Actualización y ajuste de la información obtenida en el Estudio de Factibilidad del Seguro Agrícola Catastrófico para el cultivo de maíz blanco tradicional en los departamentos de Antioquia y Tolima

CONTRATO 95-2019

Producto 5: Rendimientos sintéticos actualizados para Antioquia y Tolima, para los dos semestres productivos

Preparado para:

Noviembre de 2020

Firma consultora

Colombia
INGENIAR CAD/CAE Ltda.
Carrera 19A # 84-14 OF 504
Edificio Torrenova
Tel. 57-1-691-6113
Fax 57-1-691-6102
Bogotá, D.C.
www.ingeniar-risk.com

Equipo de trabajo

Dirección y Coordinación de Grupos de Trabajo Técnico

Omar Darío Cardona A.
Dirección General del Proyecto

Gabriel Andrés Bernal G.
Dirección científica INGENIAR

Especialistas y Asesores – Grupos de Trabajo

Héctor Mauricio Yepes Casanova
Especialista en proyectos productivos

Gladys Cardona Cortés
Especialista Agroecología

Claudia Villegas
Especialista INGENIAR

Diana González
Especialista INGENIAR

Sthefania Grajales
Especialista INGENIAR

Paula Marulanda
Especialista INGENIAR

John Fredy Molina
Especialista INGENIAR

David Rincón
Especialista INGENIAR

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 1

1.1 OBJETIVOS 1

2 FUENTES DE INFORMACIÓN DE RENDIMIENTOS 3

2.1 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD – SEGURO AGRÍCOLA CATASTRÓFICO POR BANCO MUNDIAL 3
2.2 CENSO NACIONAL AGROPECUARIO Y ENCUESTA NACIONAL AGROPECUARIA – DANE 4
2.3 EVALUACIONES AGROPECUARIAS MUNICIPALES – EVA 6
2.4 ANUARIO AGRÍCOLA ANTIOQUEÑO – AÑO 2018 9

3 MODELACIÓN DE LA RESPUESTA AL AGUA DE CULTIVOS 11

3.1.1 Clima 13
3.1.2 Cultivo 13
3.1.3 Suelo 16
3.1.4 Manejo 17
3.2 LA DINÁMICA DE LA RESPUESTA DE LOS CULTIVOS AL ESTRÉS HÍDRICO 17

4 MODELO PARA EL MAÍZ BLANCO 22

4.1 CLIMA: SERIES METEOROLÓGICAS DIARIAS 22
4.1.1 Series diarias de precipitación y temperatura 22
4.1.2 Series diarias de evapotranspiración 23
4.1.3 Concentración de dióxido de carbono 24
4.1.4 Cambio climático 25
4.2 CULTIVOS: PARÁMETROS AGRONÓMICOS 26
4.2.1 Tipo de parámetros de cultivos 26
4.3 SUELO: CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS 33
4.3.1 Almacenamiento y disponibilidad de agua en el suelo 34
4.3.2 Estimación de la escorrentía 37
4.3.3 Parámetros de suelos usados en la modelación 39

5 RENDIMIENTOS SINTÉTICOS SIMULADOS 42

5.1 RENDIMIENTOS SIMULADOS CON CLIMA BASE 43
5.2 RENDIMIENTOS SIMULADOS CON CAMBIO CLIMÁTICO 50

6 ACRÓNIMOS 59

7 REFERENCIAS 60

A. 1 ANEXOS FUENTES DE INFORMACIÓN DE RENDIMIENTOS HISTÓRICOS 64

A. 2 CONCENTRACIÓN MEDIA ANUAL DE DIÓXIDO DE CARBONO EN LA ATMÓSFERA 66

A. 3 PARÁMETROS DE CULTIVOS PARA MODELO DE RESPUESTA AL AGUA 68

A. 4 DIAGRAMAS DE FRECUENCIA DE LOS RENDIMIENTOS SIMULADOS 70

A. 5 MAPAS DE MUNICIPIOS Y VEREDAS DE LOS RENDIMIENTOS SIMULADOS 80

A. 6 RENDIMIENTOS SIMULADOS 92

1 Introducción

El presente proyecto considera la evaluación de riesgo para cultivos de maíz blanco en los departamentos de Antioquia y Tolima expuestos a riesgos de tipo hidrometeorológico. Para cada departamento se evalúa el riesgo de desastres de manera cuantitativa en términos de la reducción del rendimiento de la cosecha de maíz blanco, que incluye las estimaciones de pérdidas máximas probables y pérdidas promedio anuales. El desarrollo de este proyecto se basará en el enfoque metodológico indicado en los términos de referencia y complementariamente usando una metodología de análisis de riesgo probabilista que utiliza como herramienta principal la plataforma CAPRA ROBOT desarrollada por el equipo consultor en el marco de una iniciativa o estrategia regional para fortalecer y consolidar un proceso técnico-científico, idóneo, versátil y efectivo de evaluación del riesgo para el sector agropecuario con fines de avanzar en el conocimiento y la toma de decisiones.

En resumen, el proyecto "*Actualización y ajuste de la información obtenida en el estudio de factibilidad del seguro agrícola catastrófico*" se divide en seis actividades principales a desarrollar en un plazo de 12 meses. Las actividades son:

- Actividad 1. Determinar el número de productores objeto del esquema del seguro agrícola catastrófico en Antioquia y Tolima
- Actividades 2 y 3. Identificación de áreas establecidas de maíz blanco tradicional en Antioquia y Tolima, para los dos semestres productivos; e Identificación de fechas de siembra y cosecha de maíz blanco tradicional en Antioquia y Tolima, para los dos semestres productivos
- Actividad 4. Actualización de la información meteorológica en Antioquia y Tolima
- Actividad 5. Actualización de los rendimientos sintéticos obtenidos en el estudio de factibilidad para Antioquia y Tolima, para los dos semestres productivos
- Actividad 6. Piloto de evaluación de pérdidas modeladas para un aviso de siniestro hipotético.

1.1 Objetivos

El objetivo principal del proyecto es actualizar y ajustar la información obtenida en el estudio de factibilidad del seguro agrícola catastrófico para el cultivo de maíz blanco tradicional en los departamentos de Antioquia y Tolima.

La consultoría se enfoca en la actualización de la información por medio de:

i) Estimación de número de productores objeto del esquema del seguro agrícola catastrófico en los dos departamentos seleccionados

ii) La identificación de las áreas establecidas de maíz blanco tradicional en cada uno de los departamentos seleccionados para los dos semestres productivos, así como las fechas más probables de siembra y cosecha

iii) La información meteorológica de los departamentos seleccionados

iv) Los rendimientos sintéticos a partir de la información disponible para los dos departamentos

v) Un piloto de evaluación de pérdidas modeladas simulando un evento real de aviso de siniestro en los dos departamentos[1].

Este informe contiene los resultados de la Actividad 5 *Actualización de los rendimientos sintéticos obtenidos en el estudio de factibilidad para Antioquia y Tolima, para los dos semestres productivos.* En la primera parte se presenta la revisión de fuentes de información que incluye el análisis de información generada por el DANE y otras instituciones relacionadas con los rendimientos históricos y sintéticos de maíz blanco en Antioquia y Tolima. Luego se presenta el marco conceptual sobre el rendimiento de los cultivos como función del consumo de agua. Se presentan también en detalle los parámetros del modelo de cultivo de maíz blanco que se utilizó para evaluar su respuesta al agua. En la sección final del documento se presentan los rendimientos sintéticos obtenidos con un enfoque probabilista, en base a la simulación estocástica de clima para identificar eventos de mayor o menor rendimiento en Antioquia y Tolima, e incorporando el cambio climático en la evaluación, lo cual constituye un valor agregado a este trabajo.

[1]El objeto de esta actividad cambió con respecto al contrato original, como se encuentra consignado en el Otrosí número UNO al contrato de consultoría No. 95 de 2019 celebrado entre el Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario - FINAGRO e INGENIAR CAD/CAE Limitada.

2 Fuentes de Información de Rendimientos

Con el objetivo de ajustar la simulación de rendimientos en el modelo de respuesta al agua del maíz blanco, se consultaron diversas fuentes de información de rendimientos históricos. Esto permite contar con una visión del orden de magnitud de la producción esperada en Antioquia y Tolima, por ciclo productivo y discriminando, en donde la información lo permite, entre maíz blanco tecnificado y tradicional. Conviene anotar que, si bien la consultoría está enfocada en maíz blanco tradicional, se incluyen los cálculos y simulaciones también para el sistema tecnificado.

En esta sección se presenta un resumen de las fuentes de información de rendimientos históricos y sintéticos, consultadas para actualizar la información de rendimientos sintéticos de maíz blanco para Antioquia y Tolima.

2.1 Estudio de Factibilidad – Seguro Agrícola Catastrófico por Banco Mundial

En el Estudio de Factibilidad del Seguro Agrícola Catastrófico en Colombia (FINAGRO & Banco Mundial, 2017) se realizó un proceso de simulación de rendimientos de Maíz Blanco Tradicional (MBT) con el objetivo de determinar la factibilidad del Seguro Agrícola Catastrófico, enfocado inicialmente a este cultivo en Antioquia y Tolima. La modelación realizada consideró factores como la dedicación del cultivo, la siembra en pequeñas extensiones de superficie, el uso de semillas no certificadas, alto empleo de mano de obra y el bajo uso de agroquímicos (fertilizantes).

Una primera modelación a una resolución de pixel de 55 Km, permitió estimar rendimientos de 3.1 Ton/ha en Tolima y 943 Kg/ha Antioquia, para el Ciclo A (primer semestre). En el caso del Ciclo B (segundo semestre), sin embargo, la baja resolución no permitió obtener resultados representativos. El estudio consideró entonces un portafolio de mayor resolución a 8Km de pixel, para el cual fue posible determinar los rendimientos de ambos ciclos. Las Figuras 2-1 y 2-2 muestran los valores promedio obtenidos de las simulaciones sintéticas de rendimiento realizadas para 30 años de climatología histórica. Como se puede apreciar, los rendimientos promedio mayores en los ciclos A y B se presentan en la zona Centro – Sur de Antioquia (entre 2500 y 3000 kg/ha principalmente) mientras que los más bajos se ubican en sector de Urabá Antioqueño (entre 500 y 1000 kg/ha predominantemente). En el caso del Tolima, la tendencia en todo el territorio se inclina hacia rendimientos con valores entre 1500 y 3500 kg/ha.

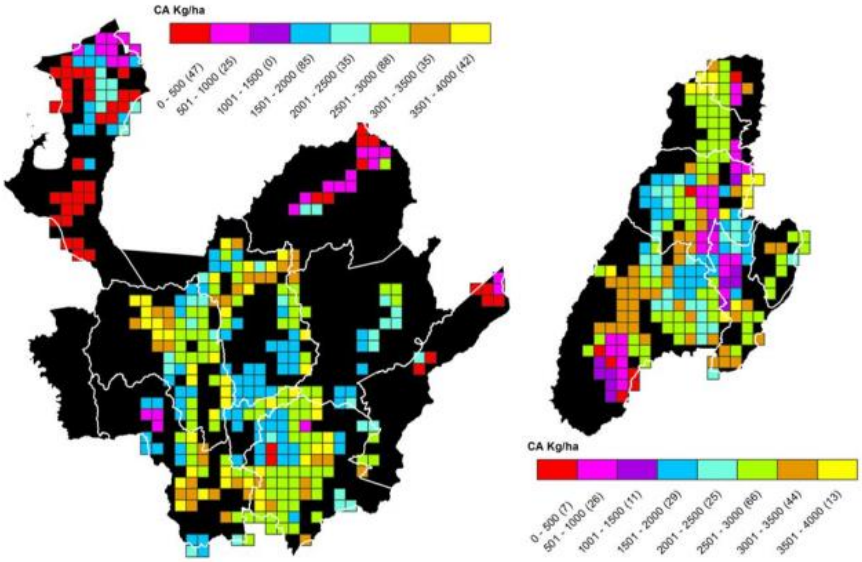


Figura 2-1. Mapa de rendimiento promedio de MBT para el ciclo A. (FINAGRO & Banco Mundial, 2017)

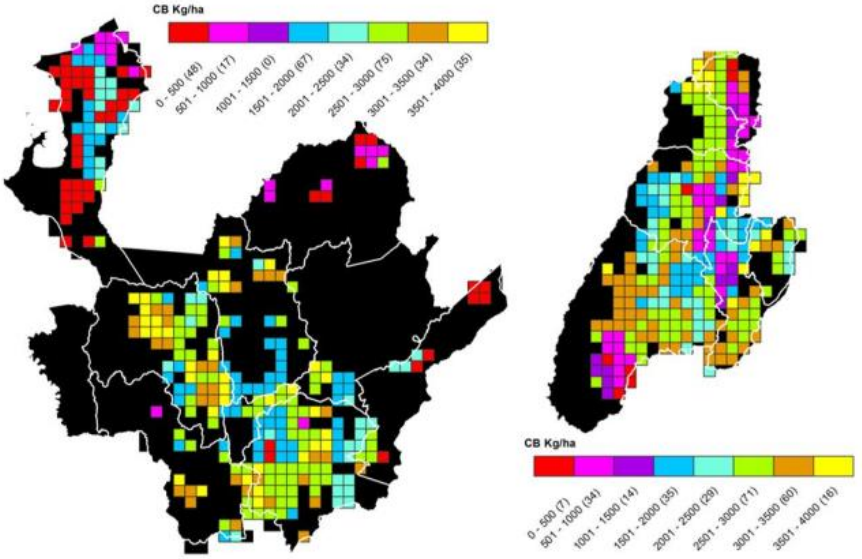


Figura 2-2. Mapa de rendimiento promedio de MBT para el ciclo B. (FINAGRO & Banco Mundial, 2017)

2.2 Censo Nacional Agropecuario y Encuesta Nacional Agropecuaria – DANE

La Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) provee información estadística sobre el área sembrada y cosechada, la producción y el rendimiento de una canasta de cultivos transitorios y permanentes. La ENA brinda cifras estadísticas anuales para los 32 departamentos del territorio colombiano considerando el Marco Maestro Rural y Agropecuario actualizado a partir de la información del 3er Censo Nacional Agropecuario (DANE, 2019).

La información reportada por la ENA se encuentra desagregada para maíz blanco sin especificar el sistema productivo (tradicional o tecnificado). En la Tabla 2-1 se presentan los valores de rendimiento a nivel nacional y departamental para Antioquia y Tolima. Dentro de los registros históricos (2012-2019) de la ENA, Antioquia presenta un rango de rendimientos que oscilan entre 0.9 y 2.4 ton/ha. En el caso de Tolima, los rendimientos son más altos y oscilan entre 3.6 y 5 ton/ha como se muestra en la Figura 2-3.

Tabla 2-1. Rendimientos históricos de maíz blanco reportados por la ENA (DANE, 2019).

Año	Rendimiento (Ton/ha)								
	Antioquia			Tolima			Colombia		
	Ciclo A	Ciclo B	Anual	Ciclo A	Ciclo B	Anual	Ciclo A	Ciclo B	Anual
2012	1.4	2.0	1.7	3.7	3.4	3.6	3.5	3.7	3.6
2013	0.9	1.5	1.2	5.0	4.1	4.6	3.7	4.1	3.9
2014	1.9	1.2	1.5	4.0	4.0	4.0	3.6	3.8	3.8
2015	1.1	1.1	1.1	3.7	4.1	3.9	3.5	3.8	3.7
2016	2.4	1.6	2.2	3.7	5.0	4.3	4.1	4.6	4.4
2017	2.1	1.7	1.8	4.9	5.0	5.0	5.0	4.4	4.7
2018	2.1	2.3	2.3	4.0	4.1	4.0	4.2	4.2	4.2
2019	2.1	2.1	2.1	4.8	4.7	4.7	4.4	4.2	4.3

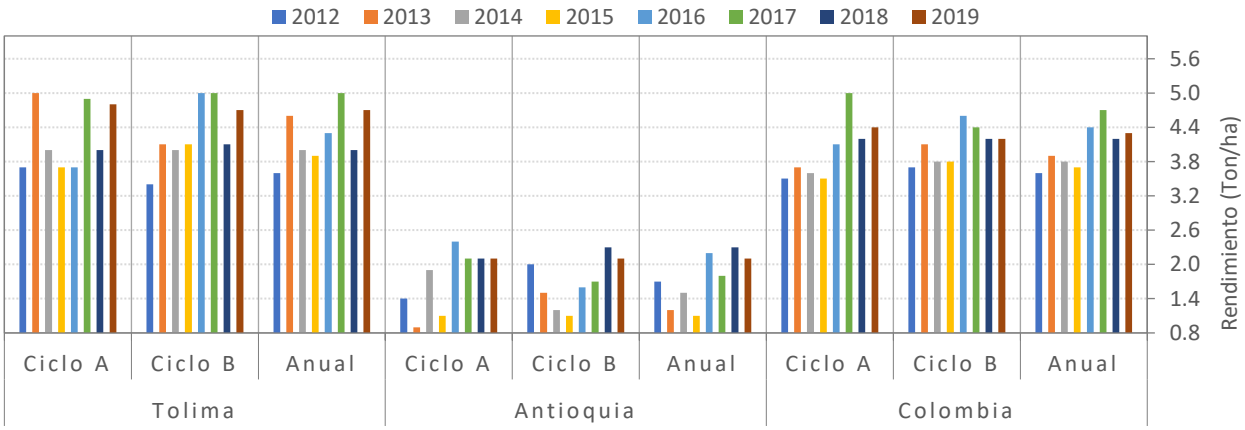


Figura 2-3. Rendimientos históricos de maíz blanco reportados por la ENA a nivel nacional, Antioquia y Tolima. (DANE, 2019).

Según el 3er Censo Nacional Agropecuario (CNA), (DANE, 2016), el rendimiento de maíz blanco en Antioquia para el primer semestre fue de 3.11 ton/ha y para el segundo semestre de 3.10 ton/ha del año 2013. En cuanto a Tolima, los rendimientos fueron 4.29 y 4.92 para el primer y segundo semestre. A nivel nacional el censo reporta un rendimiento promedio de maíz blanco de

2.9 ton/ha. Como se muestra en la Tabla 2-2, los rendimientos de maíz blanco en Antioquia son más bajos que en Tolima. Es importante resaltar que si bien el Censo Nacional Agropecuario (CNA) contiene la información más completa que ha sido publicada en el país hasta la fecha y se tiene la posibilidad de acceder a los microdatos anonimizados, este solo proporciona la información para un año agrícola, de tal manera que no es posible establecer el comportamiento temporal de los rendimientos en ambos departamentos.

Tabla 2-2. Rendimientos por ciclo de maíz blanco según el Censo Nacional Agropecuario 2013 (CNA) (DANE, 2017).

Año agrícola 2013	Antioquia Rendimiento (Ton/ha)	Tolima Rendimiento (Ton/ha)
Ciclo A (2013)	3.11	4.29
Ciclo B (2013)	3.10	4.92
Anual (2013)	3.10	4.65

2.3 Evaluaciones Agropecuarias Municipales – EVA

Las evaluaciones agropecuarias municipales (EVA) son el sistema básico para la construcción de las estadísticas sectoriales y municipales sobre la actividad agropecuaria, y son construidas a partir de un esfuerzo institucional local y regional. A partir del 2019 el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) delegó a la Unidad de Planeación Rural Agropecuaria (UPRA) la misión de gestionar la información del sector agropecuario, permitiéndole ejercer la secretaría técnica de la mesa de estadísticas agropecuarias y la realización de las EVA en coordinación con las entidades competentes (MADR, 2019).

La información histórica (2007-2019) de área, producción y rendimiento reportada por las EVA se encuentra disponible en la Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano (Agronet)[2]. Los rendimientos de maíz para los años 2007-2019, desagregados por ciclo agrícola (Ciclo A para el primer semestre y Ciclo B para el segundo semestre del año) se presentan en la Figura 2-4 a la Figura 2-9 para todo el país y para Antioquia y Tolima. Si bien esta información permite diferenciar entre sistema tecnificado y tradicional, no es específica al tipo de maíz, es decir que los datos dan cuenta de la producción y rendimiento de maíz amarillo y blanco.

[2] Base Agrícola EVA 2007-2019, https://www.agronet.gov.co/Lists/Boletin/Attachments/3930/Base%20Agr%C3%ADcola%20EVA%202007-2019%20(P)_12_02_2020%20(1).xlsb

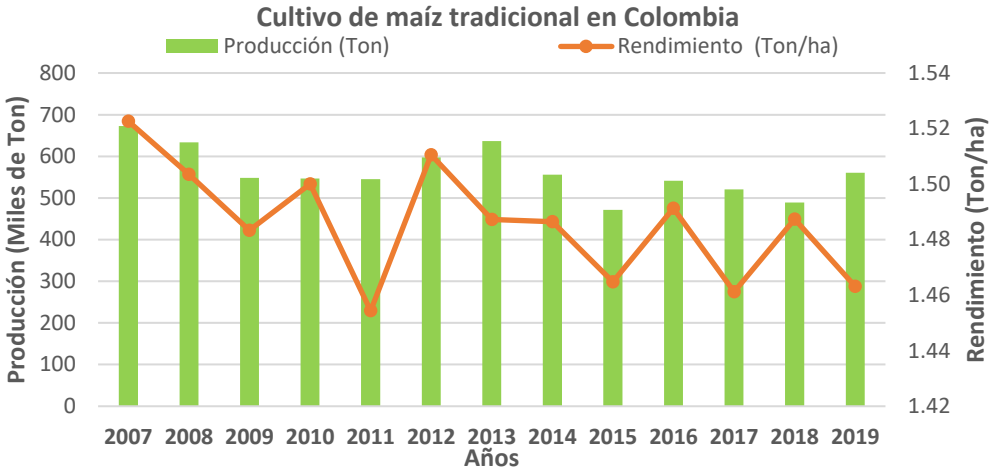


Figura 2-4. Rendimientos históricos EVA (2007-2019), cultivo maíz tradicional en Colombia, (MADR, 2019).

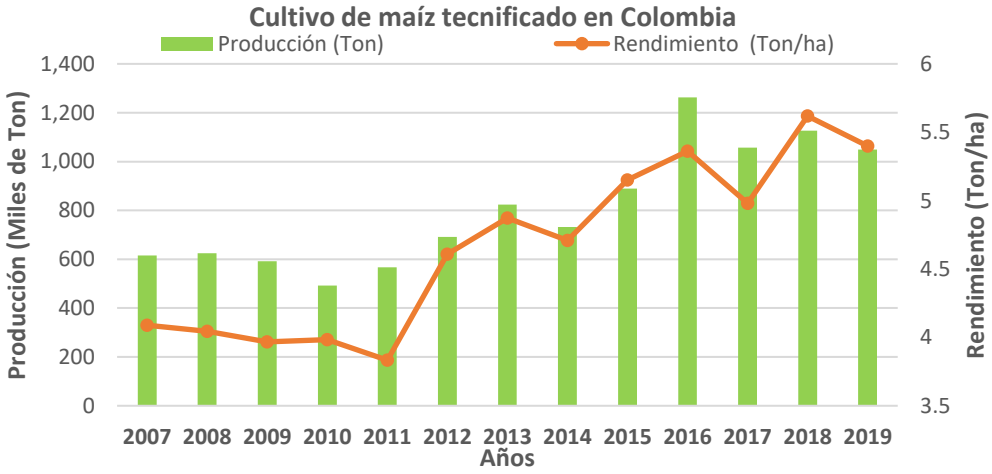


Figura 2-5. Rendimientos históricos EVA (2007-2019), cultivo maíz tecnificado en Colombia, (MADR, 2019).

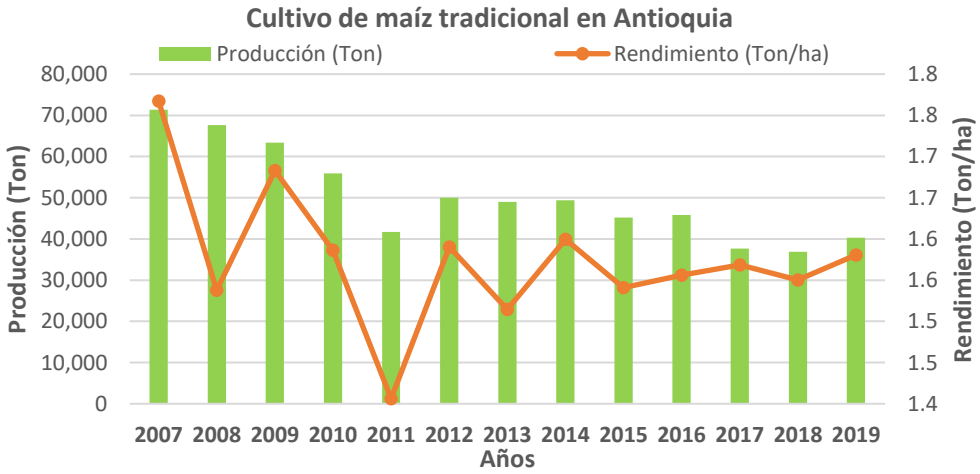


Figura 2-6. Rendimientos históricos EVA (2007-2019), cultivo maíz tradicional en Antioquia, (MADR, 2019).

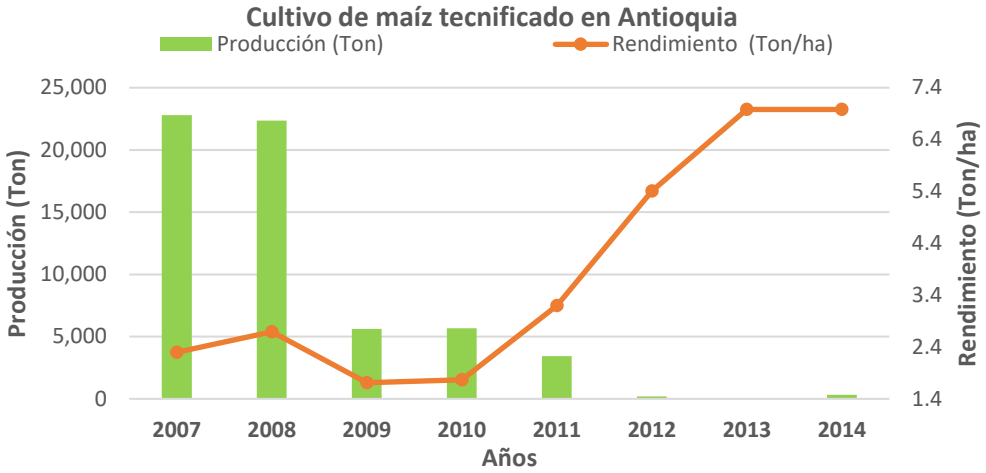


Figura 2-7. Rendimientos históricos EVA (2007-2019), cultivo maíz tecnificado en Antioquia, (MADR, 2019).

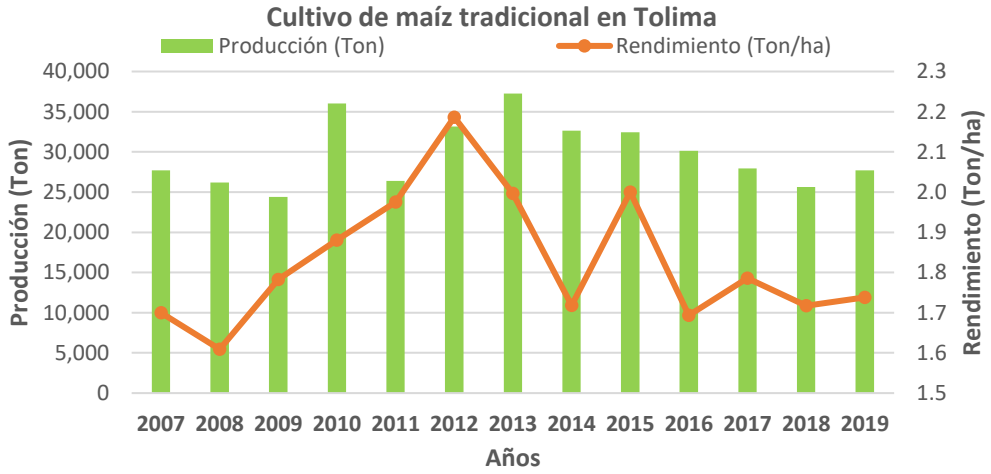


Figura 2-8. Rendimientos históricos EVA (2007-2019), cultivo maíz tradicional en Tolima, (MADR, 2019)

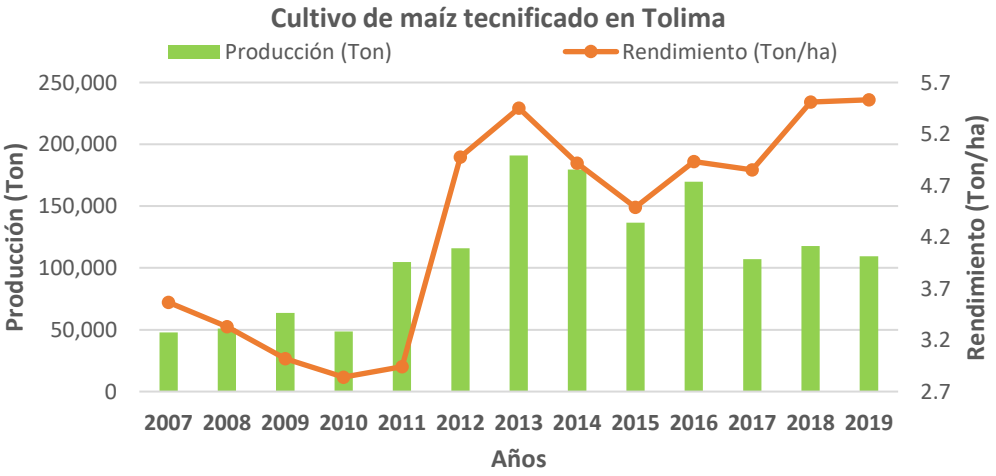


Figura 2-9. Rendimientos históricos EVA (2007-2019), cultivo maíz tecnificado en Tolima, (MADR, 2019).

2.4 Anuario Agrícola Antioqueño – año 2018

En el Anuario del sector agropecuario del Departamento de Antioquia del año 2018 (Gobernación de Antioquia, 2018a, pp. 2–151), se realizó la caracterización estadística de la capacidad agrícola productiva de Antioquia, mediante la división del territorio en nueve (9) subregiones (Urabá, Bajo Cauca, Norte, Nordeste, Occidente, Magdalena Medio, Oriente, Suroeste y Valle de Aburra) y se obtuvieron valores de referencia de producción y rendimientos de cultivos permanentes como el Maíz Blanco Tradicional (MBT).

En la siguiente tabla se presenta el resultado obtenido para los rendimientos de los cultivos de MBT para el ciclo A y el Ciclo B en las 9 subregiones analizadas. Como se puede apreciar, el departamento presenta rendimientos similares en los dos ciclos del año, con un ligero incremento en el Ciclo A (1.7 Ton/ha) con respecto al Ciclo B (1.6 Ton/ha). El rendimiento total promedio del departamento se sitúa en 1.7 Ton/ha al año; las subregiones que más producen son Suroeste, Oriente y Occidente, con valores de 3.7, 3.5 y 2 Ton/ha al año respectivamente.

Por su parte, las regiones con menor tasa de rendimiento anual son Nordeste (1.1 Ton/ha), Bajo Cauca (1.3 Ton/ha) y Valle de Aburrá (1.3 Ton/ha). Lo que indica que las características edáficas e hidrológicas del departamento de Antioquia favorecen una producción variada y constante a lo largo del año del MBT.

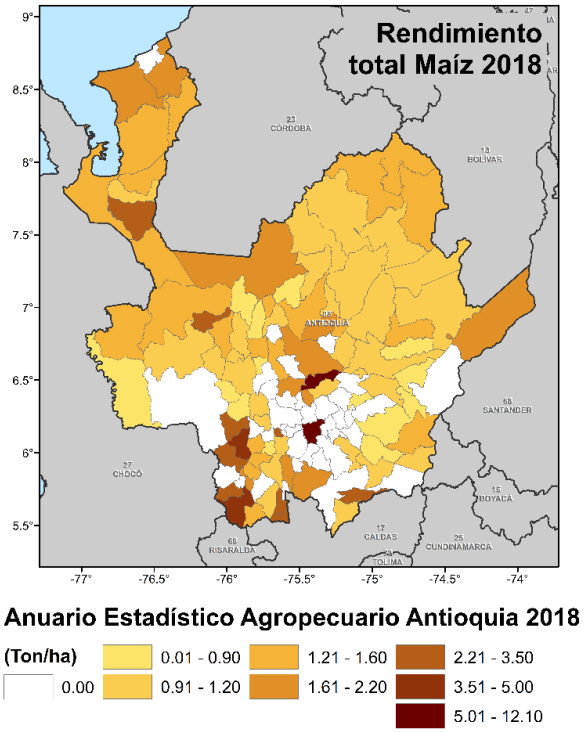


Figura 2-10. Rendimiento total del cultivo de maíz en Antioquía para el Año Agrícola 2018 (Elaboración propia a partir de Gobernación de Antioquía, 2018).

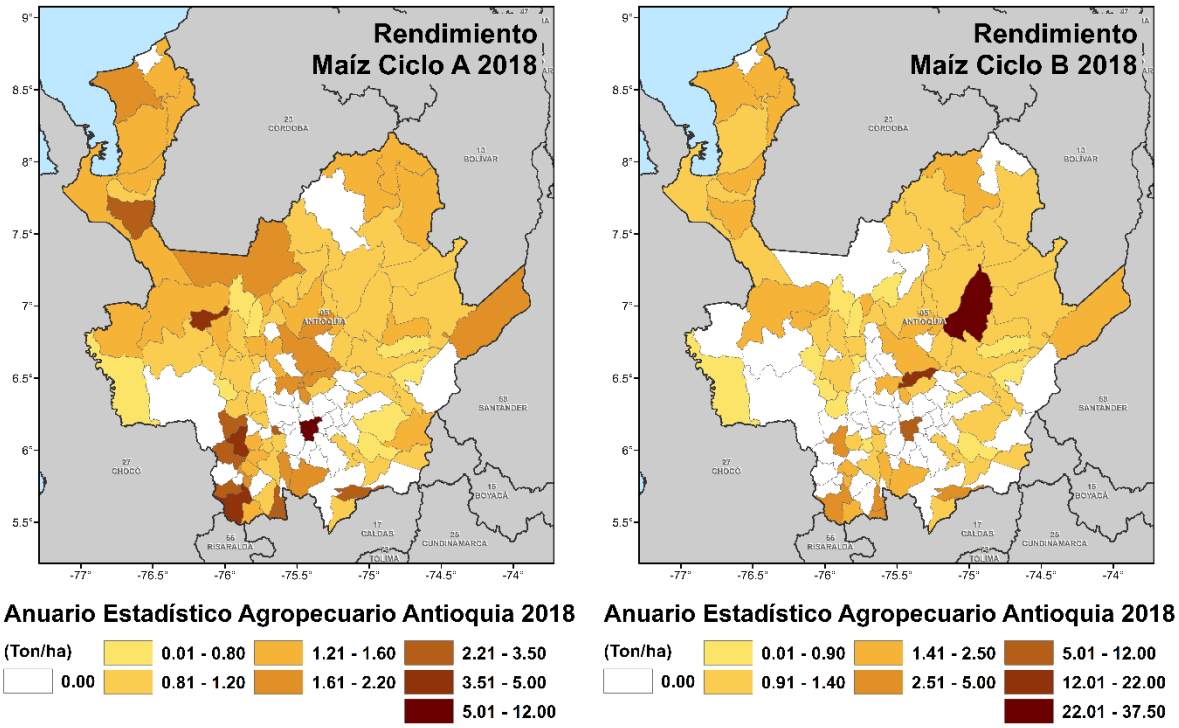


Figura 2-11. Rendimiento total del cultivo de maíz por semestre en Antioquía para el Año Agrícola 2018 (Elaboración propia a partir de Gobernación de Antioquía, 2018).

3 Modelación de la respuesta al agua de cultivos

Con el objetivo de mejorar la eficiencia y la productividad del uso del agua en cultivos, la división de Tierra y Agua de la FAO ha desarrollado una línea de investigación sobre la gestión eficaz del agua en la agricultura de secano e irrigada. El objetivo general es aumentar los ingresos de los agricultores mejorando el rendimiento agrícola, respondiendo a la creciente demanda de alimentos y a los limitados recursos hídricos. El enfoque inicial para modelar la relación entre el rendimiento de los cultivos y el consumo de agua se encuentra publicado en el documento de FAO: *Irrigation and Drainage paper No. 33 Yield response to water* (Doorenbos et al., 1979). Este es un enfoque simplificado, en donde la pérdida relativa de rendimiento en cualquier cultivo $(1 - Y/Y_x)$, se relaciona proporcionalmente a la reducción relativa en el consumo de agua en términos de la evapotranspiración $(1 - ET/ET_x)$, por medio de un coeficiente de proporcionalidad (K_y), que es específico para cada tipo de cultivo y fase fenológica.

