo o en las aguas de riego. La parte superior de las raíces es la más sensible a los efectos de las sales. El crecimiento de las raíces se ve severamente más afectado por las sales que la parte aérea.



En Colombia según FENALCE el maíz se adapta muy bien a todos tipos de suelo, especialmente con pH entre 6 a 7. También requieren suelos profundos, ricos en materia orgánica, con buena circulación del drenaje para no producir encharques que originen asfixia radicular.

#### 4.1.9 Prácticas Agrícolas

Generalmente en la producción de maíz tecnificado se elaboran prácticas agrícolas como laboreo intensivo del suelo, siembra con sembradora abonadora, uso de semilla certificada de una variedad mejorada o un híbrido escogido bajo criterio de un experto, reabonamiento manual, aplicación de plaguicidas con tractor cuando el cultivo está pequeño y luego manual y recolección mecanizada. Los rendimientos para Maíz tecnificado están entre las 4.5 a 11 toneladas por hectárea dependiendo la zona. En Tolima los rendimientos superan las 7 toneladas por hectárea (FENALCE, 2010).

En el caso de los periodos de siembra y cosecha, los mayores reportados se encuentran en Abril y Septiembre, respectivamente, y una segunda temporada de siembra a mediados de Agosto, y su cosecha en Diciembre. El maíz generalmente se siembra de 5 a 8 cm de la superficie del suelo en condiciones de humedad adecuadas (Paliwal, 2001). Se han obtenido buenos resultados con densidades de siembra de 40.000 plantas por hectárea (80 cm entre surcos y 45cm entre plantas), depositando 3 granos por sitio, para un total de 15 a 20Kg de semilla por hectárea (Mendez J. 2012).

El momento óptimo de la cosecha ocurre entre los 60 y 80 días después de la floración con un contenido de humedad del grano entre el 16 y el 18%. Son índices de cosecha para la recolección, la aparición de un punto o capa negra entre el grano y la tusa, y la inclinación de la mazorca.

### 4.3 Cultivo de Maíz en Tolima

#### 4.3.1 Participación de la producción en la región

El rendimiento de producción en Tolima está cerca de seis toneladas por hectárea en el 2011 y existen zonas donde se produce más maíz, como Armero-Guayabal, Valle de San Juan y Espinal<sup>14</sup>. En promedio desde 2004 hasta el 2012 el rendimiento de cultivo de maíz es de 4.84 tonelada por hectárea (FENALCE). Se estima que en el Tolima se cultiva cerca de 40 mil hectáreas de maíz, de las cuales 8.000 son maíz blanco y 32.000 corresponden a maíz amarillo.

<sup>14</sup> El Nuevo día. 2012. Nota periodística. <http://www.elnuevodia.com.co/nuevodia/actualidad/economica/135672-comercializacion-del-maiz-en-caida-libre#sthash.wLK6Kl6c.dpuf>



**Tabla 4. Rendimientos de maíz amarillo tecnificado por departamentos y semestres del 2004 al 2012. Fuente. Fenalce. Indicadores Cerealista 2012.**

Rendimientos por departamentos, producto y semestres (2004A-2012B)																		
(Tonelada/Hectárea)																		
Regionales	Sem A/04	Sem B/04	Sem A/05	Sem B/05	Sem A/06	Sem B/06	Sem A/07	Sem B/07	Sem A/08	Sem B/08	Sem A/09	Sem B/09	Sem A/10	Sem B/10	Sem A/11	Sem B/11	Sem A/12	Sem B/12
<b>MAÍZ AMARILLO TECNIFICADO</b>																		
ANTIOQUIA	3,60	3,50	3,90	3,50	4,00	3,70	4,10	3,70	4,20	3,76	3,32	3,13	4,60	1,78	4,60	3,50	4,14	3,50
ATLANTICO	4,00	4,00	2,70	4,00	3,90	3,90	4,10	3,90	4,10	3,75	4,10	3,85	4,00	2,84	4,00	4,00	3,64	4,00
BOLIVAR - MAGDALENA	4,30	4,20	4,46	4,30	4,11	3,87	4,30	3,87	4,10	3,75	4,10	3,83	4,00	2,81	4,00	4,00	3,29	4,00
BOYACA	4,20	3,20	3,60	-	3,60	3,50	3,70	-	3,00	2,56	3,00	1,66	2,20	2,50	2,66	2,00	-	-
CAQUETA	-	-	-	-	3,50	3,70	3,50	-	3,50	-	3,50	-	-	-	4,00	-	-	-
CASANARE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,50	-	-	-
CORDOBA	4,60	4,00	4,55	4,20	4,50	3,80	4,80	3,80	4,70	2,93	5,20	2,40	5,20	2,25	5,30	3,20	5,20	3,50
CESAR NORTE	3,60	3,60	3,60	4,00	4,10	3,90	4,10	3,90	4,10	3,48	3,59	1,81	3,50	3,15	4,00	3,48	3,00	6,47
CESAR SUR	4,10	4,00	3,90	4,20	-	3,80	4,10	3,80	4,10	3,66	4,00	2,89	5,00	4,00	6,11	6,00	6,30	3,36
CUNDINAMARCA	4,10	3,70	4,00	4,30	4,30	4,10	4,30	4,10	4,30	3,20	3,50	2,11	3,50	3,21	3,80	3,50	3,63	3,60
HUILA	3,03	4,00	4,10	4,25	4,10	4,20	4,20	4,20	4,20	5,57	3,93	3,61	4,30	4,19	4,43	4,40	4,50	4,39
META - Attilanura	4,00	5,00	4,60	5,00	4,76	5,46	5,37	5,46	5,50	4,57	5,50	5,35	5,00	5,00	6,00	6,50	6,50	6,00
META - Granada	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,50	5,50	5,50	6,00
NARIÑO	-	-	3,80	-	3,80	3,00	3,10	3,00	3,50	1,98	2,90	1,51	3,48	1,76	3,50	2,75	2,40	2,97
NORTE DE SANTANDER	3,50	-	4,10	-	4,10	3,70	4,10	3,70	4,20	4,12	3,00	4,00	-	-	4,50	-	-	-
TOLIMA	4,30	4,26	4,50	4,92	4,50	4,00	4,50	4,00	4,50	4,94	4,73	4,49	5,50	5,50	6,24	6,50	3,20	6,67
SANTANDER	4,00	4,00	4,10	4,50	4,30	4,30	4,30	4,20	4,20	5,49	5,00	3,46	5,10	4,36	5,10	5,31	5,10	5,22
SUCRE	3,80	3,80	3,80	4,10	4,50	3,80	4,10	3,80	4,20	3,37	3,40	2,02	3,70	2,91	3,65	3,60	3,80	3,50
VALLE	6,10	6,10	6,20	6,21	6,20	7,20	6,70	7,20	7,50	6,24	7,09	4,93	6,20	4,26	6,90	6,50	7,18	7,18
CAUCA	4,50	4,60	4,50	4,50	4,50	4,20	4,50	4,20	5,00	3,09	4,20	4,50	4,20	3,17	5,10	4,20	6,20	6,20
GUAJIRA	-	-	4,00	-	4,00	3,80	3,90	3,80	3,90	3,47	3,00	1,07	2,40	3,14	3,80	3,00	2,66	2,82
ZONA CAFETERA	3,80	3,70	4,20	4,05	3,50	3,20	3,80	3,20	4,50	8,78	4,20	3,04	4,80	3,84	4,50	4,50	5,50	5,50
Otros	-	-	4,00	-	-	-	-	-	-	3,66	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Total Maíz Amarillo Tecnificado</b>	<b>4,29</b>	<b>4,22</b>	<b>4,46</b>	<b>4,51</b>	<b>4,49</b>	<b>4,35</b>	<b>4,55</b>	<b>4,28</b>	<b>4,74</b>	<b>4,54</b>	<b>4,44</b>	<b>3,58</b>	<b>4,64</b>	<b>3,86</b>	<b>4,96</b>	<b>5,02</b>	<b>4,70</b>	<b>5,30</b>

De acuerdo a las estadísticas del MADR los municipios con mayor producción son Guamo, Espinal, Ibagué y Valle de San Juan y respecto a rendimiento se encuentran, Espina, Mariquita, Natagaima y Valle de San Juan como se observa en la tabla 5.

**Tabla 5. Base de evaluaciones agropecuarias 2004- 2012. Ministerios de Agricultura y Desarrollo Rural.**

MUNICIPIO	PERIODO	2006B	2007A	2007B	2008A	2008B	2009A	2009B	2010A	2010B	2011A	Total general
AMBALEMA	Producción_(t)				250.0	190.0	269.0	140.6	65.7	140.6	65.7	1121.6
	Rendimiento_(t/ha)				2.08	2.24	2.15	1.90	1.46	1.90	1.46	13.19
CHAPARRAL	Producción_(t)				190.0	236.0	259.0					685.0
	Rendimiento_(t/ha)				1.15	1.18	1.19					3.52
ESPINAL	Producción_(t)	1640.0	2150.0	2365.0	2473.0	2527.0	1125.0	1941.0	600.0	1650.0	12000.0	28471.0
	Rendimiento_(t/ha)	5.41	5.00	4.59	4.46	4.37	3.33	3.00	3.00	3.00	3.00	39.16
GUAMO	Producción_(t)	2600.0	2002.6	650.0	1060.0	1265.0	3145.6	2400.0	2500.0	2900.0	3895.0	22418.2
	Rendimiento_(t/ha)	4.00	3.80	3.10	2.94	3.29	3.20	3.00	3.33	3.49	3.80	33.95
IBAGUE	Producción_(t)				2350.0	2555.0	2658.0	2950.0	1975.0	2500.0	1830.0	18633.0
	Rendimiento_(t/ha)				2.55	2.72	2.80	3.73	3.32	3.57	3.00	24.69
LERIDA	Producción_(t)				353.0	664.0	819.0	2634.0	2100.0	2634.0	2100.0	11784.0
	Rendimiento_(t/ha)				3.53	3.35	3.32	3.00	3.00	3.00	3.00	25.20
MARIQUITA	Producción_(t)	85.0	95.0	218.0		279.0	2722.0	2641.0	350.0	225.0	585.0	7200.0
	Rendimiento_(t/ha)	3.40	3.39	3.41		3.40	4.41	4.45	5.00	4.50	4.88	36.84
NATAGAIMA	Producción_(t)	1400.0	1280.0	490.0	425.0	393.0					1750.0	5738.0
	Rendimiento_(t/ha)	4.00	4.00	3.38	3.60	3.78					5.00	23.76
PURIFICACION	Producción_(t)	160.0	280.0	150.0	150.0	260.0						1000.0
	Rendimiento_(t/ha)	4.00	4.00	3.00	2.50	4.33						17.83
RIOBLANCO	Producción_(t)	300.0	525.0				828.0	820.0	828.0	820.0	650.0	4771.0
	Rendimiento_(t/ha)	3.00	3.00				2.00	2.00	2.00	2.00	1.91	15.91
VALLE DE SAN JUAN	Producción_(t)	5400.0	5000.0	5100.0	5150.0	5175.0	8001.0	5180.0	3858.0	5180.0	5400.0	53444.0
	Rendimiento_(t/ha)	4.50	4.00	4.00	4.00	4.00	3.50	2.80	3.00	2.80	2.92	35.52
	Total Suma de Producción_(t)	11745.0	11486.6	13026.0	13773.0	14774.0	22273.2	17270.2	13894.6	14873.2	27174.6	160290.4
	Total promedio Rendimiento_(t/ha)	3.82	3.88	3.08	3.00	3.26	3.13	2.88	3.10	2.91	3.44	3.25

#### 4.3.2 Fecha de Siembra y Cosecha del maíz

El mayor porcentaje de siembras a nivel nacional ocurre entre marzo y mayo y en cuanto al periodo de cosechas se presentan entre julio y septiembre y nuevamente en diciembre. En la figura siguiente se indica la distribución porcentual de las siembras y cosechas en el ámbito nacional.

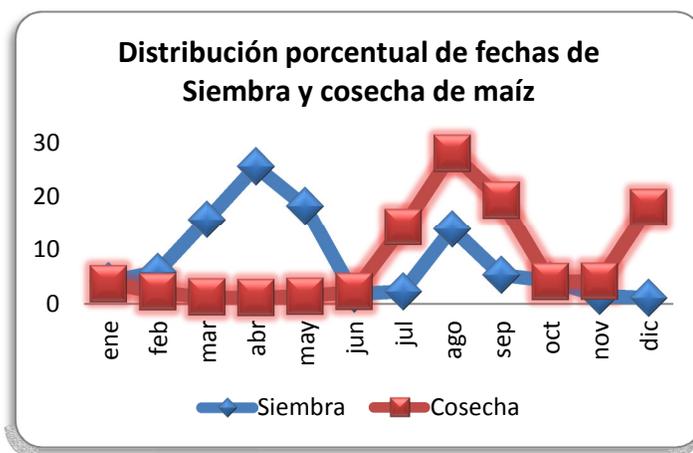


Figura 17. Distribución porcentual de fechas de siembra y cosecha de maíz en Colombia. Fuente: DANE.

#### 4.3.3 Fases fenológicas de dos variedades en Meta y Tolima

La duración de cada fase fenológica depende del material y de las características edafoclimáticas. Para el presente estudio se trabajaron con dos materiales en Meta y Tolima. La fecha de inicio de siembra para la variedad PAC 105 corresponde a mayo del 2008 y para Ica V156 es de septiembre de 2003 (Tabla 6). Los datos presentes fueron utilizados en la calibración y validación del modelo AquaCrop elaborado en el 2012<sup>15</sup> y se utilizarán en el presente estudio como insumo del modelo.

<sup>15</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.



**Tabla 6.** Etapas fenológicas para el cultivo de maíz, bajo las condiciones de Villavicencio -Meta en el primer semestre agrícola de 2008. Fuente: Semilla del Valle (<http://www.semillasvalle.com/>)

MATERIAL	PAC 105		Ica V156	
	Villavicencio, Meta		Espinal, Tolima	
Fase Fenológica	GD acumulados (°C/día)	Edad (°C/día)	GD acumulados (días)	Edad días
Emergencia	54.7	5		5
Máximo dosel	873	49		58
Floración	891	50		56
Máxima Profundidad radicular	906	51		65
Senescencia	1641	94		98
Cosecha	2167	125		140

**Tabla 7.** Características físicas del perfil modal del suelo en cultivo de maíz tecnificado.

Prof(cm)	horizonte	Arena	Arcilla	Limo	Tex	D.A	CC	PMP	K(θ) (mm/d)
10	0-20	46.18	25.42	28.4	F	1.63	27.00	15.0	112.8
45	20-40	48.18	25.42	26.4	F-Ar-A	1.15	27.00	15.0	108
80	40-80	52.18	23.42	24.4	F-Ar-A	0.74	25.00	14.0	127.2

Según los autores del estudio de calibración del AquaCrop, indicaron que la profundidad máxima de raíces del cultivo de Maíz no supera los **20cm** de profundidad de acuerdo a la información reportada por el gremio. Este valor puede cambiar en función del tipo de suelos y prácticas agrícolas en cada región.

**Tabla 8.** Parámetros utilizados en el módulo de cultivo para MAIZ PAC 105. (Fuente. Méndez, 2012)

PARAMETRO	VALOR	UNIDADES	DESCRIPCION
$CC_0$	0.46	%	Cobertura de Dosel inicial. Se determina cuando el 50 de las semillas han germinado
<i>Densidad de siembra</i>	70.000	Plantas/ha	Número de plantas sembradas en un área de una (1) hectárea
$CC_x$	90	%	Máxima cobertura de dosel-Bien cubierta
$CGC$	15	%/Día	Coficiente de crecimiento del dosel después de emergencia
$CDC$	14.4	%/Día	Coficiente de declinación del dosel después de senescencia



<i>Zr(minimum)</i>	0.1	m	Mínima profundidad de raíces
<i>Zr(maximum)</i>	0.5	m	Máxima profundidad de raíces
<i>WP*</i>	33.7	g/m <sup>2</sup>	Productividad hídrica normalizada (Cultivo C4)
<i>HI<sub>0</sub></i>	42	%	Índice de Cosecha-Relación porcentual entre rendimiento y biomasa en base seca

## 4.2 Cultivo de papa

### 4.2.1 Generalidades de la papa

El cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) se desarrolla en los altiplanos de la región andina en Colombia, en donde Nariño, Cundinamarca y Boyacá son los mayores productores. La papa se cultiva de 2500 a 3400 m.s.n.m. (hoy se hace a 4000 m.s.n.m en los páramos) casi siempre en laderas. La temperatura media óptima en el altiplano oscila entre de 8 y 15°C. (J.E. Austin Associates, Arlington Virginia y CORPOCEA, 2000).

En todo el territorio colombiano se reporta que hay aproximadamente 250 municipios que producen alguna variedad de papa. En los departamentos donde se registra la mayor producción de papa para el país son Cundinamarca y Boyacá, con el 39.3 % y 27.3% en área total cultivada, con una producción de 1.031.005 y 725.305 toneladas anual respectivamente (Ñústez, 2011, citado por Mendez, 2012).

