

Impactos del cambio climático sobre las áreas óptimas de nueve cultivos en Cundinamarca - Colombia

Impacts of climate change on best areas of nine crops in Cundinamarca - Colombia

Yolanda Cortés^{1*} y Juan C. Alarcón²

Recibido para publicación: Marzo 29 de 2016 - Aceptado para publicación: Octubre 13 de 2016

RESUMEN

Debido a que se esperan cambios en las condiciones de la precipitación y la temperatura por efectos del cambio climático, para el departamento de Cundinamarca los cuales afectarán el desarrollo de los cultivos, surge la necesidad de identificar los cambios en las áreas de producción de los alimentos más importantes para la seguridad alimentaria bajo escenarios de cambio climático, lo cual permitirá implementar medidas de adaptación oportunas para los municipios más afectados. Se interpolaron los datos para cada uno de los cultivos de acuerdo con sus rangos óptimos de temperatura y precipitación, y la modelación de estas variables se determinó el área y espacialización actual de los cultivos, así como las proyecciones para los periodos 2011 – 2040 y 2070 – 2100 bajo los escenarios de cambio climático A2 (escenario pesimista) y B2 (escenario optimista), los cuales se obtienen a partir de escenarios de emisiones, introducidas en un modelo climático para obtener proyecciones climáticas; los resultados demostraron que bajo nuevas condiciones climáticas, los cultivos de arveja y papa pastusa tienden a desaparecer, mientras que en el cultivo de arroz se esperaba un aumento de las áreas óptimas de producción. Para los escenarios A2 2011 - 2040 y B2 2011 - 2040 se presentaría una reducción del 74% del área cultivable para los nueve alimentos evaluados, contrario a los escenarios A2 2070 - 2100 y B2 2070 - 2100 que indican un incremento del área óptima del 5% respecto a la actual.

Palabras clave: Agricultura, escenarios climáticos, modelación, producción de alimentos, seguridad alimentaria.

ABSTRACT

Because changes in rainfall and temperature conditions due to climate change are expected, for the department of Cundinamarca, which will affect crop development, it is necessary to identify them in the areas of food production that are the most important for food security under climate change scenarios. Such identification will allow the implementation of timely adaptation measures for most affected areas. We investigated the impact of climate change on the best areas of nine crops in Cundinamarca - Colombia. There were interpolate data for each crop according their optimum ranges of precipitation and temperature, and with the preposition of these variables it was determined the current area and spacialization of crops, as well as the projections for the periods 2011 – 2040 and 2070 – 2100 under A2 (pessimistic) y B2 (optimistic), climate change scenarios. Results showed that under new climatic conditions, the potato and vetch crops tend to disappear, while for rice crop, it would hope an increase on optimum areas of production. A2 2011 - 2040 and B2 2011 - 2040 scenarios would show a decrease near 74% of cultivable area for all nine crops, against A2 2070 - 2100 and B2 2070 – 2100 scenarios which indicate a rise of optimum area close to 5% in relation to current area.

Key words: Agriculture, climate change, crops, food security, modeling, yields.

^{1*} M.Sc. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C. Colombia. Carrera 73 # 7C – 49. Celular: 320-2392716. e-mail: yolanda_cortes_cortes@hotmail.com,

² M.Sc. Profesor Asociado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, D.C. Colombia. e-mail: jcalarconh@udistrital.edu.co

INTRODUCCIÓN

Cundinamarca es uno de los 32 departamentos de Colombia, se ubica en la región andina, cuenta con 116 municipios, tiene una extensión de 23.960 Km² y está subdividido en 15 provincias administrativas. Según la Gobernación de Cundinamarca (2002), cerca del 12% del suelo del departamento es destinado para usos agrícolas y, la Secretaría Distrital de Desarrollo Económico (2005), señala que la capital consume 7.600 toneladas diarias de alimentos entre frutas, verduras, cereales y carnes, de los cuales el 77% se encuentran en un radio de 300 kilómetros, provenientes principalmente de Cundinamarca, Boyacá, Tolima y Meta; por lo que resulta oportuno conocer los impactos que sobre el sector agrícola tendrá el clima en el futuro.

Como lo indica el Panel Intergubernamental de Cambio Climático - IPCC (2014) en su quinto informe de evaluación, existe un riesgo de cambio climático global entre alto y muy alto con un aumento de la temperatura media global de 4 °C o más, por encima de los niveles preindustriales en todos los motivos de preocupación, cambio que conlleva impactos graves y generalizados en sistemas únicos y amenazados, importantes extinciones de especies, grandes riesgos para la seguridad alimentaria global y regional, y una combinación de alta temperatura y humedad que pone en riesgo las actividades humanas normales, entre ellas, actividades de producción de alimentos.

Durante las últimas décadas, estos cambios en el clima han estado afectando la producción de los cultivos (Lobell et al. 2011). Los impactos negativos del cambio climático sobre el sector agrícola ya son evidentes en algunas zonas del país y, según lo señala Beddington et al. (2011), este fenómeno nos llevará a situaciones críticas en muchas zonas del planeta, considerando que las amenazas del cambio climático sobre los suministros de alimentos y los medios de subsistencia varían según el lugar.

Si la temperatura se incrementa 2 °C o más respecto a los niveles de finales del siglo XX, y en ausencia de medidas de adaptación, se prevén impactos negativos sobre la producción de los principales cultivos (trigo, arroz y maíz). Estos impactos, afectarán a las regiones tropicales y templadas, aunque algunas ubicaciones puntuales pueden verse beneficiadas (IPCC 2014), razón por la cual el desarrollo de investigaciones relacionadas, aportan al direccionamiento oportuno de estrategias que permitan una adaptación planificada en el territorio.

