

Impacto del calentamiento global y enriquecimiento atmosférico de CO₂ sobre cultivos tropicales: la perspectiva para Venezuela

Ernesto Medina^{1*}, Grisel Velásquez¹ e Ismael Hernández Valencia²

¹ Centro de Ecología, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. Caracas, DC. Venezuela

² Instituto de Zoología y Ecología Tropical, Universidad Central de Venezuela. Caracas, DC. Venezuela.

RESUMEN

La realidad del cambio climático, representado por el incremento de temperatura y concentración atmosférica de CO₂, y su relación con causas antropogénicas ya no admite discusión. Este incremento genera profundos cambios en los patrones de distribución de lluvias afectando la disponibilidad de agua para cultivos. En 1975 la población mundial sobrepasó los 4 millardos y en el 2015 acaba de sobrepasar los 7 millardos, con lo cual la vulnerabilidad al cambio climático de la producción agrícola alcanza una dimensión de política de estado. Los factores que determinan la capacidad productiva de plantas cultivadas son: a) la concentración atmosférica de CO₂, por sus efectos sobre especies con distinto tipo fotosintético (C3, C4, CAM), hábitos de crecimiento (herbáceas, leñosas), y productos de consumo (cereales, cañas, raíces, tubérculos, fibras, frutas, hojas y flores), b) la temperatura por sus efectos sobre la tasa de crecimiento, estabilidad de membranas celulares y pérdidas nocturnas por respiración y c) la disponibilidad de agua, por su impacto en el mantenimiento de la turgencia de las superficies fotosintéticas y la absorción de nutrientes. El presente análisis incluye una revisión de la literatura reciente sobre los efectos de los incrementos de temperatura y CO₂ atmosférico sobre cultivos de importancia para Venezuela, como son arroz, yuca, maíz y caña de azúcar. El trabajo describe finalmente los cambios climáticos esperados para Venezuela derivados de modelos del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, utilizando el índice de aridez de Bailey y propone una agenda de investigación.

Palabras clave: cambio climático, índice de aridez, fotosíntesis, plantas C3-C4-CAM, arroz, yuca, maíz, caña de azúcar.

Impact of global warming and atmospheric CO₂ enrichment on tropical crops: a perspective for Venezuela

ABSTRACT

The reality of climate change, expressed as increases in temperature and atmospheric CO₂ concentration, and its relation to anthropogenic causes is no longer disputed. These increments generate deep changes in distribution of rainfall, affecting water availability for plant crops. In 1975 the world population exceeded 4 billion and in 2015 just exceed 7 billion, thus vulnerability to climate change of agricultural production reaches a dimension of state policy. The factors that determine the productive capacity of cultivated plants are: a) the atmospheric concentration of CO₂,

*Autor de correspondencia: Ernesto Medina

E-mail: emedina@ivic.gob.ve

for their effects on species with different photosynthetic type (C3, C4, CAM), growth habits (herbaceous, woody), and consumer products (cereals, canes, roots, tubers, fibers, fruits, leaves and flowers), b) the temperature effects on the growth rate, stability of cell membranes, and night respiration losses, and c) water availability, for their impact on the maintenance of turgent photosynthetic surfaces and absorption of plant nutrients. The analysis includes a review of recent literature on the effects of increases in atmospheric temperature and CO₂ on crops of importance to Venezuela such as rice, cassava, corn, and sugar cane. The paper finally describes the expected climate changes for Venezuela derived from models of the Intergovernmental Panel on Climate Change, using Bailey's aridity index and proposes a research agenda.

Key words: climatic change, aridity index, photosynthesis, C3-C4- CAM plants, rice, cassava, corn, sugarcane

INTRODUCCIÓN

El proceso de cambio climático se manifiesta claramente por: a) incremento significativo de la temperatura promedio de la tropósfera, b) variaciones en los patrones de distribución de las lluvias y la frecuencia de eventos extremos y c) sostenido y creciente incremento de la concentración atmosférica de CO₂, y otros gases con efecto de invernadero. El proceso tiene causas naturales (ciclos solares, cambios orbitales de la Tierra) y antropogénicas. Las segundas determinan una aceleración significativa del proceso natural a través de los cambios en la composición atmosférica producto del uso de combustibles fósiles, utilización de carbonatos en la producción de cemento, y los cambios de uso de la tierra (deforestación y quemadas) por la expansión de la frontera agrícola (IPCC, 2013). Este artículo tiene como objetivos: revisar el impacto sobre cultivos tropicales de los escenarios de cambio climático substanciados por el Panel Intergubernamental para el Estudio del Cambio Climático (IPCC, 2014), determinar cuáles serían los cambios esperados en la distribución de provincias de humedad del país mediante un modelo simple basado en temperatura y precipitación media y analizar los potenciales impactos de estos cambios sobre los principales rubros agrícolas de Venezuela.

Desde la década de los setenta, cuando empezaron a detectarse evidencias notables del proceso de cambio climático, se evalúan las consecuencias para las actividades humanas, principalísima entre ellas, la producción de alimentos. En 1975 la población mundial sobrepasó los 4 millardos y en el 2015 acaba de sobrepasar los 7 millardos, con lo cual la vulnerabilidad al cambio climático de la producción agrícola mundial debe alcanzar una dimensión de política de estado.

El conocimiento de la fisiología de los principales rubros agrícolas es suficiente como para hacer estimaciones sobre el impacto del cambio climático

sobre su productividad, de acuerdo a los escenarios del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2014). Tres factores determinan la capacidad productiva de plantas cultivadas: a) la concentración atmosférica de CO₂, por sus efectos sobre especies con distinto tipo fotosintético (C3, C4, CAM), hábitos de crecimiento (herbáceas, leñosas) y productos de consumo para animales y seres humanos (cereales, cañas, raíces, tubérculos, fibras, frutas, hojas y flores), b) la temperatura, por sus efectos sobre la tasa de crecimiento, estabilidad de membranas, y pérdidas nocturnas por respiración y c) la disponibilidad de agua, por su impacto en el mantenimiento de la turgencia de las superficies fotosintéticas y el transporte de nutrientes suelo-planta.

El análisis del efecto de estos factores no puede hacerse aisladamente, por cuanto interactúan de manera compleja. La evaluación del impacto del cambio climático sobre la productividad de cultivos y de sistemas fotosintéticos, en general, tiene que hacerse a través de acercamientos experimentales bajo condiciones controladas y modelos de simulación. Sin embargo, pueden hacerse dos consideraciones elementales que permiten entender los fundamentos fisiológicos de las respuestas al cambio climático. La primera es que el incremento de CO₂ atmosférico debe aumentar la capacidad fotosintética de cultivos C3, pues la concentración actual de este gas en la atmósfera está muy por debajo de los niveles de saturación de la enzima RubisCO. Luego, los incrementos de la temperatura del aire durante el período de crecimiento resultarán en incremento de la demanda de agua para cubrir las pérdidas por transpiración (Allen *et al.*, 2006).

