

Escenarios de aridez para Guatemala para los años 2030, 2050 y 2070 utilizando modelos de cambio climático.

Pons, D.¹, Castellanos, E.², Conde, D.³, Brincker, J.⁴, Incer, D.⁴, López, A.⁵

¹Investigador, Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad, Universidad del Valle de Guatemala, dapons@uvg.edu.gt

²Decano Instituto de Investigaciones, Universidad del Valle de Guatemala.

³Estudiante de Física, Universidad del Valle de Guatemala.

⁴Investigador, Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad, Universidad del Valle de Guatemala.

⁵Estudiante de Biología, Universidad del Valle de Guatemala.

Cita: Pons, D., Castellanos, E., Conde, D., Brincker, J., Incer, D., López, A. (2018). Escenarios de aridez para Guatemala para los años 2030, 2050 y 2070 utilizando modelos de cambio climático. *Revista Yu'am* 2(4): 4-16 pp.

Recibido: 16/2/2018

Aceptado: 10/7/2018

Publicado: 1/9/2018

Resumen

El manejo adecuado del recurso hídrico es un factor crítico para el desarrollo sostenible en todo el mundo. En Guatemala la agricultura de secano es extremadamente vulnerable a cambios espaciales y temporales en la precipitación lo cual se evidencia en las extensivas pérdidas en la agricultura de subsistencia cuando ocurre una sequía asociada a el fenómeno de El Niño o cuando se presenta una extensión de la canícula. Otros sectores como el hidroeléctrico, se ven igualmente afectados por este tipo de fenómenos asociados a la variabilidad climática. Desafortunadamente, las proyecciones generadas por modelos de circulación general en escenarios de cambio climático sugieren cambios drásticos en la temperatura y en el régimen hídrico sobre el territorio nacional. En este estudio se utilizó un modelo de circulación general para determinar la relación futura de estas dos variables (temperatura y precipitación) mediante el cálculo de aridez a nivel nacional. Este ejercicio se llevó a cabo para los años 2030, 2050 y 2070 bajo escenarios optimistas, moderados y pesimistas de emisiones de gases de efecto invernadero. Los resultados sugieren un incremento hacia finales de siglo en el déficit hídrico en regiones secas del país pero también sugieren cambios sustanciales en regiones tradicionalmente húmedas donde se concentra la mayoría de la agricultura de subsistencia (sur de Petén) y la agroindustria (costa sur).

Palabras clave: aridez, disponibilidad de agua, agricultura, cambio climático, Guatemala.

Abstract

Adequate allocation of water resources is a critical factor for sustainable development throughout the world. In Guatemala, rainfed agriculture is extremely vulnerable to spatial and temporal changes in precipitation, which is evidenced by the extensive losses in subsistence agriculture when a drought associated with the El Niño phenomenon occurs or when there is an extension of the mid-summer drought. Other sectors, such as hydroelectric power, are also affected by this type of phenomena associated with climate variability. Unfortunately, the projections generated by general circulation models (GCMs) under climate change scenarios suggest drastic changes in the temperature and in the water regime over the national territory. In this study, a general circulation model was used to determine the future relationship of these two variables (temperature and precipitation) by calculating aridity at the national level. This exercise was carried out for the years 2030, 2050 and 2070 under optimistic, moderate and pessimistic scenarios of emissions of greenhouse gases. The results suggest an increase in the water deficit in traditionally dry regions but also substantial changes in traditionally humid regions where the majority of subsistence agriculture (south of Petén) and agroindustry (south coast) are concentrated.

Keywords: aridity, water availability, agriculture, climate change, Guatemala.

Introducción

El manejo adecuado del recurso hídrico es un factor crítico para el desarrollo sostenible en todo el mundo (Villanueva-Díaz et al., 2005; Oki y Kanae, 2013). Un componente importante en la modelación hidrológica es la evapotranspiración potencial que en conjunto con la precipitación conforman el balance hídrico (Xu, Pan, Fu, Tian, y Zhang, 2013; Nastos, Kapsomenakis, Kotsopoulos y Poulos, 2015). De manera simple se puede decir que cuando la precipitación supera a la evapotranspiración se obtiene un superávit de agua y cuándo la evapotranspiración es superior a la precipitación se obtiene un déficit de la misma. Para medir y comparar esta relación se ha generado una serie de clases de *aridez* que representan diferentes relaciones entre estas variables y que sirven para determinar de manera teórica las diferencias entre una región hiper-árida de una región sub-húmeda por ejemplo (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 1992). Estas clases definen el nivel de aridez de una región en particular y pueden servir para orientar esfuerzos en el manejo del recurso hídrico.