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right) \qquad \text{Ec. 3-1}$$

en donde Y es el rendimiento real, Y_x es el máximo rendimiento, el cual depende de la genética del cultivo y las condiciones climáticas, y se calcula asumiendo que los factores agronómicos (agua, fertilizantes, plagas y enfermedades) no son limitantes. ET es la evapotranspiración real, calculada para condiciones específicas de precipitación y temperatura, y ET_x es la máxima evapotranspiración, calculada asumiendo que los requerimientos de agua del cultivo están totalmente satisfechos.

Este es un enfoque apropiado para propósitos de planificación general y evaluación rápida (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012) y puede aplicarse a todos los cultivos agrícolas (herbáceos, árboles y vides), usando el valor apropiado de K_y. Este coeficiente, que es específico de los cultivos y varía a lo largo de la temporada de crecimiento, incluye los procesos biológicos, físicos y químicos involucrados en la producción de biomasa. La Figura 3-1 se muestra la función lineal de producción de agua para el maíz. En términos generales, si K_y> 1, se trata de un cultivo muy sensible al estrés hídrico, mientras que si K_y <1, se trata de un cultivo más tolerante al déficit de agua. Adicionalmente, los cultivos en estado vegetativo o de maduración son más resistentes que los cultivos en etapas de floración o de formación de rendimiento.

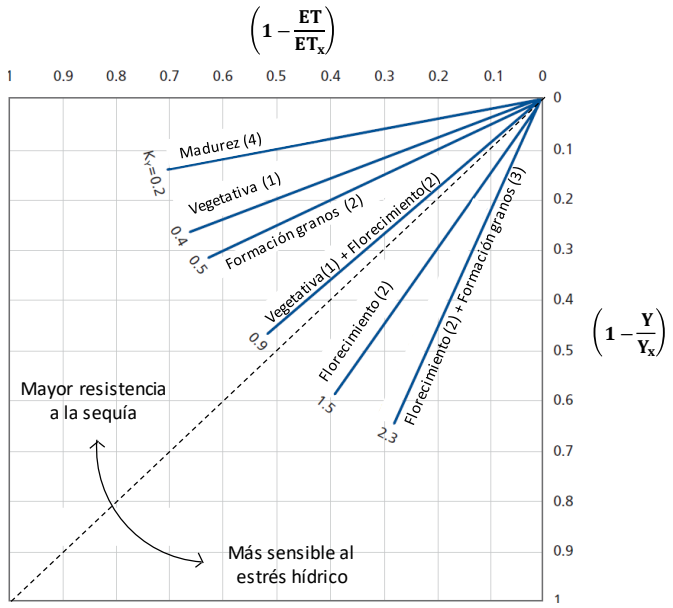


Figura 3-1. Funciones de agua-rendimiento para el maíz (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 8)

Utilizando la Ec. 3-1 como punto de partida, la FAO desarrolló un modelo avanzado de respuesta de rendimiento como función del consumo de agua, el cual se encuentra publicado en el documento *Irrigation and Drainage Paper No. 66 Crop yield response to water* (Steduto et al., 2012). Este nuevo enfoque permite calcular la biomasa de los cultivos con base en la cantidad de agua transpirada y el rendimiento del cultivo como la proporción de biomasa que entra en las partes cosechables de las plantas. Algunas de las características del modelo de la FAO, que son interesantes para la evaluación del riesgo por fenómenos hidrometeorológicos, son:

- El modelo considera la relación proporcional entre el estrés hídrico y la reducción de la producción de biomasa. En consecuencia, la reducción de la producción de biomasa está relacionada con la reducción de los rendimientos y las pérdidas económicas asociadas con fenómenos hidrometeorológicos.
- El modelo de la FAO incluye el efecto de las anomalías de la humedad del suelo y la respuesta fisiológica de los cultivos al déficit hídrico, anegamiento, estrés por temperatura del aire y salinidad del suelo.
- El modelo calcula la producción de biomasa en una escala de tiempo diaria, para representar mejor la dinámica de la respuesta del cultivo al agua en diferentes etapas de crecimiento. Esta característica es conveniente porque los parámetros meteorológicos simulados también tienen una escala de tiempo diaria.
- Como la producción de biomasa se calcula a partir de las series de precipitación y temperatura, el modelo puede introducir el efecto de los escenarios de cambio climático. Se incluye también la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera.
- La FAO ha establecido parámetros estándar para los cultivos, con sus correspondientes procedimientos de calibración y validación.

- Es posible incorporar modificadores asociados a prácticas agrícolas (por ejemplo, riego o fertilización), en función de la información disponible.

El modelo de respuesta de cultivos tiene cuatro componentes principales: el clima (en términos de temperatura, precipitación, demanda por evaporación y concentración de dióxido de carbono), los cultivos (procesos de desarrollo, crecimiento y rendimiento), el suelo (balance de agua y sal) y el manejo y administración (prácticas agrícolas). Cada uno de los componentes se explica brevemente a continuación, según lo contenido en Steduto et al. (2012).

3.1.1 Clima

La temperatura influye en el desarrollo de los cultivos y la precipitación es determinante para el balance hídrico del suelo en la zona radicular y el estrés hídrico. Por lo tanto, las principales variables climáticas para el modelo son las temperaturas máximas y mínimas diarias del aire, las precipitaciones diarias totales y la demanda evaporativa de la atmósfera, expresadas como evapotranspiración. Para el caso del modelo de simulación aplicado en este estudio, todas estas variables climáticas se calculan previamente en la evaluación de la amenaza por fenómenos hidrometeorológicos, y vienen descritas como series simuladas de 1000 años.

Adicionalmente, la concentración de dióxido de carbono (CO_2) se incluye en la evaluación, ya que es un aspecto que afecta la expansión del cultivo y la conductancia estomática. Los valores por defecto de las concentraciones anuales de CO_2 se miden en el Observatorio Mauna Loa, en Hawái (www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/). Para el caso de la evaluación prospectiva aquí presentada, en el clima base se utiliza la concentración de dióxido de carbono para el último año disponible y, para la evaluación de los modelos con cambio climático, se usan las proyecciones de concentración de dióxido de carbono según el escenario de RCP (trayectoria representativa de concentración) analizado.

3.1.2 Cultivo

Los cultivos se modelan en términos de los procesos biológicos, físicos y químicos que determinan su rendimiento. El modelo permite evaluar cómo los cultivos crecen y se desarrollan a lo largo de su ciclo de crecimiento específico, creciendo el follaje, profundizando sus raíces y acumulando biomasa. Todas las etapas fenológicas (o etapas de crecimiento) se consideran en el modelo: vegetativo, floración, formación de rendimiento y maduración (como se muestra en la Figura 3-1), incluyendo etapas fenológicas distintas para cultivos herbáceos o forrajeros.

La fenología se refiere a las etapas de desarrollo de los cultivos y su duración, que se puede definir en días de grado de crecimiento (GDD – *Growing Deegre Days*) o días calendario. La cobertura vegetal (CC – *Canopy Cover*) es la representación de la cantidad de follaje, la cual se considera proporcional a la cantidad de agua transpirada y la cantidad de biomasa producida. El subcomponente de profundidad de enraizamiento modela el proceso en el cual las raíces se profundizan a una tasa relativa constante mientras que la planta está creciendo hasta la fase de

formación de rendimiento. El modelo puede incluir los efectos de capas de suelo o nivel freático superficial que restringen de crecimiento de las raíces.

En la Figura 3-2 se muestran las curvas de la cobertura vegetal y profundidad de la raíz. La curva en la parte superior representa el desarrollo de la cobertura vegetal a partir de la expansión (CGC: coeficiente de crecimiento vegetal – *Canopy Growth Coefficient*) y la disminución (CDC: coeficiente de disminución vegetal – *Canopy Decline Coefficient*). La cobertura vegetal se expresa como una fracción de suelo sombreado por las hojas o partes aéreas de las plantas, siendo su nivel máximo (CCx) específico del cultivo. La segunda curva representa la profundidad de enraizamiento efectiva, desde su valor mínimo (Zn) en el momento de la siembra hasta su valor máximo (Zx) en la fecha que se alcanza la madurez del cultivo. Este conjunto de curvas representa el desarrollo del cultivo y su interacción con los sistemas de suelo y aire.

El modelo permite calcular la transpiración de los cultivos separadamente de la evaporación del suelo. El subcomponente de transpiración de cultivos determina el uso de agua de la planta cuando no hay estrés que limite la apertura estomática, característica que es específica del tipo de cultivo y cambia durante su desarrollo. La evaporación del suelo considera la pérdida de agua de la superficie del suelo húmedo no sombreado por la vegetación. Los dos últimos subcomponentes, producción de biomasa y rendimiento cosechable, se pueden resumir en las ecuaciones Ec. 3-2 y Ec. 3-3.

La producción de biomasa se define como:

$$B = WP * \sum Tr \qquad \text{Ec. 3-2}$$

en donde B es la biomasa producida acumulada, Tr es la transpiración del cultivo sumada durante el período de producción de la biomasa y WP es el parámetro de productividad del agua medido como la cantidad de biomasa seca (kilogramos) por unidad de área (m^2) y de agua transpirada (mm). La robustez del modelo depende de la naturaleza conservadora del WP que permanece constante en un rango de ambientes, cuando se normaliza para demandas evaporativas.

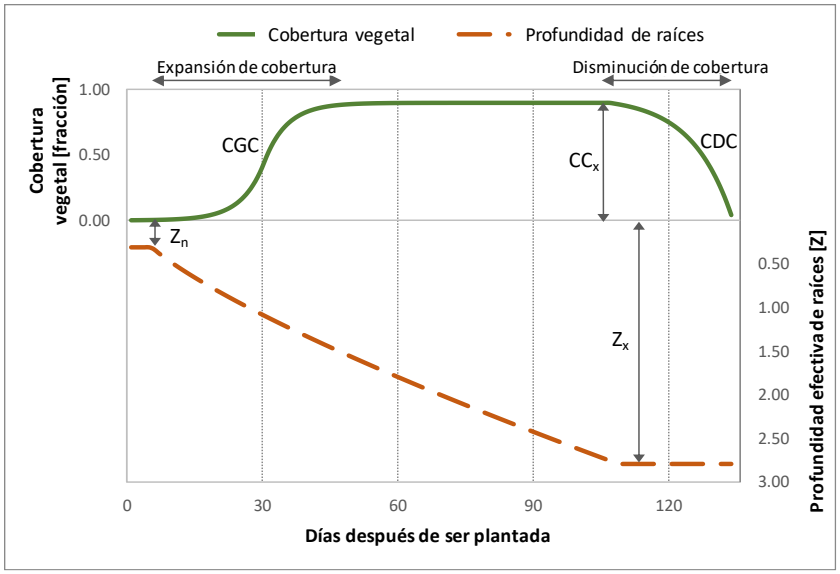


Figura 3-2. Representación esquemática del desarrollo en el tiempo de la cobertura vegetal y la profundidad de enraizamiento (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 23)

Finalmente, se utiliza un índice de cosecha HI para estimar el rendimiento Y de la biomasa producida B. Al hacer esta distinción entre la biomasa y el rendimiento, se pueden evaluar por separado los efectos de las condiciones climáticas sobre la producción de biomasa y la cosecha.

$$Y = HI * B \qquad \text{Ec. 3-3}$$

La Figura 3-3 muestra la función del cambio del índice de cosecha HI en el tiempo para cultivos de frutas o granos, para el período de formación del rendimiento (fase de floración hasta la madurez fisiológica). HI comienza a partir de cero, en un crecimiento lento pero acelerado seguido por una tasa de aumento constante hasta que se alcanza el rango superior HI_o. Este nivel superior es el índice de cosecha de los cultivos en condiciones óptimas, es específico del tipo de cultivo y se dispone de datos para su calibración.

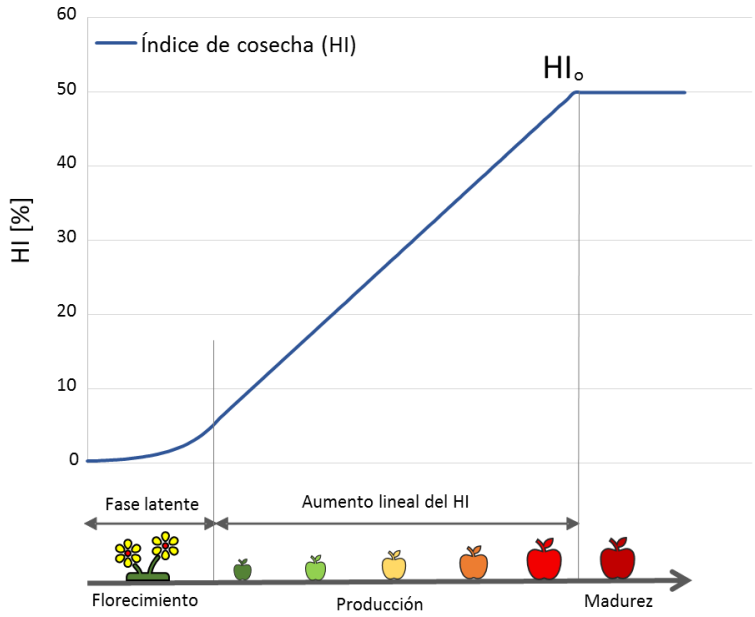


Figura 3-3. Representación esquemática del cambio en el tiempo del índice de cosecha (HI) para cultivos de frutas o granos (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 27)

3.1.3 Suelo

El componente de suelo incluye su perfil en profundidad y las características del nivel freático dentro del sistema radicular de la planta, expresando la región radicular como un volumen de control en donde se estiman los balances de agua y sal. El suelo puede ser subdividido en capas de profundidad variable, cada una con diferentes características físicas como el contenido de agua en el suelo saturado, el límite superior de agua contenida o capacidad de campo (FC – *Field Capacity*), el punto de marchitamiento permanente (PWP – *Permanent Wilting Point*) o límite inferior del nivel de agua, y la conductividad hidráulica del suelo saturado (Ksat). Estos valores son las entradas para determinar la evaporación del suelo, el drenaje interno, la percolación profunda, el escurrimiento superficial y la capilaridad. El nivel freático debe caracterizarse en términos de su profundidad y salinidad.

La Figura 3-4 muestra una representación simplificada del modelo del sistema radicular, donde Dr representa el agotamiento de la raíz y Wr es la profundidad equivalente del agua. El agua disponible total (TAW – *Total Avaliable Water*) es la cantidad de agua retenida en la zona de raíces entre la capacidad de campo (límite superior) y el punto de marchitamiento permanente (límite inferior).

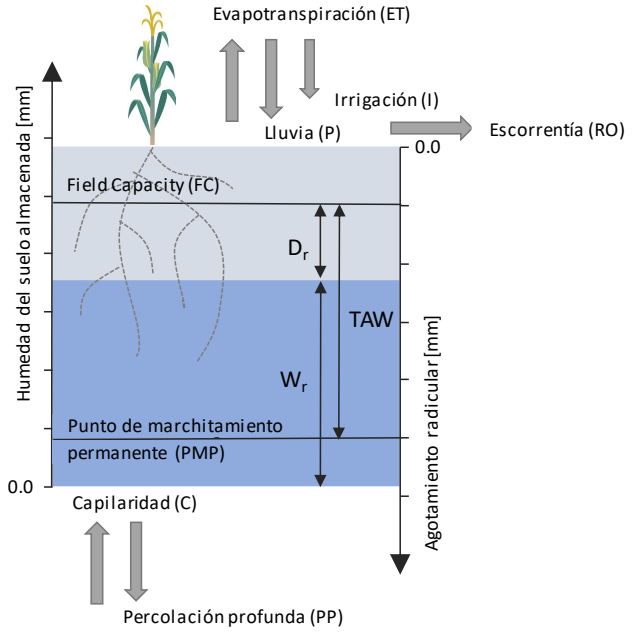


Figura 3-4. Representación esquemática del volumen de control de la zona radicular (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 28)

El balance hídrico dentro de la zona radicular se calcula día a día, y para cualquier momento del desarrollo del cultivo. Los caudales de agua entrantes considerados en el modelo son provistos por las lluvias, el riego y la capilaridad. Por otro lado, los flujos de agua salientes considerados en el modelo son el escurrimiento, la evapotranspiración y la percolación profunda.

3.1.4 Manejo

El modelo tiene la capacidad de incorporar las prácticas de manejo en la respuesta del rendimiento de los cultivos al agua, incluyendo el riego y manejo de campo. Las opciones de manejo de riego incluyen la selección de métodos de aplicación de agua y la definición de programas de riego. Las opciones de manejo de campo incluyen la fertilización del suelo, la cobertura del suelo para evitar la evaporación y el uso de protecciones para controlar el escurrimiento superficial.

3.2 La dinámica de la respuesta de los cultivos al estrés hídrico

Las condiciones de estrés hídrico son representadas por un coeficiente de estrés (K_s) y un umbral para los indicadores de estrés. K_s es un modificador que cuantifica la intensidad del efecto que produce el estrés en los procesos de crecimiento específicos para un cultivo y etapa de crecimiento. Como se observa en la Figura 3-5, los valores de K_s varían entre 0 (estrés total) y 1 (sin estrés), siguiendo una función lineal o convexa (el grado de curvatura se establece durante la calibración del modelo) como función de un indicador de estrés. Los indicadores de estrés se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- *Estrés por escasez de agua*: el indicador de estrés es el agotamiento en la zona de la raíz (Dr), indicando 0% de estrés en capacidad de campo y 100% de estrés en el punto de marchitamiento.
- *Estrés por anegamiento*: el indicador de estrés es el grado de exceso de agua, definido como la cantidad de agua entre la saturación del suelo y el punto anaeróbico, en el cual se ocurre la pérdida total de oxígeno en la zona radicular.
- *Estrés por temperatura del aire*: Los indicadores de estrés son el grado de días de crecimiento (GDD) (para inhibición de transpiración del cultivo a bajas temperaturas), y las temperaturas mínima (Tn) y máxima (Tx) diarias (para la inhibición de la polinización por frío y calor extremos, respectivamente).
- *Estrés por salinidad del suelo*: El indicador de estrés es la conductividad eléctrica promedio del suelo saturado (ECe) en la zona radicular.

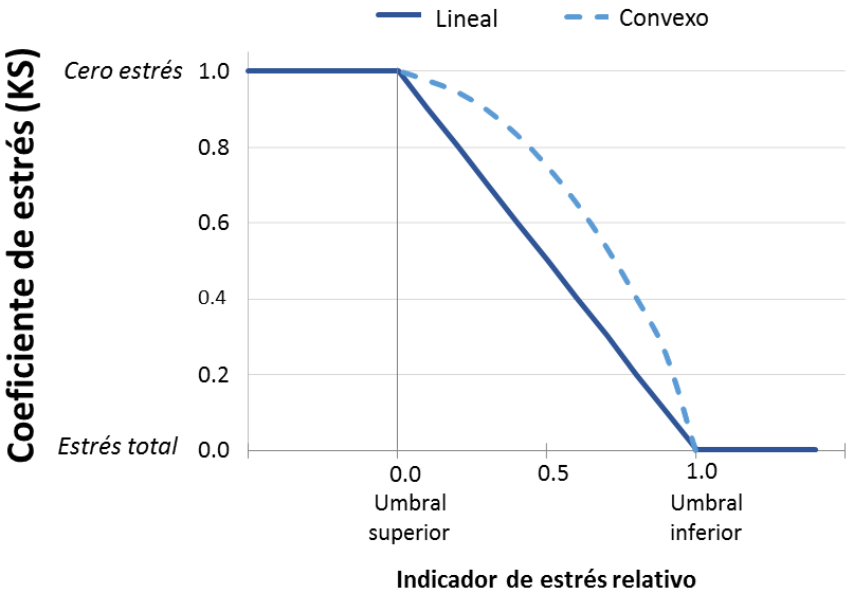


Figura 3-5.Función del coeficiente de estrés (Ks) (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 32)

Por ejemplo, la susceptibilidad del cultivo al exceso de agua se especifica al establecer el valor del umbral superior que indica, para cada tipo de cultivo, cuál es el volumen máximo saturable del suelo que se considera no restrictivo para su crecimiento. También se debe establecer el número de días que debe permanecer el suelo saturado para considerar que la deficiencia de aireación es perjudicial para la planta.

A continuación, se detalla el modelo que permite calcular los efectos del déficit hídrico en el crecimiento de la cobertura vegetal, la conductancia estomática, la senescencia temprana, la profundización de la raíz y el índice de cosecha. La Figura 3-6 muestra estos cinco procesos (líneas punteadas), dentro del esquema general de desarrollo de rendimiento. Un resumen general del

proceso de cálculo se presenta a continuación. Nótese que todos los pasos del proceso se calculan en intervalos de tiempo diarios.

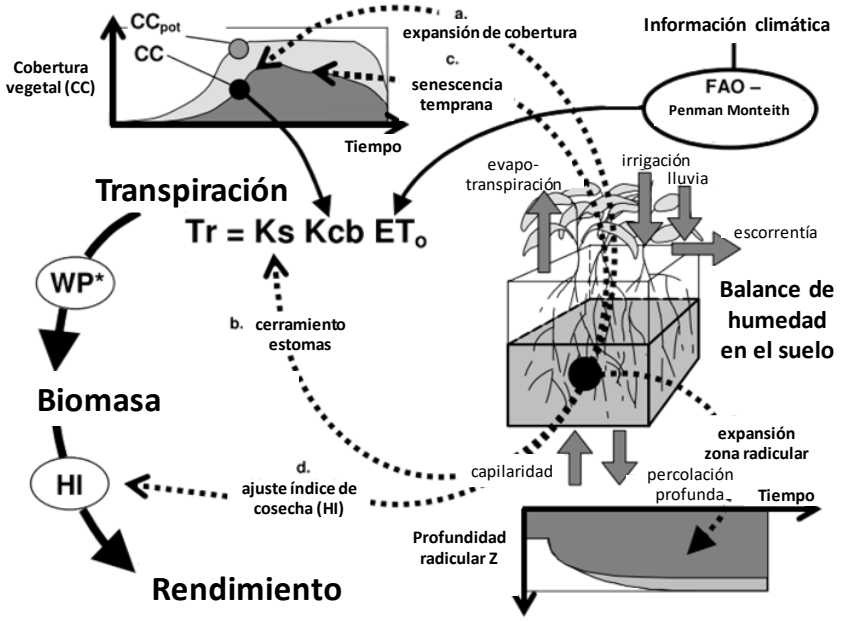


Figura 3-6. Representación esquemática de la respuesta del cultivo al estrés hídrico (Adaptado de Raes et al., 2011)

1. *Balance del agua en el suelo*: determina la cantidad de agua almacenada en la zona radicular, contabilizando los flujos de agua entrante y saliente. El crecimiento del cultivo no se ve afectado y no hay estrés hídrico ($K_s = 1$) entre el nivel de capacidad de campo (FC) y el nivel superior de agotamiento de la zona de raíz. En el otro extremo, entre el umbral inferior en el agotamiento de la zona de raíz y el punto de marchitamiento permanente hay tensión total ($K_s = 0$) y el crecimiento del cultivo se ve completamente impactado. A medida que se reduce el agua almacenada en el volumen de control del suelo, el coeficiente de estrés disminuye.
2. *Expansión de la cobertura vegetal*: Se simula el efecto del déficit hídrico en la expansión de la cobertura, mediante la reducción del coeficiente de crecimiento vegetal (CGC) por el coeficiente de estrés hídrico para la expansión de cobertura $K_{s,exp,w}$, y modificando el coeficiente de disminución de cobertura por coeficiente de estrés hídrico de senescencia temprana $K_{s,sen}$.
   Por una parte, cuando el agotamiento de la zona radicular está por debajo de los umbrales superiores de contenido de agua, $K_{s,exp,w}$ se hace menor que 1 y la cobertura reduce su tasa de expansión. Cuando el agotamiento de la zona radicular está por debajo del límite inferior, $K_{s,exp,w} = 0$ y se detiene el desarrollo de la cobertura. Por otra parte, cuando el estrés hídrico es severo (agotamiento de la zona radicular cerca del punto de

marchitamiento permanente), se desencadena la senescencia temprana. El grado de senescencia está descrito por $K_{s,sen}$. La cobertura vegetal máxima no puede ser alcanzada bajo condiciones de estrés hídrico, o podría alcanzarse en una última etapa de la temporada, como se muestra en la Figura 3-8.

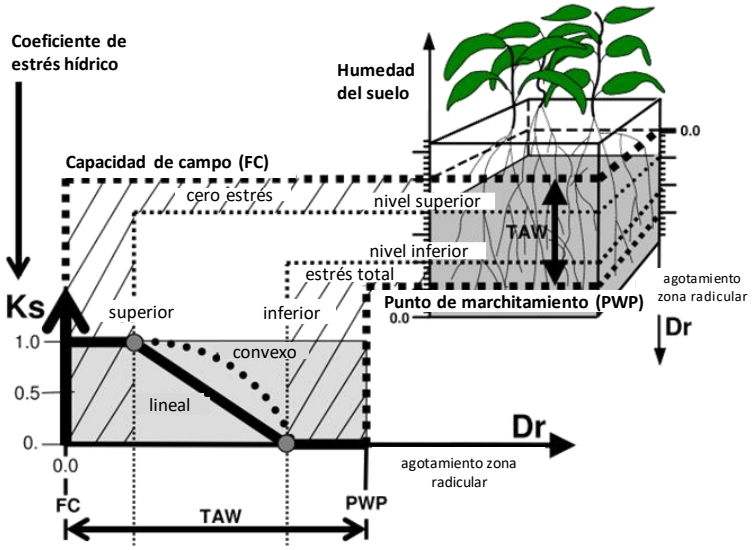


Figura 3-7. Representación esquemática del coeficiente de estrés hídrico (Adaptado de Raes et al., 2011)

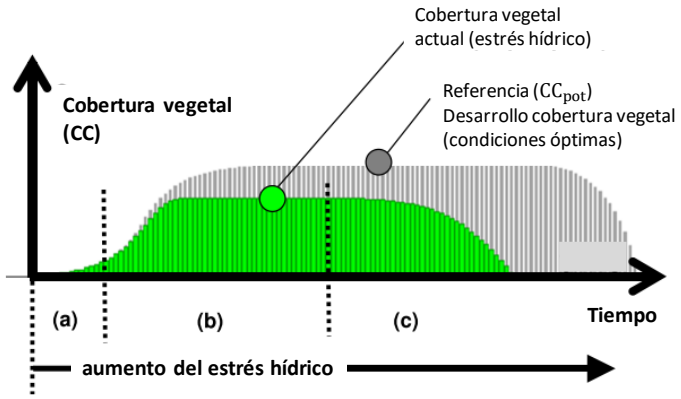


Figura 3-8. Representación esquemática de la expansión de la cobertura vegetal, bajo condiciones óptimas (gris) y bajo estrés hídrico (verde). (Adaptado de Raes et al., 2011)

3. *Transpiración*: se calcula la potencia de evaporación de la atmósfera considerando un coeficiente de cultivo K_{cb} y el coeficiente de estrés hídrico K_s, como se muestra en la ecuación Ec. 3-4. La evapotranspiración potencial (ETo) se calcula usando la ecuación de Penman-Monteith de FAO (Allen et al., 1998).

$$Tr = K_s(K_{cb}CC^*)ETo \qquad \text{Ec. 3-4}$$

El coeficiente de transpiración del cultivo K_{cb} es un parámetro que debe ser ajustado continuamente en función de la cobertura vegetal simulada, con el fin de considerar los efectos de envejecimiento y senescencia.

El efecto del estrés hídrico sobre la transpiración del cultivo se simula mediante el coeficiente de estrés hídrico K_s. Si el estrés se debe a una escasez de agua, se considera un coeficiente de estrés por cierre estomático $K_{s,sto}$. Si el estrés se debe a un exceso de agua, se considera un coeficiente de estrés hídrico del suelo por anegamiento o aireación deficiente $K_{s,aer}$. Cuando el contenido de agua en la zona de la raíz cae por debajo del umbral de $K_{s,sto}$, o está por encima del umbral de $K_{s,aer}$, el coeficiente de estrés se vuelve menor que 1 y la transpiración del cultivo disminuye.

4. *Biomasa arriba de la superficie*: La relación entre la biomasa producida y el agua consumida por un cultivo específico se conoce como la productividad del agua (WP), la cual tiende a ser lineal para una condición climática dada, como se muestra en la ecuación Ec. 3-5. Para incluir condiciones climáticas alteradas, se emplea la productividad del agua normalizada WP^{**} en la simulación del desarrollo de biomasa sobre el suelo. Utilizando el parámetro normalizado, el modelo puede aplicarse a diferentes regiones y estaciones. La normalización se realiza para la concentración atmosférica de CO_2 y la demanda evaporativa de la atmósfera (Raes et al., 2011).
5. La producción de biomasa arriba de la superficie se calcula, para un paso de tiempo diario, de la siguiente manera:

$$B = K_{sb} WP^* \sum_i \frac{Tr_i}{ETo_i} \qquad \text{Ec. 3-5}$$

en donde la productividad del agua normalizada WP^* se multiplica por la relación entre la transpiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia del día de cálculo $\frac{Tr_i}{ETo_i}$ (expresión que se agrega durante todo el periodo de desarrollo del cultivo), y por el coeficiente de estrés por temperatura K_{sb}. Este coeficiente decrece a medida que la temperatura disminuye, y alcanza un valor de cero cuando hace demasiado frío y se detiene el crecimiento vegetal.

6. *Rendimiento*: Como se mencionó anteriormente, el rendimiento se calcula de multiplicar la biomasa sobre el suelo por un índice de cosecha, que depende del tipo de cultivo. Para considerar el estrés hídrico, debe ajustarse el índice de cosecha de su valor de referencia HI_o en condiciones óptimas, a su valor en condiciones reales, mediante la inclusión del factor f_{HI}:

$$Y = f_{HI} * HI_o * B \qquad \text{Ec. 3-6}$$

El índice de cosecha puede ajustarse al déficit hídrico y a las variaciones de la temperatura del aire, y depende de la etapa del cultivo y la intensidad del estrés durante la temporada de crecimiento.

4 Modelo para el Maíz Blanco

En esta sección se describe la información requerida para aplicar el modelo de respuesta al agua del cultivo de maíz blanco[3]. La información de entrada se agrupa en variable climáticas, variables del cultivo y suelo.

4.1 Clima: Series meteorológicas diarias

Las variables climáticas requeridas por el modelo son series diarias de precipitación, temperatura máxima, media y mínima, evapotranspiración y concentración anual estimada de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera. Estas variables son el resultado de la simulación estocástica de series meteorológicas. El método de generación de clima empleado en este estudio, y los resultados obtenidos, pueden ser consultados en el Producto 4 de esta consultoría: *Información meteorológica actualizada en Antioquia y Tolima.* A continuación, se hace un breve resumen de la metodología y resultados.

4.1.1 Series diarias de precipitación y temperatura

La metodología de generación estocástica de series de clima empleada utiliza distribuciones de probabilidad para definir conjuntos de datos climáticos históricos y estimar la probabilidad de ocurrencia de un determinado valor de precipitación o temperatura fuera del rango de observaciones históricas. La metodología toma cada día o grupo de 10 días del año hidrológico en un análisis separado, y encuentra la distribución de probabilidad que se ajusta mejor a los registros históricos. Posteriormente, se generan números aleatorios para la precipitación diaria y la temperatura para un determinado número de años de simulación, usando los parámetros de las distribuciones seleccionadas. Estas series generadas aleatoriamente se correlacionan en el tiempo y en el espacio para representar las condiciones climáticas de la región de análisis.

Para el caso de Antioquia y Tolima, se generaron series estocásticas de precipitación y temperatura para 1,000 años equivalentes. Estos 1,000 años de series de precipitación y temperatura (máxima, mínima y media) no corresponden a un pronóstico, sino que son valores aleatorios provenientes de un modelo probabilista representativo del clima del área de estudio, con el fin de proveer condiciones no observadas en la historia acerca sobre posibles eventos climáticos extremos. Este enfoque tiene la ventaja de simular valores atípicos extremos de precipitación o temperatura, lo que significa que las series modeladas incluyen valores que, si bien no han sido observados, pueden ocurrir, con una baja probabilidad, en el futuro.

[3] Es importante resaltar que la producción de maíz blanco o amarillo requiere de las mismas características edáficas, hídricas y térmicas, por lo tanto, para evaluar la respuesta del cultivo, se utiliza un modelo general de maíz que aplica para ambos tipos.

Como ejemplo, la Figura 4-1 presenta series de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima para una ubicación arbitraria en Tolima, para dos años seleccionados del conjunto de simulaciones y para la duración típica del Ciclo B.

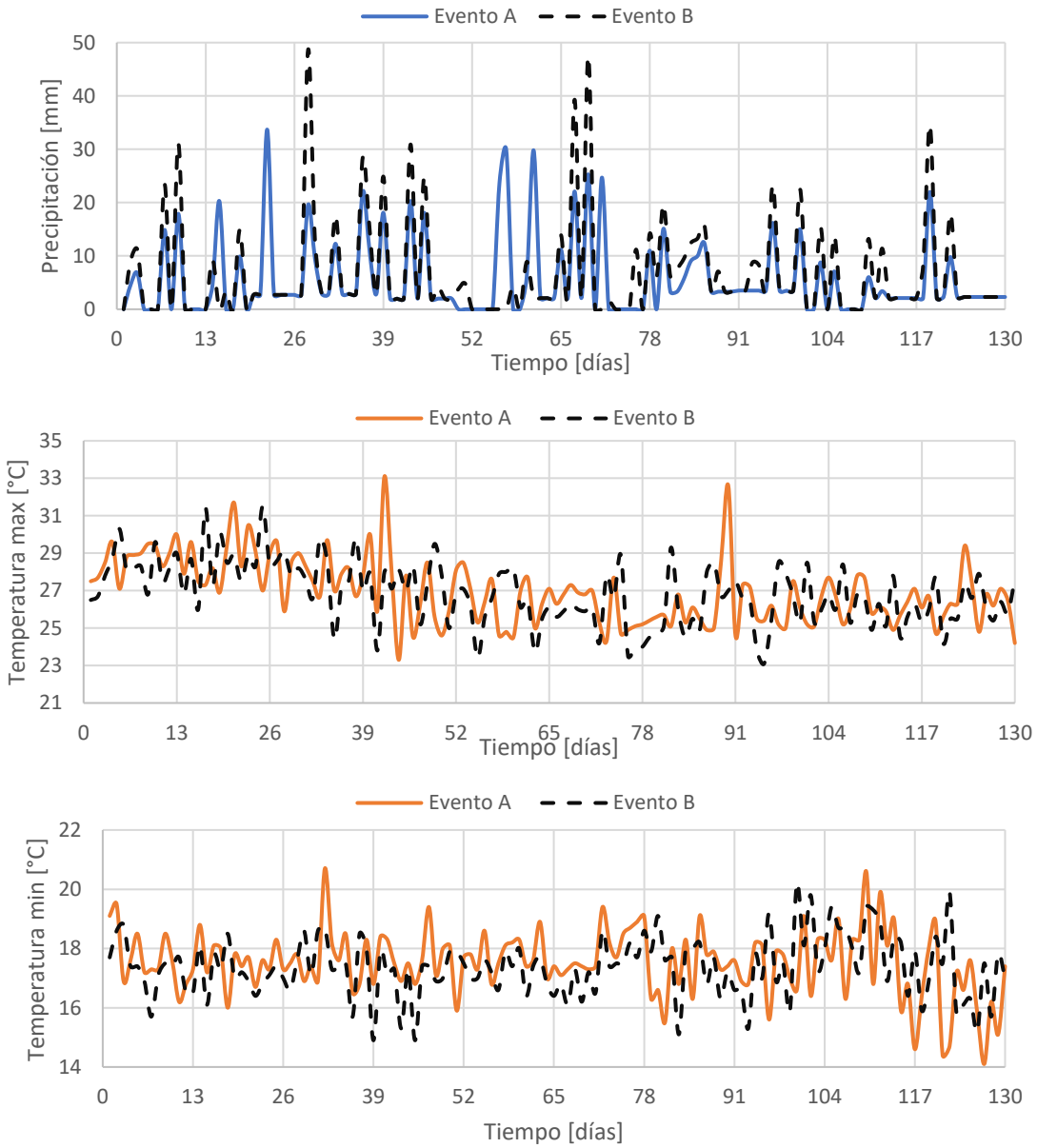


Figura 4-1. Comparación de series de parámetros climáticos para dos eventos simulados, para el ciclo productivo B: precipitación total diaria, temperatura máxima y mínima diarias.

4.1.2 Series diarias de evapotranspiración

El cálculo de la evapotranspiración de referencia, que también es un parámetro de entrada al modelo de respuesta al agua, se hace siguiendo el documento: *Crop evapotranspiration:*

Guidelines for computing crop requirements (Allen et al., 1998), que es el método más ampliamente usado a nivel internacional y el recomendado por FAO.