Escenarios probables de cambio climático

Los escenarios de cambio climático revisados en el último informe del IPCC (2014) se dividen entre "optimistas", que estiman que el incremento de CO₂ atmosférico alcanzará un equilibrio en el 2020 y de allí

comenzará a bajar, y los “realistas” o “pesimistas”, que estiman que no habrán modificaciones en los procesos antropogénicos que subyacen de manera determinante en los cambios observados. Según el escenario pesimista RCP 8.5 (Representative Concentration Pathways, el número indica el forzamiento radiativo en W/m^2), la temperatura de la superficie puede aumentar unos $2^{\circ}C$ en el 2050 y pasar de los $4^{\circ}C$ en el 2100 (IPCC, 2014). De igual manera, la concentración de CO_2 atmosférico, el principal gas con efecto invernadero, que alcanzó 310 ppm en 1950, sobrepasará los 400 ppm en 2016 (Figura 1) y parece seguir acelerando su aumento anual, pues entre 1995 y 2004 incrementó 1,9 ppm/año y creció hasta 2,1 ppm/año entre el 2005 y 2014, y subió a 5 ppm entre marzo de 2015 y marzo 2016 (<https://www.co2.earth/>).

Las causas del cambio climático en desarrollo son naturales dentro de un período interglacial caracterizado, como en eventos anteriores durante los últimos 650.000 años, por incrementos de temperatura de superficie y aumentos de concentración de CO_2 (IPCC, 2013). Sin embargo, el proceso actual está acentuado fuertemente por efectos antropogénicos representados por la descarga masiva de CO_2 a la atmósfera desde el comienzo de la revolución industrial a mediados del siglo XIX:

“La inercia de emisiones continuadas conlleva un potencial calentamiento global durante el siglo 21

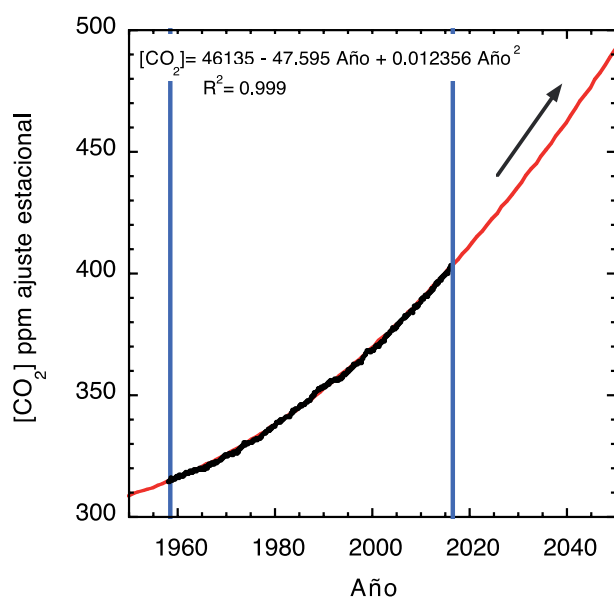


Figura 1. Concentración de CO_2 atmosférico medida mensualmente en Mauna Loa desde 1958 y extrapolada al 2050. Las líneas azules demarcan la extensión de los datos utilizados para calcular la regresión polinomial.

con los mayores cambios globales ocurridos en los últimos 65 millones de años, pero varios órdenes de magnitud más rápido” (Diffenbaugh y Field, 2013).

Este proceso se asocia, con razón, a la creciente explotación de recursos minerales y energéticos, y también a la expansión de la frontera agrícola. Todo esto impulsado por el incremento poblacional, que a pesar de la baja en la tasa de crecimiento que está ocurriendo en décadas recientes, debe sobrepasar la cifra de 9 millardos de habitantes en el 2050 (United Nations, 2013).

Una de las consecuencias potencialmente más perjudiciales del cambio climático es la variación en los patrones de precipitación y la expansión de las zonas secas del mundo. Un estudio reciente basado en análisis de los cocientes de precipitación y evaporación potencial concluye que las zonas secas del mundo (hiperáridas, áridas, semiáridas y subhúmedas secas) cubren alrededor de 41% de la superficie terrestre y albergan más de 1/3 de la población mundial (Feng y Fu, 2013). Estas zonas se han expandido en los últimos 60 años y continuarán expandiéndose durante el siglo XXI en un escenario de alta emisión de gases de efecto invernadero. En el continente americano la mayor expansión de regiones áridas ocurrirá al suroeste de América del Norte mientras que Suramérica será una de las zonas con mayor expansión de regiones semiáridas.

Impacto del cambio climático sobre cultivos tropicales

El análisis de la respuesta potencial de plantas superiores al cambio climático sobre bases puramente fisiológicas no es suficiente para explicar el comportamiento del cultivo en condiciones agronómicas; es decir, bajo las condiciones ambientales que el cultivo experimenta desde la siembra hasta la cosecha. La mayoría de los experimentos fisiológicos se realizan bajo condiciones semi controladas, frecuentemente con insuficiente volumen para el desarrollo radical, y en cámaras cerradas de tamaño reducido. Esas condiciones invariablemente muestran una fuerte respuesta al CO_2 elevado por plantas C3, respuestas menores en plantas C4 y resultados intermedios con plantas CAM; bajo estas condiciones experimentales, es frecuente observar una reducción de fotosíntesis durante exposición prolongada a CO_2 elevado, especialmente en plantas de tipo C3. Este efecto de “regulación a la baja” es complejo y puede asociarse a deficiencias nutricionales, bajo potencial de sumidero de carbohidratos o variaciones en la eficiencia o cantidad de RubisCO (Drake *et al.*, 1997; Long *et al.*, 2004).

El avance tecnológico para el manejo de concentraciones ambientales de CO₂ llevó al desarrollo de cámaras de gran tamaño, sin tapa superior, en las cuales pueden cultivarse plantas sin restricciones en el desarrollo radical y bajo condiciones de iluminación y humedad similares a las del ambiente, pero lo ideal es analizar áreas cultivadas mayores y con enriquecimiento en CO₂ al aire libre. Esto se logró en los Experimentos de Enriquecimiento de CO₂ al Aire Libre (ECAL) equivalente a la denominación en inglés FACE, 'Free-air CO₂ Enrichment Experiments'. Los ECAL con cultivos C3 y C4 han demostrado que el incremento de fotosíntesis y productividad causados por la mayor concentración de CO₂ son mucho menores a los obtenidos en experimentos con cámaras cerradas.