Específicamente para Cundinamarca, la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático generada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM (2015), indica que para el fin de siglo el departamento podrá presentar elevaciones de temperatura promedio de 2,3 °C adicionales a los valores actuales; en particular, las provincias de Alto, Centro y Bajo Magdalena, así como la Provincia de Medina, serían aquellas con mayores incrementos de hasta 2,4 °C para el 2100.

Por su parte, los principales aumentos de precipitación podrán presentarse en las provincias de Sabana Centro, Sabana Occidente, Norte de Bogotá, Ubaté y Almeidas, con valores de entre 10% y 30% adicionales a los valores actuales. Las principales disminuciones en precipitación podrán presentarse en la Provincia de Medina con valores de hasta un 20% menos sobre el valor actual de referencia. De igual manera, se menciona que los principales efectos podrían presentarse en el sector agrícola, debido a los cambios acentuados de temperatura, así como a la persistencia de plagas asociadas al aumento de precipitación para las zonas en las cuales este valor se eleva.

A nivel mundial y Latinoamericano, se han desarrollado diversidad de investigaciones,

que pretenden evaluar el impacto del cambio climático sobre los cultivos, empleando variadas metodologías, con diferentes escenarios climáticos y proyecciones temporales, no obstante, vale la pena resaltar las siguientes:

Por un lado, el Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT, con apoyo de otras organizaciones, desarrollaron un estudio publicado en el año 2011 llamado "Impactos del Cambio Climático en la Seguridad Alimentaria de Bogotá y los medios de subsistencia de los pequeños productores"; en el que se evaluó la vulnerabilidad de los productores de alimentos alrededor de Bogotá, en el Municipio de Duitama en Boyacá y los Municipios de Guasca, La Vega, Cáqueza, Choconta, San Bernardo y San Antonio de Tequendama en Cundinamarca y, se determinaron los efectos sobre la seguridad alimentaria en la ciudad CIAT (2011).

En este documento, se concluye que el área metropolitana de Bogotá presentará incrementos en sus medias anuales y mensuales de precipitación y temperatura para 2030; además las zonas de producción de alimentos para Bogotá cambiarán y se presentarán alteraciones significativas en algunos cultivos específicos para 2050, en los municipios estudiados se generarán de igual forma, alteraciones en las características climáticas de la región presentándose condiciones extremas. En términos generales, el promedio de disminución de la idoneidad climática de los cultivos sería de un 13% desde el punto de vista de una canasta alimenticia para el área metropolitana de Bogotá.

En marzo del 2014, el CIAT, en compañía del "Portal Regional para la Transferencia de Tecnología y la Acción frente al Cambio Climático en América Latina y el Caribe" – REGATTA (Por sus siglas en inglés), emitieron el documento "Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de la agricultura y del recurso hídrico en los Andes de Colombia, Ecuador

y Perú", en el cual se identifica el impacto para 15 cultivos en términos de reducción o ampliación de su área óptima bajo las variables de precipitación y temperatura en los años 2030 y 2050, concluyendo que en el departamento de Cundinamarca habrán en el futuro zonas más aptas y nuevas zonas aptas para todos los cultivos evaluados CIAT (2011).

En este sentido, es transcendental desarrollar investigaciones que permitan hacer un acercamiento a los impactos negativos y eventualmente positivos, que el cambio climático puede generar sobre los principales medios de vida y actividades económicas de la región y, por consiguiente sobre la calidad de vida de sus habitantes. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación se enmarca en identificar los posibles impactos del cambio climático sobre las áreas óptimas de producción de los cultivos de arroz, arveja, caña panelera, frijol, maíz, papa criolla y pastusa, plátano y yuca; respecto de las variaciones de la precipitación y la temperatura para los escenarios climáticos A2 y B2 en los periodos 2011 – 2040 y 2070 – 2100.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló para Cundinamarca, departamento ubicado en el centro de Colombia y que limita por el norte con los departamentos de Boyacá y Meta; por el sur con los departamentos de Meta, Huila y Tolima y por el occidente con el río Magdalena que lo separa de los departamentos de Tolima y Caldas.

Este territorio se extiende desde el río Magdalena al occidente de la cordillera Oriental, hasta el piedemonte llanero pasando por este eje montañoso, razón por la cual, se encuentran en este departamento todos los pisos térmicos. (Plan frutícola nacional 2006).

El estudio se realizó en dos fases, a saber: 1) La modelación espacial actual de los cultivos

seleccionados, con una base climática 1971-2000; y 2) la elaboración de mapas de las posibles distribuciones futuras de los cultivos seleccionados, considerando los periodos entre los años 2011-2040 y 2070-2100, bajo los escenarios de cambio climático A2 y B2 por IPCC (2007). Las variables climatológicas utilizadas para la modelación fueron la temperatura promedio anual y la precipitación promedio multianual, con una grilla de resolución de 900 x 900 metros. (Alarcón y Pabón 2013). Los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación, existen dos familias de escenarios los A (escenarios pesimistas), y los B (escenarios optimistas), Según IPCC (2007). Lo anterior a fin de considerar ambos extremos y poder hacer comparaciones.