Es importante señalar que la evapotranspiración de referencia (ET_0) es diferente a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) y a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c\,aj}$). La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) considera características particulares según el tipo de cultivo que se esté evaluando (resistencia del cultivo, albedo, anatomía de las hojas, características de los estomas, propiedades aerodinámicas, entre otros). Por otro lado, la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c\,aj}$) considera cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes a condiciones óptimas de suelo y agua, presencia de enfermedades o fertilización que implican cambios en el rendimiento de la cosecha. Sin embargo, como base se requiere la evapotranspiración de referencia, que se obtiene también de las simulaciones climáticas realizadas.

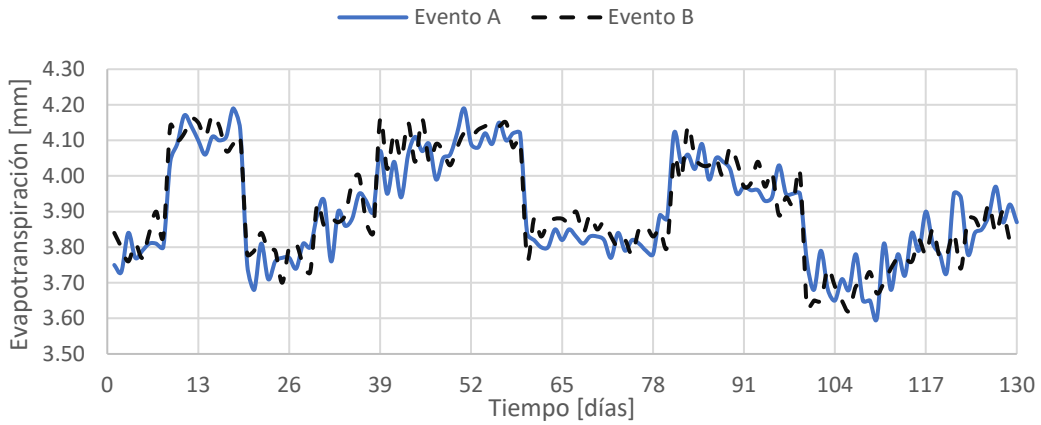


Figura 4-2. Comparación de los valores diarios de evapotranspiración de referencia para dos eventos simulados, para un ciclo B.

4.1.3 Concentración de dióxido de carbono

Como se mencionó en la Sección 3.1.1, el modelo de AquaCrop considera el efecto de la concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera, dada su importancia en los procesos metabólicos de la vegetación. En el proceso de fotosíntesis, las platas capturan el CO_2 de la atmósfera y lo reducen a carbono, que usan como sustento (junto con hidrógeno y oxígeno). Bajo concentraciones más altas de CO_2, la mayoría de las especies de plantas muestran un incremento en su tasa de fotosíntesis, mayor crecimiento, menor uso de agua y menor concentración de nitrógeno y proteínas en sus tejidos (Taub, 2010). Es decir que el aumento de las concentraciones de CO_2 en la atmósfera puede potencialmente reflejarse en una mayor producción, pero con menor calidad de producto.

Para el caso de la evaluación prospectiva, se utiliza la concentración de CO_2 media anual para 2017 que es 404.99 ppm[4] (Dlugokencky & Tans, 2018). Para la evaluación de los modelos con cambio climático se usan las proyecciones de concentración de dióxido de carbono según el escenario de RCP (trayectoria representativa de concentración) analizado, como se muestra en la Figura 4-3.

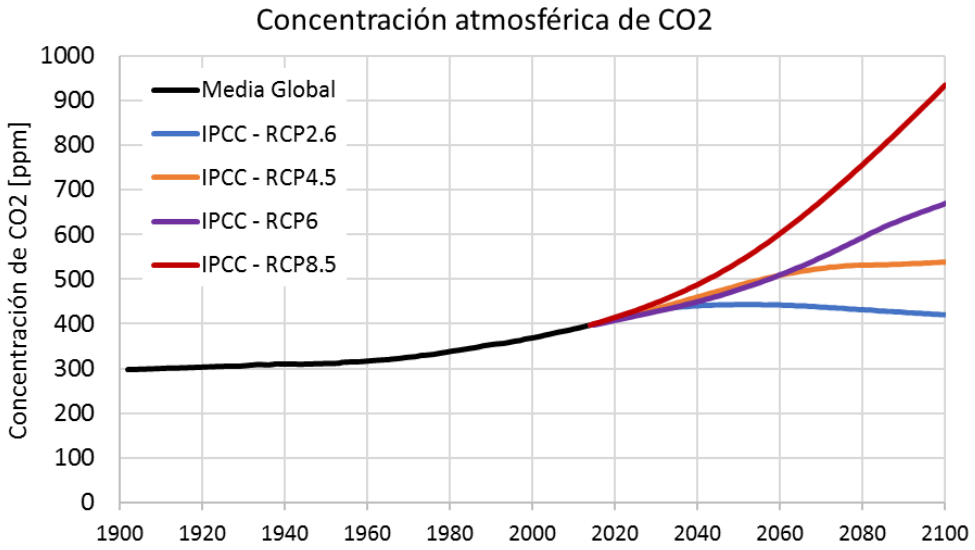


Figura 4-3. Concentraciones medias anuales de CO_2 proyectadas según escenarios del Assessment Report 5 del IPCC (Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IPCC AR5 (Dlugokencky & Tans, 2018))

En el Anexo A. 2 se presentan los valores de concentración de dióxido de carbono media global para la serie medida entre 1980 y 2017 y las proyecciones hasta el año 2100. Los valores de concentración media global de CO_2 en la atmósfera son medidos en el observatorio Mauna Loa en Hawái, dada su ubicación que asegura un aire puro alejado de fuentes de contaminación. Estudios de clima global y cambio climático prefieren este tipo de mediciones como insumo a modelos de circulación, dado que reflejan las concentraciones promedio de la atmósfera global.

4.1.4 Cambio climático

Como valor agregado a este estudio, se incluyeron proyecciones de cambio climático con el fin de determinar la incidencia de los posibles cambios de largo plazo en precipitación y temperatura en el rendimiento del maíz blanco. En base a la información disponible, se seleccionó el modelo HadGEM2-AO (Collins et.al. 2008), con el cual se proyectaron los cambios de largo plazo para los 4 RCPs definidos por el IPCC. Adicionalmente, se incorporaron las proyecciones dadas por el IDEAM en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (Ruiz et.al. 2015), obtenidas a

[4] Ver ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2_annmean_gl.txt

partir de un ensamble multimodelo. De esta manera, los rendimientos sintéticos presentados en este informe fueron calculados considerando 6 climas diferentes:

- *Clima base:* clima actual, caracterizado por la climatología histórica, no perturbado por cambio climático.
- *RCP 2.6*: clima descrito por el modelo HadGEM2-AO para el RCP 2.6 (escenario optimista de emisiones de gases de efecto invernadero).
- *RCP 4.5*: clima descrito por el modelo HadGEM2-AO para el RCP 4.5.
- *RCP 6*: clima descrito por el modelo HadGEM2-AO para el RCP 6.
- *RCP 8.5*: clima descrito por el modelo HadGEM2-AO para el RCP 8.5 (escenario pesimista de emisiones de gases de efecto invernadero – *business as usual*).
- *CC IDEAM*: clima descrito según lo proyectado por IDEAM en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.

4.2 Cultivos: Parámetros agronómicos

La información de entrada también incluye las variables necesarias para parametrizar el cultivo de MBT, según los requerimientos del modelo AquaCrop. A continuación, se presenta una descripción detallada de los diferentes parámetros y sus unidades. También se incluyen valores por defecto para aquellos parámetros que son independientes al MBT o al tipo de suelo. Para mayor información sobre los parámetros que utilizar Aquacrop se recomienda consultar el manual de usuario y artículos publicados por los autores del modelo (Allen et al., 1998; FAO, 2017; Raes et al., 2017; Raes et al., 2011; Steduto et al., 2012).

4.2.1 Tipo de parámetros de cultivos

Los parámetros del cultivo de maíz utilizado en el modelo de respuesta al agua se clasifican como parámetros conservativos y parámetros no conservativos, como se explica a continuación.

Parámetros conservativos:

Son aquellos que no sufren variaciones considerables en el tiempo, bajo diferentes condiciones de manejo, por ubicación geográfica o clima. Se supone que no cambian entre tipo de cultivos. Algunos de estos parámetros incluyen los umbrales de estrés y productividad hídrica normalizada de biomasa.

En la Tabla 4-1 se muestra la lista de parámetros conservativos que definen las condiciones iniciales del modelo de AquaCrop. Para este estudio el modelo de respuesta del cultivo (MBT) al agua se limita a evaluar condiciones de estrés asociado al clima (falta de agua en el desarrollo de la planta, anegamiento o estrés por temperatura), y no incluye procesos de estrés por fertilidad o salinidad del suelo.

Tabla 4-1. Parámetros que definen el modelo de AquaCrop.

Variable	Descripción	Valor
Tipo del cultivo	1: Vegetales de hoja 2: Frutales/Granos 3: Tubérculos y raíces	2
Determinación del ciclo de crecimiento	0: Grados crecimiento GDD 1: Días calendario	1
Método de siembra	0: Trasplante 1: Siembra directa	1
Respuesta de la expansión de la cobertura Respuesta de la expansión máxima de la cobertura Respuesta de la productividad hídrica	Aplica para modelación de la fertilidad del suelo	25 (No se considera)
Respuesta del declive de la cobertura Respuesta del cierre de estomas		
Conductividad eléctrica del suelo en la que el cultivo empieza a afectarse Conductividad eléctrica del suelo en la que el cultivo detiene su desarrollo	Aplica para modelación de la salinidad del suelo	-9 (No se considera)

La Tabla 4-2 muestra otro conjunto de parámetros que son independientes del tipo de cultivo o método de siembra. Para todos estos parámetros se presentan los valores adoptados por defecto que se aplican en este estudio, según las recomendaciones publicadas por los autores del modelo de AquaCrop, por la FAO e investigadores (Allen et al., 1998; Raes et al., 2017; FAO, 2018; Monfreda et al., 2008).

Tabla 4-2. Parámetros conservativos de cultivos considerados en este estudio

Variable	Descripción	Valor
Disminución de factores de agua en suelo se ajusta por ETo	1: Ajuste por ETo	1
Acumulado de ETo durante periodo de estrés a ser excedido antes que se dispare la senescencia	0: No se considera	0
Estrés por fertilidad del suelo considerado para la calibración	Porcentaje [0,100]	50
Máxima extracción de agua en el cuarto superior de la zona radicular	m3/m3/día	0.048
Máxima extracción de agua en el cuarto interior de la zona radicular	m3/m3/día	0.012
Máxima disminución de CGC entre estaciones	-9: No aplica	-9
Número de estaciones en el que se alcanza la máxima disminución de CGC	-9: No aplica	-9
Factor de forma para la disminución del CGC	-9: No aplica	-9
Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2 durante formación de cosecha	Porcentaje [0,100]	100 frijol: 90
Desempeño del cultivo bajo concentraciones elevadas de CO2	Porcentaje [0,100]	50
Distorsión de la cobertura por estrés debido a salinidad del suelo	Rango: 0: ninguno a 100: muy fuerte	25
Respuesta calibrada del estrés de estomas por salinidad del suelo	Rango: 0: ninguno a 200: extremo	100

Los valores asignados a los parámetros conservativos del cultivo de MBT son aquellos que los autores de la metodología de la FAO recomiendan y se consideran los valores de referencia para aplicar la metodología. Estos son valores que han demostrado buenos resultados en múltiples evaluaciones en el mundo al calibrar los resultados del modelo con mediciones en campo.

Parámetros específicos y no conservativos:

Son aquellos que requieren un ajuste según tipo de cultivo o condiciones ambientales diferentes a los definidos en la calibración. Estos son los parámetros que se deben conocer para conformar la base de datos de cultivo de MBT que mejor se ajusta a las condiciones del área de estudio.

La Tabla 4-3 muestra los parámetros específicos del cultivo de maíz agrupados por categorías: parámetros afectados por el método de siembra, parámetros fenológicos o parámetros afectados por las condiciones del suelo. Estos mismos parámetros se presentan de forma esquemática en la Figura 4-4, en un diagrama que representa la curva del crecimiento en el tiempo, de la cobertura verde de la planta (zona verde) y del sistema radicular (zona anaranjada). En este diagrama se señalan los tiempos para alcanzar cada una de las etapas fenológicas medidas desde el momento de la siembra. También se señalan los valores de crecimiento máximo potencial de la cobertura (CCx) y la profundidad máxima potencial que pueden alcanzar las raíces (Zx).

Tabla 4-3. Parámetros específicos del cultivo por categoría

Parámetros afectados por método de siembra y manejo	Método de siembra: Siembra directa o trasplante.
	Densidad de plantas: determina la cobertura inicial (CC_0) y máxima (CC_x)
	Tiempo para alcanzar el 90% de germinación.
Fenología de cultivos	Tiempo para alcanzar la cobertura máxima (CC_x)
	Tiempo para inicial senescencia
	Tiempo para alcanzar la madurez fisiológica
	Tiempo para el inicio de floración/formación de cosecha
	Duración de la floración
Parámetros afectados por las condiciones del suelo	Profundidad máxima efectiva de zona radicular (Z_x)
	Tasa de profundización de raíces o tiempo para alcanzar profundidad máxima (Z_x)

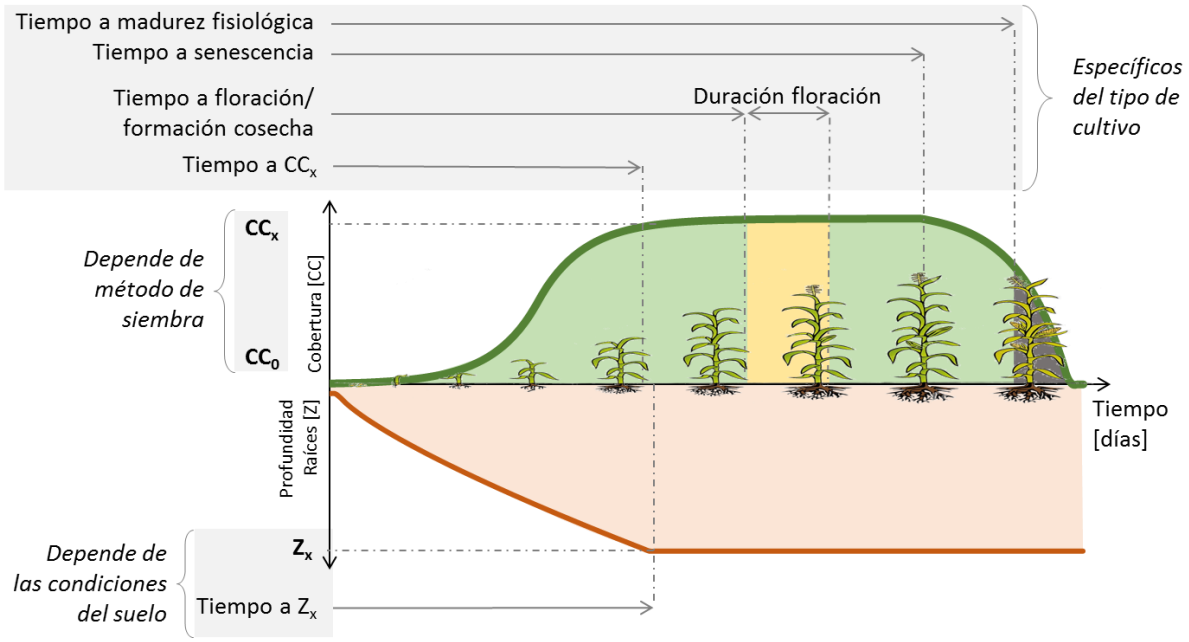


Figura 4-4. Parámetros de cultivos que dependen del tipo de planta y condiciones ambientales (FAO, 2017)

Otros parámetros específicos del tipo del cultivo se presentan en la Tabla 4-4. Estos parámetros se deben definir para el cultivo de maíz y se considera en el análisis de vulnerabilidad.

Tabla 4-4. Parámetros específicos según tipo de cultivo

Símbolo	Variable	Descripción
	Producción del cultivo asociada a floración	0: No asociado 1: Asociado
Tbase Tupper GDD_lo	Temperatura base, por debajo no crece el cultivo (estrés frío) Temperatura máxima, por encima no crece el cultivo (estrés calor) Mínimos grados de crecimiento para transpiración completa	en °C en °C en GDD (grado crecimiento)
Do Ao CCx	Plantas por hectárea Superficie de suelo cubierta por una planta a 90% de germinación Cobertura verde máxima	# plantas/ha cm^2/ha fracción [0,1]
dT.GDD d.germinacion d.flor d.flores d.sen d.mad d.Zx	Duración del ciclo de crecimiento completo Tiempo desde siembra hasta germinación Tiempo desde siembra hasta floración Duración de etapa de floración Tiempo desde siembra hasta inicio de senescencia Tiempo desde siembra hasta madurez Tiempo desde siembra hasta máxima profundidad radicular	en GDD (grado crecimiento) -9: Si modelo usa días calendario En # días calendario o GDD (grado crecimiento) -1: Cultivos permanentes
Zn Zx n	Profundidad de raíces mínima efectiva Profundidad de raíces máxima efectiva Factor de forma para el crecimiento radicular	en metros en metros [-]
Kcbx	Coeficiente del cultivo Factor de disminución de coeficiente del cultivo, como resultado de edad, deficiencia de nitrógeno, etc.	Sin unidades # %/día 0.15 o 0.3

Símbolo	Variable	Descripción
CGC	Coeficiente de crecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)
CDC	Coeficiente de decrecimiento de la cobertura	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)
HI_0	Índice de Cosecha de referencia	Porcentaje [0,100]
dHI	Aumento potencial del Índice de cosecha	Porcentaje [0,100] -9: No aplica
p exp,upper	Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]
p exp,lower	Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura	Umbral inferior fracción [0,1]
Ks exp,w	Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por expansión de la cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta
p sto	Factor de disminución de agua en suelo para control de estomas	Umbral superior fracción [0,1]
Ks sto	Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por control de estomas	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta
p sen	Factor de disminución de agua en suelo para senescencia de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1]
Ks sen	Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por senescencia de cobertura	> 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta
p pol	Factor de disminución de agua en suelo por polinización	Umbral superior fracción [0,1]
	Punto anaerobio en el cual ocurre aireación deficiente	%Vol 0: Arroz 5: Otros cultivos tolerantes a encharcamiento
f cc	Efecto de la cobertura en la reducción de evaporación del suelo en la etapa final	Porcentaje [0,100]
d.cos	Exceso de frutas potenciales Tiempo desde floración hasta alcanzar el índice de cosecha	Porcentaje [0,100] # días
WP*	Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2	g/m2 Cultivo tipo C3: entre 13 y 18 C4: entre 28 y 33
f yield	Coeficiente que describe el impacto positivo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha Coeficiente que describe el impacto negativo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha Incremento máximo permitido de in HI especificado	[-] -9: No aplica [-] -9: No aplica Porcentaje [0,100] -9: No aplica

Los valores de los parámetros no conservativos se determinan a partir de estudios en campo, en los que se evalúan las condiciones de crecimiento de la planta bajo diferentes escenarios de disponibilidad hídrica. Para el caso específico de Antioquia y Tolima, se utilizaron los parámetros para maíz, adaptados a las condiciones agrometeorológicas de Colombia, propuestos por Bernal et.al. (2013) con el apoyo de la FAO y de Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) (ver Tabla 4-5).

Tabla 4-5. Parámetros del cultivo de maíz. (Bernal et al. ,2013)

Variable	Descripción	Maíz
Producción del cultivo asociada a floración	0: No asociado 1: Asociado	1
Temperatura base, por debajo no crece el cultivo (estrés frío) Temperatura máxima, por encima no crece el cultivo (estrés calor) Mínimos grados de crecimiento para transpiración completa	en °C en °C en GDD (grado crecimiento)	8 30 12
Plantas por hectárea Superficie de suelo cubierta por una planta a 90% de germinación Cobertura verde máxima	# plantas/ha cm^2/ha fracción [0,1]	62,500 6.5 0.90
Duración del ciclo de crecimiento completo	en GDD (grado crecimiento)	-9
Tiempo desde siembra hasta germinación Tiempo desde siembra hasta floración Duración de etapa de floración Tiempo desde siembra hasta inicio de senescencia Tiempo desde siembra hasta madurez	En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	8 64 10 90 100
Tiempo desde siembra hasta máxima profundidad radicular		110
Profundidad de raíces mínima efectiva Profundidad de raíces máxima efectiva Factor de forma para el crecimiento radicular	en metros en metros [-]	0.15 0.35 13
Coeficiente del cultivo Factor de disminución de coeficiente del cultivo, como resultado de edad, deficiencia de nitrógeno, etc. Coeficiente de crecimiento de la cobertura Coeficiente de decrecimiento de la cobertura	Sin unidades # %/día 0.15 o 0.3 En # días calendario o GDD (grado crecimiento) En # días calendario o GDD (grado crecimiento)	1.05 0.3 0.181 0.124
Índice de Cosecha de referencia Aumento potencial del Índice de cosecha	Porcentaje [0,100] Porcentaje [0,100] -9: No aplica	0.40 0
Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura Factor de disminución de agua en suelo para expansión de la cobertura Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por expansión de la cobertura	Umbral superior fracción [0,1] Umbral inferior fracción [0,1] > 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	0.14 0.72 2.9
Factor de disminución de agua en suelo para control de estomas Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por control de estomas	Umbral superior fracción [0,1] > 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	0.69 6
Factor de disminución de agua en suelo para senescencia de la cobertura Factor de forma para coeficiente de estrés hídrico por senescencia de cobertura	Umbral superior fracción [0,1] > 0; 3 si no hay datos si =0 línea recta	0.69 2.7
Factor de disminución de agua en suelo por polinización	Umbral superior fracción [0,1]	0.8
Punto anaerobio en el cual ocurre aireación deficiente	%Vol	5
Efecto de la cobertura en la reducción de evaporación del suelo en la etapa final	Porcentaje [0,100]	50
Exceso de frutas potenciales Tiempo desde floración hasta alcanzar el índice de cosecha Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2	Porcentaje [0,100] # días g/m2	50 51 33.7

Variable	Descripción	Maíz
Coeficiente que describe el impacto positivo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	7
Coeficiente que describe el impacto negativo en HI por cierre de estomas durante la formación de la cosecha	[-] -9: No aplica	3
Incremento máximo permitido de in HI especificado	Porcentaje [0,100] -9: No aplica	15

Como ejemplo, la Figuras 4-5 y 4-6 muestran el resultado de la simulación en una unidad cultivada seleccionada arbitrariamente en Tolima, para Ciclo B, ante dos eventos simulados tomados de la colección de series climáticas. La Figura 4-5 muestra la serie de valores en el tiempo de las variables asociadas al flujo de agua en el suelo, como resultado del balance hídrico calculado. Por su parte, la Figura 4-6 muestra el desarrollo del cultivo en términos de múltiples variables relacionadas con este, como la transpiración, cobertura del dosel, la generación de biomasa, o el rendimiento, entre otras.

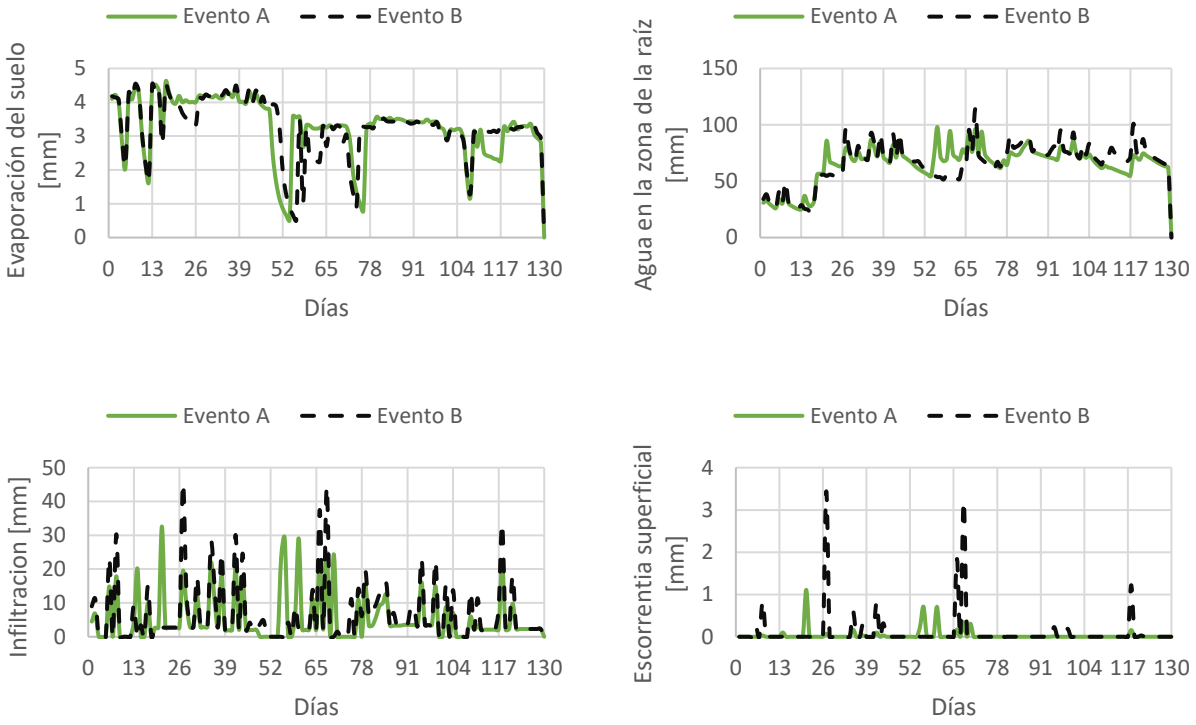


Figura 4-5. Series simuladas de procesos asicados al balance hídrico en el suelo.

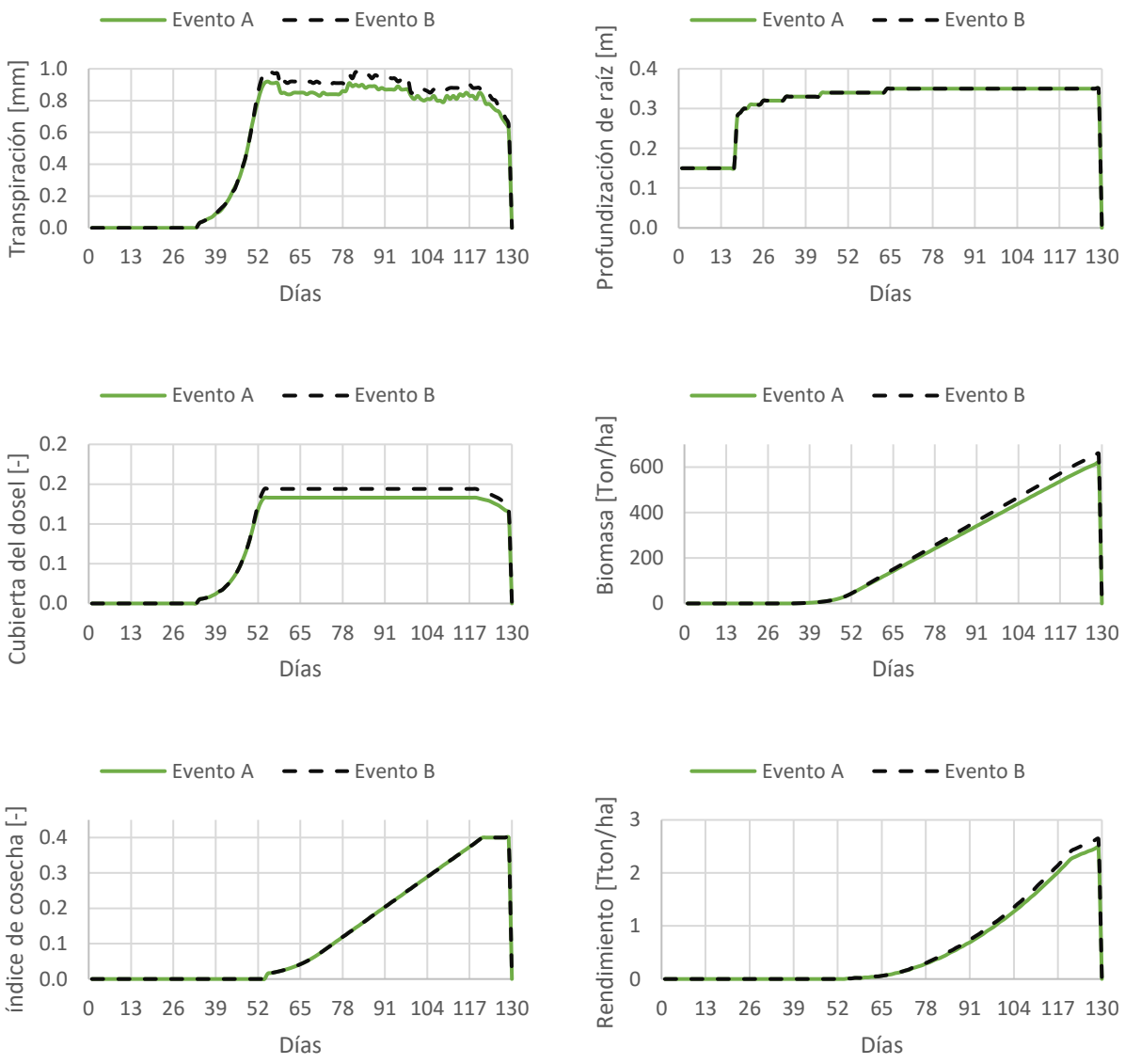


Figura 4-6. Series simuladas asociadas al desarrollo del cultivo.

4.3 Suelo: Características agronómicas

El modelo aplicado toma un volumen de referencia del suelo en la zona radicular, y estima su balance hídrico para determinar la cantidad de agua que tiene disponible la planta. Con esto se evalúan las interacciones suelo-planta-atmósfera que permiten modelar el crecimiento de cultivos y su rendimiento. La información requerida incluye el tipo de suelo, textura, perfil en profundidad y nivel freático.

Dada la escala del modelo desarrollado para maíz blanco en Antioquia y Tolima no se incluyen parámetros de afectación local como presencia de múltiples horizontes de suelo o variaciones en el nivel freático. En el caso del perfil de suelo se supone un perfil homogéneo para la profundidad máxima que alcanzan las raíces del maíz, y no se considera la presencia de barreras físicas que limiten su profundización.

4.3.1 Almacenamiento y disponibilidad de agua en el suelo

Los parámetros necesarios para estimar la capacidad de suelo de almacenar y retener agua se ilustran en la Figura 4-7. Dependiendo del nivel del agua en el suelo, se define la disponibilidad del agua para la planta. El volumen de agua en el volumen de control se determina por medio de un balance hídrico, en donde se establecen los volúmenes de escorrentía, infiltración, evaporación y percolación. Se observan los diferentes niveles de humedad del suelo que son relevantes en la modelación. La capacidad efectiva de retener el agua es la capacidad de campo, que es menor al nivel de saturación total del suelo. Humedades mayores a la capacidad de campo no son aprovechadas por la planta. La humedad en esta región se pierde por consumo de la planta y procesos de percolación profunda, lo cual puede llevar la humedad hasta el punto de marchitamiento permanente, debajo del cual la planta entra en estrés hídrico total, a menos que nueva precipitación o riego permitan la recarga del volumen de suelo.

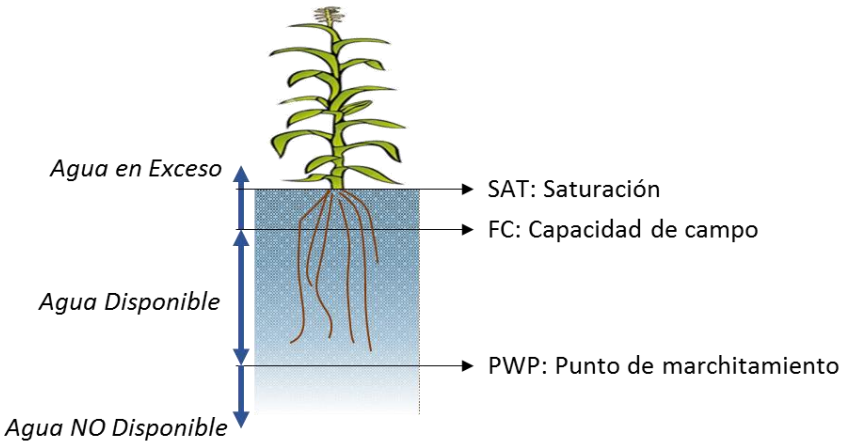


Figura 4-7. Esquema de la disponibilidad del agua en el suelo

La capacidad de retener el agua en el suelo depende en gran medida de su textura. Como el suelo es un medio poroso, dependiendo del tamaño de los espacios entre partículas está en capacidad de almacenar más o menos agua. El tamaño de las partículas del suelo, o textura se define según su contenido de arena, limo y arcilla. Es así como suelos arenosos tienen poca capacidad de retener agua por su estructura de partículas gruesas con macroporos[5]. Por otro lado, suelos de

[5] Se entiende como poro el espacio entre partículas de suelo. En suelos de partículas gruesas como las arenas, los poros son de mayor tamaño que en suelos de partículas finas como las arcillas.

partículas finas retienen el agua en microporos y tienen una mayor capacidad de campo (Sheppard & Hoyle, 2018). Esta relación se puede ver de forma esquemática en la Figura 4-8, en la que se presenta el porcentaje de volumen de agua para la capacidad de campo según la textura de suelo, desde arenas con partículas gruesas hasta arcilla de partículas finas. Se puede ver como la capacidad campo y el volumen total de agua disponible aumentan a medida que las partículas de suelo son más finas. Para que el agua esté disponible para las plantas, el contenido de agua en el suelo debe mantenerse sobre el punto de marchitamiento. El punto de marchitamiento también aumenta en la medida que la textura del suelo es más fina. Esto se debe a que, aunque hay mayor volumen de agua retenida en el suelo fino, la fuerza que se ejerce para mantener el agua en los microporos es muy alta y las plantas no tienen capacidad de succionarla. Entonces, para propósitos agrícolas es preferible cultivar en suelos de textura media, tipo francos o francos limosos, que presentan un balance entre su capacidad de almacenamiento y su conductividad hidráulica.

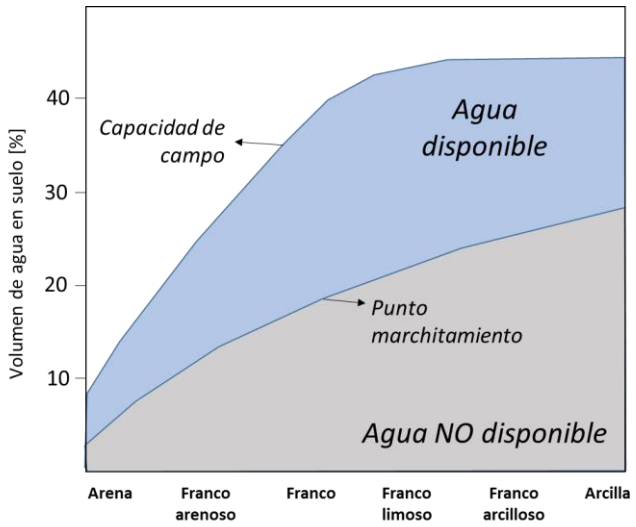


Figura 4-8. Esquema de retención de agua según tipo de suelo (Sheppard & Hoyle, 2018)

Los valores de contenido volumétrico de agua en el suelo para condiciones de saturación, capacidad de campo y punto de marchitamiento, deben ser determinados a partir de evaluaciones locales. En este caso no se cuenta con esta información por lo cual se optó por usar los valores de referencia propuestos por los autores del modelo AquaCrop (Raes et al., 2011). Los valores utilizados y se presentan en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6. Valores de parámetros de contenido volumétrico de agua por defecto en el modelo AquaCrop

Tipo suelo	SAT [%vol]	FC [%vol]	PWP [%vol]
Arena	36	13	6
Arenoso franco	38	16	8
Franco arenoso	41	22	10
Franco	46	31	15
Franco limoso	46	33	13
Limoso	43	33	9
Franco arcillo arenoso	47	32	20
Franco arcilloso	50	39	23
Franco arcillo limoso	52	44	23
Arcillo arenoso	50	39	27
Arcillo limoso	54	50	32
Arcilla	55	54	39
Impermeable	0.5	0.3	0.1

La determinación de la textura del suelo se hace a partir de las fracciones de arcilla, limo y arenas que lo compongan. Esta clasificación se esquematiza en el triángulo de clase textural del suelo, publicado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA. Este esquema se presenta en la Figura 4-9.