Cultivos de tipo C3

Las especies con metabolismo fotosintético C3 se caracterizan por presentar fotorespiración, un proceso que bajo concentraciones atmosféricas de O₂ (20%) disminuye en un 30% la fijación neta de CO₂, por ello son muy sensibles a los incrementos de temperatura. La observación de que las temperaturas medias están aumentando, como elemento esencial del cambio climático, tiene un aspecto que no fue tomado en cuenta por mucho tiempo, y es, si las temperaturas máximas (registradas durante el día) y las mínimas (registradas durante la noche) incrementan de manera similar. La pregunta es importante, pues mientras las temperaturas diurnas pueden incrementar la tasa de crecimiento del cultivo y en ciertos casos, incluso incrementar su eficiencia fotosintética, las temperaturas nocturnas afectan la tasa de transporte y consumo de carbohidratos dentro de la planta generando pérdidas netas que reducen su rendimiento agronómico. En las fincas del Instituto Internacional para la Investigación de Arroz (IRRI) en Filipinas, Peng *et al.* (2004) encontraron que durante el período 1975-2004 las temperaturas máximas incrementaron en 0,35°C, mientras que las mínimas aumentaron más del doble (1,13°C). Los rendimientos durante el mismo período se correlacionaron negativamente de forma muy significativa con la temperatura mínima, mientras que no se observó tendencia alguna con la temperatura diurna. Adicionalmente, Welch *et al.* (2010) mediante la evaluación de rendimiento de arroz irrigado en el sureste asiático, observaron una significativa correlación negativa con el incremento de temperaturas nocturnas en los procesos de crecimiento vegetativo, desarrollo reproductivo y maduración, mientras que la correlación

con temperaturas diurnas es positiva y significativa solo para el caso de crecimiento vegetativo.

La regulación fotosintética depende en parte del balance entre sustrato para la fotosíntesis, es decir, el CO₂, y la capacidad de sumidero para los asimilados (Figura 2) (Venkateswarlu y Visperas, 1987). Bajo condiciones similares, plantas de tipo C3 con sumideros vegetativos, sin restricciones hídricas o nutricionales durante todo el período de crecimiento, deben exhibir mayor estimulación en respuesta a CO₂ elevado que plantas con sumideros reproductivos de corta duración (por ejemplo, raíces de yuca o tubérculos de papa comparadas con mazorcas de maíz o espiguillas de arroz).

Los ECAL con yuca demuestran la importancia de un sumidero funcional, duradero y de alta capacidad como el que representan tubérculos y raíces tuberosas (Rosenthal *et al.*, 2012). Plantaciones de yuca enriquecidas con CO₂ al aire libre incrementan sus tasas de fotosíntesis y reducen significativamente su conductancia estomática con lo cual se generan incrementos substanciales en eficiencia de uso de agua. En estos experimentos, se observó una disminución en el efecto del CO₂ durante las primeras semanas de cultivo (regulación a la baja), mientras comenzaba a desarrollarse la capacidad del sumidero radical, tal como lo señalaron Fernández *et al.* (2002) con yuca en cámaras de techo abierto. El resultado es que el rendimiento de raíces tuberosas de yuca aumentó significativamente sobre el control.

Cultivos de tipo C4

Los cultivos de tipo C4 no son sensibles a variaciones marcadas de la concentración atmosférica de O₂ (sin fotorespiración) y su fotosíntesis se satura a concentraciones de CO₂ menores a 350 ppm (Long *et al.*, 2004). Por lo tanto, no deberían responder de manera significativa a los incrementos de concentración atmosférica de CO₂. Sin embargo, varios experimentos realizados en cámaras cerradas dan efectos contradictorios (Long *et al.*, 2005). Un ECAL con maíz en la principal zona productora de este cereal en USA no mostró efecto alguno de CO₂ sobre la productividad del cultivo, aunque si se registró un marcado aumento en la eficiencia de uso de agua como consecuencia de la reducción de la conductancia estomática (Leakey *et al.*, 2006). Otro experimento más reciente con caña de azúcar en Brasil, utilizando cámaras grandes de techo

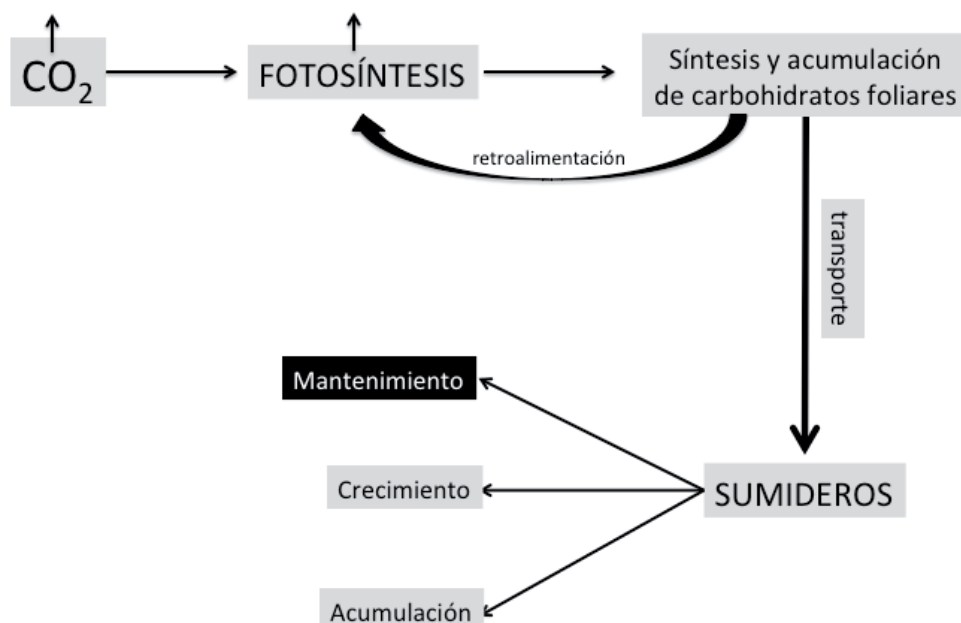


Figura 2. Representación esquemática de la regulación de fotosíntesis por disponibilidad de CO_2 y fuerza de los sumideros de carbohidratos, bajo condiciones óptimas de hidratación, irradiación y temperatura

abierto, mostraron un claro efecto del CO_2 elevado sobre la fotosíntesis y la conductancia estomática que los autores atribuyen a cortos períodos de estrés hídrico (De Souza *et al.*, 2008). En ambos experimentos el efecto positivo del CO_2 elevado es atribuible al incremento en la eficiencia de uso de agua.