Dptos	Total 2006	Total 2007	Total 2008	Total 2009	Total 2010	Total 2011	Total 2012 (Proy.)	AÑO	Rendimiento promedio
Antioquia	15,425	15,700	13,235	13,070	13,390	12,010	10,450	2006	17.05
Boyaca	42,470	43,940	38,855	36,820	38,200	35,250	36,580	2007	17.80
C/marca	58,158	58,380	51,700	52,825	54,470	50,310	50,320	2008	18.83
Nariño	27,788	27,900	22,010	20,505	20,980	20,010	23,480	2009	19.00
Otros	14,250	14,770	12,515	11,420	11,591	10,730	13,035	2010	19.13
Total	158,091	160,690	138,315	134,640	138,631	128,310	133,865	2011	20.56
								2012	20.83

Figura 18. Indicadores de área sembrada y rendimiento por departamentos en el 2012. Fuente: Revista Papa. FEDEPAPA, 2012.

Cundinamarca es el primer productor de papa en Colombia. De acuerdo a las estadísticas de Cevipapa la producción de todos los municipios de este departamento para el periodo 1990-2004 osciló entre 788.000 a 1.280.000 (ha), con un rendimiento promedio de 17,27 (t/ha) y un área cultivada entre 45.000 y 69.000 hectáreas en ese periodo. Para el periodo de 2006 al 2012 municipios como Tausa, Villapinzón, Guatavita, San Cayetano obtuvieron una producción anual entre 50.000 y 120.000 toneladas anuales. La producción más significativa ocurrió en el 2010 en Villapinzón con 211.000 toneladas aproximadamente según cifras de MADR.

Las figuras 19 y 20 presenta la producción total del 2006 al 2012 en toneladas, se destacan los municipios de Ventaquemada, Tunja, Saboya, Tutazá, con una producción por encima de 200.000 toneladas y un rendimiento promedio de 14 toneladas por hectárea de acuerdo a cifras del MADR (2013).

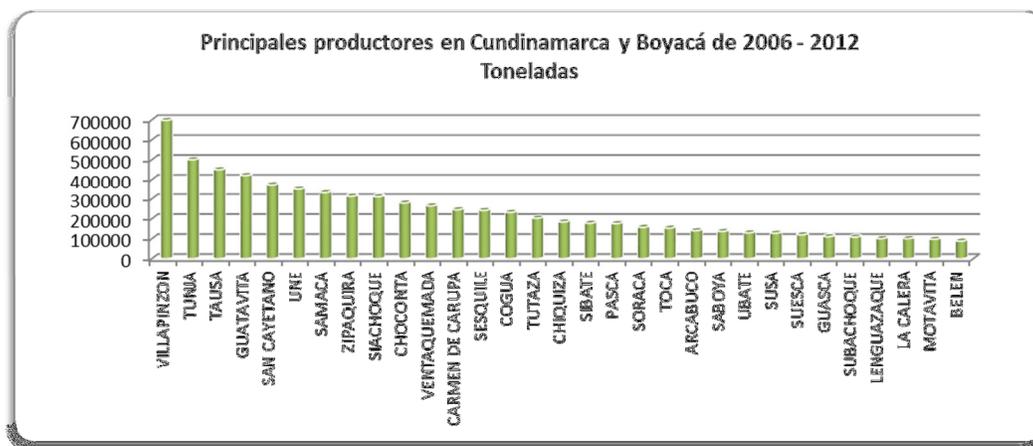


Figura 19. Municipios con mayor producción en Cundinamarca y Boyacá de 2006-20012.

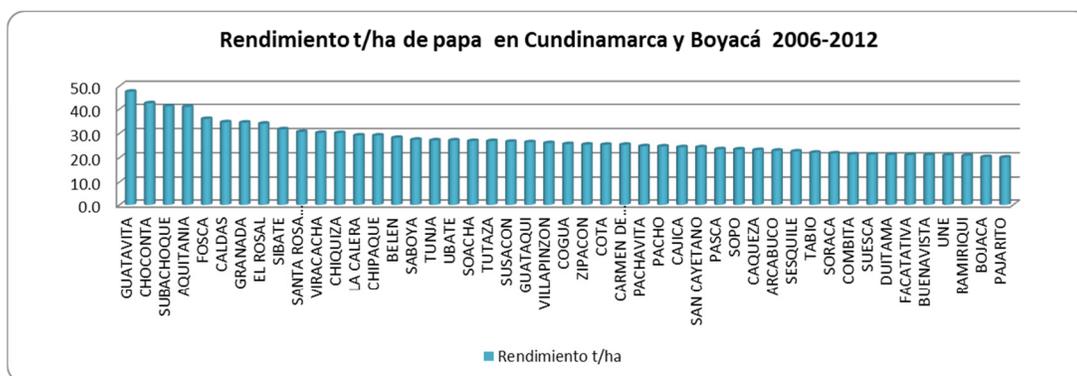
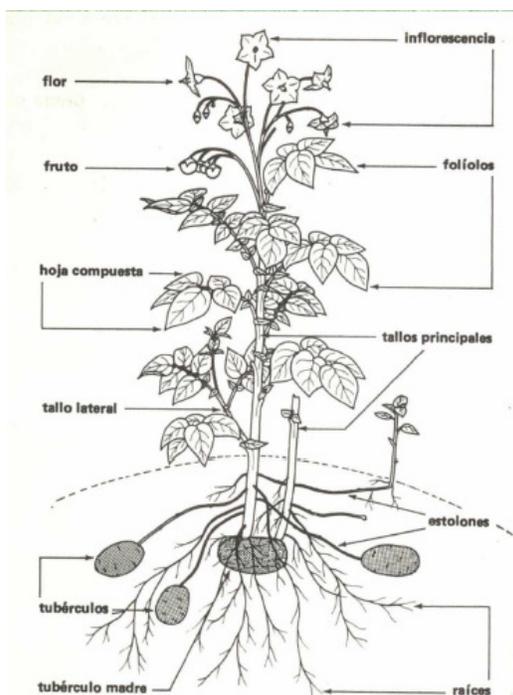


Figura 20. Rendimiento de papa en t/h en Cundinamarca y Boyacá por encima de 20 t/ha.

#### 4.2.2 Aspectos fisiológicos

El crecimiento de la papa se encuentra asociado a aspectos fenológicos y fisiológicos donde el desarrollo aéreo y subterráneo de la planta es importante. De esta manera existe una interrelación entre la fisiología de la papa y los principales factores determinantes del microambiente como lo son la radiación solar, el CO<sub>2</sub>, la temperatura y el agua (Corchuelo, 2005). A través de la radiación solar, las plantas presentan respuestas a la luz por medio de procesos como fotosíntesis, fotorespiración, fotoperiodicidad y foto morfogénesis entre otros (Corchuelo, 2005).



La papa es una dicotiledónea herbácea con hábitos de crecimiento rastrero o erecto, generalmente de tallos gruesos y leñosos, con entrenudos cortos. Su crecimiento promedio es de un metro y produce un tubérculo con tan abundante contenido de almidón que ocupa el cuarto lugar mundial en importancia como alimento, después del maíz, el trigo y el arroz. La papa pertenece a la familia de floríferas solanáceas, del género *Solanum*, formado por otras mil especies por lo menos, como el tomate y la berenjena. La especie *S. tuberosum* se divide en dos subespecies apenas diferentes, la *Andigena*, adaptada a condiciones de días breves, cultivada principalmente en los Andes, y *tuberosum*, la variedad que hoy se cultiva en todo el mundo y se piensa que descende de una introducción en Europa de papas *Andigena*, posteriormente adaptadas a días más prolongados (FAO, 2008, citado por Rojas, 2011).

Por encima del suelo, se encuentran los tallos y las hojas, que son los órganos de los cuales depende la fotosíntesis de la planta, ya que su tamaño y forma determinan la capacidad de la planta para sintetizar carbohidratos para su crecimiento y desarrollo de los tubérculos. También se encuentran las flores y frutos, que solo tienen importancia en el mejoramiento genético para la creación de nuevas variedades, pues en el cultivo comercial solo se utilizan los tubérculos o trozos de tubérculos más grandes como semilla para las nuevas cosechas (Rojas, 2011).

Por debajo del nivel del suelo se encuentran los estolones, que son tallos laterales a partir de los cuales se forman los tubérculos que son tallos modificados para el almacenamiento de reservas, principalmente de almidón y finalmente las raíces adventicias responsables de la absorción del agua y nutrientes desde el suelo y del anclaje de la planta (Rojas, 2011).

En la fotosíntesis las plantas reaccionan a la estimulación de la luz, gracias a una variedad de moléculas conocidas como pigmentos, que tienen la propiedad de absorber luz de determinadas longitudes de onda. Así la transformación de energía radiante en energía química la realizan las plantas y ello se traduce en carbohidratos, proteínas, lípidos, etc., todo aquello que desde el punto de vista agronómico corresponde a la producción (Fuentealba, 2001).

La mayor parte de las plantas, aquellas que viven en ambientes balanceados, sin tensiones excepcionales, toman el CO<sub>2</sub> durante el día a través de los estomas foliares, de allí es transferido rápidamente a los cloroplastos de las células, donde es usado inmediatamente en la fotosíntesis. Esta ruta es conocida como la C<sub>3</sub> por ser un compuesto de tres carbonos, el ácido 3 - fosfoglicérico (PGA). Esta se caracteriza por mantener abiertos los estomas durante día y noche para transferir CO<sub>2</sub> a la planta, lo cual indica, a través de estudios, que las plantas C<sub>3</sub> son las más primitivas, pues ellas no tienen especiales cualidades de resistencia a la sequía. El hecho de que



los estomas en la papa permanezcan abiertos de continuo, ayuda a explicar en parte, los descensos en los rendimientos cuando el cultivo está sometido a estrés hídrico, pues ni siquiera tienen la posibilidad de activar un mecanismo de cierre que permita reducir la pérdida de agua.

La papa eso sí, como planta C3 presenta ventaja de que la temperatura óptima para la fijación de CO<sub>2</sub>, base para una fotosíntesis eficiente, está entre 15 y 25° Celsius, reporta Fuentealba (2001) para el caso de Chile.

En general, los aspectos del crecimiento de la planta, tales como procesos biofísicos, reacciones enzimáticas, transporte de iones, translocación, asignación y distribución del carbono y permeabilidad de membranas son regulados por la temperatura (Corchuelo, 2005).

La variación anual en los rendimientos de los cultivos comerciales de papa es en parte consecuencia de las fluctuaciones en las condiciones meteorológicas y el factor responsable de la mayoría de estos cambios es la distribución y cantidad de lluvias. La baja disponibilidad de agua ocasiona en el cultivo una notoria disminución en su crecimiento y desarrollo. La transpiración, la captación de agua y su transporte desde las raíces a las superficies que transpiran son los procesos básicos de la economía hídrica (Corchuelo, 2005).

La exposición del cultivo de papa a estrés de agua causa la reducción del potencial de rendimiento, reduciendo la eficiencia fotosintética del dosel. Como resultado del déficit de agua durante el desarrollo vegetativo, el área de las hojas de la planta se reduce, como también el número de hojas por planta debido a restricciones en las tasas de exposición foliar. Aún más, la sequía induce a la prematura senescencia foliar (Corchuelo, 2005). Como arriba se había mencionado, bajos potenciales de agua en el suelo son suficientes para causar tasas bajas de intercambio de CO<sub>2</sub>, debido al cierre parcial de estomas. Esto indica que la papa es una de las especies de plantas mesofíticas, muy sensibles al estrés hídrico (Corchuelo, 2005).

#### **4.2.3 Aspectos fenológicos**

La parte aérea de la planta de papa, desarrolla el proceso Fotosíntesis-Respiración, necesario para formar Hidratos de Carbono que serán transportados a zonas de crecimiento aéreo (follaje, brotes, flores, fruto), y subterráneo (raíces, estolones y tubérculos).

Para que este proceso se efectúe en forma óptima, se requiere de luz, temperatura, humedad y nutrientes los que deben estar en el medio donde ésta planta se desarrolle. La asimilación neta es calculada por la sustracción de los carbohidratos usados en la respiración, de los carbohidratos producidos en la fotosíntesis.

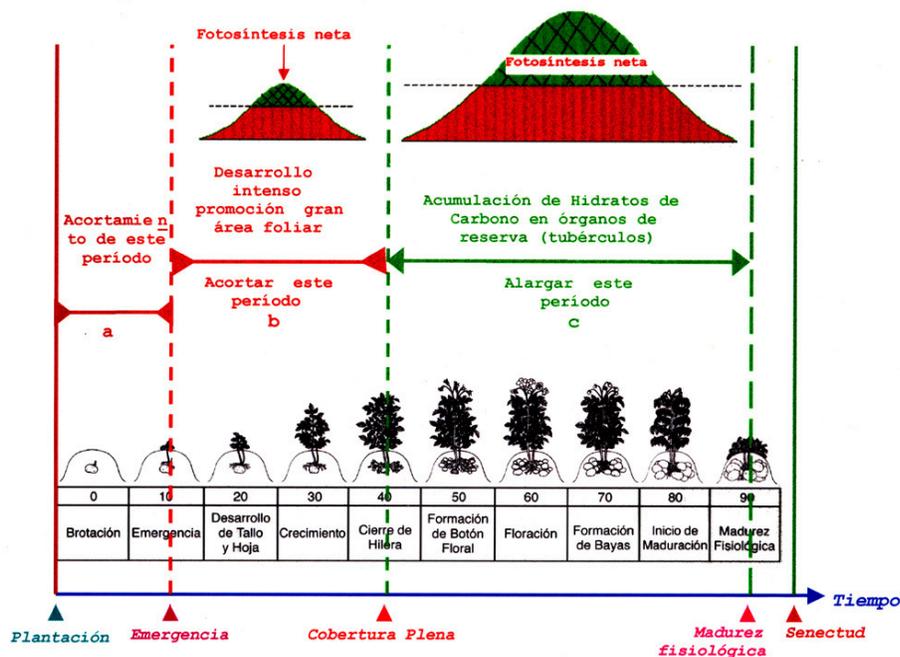
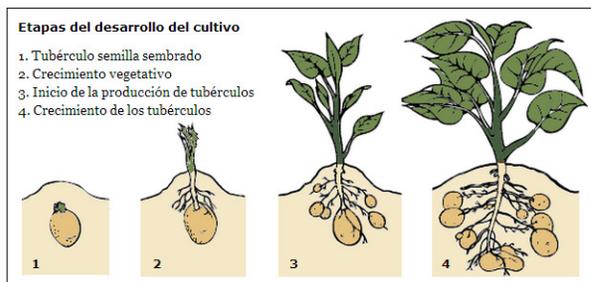


Figura 21. Ciclo vegetativo de la papa. Fuente: Universidad Austral de Chile, Escuela de Agronomía.

En Colombia, el ciclo vegetativo de la papa en el altiplano, en el que tiene lugar el crecimiento y desarrollo de la papa, se puede dividir en cuatro etapas de acuerdo a la correlación entre el crecimiento del follaje y de los tubérculos según Alvarado, 1998:

- PRIMERA ETAPA: Formación de raíces y estolones
- SEGUNDA ETAPA: Tuberización
- TERCERA ETAPA: Engrosamiento y diferenciación
- CUARTA ETAPA: Llenado final de los tubérculos

De las mencionadas etapas, el periodo de tuberización y engrosamiento, es decir cuando se realiza el llenado del tubérculo, representan las fases más críticas, principalmente la etapa tercera, es así que un inadecuado suministro de agua en esta fase no permitiría un desarrollo normal del tubérculo afectando notoriamente el rendimiento (Alvarado, 1998).



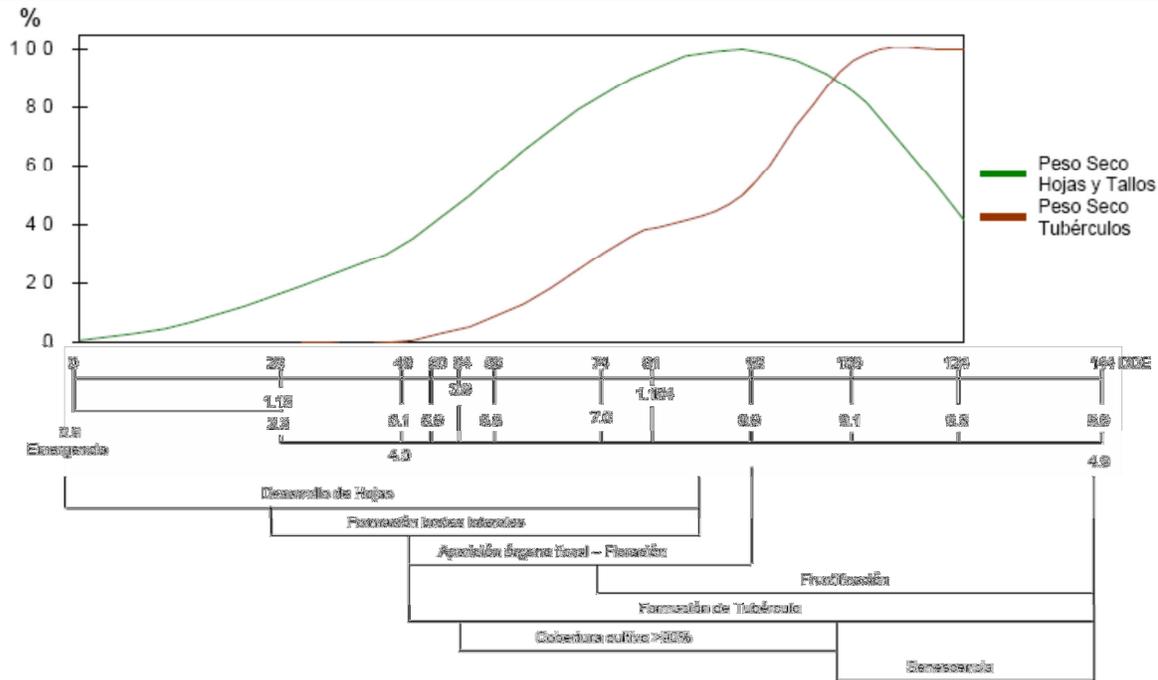


Figura 22. Estados fenológicos de Desarrollo para la variedad parda pastusa. Fuente:Santos & Segura, 2005.