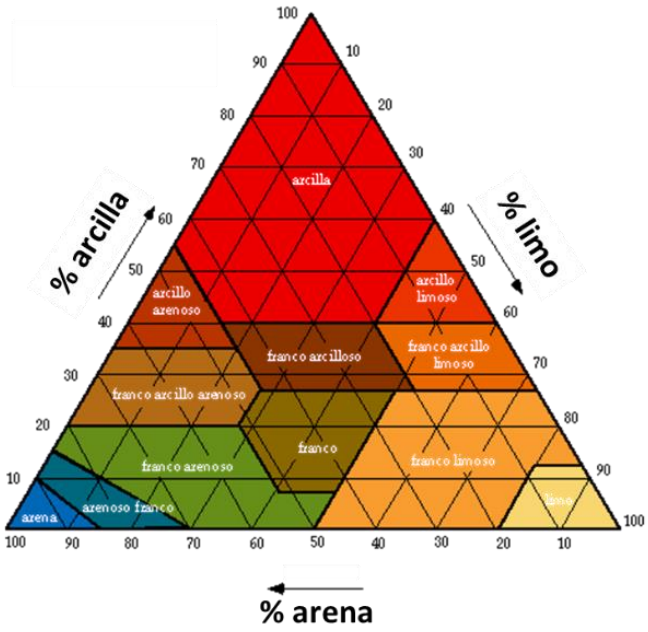


Figura 4-9. Triángulo de clases texturales básicas de suelos según el tamaño de partículas. Elaborado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

Para definir las características del suelo en Antioquia y Tolima, se consultó la información publicada en la página oficial del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC[6], en donde se presentan Unidades de Clasificación de Suelos (UCS) para todos los departamentos del país. No obstante, en la información disponible para las diferentes UCS no se encuentra la clasificación de textura ni información suficiente para inferirla. Por esta razón, la información de las texturas de suelo fue obtenida de la Harmonized World Soil Database – HWSD, la cual contiene información estandarizada para la clasificación de texturas de suelo con resolución de 1km a nivel mundial (Nachtergaele et al., 2009). En la Figura 4-10, se observan las texturas de suelo asignadas en los departamentos de estudio.

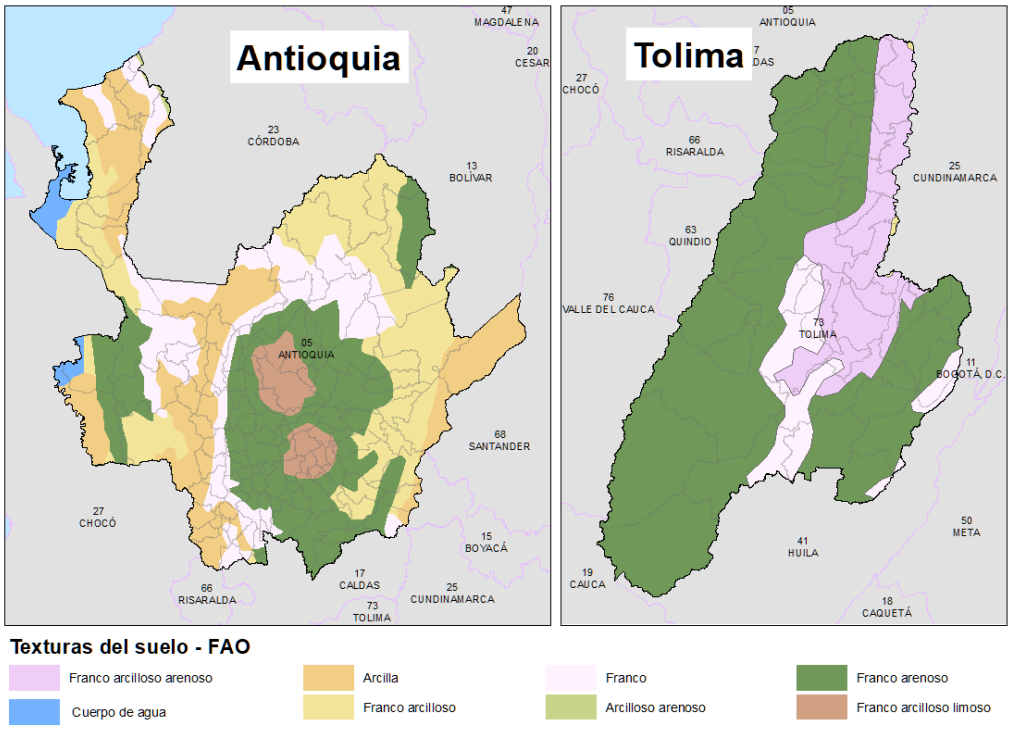


Figura 4-10. Mapas de texturas del suelo para los departamentos de Antioquia y Tolima (FAO, 2020)

4.3.2 Estimación de la escorrentía

Dentro del balance hídrico en el volumen de control del suelo, se deben considerar tanto los flujos de entrada (precipitación, irrigación, capilaridad) como los flujos de salida (escorrentía, evapotranspiración y percolación profunda), y con esto estimar la cantidad de agua almacenada y disponible para la planta. Para calcular el caudal de escorrentía se requiere asignar valores a la

[6] https://www.igac.gov.co/

conductividad hidráulica saturada y el número de curva definido por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos.

La conductividad hidráulica saturada (Ksat) determina el drenaje interno del perfil de suelo, las pérdidas por percolación profunda y la cantidad de agua infiltrada en la zona radicular, y la escorrentía superficial después de la lluvia (Raes et al., 2011). Se usan los valores recomendados por Raes et al., 2011, como se muestra en la Tabla 4-7. Más información sobre cada grupo hidrológico se presenta en la Tabla 4-8.

Tabla 4-7. Valores de parámetros hidrológicos del suelo (Raes et al., 2011)

Tipo suelo	Ksat [mm/d]	Grupo hidrológico
Arena	3000	A
Arenoso franco	2200	A
Franco arenoso	1200	A
Franco	500	B
Franco limoso	575	B
Limoso	500	B
Franco arcillo arenoso	225	C
Franco arcilloso	125	C
Franco arcillo limoso	150	C
Arcillo arenoso	35	D
Arcillo limoso	100	D
Arcilla	35	D
Impermeable	0	D

Tabla 4-8. Capacidad de infiltración según grupo hidrológico del suelo (Soil Conservation Service, 1986, Raes et al., 2011)

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración con humedad alta	Características
A	Rápida	Alta capacidad de infiltración > 76 mm/h
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38 mm/h
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36-13 mm/h
D	Muy Lenta	Capacidad de infiltración < 13 mm/h

El número de curva es un indicador global de la cantidad de agua que será absorbida por los suelos superficiales. Se obtiene como función del uso de la tierra, la cobertura vegetal y las condiciones de infiltración y transpiración del suelo superficial. La metodología del US Soil Conservation Service consiste en calcular el agua perdida por escorrentía (RO) a partir de la precipitación (P) y el agua que se alcanza a infiltrar antes que ocurra el escurrimiento (I_a). Eso se hace a partir del potencial máximo que tiene el suelo de retención de agua (S) que se calcula en función del número de curva (CN). Siguiendo las ecuaciones Ec. 4-1 y Ec. 4-2 se procede a calaular la escorrentía:

$$RO = \frac{[P - I_a]^2}{P + S - I_a} \qquad \text{Ec. 4-1}$$

$$S = 254\left(\frac{100}{CN} - 1\right) \qquad \text{Ec. 4-2}$$

De acuerdo con lo recomendado en la literatura (D. Raes et al., 2017), se considera que $I_a = 0.05S$. Esta condición está implementada en el modelo por defecto. El número de curva se estimó a partir de la textura del suelo, según lo recomendado por Raes et al., 2011. Este es un número de curva inicial, que se ajusta en la modelación en función de la humedad del suelo, es decir, de la capacidad del volumen de control de recibir más agua.

4.3.3 Parámetros de suelos usados en la modelación

Parámetros conservativos:

Son aquellos que no sufren variaciones considerables en el tiempo, bajo diferentes condiciones de manejo, por ubicación geográfica o clima. No cambian significativamente entre tipos de suelo. En la Tabla 4-9 se muestra la lista de parámetros conservativos asignaos a los suelos del modelo. Se usan parámetros recomendados por FAO dada la escala de la modelación, en la cual no es posible incorporar valores puntuales medidos en campo.

Tabla 4-9. Parámetros conservativos del suelo.

Campo	Descripción	Valor	Unidad
EvapZsurf	Espesor de la capa evaporativa del suelo superficial que está en contacto directo con la atmósfera (m)	0.04	[m]
EvapZmin	Mínimo espesor de la capa evaporativa completa del suelo	0.15	[m]
EvapZmax	Máximo espesor de la capa evaporativa completa del suelo	0.3	[m]
Kex	Coeficiente de evaporación máxima del suelo	1.1	[-]
fevap	Factor de forma que describe la reducción en la evaporación con la disminución del contenido de agua en la capa superficial del suelo	4	[-]
fWrelExp	Contenido relativo de agua en la capa superficial del suelo en la cual la profundidad de la capa evaporativa se expande	0.4	[-]
fwcc	Coeficiente que representa la reducción de la evaporación en el suelo por el efecto de protección de las hojas secas caídas	50	[-]
AdjCN	Define si el valor de número de curva (CN) se ajusta diariamente según las condiciones de humedad del suelo.	Si	[-]

Campo	Descripción	Valor	Unidad
zCN	Espesor de la capa de suelo que se usa para calcular el contenido de humedad del suelo para ajustar el CN	0.3	[m]
zGerm	Espesor de la capa de suelo que se usa para calcular el contenido de humedad del suelo y determinar si puede ocurrir la germinación.	0.3	[m]
zRes	Profundidad de una capa restrictiva del suelo que pueda inhibir el crecimiento de las raíces.	No se incluyó	[-]
fshapecr	Factor de forma que describe el efecto de nivel freático superficial en el contenido de agua	16	[-]
Thickness	Espesor (se usa un espesor estándar para todos los tipos de suelo)	3	[m]
NumComp	Número de compartimientos en lo que se divide el espesor total del suelo para hacer cálculos de flujo de agua	10	[-]

Parámetros específicos y no conservativos:

Son aquellos que requieren un ajuste según tipo de suelo, que en el marco de este estudio está asociado a la textura de la capa principal. La Tabla 4-10 muestra la lista de parámetros que son específicos según el tipo de suelo y su uso. Se incluyen parámetros como el Número de Curva que se utiliza para el cálculo de volúmenes de escorrentía, así como parámetros de capacidad de almacenamiento de agua.

Tabla 4-10. Parámetros no conservativos del suelo que definen el modelo de AquaCrop.

Campo	Descripción	Valor por defecto	Unidad
CN	Número de curva inicial	Calculado según la textura (Raes et al., 2011)	[-]
SAT	Contenido de agua en suelo saturado	Ver Tabla 4-11	[%vol]
FC	Contenido de agua en suelo a capacidad de campo		[%vol]
PWP	Contenido de agua en suelo en punto de marchitamiento		[%vol]
Ksat	Conductividad hidráulica en saturación		[mm/d]
Textura	Descripción del suelo – nombre		[-]
TXT	Código de textura		[-]
InitialWC	Contenido inicial del suelo	Se determina mediante la simulación del balance hídrico en el suelo 30 días antes de la fecha de siembra. La humedad al inicio de este proceso es la capacidad de campo	[-]

La Tabla 4-11 muestra la relación entre el tipo de textura con el almacenamiento de agua en el suelo y su disponibilidad para las plantas. La categoría *impermeable* hace referencia a zonas urbanas y la categoría *agua* hace referencia a cuerpos de agua.

Tabla 4-11. Relación de la textura del suelo con parámetros de contenido de agua y grupo hidrológico.

Textura	TXT	SAT [%vol]	FC [%vol]	PWP [%vol]	TAW [%vol]	Ksat [mm/d]	Grupo
Arena	0	36	13	6	70	3000	A
Arenoso franco	1	38	16	8	80	2200	A
Franco arenoso	2	41	22	10	120	1200	A
Franco	3	46	31	15	160	500	B
Franco limoso	4	46	33	13	200	575	B
Limoso	5	43	33	9	240	500	B
Franco arcillo arenoso	6	47	32	20	120	225	C
Franco arcilloso	7	50	39	23	160	125	C
Franco arcillo limoso	8	52	44	23	210	150	C
Arcillo arenoso	9	50	39	27	120	35	D
Arcillo limoso	10	54	50	32	180	100	D
Arcilla	11	55	54	39	150	35	D
Impermeable	12	0.5	0.3	0.1	2	0	D
Agua	-1	0.5	0.3	0.1	2	0	D

5 Rendimientos sintéticos simulados

El modelo desarrollado para la generación de rendimientos sintéticos se compone de 5,569 unidades de tierra cultivada (CLU), las cuales corresponden a píxeles de 1x1 Km, como se indica en detalle en los productos 2: *Identificación de áreas establecidas de Maíz Blanco Tradicional*, y 3: *Identificación de fechas de siembra y cosecha para Maíz Blanco Tradicional*, de esta consultoría. Cabe anotar que las CLU son unidades de cálculo, por lo cual pueden admitir áreas cultivadas mayores a su área espacial, y no se relacionan de forma directa con las UPAs. Los rendimientos son calculados sobre las CLU, en ambos ciclos productivos, para mil años de series meteorológicas simuladas, y para los seis climas considerados (uno base y cinco alterados por cambio climático). Esto quiere decir que se realizaron 33'414,000 simulaciones de rendimiento en ambos departamentos. A continuación, se presentan los resultados para cada departamento, en forma de diagramas de frecuencia y mapas de distribución de valores medios, dado que resulta impráctico incorporar todos los resultados generados en este informe. No obstante, la totalidad de los rendimientos calculados se entregan en el Anexo 6, el cual es un libro de Excel que contiene todos los resultados obtenidos.

La Tabla 5-1 presenta los diferentes portafolios considerados, en los cuales se subdivide el cálculo de rendimientos. Como se indica, los portafolios de productores de más de 20 hectáreas de Tolima se asumieron como de sistema tecnificado, con el objetivo de simular los mayores rendimientos reportados en el departamento, así como la no despreciable existencia de UPAs con sistema tecnificado (ver secciones 2.2 y 2.3). Por su parte, en Antioquia se reporta sistema tecnificado hasta 2014 (en adelante no se reporta) y solo en un municipio (Jericó), con una cantidad despreciable de área cultivada (en 2014 reportó 30ha Ciclo A y 15ha Ciclo B), por lo cual todo este departamento se simuló como de sistema tradicional.

Tabla 5-1. Portafolios de maíz blanco calculados.

Portafolio	Departamento	Ciclo	Tamaño UPAs	Sistema productivo	Número de CLUs
1	Antioquia	A	<20	Tradicional	161
2			>20	Tradicional	4
3		B	<20	Tradicional	2865
4			>20	Tradicional	98
5	Tolima	A	<20	Tradicional	530
6			>20	Tecnificado	25
7		B	<20	Tradicional	1761
8			>20	Tecnificado	125

Todos los cálculos se ejecutaron en el software DroughtPro (Bernal et.al. 2018), el cual implementa la metodología propuesta por Bernal et.al (2017) para el cálculo del riesgo catastrófico por fenómenos hidrometeorológicos en el sector agrícola, y que contiene el sistema AquaCrop .NET, desarrollado por INGENIAR, y que está basado en el software de código abierto AquaCrop OS (Foster et. al. 2017).

5.1 Rendimientos simulados con clima base

Considerando las condiciones climáticas actuales, se simularon los rendimientos en todas las unidades de tierra cultivadas de cada portafolio. La Figura 5-1 muestra como ejemplo los rendimientos para un año arbitrario de simulación de clima, en todas las CLU de Antioquia y Tolima del portafolio de Ciclo B para UPAs de menos de 20 ha. Puede verse como la simulación recoge todos los componentes del problema para expresar un resultado del portafolio que es totalmente coherente con el clima, cultivo y suelo considerados.

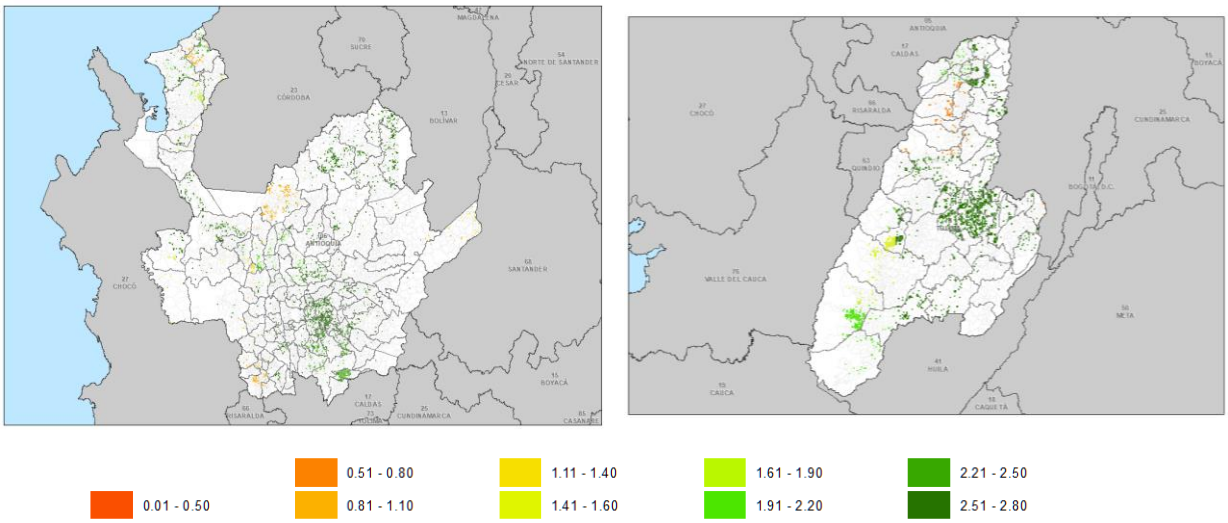


Figura 5-1. Rendimientos calculados para una simulación arbitraria, ciclo B para UPAs menores a 20 ha en Antioquia y Tolima

Las Figuras 5-2 y 5-3 presentan las series de rendimientos totales departamentales para todos los portafolios de Antioquia y Tolima respectivamente, junto con una media móvil de 10 años que permite visualizar de mejor manera la tendencia de los datos. Debe tenerse cuidado al interpretar estos resultados, pues no se trata de un pronóstico de rendimientos, sino simplemente de una secuencia arbitraria de simulaciones.

La fluctuación en los rendimientos es indicativa de la sensibilidad del cultivo a las condiciones climáticas cambiantes en las simulaciones generadas. El comportamiento de la serie se aproxima a la de una secuencia de rendimientos reales, por lo que se considera que la colección de simulaciones expresa suficientemente bien las condiciones del problema y permite contar con una base de información amplia para múltiples propósitos en el futuro, desde la cuantificación del seguro agropecuario catastrófico, hasta la verificación de estrategias de adaptación de cultivos, cambios por aptitud del suelo, inversiones en infraestructura de riego, entre otras posibles aplicaciones directas.

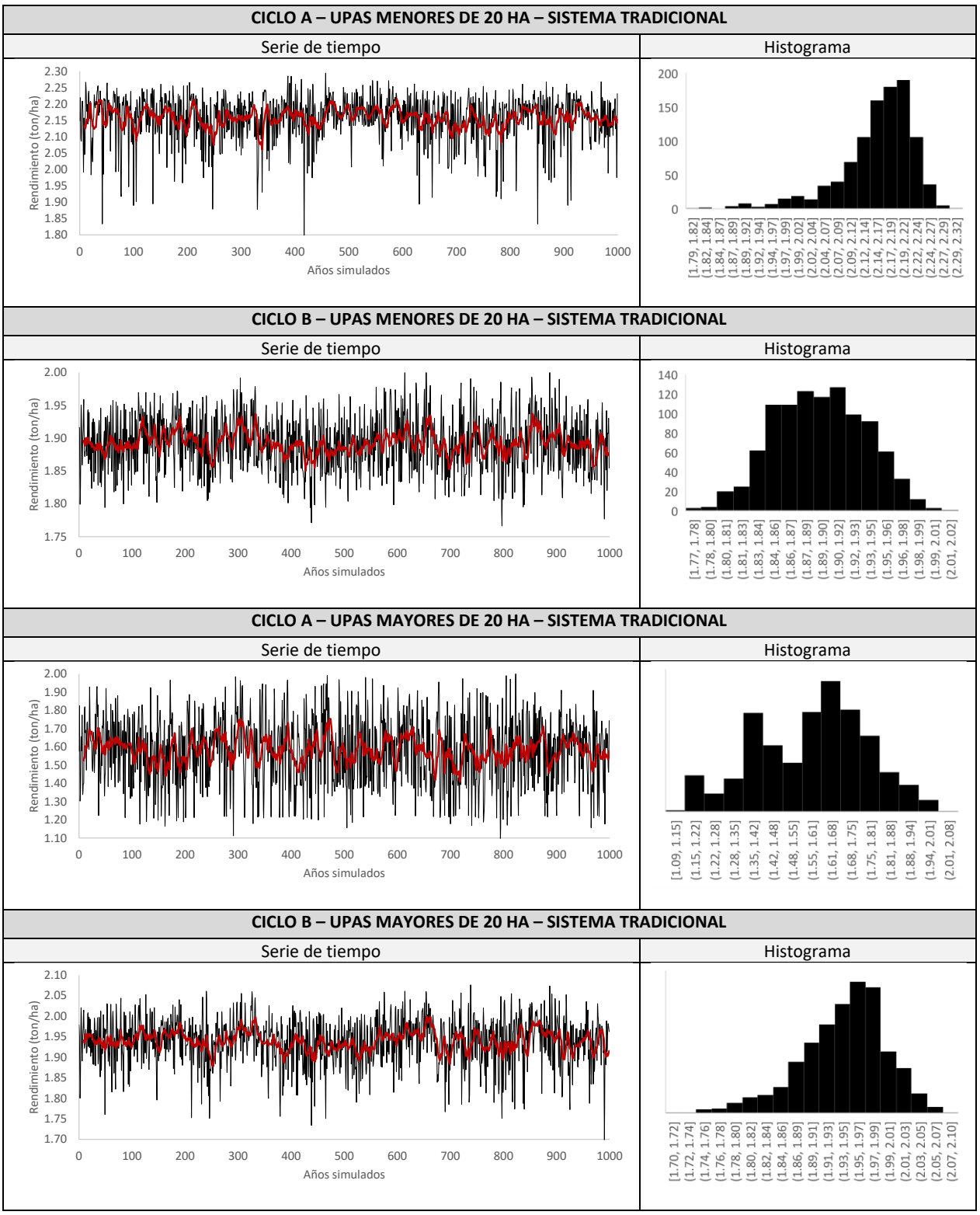


Figura 5-2. Series e histogramas de rendimientos departamentales simulados para los cuatro portafolios de Antioquia

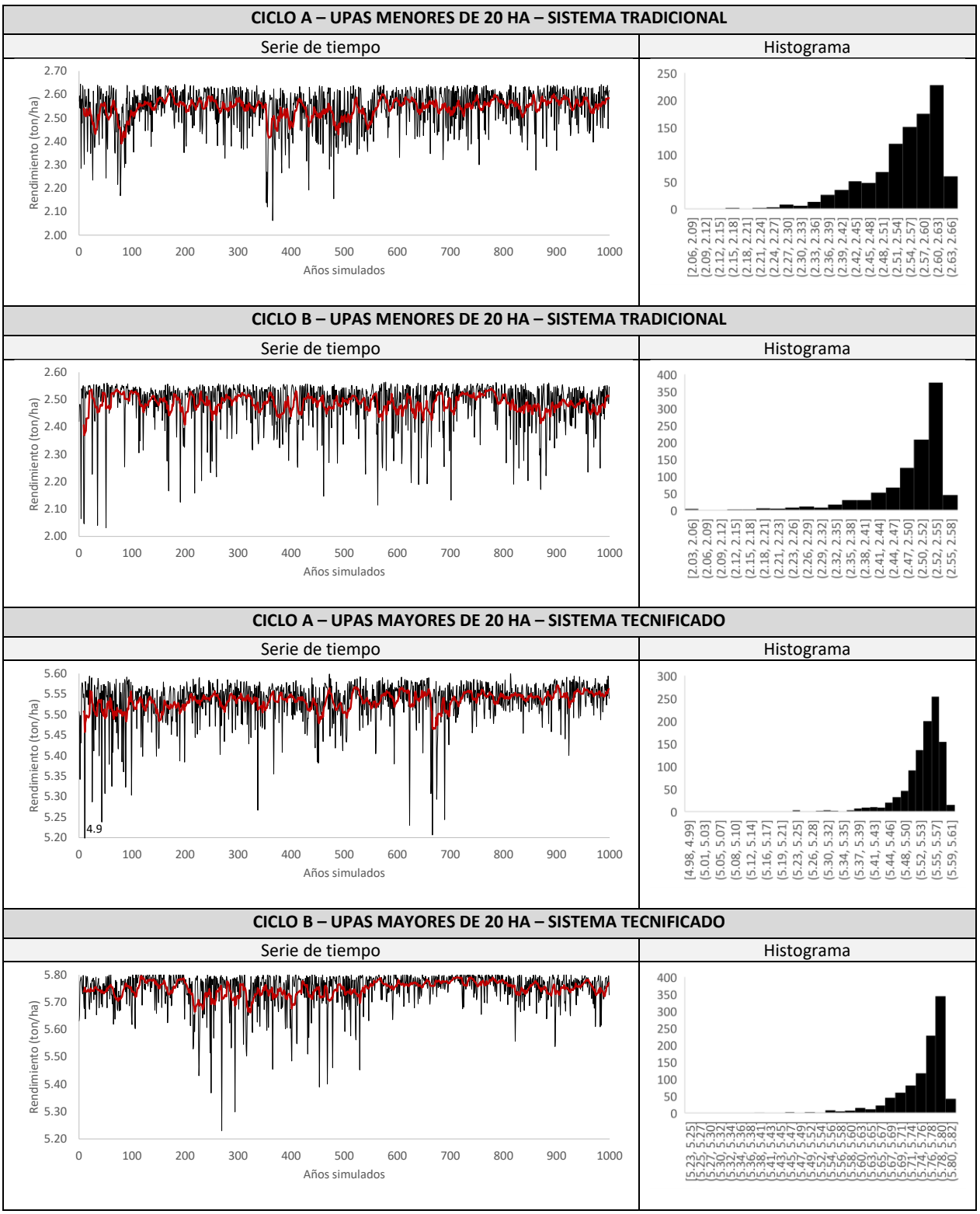


Figura 5-3. Series e histogramas de rendimientos departamentales simulados para los cuatro portafolios de Tolima

De la colección de series de tiempo e histogramas de los portafolios calculados, podemos concluir que, en general, el rendimiento presenta menor variabilidad en Tolima que en Antioquia, en parte por la presencia de sistema tecnificado, el cual no solo eleva los rendimientos, sino que se manifiesta en histogramas mucho más cerrados (menor varianza) y sesgados hacia el rendimiento máximo o potencial. En el sistema tradicional, sin embargo, también es posible ver un comportamiento similar, con histogramas en Tolima de menor varianza y sesgados al máximo, mientras que en Antioquia se presenta una mayor variabilidad. Esto es, por supuesto, el resultado de la incidencia de todas las variables en conjunto. Por ejemplo, los suelos en Tolima son, principalmente, de textura intermedia, con conductividades hidráulicas medias, lo que implica que permiten un balance apropiado entre su capacidad de retención de agua y la capacidad de aprovechamiento del cultivo.

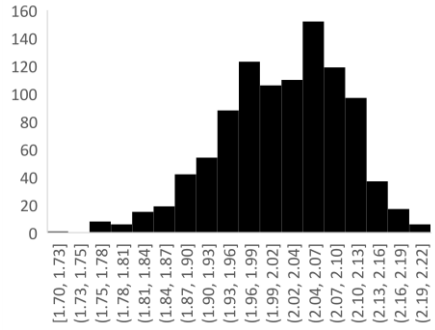
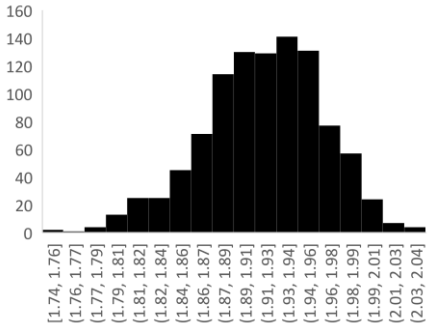
Los rangos de variación de los rendimientos departamentales se consideran aceptables en comparación con los valores reportados en las diferentes fuentes de información consultadas (ver sección 2). La Tabla 5-2 presenta la distribución de los rendimientos totales para ambos ciclos productivos, en comparación con los valores reportados en las diferentes fuentes de información consultadas (ENA, CNA, EVA). En general, se considera que los resultados obtenidos se ajustan a lo observado. Las principales diferencias se encuentran en Tolima, en donde la existencia del sistema tecnificado en una cantidad no despreciable de UPAs, modifica los valores de producción total del departamento. Si separamos los sistemas tradicional y tecnificado en Tolima (ver Figura 5-3), vemos que efectivamente los resultados obtenidos coinciden mejor con lo reportado, especialmente en las Evaluaciones Agropecuarias Municipales. Vemos también un mayor sesgo a la derecha, así como menor varianza en los histogramas para ambos ciclos de Tolima en comparación con Antioquia, lo cual se debe a las razones ya explicadas anteriormente.

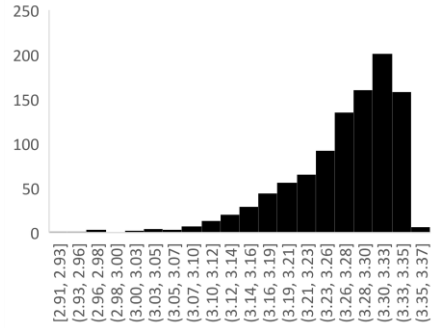
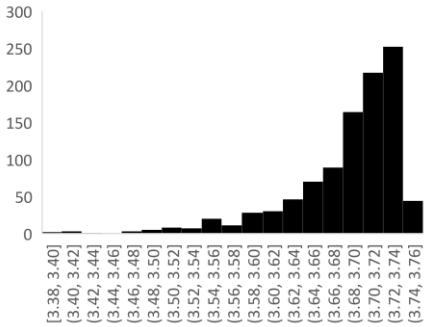
Las Figuras 5-4 a 5-7 y Figuras 5-8 a 5-11 muestran para Antioquia y Tolima, respectivamente, los mapas municipales y veredales del promedio de rendimientos simulados para ambos ciclos productivos y para UPAs mayores y menores a 20 ha. La distribución de los valores de rendimiento medio es consistente con lo esperado, en función del clima, tipo de suelo y sistema predominante.

Se puede concluir que el modelo aplicado para la simulación de rendimientos es apropiado y permite diferenciar entre sistema tradicional y tecnificado de forma apropiada. Este proyecto busca enfocarse en Maíz Blanco Tradicional y en pequeños productores (i.e. UPAs de menos de 20 ha). Del total de portafolios considerados, aquellos que cumplen con esta definición son los portafolios 1, 3, 5 y 7 (ver Tabla 5-1). Sin embargo, en favor de la generalidad, y dada la relevancia del sistema tecnificado en Tolima, se incluyeron los demás portafolios.

Los rendimientos simulados son la base para el diseño del seguro agrícola catastrófico. En base a las series de rendimiento es posible encontrar eventos de pérdida, y definir así una siniestralidad sintética que sirve de soporte al dimensionamiento de las pérdidas máximas probables y anuales esperadas, así como el análisis de capas para definir primas, limites, prioridades, y otras características propias del seguro que se defina.

Tabla 5-2. Comparación de rendimientos simulados en Antioquia y Tolima con los registrados en las diferentes fuentes de información disponibles.

ANTIOQUIA			
CICLO A		**CICLO B**	
	*ENA (2012-2019)*		*ENA (2012-2019)*
	1.8 [0.9,2.4]		1.7 [1.1,2.3]
	CNA (2014)		*CNA (2014)*
	3.11		3.10
	EVA (2007-2019)		*EVA (2007-2019)*
	1.6 [1.4, 1.8]		1.6 [1.4, 1.7]

TOLIMA			
CICLO A		**CICLO B**	
	*ENA (2012-2019)*		*ENA (2012-2019)*
	4.2 [3.7, 5.0]		*4.3 [3.4, 5.0]*
	CNA (2014)		*CNA (2014)*
	4.29		*4.92*
	EVA (2007-2019)		*EVA (2007-2019)*
	Tr *1.8 [1.6, 2.2]*		*Tr* *1.8 [1.6, 2.2]*
	Te *4.3 [2.9, 5.8]*		*Te* *4.4 [2.8, 5.7]*

Nota: Valores en ton/ha. Los valores mostrados son promedios con intervalos [min , max] del periodo observado, excepto para CNA. *Tr* es Sistema Tradicional. *Te* es Sistema Tecnificado.

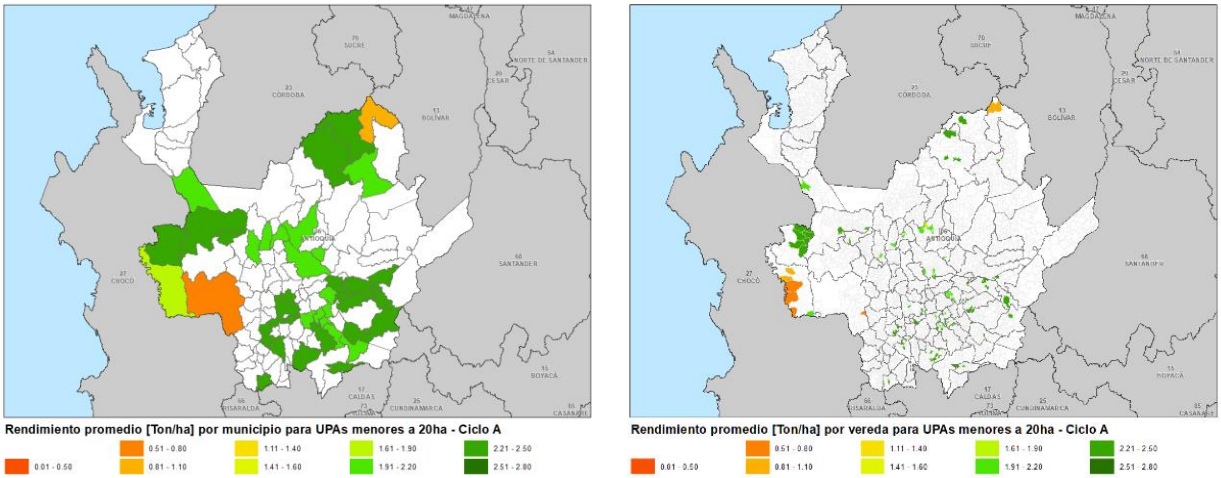


Figura 5-4. Mapa de rendimientos promedio. Ciclo A - UPAs < 20 ha. Municipal (izq.) y veredal (der.) para Antioquia.

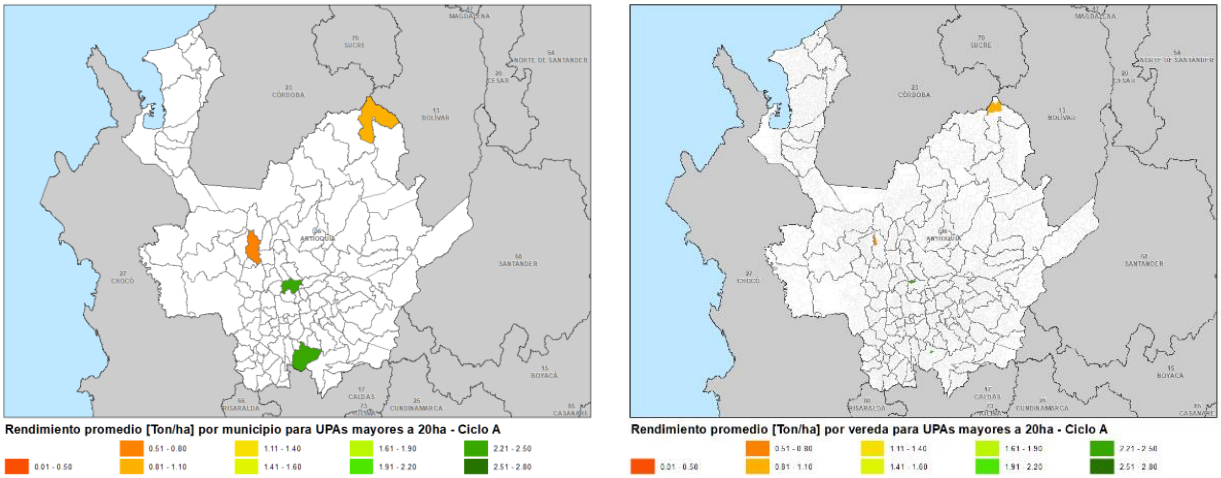


Figura 5-5. Mapa de rendimientos promedio. Ciclo A - UPAs > 20 ha. Municipal (izq.) y veredal (der.) para Antioquia.