Cultivos seleccionados

Los nueve cultivos analizados, se seleccionaron respecto a los siguientes criterios:

- 1. Prioridad de los alimentos:** El grupo de alimentos prioritarios de Colombia, según lo refiere la Política Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional (2012) está compuesto por: cereales (arroz, maíz y trigo); leguminosas (fríjol, lenteja y arveja); frutas y hortalizas; tuberosas y plátano (papa, yuca y plátano); azúcares (azúcar y panela); aceite y, otros productos cárnicos y derivados lácteos.
- 2. Rendimiento de los cultivos:** aquellos que se producen en mayor cantidad en términos de toneladas obtenidas frente a hectáreas sembradas. Esta información se obtuvo de las estadísticas agropecuarias para el año 2013, generadas por la Gobernación de Cundinamarca.
- 3. Variedad del producto:** Una vez seleccionados los productos de acuerdo con los puntos anteriores, se identificó la variedad predominante de cada uno de ellos.

Combinando estos criterios, se determinaron los cultivos a considerar para el estudio relacionados en la tabla 1.

Tabla 1. Cultivos seleccionados para el análisis del impacto del cambio climático en cundinamarca.

GRUPO ALIMENTICIO	CULTIVO Y VARIEDAD	TIPO DE CULTIVO	PRODUCCIÓN OBTENIDA 2013 (t)	PRINCIPALES MUNICIPIOS PRODUCTORES
CEREALES	Arroz seco	Transitorio	6.426	Paratebuena, San Juan de Río Seco
	Maíz tradicional	Transitorio	64.426	Jerusalén, Tocaime, Caparrapí
	Frijol bolo rojo y cargamanto	Transitorio	16.035	Guaduas, Gutiérrez, Cabrera
LEGUMINOSAS	Arveja Santa Isabel	Transitorio	22.455	El Rosal, Facatativá, Madrid, Gachetá
	Plátano Dominicano Hartón	Permanente	55.655	Pacho, Villeta, Puerto Salgar
CARBOHIDRATOS	Yuca Armenia	Anual	32.190	Caparrapí, Paima, Yacopí
	Papa pastusa y suprema	Transitorio	1.031.271	Chocontá, Villapinzón, Tausa
	Papa criolla yema de huevo	Transitorio	39.363	Pacho, El Rosal, Ubaque, Subachoque
OTROS	Caña panelera POJ-2878	Permanente	182.451	Caparrapí, La Peña, Útica, San Cayetano
TOTAL (t).			1.450.272	

Fuente: Elaboración propia a partir de las estadísticas agropecuarias de la Gobernación de Cundinamarca del año 2014

Es importante aclarar, que los requerimientos climáticos en muchos cultivos, varían de acuerdo con su etapa de desarrollo, de manera que la precipitación, requerida en su etapa de crecimiento inicial, puede no ser la misma que requiere la planta cuando está en su etapa madura, sin embargo, para efectos del presente estudio, no se hicieron estas diferenciaciones y se consideraron de manera general las condiciones de precipitación y temperatura necesarias para una buena cosecha.

A partir de revisión bibliográfica (Benacchio 1982; Muñoz 1995; CENTA 2002; Román 2002; Tamayo 2002; FAO 2003; CORPOICA 2005; CEVIPAPA 2005; CORPOICA y FAO 2007; FAO 2007; FEDEPANELA 2009; FINAGRO 2014), e información climática de los grandes productores de estos alimentos, se definieron los rangos de temperatura (T) media mensual en grados centígrados (°C) y, precipitación (pp) en milímetros totales anuales (mm/año) relacionados en la tabla 2.

Se utilizó el software ArcGis® versión 10.1, para modelar la distribución espacial de las variables de temperatura y precipitación en cada uno de los cultivos, tanto para la validación de las áreas óptimas actuales, como para los escenarios de cambio climático.

Tabla 2. Requerimientos climáticos para cada uno de los cultivos seleccionados para el análisis del impacto del cambio climático en cundinamarca.

CULTIVO	T (°C)	pp (mm/año)
Arroz	25 - 30	1400 – 3400
Arveja	10 - 15	500 – 900
Caña	20 - 28	1600 – 2200
Frijol	13 – 25	1000 – 1800
Maíz	20 - 32	990 – 1800
Papa pastusa	10 - 15	600 – 800
Papa criolla	12 - 19	800 – 1600
Plátano	19 - 30	1400 – 2200
Yuca	20 - 25	1600 – 2500

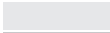


Fuente: Elaboración propia a partir de revisión bibliográfica.

Tanto para la temperatura como para la precipitación, se desarrolló el mismo procedimiento, en el que se tomó el rango óptimo de cada variable para cada cultivo y, con el interpolador IDW (*Inverse Distance Weighted Interpolation*), apropiado ya que se contaba con una nube de puntos lo suficientemente cerca, se hizo la modelación de los datos para la actualidad y para los escenarios climáticos (A2 y B2 en los periodos 2011-2040 y 2070-2100).

Mediante la técnica de álgebra de mapas se procesaron cerca de 90 capas con temperatura y precipitación, obteniendo así las áreas óptimas (en hectáreas) de producción para cada cultivo y escenario.

Se hizo la comparación de pérdida o ganancia de áreas óptimas para cada uno de los escenarios climáticos respecto de las áreas óptimas actuales, empleando la escala de la tabla 3 para la presentación de los resultados.

Tabla 3. Criterios para la clasificación de resultados

CRITERIO	ha (%)	COLOR
Ganancia	Cualquier porcentaje	
Pérdida leve	≤ 33,33 % del área actual	
Pérdida media	33,34 a 66,66 % del área actual	
Pérdida fuerte	> 66,66 % del área actual	

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 4 muestra en hectáreas, el área óptima para el desarrollo de los cultivos tanto en la actualidad, como para cada uno de los escenarios de cambio climático considerados.