De acuerdo a la escala descriptiva de los estados fenológicos de la Papa *Solanum tuberosum*, BBCH (Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt Chemise, 1993) la papa tiene nueve estados fenológicos como se ve en la figura 23.

BBCH	Estado	Descripción
0 0.0 – 0.9	Brotación – Germinación	Los tubérculos que se encuentran en estado de latencia terminan el proceso de dormancia, las yemas se desarrollan dando lugar a los nuevos brotes, estos rompen la superficie del suelo y emergen, cuando esto ocurre en el 50 % de las plantas se determina emergencia.
1 1.0 – 1.9	Desarrollo de Hojas	Las hojas crecen en la parte del desarrollo del tallo y las axilas. Las hojas comienzan a extenderse hasta alcanzar una longitud superior a 10 cm.
2 2.0 – 2.9	Formación de Brotos Laterales	Formación de brotes laterales inferiores.
3 3.0 – 3.9	Alargamiento Brotos Principales	Proceso de alargamiento del tallo debido a la elongación del tallo y las ramas. Del 10 al 40 % de las plantas se encuentran en floración.
4 4.0 – 4.9	Formación de Tubérculo	Comienza desde el ensanchamiento del estribo hasta alcanzar el máximo de masa total del tubérculo, en el cual se desprenden fácilmente de las estolones y la piel ya no es removible con facilidad.
5 5.0 – 5.9	Alargamiento Tubérculo	Alargamiento del tubérculo y aumento de la masa total del tubérculo.
6 6.0 – 6.9	Desarrollo del Fruto	Desarrollo del fruto y aumento de la masa total del fruto.
7 7.0 – 7.9	Maduración de Fruto	Maduración del fruto y aumento de la masa total del fruto.
8 8.0 – 8.9	Desarrollo de Fruto	Desarrollo del fruto y aumento de la masa total del fruto.

Figura 23. Escala descriptiva de los estados fenológicos de papa según la BBCH

En Colombia las épocas de siembra están determinadas por las condiciones climáticas, así, el cultivo de papa se realiza durante dos semestres continuos y se deja en rotación con pastos de 3 a 4 años. En el primer semestre (meses de enero a marzo) se realiza la siembra de “año grande” (50% del área sembrada). En los meses de junio a agosto, la siembra de Mitaca (30% del área) En el resto del año se realizan siembras escalonadas en microclimas favorables. (Cevipapa, 2004. Citado por AgroCADENAS, 2006).

#### 4.2.4 Variedades de papa

Según Fedepapa en el país existen más de 30 variedades de papa cultivadas, pero tan solo 10 de ellas cuentan con importancia comercial. La variedad denominada Parda Pastusa es la más cultivada y la que en mayor cantidad se consume en estado fresco. Le siguen en importancia la Diacol Capiro (también conocida como R12 negra) utilizada como materia prima por la industria, para la exportación y para el consumo en fresco; la ICA-Puracé, utilizada preferentemente en algunas regiones del país (climas templado y cálido) para consumo en fresco; la Tuquerreña o Sabanera, consumida principalmente en Bogotá y la Criolla (*Solanum phureja*). (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Observatorio AgroCADENAS, 2006).

En Colombia CEVIPAPA y Corpoica lidera proyectos de investigación para el mejoramiento genético de semillas de papa. En la figura 24 se presentan variedades que se destacan por su alto rendimiento.

Variedad	Rango de adaptación (m.s.n.m.)	Rend. (ton/ha)	Período vegetativo (meses)	Características de la semilla	Uso
Parda pastusa	2.000- 3.500	25	5	Tamaño mediano, forma redonda ligeramente aplanada, ojos medianos, piel color rosado y pulpa color crema	Consumo en fresco
Diacol Monserrate	2.000- 3.500	35	4.5	Tamaño grande, forma redonda sin protuberancias, ojos superficiales, piel color crema con tintes rosados, pulpa color crema	Procesamiento
Diacol Capiro	1.800-3.200	30	5	Tamaño grande, forma redondeada ligeramente aplanada, ojos superficiales, piel color rojo - morado, pulpa color crema	Consumo en fresco y procesamiento
ICA Puracé	2.000-3.000	50 experimental	5	Tamaño grande, forma redonda, ligeramente aplanada, ojos superficiales, piel color rojo, pulpa color crema claro	Procesamiento
ICA Nariño	2.000-3.500	30	4.5	Tamaño grande, forma oblonga, ojos medianos, piel color rojo, pulpa color crema	Consumo en fresco y procesamiento
ICA San Jorge	2.500-3.000	30	5	Tamaño mediano, forma ovalada, casi redonda, piel color púrpura con halos color crema, ojos intermedios, pulpa color crema	Consumo en fresco
ICA Morita	2.600- 3.000	35	5.5	Tamaño grande, forma redonda aplanada, piel de textura gruesa y color morado oscuro, ojos superficiales, pulpa color crema	Consumo en fresco
ICA Unica	2.500-3.000	37	5	Tamaño grande y uniforme, forma redonda algo alargada, ojos superficiales, piel color crema con la yema de los ojos morada, pulpa color amarillo claro	Consumo en fresco y procesamiento
ICA Zipa	2.500-3.200	30	5	Tamaño mediano y uniforme, forma redonda y ligeramente aplanada, piel color blanco crema, pulpa color crema y profundidad de ojos media	Ideal para procesamiento

**Figura 24. Variedades mejoradas de papa. Fuente: CEVIPAPA.**

Núñez C.A. de la Universidad Nacional de Colombia en 2011, realizó una revisión y análisis de la evolución del desarrollo de variedades, como producto del mejoramiento genético de papa en Colombia, especialmente las variedades de papa más cultivadas. A continuación se indica la relación de áreas en función de la variedad sembrada en el altiplano cundiboyacense de las variedades con más demanda.

**Tabla 9. Distribución del área sembrada de variedades de papa en Cundinamarca y Boyacá. Fuente: Núñez C.E. 2011. Universidad Nacional de Colombia.**

Departamentos	Área total 2009 (ha)	Pastusa Suprema		Parda Pastusa		Diacol Capiro (R12)		Tuquerreña		ICA Puracé		ICA Única		Criolla		Otras	
		Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Cundinamarca	52,825	27,369	51.8	11,552	21.9	9,509	18	370	0.7	120	0.2	671	1.27	2,641	5	593	1.1
Boyacá	36,820	12,887	35	7,364	20	7,732	21	4,418	12	115	0.3	1,841	5	1,673	4.5	790	2.1

#### 4.2.5 Aspecto Edafológico

La papa en Colombia se cultiva en suelos con características andicas especiales debido a que tienen sus orígenes de materiales volcánicos, los cuales son suelos de medio a alto contenido de materia orgánica, altamente fijadores de fosfatos, densidades aparentes bajas y de texturas francas a arcillosas, con presencia de arcillas amorfas (Alofana e Imogolita) con alta retención de agua y complejos Aluminio-Humus (Abocol, 2004). Los suelos aptos deben ser finos y sueltos sin niveles de compactación que impidan la penetración de las raíces. Los terrones y las piedras



reducen el contacto de las raíces con el suelo causando deformación de los tubérculos en crecimiento. Los suelos fríos por debajo de 15°C retardan la emergencia y los calientes la estimulan (J.E. Austin Associates, Arligton Virginia y CORPOCEA, 2000).

Las regiones paperas de Colombia (Cundinamarca, Boyacá, Nariño, Antioquia, Cauca y Santanderes), ubicadas en climas frío, muy frío y sub-páramo, presentan, en el 68% del área, cobertura de ceniza volcánica en diferente grado de meteorización. En el 32% restante, aparecen superficies sin influencia de ceniza, bien porque no se produjo la depositación o porque se perdió por procesos de erosión (Castro 2005). En términos de química de suelos se han realizado investigaciones con el fin de caracterizar las características de los suelos de las zonas productoras de papa. Un consolidado se presenta en la tabla siguiente.

**Tabla 10. Distribución porcentual de parámetros químicos en suelos paperos de las principales zonas de Colombia**

Departamento	pH			M.O			P			K		
	<5.5	5.6-6.5	>6.5	<5	5-10	>10	<40	40-60	>60	<0.3	0.3-0.6	>0.6
Cundinamarca	77	23	-	42	38	20	66	10	24	38	31	31
Boyacá	76	24	-	64	22	14	49	16	35	82	11	7
Nariño	54	46	-	68	32	-	75	17	8	20	37	43
Antioquia	68	30	2	2	46	52	87	10	3	68	25	7

FUENTE: ICA, 1980; García, 1998; Muñoz, 1998; Muñoz, 1998; Castro, 1999; Niño *et al.*, 2003 citado por Castro (2005)

En el caso de suelos las condiciones óptimas para el desarrollo de este cultivo son, texturas francas, franca-arenosas, bien aireados con buena fertilidad, y ricos en materia orgánica, y con pH entre 5 y 6.2. Por tal razón los costos de fertilización son aproximadamente el 20% de los totales, debido a las correcciones que se deben hacer para que el cultivo se desarrolle de manera óptima.

Según estudios de fertilización de suelos, Bertch (2003) citado por Castro (2005) indica que para producir una tonelada de papa se requieren 6Kg de N, 0.8Kg de de P (1.8Kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y 9Kg de K (10.8Kg de K<sub>2</sub>O). Teniendo en cuenta lo anterior se hablaría entonces que para obtener una producción de 20Ton/ha, se requerirían 120Kg de N, 36Kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 216Kg de K<sub>2</sub>O. En cuanto al Ca, Mg y S, los contenidos estimados para producciones de alto rendimiento (30Ton/ha) están en el orden de 60, 17 y 15 Kg, respectivamente.

#### 4.2.6 Enfermedades de la papa

De otra parte los factores climáticos representados en el aumento o disminución de variables como la precipitación y la humedad relativa, intensifican la proliferación de enfermedades y plagas en el cultivo de la papa. La gota o tizón tardío (Phytophthora Infestans) una de las



enfermedades que más afecta al cultivo, se desarrolla según la precipitación y la humedad relativa predominantes en las diversas fases del ciclo de vida de la papa. Cabe anotar que el inóculo primario y la resistencia de la planta también son factores para la proliferación de plagas y enfermedades (Boshell, 2007). Al entender el cambio en el ciclo de desarrollo de la planta será mucho más eficiente el uso de los recursos, el manejo técnico del cultivo y se tendrá con mayor claridad los parámetros para establecer modelos de simulación y agricultura de precisión (Cabezas, 2005).

Generalmente los problemas que presentan los cultivos de papa son causados por veranos extensos, periodos de lluvia, heladas, la polilla guatemalteca y la gota que son los principales causantes de las pérdidas de cosechas por lo que los campesinos deben invertir demasiado en agroquímicos; de otro lado, la mano de obra incrementa los costos de producción y la carencia de agua de agua es un problema, pues cuando hay sequías no existe un sistema de riego seguro (J.E. Austin Associates, Arlington Virginia y CORPOCEA, 2000)

El ICA en Colombia ha detectado los siguientes problemas fitosanitarios en las regiones donde se cultiva la papa: Babosa (*Deroceras* sp.), Pulguilla (*Epidax* spp.), Polilla guatemalteca (*Tecia solanivora*), Mosca blanca, Gusano blanco *Premnotrypes vorax* (Hustache), Gota o añublo de la papa (*Phytophthora infestans*), Tizón temprano (*Alternaria solani*), Sarna polvorienta o roñosa polvosa (*Spongospora subterranea*), Patanegra de la papa (*Pectobacterium atrosepticum*), Pudrición blanda del tubérculo (*Pectobacterium carotovorum*) (sinónimo: *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*), Costra negra de la papa (*Rhizoctonia solani*), Marchitez bacteriana (*Ralstonia solanacearum*), Peste nieve, Mortaja blanca,, Lanosa, Macana o Lana (*Rosellinia* sp.), Sarna común, manchado o caratoseno (*Streptomyces scabiei*), Nematodo quiste o nematodo dorado de la papa (*Globodera pallida*)<sup>16</sup>.

#### 4.2.7 Prácticas Agrícolas

En Colombia el uso de semilla certificada por el ICA, es el componente básico del manejo integrado de plagas o enfermedades, ya que disminuye riesgos sanitarios y por lo tanto, los costos de protección del cultivo del papa. El ICA también promueve la siembra de tubérculo-semilla de calidad fisiológica, para esto, el estado de maduración de la semilla que permita un desarrollo múltiple de yemas debe ser el más óptimo.

La siembra de semilla con calidad genética, se refiere a la ausencia de mezclas con otras variedades. La pureza varietal garantiza un comportamiento uniforme en rendimientos y comportamiento del campo sembrado.

Calidad sanitaria en el manejo de las semillas de papa: La semilla certificada se somete a inspección sanitaria para no sobrepasar los niveles de tolerancia establecidos para enfermedades. En la semilla se han descartado aquellos tubérculos que presenten daños, síntomas o signos de enfermedades como roña polvosa, sarna común, costra negra, gota, bacteriosis o daños iniciales de larvas de gusano blanco y de polillas de la papa, en particular

<sup>16</sup> Para mayor información sobre problemas fitosanitarios remitirse a la cartilla de Manejo Fitosanitario del cultivo de la papa del ICA.



Tecia solanivora. De otra parte se espera un óptimo tratamiento de la semilla a través de productos biológicos y químicos registrados en el ICA.

En cuenta a las siembras y labores culturales el ICA sugiere una buena preparación del suelo 30 a 45 días antes de la siembra, hacer una adecuada densidad de siembra para evitar mayor número de plantas que favorecen microclima para enfermedades, realizar el aporque (llevar la tierra de la base del surco hasta el cuello de la planta el cual busca, mejorar el drenaje de los surcos o camas, servir como control de malezas, dar mayor anclaje a la planta, cubrir productos aplicados en este momento, como fertilizantes e insecticidas, entre otros.

### **4.3 Cultivo de arroz**

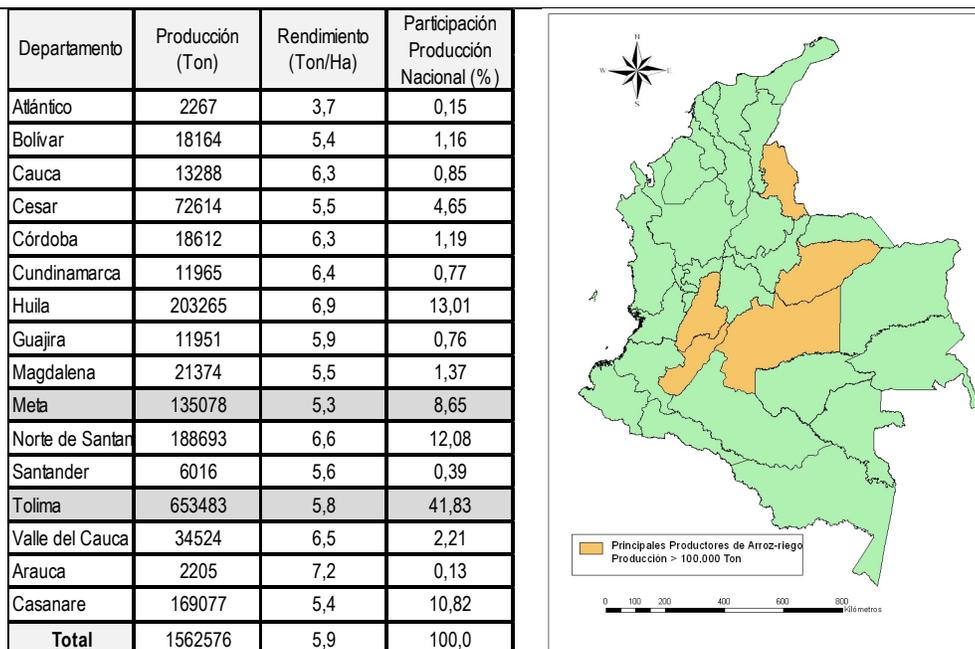
#### **4.3.1 Generalidades del Arroz**

Este cultivo es el alimento básico para más de la mitad de la población del planeta. A nivel mundial, ocupa el segundo lugar después del trigo entre los cereales con respecto a la superficie cosechada. El arroz proporciona más calorías por hectárea que cualquier de los otros cereales cultivados (Barona, 2010).

En terminos de tenencia de la tierra para el cultivo de arroz en Colombia, los resultados del III censo nacional arrocero indican que el 68.2% de las UPA resgistradas en el primer semestre para todo el país son menores de 10 hectáreas, y el 24.7% son UPA con hectáreas comprendidas entre 10 y 50 hectáreas para el mismo periodo de análisis (Fedearroz, 2008).