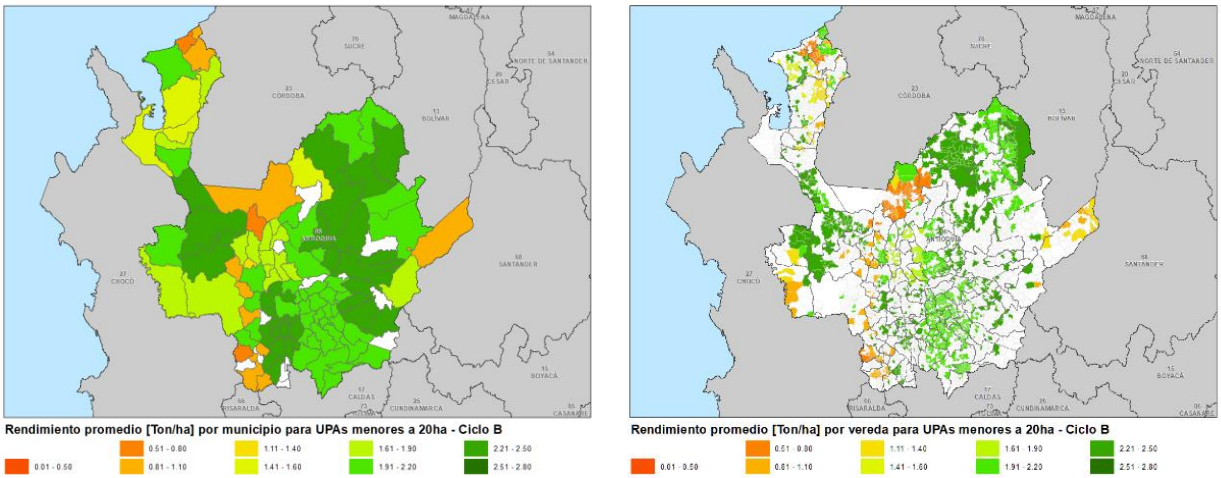


Figura 5-6. Mapa de rendimientos promedio. Ciclo B - UPAs < 20 ha. Municipal (izq.) y veredal (der.) para Antioquia.

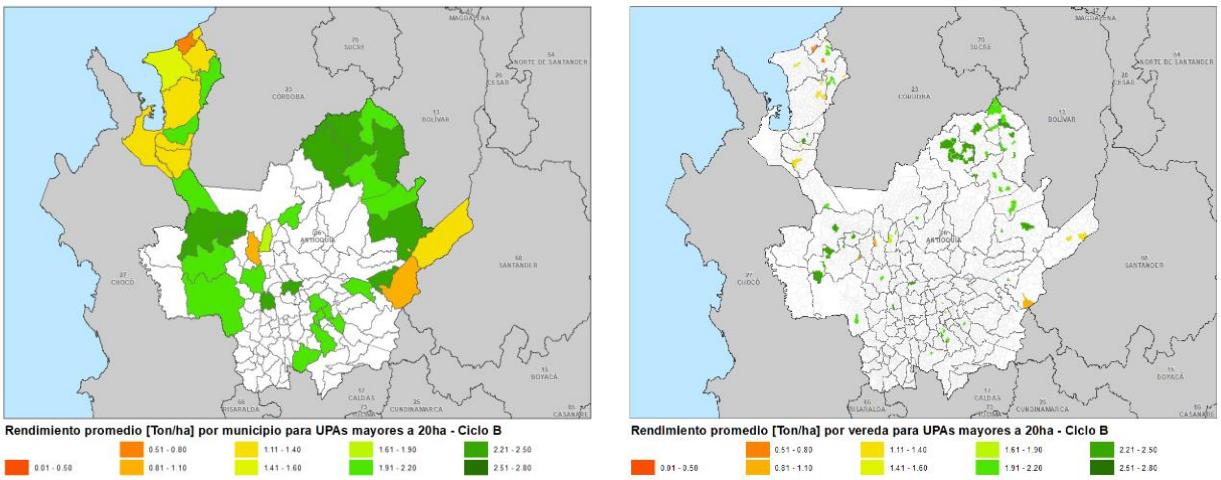


Figura 5-7. Mapa de rendimientos promedio. Ciclo B - UPAs > 20 ha. Municipal (izq.) y veredal (der.) para Antioquia.

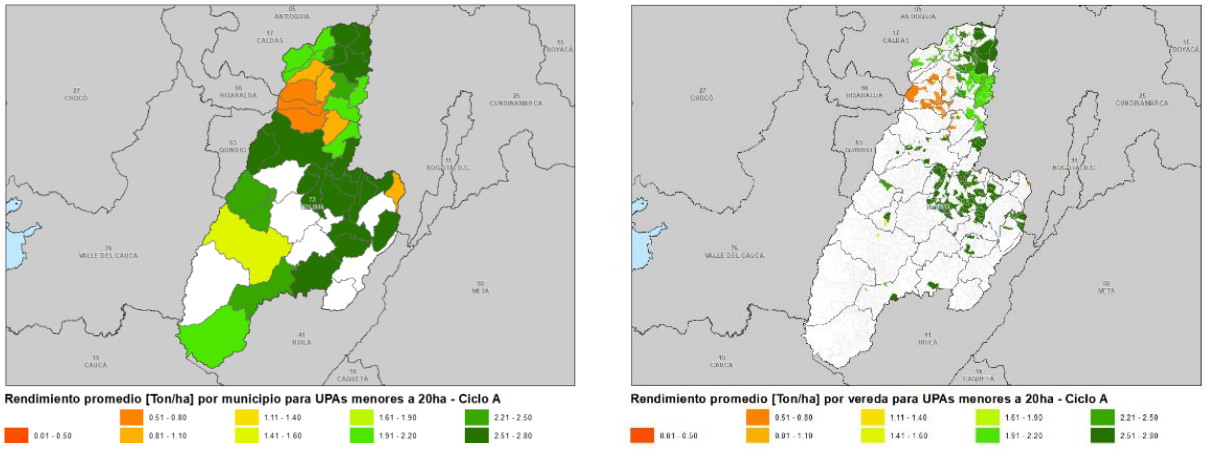


Figura 5-8. Mapa de rendimientos promedio. Ciclo A - UPAs < 20 ha. Municipal (izq.) y veredal (der.) para Tolima.

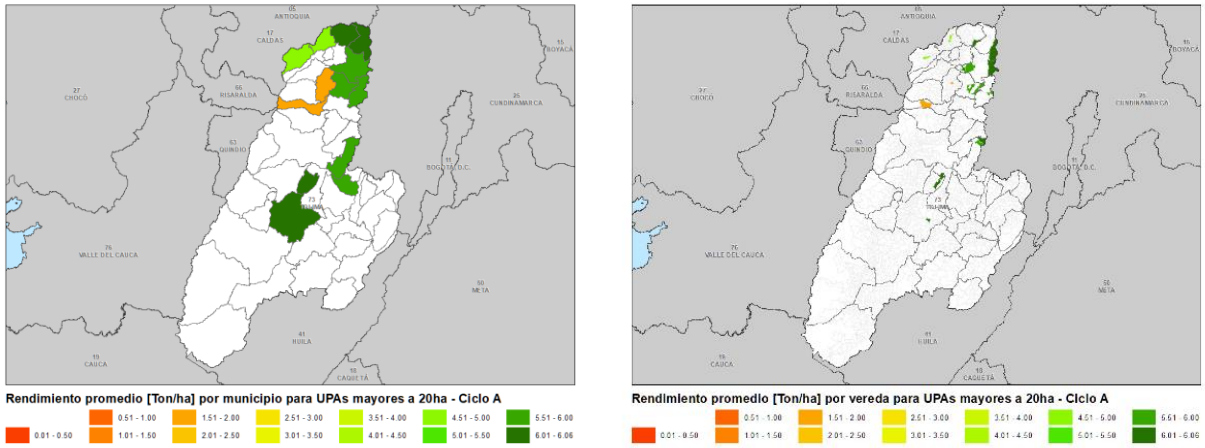


Figura 5-9. Mapa de rendimientos promedio. Ciclo A - UPAs > 20 ha. Municipal (izq.) y veredal (der.) para Tolima.

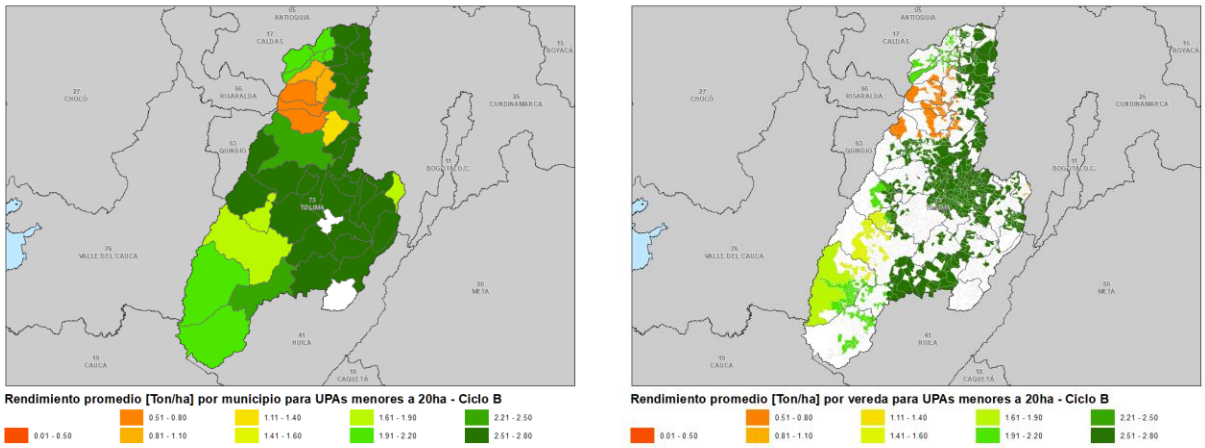


Figura 5-10. Mapa de rendimientos promedio. Ciclo B - UPAs < 20 ha. Municipal (izq.) y veredal (der.) para Tolima.

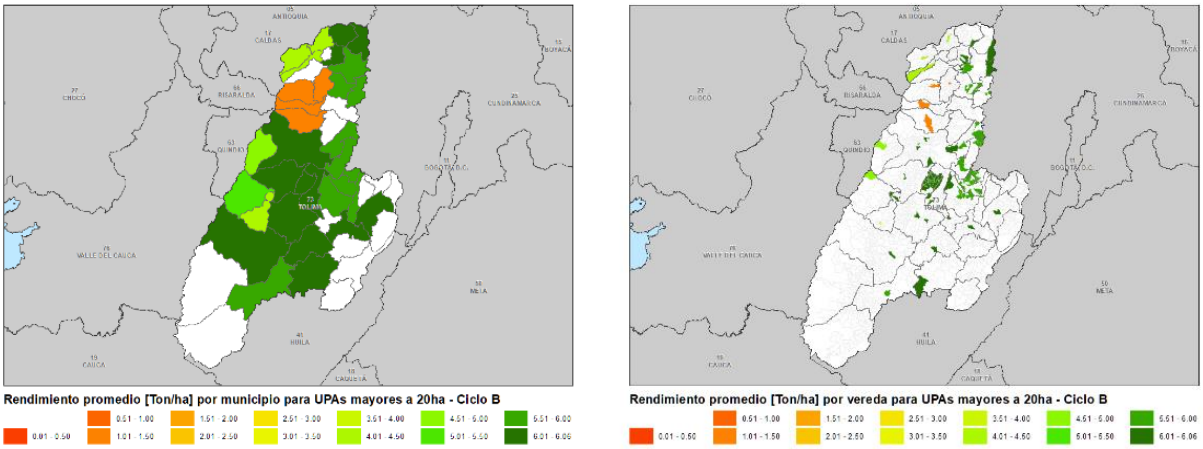


Figura 5-11. Mapa de rendimientos promedio. Ciclo B - UPAs > 20 ha. Municipal (izq.) y veredal (der.) para Tolima.

5.2 Rendimientos simulados con cambio climático

El cambio climático modificará las condiciones climáticas en las que se desarrolla la actividad agrícola del país. En este sentido, se consideran varias posibilidades de climas futuros a partir de la selección de un modelo de circulación atmosférica global que de cuenta, suficientemente bien, de la información climática histórica del país (ver sección 4.1.4). Ante diferentes concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, el calentamiento global se desarrollará de forma diferente y, así mismo, la incidencia en el clima del país cambiará. Por esta razón se incluyen los rendimientos simulados ante clima perturbado con cambio climático, considerando 5 climas futuros diferentes, cuatro con el modelo de circulación global seleccionado para Colombia por INGENIAR, siguiendo cuatro trayectorias de concentración diferentes, y uno considerando las proyecciones dadas por IDEAM en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.

En la Tabla 5-3 se presentan estadísticas generales de los rendimientos calculados con cambio climático, en comparación con el clima base, para Antioquia y Tolima. Estos valores son totales para ambos departamentos, sin diferenciar por ciclo productivo, sistema ni tamaño de UPA.

Tabla 5-3. Estadísticas de los rendimientos simulados para Antioquia (valores en ton/ha).

Estadístico	Clima base	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5	CC IDEAM
ANTIOQUIA						
Promedio	1.89	1.92	1.98	1.96	1.96	1.94
Desviación estándar	0.23	0.22	0.19	0.21	0.21	0.22
Máximo	2.29	2.31	2.34	2.34	2.34	2.33
Mínimo	1.09	1.25	1.28	1.28	1.29	1.27
TOLIMA						
Promedio	3.48	3.53	3.60	3.61	3.65	3.56
Desviación estándar	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
Máximo	3.76	3.79	3.85	3.85	3.90	3.82
Mínimo	2.91	3.08	3.17	3.20	3.22	3.12

Se observan valores promedio que se mantienen aproximadamente constantes entre los rangos 1.8 ton/ha y 2 ton/ha para Antioquia, y 3.4 ton/ha y 3.8 ton/ha para Tolima, en todos los climas, mostrando en ambos casos un leve incremento del rendimiento para climas con mayores concentraciones de CO_2. La variabilidad entre los escenarios no es amplia a excepción del RCP 2.6 que tiene valores un poco más bajos frente a los otros, pero mayores al clima base.

En las Figuras 5-12 y 5-13 se presentan los diagramas de frecuencia de rendimiento total para Antioquia y Tolima, para los 6 climas calculados. Al igual que en la Tabla 5-3, estos valores de rendimiento no diferencian entre ciclo productivo, sistema o tamaño de UPA

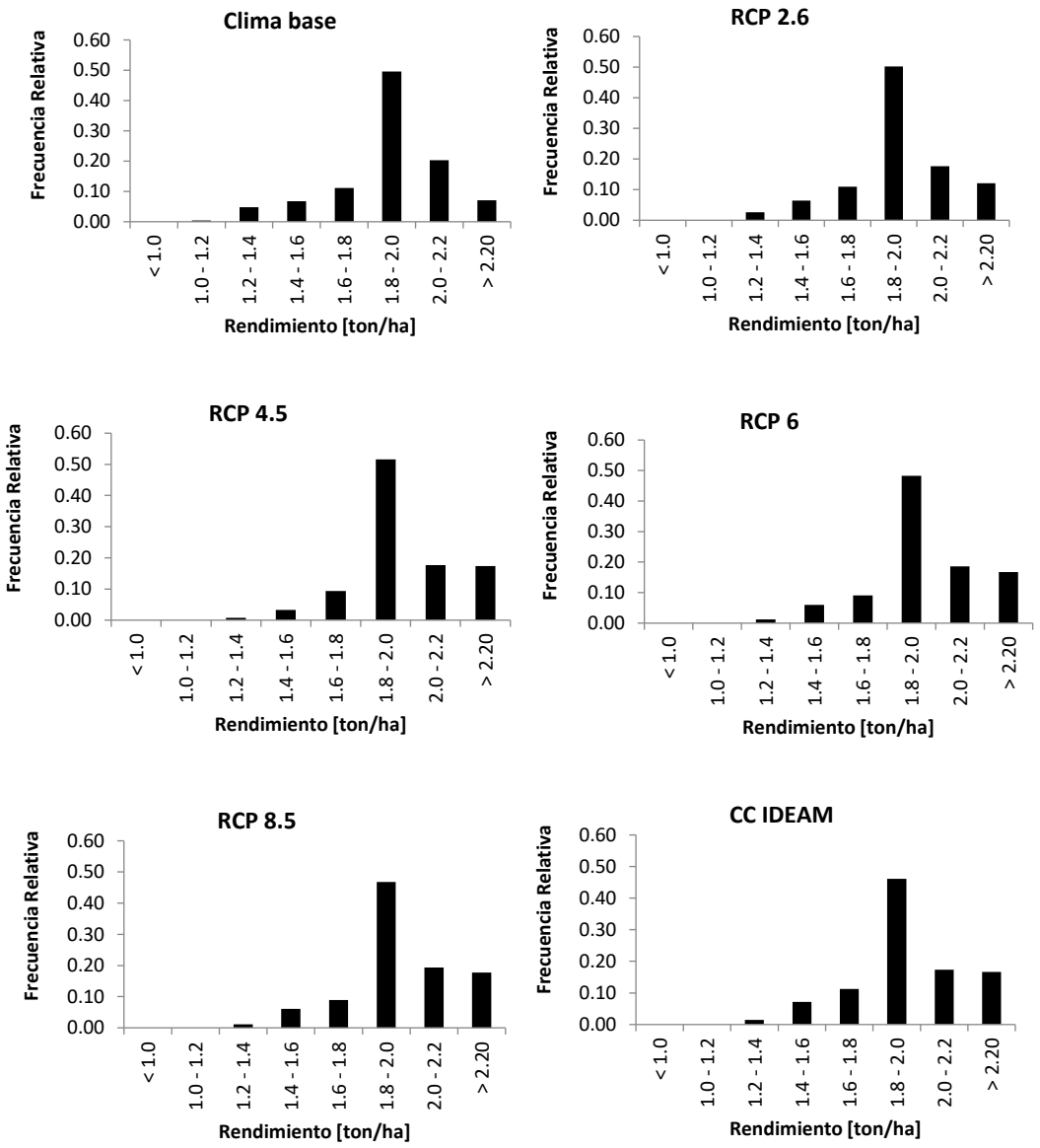


Figura 5-12. Diagramas de frecuencia de los rendimientos sintéticos simulados con cambio climático para Antioquia

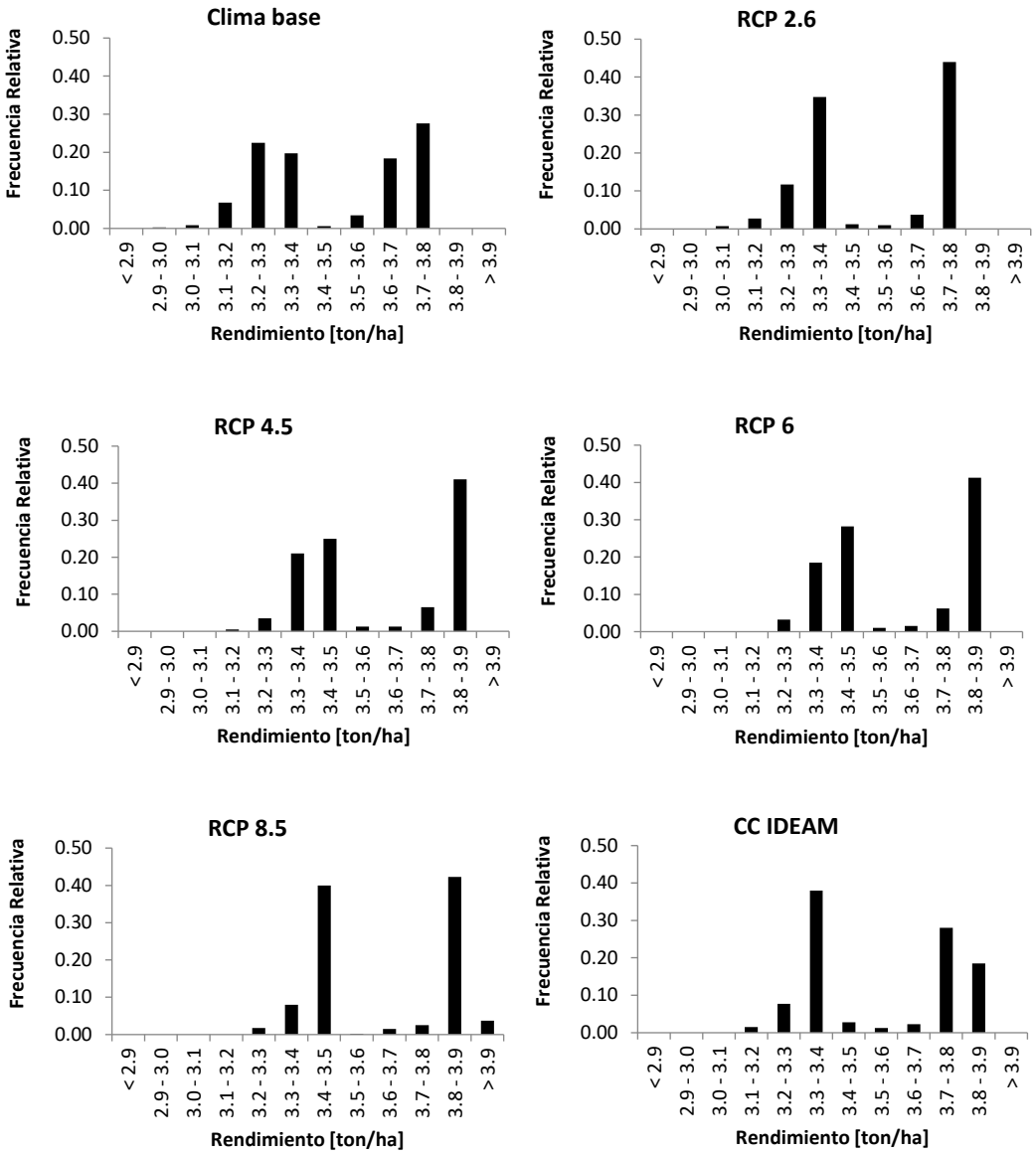


Figura 5-13. Diagramas de frecuencia de los rendimientos sintéticos simulados con cambio climático para Tolima

De los diagramas de frecuencia presentados es posible ver que la distribución de rendimientos no se modifica significativamente entre climas simulados. En Antioquia, por ejemplo, la distribución es unimodal, con una leve concentración de frecuencia hacia rendimientos más grandes, patrón que se mantienen en todos los climas. Por su parte, Tolima muestra distribuciones bimodales, que se hacen más marcadas con cambio climático que en el clima base, pero que no cambian significativamente entre los posibles climas futuros.

La Tabla 5-4 presenta, para ambos departamentos, los estadísticos de rendimiento para el clima base y los diferentes escenarios de cambio climático, discriminados por UPAs con áreas sembradas menores y mayores a 20 hectáreas, y por ciclos de siembra.

Tabla 5-4. Estadísticas de rendimientos simulados con cambio climático para los portafolios de Antioquia y Tolima

	Clima	Estadístico	Ciclo A UPAs > 20ha	Ciclo B UPAs > 20ha	Ciclo A UPAs < 20ha	Ciclo B UPAs < 20ha
ANTIOQUIA	Clima base	*Prom.*	1.58	1.94	2.16	1.89
		Desv. Est.	0.19	0.06	0.07	0.04
		Max.	2.02	2.08	2.29	2.01
		Min.	1.09	1.70	1.79	1.77
	RCP 2.6	*Prom.*	1.65	1.94	2.19	1.91
		Desv. Est.	0.19	0.06	0.06	0.04
		Max.	2.06	2.05	2.31	2.00
		Min.	1.25	1.76	1.90	1.82
	RCP 4.5	*Prom.*	1.76	1.97	2.22	1.96
		Desv. Est.	0.18	0.05	0.05	0.03
		Max.	2.10	2.08	2.34	2.03
		Min.	1.28	1.82	1.98	1.89
	RCP 6	*Prom.*	1.70	1.96	2.22	1.95
		Desv. Est.	0.19	0.06	0.06	0.04
		Max.	2.09	2.08	2.34	2.03
		Min.	1.28	1.78	1.94	1.85
	RCP 8.5	*Prom.*	1.71	1.96	2.22	1.96
		Desv. Est.	0.19	0.06	0.06	0.04
		Max.	2.10	2.07	2.34	2.04
		Min.	1.29	1.77	1.97	1.85
	CC IDEAM	*Prom.*	1.66	1.96	2.21	1.95
		Desv. Est.	0.17	0.06	0.06	0.04
		Max.	2.02	2.08	2.33	2.03
		Min.	1.27	1.78	1.92	1.84
TOLIMA	Clima base	*Prom.*	5.53	5.75	2.54	2.49
		Desv. Est.	0.05	0.06	0.09	0.08
		Max.	5.60	5.81	2.64	2.56
		Min.	4.98	5.23	2.06	2.03
	RCP 2.6	*Prom.*	5.64	5.82	2.58	2.53
		Desv. Est.	0.05	0.04	0.08	0.09
		Max.	5.69	5.86	2.66	2.59
		Min.	5.30	5.70	2.26	2.11
	RCP 4.5	*Prom.*	5.79	5.90	2.62	2.60
		Desv. Est.	0.04	0.03	0.07	0.07
		Max.	5.85	5.94	2.69	2.65
		Min.	5.49	5.81	2.36	2.22
	RCP 6	*Prom.*	5.80	5.91	2.63	2.60
		Desv. Est.	0.04	0.03	0.06	0.07
		Max.	5.85	5.94	2.69	2.65
		Min.	5.59	5.81	2.37	2.22
	RCP 8.5	*Prom.*	5.92	5.97	2.65	2.64
		Desv. Est.	0.03	0.02	0.07	0.08
		Max.	5.96	6.00	2.71	2.69
		Min.	5.71	5.88	2.36	2.26
	CC IDEAM	*Prom.*	5.68	5.85	2.59	2.56
		Desv. Est.	0.05	0.03	0.07	0.07
		Max.	5.74	5.89	2.67	2.61
		Min.	5.34	5.76	2.32	2.19

Se observa la misma tendencia anterior, con promedios, mínimos y máximos más altos para los escenarios de cambio climático con respecto al clima base. Las desviaciones estándar parecen mantenerse muy uniformes entre todos los climas. Las Figuras 5-14 a 5-17 muestran la

distribución espacial por municipio y vereda, para Antioquia y Tolima, de los rendimientos promedio para UPAs menores de 20 ha en el Ciclo B. Estos mismos mapas se presentan para todos los portafolios en el Anexo 5.

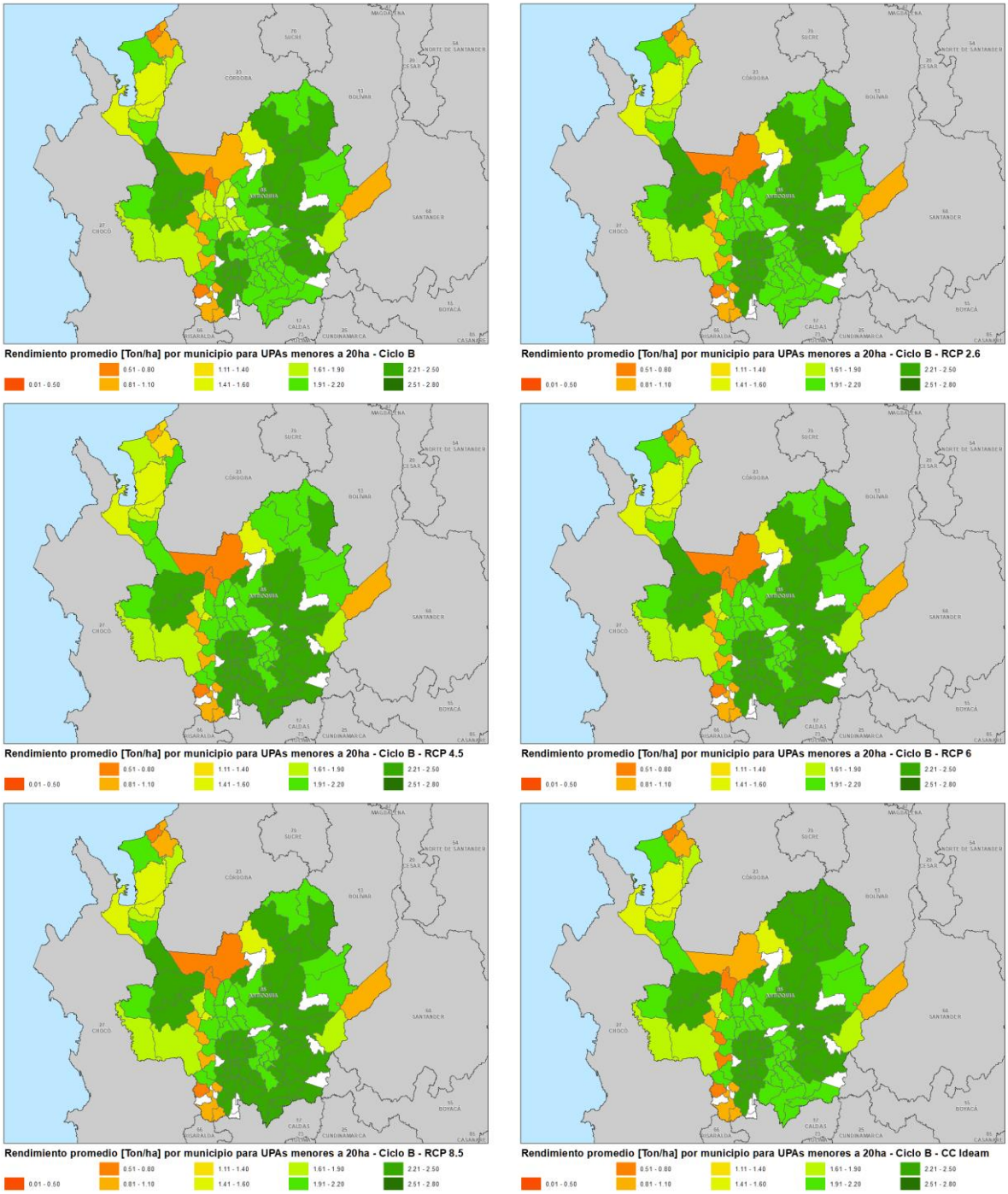


Figura 5-14. Rendimientos promedio simulados por municipio para el departamento de Antioquia en el segundo semestre de siembra para UPAs con áreas menores a 20ha

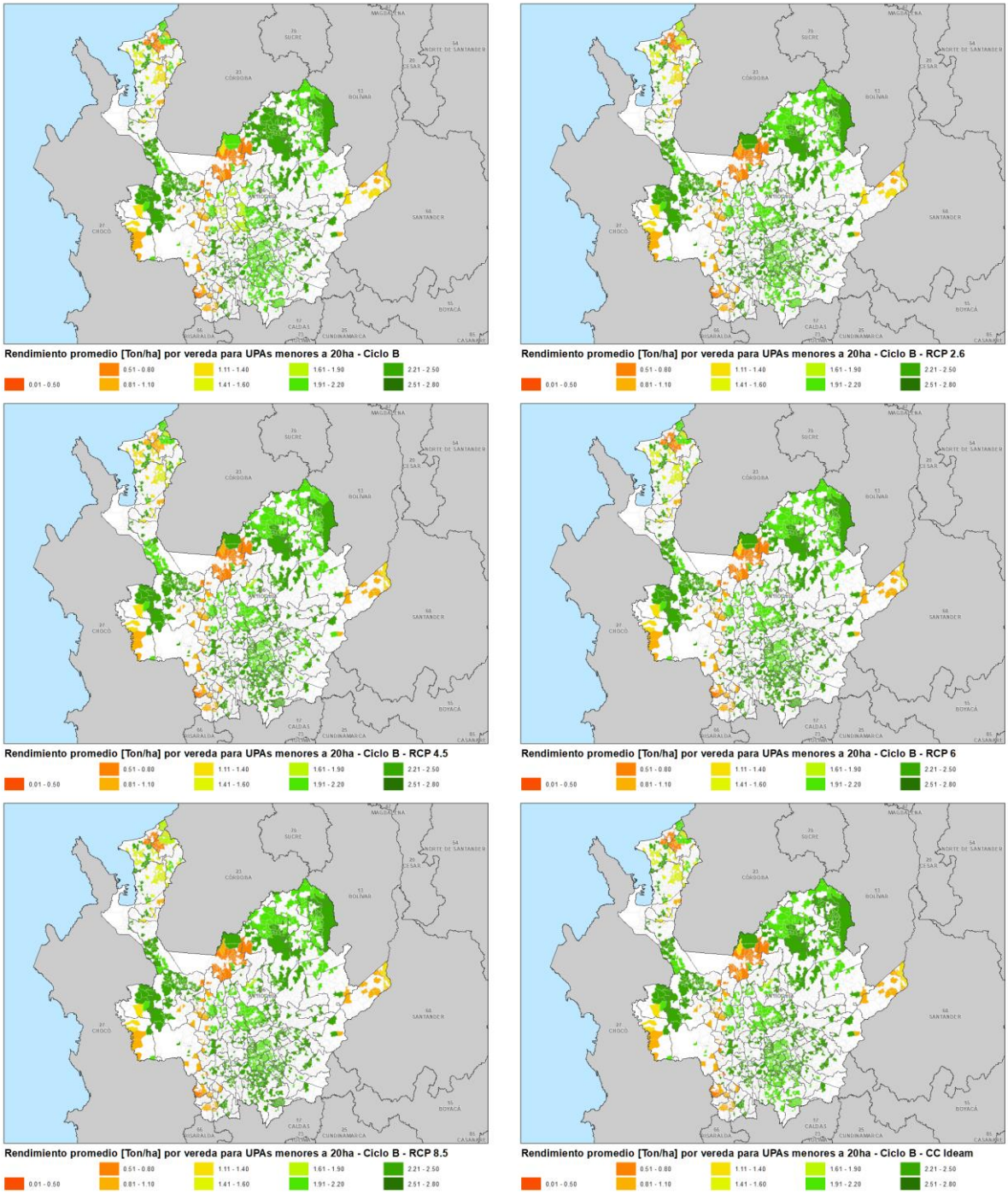


Figura 5-15. Rendimientos promedio simulados por vereda para el departamento de Antioquia en el segundo semestre de siembra para UPAs con áreas menores a 20ha

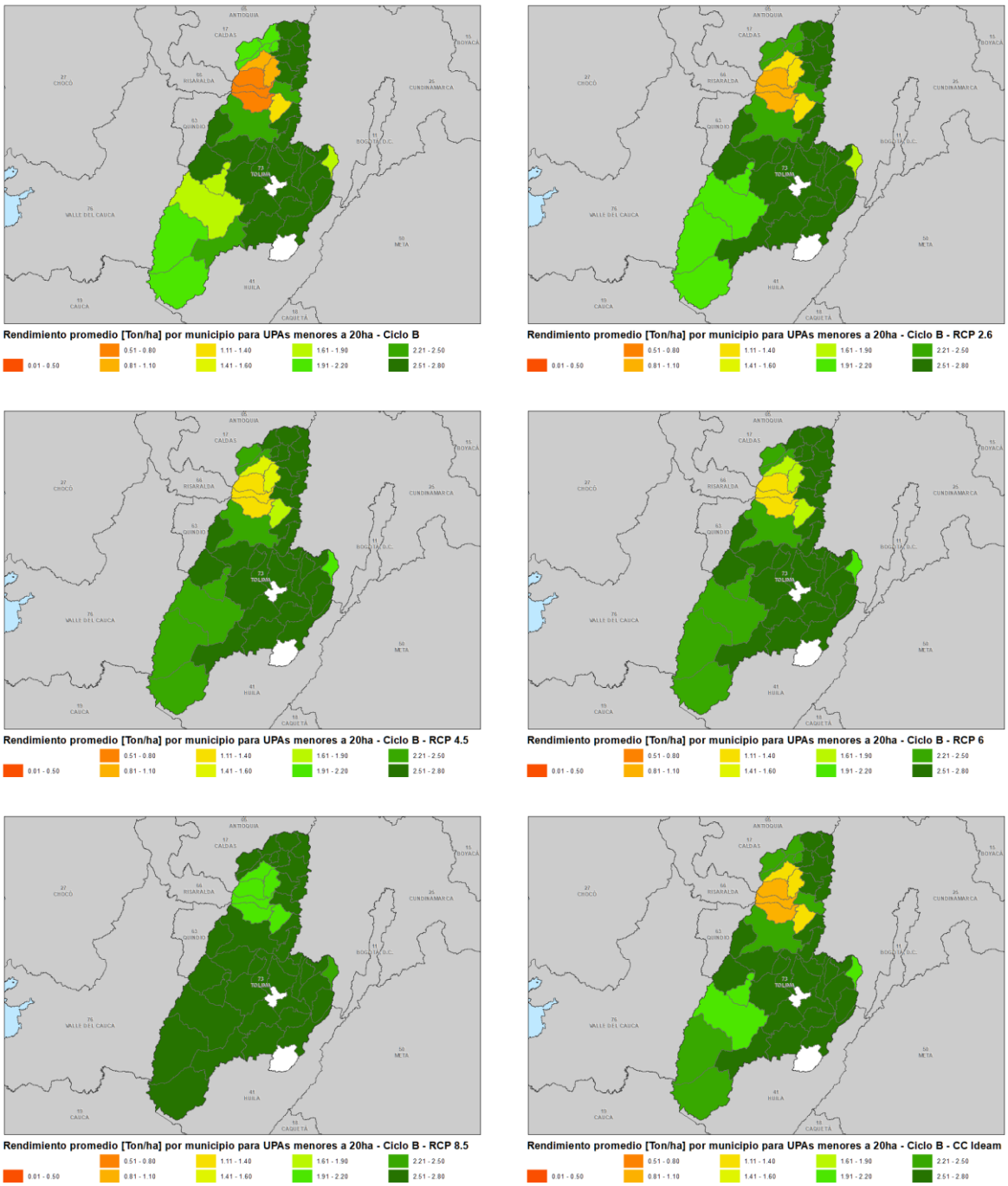


Figura 5-16. Rendimientos promedio simulados por municipio para el departamento de Tolima en el segundo semestre de siembra para UPAs con áreas menores a 20ha