Cabe mencionar, que la modelación sugiere resultados muy similares para los escenarios A2 y B2 para el año 2040 y para los escenarios A2 y B2 para finales de siglo, siendo mínima la diferencia entre cada par de escenarios, razón por la cual puede hablarse de resultados al año 2040 y al año 2100 casi que independientemente

Tabla 4. Área óptima (ha) actual y modelada para el desarrollo de cada cultivo en los escenarios A2 y B2.

CULTIVO	ACTUAL	A2		B2	
		2011 - 2040	2070 - 2100	2011 - 2040	2070 - 2100
Arroz	242.036,16	296.119,95	297.225,54	300.878,74	307.867,00
Arveja	233.506,66	0,00	0,00	0,00	0,00
Caña	285.121,53	150.977,01	267.112,21	148.498,56	252.448,16
Criolla	560.915,53	0,00	400.117,39	0,00	461.238,63
Frijol	591.660,56	11.295,15	944.392,12	12.876,70	974.882,77
Maíz	465.320,42	42.207,69	658.252,05	50.280,60	597.208,84
Papa	80.366,46	0,00	0,00	0,00	0,00
Plátano	402.240,05	172.984,81	507.319,50	160.444,93	497.776,30
Yuca	287.669,34	129.903,22	219.202,22	127.481,50	195.379,86
TOTAL	3.148.836,72	803.487,84	3.293.621,03	800.461,03	3.286.801,57

A2 (escenarios pesimistas), B2 (escenarios optimistas), IPCC (2007). Fuente: los autores

Ganancia Perdida leve Pérdida media Pérdida fuerte

de la familia de escenario climático. En la tabla 5 se muestra la distribución espacial de cada uno de los cultivos en el departamento para las condiciones actuales, así como para los escenarios climáticos definidos.

Como lo indican los resultados, los cultivos con bajos requerimientos de precipitación y temperatura como la arveja y la papa pastusa desaparecerían en el futuro, ya que estas dos variables climáticas tienden a presentar valores superiores a los actuales bajo cualquiera de los escenarios climáticos.

Lo anterior, debido a que la papa es una de las especies de plantas más sensibles al estrés hídrico (Corchuelo 2005), pues el exceso de agua en el suelo, provoca un desarrollo pobre de las raíces de la papa y la pudrición de los tubérculos recién formados (Ministerio de agricultura y ganadería 1991).

De igual manera, las altas temperaturas perjudican el contenido de materia seca y la formación de almidón en este tubérculo de primordial importancia (Ortiz 2012), afectando el desarrollo de la planta y del tubérculo y, provocando una caída en los rendimientos. (Quiroz et al. 2011).

No obstante, en el estudio realizado por el CIAT y REGATTA (2014), se establece que para el 2050 bajo el escenario climático A2, se prevén, unas zonas más aptas para el desarrollo de la papa pastusa hacia el costado oriental de la capital y, algunos puntos aislados hacia las provincias de Río Negro y Almeidas; de igual manera se esperan nuevas zonas aptas hacia las provincias de Sumapáz y Gualiva.

Por su parte, como lo indican Galindo y Clavijo (2009), cuando la temperatura de la arveja está por encima o por debajo del óptimo, el desarrollo se hace más lento y puede detenerse, dado que la temperatura es el factor primario que controla la tasa de aparición foliar, más que la duración del fotoperiodo.

En el mencionado estudio se identifican para los años 2030 y 2050, unas zonas más aptas para este cultivo a los costados de la cordillera oriental, a los alrededores de Bogotá y, en las provincias de Ubaté y Almeidas, y nuevas zonas aptas en la zona rural de la ciudad capital, así como pequeñas áreas dispersas en los municipios de Tausa y Guasca.

Dichos resultados contrastan con los obtenidos en el presente estudio; lo que podría atribuirse

fundamentalmente a las diferencias en los valores de los requerimientos climáticos considerados para medir la sensibilidad agrícola, dado que se emplearon rangos más amplios para la temperatura de la arveja, así como para la precipitación de la papa.

En un segundo grupo, están aquellos cultivos que bajo cualquiera de los escenarios climáticos presentarían disminuciones de sus áreas óptimas en alguna medida, tal es el caso de la caña, la papa criolla y la yuca, con un promedio de reducción de 28,61 y 41% respectivamente, siendo los escenarios A2 2011 - 2040 y B2 2011 - 2040 los menos favorables, incluso llegando a cero el área óptima para el caso de la papa criolla.

Los resultados obtenidos en el estudio realizado por el CIAT y REGATTA (2014), indican que las zonas aptas hoy, es decir los municipios de Puerto Salgar, Caparrapí y Yacopí, entre otros aledaños, serán más aptas para el cultivo de la caña panelera tanto en el 2030 como en el 2050 y, que las nuevas zonas aptas estarán ubicadas hacia la parte sur occidental del departamento, es decir en las provincias de Alto Magdalena y Tequendama, bajo el escenario A2, coincidiendo con los resultados de la presente investigación, siendo estas provincias las que concentrarían la mayor producción por contar con los requisitos óptimos de precipitación y temperatura.

Con respecto a la papa criolla, se encontraron reducciones del área óptima en su totalidad para los dos escenarios proyectados al año 2040 y, reducciones del 28 y 17% para los escenarios A2 2070 - 2100 y B2 2070 - 2100 respectivamente, congruentes con los resultados de la FAO (2013), en donde para todos los casos se observaron disminuciones en la producción de tubérculo seco y una mayor disminución de ésta a medida que el escenario climático tiene un horizonte de tiempo más lejano a la media climática.