#### **4.3.2 Distribución geográfica en Colombia de arroz riego**

En cuanto a la producción de arroz riego, se presenta en la figura 25 la participación departamental a nivel nacional de la producción de arroz riego Paddy verde para el año 2010. De esta tabla se observa que los departamentos de mayor producción fueron Tolima, Huila, Norte de Santander, Casanare y Meta.



**Figura 25. Participación departamental del cultivo de arroz riego, Año 2010 Fuente: DANE**

Respecto al arroz mecanizado los principales departamentos productores están en la región centro, Bajo Cauca y Llanos.

**Área de arroz mecanizado según zonas arroceras. II semestre 2000-2012**

Zona arroceras	Área sembrada (ha)												
	2000-II	2001-II	2002-II	2003-II	2004-II	2005-II	2006-II	2007-II	2008-II	2009-II	2010-II	2011-II	2012-II
Total nacional	163.591	161.703	158.378	161.253	165.751	139.550	162.195	160.337	166.246	138.982	155.151	149.175	157.502
Centro	77.277	69.645	68.363	76.215	73.907	71.157	71.386	76.442	76.427	70.771	75.147	71.527	71.560
Santanderes	13.930	12.146	13.559	11.595	11.408	9.794	11.562	10.932	10.456	11.581	13.011	13.689	11.669
Bajo Cauca	23.478	19.424	28.975	26.982	28.904	21.546	31.887	27.113	35.424	27.489	22.032	24.949	27.907
Costa Norte	22.066	22.718	17.325	13.491	13.900	13.563	14.204	12.352	15.642	8.946	12.638	9.107	10.165
Llanos	26.840	37.770	30.156	32.970	37.632	23.490	33.156	33.498	28.297	20.195	32.323	29.902	36.201

Fuente: Convenio -DANE – FEDEARROZ

**Figura 26. Área de arroz mecanizado.**

### 4.3.3 Morfología y Taxonomía

El arroz (*Oryza sativa*) es una monocotiledónea perteneciente a la familia Poaceae(Infoagro).

- ✚ Raíces: las raíces son delgadas, fibrosas y fasciculadas. Posee dos tipos de raíces: seminales, que se originan de la radícula y son de naturaleza temporal y las raíces adventicias secundarias, que tienen una libre ramificación y se forman a partir de los nudos inferiores del tallo joven. Estas últimas sustituyen a las raíces seminales.

- ✚ Tallo: el tallo se forma de nudos y entrenudos alternados, siendo cilíndrico, nudoso, glabro y de 60-120 cm. de longitud.
- ✚ Hojas: las hojas son alternas, envainadoras, con el limbo lineal, agudo, largo y plano. En el punto de reunión de la vaina y el limbo se encuentra una lígula membranosa, bífida y erguida que presenta en el borde inferior una serie de cirros largos y sedosos.
- ✚ Flores: son de color verde blanquecino dispuestas en espiguillas cuyo conjunto constituye una panoja grande, terminal, estrecha y colgante después de la floración.
- ✚ Inflorescencia: es una panícula determinada que se localiza sobre el vástago terminal, siendo una espiguilla la unidad de la panícula, y consiste en dos lemmas estériles, la raquilla y el flósculo.
- ✚ Grano: el grano de arroz es el ovario maduro. El grano descascarado de arroz (cariópside) con el pericarpio pardusco se conoce como arroz café; el grano de arroz sin cáscara con un pericarpio rojo, es el arroz rojo.

#### 4.3.4 Aspectos fenológicos del arroz

El arroz se caracteriza por ser una planta adaptada a condiciones anaeróbicas, por lo cual su principal sistema de siembra es el húmedo, donde el arrozal es inundado y el cultivo crece en agua estancada desde la plantación hasta cerca de la cosecha. También existen variedades adaptadas para crecer bajo el sistema de sequía, también conocido como de secano o de altiplanicie, en el cual el cultivo crece sobre tierra seca al igual que otros cereales (Heinrichs 2001 citado por Labrín S., 2007).<sup>17</sup>

El ciclo de crecimiento y desarrollo del arroz (Figura 3 y Tabla 5) se divide en tres períodos o fases (Vergara, 1979):

- ✚ Período vegetativo: Transcurre desde la germinación de la semilla hasta la aparición del primordio floral en la base de la planta y tiene una duración de unos 45 a 50 días dependiendo de la variedad. Incluye la germinación, el macollaje, el crecimiento de raíces y emergencia de hojas.
- ✚ Período reproductivo: Comienza con la aparición de los primordios florales hasta la apertura de la flor (por lo general ya está polinizada al abrir debido a su sistema de reproducción autógena); es decir, comienza con la diferenciación del primordio de panículas, sigue con el crecimiento de la panoja y la elongación de los tallos o entrenudos hasta la floración.
- ✚ Período de maduración: Comprende el llenado de granos, los fotoasimilados se dirigen hacia la panoja y la planta senesce gradualmente, teniendo especial importancia el

<sup>17</sup> Fenología tomada de Bernal. J. 2012.

aporte en carbohidratos generados por fotosíntesis en las hojas superiores, especialmente la hoja bandera (Fageria, 2007).

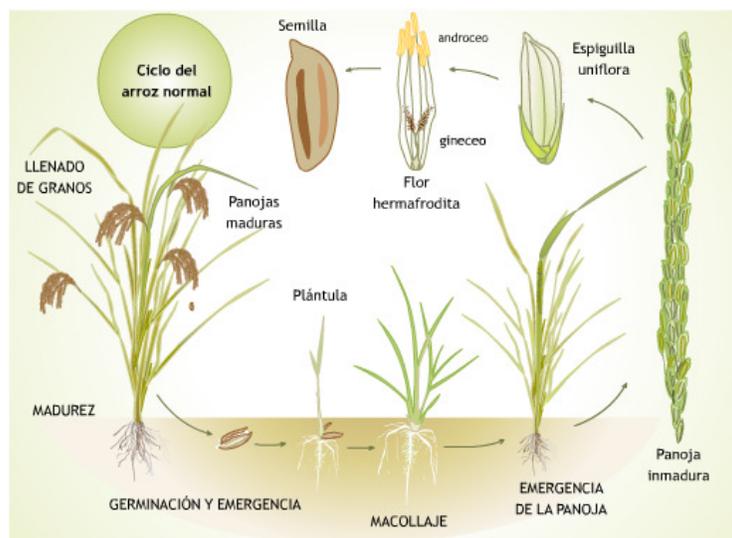


Figura 27. Etapas de crecimiento y fases de desarrollo del cultivo del arroz.

Tabla 11. Fases fisiológicas del arroz.

FASES	DURACION
Vegetativa básica o activa	De 25 a 65 días, para la mayoría de las variedades.
Vegetativa retardada (de la fase vegetativa básica al comienzo de la formación de las panojas).	Varía considerablemente, de acuerdo con la longitud del día, en las variedades estacionales.
Reproductiva (del comienzo de formación de las panojas a la floración).	Unos 35 días, sea cual fuere la variedad.
Maduración (de la floración a la maduración).	De 25 a 35 días, sea cual fuere la variedad.

Fuente: Vergara B., 1979.

Los componentes que determinan el rendimiento son las panojas por unidad de superficie son; el número de espiguillas por panoja, el porcentaje de espiguillas llenas y el peso de los granos. El principal componente que afecta el rendimiento es el número de panojas por superficie, que se establece durante el período vegetativo. En esta etapa el nitrógeno es fundamental para lograr un alto macollaje y acumulación de biomasa. El tamaño de la panoja es determinado durante el período reproductivo y el peso de los granos junto con la esterilidad es definida durante el llenado. Los estreses bióticos y abióticos en los distintos períodos reducen los rendimientos. Sin

embargo el período reproductivo es considerado el más sensible y las limitaciones en esta etapa causan los mayores perjuicios (Fageria, 2007).

El ciclo de crecimiento y desarrollo del arroz (Figura 1.3) se divide en tres períodos y cuatro fases fisiológicas (tabla 1.5) (Vergara B., 1979)<sup>18</sup>:

- Período vegetativo: Transcurre desde la germinación de la semilla hasta la aparición del primordio floral en la base de la planta y tiene una duración de unos 45 a 50 días dependiendo de la variedad. Incluye la germinación, el macollaje, el crecimiento de raíces y emergencia de hojas.
- Período reproductivo: Comienza con la aparición de los primordios florales hasta la apertura de la flor (por lo general ya está polinizada al abrir debido a su sistema de reproducción autógama); es decir, comienza con la diferenciación del primordio de panículas, sigue con el crecimiento de la panoja y la elongación de los tallos o entrenudos hasta la floración.
- Período de maduración: Comprende el llenado de granos, los fotoasimilados se dirigen hacia la panoja y la planta senesce gradualmente, teniendo especial importancia el aporte en carbohidratos generados por fotosíntesis en las hojas superiores, especialmente la hoja bandera (Álvarez 1997; Fageria, 2007).

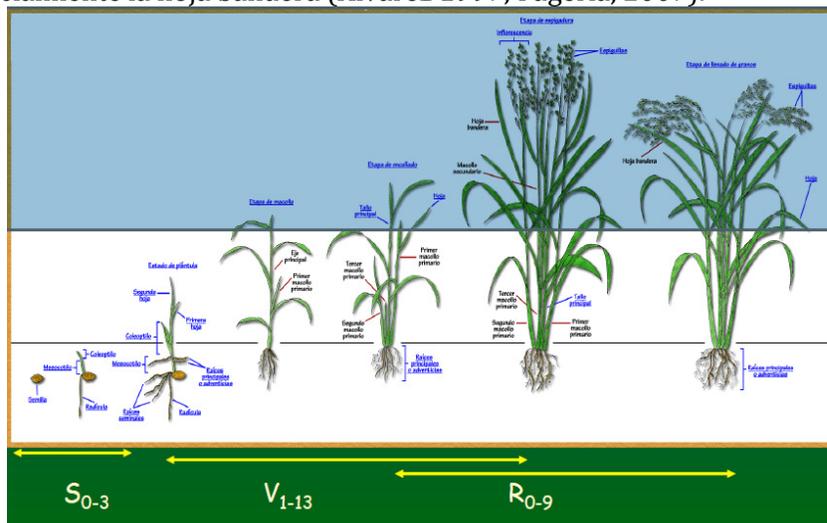


Figura 28. Etapas de crecimiento y fases de desarrollo del cultivo del arroz. Fuente: Chillan. 2007

#### 4.3.5 Aspectos edafológicos del arroz

El cultivo de arroz se realiza mayoritariamente sobre suelos con altos contenidos de arcillas expandibles, plásticos y adhesivos cuando están húmedos y duros cuando están secos.

Ellos son de colores oscuros, con cromas bajos y están sujetos a contracciones y expansiones cuando varía su humedad. Poseen concreciones de carbonato de calcio en el perfil, que en

<sup>18</sup> Fenología tomada de Díaz E., 2012.



algunos casos, llegan a aparecer en superficie. Como es de esperar por la textura fina que poseen estos suelos, el agua circula lentamente en el perfil (Quintero, 2009).

Los Vertisoles son suelos de textura fina, con un contenido de arcilla del 40-50%, sobre todo del tipo de las esmectitas (montmorillonita). Generalmente tienen textura franco-arcillo-limosa en los horizontes superficiales y arcillo-limosa en los subsuperficiales. Las características más importantes de los suelos Vertisoles son su color oscuro uniforme, elevado contenido de arcilla, formación de grietas profundas y anchas en la fase seca y sistemas de espejos de fricción (slickensides) intersectados. Las dos últimas características son resultado de los movimientos de expansión y contracción volumétrica, fenómenos debidos a las particularidades de las esmectitas, que pueden absorber y desorber importantes cantidades de agua entre sus capas cristalinas, según la humedad del medio.

Se han identificado otros tipos de suelos que son apropiados para producir arroz, los cuales poseen características vérticas y corresponden a los órdenes Alfisoles o Molisoles. La característica en común es su alto contenido de arcillas, fundamentalmente de naturaleza esmectítica, lo que les imprime condiciones favorables para evitar la pérdida de agua por drenaje profundo y por consiguiente los hace apropiados para el cultivo de arroz bajo riego.

Respecto a los Molisoles, los más usados en éste cultivo son los Argiacuoles vérticos, que tienen un epipedón mólico, de color oscuro franco-limoso y un horizonte subsuperficial argílico, donde están mayormente expresadas las características vérticas. De textura franco-arcillo-limosa a arcillo-limosa, con drenaje deficiente y abundantes concreciones de hierro-manganeso de hasta 5 mm de diámetro (Quintero C. E., 2009).

#### **4.3.6 Factores ambientales que influyen en el crecimiento del arroz: agua y temperatura**

El agua es indispensable para la planta de arroz. El contenido de agua de la planta varía según la estructura considerada (hoja, tallo) y el estado de desarrollo de la planta. La planta absorbe por las raíces la mayor parte del agua que necesita; emplea menos del 15% del agua absorbida y transpira el resto a través de los estomas de las hojas. El adecuado suministro de agua es uno de los factores más importantes en la producción de arroz. Muchas áreas sufren por exceso de agua o por sequía, ya sea porque las lluvias son irregulares o porque falla el suministro de riego (Degiovanni et al, 2010, citado por Bernal, J.).

Cuando se cultiva arroz en secano y las temperaturas están en el rango de los niveles críticos, la precipitación es el factor limitante del desarrollo. Cuando se cultiva arroz con riego, el crecimiento y el rendimiento de las plantas están determinados, en gran parte, por la temperatura y por la radiación solar (Yoshida, 1981, citado por Bernal, J., 2012). Un importante déficit de agua conduce a enrollado de las hojas, hojas reseca, macollaje limitado, raquitismo, retraso en la floración, esterilidad de espigas y llenado incompleto de los granos.

La planta de arroz es más sensible al déficit de agua desde la etapa de inicio de la panoja hasta el espigamiento. Tres días de sequía al onceavo día y tres días antes del espigamiento reduce

significativamente la producción por causa de un alto porcentaje de esterilidad (Yoshida, 1981). Una vez se produce la esterilidad no hay forma que la planta se compense (Bernal J., 2012).

## 5. 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. En la siguiente figura se presenta el esquema conceptual para la implementación del modelo AquaCrop propuesto por Diaz, Mendez & Bernal, 2012.

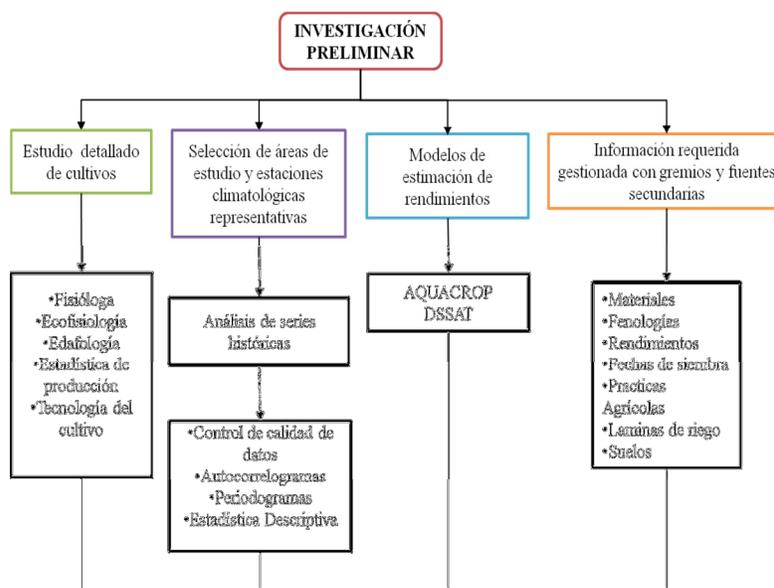


Figura 29. Esquema conceptual para la implementación del modelo AquaCrop.

### 5.1 Zonas, estaciones y materiales seleccionadas

Ya se había mencionado que en consenso se seleccionaron los departamentos de Meta, Tolima, Cundamarca y Boyacá donde los cultivos de Arroz riego, Maíz tecnificado y papa representan un renglón importante en la economía regional. Inicialmente se habían seleccionado 17 estaciones para las zonas mencionadas, las cuales contaba con datos completos en la serie con normal climatológica de 1980 a 2010, sin embargo cuando se seleccionaron los datos de los escenarios de cambio climático, no todas las estaciones contaban con series de precipitación, temperatura máxima y mínima, variables importantes para determinar la Evapotranspiración de Referencia del cultivo y posteriormente para complementar las corridas en AquaCrop. Es por eso que se



escogieron solo seis. En la siguiente tabla se relacionan las estaciones seleccionadas inicialmente y las utilizadas en este trabajo.