Uno de los principales rubros generadores de divisas en Guatemala es la agricultura, la cual depende grandemente de la disponibilidad del recurso hídrico proveniente de la precipitación (Pons, Taylor, Griffin, Castellanos y Anchukaitis, 2017). De la misma manera, Guatemala se encuentra catalogada como uno de los países más vulnerables a los efectos de la variabilidad climática y eventos meteorológicos extremos (Eckstein, Künzel y Schäfer, 2018). Esta situación se refleja en los altos costos humanos y económicos que los eventos meteorológicos extremos han tenido en el país (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología [INSIVUMEH], 2002; Comisión Económica para América Latina y El Caribe [CEPAL], 2005; The International Disaster Database [EMDAT], 2017) y evidencian la poca resiliencia de las comunidades afectadas para enfrentar estos desafíos.

Recientemente, las condiciones de sequía asociadas a El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) en Centro América redujeron la producción de granos básicos (sobre todo maíz y frijol) en comunidades agrícolas dependientes de la precipitación para la irrigación de cultivos (United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs [UNOCHA], 2016; Famine Early Warning Systems Network [FEWS NET], 2016). Si bien la variabilidad climática interanual (como la determinada por eventos de ENOS) representa un reto importante para los agricultores, los esce-

narios de cambio climático para Guatemala sugieren desafíos importantes en el mediano y largo plazo para la productividad agrícola y otros sectores económicamente importantes como la producción hidroeléctrica.

Estos escenarios climáticos simulan consistentemente un incremento en la temperatura del aire con repercusiones en los procesos de evapotranspiración (Nastos et al., 2015). De la misma manera, aunque con mayor incertidumbre, se proyecta la intensificación en el ciclo del agua con reducción de la precipitación en algunas regiones y aumentos de precipitación en otras (Neelin, Münnich, Su, Meyerson y Holloway, 2006; Karmalkar et al., 2011; Imbach et al., 2012; Magrin, et al., 2014).

Por otro lado, la segunda comunicación sobre cambio climático en Guatemala sugiere que la temperatura media ha sufrido un incremento en todo el territorio nacional en comparación con la línea de base climatológica del período 1970-2000 (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2015; INSIVUMEH, 2018). Estos incrementos de entre un 2.2% y 10.3%, se han evidenciado más en regiones montañosas como la parte alta de Quetzaltenango y Huehuetenango con hasta 1.4°C de incremento (MARN 2015, INSIVUMEH 2018).

Los escenarios de múltiples modelos de Circulación General (MCG) también sugieren un incremento conservador de la temperatura hacia la década de 2070 de hasta 2.2 °C (Imbach et al., 2012). Este incremento de la temperatura sumado a una posible reducción de la precipitación (Karmalkar et al., 2011), pueden tener consecuencias graves en la agricultura y en la cobertura forestal del país debido al aumento de la aridez y su efecto en la fenología y requerimientos hídricos de las plantas (Lyra et al., 2016). Debido a la dependencia de la agricultura de secano¹ en Guatemala, el incremento de aridez en regiones críticas para la agricultura podría tener impactos severos en la producción de este sector llegando a reducciones de hasta el 57% en ciertos cultivos (Hannah et al., 2017; CEPAL 2018).

En este estudio, se ha proyectado la temperatura mensual promedio y precipitación anual promedio hacia finales de siglo para calcular la aridez a nivel nacional para los años 2030, 2050 y 2070. El presente análisis sugiere cambios significativos en las regiones semiáridas del país en donde el corredor seco presentaría áreas que pasan de ser semiáridas a ser áridas (una categoría que aún no existe para el país) hacia las décadas del 2050 y 2070. Sin embargo, el análisis también sugiere que regiones tradicionalmente húmedas ubicadas en el centro-norte

¹Se refiere a cultivos que dependen estrictamente de la precipitación como fuente de agua.

del país como el departamento de Petén y Alta Verapaz y regiones de la costa sur también podrían presentar cambios importantes en el régimen hídrico. Dichos cambios podrían implicar consecuencias potencialmente graves como la reducción de la productividad agrícola y reducción de cobertura forestal para un país que depende de estos sectores. Estos posibles escenarios sugieren que la seguridad alimentaria de los guatemaltecos, especialmente en las áreas socialmente más vulnerables, podría verse comprometida. Esto se debe a que en Guatemala tanto la cantidad como la distribución temporal de las lluvias son críticas para los sistemas agrícolas de subsistencia.