Para el caso de la yuca, las áreas óptimas para todos los escenarios muestran una disminución respecto al área actual de entre un 23 y un 55%, representando además un desplazamiento hacia el oriente del departamento, mucho más cerca de la cordillera que lo atraviesa.

Según el estudio realizado por el CIAT y REGATTA, para el cultivo de yuca, se observa en general una ganancia de aptitud de este cultivo a través de la región andina colombiana. Esto se da especialmente en las zonas más bajas, dado que la aptitud climática generalmente se encuentra en zonas de baja altitud, y con los escenarios de cambio climático las zonas de más baja altitud de la región Andina mejorarán sus condiciones climáticas para este cultivo. En algunos municipios que se encuentran en la región Andina pero cuya localización altitudinal es baja, y que actualmente presentan buenas condiciones de aptitud climática muestran que a 2050 la aptitud se va a reducir levemente bajo el escenario A2.

Dichos resultados concuerdan parcialmente con los obtenidos en la presente investigación, donde para el periodo 2011 - 2040 bajo el escenario A2, las zonas aptas se encontrarían hacia el costado occidental de la cordillera oriental, sin embargo, hacia el costado oriental no se encontrarían zonas aptas pues la temperatura se encontraría por debajo de los 20 °C limitando el desarrollo de este cultivo.

En tercer lugar, se relacionan los cultivos cuya área óptima aumenta para dos escenarios climáticos, mientras que para los dos restantes disminuye, como ocurre con el frijol, el maíz y el plátano, siendo nuevamente los escenarios proyectados para el periodo 2070 - 2100 los más favorables, con aumentos de las áreas óptimas frente a las condiciones actuales, mientras que para el 2011 - 2040 se esperarían reducciones de las áreas de producción.

En el caso del frijol, para los escenarios A2 2011 - 2040 y B2 2011 - 2040, el área óptima corresponde a menos del 1% de la extensión del departamento, dado que es un cultivo muy sensible al estrés por sequía y a las altas temperaturas, en especial las nocturnas, que reducen la floración y por ende la producción (Eitzinger et al. 2013). Para los restantes escenarios, el panorama es contrario ya que se aprecia un aumento de alrededor de un 40% frente al área óptima actual. A semejándose estos resultados a los obtenidos por Esquivel et al. (2014), los cuales muestran que existen incrementos o decrementos en la productividad de frijol bajo escenarios de cambio climático, pero que se mantienen en promedio los rendimientos obtenidos de forma histórica.

Para los escenarios A2 2070 - 2100 y B2 2070 - 2100, se atribuyen condiciones favorables para el maíz ya que el área óptima aumenta en promedio un 35% respecto a la actual. La provincia ideal para su cosecha sigue siendo la del Alto Magdalena, pero además se extiende el área óptima hacia las provincias de Tequendama, Sabana Occidente y hasta el altiplano cundiboyacense, siendo congruente con los hallazgos de Eitzinger et al. (2014), en el que se indica que la temperatura y la precipitación afectarán a la distribución de los cultivos como maíz y plátano, siendo las áreas de producción menos adecuadas para el año 2050 frente a las actuales.

No obstante, la variación en la distribución espacial de los cultivos podría no estar directamente asociado con su productividad, pues como lo señala Ortiz (2012), bajo condiciones de cambio climático, los rendimientos del maíz podrían no sufrir cambio alguno en Colombia.

De otro lado, según Quiroga (2011), se espera que a 2050 la aptitud climática para este cultivo sea excelente para los municipios de Cáqueza y La Vega; buena para San Antonio

de Tequendama, y apta para Chocontá y San Bernardo, zonas que actualmente no tienen mayor producción de este alimento. Dicho documento concluye que en el caso del maíz, para el año 2030 se observa como las zonas que actualmente tienen una buena aptitud pasan a tener una aptitud muy baja para la siembra, afirmación que coincide con lo proyectado en este estudio ya que para el año 2040 las zonas aptas se reducirían casi en su totalidad.

Para el caso del plátano, las áreas óptimas bajo nuevas condiciones climáticas mantienen un patrón de espacialización similar al actual, siendo muy favorable para los escenarios A2 2070 - 2100 y B2 2070 - 2100, con incrementos de 26 y 23% respectivamente, a diferencia de los proyectados para el periodo 2011 - 2040 en ambas familias de escenarios climáticos, donde el área ideal disminuye de manera notable.

Finalmente, el único cultivo que podría beneficiarse en cualquiera de los cuatro escenarios climáticos es el arroz, alimento básico para más de la mitad de la población del planeta y que, a nivel mundial ocupa el segundo lugar en superficie cosechada después del trigo, proporcionando más calorías por hectárea que cualquier otro grano cultivado. (Barona 2010).

Se encontró que su área óptima presenta un aumento de aproximadamente un 24% frente a las áreas óptimas actuales, debido a que es un cultivo característico de los trópicos húmedos con requerimientos de alta precipitación, alta radiación solar y altas temperaturas (FONAIAP 1982), correspondiente con el comportamiento futuro de las variables climáticas analizadas para el departamento.

Los resultados obtenidos concuerdan con la FAO (2013), en donde se hizo la simulación con el modelo AquaCrop, deduciendo que para los escenarios de cambio climático A2 y B2; un incremento en concentraciones de dióxido de

carbono - CO₂ (no muy alto), y un incremento de temperaturas (no muy alto) puede llegar a beneficiar el rendimiento del grano.