**Tabla 12. Estaciones seleccionadas inicialmente**

ESTACIONES CON VARIABLES DE PREC-TEMPMAX- TMIN PARA ARROZ Y MAIZ EN TOLIMA EN ECC								
Código Estación	Latitud	Longitud	Elevación	Categ	Nombre Est	Municipio	Dpto	Cultivo
2118504	4.27761111	-74.7984444	286	CO	Apto Stgo vila	Flandes	Tolima	Maiz/arroz Tolima
2121508	4.23141667	-74.9950833	475	CO	CHICORAL	Espinal	Tolima	Maiz/arroz Tolima
2124501	4.42313889	-75.0074722	750	CO	PERALES HATO	Ibagué	Tolima	Maiz/erroz Tolima
2205503	3.98605556	-74.8988056	300	CO	Sta Helena	Purificación	Tolima	Arroz/Tolima
ESTACIONES CON VARIABLES DE PREC-TEMPMAX- TMIN PARA ARROZ Y MAIZ EN META EN ECC								
3207504	3.51633333	-73.7160278	360	CO	La Holanda	Granada	Meta	Arroz
3502502	4.05736111	-73.4679167	336	CP	La Libertad	Villavicencio	Meta	Arroz
3503502	4.16344444	-73.6205	423	SP	Apto Vanguardia	Villavicencio	Meta	Arroz
ESTACIONES CON VARIABLES DE PREC-TEMPMAX- TMIN PARA PAPA EN CUNDI /BOY EN ECC								
2119507	4.31011111	-74.31175	2256	CO	Pasca	Pasca	Cundinamarca	papa
2120542	4.69141667	-74.209	2543	AM	Tibaitata	Mosquera	Cundinamarca	papa
2120570	4.87986111	-73.8681111	2750	CO	Guasca	Guasca	Cundinamarca	papa
2120572	4.50575	-74.1892778	2900	CO	San Jorge Gja	Soacha	Cundinamarca	papa
2120574	5.11772222	-73.7014167	2709	CO	Silos	Chocontá	Cundinamarca	papa
3507501	5.35380556	-73.45665	2438	AM	Nvo Colon	Nvo Colón	Boyacá	papa
2403512	5.80244444	-73.0744722	2485	AM	Surbata Bonza	Duitama	Boyacá	papa
2403513	5.55355556	-73.3552778	2690	CP	UPTC	Tunja	Boyacá	papa
2403517	5.74591667	-73.1163611	2470	AM	Tunguavita	Paipa	Boyacá	papa
3523501	6.01166667	-72.5292778	3590	CO	El Cardon	Socotá	Boyacá	papa

**Tabla 13. 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 14. 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 siguiente tabla se indica la información que fue usada para la implementación del modelo, asociada a los cuatro grandes componentes de AquaCrop V.3.2.

**Tabla 15. 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

### 4.3.7 Análisis Meteorológico

#### 4.3.7.1 Complementación de series de precipitación

Se procedió a realizar un análisis exploratorio de los datos. En el caso de la precipitación debido a su carácter continuo fue necesario completar los datos en aquellos meses o años que una estación no posee datos con base en estaciones próximas previo una correlación entre las mismas. Para estimar los datos faltantes primero se revisaron y verificaron los datos en cada una de la estaciones calculando la media, la máxima, la mínima, la desviación estándar, la varianza, de esta manera se pueden suprimir datos erróneos. Una vez se hecho esto se procede a realizar la estimación.

Si la precipitación media anual [50% de probabilidad] en la estación x no difiere en más del 10% del promedio de las precipitaciones medias anuales de las estaciones vecinas, el dato faltante en

x se estima como promedio aritmético de los registros de las estaciones A, B y C el día de la falla (Silva, 1998); si la diferencia es mayor al 10%, el dato faltante se estima con la recta de regresión donde a partir de una muestra de n individuos para los que se dispone de los valores de ambas variables,  $\{(X_i, Y_i), i = 1, \dots, n\}$ , se puede visualizar gráficamente la relación existente entre ambas mediante un gráfico de dispersión, en el que los valores de la variable X se disponen en el eje horizontal y los de Y en el vertical. El problema que subyace a la metodología de la regresión lineal simple es el de encontrar una recta que ajuste a la nube de puntos del diagrama así dibujado, y que pueda ser utilizada para predecir los valores de Y a partir de los de X. La ecuación general de la recta de regresión será entonces de la forma:  $Y = a + bX$ .

#### 4.3.7.2 Análisis Climático

Colombia es un país que por su posición geográfica y sus características topográficas, su régimen climático es determinado por patrones de escala global, regional y local los cuales inciden fuertemente en la distribución espacio – temporal de las precipitaciones. Además los factores climáticos que son ciertas condiciones físicas, distintas de los elementos climatológicos, influyen sobre el clima del país; entre éstas cabe mencionar la latitud, altitud, distribución de tierras y mares, continentalidad, distancia al litoral, topografía y corrientes oceánicas entre otras (Mayorga, 2003). Los sistemas atmosféricos más influyentes en los patrones de precipitación en Colombia son los sistemas sinópticos (Baja anclada de Panamá, sistema sinóptico de la Amazonia), Ondas del Este, ondas tropicales y ciclones tropicales los cuales son frecuentes entre mayo y noviembre, la Zona de confluencia intertropical 19, la Onda Intraestacional Madden-Julian (Esta oscilación puede presentar fases subsidentes y convergentes lo que hace que se acentúen o disminuyan las precipitaciones), los Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM)<sup>20</sup> y convección local. Particularmente la variabilidad climática referida como las fluctuaciones observadas en el clima durante períodos de tiempo relativamente cortos, registra valores por encima o por debajo de lo normal, de allí que la normal climatológica sea un referente para análisis de largos periodos climáticos<sup>21</sup>. Según Poveda, 2004, las escalas temporales abarcan desde la escala paleo-climática (millones de años) hasta la escala de la turbulencia atmosférica de la capa límite, pasando por las escalas milenial, secular, decadal, interanual, anual, intranual y diurna. Un caso típico de variabilidad interanual que indica fluctuaciones por encima o debajo de lo normal de una variable año a año es la ocurrencia de los eventos cálidos y fríos del “Niño” y La Niña” respectivamente. De allí la importancia de los análisis de variabilidad climática interanual que permite asociar su comportamiento a determinados patrones hidrológicos en diversos

<sup>19</sup> La migración de la ZCIT ocurre dos veces en el año, de diciembre a febrero desciende hacia Nariño, de marzo a mayo asciende hacia el centro del país, de mayo a junio asciende hacia la región Caribe, de septiembre a octubre desciende nuevamente al centro de Colombia.

<sup>20</sup> Los SCM son grandes sistemas de convección organizada. Comúnmente llevan asociados tiempo severo (lluvias fuertes, granizo, rayos, vientos fuertes, tornados,..), con un tiempo de vida medio entre 6 y 12 horas, mayor que el tiempo de vida medio que el de las células convectivas individuales que los forman, estos se presentan en el Amazonas y sobre la parte oriental del océano Pacífico tropical, entre mayo y junio (León, 2007).

<sup>21</sup> La Normal Climatológica o valor normal, se utiliza para definir y comparar el clima y generalmente representa el valor promedio de una serie continua de mediciones de una variable climatológica durante un período de por lo menos 30 años.



sistemas, especialmente el agrícola. Sin embargo es incierto realizar un análisis de variabilidad proyectado hacia escenarios de cambio climático, dado que puede existir una alta incertidumbre especialmente en el comportamiento de los sistemas sinópticos y de mesoescala.

#### 4.3.8 Parámetros Agroclimáticos

##### 4.3.8.1 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:

$$t = \Sigma(Rx - Tb) \text{ para } Tx > Tb$$

El desarrollo del cultivo se puede especificar en el cultivo de días grado (GDD) o los días del calendario. Los parámetros de desarrollo de cultivos son agrupados en 5 carpetas:

- ✚ La cobertura del dosel inicial (cubierta inicial canopy a 90% de emergencia);
- ✚ Desarrollo de Canopy (ampliación del pabellón y del descenso);
- ✚ La floración y formación de Rendimiento (o formación de raíces / tubérculos);
- ✚ Profundización de raíz;
- ✚ Temperaturas (necesarias para el cálculo de grados día crecimiento).

En AquaCrop se puede indicar cualquiera de las dos opciones así como se indica en la siguiente figura:

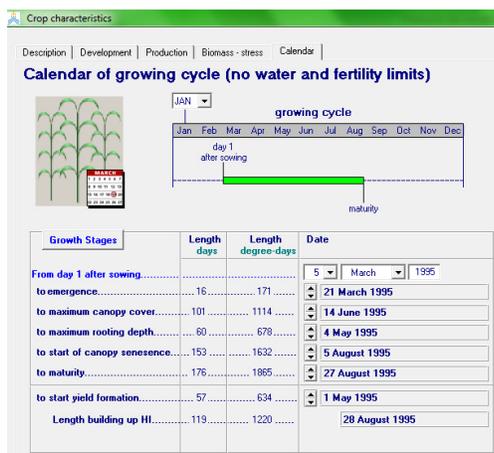


Figura 30. Ejemplo de selección de grados días en AquaCrop.

#### 4.3.9 Evapotranspiración del cultivo de referencia ETo

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, que representa la evapotranspiración de una superficie de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado (Allen, Luis S., Raes, & Smith, 2006). La ecuación de FAO Penman-Monteith es la siguiente:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

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 climática por lo que no es necesario resolución temporal detallada. Se calculó evapotranspiración del cultivo de referencia para las 6 estaciones ya mencionadas. En la figura siguiente se indica la variación de los grados día para el cultivo de papa en Tibaitatá, Mosquera.

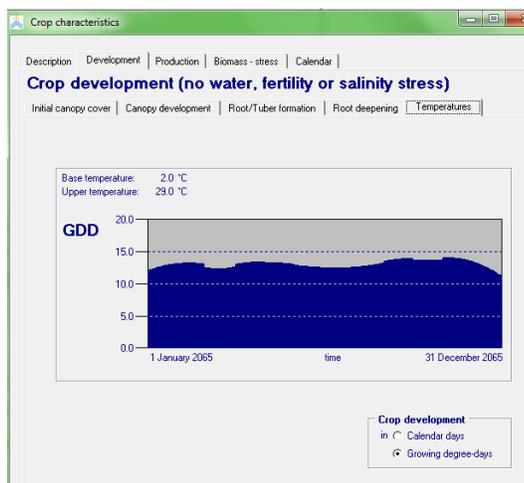


Figura 31. Ejemplo de grados día en AquaCrop

En la siguiente tabla 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 16. 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

#### 4.3.10 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 hídrica, 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 como se ve en la tabla.

**Tabla 17. Información de suelos de Tolima usados en InfoCrop**

	<b>Perfil No P-1 - Código: 73-268-83-001</b>	<b>Perfil No PI-9 - Código: 73-030-93-007-1</b>
Taxonomía 2000	Typic Haplustolls	Typic Dystrropepts
Uni. Cartográfica	Asoc. Fluventic Ustropepts Typic Ustropepts – Typic Haplustolls	Asoc. Entic Haplustolls - Ustic Dystrropepts
Simbolo	PWKa	MWJ d2
Localización	Municipio del Espinal	Municipio de Purificación
Coordenadas	4°05' 33" N / 74°55'25" W	Lat: 4°17' N / Long: 75°13' W
Geomorfología	Paisaje piedemonte, tipo de relieve: abanico terraza	Paisaje, montaña, tipo de relieve, colinas
Relieve	pendiente 0-3%	moderadamente ondulado, pendiente 7-12%
Material parental	Aluviones	Sedimentos heterométricos
Clima edáfico	Isohipertermico, ústico	Isohipertermico, ústico
Grado de erosión	Sin erosión	hídrica, laminar, moderado
Drenajes	Interno rápido, externo medio, natural bien drenado	Interno y externo rápidos, natural bien drenado
Nivel freático	No se encontró	No se encontró
Prof. efectiva	Profunda	Profundo
Horizontes	Mólico, Cámbico	Ócrico, Cámbico

Perfiles de suelos de Tolima. Fuente: IGAC. Anexo C, capítulo 3, Descripción de los perfiles de suelos.

	<b>Perfil No PV-5 Código: 50001710261</b>
Taxonomía 2000	Typic Dystrropepts
Uni. Cartográfica	Asoc. Typic Dystrropepts- Typic Troporthents
Simbolo	MUJef1
Localización	Municipio del Villavicencio
Coordenadas	4°10'9" N / 73°40'45" W
Geomorfología	Montaña
Relieve	Ligeramente escarpado
Material parental	Esquistos
Clima edáfico	Udico e isohipertérmico
Grado de erosión	Laminar, ligera
Drenajes	Externo rápido, interno medio, natural bien drenado
Profundidad efectiva	Profunda
Prof. efectiva	Profunda
Horizontes	Epipedón, ocrico, endopedón: cambico

Perfiles de suelos de Meta. Fuente: IGAC. Anexo Perfiles, Descripción de los perfiles de suelos.

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. Simbolo: RMQa. En la siguiente figura se indica el suelo característico de Tibaitatá.

**Tabla 18. Suelo de Tibaitatá, Mosquera.**

Click button to select indicative values from list		--- soil water content at ---						
horizon	description	thickness m	Pw/P	FC	SAT	TAW mm/m	Ksat mm/day	tau
			vol %					
1	Franco	0.30	25.7	44.1	54.2	184	288.0	0.63
2	Franco arcilloso	0.30	25.7	46.6	59.3	209	318.0	0.65

**Tabla 19. Características se los suelos de Tunja, Boyacá según el IGAC.**

	<b>Perfil No R02</b>
Taxonomía 2000	Andic Dystropepts
Uni. Cartográfica	Asociación
Simbolo	AMVe2
Localización	Municipio de Tunja, Boyacá
Paisaje	altiplanicie
Geomorfología	Montaña
Relieve	Fuertemente ondulado
Material parental	Lutitas e influencia de cenizas volcánicas
Clima edáfico	Isotérmico, Ustico
Grado de erosión	Hídrica, moderada, escurrimiento difuso
Drenajes	externo rápido, interno medio, natural bien drenado
Profundidad efectiva	Profunda

**Figura 32. Perfiles de suelos de Meta. Fuente: IGAC. Anexo Perfiles, Descripción de los perfiles de suelos.**

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.

#### **4.3.11 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.

- Los parámetros de cultivo conservativos no cambian significativamente con el tiempo, prácticas de gestión, o la ubicación geográfica. Estos fueron calibrados con los datos de la cosecha cultivadas en condiciones favorables y no limitativas, y siendo aplicable para condiciones de estrés a través de su modulación por funciones de respuesta al estrés. Como tales, los parámetros conservadores no requieren ajuste a las condiciones locales y pueden ser utilizados como tales en las simulaciones (FAO, 2011).

- Los parámetros específicos de cultivo de cultivares pueden requerir un ajuste cuando se selecciona un cultivar diferente de la considerada para la calibración de los cultivos. Parámetros de cultivo menos conservativos se ven afectados por la gestión de campo, las condiciones en el

perfil del suelo o el clima (especialmente cuando se simula en el modo de día calendario). Estos parámetros pueden requerir un ajuste después de la descarga para dar cuenta de la variedad local o las condiciones ambientales locales. Cuando un cultivo no está disponible en el banco de datos, un archivo de cultivos puede crearse especificando sólo el tipo de cultivos y la duración de su ciclo de crecimiento. Sobre la base de esta información AquaCrop proporciona valores predeterminados o valores de ejemplo para todos los parámetros requeridos (FAO, 2011).

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. En la figura 33 siguiente se indica la relación de días y de Canopy Cover (Cubrimiento del follaje).

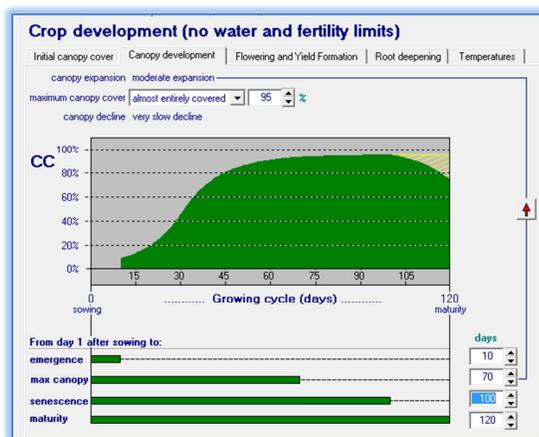


Figura 33. Parámetros No conservativos para desarrollo del canopy cover para arroz en Tolima.

Ficha técnica de la papa Pastusa Suprema: [S. sto 230490 x S. phu (Yema de huevo)] x [adg (Parda Pastusa)], variedad de amplia adaptación (2540 a 3400 m.s.n.m.), con tubérculo de forma redonda aplanada, carne crema, piel de color pardo con ojos semiprofundos, de alta materia seca, buen desarrollo de follaje, erecto y verde claro, floración moderada de color lila claro, maduración semitardía; es resistente al virus PVS y poco sensible al virus PLRV, es altamente resistente a gota (*Phytophthora infestans*) y su rendimiento promedio es de 35 a 40 t/ha y con un contenido de materia seca de 23%. Esta variedad también tiene buena calidad culinaria y aptitud para fritura en hojuelas (Ñústez, 2002).