Antecedentes

El clima en Guatemala.

Guatemala experimenta un clima de precipitación estacional bimodal, con una temporada lluviosa de verano boreal y una temporada seca de invierno boreal. El país recibe influencia fuerte de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) durante el verano boreal generando precipitación. La temporada de lluvias, dominada por tormentas convectivas, generalmente comienza en abril o principios de mayo con dos picos máximos cerca de junio y septiembre y un período de disminución de lluvia denominado canícula entre los meses de julio y agosto que puede durar de 5 a 15 días o incluso más. Los mecanismos que dan origen a la canícula aún se siguen estudiando pues no se comprenden en su totalidad.

La época lluviosa se extiende hasta octubre en la mayor parte del país, pero persiste hasta marzo en la parte norte del país por influencia de frentes fríos. La estación seca se extiende desde noviembre hasta abril. Aunado a estos procesos, la complejidad topográfica de las montañas y volcanes de Guatemala causa una importante heterogeneidad espacial en las condiciones climáticas medias. La precipitación anual en partes de las tierras bajas del noroeste y la costa sur supera los 4,000 mm, mientras que en el llamado *Corredor Seco* la precipitación anual histórica es inferior a los 800 mm (INSIVUMEH 2018). Estas condiciones complejas están relacionadas con diversos mecanismos climáticos y su interacción con la topografía del país (Karmalkar et al., 2011).

Datos e información climática en el país.

Los datos climáticos en Guatemala son escasos tanto a escalas temporales como espaciales (Anchukaitis et al., 2013; Pons et al., 2017). Desafortunadamente la disponi-

bilidad de estaciones meteorológicas oficiales está en descenso en la región de América Central (Giannini et al., 2001), lo que limita la comprensión del efecto de los diversos mecanismos climáticos discutidos anteriormente sobre el territorio (Hannah et al., 2017; Pons et al., 2017). Además de las limitaciones de la escala espacial y temporal de los datos instrumentales oficiales, existen interacciones entre varios mecanismos climáticos que apenas comienzan a estudiarse y comprenderse (Li, Li, Fu, Deng y Wang, 2011; Hannah et al., 2017).

Nuestra comprensión de mecanismos climáticos tan importantes para el país como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y sus impactos es aún parcial debido a la misma falta de datos instrumentales a escalas espaciales y temporales adecuadas, la propia variabilidad natural de los mecanismos climáticos e interacciones con otros mecanismos que influyen en el clima de la región (Pons et al., 2017). Afortunadamente, algunas de estas líneas de investigación ya se han incorporado en el documento oficial de líneas de investigación de cambio climático 2017 (Consejo Nacional de Cambio Climático, 2017).

Tendencias históricas del clima en Guatemala.

El sub-registro de datos meteorológicos a escalas temporales y espaciales adecuadas y el difícil acceso a los datos oficiales institucionales complica el análisis de la información meteorológica y climatológica en el territorio nacional como se ha descrito en las secciones anteriores. Este sub-registro también impide la evaluación de eventos meteorológicos y climatológicos de baja frecuencia y limita la capacidad de poner en contexto la variabilidad climática natural, la variabilidad antropogénica y la detección de la señal atribuible al cambio climático (Anchukaitis et al., 2013 y 2014).