Área óptima total para los nueve cultivos analizados. Como se muestra en la tabla 6, hoy en día, los cultivos se concentran hacia la parte central y occidental del departamento, con algunos parches asilados hacia el oriente y una buena porción en el municipio de Paratebueno; para el periodo 2011 - 2040 se espera una reducción del 25,46% del área óptima para los cultivos estudiados respecto al área actual y estos se agruparían en su mayoría hacia la zona nor-occidental del departamento y corresponderían en gran parte a cultivos de arroz, caña y yuca.

Para la proyección correspondiente al periodo 2070 - 2100, las zonas óptimas corresponden en cierta medida con el patrón espacial actual, donde la mayoría de zonas aptas de acuerdo con la precipitación y la temperatura se ubican hacia la zona central y occidental del departamento, aunque ya el municipio de Puerto Salgar, no sería tan productivo. Estas zonas corresponderían básicamente a cultivos de arroz, frijol, maíz y plátano, con un aumento promedio de las zonas óptimas de 141.374 ha respecto a la extensión actual.

Producción de alimentos a futuro en los municipios. Los municipios que hoy cuentan con las más altas producciones de los cultivos analizados, podrían no continuar esta tendencia bajo escenarios de cambio climático. Los resultados indican que municipios como Cabrera y Villapinzón, no serían aptos a futuro para el desarrollo de ninguno de los nueve cultivos considerados y, en este momento solo son fuertes en la producción de uno de ellos, frijol y papa pastusa respectivamente, por lo que éstos deben rápidamente diversificar sus cultivos o promover otro tipo de actividad económica, permitiendo a los pequeños agricultores asegurar sus medios de subsistencia.

Municipios como Chocontá, El Rosal, Facatativa, Gachetá, La Peña, Madrid, Subachoque, Tausa, Ubaque y Útica no presentarían áreas idóneas para cultivar a 2040 bajo ninguno de los escenarios climáticos, correspondiendo con el Plan Regional Integral de Cambio Climático Bogotá – Cundinamarca - PRICC (2014), el cual declara que, las proyecciones de cambios en la disponibilidad hídrica a 2050, muestran para todo el departamento, una tendencia a la disminución de hasta un 60% en los terrenos dedicados a la producción agrícola.

El municipio de Caparrapí, por ejemplo, que hoy es gran proveedor de 3 importantes cultivos en el departamento (arroz, yuca y caña), se vería perjudicado en cualquiera de los escenarios proyectados, siendo posible únicamente el desarrollo del arroz en cualquiera de los escenarios y, adicionalmente el del plátano para 2100.

Por otra parte, los municipios de Guaduas, Jerusalén, Paime y Tocaima, tendrían mayores opciones de incidir en otros tipos de cultivos ya que las condiciones climáticas favorecerían sus territorios en este sentido.

Estos resultados cobran importancia, ya que para 2040 (en 25 años), los municipios habrán tenido que variar sus cultivos según corresponda, como una medida de adaptación que el sector agrícola debe implementar tanto para asegurar el ingreso económico de las familias agricultoras, como para garantizar la seguridad alimentaria de sus hogares y de la región.

CONCLUSIONES

La modelación sugiere que los resultados para los escenarios A2 2011 - 2040 y B2 2011 - 2040, son similares entre sí y, de igual manera para los escenarios A2 2070 - 2100 y B2 2070 - 2100 hay alto grado de analogía para el departamento de Cundinamarca, por lo que las variaciones en las zonas productivas de los cultivos analizados

obedecen más a la proyección temporal que a la familia del escenario climático.

Las zonas óptimas para el desarrollo de los cultivos seleccionados, varían sustancialmente, tanto en extensión como en ubicación respecto de las zonas actuales. Para las proyecciones realizadas a 2040, se esperaría una reducción promedio de 25,46% para ocho de los nueve cultivos analizados, mientras que a 2100 el aumento sería de 4,48%.

Dadas las nuevas condiciones climáticas, los municipios que hoy son grandes productores de uno o más de estos alimentos, deben iniciar un proceso de diversificación de los mismos como una importante medida de adaptación planificada que garantice tanto la seguridad alimentaria como el sustento económico.

Es imperativo, definir e implementar instrumentos de planificación agropecuaria acertados, que incluyan la gestión del riesgo y el fenómeno del cambio climático, para orientar a pequeños y grandes agricultores frente a las necesidades y estrategias de adaptación, reduciendo pérdidas y aumentando la productividad.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y, especialmente al profesor Juan Carlos Alarcón, por su permanente acompañamiento y orientación en el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- Alarcón, J. y Pabón, J. 2013.** El cambio climático y la distribución espacial de las formaciones vegetales en Colombia. *Colombia Forestal* 16(2): 171-185.
- Arndt, C., Farmer, W., Strzepek, K. and Thurlow, J. 2012.** Climate change, agriculture and food security in Tanzania. *Review of Development Economics* 16(3): 378-393.
- Bandara, J. and Cai, Y. 2014.** The impact of climate change on food crop productivity, food prices and food security in South Asia. *Economic Analysis and Policy* 44(4): 1-15.
- Barona, E. 2010.** Importancia de la semilla de arroz. *Revista Arroz. Federación Colombiana de Arroz. Huila, Colombia.*
- Beddington, J., Asaduzzaman, M., Fernández, A., Clark, M., Guillou, M., Jahn, M., Erda, L., Mamo, T., Van Bo, N., Nobre, C., Scholes, R., Sharma, R. y Wakhungu, J. 2011.** Lograr la seguridad alimentaria ante el cambio climático: Resumen para responsables de la política de la Comisión sobre la Agricultura Sostenible y el Cambio Climático. Copenhague, Dinamarca. 1-20.
- Benacchio, S. 1982.** Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivos con potencial de producción en el trópico americano. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP) y Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CENIAP). Maracay, Venezuela.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Portal Regional para la Transferencia de Tecnología y la Acción frente al Cambio Climático en América Latina y el Caribe (REGATTA). 2014.** Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de la agricultura y del recurso hídrico en los Andes de Colombia, Ecuador y Perú.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Oxfam, ILSA. 2011.** Case study: Bogotá. Impact of climate change on Bogotá's food security and smallholder's livelihoods.