Cultivos de tipo CAM

Las plantas con metabolismo CAM presentan el fenómeno de fijación nocturna de CO_2 y son las plantas con mayor eficiencia de uso de agua. El efecto del CO_2 elevado sobre plantas CAM es más complejo y los resultados experimentales son frecuentemente contradictorios debido a efectos de temperatura y sequía; sin embargo, en el grupo de plantas CAM estudiado por diversos autores se encuentra un efecto positivo del CO_2 elevado sobre la productividad, tasas de crecimiento y fijación nocturna de CO_2 (Drennan y Nobel, 2000). La contribución de la fase nocturna de fijación de CO_2 a la ganancia total de carbono en ciclos de 24 h indica que la enzima PEP-carboxilasa no se satura a las concentraciones actuales de CO_2 atmosférico. La causa de este comportamiento puede estar asociada a la succulencia de los tejidos fotosintéticos de plantas CAM que dificultan la difusión de CO_2 hasta los sitios de fijación, o a disminución de la afinidad de

la enzima por el CO_2 (Drennan y Nobel, 2000). Estos autores concluyen que, en un escenario de incremento de CO_2 atmosférico y temperatura, los cultivos CAM pueden expandir sus áreas de establecimiento por sus mayores respuestas de producción de materia orgánica e incremento notable de la eficiencia de uso de agua.

Expansión de zonas áridas y semiáridas en Venezuela

Para el norte de Suramérica las perspectivas son de una ampliación substancial del área donde la sequía estacional va a ser cada vez más marcada. Una evaluación más precisa de las dimensiones y localización geográfica puede hacerse mediante la estimación de los cambios esperados en temperatura y precipitación; para ello, utilizamos la base de datos climáticos actuales y estimadas para el año 2050 disponibles en <http://www.worldclim.org/> (Hijmans *et al.*, 2005). Esta base de datos tiene una resolución de 1 km y contiene una capa de condiciones actuales, que consiste en la interpolación de datos observados, representativos del período 1950-2000 y una capa de condiciones futuras, con datos estimados de un modelo climático global (CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) incluido en la 5^{ta} Evaluación del IPCC (2014). Con los promedios anuales se calcularon los índices de Bailey

(1979) para Venezuela con el objeto de delimitar zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas. Este índice tiene especial aplicación en el estudio de zonas secas, pues utiliza la temperatura media mensual o anual como base del cálculo de la evapotranspiración y es de simple aplicación sin requerimientos especiales. Las desviaciones de los datos reales de evapotranspiración por efectos estacionales de viento y humedad relativa son menos marcadas en zonas secas, donde la fuerza determinante de evaporación de agua de superficies húmedas es la irradiación solar. El índice de Bailey se basa en la relación exponencial entre evaporación y temperatura y se calcula mensualmente (i) con los promedios mensuales de precipitación (P en mm) y temperatura (t en °C)

$$S_{(i)} = 0,018 P(i)/1,045^{t(i)}$$

El índice anual (S) es la sumatoria de los índices mensuales. En el caso de Venezuela, donde las variaciones mensuales de temperatura promedio son reducidas, el índice se calculó utilizando totales de lluvia y temperatura anual promedio (Nassar *et al.*, 2013). El valor del índice disminuye con la aridez y separa zonas áridas ($S < 2,7$), semiáridas ($2,7 < S < 4,7$), y subhúmedas secas ($4,7 < S < 6,7$). Los mapas resultantes de la aplicación del modelo de Bailey (1979) reflejan la expansión considerable de las áreas con balance hídrico anual negativo (Figura 3). El análisis indica que en poco más de 35 años las categorías de semiárido incrementarán en unos 106.000 km² y la de subhúmedo seco en 107.000 km², localizadas especialmente en la región noroccidental (Zulia y Falcón) y los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas (Figura 4).

Efectos probables sobre rubros agrícolas en Venezuela

Un análisis regional detallado basado en el modelo utilizado permite enfocar el problema agrícola frente al cambio climático dentro del marco de cuatro rubros críticos para Venezuela: maíz, caña de azúcar, arroz y yuca. La distribución por estados presentada en el Cuadro 1 no incluye al estado Amazonas ni al Territorio Esequibo porque en ellos las provincias de humedad se mantuvieron con balance hídrico anual positivo.

El análisis regional de los cambios potenciales en la extensión de provincias de humedad en Venezuela revela diferencias de interés agrícola. El mayor

incremento absoluto en área de la provincia árida se observa en los estados Falcón, Zulia y Lara (Cuadro 1). En términos absolutos los estados Anzoátegui, Cojedes y Monagas tendrán un incremento de áreas semiáridas mayores a los 10.000 km² derivado de la reducción de áreas subhúmedas secas, mientras que Guárico experimentará incrementos mayores de áreas semiáridas y subhúmedo secas. Las provincias de humedad con mayor variabilidad en los cambios absolutos son las subhúmedas (seca y húmedas), mientras que la provincia húmeda presenta reducciones en todos los estados con excepción de Bolívar, donde incrementa como resultado de la reducción de la extensión de la provincia hiperhúmeda.

Cuando se contrasta esta información con la más reciente disponible sobre la producción de arroz, caña de azúcar, yuca y maíz blanco (Figura 5), obtenidas del Censo Agrícola para el año 2007 (MPPAT, 2007-2008), se observa que el estado Portuguesa lideró la producción de maíz blanco, arroz y caña de azúcar y se estima que para el 2050, 10.260 km² (68% de su superficie) pasarán a ser zonas secas. Cuando se discrimina la información por rubros, el 99% de la producción de arroz se concentró en los estados Portuguesa, Guárico y Cojedes; el 78% de la producción de maíz blanco en los estados Portuguesa, Barinas y Cojedes; y el 77% de la producción de caña de azúcar en los estados Portuguesa, Lara, Trujillo, Yaracuy y Cojedes. A excepción de los estados Barinas y Lara, los demás estados se encuentran entre los que acusarán los incrementos más marcados ($> 50\%$) en la superficie de zonas secas (Cuadro 1). En el caso de la yuca, la producción es menos concentrada y los estados Monagas, Sucre, Bolívar, Amazonas y Zulia acumularon el 59% de la producción, siendo Monagas el primer productor, y uno de los estados en donde el aumento en zonas secas previstos para el 2050 alcanzaría el 75% de su extensión. Evidentemente, estos cambios afectarán la producción y/o superficie cultivable de estos rubros, y obligarían a la reubicación de los mismos a zonas en donde se puedan satisfacer sus requerimientos agroecológicos, a menos que se cuente con una fuente de agua suficiente.