A pesar de ello, el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), mantiene un registro de la temperatura y precipitación (entre otras métricas) que permite la evaluación de la tendencia de estas variables en ciertas localidades del país. Este análisis ha sido posible porque se ha alcanzado suficiente resolución temporal para completar una climatología (30 años de información climatológica confiable) que puede finalmente ser utilizada como línea base (1971-2000) para establecer cambios históricos y tendencias de los últimos 15 años (2001-2014). De esta manera, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) ha presentado en el año 2015

la segunda comunicación nacional sobre cambio climático en la que se presenta el análisis del cambio en la temperatura anual promedio y la precipitación anual promedio en varias regiones del país (MARN, 2015). Este análisis sugiere un incremento de la temperatura en todo el país aunque los mayores incrementos de temperatura se observan en el altiplano occidental (entre 9.4 % y 10.3%). La boca costa (vertiente del océano Pacífico) y el caribe (vertiente del océano Atlántico) presentan la menor tasa de incremento con 0.8 y 1.5% respectivamente. El resto del país muestra una tasa de incremento entre 1.8 % y 7.7% (MARN, 2015). Las tendencias más pronunciadas al incremento en la temperatura se observan en la región de las tierras bajas del norte y las Verapaces en las estaciones climáticas ubicadas en Flores en Petén, Puerto Barrios en Izabal y Cobán en Alta Verapaz y las tendencias al incremento menos pronunciadas se dan en las regiones secas del país (estaciones La Fragua y Asunción Mita) (INSIVUMEH, 2018).

En cuanto a la precipitación anual promedio, esta ha aumentado con significancia estadística en todas las regiones del país según el análisis del MARN (2015) que compara la línea base (1971-2000) contra el período actual (2001-2014). Igualmente es importante recalcar que las regiones con menos incremento relativo de precipitación promedio anual son las regiones climáticas del caribe y la franja transversal del norte con 2.3% y 9.6% respectivamente.

Proyecciones de temperatura, precipitación y aridez bajo escenarios de cambio climático.

En general, las proyecciones de los modelos climáticos sugieren un aumento de la temperatura media y una reducción de la precipitación lo que podría generar un incremento de la aridez en el país. Para poder proyectar la temperatura promedio mensual y precipitación promedio anual para los años 2030, 2050 y 2070 se debe utilizar un modelo de circulación general (MCG) cuya base física y alto poder computacional permiten integrar la mayoría de los componentes climáticos que determinan el clima a nivel global incluyendo mecanismos como ENOS. Estos modelos computacionales son muy útiles para estimar cambios globales con cierta precisión; sin embargo, hay modelos cuyas habilidades algorítmicas pueden explicar mejor los cambios observados en una u otra región dependiendo de los parámetros que han sido utilizados para

construir los modelos (Oglesby, 2016). Debido a ello, antes de utilizar un modelo de circulación general para una región se debe evaluar la capacidad del mismo para reproducir el clima histórico del dominio a estudiar en nuestro caso Guatemala. En este estudio se ha revisado la literatura más reciente para establecer cuáles son los modelos de circulación general que pueden resultar más útiles para la proyección de las variables climatológicas de interés. De esta manera Hidalgo y Alfaro (2015) evaluaron las habilidades de 48 modelos de circulación de escala global generados por múltiples agencias meteorológicas y climatológicas alrededor del mundo bajo el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5) para el Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados 5 (CMIP5). El proyecto CMIP5 ha generado los últimos modelos de circulación general que incorporan la más reciente información climatológica disponible (Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático [IPCC], 2013).

La evaluación realizada por Hidalgo y Alfaro (2015) consistió en medir la capacidad de estos modelos en reconstruir características básicas del clima en la región centroamericana durante el siglo 20. El estudio evaluó ciertas métricas tales como la capacidad de los modelos para estimar la media y desviación estándar de la precipitación y de la temperatura superficial del aire así como la capacidad de los mismos para interpretar correctamente la influencia del ENOS sobre estas variables climáticas en la región. Esto último es de suma importancia dada la alta correlación entre ENOS y el clima en Centroamérica y los impactos de este en la agricultura y productividad hidroeléctrica en Guatemala (INSIVUMEH, 2002; MARN, 2015).

Consistente con otros estudios (Kalmankar et al., 2011), Hidalgo y Alfaro (2015) encontraron que la mayoría de modelos presentan mejores habilidades para reproducir la temperatura comparado con la habilidad de los modelos para reproducir la precipitación. Esto podría deberse a la alta variabilidad de la precipitación en la región derivada de la interacción de los múltiples mecanismos antes descritos y de las tendencias sin significancia estadística reportadas para la región (Hidalgo y Alfaro, 2017). Sin embargo, el nuevo aglomerado de modelos generados por el CMIP5 parece captar mejor ciertos valores de precipitación en regiones tropicales comparado con los modelos generados en el CMIP3 (Knutti & Sedláček, 2013).