- Centro Nacional de tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA). 2002.** Guía técnica para el cultivo de la papa. Disponible en: <http://www.centa.gob.sv/documentos/guias/papa.pdf>[05 de Diciembre 2015].
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2011.** Agricultura y cambio climático: instituciones, políticas e innovación. CEPAL. Serie Seminarios y Conferencias 65. Santiago, Chile.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2013.** Impactos potenciales del cambio climático sobre los granos básicos en Centroamérica. México.
- Cervantes, R., Angulo, G., Tavizón, E. y González, J. 2014.** Impactos potenciales del cambio climático en la producción de maíz. *Investigación y Ciencia* 22(61): 48-53.
- CEVIPAPA - Centro de Desarrollo Tecnológico de la Cadena Agroalimentaria de la Papa. 2005.** Memorias. I Taller Nacional sobre suelos, fisiología y nutrición vegetal en el cultivo de la papa, Bogotá.
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2007.** Manual técnico de buenas prácticas agrícolas y buenas prácticas de manufactura en la producción de caña y panela. Medellín, Colombia.
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2007.** Manual técnico. Buenas prácticas agrícolas en la producción de frijol voluble. Colombia.
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). 2005.** Preguntas frecuentes sobre el cultivo de papa. Bogotá, Colombia.
- De Carvalho, A., Menezes, R., Nóbrega, R., De Siqueira P., Ometto, J., Von Randow, C., and Giarolla, A. 2015.** Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. *Renewable Energy* (78): 26-34.
- Departamento Nacional de Planeación. 2012.** Política Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional. Bogotá, Colombia.
- Eitzinger, A., Läderach, P., Bunn, C., Quiroga, A., Benedikter, A., Pantoja, A. and Bruni, M. 2014.** Implications of a changing climate on food security and smallholders' livelihoods in Bogotá, Colombia. *Mitigation and adaptation strategies for global change* 19(2): 161-176.
- Eitzinger, A., Schmidt, A., Sain, G., Sonder, K., Hicks, P., Nowak, A. y Rodriguez, B. 2013.** Tortillas en el Comal: Los sistemas de maíz y frijol de América Central y el cambio climático. *Centro Internacional de Agricultura Tropical*, p1-6.
- El-Sharkawy, M. 2014.** Global warming: causes and impacts on agroecosystems productivity and food security with emphasis on cassava comparative advantage in the tropics/subtropics. *Photosynthetica* 52(2), 161-178.
- Esquivel, A., Rivera, G., Velásquez, V., Muñoz, A., Macías, H. y Sánchez, I. 2014.** Modelación del rendimiento de frijol bajo escenarios regionales de cambio climático en la región sureste del estado de Durango. *Revista Agrofaz* 14(1): 97-105.

- FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2007.** Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Boletín de servicios agrícolas N° 163. Roma, Italia.
- FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2013.** Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos agrícolas en Colombia en el marco del Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático. Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de papa en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá.
- FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2013.** Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos agrícolas en Colombia en el marco del Estudio de Impactos Económicos del Cambio Climático. Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de arroz en los departamentos de Tolima y Meta.
- FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2003.** Guía para identificar las limitaciones de campo en la producción de arroz. Roma, Italia.
- FINAGRO - Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario. 2014.** El maíz en el mundo. Bogotá, Colombia.
- FONAIAP - Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias. 2001.** El cultivo del arroz. http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_tec/FonaiapDivulga/fd03/texto/arroz.htm [05 de Diciembre 2015].
- Fondo Nacional de la Panela – FEDEPANELA. 2009.** Manejo agronómico de la caña panelera con énfasis en el control biológico.
- Galindo R. y Clavijo, J. 2009.** Fenología del cultivo de arveja (*Pisum sativum* L. var. Santa Isabel) en la sabana de Bogotá en campo abierto y bajo cubierta plástica. *Revista Corpoica: Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 10(1): 5-15.
- Gobernación de Cundinamarca. 2003.** Estudio de Uso Actual y Cobertura Vegetal de los Suelos. Bogotá, Colombia.
- Gobernación de Cundinamarca. 2014.** Estadísticas agropecuarias. Volumen 23. Bogotá, Colombia.
- Gong, H., Meng, D., Li, X. and Zhu, F. 2013.** Soil degradation and food security coupled with global climate change in northeastern China. *Chinese Geographical Science* 23(5): 562-573.
- Hijmans, R. 2003.** The effect of climate change on global potato production. *American Journal of Potato Research* 80(4): 271-279.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2015.** Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Bogotá, Colombia.
- IPCC - Intergovernmental panel on Climate Change. 2007.** General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment. 66 p.
- IPCC – Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático. 2014.** Resumen para responsables de políticas. Escenarios de emisiones.