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 20. Parámetros del cultivo requeridos en AquaCrop**

ENTRADAS A AQUACROP	Maíz PAC 105 Meta y Tolima	Arroz Riego	Papa DIACOL CAPIRO	Papa PASTUSA SUPREMA
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

#### 4.3.12 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.

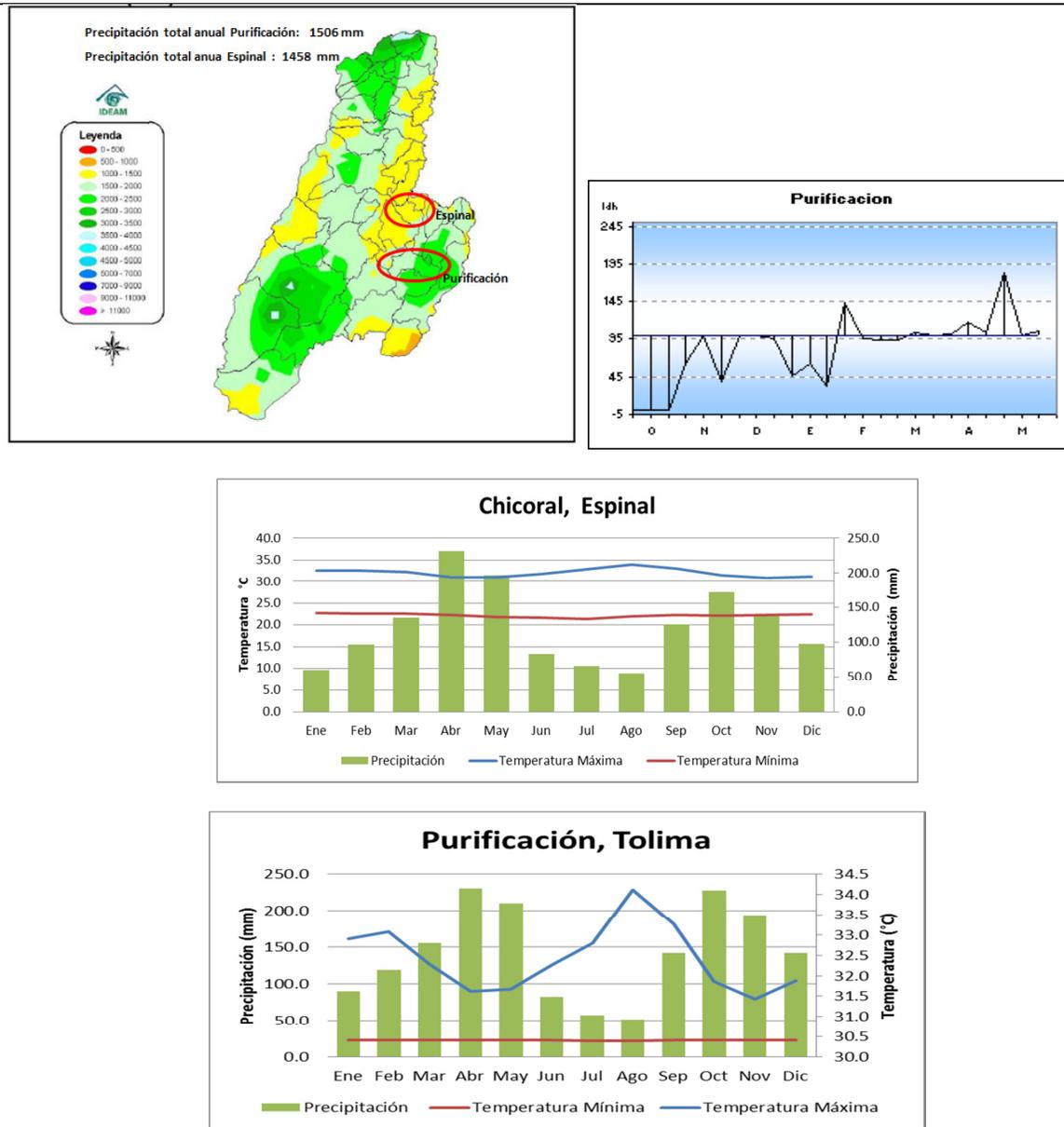


Figura 34. Distribución espacial y temporal de la precipitación en Purificación y Chicoral, Tolima.

#### 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.

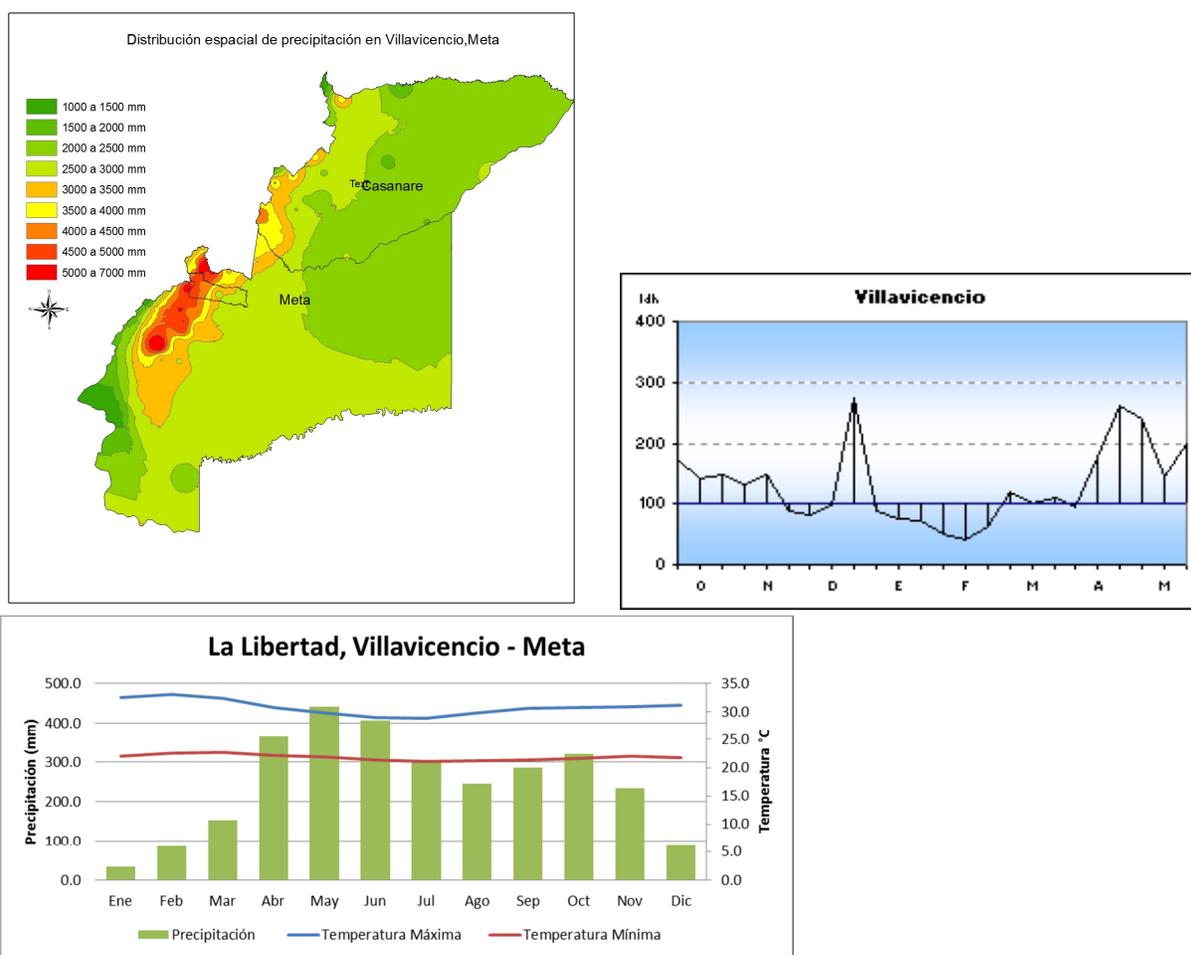


Figura 35. Distribución espacial y temporal de la precipitación en Villavicencio, Meta.

#### 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.

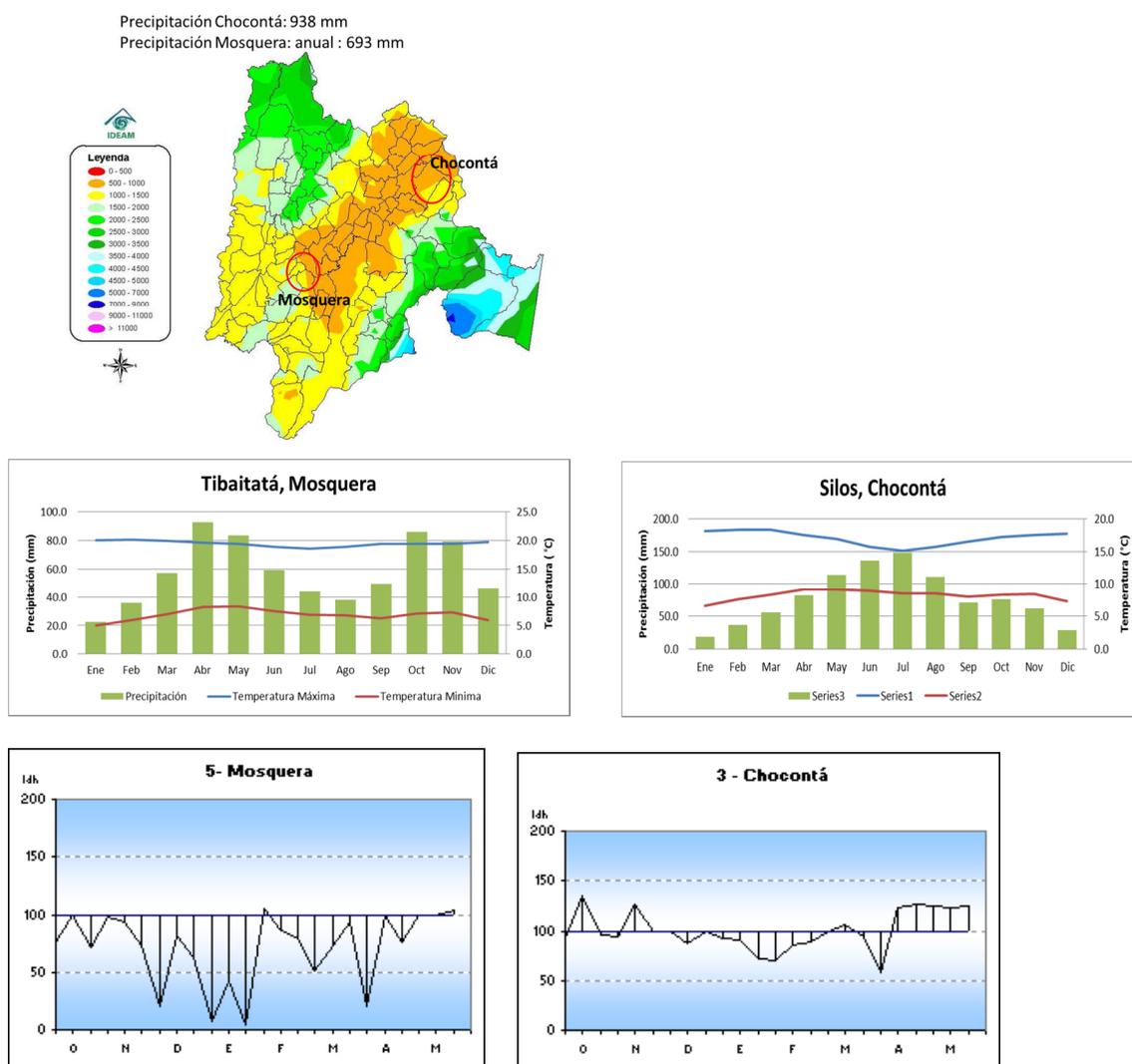


Figura 36. Distribución espacial y temporal de la precipitación en Mosquera y Chocontá, Cundinamarca.

#### 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.

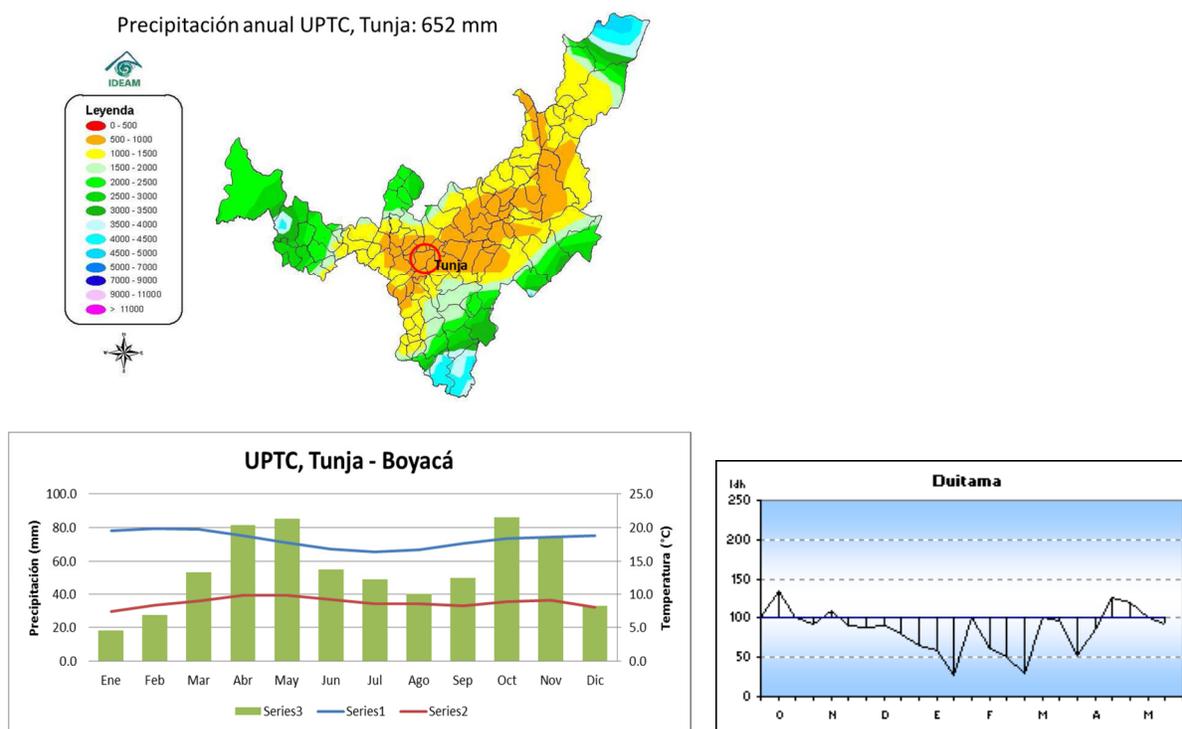


Figura 37. Distribución espacial y temporal de la precipitación en UPTC, Tunja-Boyacá.



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

### 6.1 Escenarios de cambio climático

La comunidad científica a través de observaciones históricas ha evidenciado el cambio climático en el decrecimiento de la cobertura de nieve, el incremento del nivel del mar, las variaciones regionales de los patrones de precipitación y los cambios en extremos de tiempo y clima (Jones et al, 2004). Según el reporte síntesis del IPCC de más de 29.000 series de datos, de 75 estudios, que muestran un cambio significativo en muchos sistemas físicos y biológicos, más del 89 % son consistentes a un cambio esperado como respuesta de un calentamiento (IPCC, 2007).

En IPCC (1992), se utilizó un conjunto de escenarios de emisiones como base para las proyecciones climáticas, conocidos como escenarios IS92. En el Informe Especial del IPCC: Escenarios de Emisiones (Nakicenovic et al., 2000), se publicaron nuevos escenarios de emisiones, los llamados Escenarios del IEEE (IPCC, 2001), más ampliamente identificados como escenarios SRES (Special Report on Emission Scenarios). (Ideam. 2010)

#### 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 adicional políticas climáticas sobre los actuales. Las proyecciones de las emisiones son ampliamente utilizados en las evaluaciones del futuro cambio climático y su supuestos subyacentes con respecto a los cambios socioeconómicos, demográficos y tecnológicos sirven como insumos para muchos climático reciente cambiar la vulnerabilidad y evaluaciones de impacto. (IPCC, 2007)

#### Características de los Escenarios

A1: Un mundo con un crecimiento económico muy rápido; población global que alcanza su punto máximo a mediados de siglo y disminuye a partir de entonces. Se presenta una introducción rápida de tecnologías nuevas y más eficientes.

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)

B1: Un mundo convergente con la misma población global que en A1 pero con cambios rápidos de estructuras económicas hacia un servicio y economía de la información, con reducciones de intensidad material, y la introducción de tecnologías limpias y eficientes de recursos.

B2: Un mundo en el cual el énfasis esta 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).

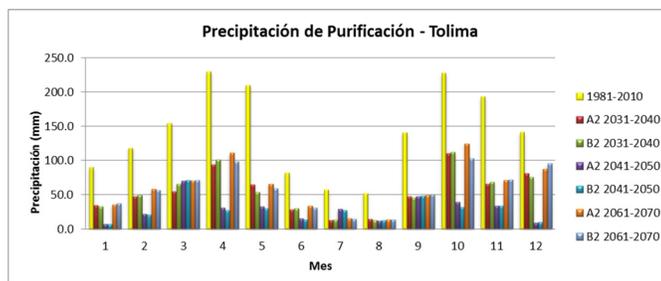
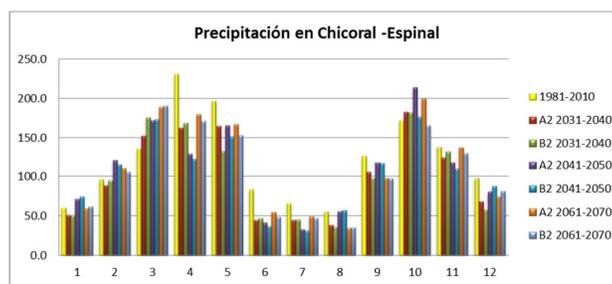
Para la proyección de cambio climático, se tomaron las condiciones iniciales de los Modelos Globales MPIECH5 (ECHAM5) y UKHADCM3, para los escenarios A2 y B2, en el periodo 2011-2100. El clima presente, de referencia, fue a partir de ERA 40 1981-2100. Las proyecciones fueron generadas por el grupo de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

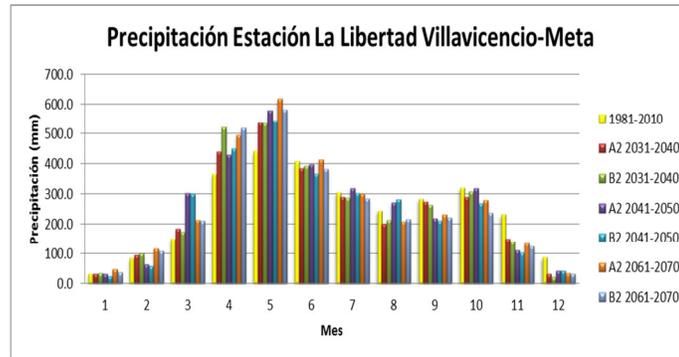
Para este trabajo el modelamiento de rendimientos potenciales fue evaluado para los dos escenarios de Cambio Climático, A2 y B2 para las décadas 2031 -2040, 2041 a 2050 y 2061 a 2070 puntualmente para las 6 estaciones ya mencionadas.