En lo que respecta a los requerimientos de agua, el comportamiento de cada cultivo es diferente y varía según la fenología, con máximos valores en las fases intermedias cuando se alcanza el mayor desarrollo, pero no se ha iniciado la senescencia. El coeficiente cultivo

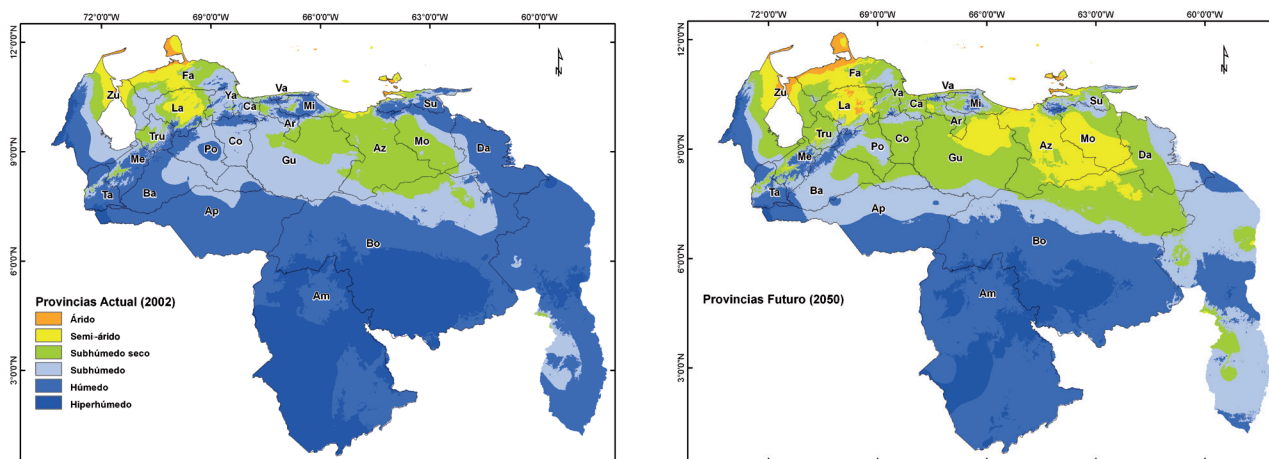


Figura 3. Distribución de las provincias de humedad para los años 2002 y 2050. Las iniciales corresponden al nombre de estados.

(Kc) es utilizado como un indicador de la demanda de agua y expresa la relación entre la evapotranspiración de un cultivo específico bajo una situación estándar de excelentes condiciones agronómicas y sin limitaciones de humedad en el suelo y la evapotranspiración de un pastizal de referencia en similares condiciones (Allen *et al.*, 2006). Los cultivos de caña de azúcar y el arroz presentan los mayores valores de Kc, es decir, tienen la mayor exigencia de agua, mientras que la yuca tiene las menores demandas asociadas a su mayor eficiencia de uso de agua (Cuadro 2); esto le confiere a la yuca una ventaja sobre el resto como rubro a desarrollar

como fuente de carbohidratos ante un escenario de intensificación de la sequía.

De acuerdo a Martelo (2012), las condiciones climáticas del país han sido alteradas por el cambio climático y en consecuencia, han comenzado a producirse impactos en el sector agrícola. Los cambios más significativos registrados son: a) los totales de lluvia anual y de la época lluviosa disminuyeron en casi todo el país, entre 3 y 20%, siendo estadísticamente significativos en las regiones central y occidental. El total de lluvia de la época seca disminuyó en algunas zonas y por el contrario, aumentó en noroccidente y algunas zonas de la Cordillera de la Costa, y b) la oscilación térmica diaria ha disminuido, principalmente por un aumento de la temperatura mínima (Cárdenas y Alonso, 2003; Cárdenas y De Grazy, 2003; Lisboa y Martelo, 2003). Por otra parte, las estimaciones de este trabajo indican una reducción de las precipitaciones y un aumento de las temperaturas en la mayor parte del territorio, tal como se había previsto hace más de 10 años (Marnr, 2005).

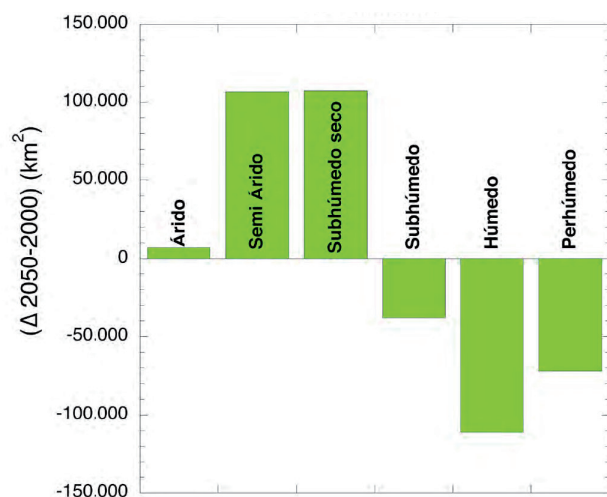


Figura 4. Estimación de los incrementos o reducción de la extensión de tipos de clima de Bailey durante el período 2002-2050 en Venezuela.

Además del uso de modelos de simulación, en el país existen pocos estudios de campo sobre la relación entre producción y el cambio climático, en donde buena parte de ellas han sido resumidas por Martelo (2012). Estas evaluaciones de campo son complejas, ya que no se cuenta con una línea de base respecto a rendimientos y procesos fisiológicos. Las variaciones en los rendimientos de los cultivares están afectados tanto por factores climáticos como por factores de manejo del cultivo (riego, fertilizantes, labranza, control de plagas,

Cuadro 1. Cambios en la extensión de provincias de humedad previstas para el año 2050 (áreas en km²)

Estado	Árida	Semiárida	Subhúmeda seca	Subhúmeda húmeda	Húmeda	Hiperhúmeda
Anzoátegui	117	33.713	-27.646	-5.576	-442	-166
Apure	0	0	625	36.487	-36.428	-684
Aragua	0	1.401	2.154	-2.012	-1.543	0
Barinas	0	0	13.718	6.006	-19.609	-115
Bolívar	0	9.679	41.764	-5.700	22.071	-67.814
Carabobo	0	137	3.768	-2.496	-1.409	0
Cojedes	0	13.619	-10.806	-2.813	0	0
Delta Amacuro	0	2.566	22.633	8.940	-34.095	-44
DF	0	-31	-23	51	3	0
Falcón	3.561	556	2.534	-6.651	0	0
Guárico	0	15.550	28.754	-43.640	-664	0
Lara	1.102	3.103	976	-2.962	-2.219	0
Nueva Esparta	145	-127	-11	-4	-3	0
Mérida	0	244	2.953	1.272	-4.323	-146
Miranda	0	368	2.290	855	-3.509	-4
Monagas	0	21.562	-9.914	-4.583	-6.958	-107
Portuguesa	0	4	10.256	-3.792	-6.468	0
Sucre	125	740	3.302	2.430	-6.474	-123
Táchira	0	32	1.043	1.422	-1.965	-535
Trujillo	0	624	3.464	-2.388	-1.700	0
Vargas	4	87	207	185	-483	0
Yaracuy	0	252	4.241	-3.230	-1.263	0
Zulia	2.040	2.494	10.968	-9.823	-3.492	-2.187

etc.). Si se disponen de estos datos se podría hacer un análisis de los rendimientos agrícolas, teniendo cuidado en corregir las numerosas variables que inciden sobre la producción y que al ser controladas, permitirían asociar los cambios en rendimiento con las variables de cambio climático (temperatura y CO₂). No hemos encontrado información reciente sobre los rendimientos agrícolas del país. Sin embargo, información proveniente de Venescopio (2016) indica que en el período comprendido entre 1970 y 2000 los rendimientos (Mg/ha) de cereales (no se discriminan cuales) pasaron de 1,2 a 3,2; de raíces y tubérculos de 6,5 a 14; de leguminosas de 0,35 a 0,8 y de hortalizas de 11 a 21. Después del 2000 solo se presentan valores para el 2008, los cuales muestran estabilización o reducción del rendimiento. Para el caso específico del arroz, Kassen (2010) indica que entre 1995 y 2002 el rendimiento incrementó de 4,3 hasta 5,2 Mg/ha. Los años siguientes muestran una

caída notable. Una revisión anterior de Marín-Chirinos (2002) indica también que los rendimientos de cultivos C3 como arroz y yuca y C4 como maíz incrementaron 52, 48 y 51% respectivamente, durante el período 1988-2002. Si estos incrementos son consecuencia de factores del cambio climático es un asunto que aún está por determinarse.