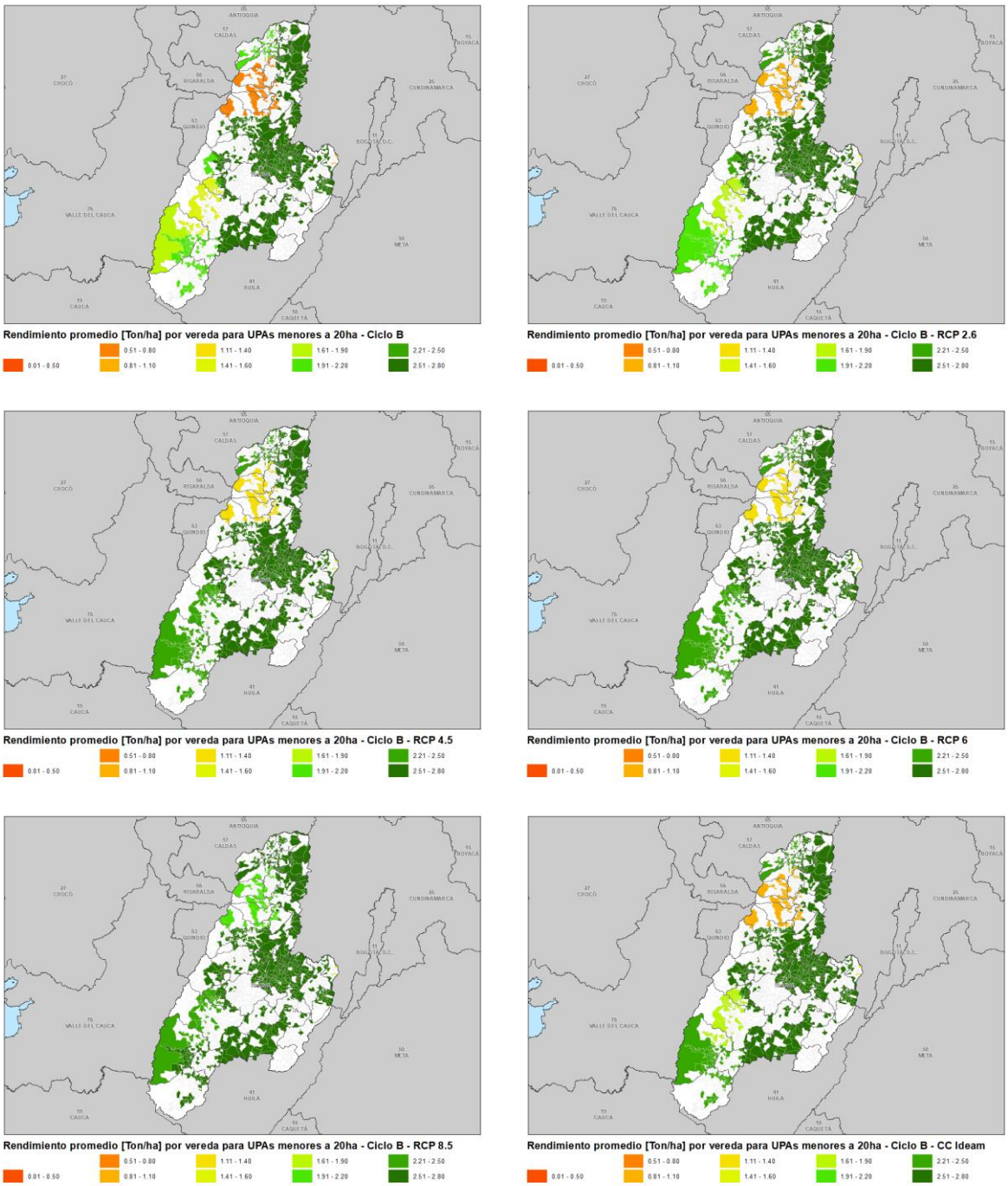


Figura 5-17. Rendimientos promedio simulados por vereda para el departamento de Tolima en el segundo semestre de siembra para UPAs con áreas menores a 20ha

De los resultados presentados, se puede inferir que el paso del clima promedio en Antioquia y Tolima a uno más cálido a causa del cambio climático resulta beneficioso para el rendimiento, independientemente del modelo de proyección usado. Así mismo, la reducción en la precipitación no parece ser suficiente para causar afectación en la producción. El cambio climático más extremo (RCP 8.5) no causa un estrés hídrico particular por cuenta de la disminución de la lluvia, e implica un aumento en temperatura que no lleva al cultivo a una condición de estrés térmico, sino que, por el contrario, induce mejores niveles de transpiración y, por lo tanto, de rendimiento.

Se puede concluir entonces que climas perturbados por cambio climático resultan beneficiosos para el cultivo de maíz blanco. Esto significa que, para el diseño y dimensionamiento del SAC, no se considera relevante incluir escenarios de cambio climático, sino determinar la siniestralidad en función exclusivamente de los rendimientos calculados con el clima actual. Esta conclusión no debe ser extendida a otras regiones u otros cultivos o sistemas productivos, pues cada portafolio presenta sus particularidades que deben ser evaluadas caso a caso. Esta conclusión es precisamente muestra de ello, pues es usual asumir que un clima perturbado por cambio climático es necesariamente perjudicial para la actividad agrícola. No obstante, tras una verificación rigurosa, se concluye justamente lo contrario.

Esta conclusión se basa únicamente en estimaciones de rendimiento, más no de calidad del producto, la cual puede verse afectada, no solo por las condiciones climáticas cambiantes, sino por la concentración de CO2 en la atmósfera. Este tipo de evaluaciones exceden el alcance del trabajo presentado, pero deben ser tenidas en cuenta en futuros esfuerzos con el fin de dimensionar de forma completa la incidencia del cambio climático.

6 Acrónimos

AR5 Assessment Report 5

CNA Censo Nacional Agropecuario

DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadística

EMC Estaciones Meteorológicas Convencionales

FAO Food and agriculture organization (organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura)

ha Hectárea

IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

IGAC Instituto Geográfico Agustín Codazzi

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

MADR Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural

MERRA Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications

NASA National Aeronautics and Space Administration

NCEP National Centers for Environmental Prediction

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration

PRER Población Rural de Escasos Recursos

RCP Representative Concentration Pathways

SAC Seguro Agrícola Catastrófico

ton Tonelada

USDA Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

7 Referencias

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO*, (56), 300. https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001

Banimahd, S. A., & Khalili, D. (2013). Factors Influencing Markov Chains Predictability Characteristics, Utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI Drought Indices in Different Climatic Zones. *Water Resources Management*, *27*(11), 3911-3928. https://doi.org/10.1007/s11269-013-0387-z

Bernal, J., Díaz, E., Méndez, J., Cortés, C., Boshell, F., Mejías, P., ... & Stedutto, P. (2013). Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de maíz en los departamentos de Córdoba, Meta, Tolima y Valle del Cauca. FAO Colombia, Bogotá, 161.

Bernal, G. A., Escovar, M. A., Zuloaga, D., & Cardona, O. D. (2017). Agricultural Drought Risk Assessment in Northern Brazil: An Innovative Fully Probabilistic Approach. En V. Marchezini, B. Wiesner, S. Saito, & L. Londe (Eds.), Reduction of Vulnerability to Disasters: from Knowledge to Action (RiMa Edito, pp. 331–356).

Bernal, G., Rincon, D., & Cardona, O. D. (2018). Drought Pro: Computer program for probabilitic drought risk assessment of crops and livestock systems.

Collins, W.J., N. Bellouin, M. Doutriaux-Boucher, N. Gedney, T. Hinton, C. D. Jones, S. Liddicoat, G. Martin, F. O'Connor, J. Rae, C. Senior, I. Totterdell, S. Woodward, T. Reichler, J. Kim (2008): Evaluation of the HadGEM2 model. Met Office Hadley Centre Technical Note no. HCTN 74, http://www.metoffice.gov.uk/publications/HCTN/index.html

Daly, C, Gibson, W., Taylor, G., Johnson, G., & Pasteris, P. (2002). A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate. *Climate Research*, *22*, 99-113. https://doi.org/10.3354/cr022099

Daly, Christopher, Halbleib, M., Smith, J. I., Gibson, W. P., Doggett, M. K., Taylor, G. H., … Pasteris, P. P. (2008). Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States. *International Journal of Climatology*, *28*(15), 2031-2064. https://doi.org/10.1002/joc.1688

DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2016). III. Censo Nacional Agropecuario 2014. Tomo 2, Resultados.

DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2017). Microdatos - DANE. Tercer Censo Nacional Agropecuario 2014. Recuperado de http://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/513/datafile/F15

DANE-Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2019). Ficha metodológica encuesta Nacional Agropecuaria-ENA. https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena.

Dlugokencky, E., & Tans, P. (2018). Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Retrieved from www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/

Doorenbos, J., Kassam, A. H., Bentvelsen, C. L. M., Branscheid, V., & Plusje, J. M. G. A. (1979). Yield response to water (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33). Rome.

FAO. (2017). AquaCrop training handbooks Book I Understanding AquaCrop. Rome.

FAO. (2018). Crop Water Information - Grape. Retrieved from http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/grape/en/

FAO. (2020). Harmonized World Soil Database. Retrieved from http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/

FINAGRO, & Banco Mundial. (2017). *Seguro Agrícola Catastrófico en Colombia. Estudio de Factibilidad*. Bogotá.

Foster, T., Brozović, N., Butler, A.P., Neale, C.M.U., Raes, D., Steduto, P., Fereres. E., Hsiao, T.C. (2017) AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. Agricultural Water Management. 181: 18-22.

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., … Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, *2*, 1-21. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

Gobernación de Antioquia-secretaria de agricultura y desarrollo rural. (2019) Anuario estadístico del sector agropecuario, Antioquia 2018. Pg 2-151. http://www.antioquiadatos.gov.co/index.php/8-anuario-estadistico/33-anuario-estadistico-de-antioquia-2018.

IDEAM. (2014) Mapa de coberturas de la tierra.

IDEAM. (2020). Geoportal - Galeria de Mapas. Recuperado de http://www.ideam.gov.co/galeria-de-mapas/-/document_library_display/4VnjNLZDi78B/view/98893526?_110_INSTANCE_4VnjNLZDi78B_redirect=http%3A%2F%2Fwww.ideam.gov.co%2Fgaleria-de-mapas%3Fp_p_id%3D110_INSTANCE_4VnjNLZDi78B%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnorm

IDEAM, & MinTIC. (2020). Catálogo Nacional de Estaciones Meteorológicas. Recuperado de Datos Abiertos website: https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Cat-logo-Nacional-de-Estaciones-del-IDEAM/hp9r-jxuu/data

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI - IGAC. (2020) Mapas publicados por el IGAC. https://geoportal.igac.gov.co/contenido/geoservicios

IPCC. (2013). *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis* (Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed.). https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324

MADR-Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). Evaluaciones Agropecuarias Municipales-EVA. https://www.upra.gov.co/documents/10184/140540/presentacion_eva_upra.pdf/d61f57b5-e843-4766-8eba-bedae760c401

Monfreda, C., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2008). Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. Global Biogeochemical Cycles, 22(1), 1–19. https://doi.org/10.1029/2007GB002947

Nachtergaele, F., Velthuizen, H. V., Verelst, L., & Wiberg, D. (2009). Harmonized World Soil Database (HWSD). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Poppe, M. (2016). Simulating the water footprint of woodies in AquaCrop and Apex. University of Twente.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2011). FAO cropwater productivity model to simulate yield response to water AquaCrop. In Reference Manual of AQUACROP (p. 56).

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T., & Fereres, E. (2017). Calculation Procedures. In AquaCrop Version 6.0 Reference Manual. Rome: FAO.

Ruíz Murcia, F., Gutierrez Valderrama, J. E., Dorado Delgado, J., Mendoza, J. E., Martínez Zuleta, C., Rojas Laserna, M., … Rodríguez Salguero, M. (2015). Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científica para los Tomadores de Decisiones- Enfoque Nacional - Departamental: Tercera Comunicacion Nacional de Cambio Climatico. En *Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climatico*. https://doi.org/10.1186/1471-2156-13-58

Sheffield, J., Goteti, G., & Wood, E. F. (2006). Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *Journal of Climate*, *19*(13), 3088-3111. https://doi.org/10.1175/JCLI3790.1

Sheppard, J., & Hoyle, F. (2018). Water availability. Retrieved from http://soilquality.org.au/factsheets/water-availability

Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop yield response to water (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66). Rome.

Taub, D. (2010). Effects of Rising Atmospheric Concentrations of Carbon Dioxide on Plants. Nature Education Knowledge, 3(10), 21.

Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. (2017). *Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el periodo 1981-2014*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Verdin, A., Rajagopalan, B., Kleiber, W., & Funk, C. (2015). A Bayesian kriging approach for blending satellite and ground precipitation observations. *Water Resources Research*, *51*(2), 908-921. https://doi.org/10.1002/2014WR015963

World Meteorological Organization (WMO). (2015). Nuevo enfoque de dos niveles para las “normales climatológicas”. Recuperado de https://public.wmo.int/es/media/news/nuevo-enfoque-de-dos-niveles-para-las-“normales-climatológicas”

A. 1 Anexos fuentes de Información de Rendimientos históricos

A. 1.1 Rendimientos maíz por municipio en Antioquia (2018).

Elaboración propia a partir de (Gobernación de Antioquia, 2018a, pp. 2–151). El anuario no reporta valores de rendimiento para los campos con (*)

SUB-REGIÓN	Municipio	Rendimiento (Ton/ha)		
		Semestre A	Semestre B	Anual
BAJO CAUCA	Cáceres	*	1	1
	Caucasia	1.5	1.5	1.5
	El Bagre	1.5	1.3	1.4
	Nechí	1.6	*	1.6
	Tarazá	1.2	1.2	1.2
	Zaragoza	1	1	1
BAJO CAUCA - TOTAL (Ton/ha)		**1.4**	**1.2**	**1.3**
MAGDALENA MEDIO	Caracolí	0.9	1.1	0.9
	Maceo	0.8	0.8	0.8
	Puerto Nare	1.3	*	1.3
	Puerto Triunfo	1.2	1.2	1.2
	Yondó	1.8	1.8	1.8
MAGDALENA - MEDIO TOTAL (Ton/ha)		**1.7**	**1.7**	**1.7**
NORDESTE	Amalfi	1.1	37.5	1.2
	Anorí	1.2	1.2	1.2
	Cisneros	1	1	1
	Remedios	1.1	1.1	1.1
	San Roque	1	1	1
	Segovia	1.2	1.3	1.2
	Vegachí	1.4	1.4	1.4
	Yalí	0.6	0.6	0.6
	Yolombó	1.1	1.1	1.1
NORDESTE - TOTAL (Ton/ha)		**1.1**	**1.1**	**1.1**
NORTE	Angostura	2.1	2.3	2.2
	Belmira	1.5	*	1.5
	Briceño	0.9	0.9	0.9
	Campamento	1.2	1.2	1.2
	Don Matias	2.2	22	12.1
	Gómez Plata	1	1	1
	Guadalupe	1.5	1.5	1.5
	Ituango	2.2	*	2.2
	San Andrés de C.	1	1	1
	San Pedro de los M.	1.7	1.8	1.7
	Santa Rosa de Osos	1.8	1.7	1.8
	Toledo	1.3	1.5	1.3
	Valdivia	1.2	*	1.2
	Yarumal	1.4	1.4	1.4
NORTE - TOTAL (Ton/ha)		**1.8**	**1.9**	**1.8**
OCCIDENTE	Abriaquí	1.2	0.8	1
	Anzá	0.9	0.9	0.9
	Buriticá	1	1	1
	Caicedo	0.6	0.6	0.6
	Cañasgordas	1.4	1.4	1.4
	Dabeiba	1.5	1.5	1.5
	Ebéjico	1	*	1
	Frontino	1	*	1
	Giraldo	1.1	*	1.1
	Heliconia	1	*	1
	Liborina	1.3	1.3	1.3
	Olaya	0.9	0.9	0.9
	Peque	0.8	0.7	0.8

SUB-REGIÓN	Municipio	Rendimiento (Ton/ha)		
		Semestre A	Semestre B	Anual
	Sabanalarga	0.7	0.5	0.6
	Santa Fe de Ant.	1.2	1.2	1.2
	Uramita	4	2	3
OCCIDENTE - TOTAL (Ton/ha)		**2.3**	**1.6**	**2**
SUROESTE	Amagá	0.9	0.9	0.9
	Andes	5	5	5
	Betania	3	*	3
	Betulia	2.5	*	2.5
	Caramanta	3.5	3.5	3.5
	Concordia	5	5	5
	Fredonia	1.1	1.1	1.1
	Jardín	1.5	1.5	1.5
	Pueblorrico	2	2	2
	Salgar	2.5	*	2.5
	Santa Bárbara	2	2	2
	Támesis	1	*	1
	Tarso	1.5	1.5	1.5
	Titiribí	1.3	1.3	1.3
	Valparaíso	3	3	3
	Venecia	1.3	*	1.3
SUROESTE - TOTAL (Ton/ha)		**3.6**	**3.8**	**3.7**
ORIENTE	Abejorral	1.8	1.8	1.9
	Alejandría	1	0.8	0.9
	Argelia	3	3	3
	Cocorná	1	1	1
	Nariño	1	1	1
	Rionegro	12	12	12
	San Carlos	0.5	1	0.8
	San Francisco	1	1	1
	San Luis	0.8	0.8	0.8
ORIENTE - TOTAL (Ton/ha)		**3.6**	**3.4**	**3.5**
URABÁ	Apartadó	1.5	1.5	1.5
	Arboletes	1.5	2	1.8
	Carepa	1	1	1
	Chigorodó	2.5	2.5	2.5
	Murindó	1.5		1.5
	Mutatá	1.3	1.4	1.3
	Necoclí	1.8	1.8	1.8
	San Pedro de Urabá	1.5	1.5	1.5
	Turbo	1.4	1.4	1.4
	Vigía del Fuerte	0.7	0.7	0.7
URABÁ - TOTAL (Ton/ha)		**1.5**	**1.6**	**1.5**
VALLE ABURRÁ	Barbosa	1	1	1
	Caldas	1	1	1
	Girardota	2	2	2
	La Estrella	2.5	2.5	2.5
VALLE ABURRÁ - TOTAL (Ton/ha)		**1.3**	**1.3**	**1.3**
TOTAL - RENDIMIENTO PROMEDIO (Ton/ha)		**1.7**	**1.6**	**1.7**

A. 2 Concentración media anual de dióxido de carbono en la atmósfera

A. 2.1 Concentraciones de CO2 [ppm] medidas entre 1980 y 2017 (Dlugokencky & Tans, 2018)

Año	Media Global
1980	338.7
1981	340.11
1982	341.22
1983	342.84
1984	344.4
1985	345.87
1986	347.19
1987	348.98
1988	351.45
1989	352.89
1990	354.16
1991	355.48
1992	356.27
1993	356.95
1994	358.63
1995	360.62
1996	362.37
1997	363.47
1998	366.5
1999	368.14
2000	369.41
2001	371.13
2002	373.22
2003	375.77
2004	377.49
2005	379.8
2006	381.9
2007	383.77
2008	385.59
2009	387.37
2010	389.85
2011	391.63
2012	393.82
2013	396.48
2014	398.55
2015	399.41
2016	402.83
2017	404.99

A. 2.2 Proyección de concentraciones de CO_2 [ppm] según escenario de cambio climático del IPCC

Año	IPCC - RCP2.6	IPCC - RCP4.5	IPCC - RCP6	IPCC - RCP8.5
2018	408	407	405	410
2020	412	411	409	416
2025	423	423	419	431
2030	431	435	429	449
2035	437	448	439	468
2040	440	461	451	489
2045	442	474	463	513
2050	443	487	478	541
2055	443	498	493	571
2060	442	509	511	604
2065	440	518	529	639
2070	437	524	550	677
2075	435	529	572	717
2080	432	531	594	758
2085	429	532	617	801
2090	426	534	636	845
2095	423	536	653	890
2100	421	538	670	936

A. 3 Parámetros de cultivos para modelo de respuesta al agua

A. 3.1 Parámetros que definen el modelo de AquaCrop

Variable	Descripción	Herbáceos	Frutos y leguminosas	Tubérculos y raíces
Tipo del cultivo	1: Vegetales de hoja 2: Frutales/Granos 3: Tubérculos y raíces	1	2	3
Determinación del ciclo de crecimiento	0: Grados crecimiento 1: Días calendario	1	1	1
Método de siembra	0: Trasplante 1: Siembra directa	1	1	0
Respuesta de la expansión de la cobertura Respuesta de la expansión máxima de la cobertura Respuesta de la productividad hídrica Respuesta del declive de la cobertura Respuesta del cierre de estomas	Aplica para modelación de la fertilidad del suelo	25	25	25
Conductividad eléctrica del suelo en la que el cultivo empieza a afectarse Conductividad eléctrica del suelo en la que el cultivo detiene su desarrollo	Aplica para modelación de la salinidad del suelo	-9	-9	-9

A. 3.2 Parámetros conservativos de cultivos considerados en este estudio

Variable	Descripción	Transitorios	Perennes
Disminución de factores de agua en suelo se ajusta por ETo	1: Ajuste por ETo	1	1
Acumulado de ETo durante periodo de estrés a ser excedido antes que se dispare la senescencia	0: No se considera	0	0
Estrés por fertilidad del suelo considerado para la calibración	Porcentaje [0,100]	50	50
Máxima extracción de agua en el cuarto superior de la zona radicular	m3/m3/día	0.048	0.024
Máxima extracción de agua en el cuarto interior de la zona radicular	m3/m3/día	0.012	0.006
Máxima disminución de CGC entre estaciones	-9: No aplica	-9	-9
Número de estaciones en el que se alcanza la máxima disminución de CGC	-9: No aplica	-9	-9
Factor de forma para la disminución del CGC	-9: No aplica	-9	-9
Productividad hídrica normalizada por ETo y CO2 durante formación de cosecha	Porcentaje [0,100]	100	100

Variable	Descripción	Transitorios	Perennes
Desempeño del cultivo bajo concentraciones elevadas de CO2	Porcentaje [0,100]	50	50
Distorsión de la cobertura por estrés debido a salinidad del suelo	Rango: 0: ninguno a 100: muy fuerte	25	25
Respuesta calibrada del estrés de estomas por salinidad del suelo	Rango: 0: ninguno a 200: extremo	100	100

A. 4 Diagramas de frecuencia de los rendimientos simulados

A. 4.1 Antioquia

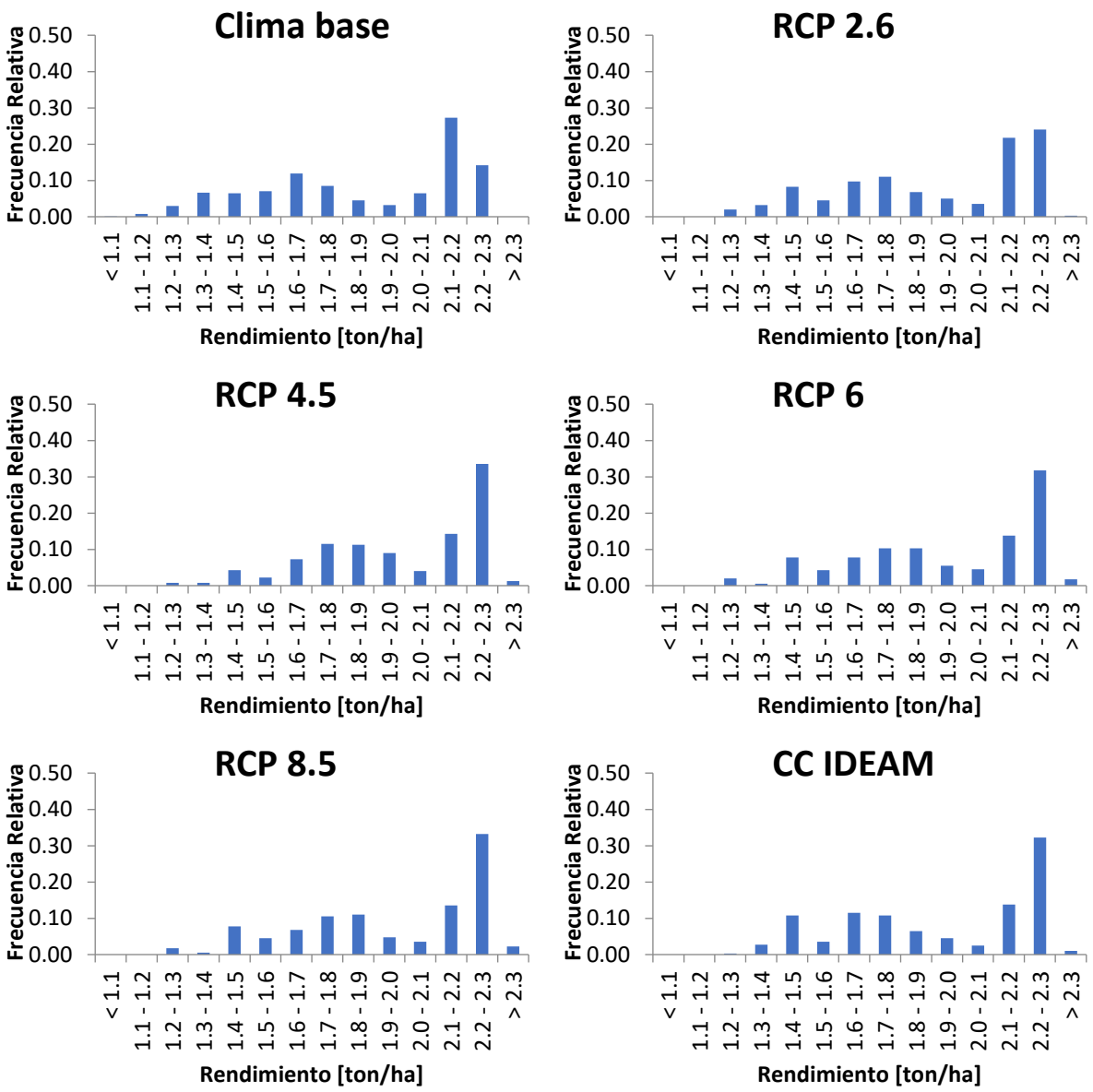


Figura 7-1. Diagramas de frecuencia de los rendimientos sintéticos simulados para el departamento de Antioquia en el primer semestre de siembra

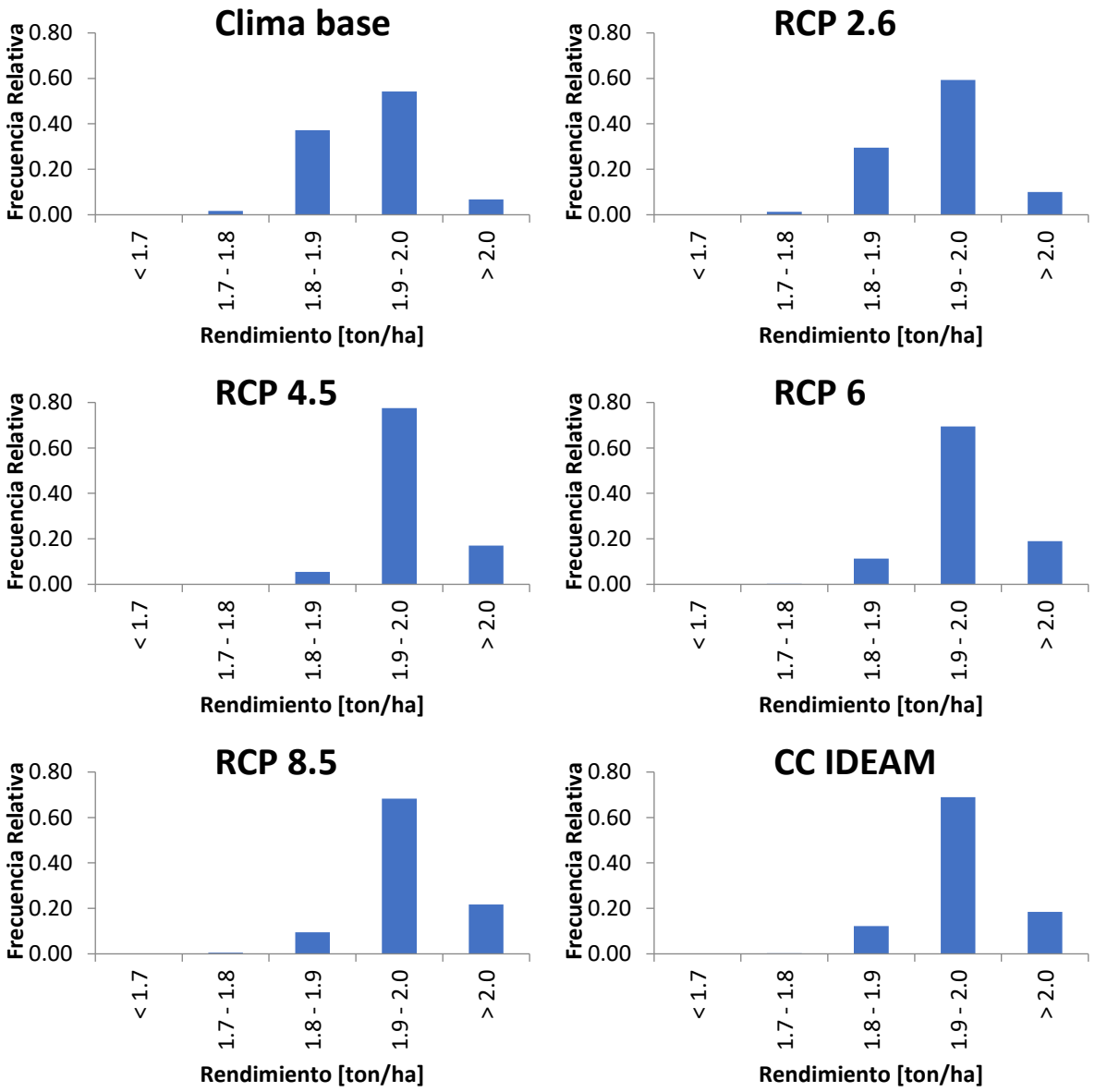


Figura 7-2. Diagramas de frecuencia de los rendimientos sintéticos simulados para el departamento de Antioquia en el segundo semestre de siembra

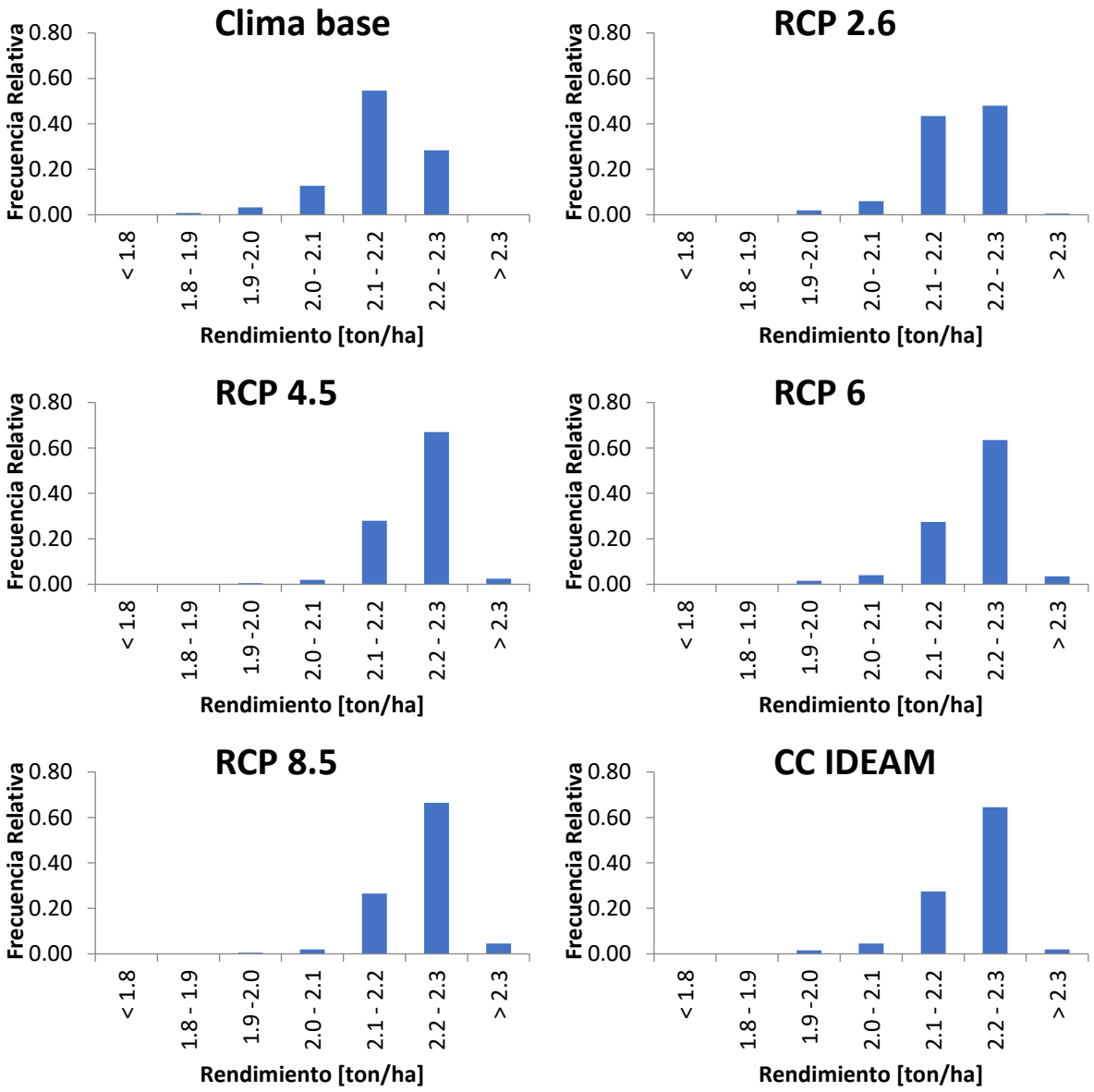


Figura 7-3. Diagramas de frecuencia de los rendimientos sintéticos simulados para el departamento de Antioquia en el primer semestre de siembra para UPAs con áreas menores a 20ha