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.

## 6.2 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.

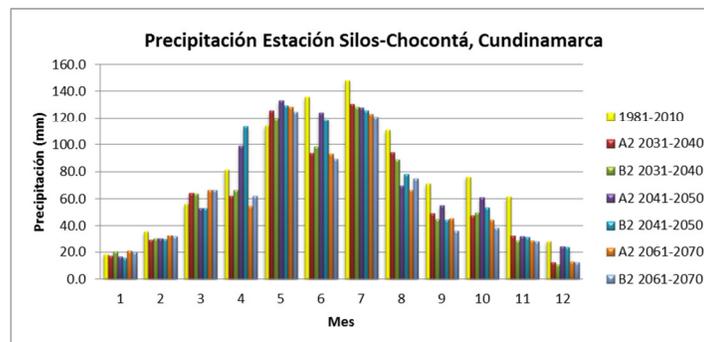
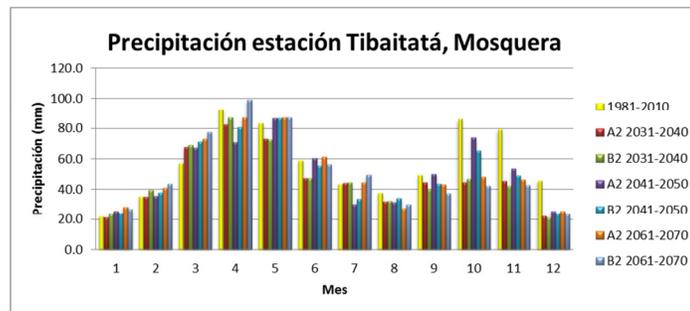




**Figura 38. Precipitación para los escenarios A2 y B2 para décadas 2031-2040, 2041-2050 y 2061-2070 comparado con la media climática 1981-2010 en Meta y Tolima.**

### 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.



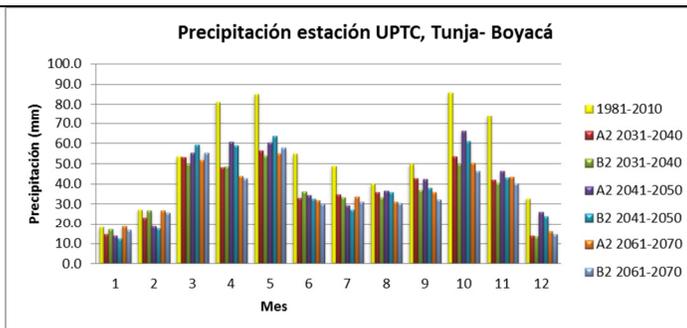


Figura 39. Precipitación para los escenarios A2 y B2 para décadas 2031-2040, 2041-2050 y 2061-2070 comparado con la media climática 1981-2010.

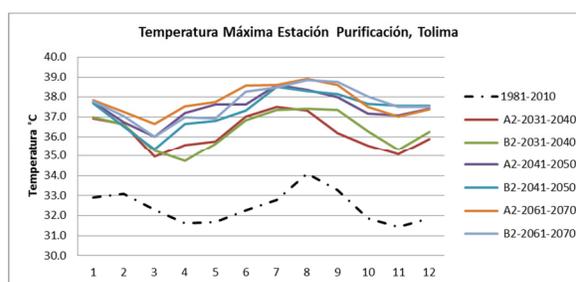
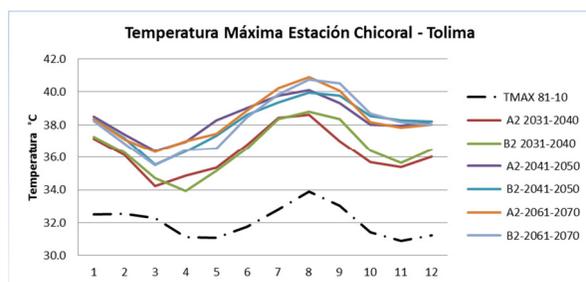
### Cambios de temperatura del aire

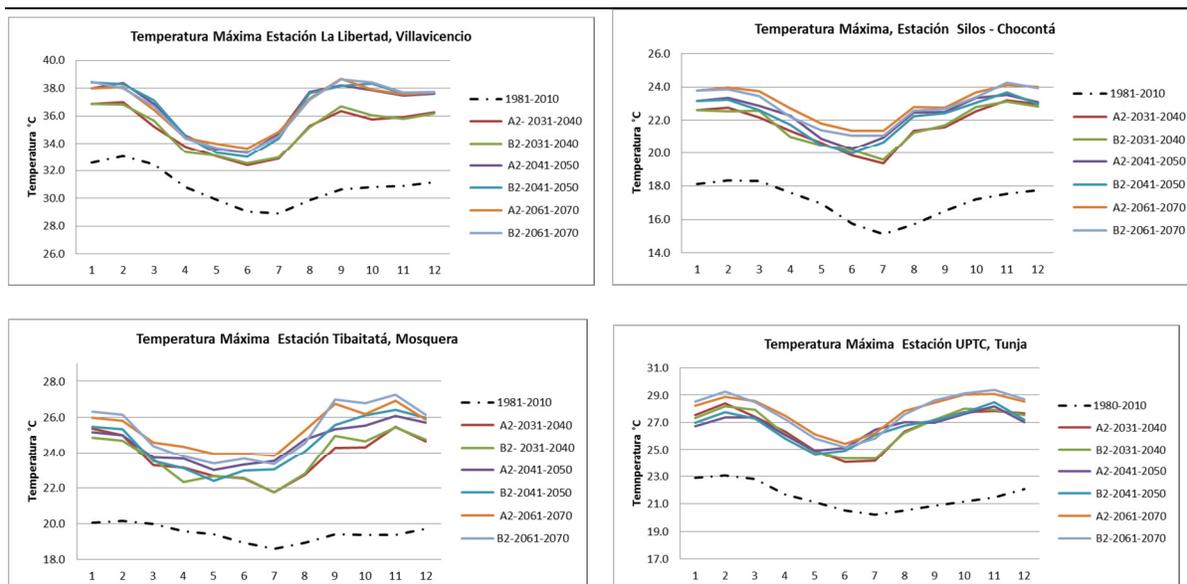
Se tomaron las temperaturas Máximas para los escenarios A2 y B2 para décadas 2031-2040, 2041-2050 y 2061-2070 comparado con la media climática 1981-2010.

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°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 40. 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.

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

#### 6.2.1 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de maíz tecnificado en Tolima

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 como se indica en la tabla siguiente. Como ya se había mencionado 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. Los resultados de dichas simulaciones se indican en la tabla siguiente.



**Tabla 21. Resultado del rendimiento del cultivo de maíz tecnificado en Tolima**

<b>Maíz Tecnificado ( Variedad PAC105) Tolima - Estación Chicoral, Espinal - Tolima</b>										
Escenario	Seme	Siembra	Cosecha	GDD° C	Prec (mm)	Eto (mm)	Irr(mm)	CO2 (ppm)	B (Ton/ha)	Y (Ton/ha)
1981-2010	A	mar-07	jun-15	1396.0	476.9	317.7	0.9	360.6	15.1	6.3
	B	ago-15	nov.25	1380.9	294.3	333.4	54.0	360.6	14.3	6.0
A2 2031-2041	A	mar-07	jun-27	1391.2	348.1	317.6	0.3	470.5	14.2	5.9
	B	ago-15	nov-15	1398.5	219.4	352.3	113.4	470.5	13.5	5.6
B2 2031-2040	A	mar-07	jun-15	1395.5	347.5	355.5	10.3	441.0	13.3	5.6
	B	sep-06	dic-05	1398.7	292.7	370.6	66.2	441.0	13.1	5.5
A2 2041-2050	A	mar-05	jun-12	1399.1	295.3	313.7	24.8	511.0	13.2	5.5
	B	ago-15	nov-15	1401.9	229.4	346.7	106.6	511.0	13.1	5.5
B2 2041-2050	A	mar-06	jun-26	1393.4	294.0	307.8	28.8	465.5	13.2	5.5
	B	ago-15	nov.-15	1400.8	216.6	351.3	113.4	465.5	12.9	5.4
A2 2061-2070	A	mar-05	jun-12	1388.4	363.8	316.2	0.0	607.5	13.7	5.7
	B	ago-15	nov-11	1385.5	189.1	362.5	140.5	607.5	13.5	5.6
B2 2061-2070	A	mar-05	jun-04	1381.5	360.4	312.4	0.0	517.5	13.5	5.6
	B	sep-06	dic-04	1403.0	264.0	359.3	74.8	517.5	13.1	5.5
<b>Maíz (Variedad PAC105 ) Tolima - Estación Sta Helena, Purificación - Tolima</b>										
Escenario	Seme	Siembra	Cosecha	GDD° C	Prec (mm)	Eto (mm)	Irr(mm)	CO2 (ppm)	B (Ton/ha)	Y (Ton/ha)
1981-2010	A	feb-05	may-07	1397.1	379.6	314.5	12.3	360.6	14.4	6.0
	B	ago-05	nov-03	1394.8	283.8	336.7	113.7	360.6	14.1	5.9
A2 2031-2041	A	feb-05	may-07	1392.8	117.2	309.7	202.7	470.5	13.6	5.7
	B	ago-05	nov-13	1401.4	77.8	335.6	227.8	470.5	13.6	5.7
B2 2031-2040	A	feb-05	may-07	1397.4	132.8	307.8	182.1	441.0	13.4	5.6
	B	ago-05	nov-03	1383.6	67.5	335.9	251.8	441.0	12.8	5.3
A2 2041-2050	A	feb-05	may-04	1387.8	95.4	290.3	170.9	511.0	13.1	5.5
	B	ago-05	nov-01	1381.2	58.4	313.5	240.6	511.0	12.9	5.4
B2 2041-2050	A	feb-05	may-05	1390.7	96.8	288.8	186.7	465.5	13.0	5.5
	B	ago-05	nov-01	1399.5	60.3	324.8	246.5	465.5	12.9	5.4
A2 2061-2070	A	feb-05	may-04	1400.8	136.0	301.9	161.3	607.5	13.9	5.8
	B	ago-05	nov-01	1399.3	66.1	333.4	238.5	607.5	13.6	5.7
B2 2061-2070	A	feb-05	may-05	1402.5	137.3	303.7	164.5	517.5	13.4	5.6
	B	ago-05	nov-01	1392.5	66.1	336.5	239.3	517.5	12.8	5.3

**6.3.1.1 Condiciones del rendimiento del maíz tecnificado en Espinal y Purificación bajo escenario A2**

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. Para este caso se observa 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).



### 6.3.1.2 Condiciones del rendimiento del maíz tecnificado en Espinal y Purificación bajo escenario B2

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 según los resultados.

En la tabla anterior se indica que los valores de las láminas de riego requeridas por el cultivo 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.

## 6.4 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de maíz tecnificado en Meta ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop

Las simulaciones realizadas en AquaCrop para el maíz en la estación La Libertad en Villavicencio se realizaron para un ciclo vegetativo de 115 días es decir tres meses y medio aproximadamente, para los semestres A y B como se indica en la tabla siguiente. Al igual que para la zona del Tolima, 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. Los resultados de dichas simulaciones se indican en la tabla siguiente.

**Tabla 22. Resultado del rendimiento del cultivo de maíz tecnificado en Meta**

Maíz Tecnificado (Variedad PAC 105) - Estación La Libertad, Villavicencio - Meta										
Escenario	Seme	Siembra	Cosecha	GDD° C	Prec (mm)	Eto (mm)	Irr(mm)	CO2 (ppm)	B (Ton/ha)	Y (Ton/ha)
1981-2010	A	mar-22	jun-24	1693.4	1198.5	368.6	0	360.62	21.21	8.4
	B	ago-23	nov-25	1693.1	872	387.1	0	360.62	21.21	8.4
A2 2031-2041	A	mar-22	jun-24	1667.7	1367.6	471.2	0	465	21.13	8.8
	B	ago-23	nov-25	1698.5	754.4	537.8	12	465	22.18	8.8
B2 2031-2040	A	mar-22	jun-24	1670.5	1458	471.6	0	439.57	19.28	7.7
	B	ago-23	nov-25	1699.8	754.5	541.7	16.6	439.57	22.02	8.8
A2 2041-2050	A	mar-22	jun-24	1634.3	1445.2	504.5	0	511	22	8.8
	B	ago-23	nov-25	1700.3	711.1	590.3	103.8	511	22.3	5.8
B2 2041-2050	A	mar-22	jun-24	1629.2	1407.9	505.4	0	465.5	22.1	8.8
	B	ago-23	nov-25	1699.7	647.5	593.3	118.5	465.5	22.1	2.99
A2 2061-2070	A	mar-22	jun-24	1706.5	1542.9	482.9	0	607.5	19.9	7.99
	B	ago-23	nov-25	1754.1	687.5	576.8	54.9	607.5	22.6	5.96
B2 2061-2070	A	mar-22	jun-24	1701.5	1506.1	483.8	0	517.5	18.4	7.3
	B	ago-23	nov-25	1753.6	627.3	583.1	75.5	517.5	22.3	3.07



#### **6.4.1.1 Condiciones del rendimiento del maíz tecnificado en Villavicencio bajo escenario A2**

Aunque los resultados muestran poca variación en los rendimientos en Villavicencio 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 CO2 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 CO2 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.

#### **6.4.1.2 Condiciones del rendimiento del maíz tecnificado en Villavicencio bajo escenario B2**

Para el caso de la proyección del rendimiento de maíz en Meta se observa mayor incremento de CO2 para el escenario A2 respecto al B2, y aunque se esperan 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.

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

Se tomó 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 CO2, A2 y B2 del IPCC, correspondientes al año promedio, es decir, la concentración de CO2 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 120 días es decir tres meses y medio aproximadamente, para los semestres agrícolas A y B como se indica en la tabla siguiente. Como ya se había mencionado 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. Los resultados de dichas simulaciones se indican en la tabla siguiente.

#### **6.5.1.1 Condiciones del rendimiento del arroz riego en Espinal y Purificación bajo escenario A2**

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 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%, 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.

#### **6.5.1.2 Condiciones del rendimiento del arroz riego en Espinal y Purificación bajo escenario B2**

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

Para el escenario B2 en las décadas 2041-2050 y 2061-2070 especialmente para el primer semestre agrícola se presentan mayor rendimiento respecto al segundo semestre. Se resalta el aumento de los grados días acumulados en la estación Santa Helena en Purificación asociada a aumento de temperatura y altas tasas de evapotranspiración de referencia. En resumen se esperan disminución del 60 al 90% de disminución del cultivo 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.