- IPCC - Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 2014.** Quinto Informe de Evaluación. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas. Suiza.
- Jiangshan, W., Fenghua, S. and Chunyu, Z. 2009.** Influences of climate warming on the agricultural production in Northeast China. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* 37(19): 9053-9056.
- Knox, J., Hess, T., Daccache, A. and Perez, O. 2011.** What are the Projected Impacts of Climate Change on Food Crop Productivity in Africa and South Asia? DFID Systematic Review, Final Report. Cranfield University, Cranfield, Bedfordshire, (UK).
- Lobell, D., Burke, M., Tebaldi, C., Mastrandrea, M., Falcon, W. and Naylor, R. 2008.** Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science* 319(5863): 607-610.
- Lobell, D., Schlenker, W. and Costa, R. 2011.** Climate trends and global crop production since 1980. *Science New York* 333: 616-620.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola. 1991.** Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica.
- Montenegro, R., Zarabozo, O. y Baca, M. 2015.** Modelos de impacto en la agricultura teniendo en cuenta los escenarios de la agricultura del cambio climático. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático* 1(1), 1-50.
- Moore, N., Alagarswamy, G., Pijanowski, B., Thornton, P., Lofgren, B., Olson, J. and Qi, J. 2012.** East African food security as influenced by future climate change and land use change at local to regional scales. *Climatic change* 110(3-4): 823-844.
- Muñoz, R. 1995.** Fertilización del plátano (*Musa AAB*, Simonds) en suelos de clima medio en Colombia. *Fertilización de cultivos en clima medio*, 1: 195-204.
- Ortiz, R. 2012.** El cambio climático y la producción agrícola. Banco Interamericano de Desarrollo, p13-17.
- PRICC - Plan Regional Integral de Cambio Climático. 2014.** Enfoque territorial para el cambio climático. Estrategia regional de mitigación y adaptación al cambio climático para Bogotá y Cundinamarca. Bogotá, Colombia.
- Quiroga, A. 2011.** Impacto del cambio climático sobre los medios de vida de pequeños productores y desarrollo de estrategias frente al cambio climático. Tesis Biólogo, Universidad del Tolima, Tolima.
- Quiroz, R., Posadas, A., Yarleque, C., Heidinger, H., Barreda, C., Raymundo, R., Carbajal, M., Tonnang, H., Kroschel, J., Forbes, G. and Haan, S. 2012.** Challenges to sustainable potato production in a changing climate: A research perspective. *American Journal of Potato Research* 89(1): 30-52.
- Ramirez, C., Kumar, L. and Taylor, S. 2016.** Crop niche modeling projects major shifts in common bean growing areas. *Agricultural and Forest Meteorology* 218, 102-113.

- Ramirez, J., Jarvis, A., Van den Bergh, I., Staver, C. and Turner, D. 2011.** Changing climates: effects on growing conditions for banana and plantain (*Musa spp.*) and possible responses. *Crop Adaptation to Climate Change* 426-438.
- Rojas, E. 2011.** Evaluación del desarrollo del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática interanual y cambio climático, en el sur oeste de la Sabana de Bogotá. Tesis magister Ciencias Meteorología, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Román, M. y Hurtado, G. 2002.** Cultivo de la papa. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA). El Salvador. 36p.
- Secretaría distrital de desarrollo económico. 2005.** Documento técnico de soporte del Plan Maestro de Abastecimiento y Seguridad Alimentaria de Bogotá.
- Singh, B., Dua, V., Govindakrishnan, P. and Sharma, S. 2013.** Impact of climate change on potato. In *Climate-Resilient Horticulture: Adaptation and Mitigation Strategies*. En: Harish, S., Nadipynayakanahally K., Sriniv R., y Kodthalu, S. (Ed). India, p125-135.
- Stern, N. 2007.** The economics of climate change: the Stern review. Cambridge, Cambridge University Press. p532-535.
- Stokes, C., Inman-Bamber, N., Everingham, Y. and Sexton, J. 2016.** Measuring and modelling CO2 effects on sugarcane. *Environmental Modelling & Software* (78): 68-78.
- Tamayo, M. 2002.** Enfermedades del cultivo de la arveja en Colombia: Guía de reconocimiento y control. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Boletín técnico 14. Colombia. 49p.
- Tinoco, J., Gómez, J. y Monterroso, A. 2011.** Efectos del cambio climático en la distribución potencial del maíz en el estado de Jalisco, México. *Terra Latinoamericana* 29(2): 161-168.
- Van den Bergh, I., Ramirez, J., Staver, C., Turner, D., Jarvis, A. and Brown, D. 2010.** Climate change in the subtropics: The impacts of projected averages and variability on banana productivity. In *XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on 928 p89-99.*
- Wiebelt, M., Breisinger, C., Ecker, O., Al-Riffai, P., Robertson, R. and Thiele, R. 2013.** Compounding food and income insecurity in Yemen: Challenges from climate change. *Food Policy* (43): 77-89.
- Ye, L., Tang, H., Wu, W., Yang, P., Nelson, G. C., Mason-D'Croz, D. and Palazzo, A. 2014.** Chinese food security and climate change: Agriculture futures. *Economics Discussion Papers* 8(1): 1-39.
- Zapata, E., Jarvis, A., Ramirez, J. y Lau, C. 2012.** Análisis de los impactos de cambio climático sobre cultivos andinos. Secretaría General de la Comunidad Andina. Condesan, Lima, p1-75.
- Zinyengere, N., Crespo, O. and Hachigonta, S. 2013.** Crop response to climate change in Southern Africa: A comprehensive review. *Global and Planetary Change* (111): 118-126.