Propuesta de una agenda de acción

El panorama climático previsible para Venezuela requiere establecer una agenda de investigación de los impactos probables sobre la producción agrícola del país, así como, las medidas de adaptación y mitigación para enfrentarlo. En la actualidad se cuenta con un sólido bagaje de información científica para estimar los impactos que puede producir el cambio climático sobre la agricultura; sin embargo, se deben definir con más precisión las medidas a adoptar, de acuerdo a los

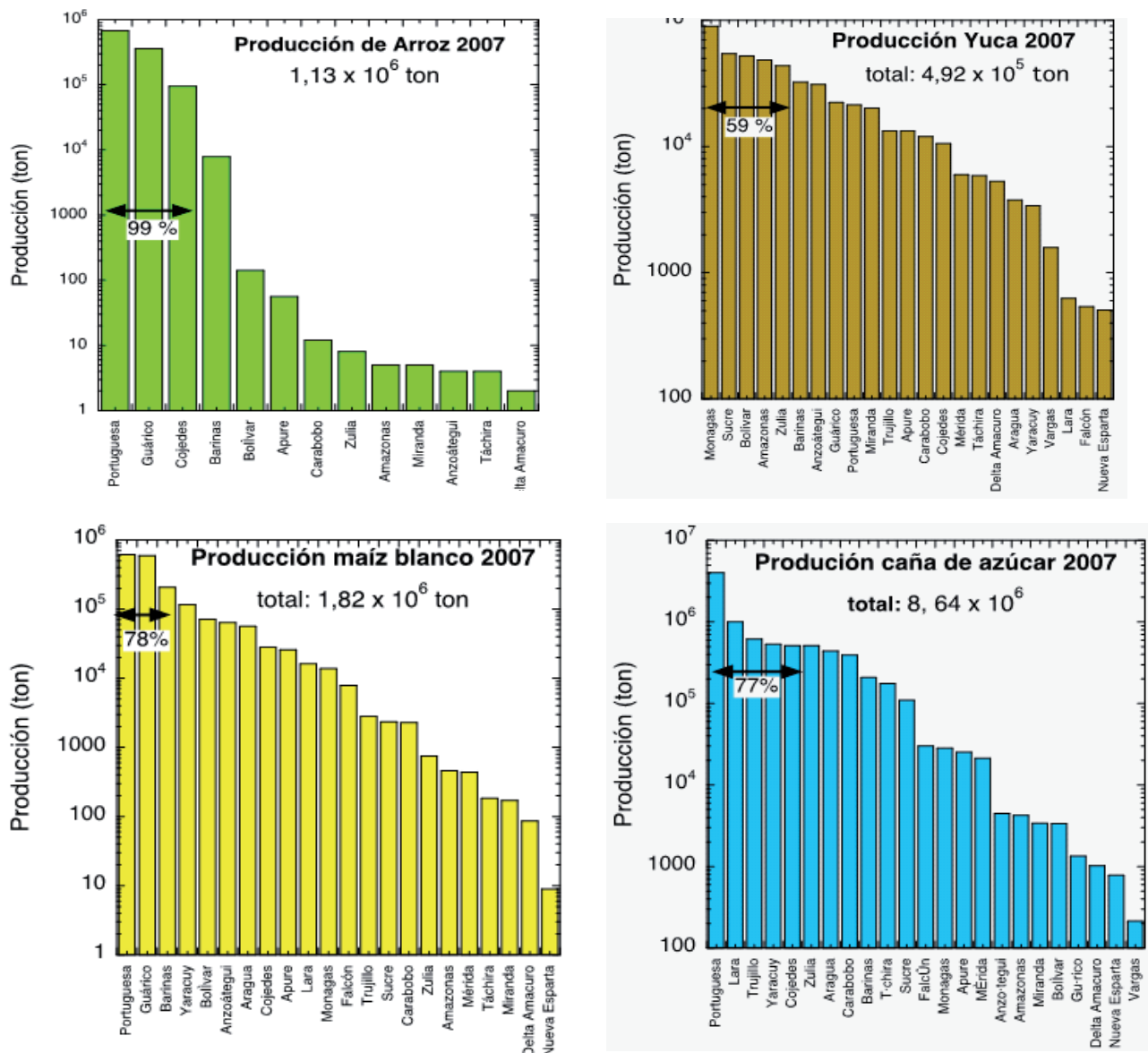


Figura 5. Producción de arroz, yuca, maíz blanco y caña de azúcar en Venezuela para el año 2007. Fuente: Mppat (2007-2008).

Cuadro 2. Coeficiente de cultivo (Kc) para el arroz, maíz, caña de azúcar y yuca en las fases iniciales, intermedias y finales de crecimiento.

Cultivo	Inicial	Intermedia	Final
Arroz	0,3	0,8	0,3
Maíz	----	1,2	0,35-0,6
Caña de azúcar	0,40	1,25	0,75
Yuca	0,3	0,8	0,3

Fuente: Allen *et al.* (2006)

rubros y variedades que se cultivan, las condiciones agroecológicas y el entorno social del país.

Aquí presentamos un conjunto de acciones a ejecutar dentro de un programa a corto plazo, así como algunos aspectos de investigación que deben profundizarse (Cuadro 3). Las propuestas se restringen al impacto de la elevación térmica y prolongación de la duración e intensidad de sequía, así como, los aspectos de investigación específicos sobre los cultivos de maíz, arroz, caña de azúcar y yuca en Venezuela. Esta agenda se deriva de un conjunto de interrogantes que surgen

Cuadro 3. Impactos y aspectos a considerar en una agenda de investigación sobre los efectos de la elevación térmica y aumento del período de sequía sobre los cultivos de maíz, arroz, caña de azúcar y yuca en Venezuela