**Tabla 23. Resultado del rendimiento del cultivo de arroz riego en Tolima**

<b>Arroz riego (Variedad Fedearroz 174) Tolima - Estación Chicoral, Espinal - Tolima</b>										
Escenario	Sem	Siembra	Cosecha	GDD °C	Prec (mm)	Eto (mm)	Irr(mm)	CO2 (ppm)	B (Ton/ha)	Y (Ton/ha)
1981-2010	A	mar-05	jul-03	2162.6	636.2	515.5	54.8	360.6	17.5	7.9
	B	ago-05	dic-03	2153.3	489.3	533.1	129.9	360.6	17.0	7.6
A2 2031-2041	A	ene-03	abr-24	2151.6	413.1	551.5	195.8	470.5	19.4	8.8
	B	ago-05	dic-03	2156.6	331.7	645.0	402.1	470.5	19.9	2.1
B2 2031-2040	A	ene-13	abr-24	2151.6	449.3	611.7	217.7	441.0	18.8	1.9
	B	ago-05	nov-26	2169.3	428.7	696.4	344.9	441.0	19.3	0.1
A2 2041-2050	A	ene-03	abr-20	2168.4	440.4	551.2	155.7	511.0	19.6	2.0
	B	ago-05	nov-21	2167.6	467.0	625.1	244.5	511.0	19.6	0.1
B2 2041-2050	A	ene-05	abr-22	2155.3	438.6	540.4	148.7	465.5	18.8	5.1
	B	ago-05	nov-21	2167.0	422.8	633.6	280.8	465.5	18.7	0.0
A2 2061-2070	A	ene-03	abr-21	2164.4	476.8	564.8	161.2	607.5	21.4	2.3
	B	sep-03	dic-21	2156.5	488.3	619.1	181.8	607.5	21.4	0.1
B2 2061-2070	A	ene-03	abr-21	2154.1	469.8	551.1	160.1	517.5	19.9	5.3
	B	ago-15	dic-02	2156.2	416.0	654.6	324.0	517.5	20.0	0.0
<b>Arroz riego (Variedad Fedearroz F174) Tolima - Estación Sta Helena, Purificación - Tolima</b>										
Escenario	Sem	Siembra	Cosecha	GDD °C	Prec (mm)	Eto (mm)	Irr(mm)	CO2 (ppm)	B (Ton/ha)	Y (Ton/ha)
1981-2010	A	mar-05	jul-04	2236.5	668.1	521.4	54.6	360.6	17.8	8.0
	B	ago-05	dic-04	2226.3	632.7	548.2	126.7	360.6	17.7	8.0
A2 2031-2041	A	ene-05	may-06	2388.5	240.5	616.1	430.4	470.5	21.4	5.7
	B	ago-05	dic-04	2353.6	246.1	624.6	426.7	470.5	21.5	7.6
B2 2031-2040	A	ene-05	may-06	2392.4	257.3	603.7	409.8	441.0	20.6	8.7
	B	ago-05	dic-04	2364.2	247.9	643.1	459.4	441.0	20.7	6.1
A2 2041-2050	A	ene-05	may-06	2481.7	136.9	614.8	504.0	511.0	22.3	0.9
	B	ago-05	dic-04	2462.9	133.5	644.3	545.4	511.0	22.4	0.7
B2 2041-2050	A	ene-05	may-06	2467.8	133.3	604.7	501.7	465.5	21.3	1.9
	B	ago-05	dic-04	2469.1	127.4	659.6	572.1	465.5	21.4	0.2
A2 2061-2070	A	ene-05	may-06	2469.9	286.2	633.0	386.6	607.5	24.0	0.5
	B	ago-05	dic-04	2446.2	271.5	656.6	664.8	607.5	24.2	0.9
B2 2061-2070	A	ene-05	may-06	2454.9	272.5	625.8	404.5	517.5	22.4	1.1
	B	ago-05	dic-04	2442.4	251.2	674.1	481.0	517.5	22.5	0.2

## 6.6 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de Arroz riego en Meta ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop

Se tomó 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 CO2, A2 y B2 del IPCC, correspondientes al año promedio, es decir, la concentración de CO2 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 120 días es decir 4 meses aproximadamente, para los semestres agrícolas A y B como se indica en la tabla siguiente. Como ya se había mencionado se usó la variedad F174 de Fedearroz, al igual que en Tolima, y se seleccionó para el requerimiento de agua: Requerimiento neto con 50% RAW y no fueron considerados efectos por condiciones de estrés por fertilidad para la producción de biomasa. Los resultados de dichas simulaciones se indican en la tabla siguiente.

**Tabla 24. Resultado del rendimiento del cultivo de arroz riego en Meta**

Arroz Riego (Variedad Fedearroz 174) - Estación La Libertad, Villavicencio - Meta										
Escenario	Sem	Siembra	Cosecha	GDD° C	Prec (mm)	Eto (mm)	Irr(mm)	CO2 (ppm)	B (Ton/ha)	Y (Ton/ha)
1981-2010	A	mar-15	jul-15	2178.5	1472.4	473.9	369.0	360.6	17.9	8.0
	B	ago-15	dic-15	2193.2	1021.6	498.3	369.0	360.6	17.7	7.9
A2 2031-2041	A	mar-15	jul-17	2185.4	1655.0	619.4	375.0	465.0	21.9	9.8
	B	ago-15	dic-14	2183.0	848.1	684.2	366.0	465.0	21.3	3.8
B2 2031-2040	A	mar-15	jul-17	2189.3	1742.8	621.3	375.0	439.6	21.1	9.5
	B	ago-15	dic-14	2184.9	843.4	685.7	366.0	439.6	20.5	4.2
A2 2041-2050	A	mar-15	jul-14	2188.2	1798.9	675.2	381.0	511.0	23.3	10.4
	B	ago-15	dic-14	2190.4	817.2	747.7	366.0	511.0	22.2	0.3
B2 2041-2050	A	mar-15	jul-19	2180.2	1742.6	676.9	381.0	465.5	22.3	10.0
	B	ago-15	dic-14	2188.4	755.2	751.5	366.0	465.5	21.2	0.2
A2 2061-2070	A	mar-15	jul-14	2190.0	1817.0	622.3	366.0	607.5	24.3	10.9
	B	ago-15	dic-10	2180.1	775.9	708.9	354.0	607.5	23.1	0.2
B2 2061-2070	A	mar-15	jul-14	2181.8	1764.7	624.1	366.0	517.5	22.7	10.2
	B	ago-15	dic-10	2178.4	714.6	714.7	354.0	517.5	21.6	0.2

#### 6.6.1.1 Condiciones del rendimiento del arroz riego en Villavicencio bajo escenario A2

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 un 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 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 arroja como resultado una crítica disminución en el rendimiento del grano del 97 %; y la biomasa seca total tendría un aumento del 20 %. 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.

#### **6.6.1.2 Condiciones del rendimiento del arroz riego en Villavicencio bajo escenario B2**

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.

### **6.7 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de papa en 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 como se indica en la tabla siguiente. Se usó la variedad Pastusa Suprema y se seleccionó para el requerimiento de agua: Requerimiento neto con 50% RAW y no fueron considerados efectos por condiciones de estrés por fertilidad para la producción de biomasa. Los resultados de dichas simulaciones se indican en la tabla siguiente.

**Tabla 25. Resultado del rendimiento del cultivo de papa Pastusa Suprema en Cundinamarca**

<b>Papa (Variedad Diacol Capiro) - Estación Tibaitatá, Mosquera, Cundinamarca</b>										
Escenario	Semé	Siembra	Cosecha	GDD° C	Prec (mm)	Eto (mm)	Irr(mm)	CO2 (ppm)	B (Ton/ha)	Y (Ton/ha)
1981-2010	A	feb-20	jul-21	1732.7	338.0	545.1	148.3	360.6	14.8	12.3
	B	jul-26	dic-03	1737.0	305.0	577.1	205.3	360.6	15.3	12.7
A2 2031-2041	A	feb-20	jul-17	1740.0	310.8	882.2	282.9	470.5	17.5	14.5
	B	jul-12	dic-06	1732.0	198.7	724.7	428.6	470.5	17.2	14.3
B2 2031-2040	A	feb-20	may-27	1728.0	289.0	456.0	113.6	441.0	11.2	9.5
	B	jul-20	oct-30	1728.0	157.5	479.3	271.9	441.0	11.3	9.5
A2 2041-2050	A	feb-19	jul-11	1740.0	320.0	674.2	420.3	511.0	17.4	14.9
	B	jul-30	nov-17	1734.1	239.0	706.5	455.4	511.0	16.3	13.6
B2 2041-2050	A	feb-20	jul-15	1733.5	328.0	679.6	265.4	465.5	16.7	14.1
	B	jul-30	dic-16	1734.2	208.9	733.5	0.0	465.5	0.0	0.0
A2 2061-2070	A	feb-20	jul-04	1732.6	330.9	650.0	218.4	582.0	16.9	14.0
	B	jul-01	nov-09	1737.7	177.0	679.4	390.6	582.0	16.2	13.4
B2 2061-2070	A	feb-15	jun-29	1736.2	342.7	644.4	207.0	517.5	16.0	13.3
	B	jul-16	nov-22	1744.5	166.4	688.2	406.5	517.5	14.8	12.5
<b>Papa (Variedad Diacol Capiro) - Estación Silos- Chocontá - Cundinamarca</b>										
Escenario	Semé	Siembra	Cosecha	GDD° C	Prec (mm)	Eto (mm)	Irr(mm)	CO2 (ppm)	B (Ton/ha)	Y (Ton/ha)
1981-2010	A	mar-05	ago-11	1872.1	628.1	502.4	15.5	360.6	19.2	13.5
	B	jul-04	dic-31	1871.7	480.0	523.0	95.8	360.6	18.6	13.4
A2 2031-2041	A	mar-05	ago-09	1871.0	497.0	623.8	97.2	470.5	20.7	14.9
	B	jul-25	dic-31	1865.8	263.2	701.3	376.8	470.5	20.3	14.6
B2 2031-2040	A	mar-05	ago-07	1865.0	490.0	611.9	88.4	441.0	19.6	13.8
	B	jul-25	dic-31	1869.6	249.0	698.8	388.8	441.0	19.5	14.0
A2 2041-2050	A	mar-05	ago-03	1876.5	536.6	626.6	55.8	511.0	20.4	15.0
	B	jul-25	dic-22	1868.8	260.8	670.5	339.9	511.0	19.6	14.3
B2 2041-2050	A	mar-05	ago-06	1865.6	550.0	627.6	40.5	465.5	20.2	14.5
	B	jul-25	dic-25	1872.4	251.8	688.7	371.4	465.5	19.0	13.4
A2 2061-2070	A	mar-05	jul-23	1870.9	425.2	581.3	107.0	607.5	20.4	14.9
	B	jul-25	dic-16	1868.8	217.4	650.6	357.2	607.5	20.6	15.1
B2 2061-2070	A	mar-04	jul-26	1869.2	434.2	584.4	106.8	517.5	19.6	13.7
	B	jul-25	dic-18	1867.4	211.9	660.5	382.8	517.5	19.5	13.6

**6.7.1.1 Condiciones del rendimiento del papa riego en Mosquera y Chocontá bajo escenarios A2 y B2**

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

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.

## 6.8 Posible respuesta del rendimiento del cultivo de papa en Boyacá ante escenarios de cambio climático según el modelo AquaCrop

### 6.8.1.1 Condiciones del rendimiento del papa riego en Tunja bajo escenarios A2 y B2

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 como se indica en la tabla siguiente. Se usó la variedad Pastusa Suprema y se seleccionó para el requerimiento de agua: Requerimiento neto con 50% RAW y no fueron considerados efectos por condiciones de estrés por fertilidad para la producción de biomasa. Los resultados de dichas simulaciones se indican en la tabla siguiente.

**Tabla 26. Resultado del rendimiento del cultivo de papa Pastusa Suprema en Boyacá**

<b>Papa (Variedad Pastusa Suprema) - Estación UPTC, Tunja, Boyacá</b>										
Escenario	Sem	Siembra	Cosecha	GDD° C	Prec (mm)	Eto (mm)	Irr(mm)	CO2 (ppm)	B (Ton/ha)	Y (Ton/ha)
1981-2010	A	mar-05	ago-11	1828.8	331.6	491.6	125.3	360.6	14.2	10.1
	B	ago-05	dic-31	1682.0	277.5	472.0	171.6	360.6	13.4	9.4
A2 2031-2041	A	mar-05	ago-11	2055.6	230.6	654.6	361.4	470.5	17.2	12.2
	B	ago-05	dic-31	1942.8	183.3	674.7	435.5	470.5	16.2	11.2
B2 2031-2040	A	mar-05	ago-11	2065.7	226.4	653.8	363.6	441.0	16.5	11.8
	B	ago-05	dic-31	1936.4	169.4	674.6	449.2	441.0	15.6	10.8
A2 2041-2050	A	mar-05	ago-05	2144.8	245.4	654.1	346.3	511.0	17.8	12.8
	B	ago-05	dic-31	2004.3	213.0	676.7	401.4	511.0	16.8	11.7
B2 2041-2050	A	mar-05	ago-11	2098.0	246.2	647.0	346.5	465.5	17.0	12.2
	B	ago-01	dic-31	2034.4	202.1	697.7	433.8	465.5	16.6	11.6
A2 2061-2070	A	mar-05	ago-11	2275.3	219.8	683.7	382.5	607.5	19.2	13.7
	B	ago-01	dic-31	2173.7	176.4	709.8	176.4	607.5	18.7	13.1
B2 2061-2070	A	mar-05	ago-11	2231.6	220.2	677.4	386.6	517.5	17.9	12.8
	B	ago-01	dic-31	2153.5	164.0	722.0	483.0	517.5	17.4	12.1



---

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.

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.

## 7. CONCLUSIONES

7.1 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)

7.2 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.

- 7.3 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.
- 7.4 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.
- 7.5 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.
- 7.6 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.
- 7.7 De otra parte los datos de producción de los cultivos es deficiente y no está actualizada. 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.

- 7.8 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 en la mitigación de plagas enfermedades y adecuadas prácticas del suelo.
- 7.9 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.
- 7.10 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.

## 8. RECOMENDACIONES

- 8.1 Es necesario que los gremios agrícolas sigan validando y calibrando el modelo AquaCrop para otros cultivos en Colombia 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.
- 8.2 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.
- 8.3 Implementar la reutilización de agua para riego en pequeñas parcelas como herramienta de mitigación para economías campesinas.
- 8.4 Generar planes de acción de mitigación en conjunto con la comunidad.
- 8.5 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.
- 8.6 Definir umbrales de la velocidad y dirección del viento para los cultivos vulnerables a esta variable.



8.7 Se hace hincapié en la necesidad de transferencia de conocimiento climático a los pequeños productores a través replicadores técnicos en cada municipio.

8.8 Establecer planes de mitigación de impacto en conjunto con los municipios.

## 9. BIBLIOGRAFIA

Corrales y Acevedo et al. 2004. MADR, Federación nacional de cafeteros de Colombia, Fondo de fomento cerealista· FENALCE. Bogotá, Colombia.

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.

DNP, 2010. Análisis de los Impactos Económicos del Cambio Climático para Colombia utilizando un Modelo de Equilibrio General Computable Subdirección de Desarrollo Ambiental Sostenible – DNP. Bogotá, Colombia

DNP y CIAT 2012. Midiendo el impacto del cambio climático en Colombia. Ganadería, Recurso Hídrico y Biodiversidad.

FAO, 1997. La agricultura y los cambios climáticos la función de la FAO

FAO , 2011. Cropwater productivity model to simulate yield response to water. Reference Manual, Chapter 1 – AquaCrop, Version 3.1plus January 2011

FAO, 2012. Agronoticias Americalatina y el Caribe.

FENALCE, 2010. El cultivo del maíz, historia e importancia. Importancia de los cultivos representados por Fenalce. El cerealista, edición mayo-junio de 2010. Bogotá.

FEDEPAPA, 2012. Indicadores de área sembrada y rendimiento por departamentos en el 2012. En Revista Papa. FEDEPAPA, 2012.

Fedearroz. (2012). Federación Nacional de Arroceros de Colombia.

Fedearroz (2010). Boletín informativo de la federación internacional de arroceros NO. 234. Junio de 2010.



Fageria, N. (2007). Yield Physiology of Rice. *Journal of plant nutrition*, 1-37.

Fernández M. 2009. Efecto del fenómeno El Niño en el agrosistema de papa y sus impactos socioeconómicos en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá para el periodo de 1976-2006. Tesis para optar el grado de Magister en Meteorología. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

Gonzalez J. A. \_\_. Ecofisiología y morfología del estrés debido a factores adversos. Fundación Miguel Lillo, Instituto de Ecología Vegetal. Universidad Nacional de Tucumán. Argentina.

ICA. 2011. Manejo fitosanitario del cultivo de papa. Colombia.

IPCC. 2007. Reporte cuarta comunicación de cambio climático

IDEAM. Segunda comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático. Inventario nacional de emisiones, Gases de efecto Invernadero. 2009

Jones, J.W., Hoogenboom, G., C.H. Porter, K.J. Boote, Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J. y J.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.*

MADR, 2012. Perspectivas Agropecuarias. Primer Semestre de 2012.

Nústez C.E. 2011. Variedades colombianas de papa. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía. Bogotá, Colombia.

Ospina, 1999. Tecnología del cultivo del maíz. Fenalce, Bogotá. Colombia.

Rojas E. 2011. Evaluación del desarrollo del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática interanual y cambio climático, en el sur oeste de la Sabana de Bogotá. Tesis de Grado. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

R.L. Paliwal. 2001. EL MAÍZ EN LOS TRÓPICOS: Mejoramiento y producción FAO Plant Production and Protection Series. Roma, Italia. Fuente electrónica en: <http://www.fao.org/DOCREP/003/X7650S/X7650S00.HTM>

Segura, Santos & Nústez. 2006. Desarrollo fenológico de cuatro variedades de Papa (*solanum tuberosum* l.) en el municipio de zipaquirá (Cundinamarca). En: *Fitotecnia Colombiana* 6(2):33-43 (2006)

Seo, N., & Mendelsohn R. 2007. An Analysis of Crop Choice: Adapting to Climate Change in Latin American Farms. Niggol Seo University of Aberdeen Business School, UK and Robert Mendelsohn School of Forestry and Environmental Studies, Yale University, USA.

Stockle C. \_\_ The CropSyst Model: A Brief description. Biological Systems Engineering Dept. Washington State University



Superintendencia de Industria y Comercio, 2011. Cadena Productiva del maíz. Bogotá, Colombia.

Stedutto, P., Hsiao, T., Raes, D., & Fereres, E. (2009). Aquacrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and underlying Principles.

Van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L. y J. Goudriaan. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. Eur. J. Agron.