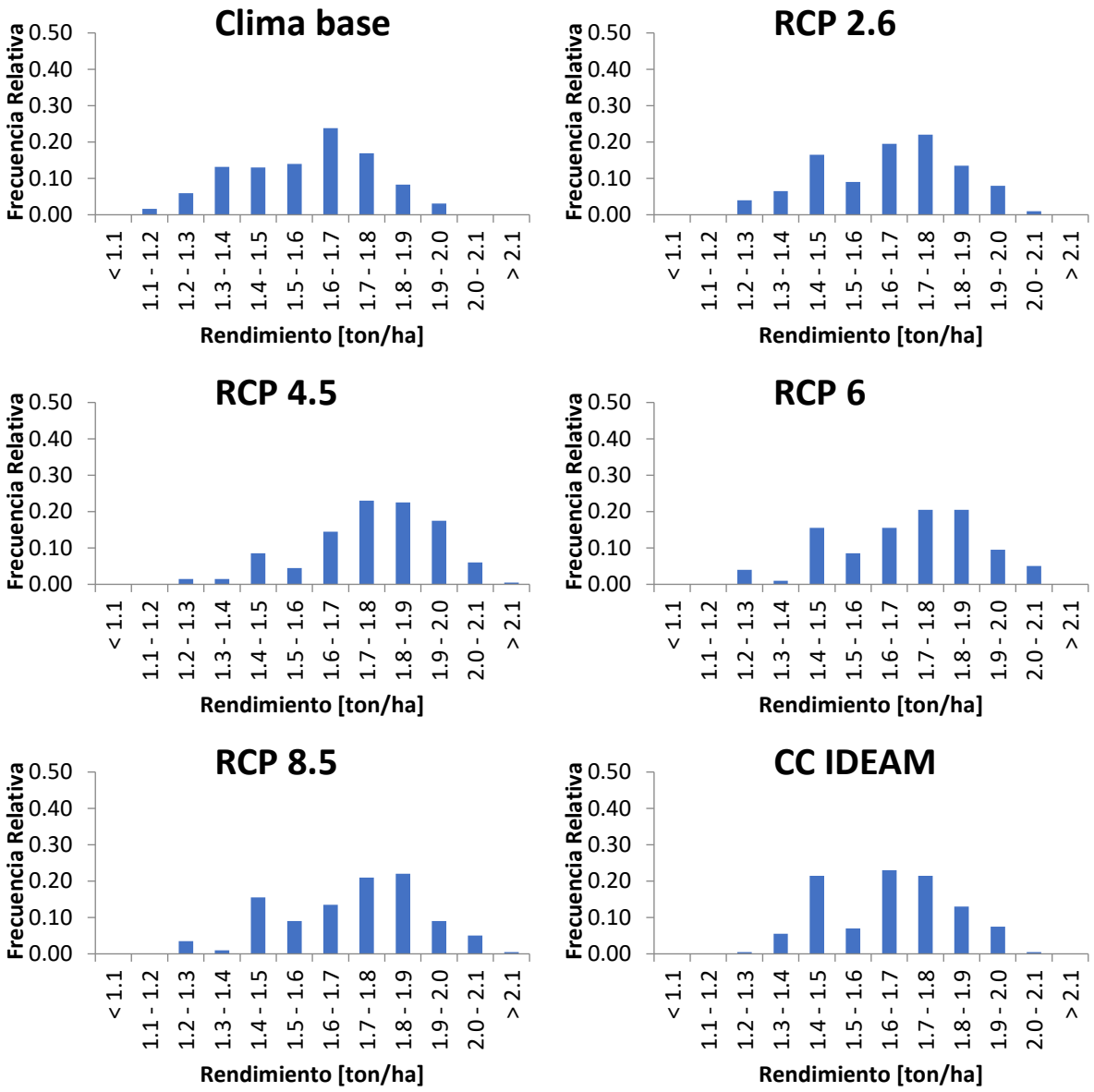


Figura 7-4. Diagramas de frecuencia de los rendimientos sintéticos simulados para el departamento de Antioquia en el primer semestre de siembra para UPAs con áreas mayores a 20ha

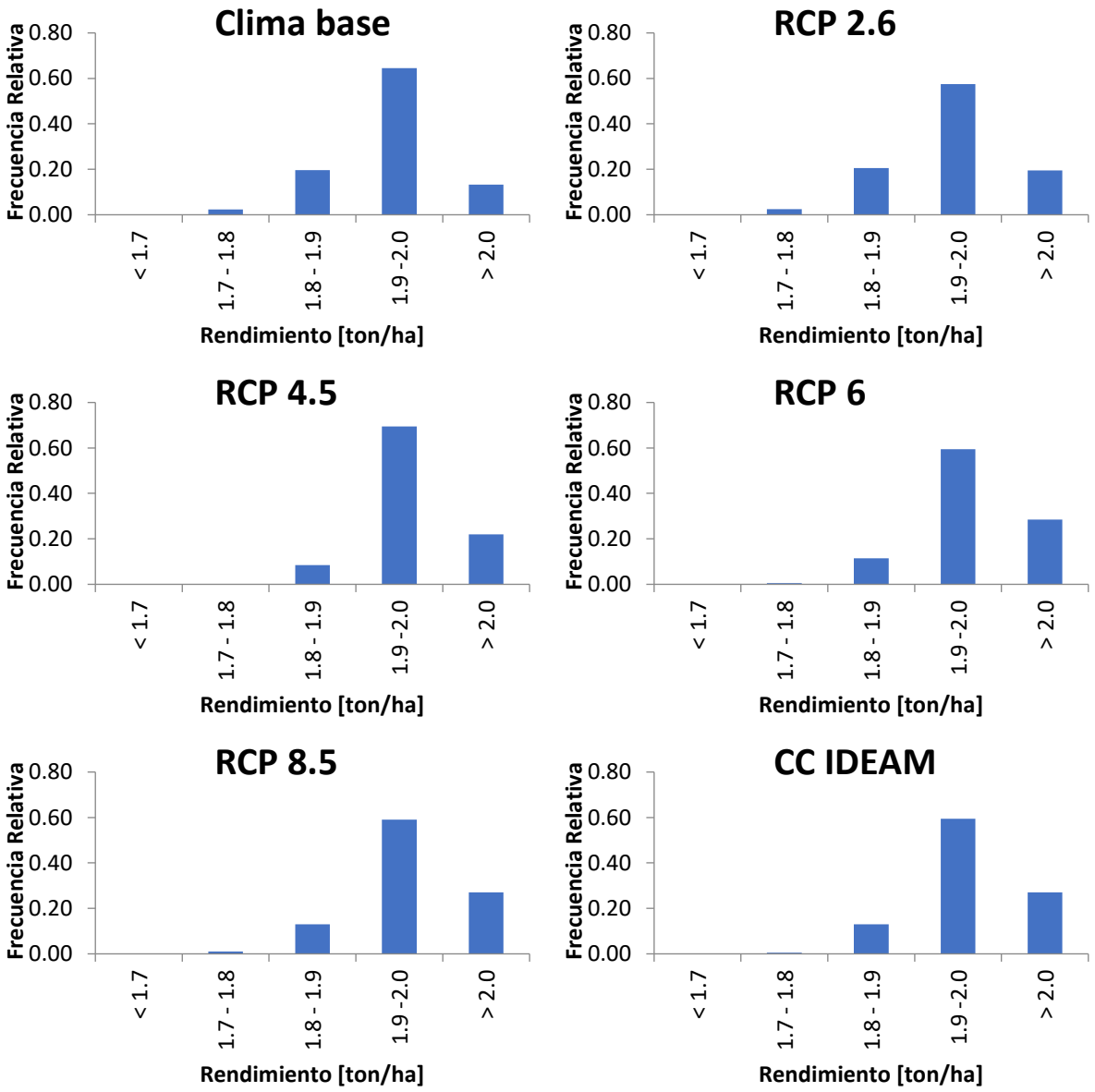


Figura 7-5. Diagramas de frecuencia de los rendimientos sintéticos simulados para el departamento de Antioquia en el segundo semestre de siembra para UPAs con áreas mayores a 20ha

A. 4.2 Tolima

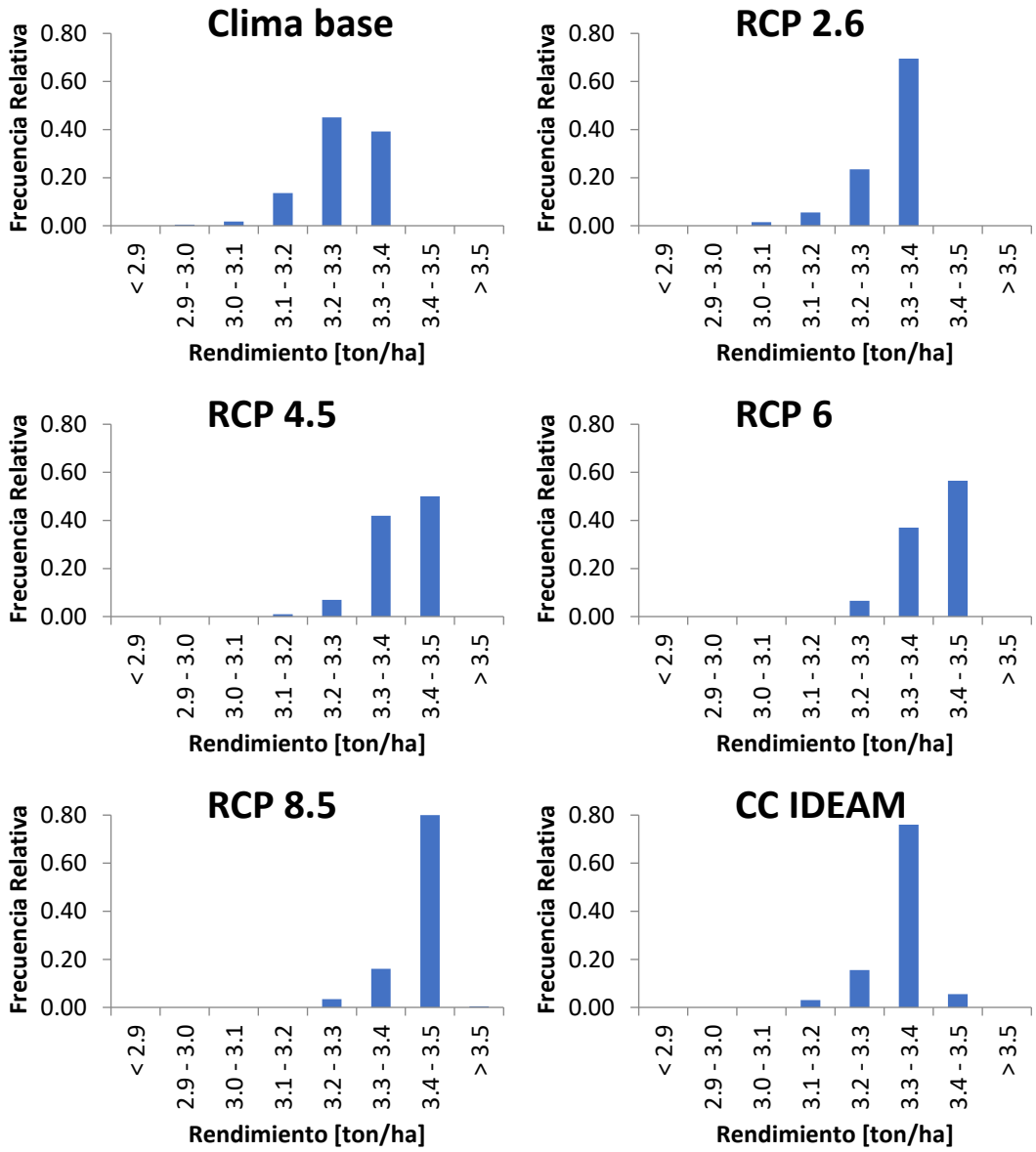


Figura 7-6. Diagramas de frecuencia de los rendimientos sintéticos simulados para el departamento de Tolima en el primer semestre de siembra

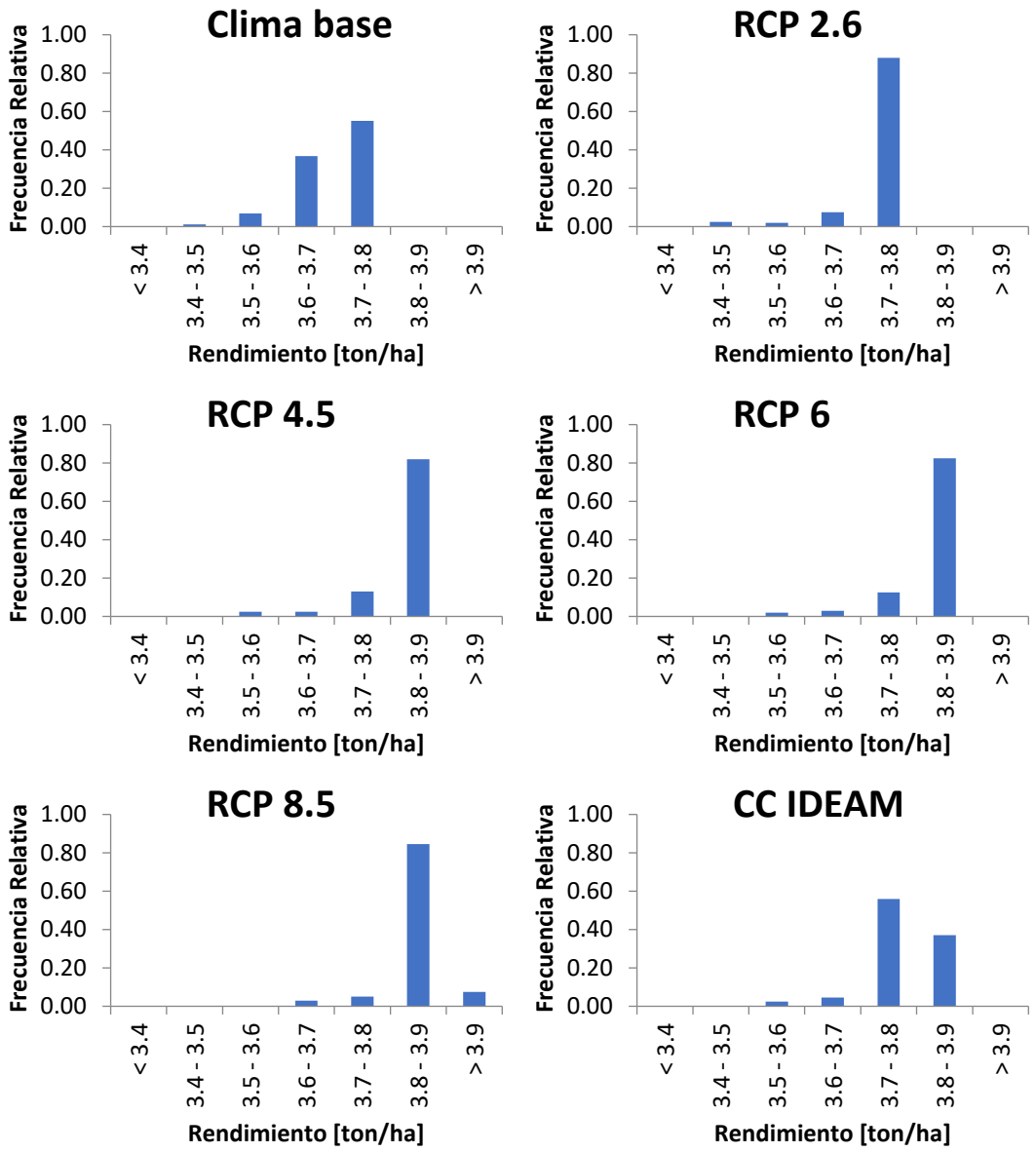


Figura 7-7. Diagramas de frecuencia de los rendimientos sintéticos simulados para el departamento de Tolima en el segundo semestre de siembra

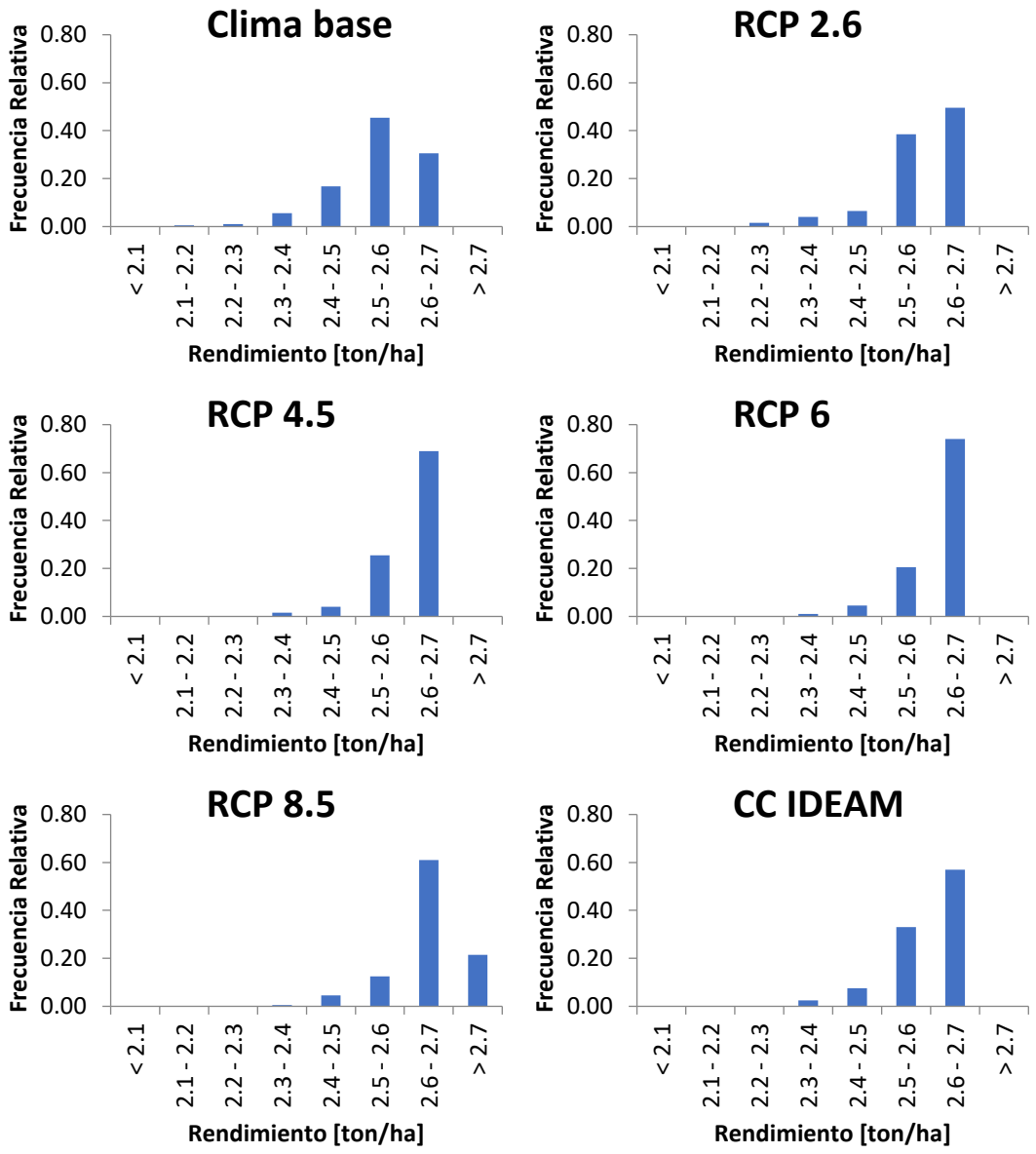


Figura 7-8. Diagramas de frecuencia de los rendimientos sintéticos simulados para el departamento de Tolima en el primer semestre de siembra para UPAs con áreas menores a 20ha

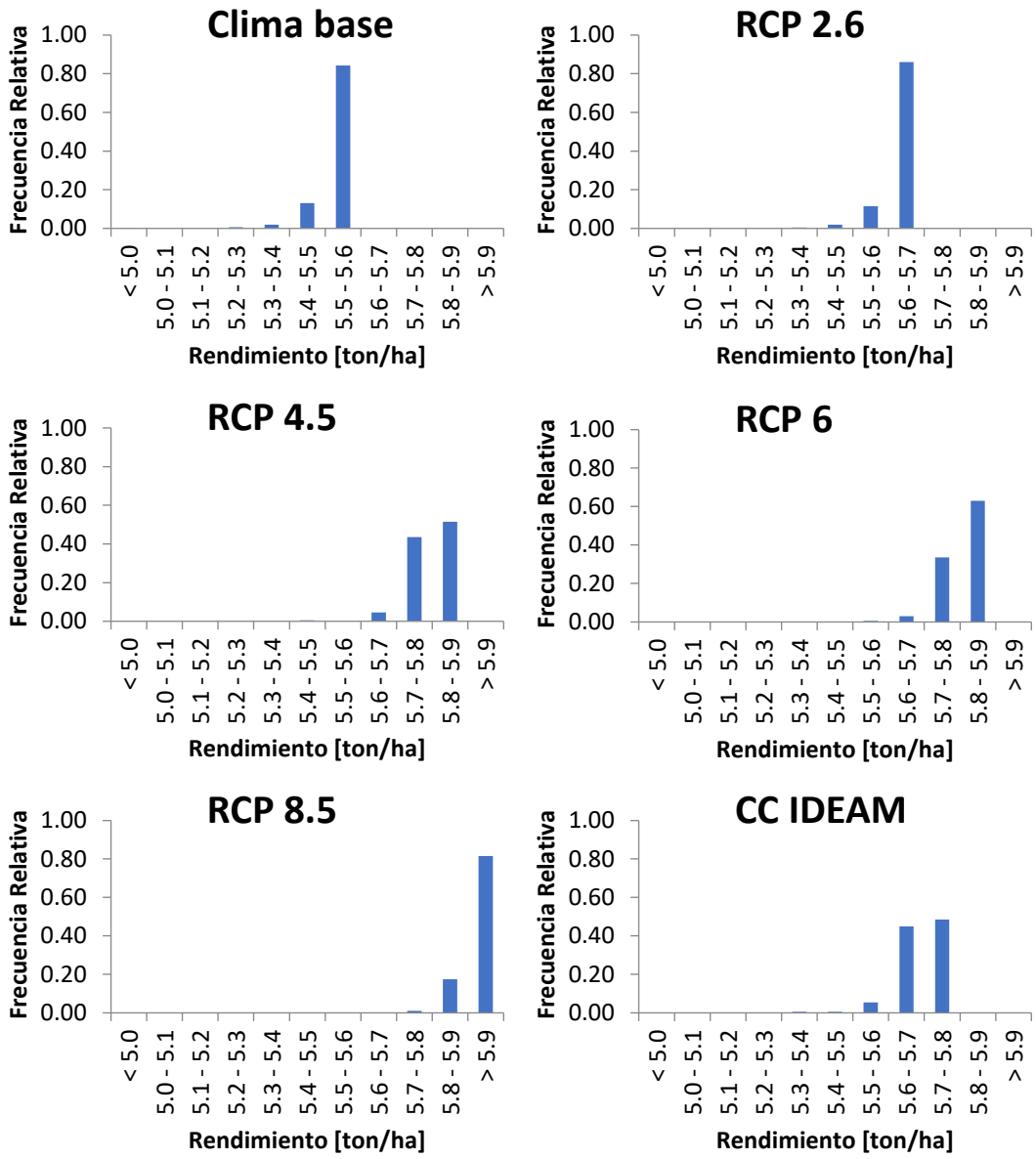


Figura 7-9. Diagramas de frecuencia de los rendimientos sintéticos simulados para el departamento de Tolima en el primer semestre de siembra para UPAs con áreas mayores a 20ha

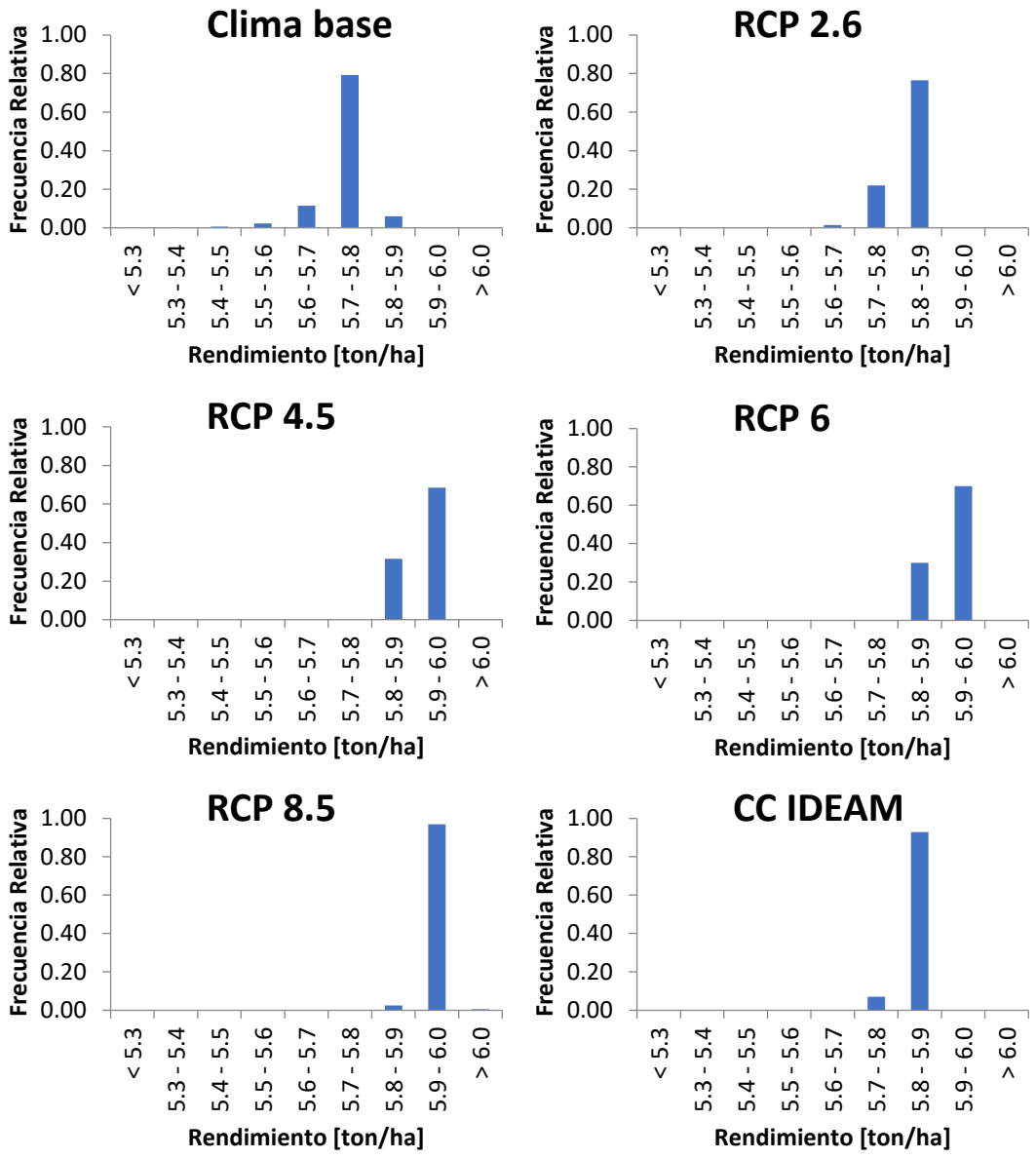


Figura 7-10. Diagramas de frecuencia de los rendimientos sintéticos simulados para el departamento de Tolima en el segundo semestre de siembra para UPAs con áreas mayores a 20ha

A. 5 Mapas de municipios y veredas de los rendimientos simulados

A. 5.1 Antioquia

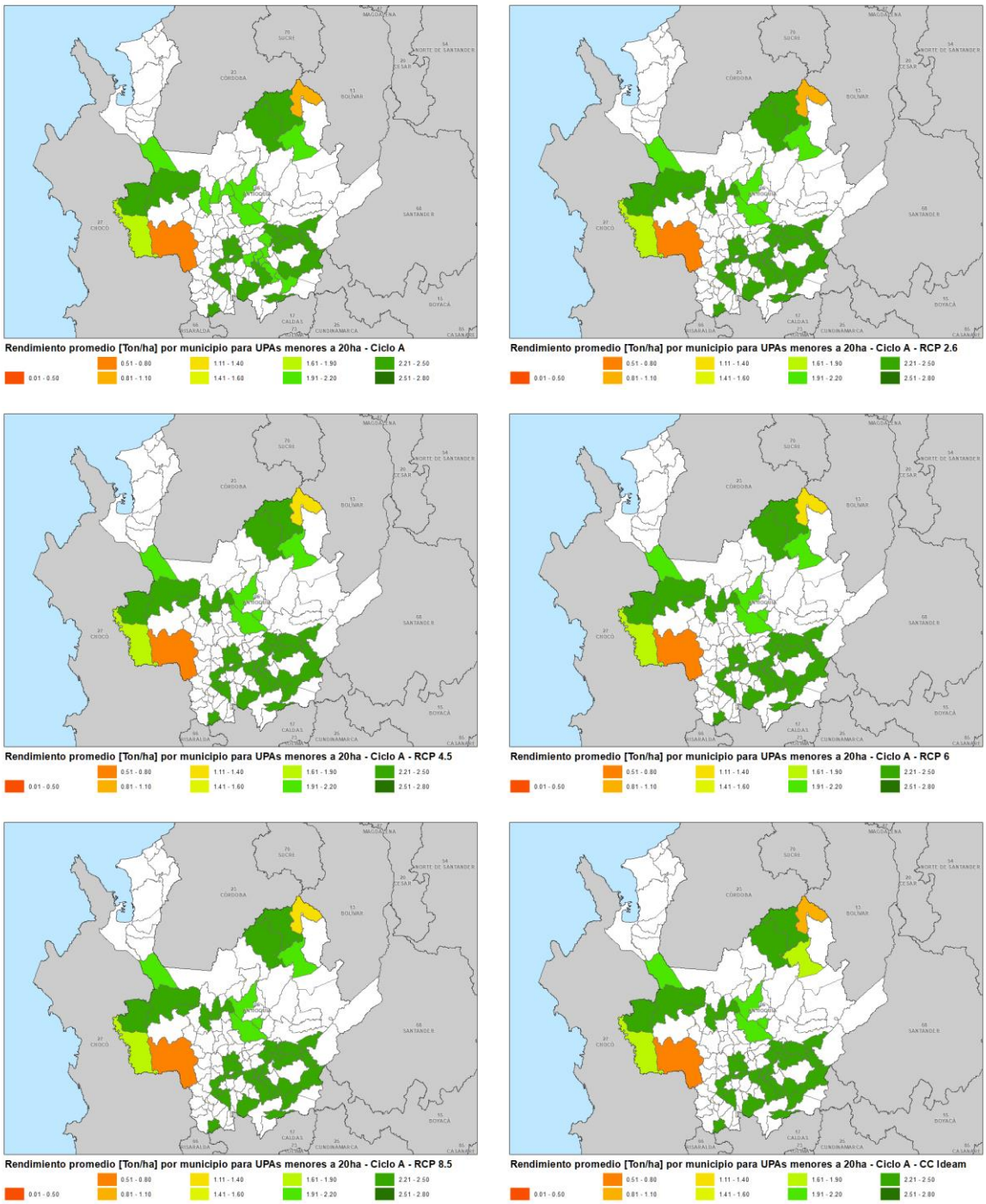


Figura 7-11. Rendimientos promedio simulados por municipio para el departamento de Antioquia en el primer semestre de siembra para UPAs con áreas menores a 20ha

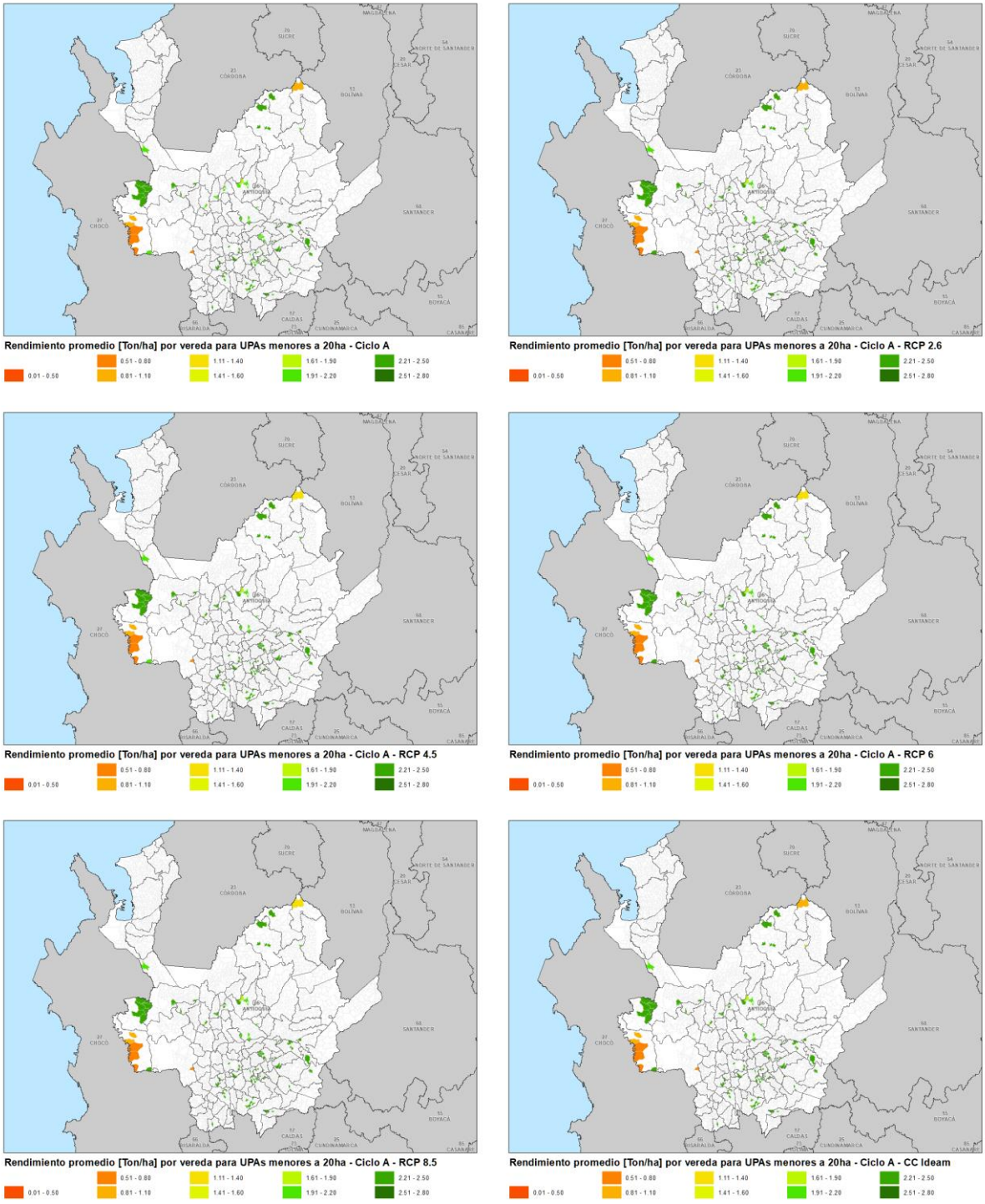


Figura 7-12. Rendimientos promedio simulados por vereda para el departamento de Antioquia en el primer semestre de siembra para UPAs con áreas menores a 20ha

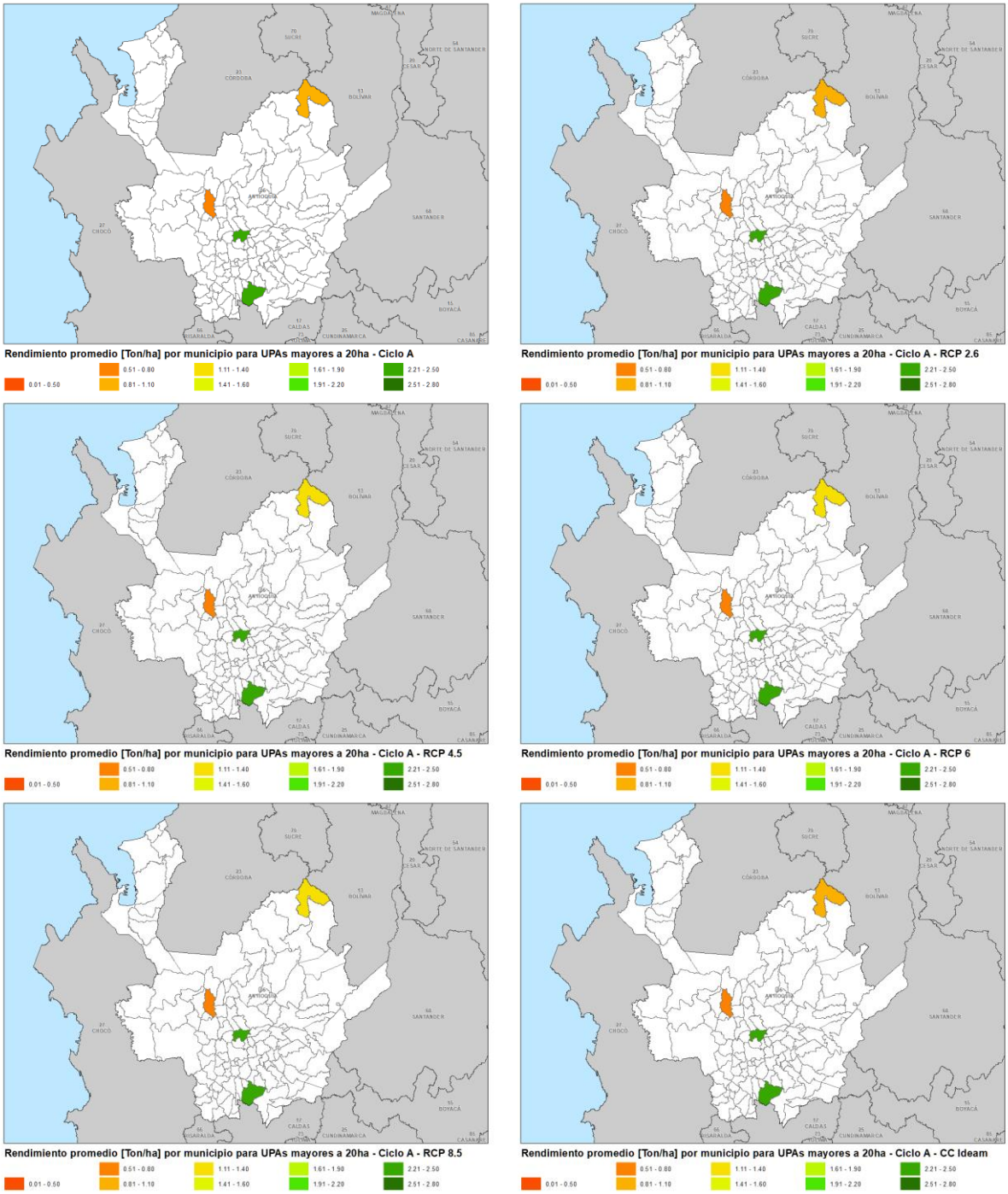


Figura 7-13. Rendimientos promedio simulados por municipio para el departamento de Antioquia en el primer semestre de siembra para UPAs con áreas mayores a 20ha