Impactos	Medidas y aspectos de investigación
Cambios en la fenología, rendimiento y producción de cultivos	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluación de los bancos de germoplasma para selección de materiales tolerantes a la sequía y a altas temperaturas - Desarrollo de nuevas variedades resistentes al incremento de la temperatura y de los periodos secos - Identificación de los efectos del cambio del régimen térmico y de humedad sobre la fenología, especialmente la floración y llenado del grano (maíz y arroz), acumulación de azúcar en el tallo (caña) y acumulación de almidón/carbohidrato en las raíces (yuca)
Cambios en la disponibilidad de aguas subterráneas y superficiales para riego	<ul style="list-style-type: none"> - Selección y/o desarrollo de variedades más eficientes en el uso de agua - Conservación del agua del suelo - Conservación de cuencas - Agricultura de precisión
Cambios en la distribución y abundancia de las precipitaciones y alteraciones en los ciclos térmicos	<ul style="list-style-type: none"> - Fortalecimiento de la red meteorológica y mejora de la capacidad predictiva de los modelos para evaluar el cambio climático - Reubicación de cultivos de acuerdo a sus requerimientos agroecológicos

sobre la capacidad de respuesta del sector agrícola para enfrentar el cambio climático: ¿De los cultivares de los rubros considerados que actualmente se utilizan o se encuentran en los bancos de germoplasma del país, cuáles de ellos serían más tolerantes a los cambios esperados en el futuro cercano?, ¿Cómo afectan estos cambios la fenología y especialmente los procesos que modulan desarrollo de los índices de cosecha? ¿Qué regiones del país tendrían potencial para cultivar estos rubros en un escenario de cambio climático? Ello llevaría a evaluar o generar información relacionada con valores umbrales e intervalos temperatura y humedad del suelo favorables para el crecimiento, requerimientos de días con agua disponible para el desarrollo del cultivo y cambios en la distribución de asimilados, entre otros, especialmente la floración y llenado del grano (maíz y arroz), la acumulación de azúcar en el tallo (caña) y la acumulación de almidón/carbohidratos en las raíces (yuca).

En Venezuela se cuenta con estudios recientes sobre el efecto de variables ambientales sobre el comportamiento de plantas cultivadas bajo condiciones de campo y vivero, así como con el uso de modelos

de simulación (Martelo, 2012; Puche *et al.*, 2004). Sin embargo, faltan experimentos a largo plazo que permitan cuantificar los efectos específicos de los factores de cambio climático (temperatura y CO₂) sobre los rendimientos de nuestros principales rubros agrícolas, y evaluar separadamente los factores propios del manejo de cultivos, tales como mejoramiento genético de cultivares, fertilización y control de plagas, entre otros.

En lo que respecta a las fuentes agua para riego, primero se debe destacar que en el país predomina la agricultura de secano y el volumen de agua proveniente de pozos es casi el triple que el proveniente de embalses (Martelo, 2012), siendo estos dos últimos fuente importante de la agricultura intensiva. La disminución de la lluvia y/o el incremento de frecuencia de sequías, así como, un incremento en la evapotranspiración disminuirán los caudales de ríos y la capacidad de recarga de los acuíferos. Lluvias más intensas pueden afectar la relación infiltración/escorrentía, así como, el tiempo de escurrimiento, con lo cual pueden incrementarse las inundaciones repentinas, la percolación, y por ende, la recarga de acuíferos. Simulaciones realizadas

por el Cidiat (2005) en las cuencas de los ríos Pao, Guárico y Tucuyo indican menores caudales futuros, con lo que se puede afectar los embalses que surten los sistemas de riego de la principal zona arrocerá y parte de la zona cañera en occidente. Situación similar podría ocurrir con los acuíferos, en donde la recarga será menor y los requerimientos de agua serán mayores por el incremento de la evapotranspiración, lo que junto a la sobreexplotación de pozos disminuirá la calidad de aguas de riego, incrementará los riesgos de salinización del suelo y aumentarán los costos de tratamiento del agua e/o inhabilitará su uso. La investigación debe estar dirigida a la selección de especies y la evaluación de prácticas de manejo del suelo que permitan la conservación o el uso más eficiente del agua (por ejemplo, labranza mínima, uso de coberturas, cultivos asociados, agricultura de precisión, drenajes). Estos estudios deben ser acompañados por el monitoreo de la calidad y el modelaje de la disponibilidad del agua bajo diferentes escenarios.

Un aspecto primordial es el fortalecimiento de la red meteorológica nacional, tanto en infraestructura, como en personal especializado en el manejo de los datos. La información climática es esencial para planificar las labores de preparación del terreno, siembra, cuidados, cosechas e incluso el manejo post cosecha. El cambio climático requiere reorganizar estas actividades, que serán más efectivas en la medida que se cuente con información suficiente y confiable para predecir la magnitud de los cambios; por ejemplo, en el caso de la precipitación, elemento con una alta variabilidad espacio-temporal, Venezuela posee pocas estaciones meteorológicas de series largas y los promedios espaciales más elaborados y eficientes se han realizado para cuadrículas de 5 x 5 grados (Marnr, 2005). Por esto, una de las prioridades debe ser aumentar la densidad de estaciones en el país y mantener un monitoreo y análisis de datos constante que permitan una evaluación más precisa del comportamiento pasado y de futuros escenarios que son útiles para un alerta temprana. Contar con información climática robusta también permitirá establecer las modificaciones de la zonificación agroclimática actual y hacia cuáles áreas se pueden migrar los cultivos. Ya el análisis previo presentado indica una expansión de las zonas secas puede afectar la producción de los rubros aquí considerados. De igual forma, Ovalles *et al.* (2005) estiman que en el país crecerá significativamente el área con déficit hídrico. En la zona oriental se afectarán los cultivos de caña de azúcar y yuca, este último quedaría en áreas marginales, necesitando riego complementario.

En la zona centro occidental serán afectados los cultivos de maíz, arroz y caña de azúcar, mientras en la zona occidental el impacto principal sería sobre el maíz.

Esta agenda también debe ser acompañada de la evaluación de los impactos y la implementación de medidas en el ámbito socioeconómico, ya que al ser la agricultura una práctica realizada por seres humanos para seres humanos, es vital la aceptación y adopción de las prácticas para enfrentar los impactos por parte de las comunidades. Sobre los aspectos socioeconómicos, también vale destacar los potenciales efectos adversos a diferentes escalas, como puede ser la agricultura de subsistencia realizada por comunidades pobres (dependen exclusivamente de una agricultura estacional), un sector muy vulnerable ya que cuenta con recursos limitados para adaptarse al cambio climático, hasta los medianos y grandes productores que suplen al sector industrial y de servicios.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Allen, R; L. Pereira; D. Raes; M. Smith. 2006. Evaporación del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO. Roma. 299 p.
- Bailey, H.P. 1979. Semi-arid climates: Their definition and distribution. *In* Hall, A.E.; G.H. Cornell; H.W. Lawton (Eds.) *Agriculture in Semi-Arid Environments*. Springer-Verlag. New York, EUA. pp. 73–97.
- Cárdenas P.; R. Alonso. 2003. Variaciones de la temperatura del aire en Venezuela. Proyecto Marnr-PNUD. VEN/00/G31. Caracas. Venezuela. 57p.
- Cárdenas, P.; E. De Grazy. 2003. Tendencia a largo plazo en la precipitación para Venezuela. Proyecto Marnr-PNUD. VEN/00/G31. Caracas, Venezuela. 43p.
- Cidiat. 2005. Análisis de los posibles impactos de los cambios climáticos sobre los recursos hídricos en Venezuela. Proyecto Marnr-PNUD VEN/00/G31. Mérida, Venezuela. 236p.
- De Souza, A.P.; M. Gaspar; E.A. Da Silva; E.C. Ulian; A.J. Waclawovsky; M.Y. Nishiyama Jr.; R.V. Dos Santos; M.M. Teixeira; G.M. Souza; M.S. Buckeridge. 2008. Elevated CO₂ increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. *Plant Cell Environ.* 31: 1116–1127