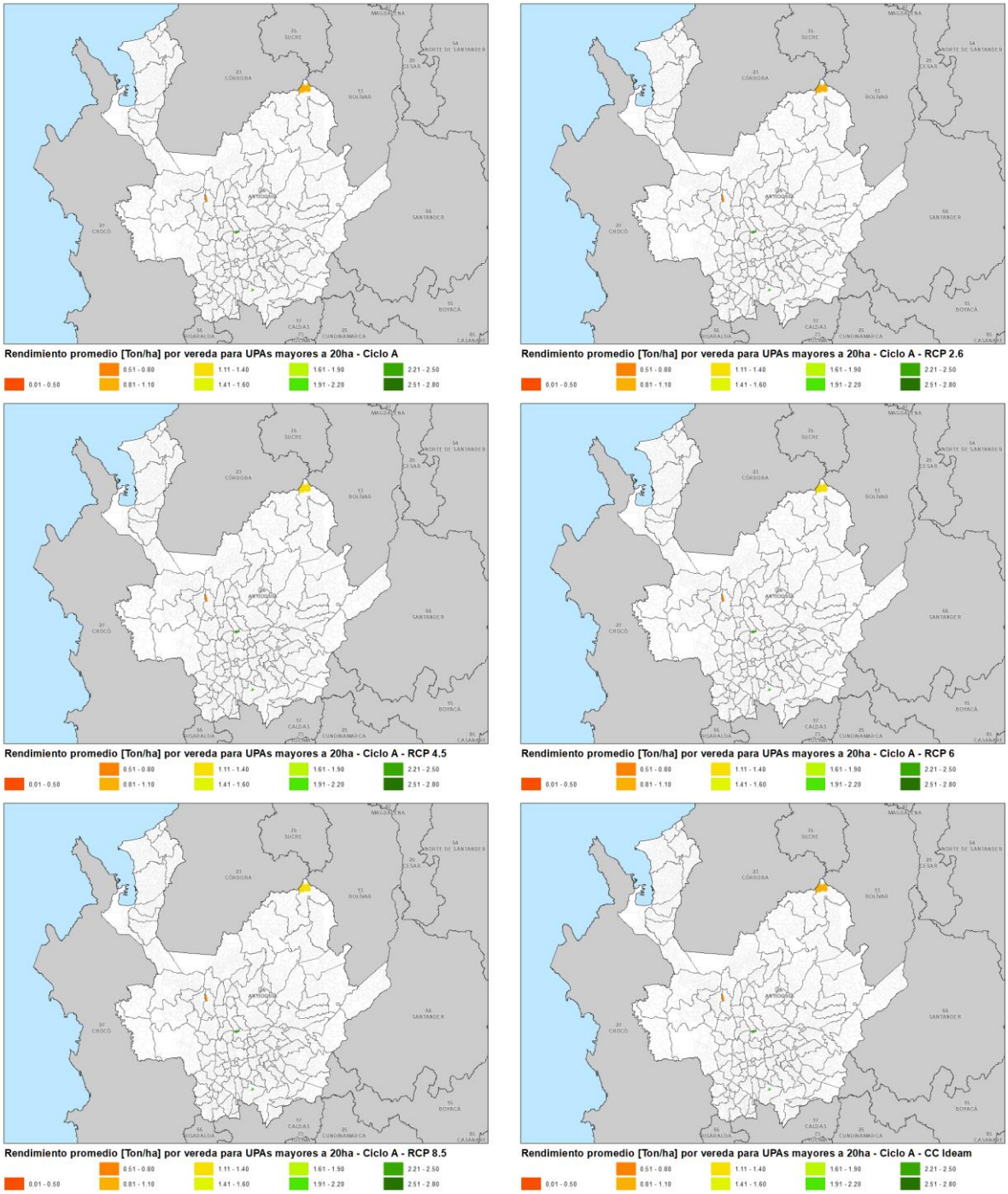


Figura 7-14. Rendimientos promedio simulados por vereda para el departamento de Antioquia en el primer semestre de siembra para UPAs con áreas mayores a 20ha

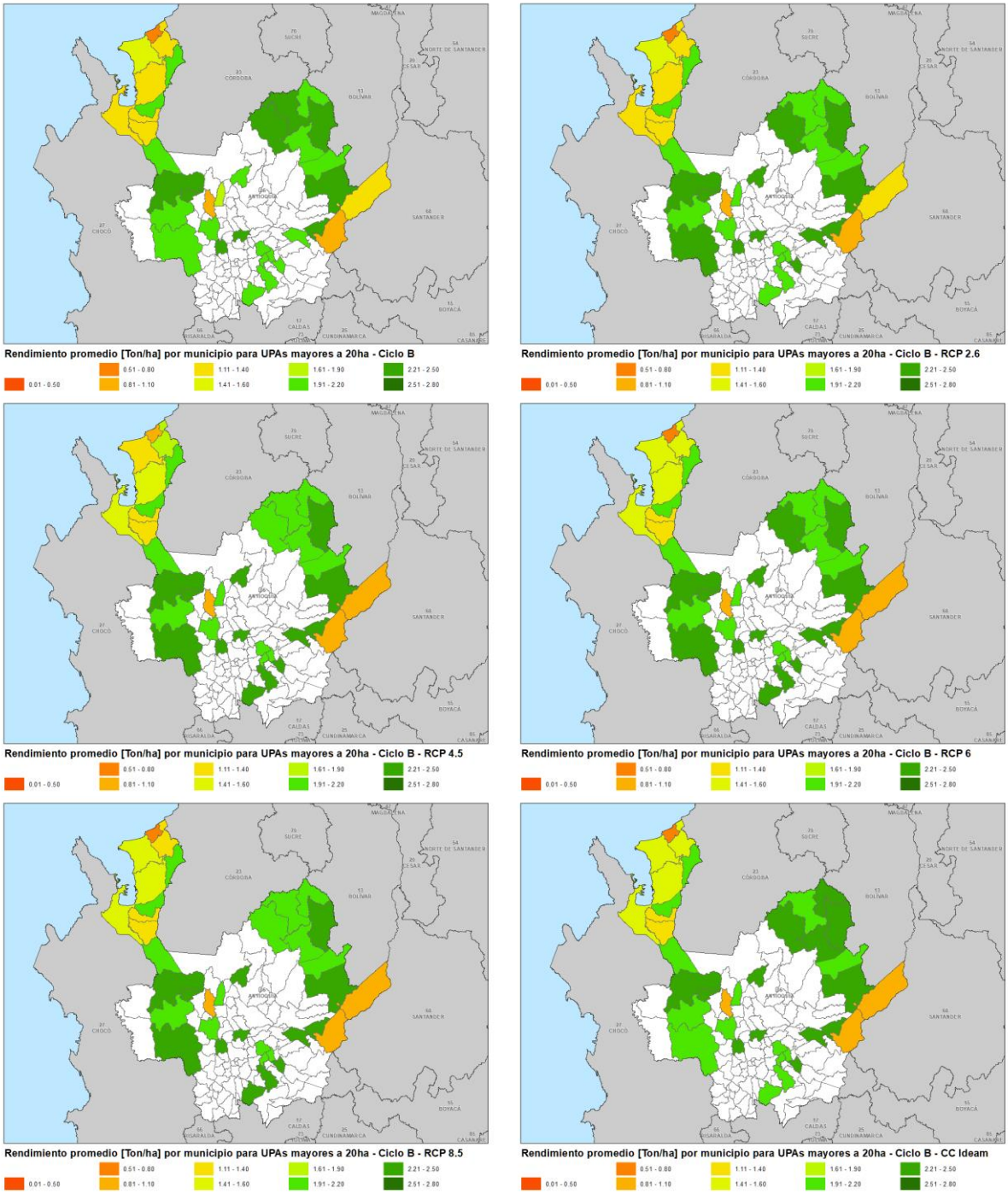


Figura 7-15. Rendimientos promedio simulados por municipio para el departamento de Antioquia en el segundo semestre de siembra para UPAs con áreas mayores a 20ha

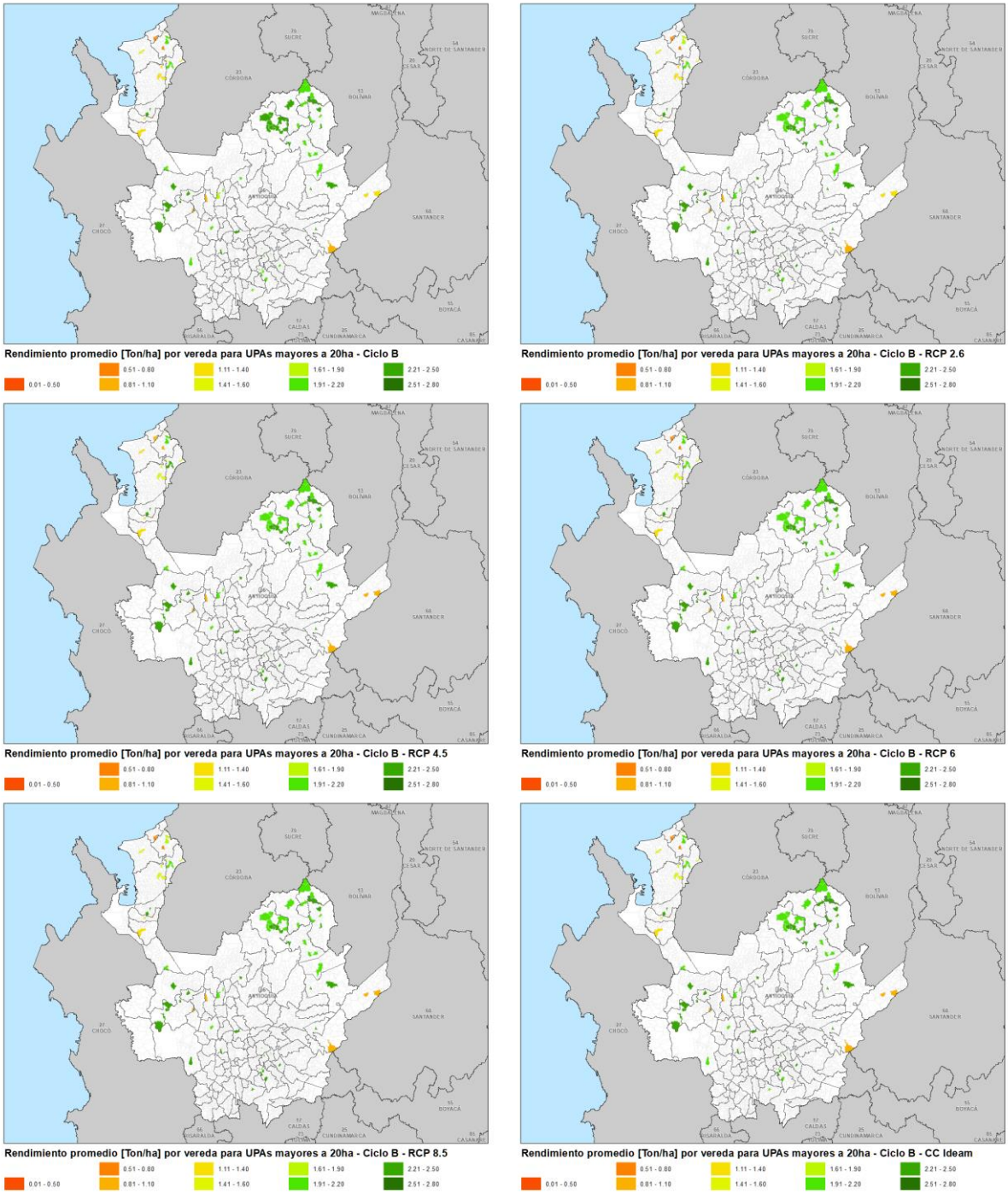


Figura 7-16. Rendimientos promedio simulados por vereda para el departamento de Antioquia en el segundo semestre de siembra para UPAs con áreas mayores a 20ha

A. 5.2 Tolima

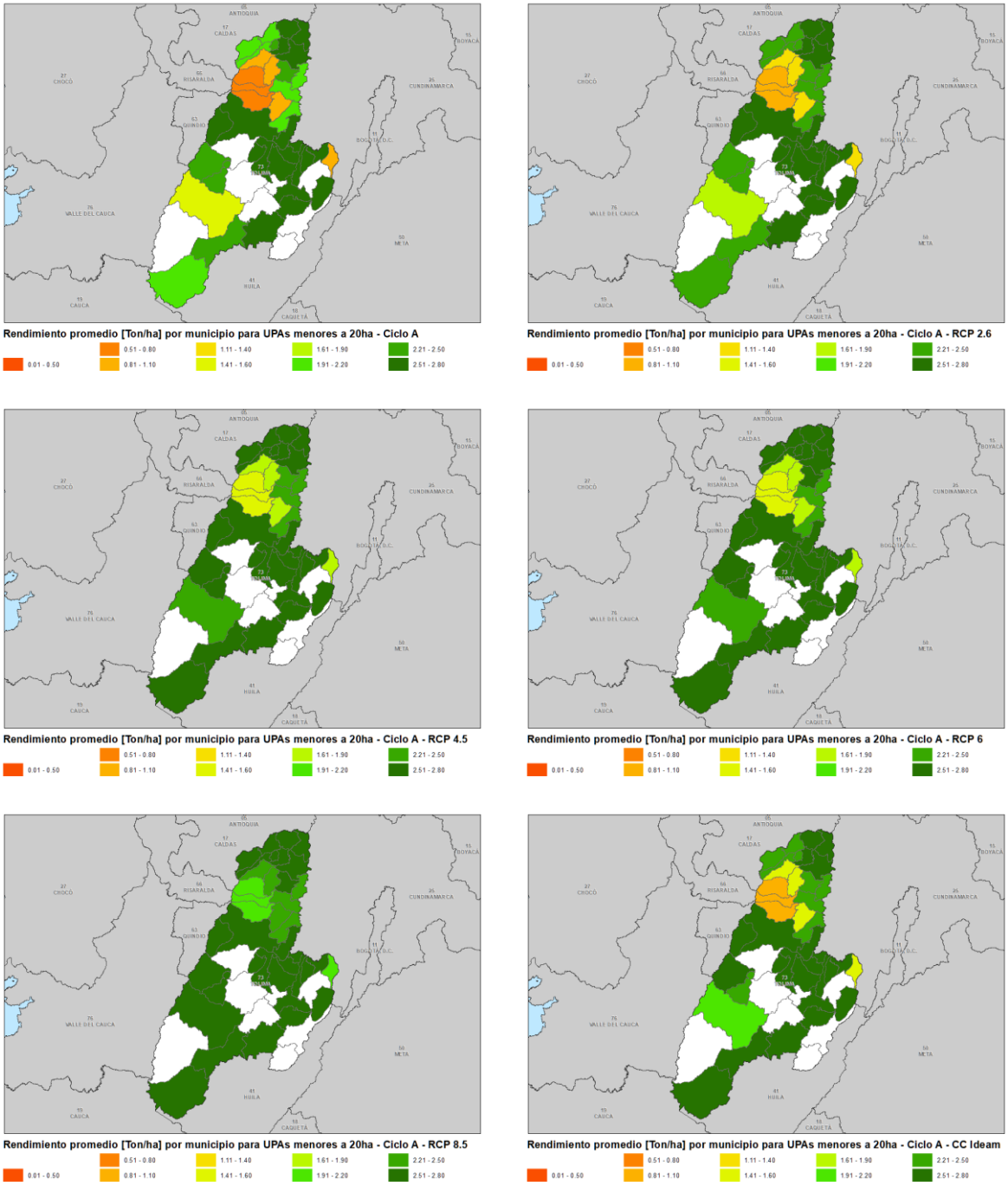


Figura 7-17. Rendimientos promedio simulados por municipio para el departamento de Tolima en el primer semestre de siembra para UPAs con áreas menores a 20ha

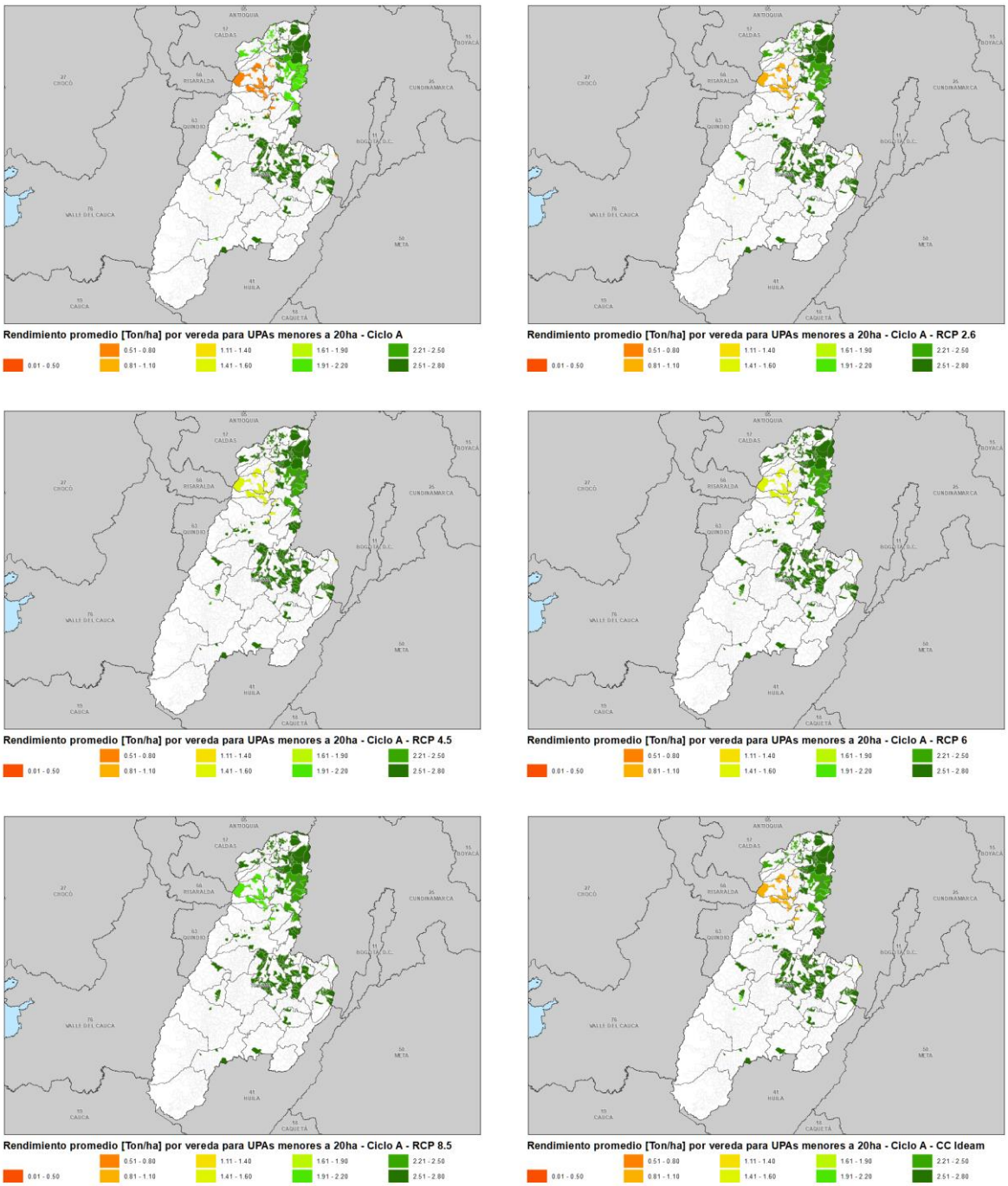


Figura 7-18. Rendimientos promedio simulados por vereda para el departamento de Tolima en el primer semestre de siembra para UPAs con áreas menores a 20ha

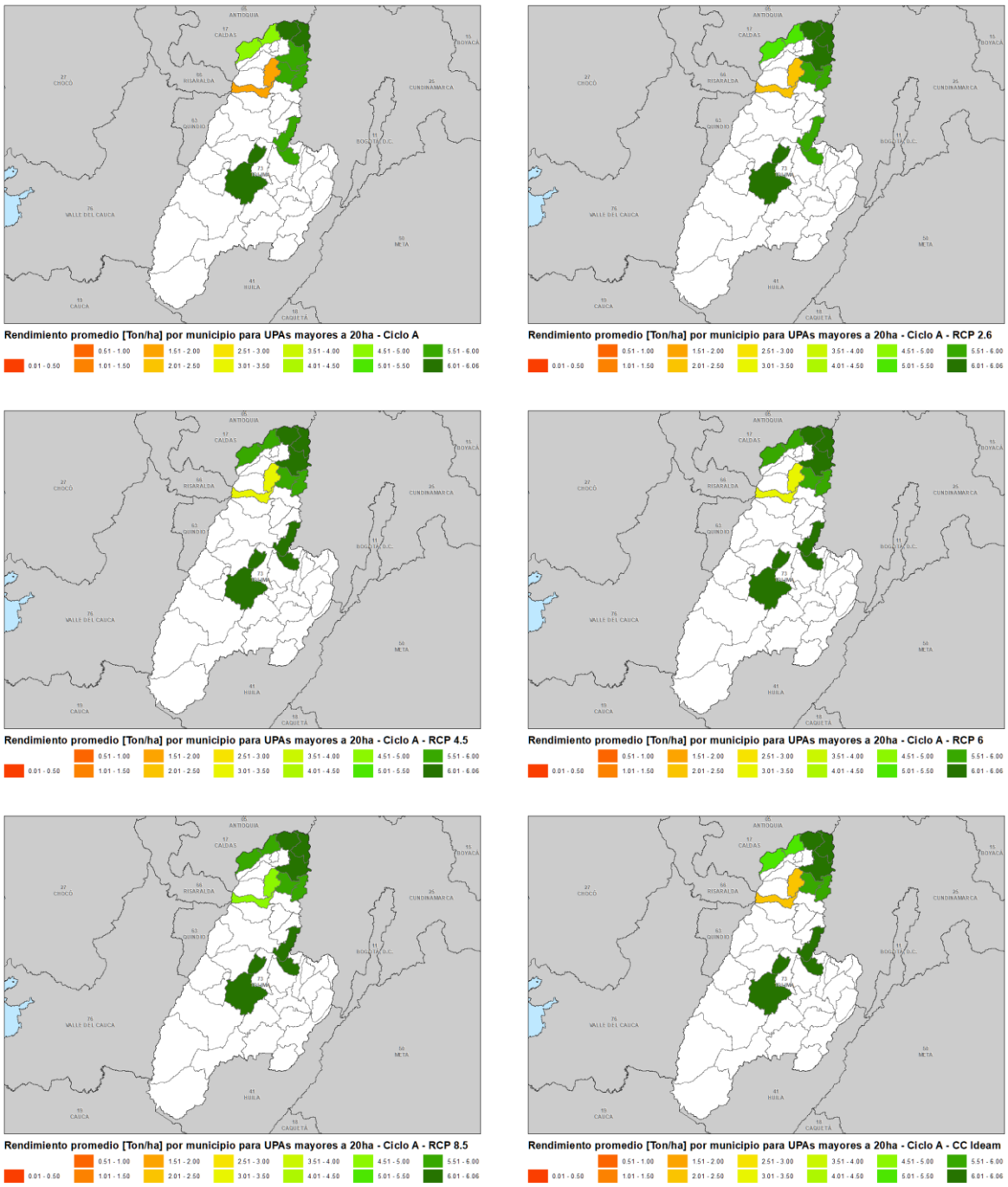


Figura 7-19. Rendimientos promedio simulados por municipio para el departamento de Tolima en el primer semestre de siembra para UPAs con áreas mayores a 20ha

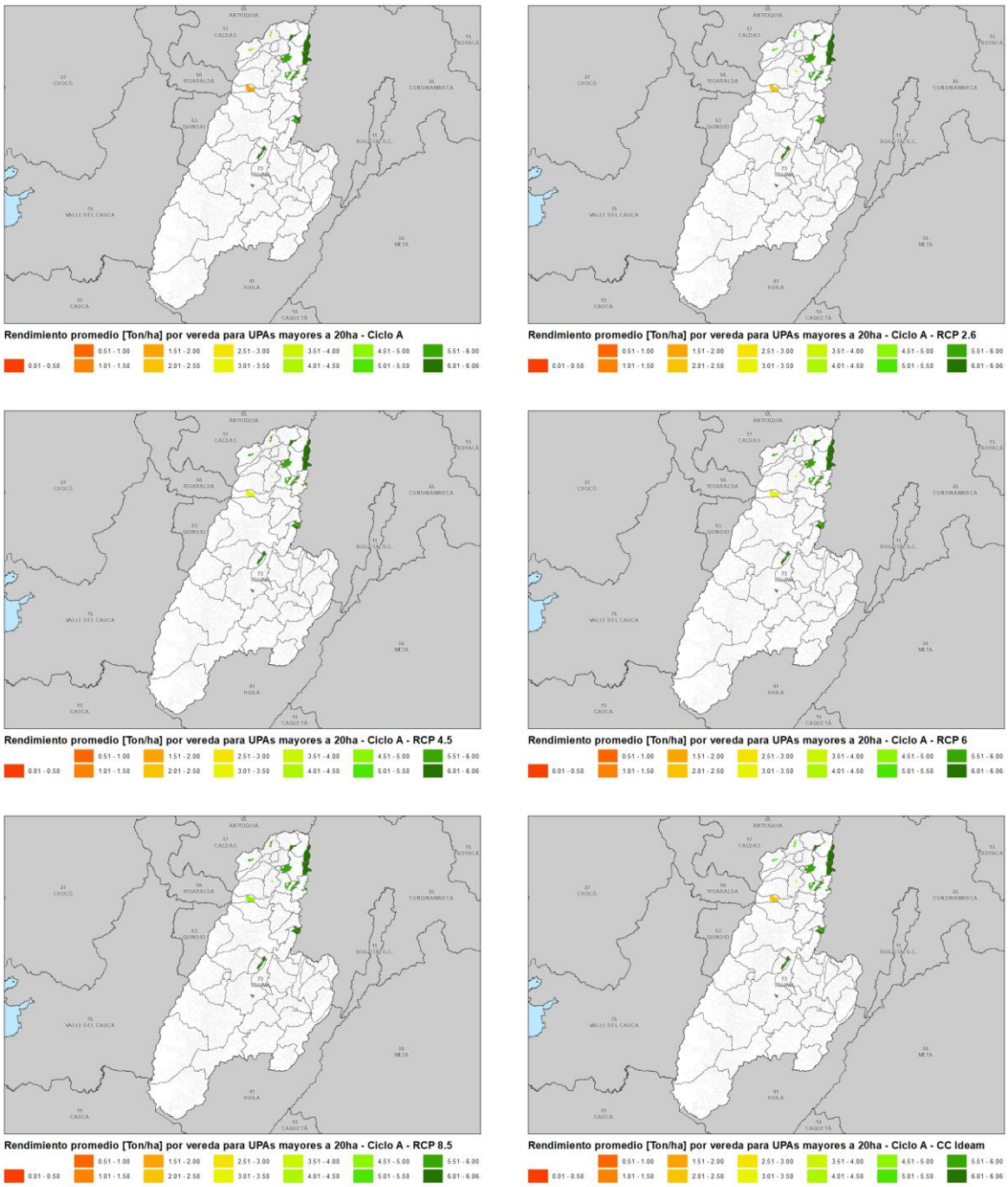


Figura 7-20. Rendimientos promedio simulados por vereda para el departamento de Tolima en el primer semestre de siembra para UPAs con áreas mayores a 20ha

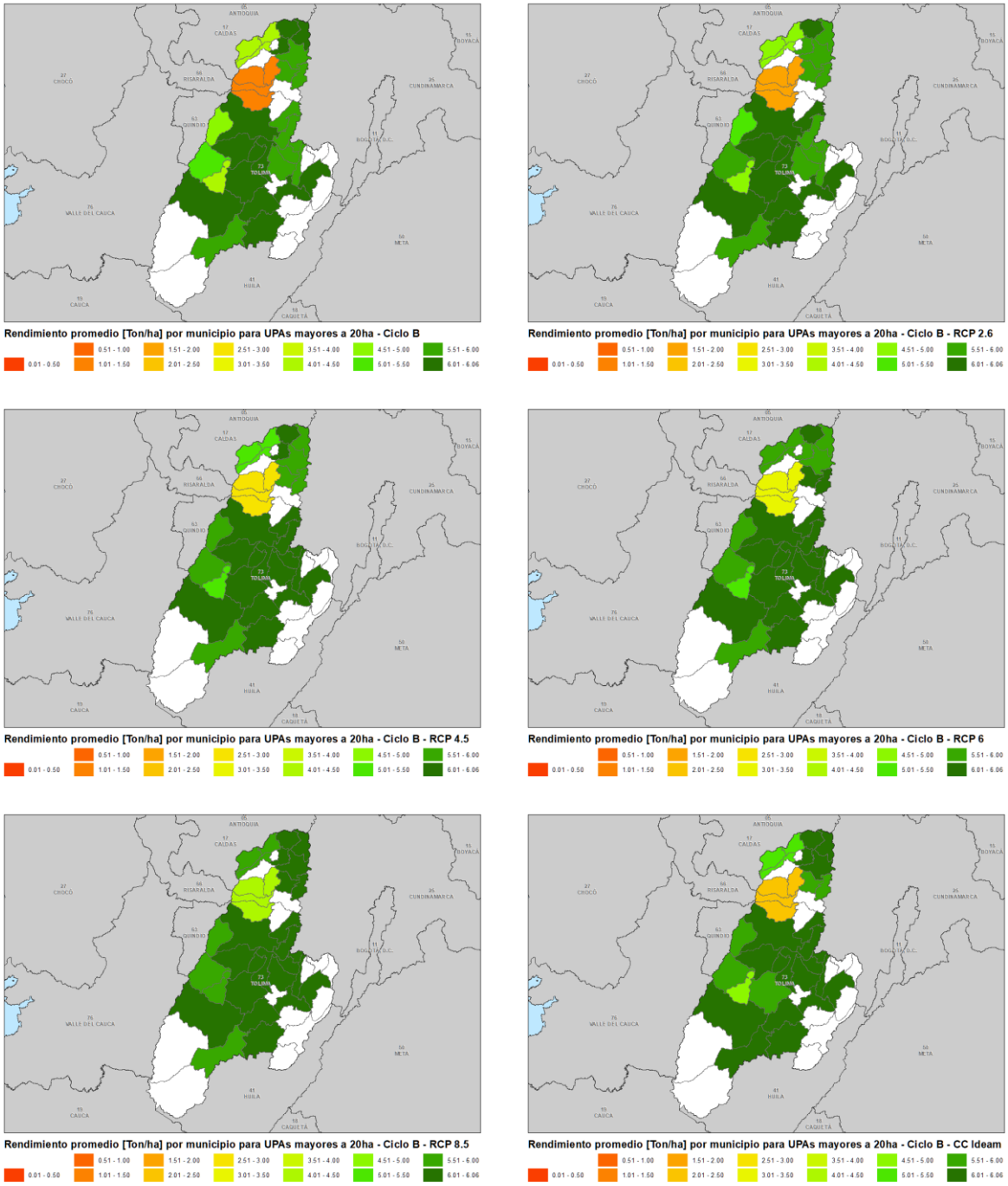


Figura 7-21. Rendimientos promedio simulados por municipio para el departamento de Tolima en el segundo semestre de siembra para UPAs con áreas mayores a 20ha

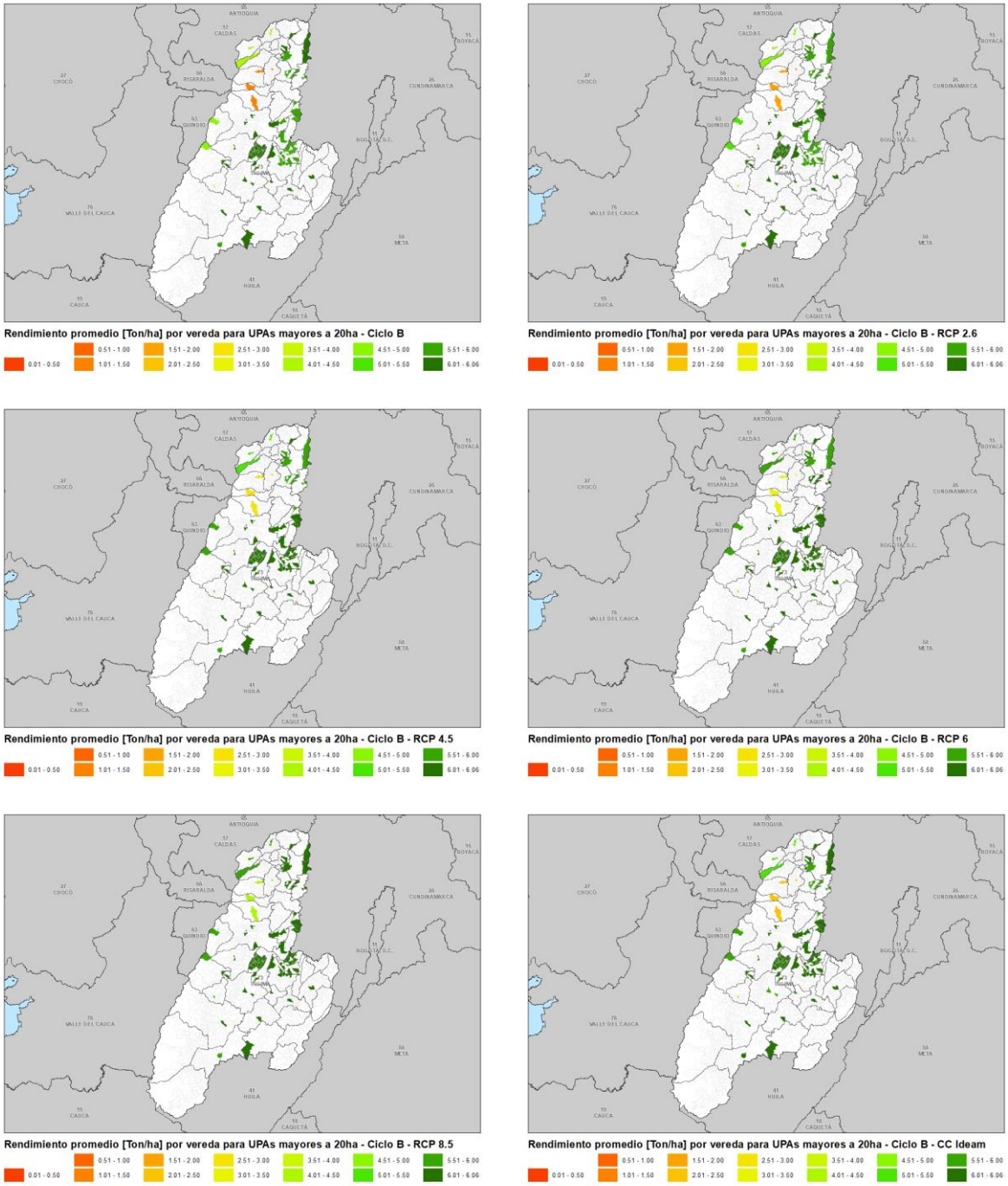


Figura 7-22. Rendimientos promedio simulados por vereda para el departamento de Tolima en el segundo semestre de siembra para UPAs con áreas mayores a 20ha

A. 6 Rendimientos simulados

La totalidad de resultados de las 33’414,000 simulaciones de rendimiento realizadas en ambos departamentos se consigna en el archivo “*Rendimientos_Antioquia_Tolima.xlsx*”