- Diffenbaugh, N.S.; C.B. Field. 2013. Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions. *Science* 341: 486-492.
- Drake, B.G.; M.A. González-Meler; S.P. Long. 1997. More efficient plants: A consequence of rising atmospheric CO₂? *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 48: 609–639.
- Drennan, P.M.; P.S. Nobel. 2000. Responses of CAM species to increasing atmospheric CO₂ concentrations. *Plant Cell Environ.* 23: 767-781
- Feng, S.; Q. Fu. 2013. Expansion of global drylands under a warming climate. *Atmos. Chem. Phys.* 13: 10081–10094.
- Hijmans, R.J.; S.E. Cameron; J.L. Parra; P.G. Jones; A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Clim.* 25: 1965-1978.
- IPCC. 2013. *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F.; D. Qin; G.K. Plattner; M. Tignor; S.K. Allen; J. Boschung; A. Nauels; Y. Xia; V. Bex; P.M. Midgley (Eds.)] Cambridge University Press. Cambridge, Inglaterra. 1535 pp
- IPCC. 2014. *Climate change. Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* [Pachauri, R. K.; L.A. Meyer (Eds.)] IPCC. Ginebra, Suiza. 151p.
- Kassen, F. 2010. El arroz en Venezuela. Presentación Asamblea Anual de la Confederación Nacional de Productores Agropecuarios, Fedeaagro. Valle de La Pascua, Venezuela.
- Leakey, A.D.B.; M. Uribealrea; E.A. Ainsworth; S.L. Naidu; A. Rogers; D.R. Ort; S.P. Long. 2006. Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO₂ concentration in the absence of drought. *Plant Physiol.* 140: 779–790
- Lisboa, E.; M.T. Martelo. 2003. Análisis de eventos extremos de precipitación diaria mediante la distribución generalizada de Pareto. Centro de Análisis Estadístico y Matemático. Universidad Simón Bolívar, Dirección de Hidrología y Meteorología, MARN. Caracas, Venezuela. 39p.
- Long, S.P.; E.A. Ainsworth; A. Rogers; D.R. Ort. 2004. Rising atmospheric carbon dioxide: Plants FACE the future. *Ann. Rev. Plant Biol.* 55: 591-628.
- Long, S.P.; E.A. Ainsworth; A.D.B. Leakey; P.B. Morgan. 2005. Global food insecurity. Treatment of major food crops with elevated carbon dioxide or ozone under large-scale fully open-air conditions suggests recent models may have overestimated future yields. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 360: 2011–2020.
- Marnr. 2005. *Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela.* Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Fondo Mundial para el Medio Ambiente. Fundambiente. Caracas, Venezuela. 141p.
- Marín Chirinos, D. 2001. Rendimiento y producción agrícola vegetal: un análisis del entorno mundial (1997-1999) y de Venezuela (1988 – 2001). *Agroalimentaria* 7(15): 49-73
- Martelo, M.T. 2012. Impacto del cambio climático en la agricultura de Venezuela. *Rev. Fac. Agron. Alcance* 71: 66-81.
- Mppat. 2007-2008. VII Censo Agrícola Nacional (Mayo 2007/ Abril 2008). Procesado con Redatam+SP CEPAL/Celade Disponible en <http://censo.mat.gob.ve>. Accesado Octubre 2015.
- Nassar, J.M.; G. Velázquez; J.C. Romero-Briceño; E. Medina. 2013. Las cactáceas como elementos de caracterización de ambientes áridos y semiáridos en Venezuela. *In* Medina, E.; O. Huber; J.M. Nassar; P. Navarro (Eds.) *Recorriendo el Paisaje Vegetal de Venezuela.* Ediciones IVIC. Caracas, Venezuela. pp. 97-123.
- Ovalles, F.; E. Cabrera; A. Cortez; M.F. Rodríguez; J.C. Rey; J. Comerma. 2005. Formulación de lineamientos generales para un programa de adaptación a los posibles impactos del cambio climático sobre el sector agrícola en Venezuela, considerando tres escenarios (2015, 2040 y 2060). Aproximación a los escenarios de adaptación al cambio climático en el sector agrícola. Proyecto Marnr-PNUD. VEN/00/G31. Maracay, Venezuela. 44p.
- Peng, S.; J. Huang; J.E. Sheehy; R.C. Laza; R.M. Visperas; X. Zhong; G.S. Centeno; G.S. Khush; K.G. Cassman. 2004. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 101(27): 9971–9975.

- Puche, M.; O. Silva; R. Warnock. 2004. Evaluación del efecto del cambio climático sobre cultivos anuales en Venezuela. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía. Postgrado en Agronomía, Programa de Modelos Agroambientales. Proyecto MARN-PNUD VEN/00/G31. Maracay, Venezuela. 162p.
- Rosenthal, D.M.; R.A. Slattery; R.E. Miller; A.K. Grennan; T.R. Cavagnaro; C.M. Fauquet; R.M. Gleadow; D.R. Ort. 2012. Cassava about-FACE: Greater than expected yield stimulation of cassava (*Manihot esculenta*) by future CO₂ levels. *Global Change Biol.* 18: 2661–2675.
- United Nations. 2013. World Population Prospects: The 2012 Revision. Highlights and Advance Tables. UN. New York, EUA. 94p.
- Venescopio. 2016. Estadísticas básicas de Venezuela. Volumen de producción por grupos del subsector agrícola. Disponible en <http://www.venescopio.org.ve/estadisticasbasicasdevenezuela/volumen-de-produccion-por-grupos-del-subsector-vegetal>. Consultado 28/3/ 2016.
- Venkateswarlu B., R.M. Visperas. 1987. Source-sink relationships in crop plants. The International Rice Research Institute. Research Paper Series, N° 125: 1-19. Manila, Las Filipinas.
- Welch, J.R.; J.R. Vincent; M. Auffhammer; P.F. Moya; A. Dobermann; D. Dawe. 2010. Rice yields in tropical/subtropical Asia exhibit large but opposing sensitivities to minimum and maximum temperatures. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107: 14562–14567.