Métodos

Bajo las consideraciones anteriores, se seleccionó el modelo *cesm1_cam5* del National Center for Atmospheric Research (NCAR) cuya corrida para este análisis se llevó a cabo por el Centro Euro-Mediterráneo per I Cambiamenti Climatici (Hidalgo y Alfaro, 2015). Este modelo fue utilizado para realizar los cálculos de precipitación, temperatura y aridez proyectados hacia los años 2030, 2050 y 2070 bajo las trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) 2.6, 4.5 y 8.5 del IPCC (2013). Este modelo ha sido catalogado como el que mejor reproduce las características básicas del clima del siglo 20 para la región Centro Americana (suma de las métricas evaluadas). Entre las métricas que se evaluaron en este modelo para establecer su clasificación se encuentran: precipitación mensual promedio; temperatura superficial mensual promedio; desviación estándar de la precipitación mensual promedio; desviación estándar de la temperatura mensual promedio y; la tele-conexión con ENOS.

Dada la amplia escala espacial del modelo *cesm1_cam5*, se utilizó un modelo regionalizado utilizando el método Delta para el dominio de Guatemala a una resolución aproximada de un kilómetro (Ramirez-Villegas y Jarvis, 2010). El método de regionalización Delta ha sido generado pensando en la necesidad de modelar el comportamiento de cultivos, nichos de biodiversidad y para evaluar los potenciales impactos del cambio climático sobre sistemas agrícolas por lo que se consideró adecuado para su uso en este proyecto (Ramirez-Villegas & Jarvis, 2010).

Utilizando la reducción de escala de 1 km de resolución especial del modelo de circulación general *cesm1_cam5* discutido anteriormente, se proyectaron los incrementos de temperatura mensual promedio a nivel nacional para los años 2030, 2050 y 2070 bajo las trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) de escenarios optimista (RCP 2.6), moderado (RCP 4.5) y pesimista (RCP 8.5) del IPCC (IPCC, 2013). De la misma manera se proyectó la precipitación anual para los mismos años y bajo los mismos escenarios. A partir de esta información se calculó el índice de aridez utilizando la ecuación de evapotranspiración de Thornthwaite (1948).

Finalmente se clasificó el índice de aridez bajo las clases definidas por el PNUMA (1992), que ha utilizado la República de Guatemala para sus estimaciones de aridez (MAGA, 2002). Se generó así mismo una línea base en la misma escala de las otras métricas utilizando la climatología 1961-1990 de Worldclim (Hijmans, Cameron, Parra, Jones y Jarvis, 2005). El razonamiento detrás de la utilización de un índice de aridez como un componente importante para evaluar el riesgo climático asociado a los recursos hídricos del país se debe a que este es un buen indicador del clima regional (Marengo y Bernasconi, 2015).

El índice de aridez permite establecer cambios en el ciclo hidrológico que pueden ser relacionados fácilmente con sistemas tanto naturales (por ejemplo bosques) como antropogénicos (por ejemplo agricultura) ya que incorpora la evapotranspiración potencial. Además, el índice se puede construir con únicamente dos variables: temperatura y precipitación. Esto simplifica el proceso de cálculo del índice de aridez para la región pues no existen registros confiables en el país de otras métricas ambientales como la presión de vapor, dirección y velocidad del viento a nivel nacional.

Para la línea base se utilizaron los datos de alta resolución de temperatura media por mes y los datos de precipitación anual de WorldClim v1.4 para la climatología promedio de 1960-1990. Los datos a futuro de las mismas variables para los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5 del modelo *cesm_cam5* se tomaron de la extensión regional B2, disponibles en el portal de datos de CCAF (<http://www.ccafs-climate.org/data/>). Los índices de aridez presentados son anuales, y se calcularon con la fórmula:

$$AI = \frac{PA}{PET}$$

Donde PA es la precipitación anual y PET es el estimado de potencial de evapotranspiración potencial anual combinado. Ambas cantidades están en las mismas dimensionales (mm) y la división entre ellas explica AI. Por su parte, el PET mensual se calculó usando la ecuación de Thornthwaite (1948):

$$PET = 16 \left(\frac{L}{12} \right) \left(\frac{N}{30} \right) \left(\frac{10T_a}{I} \right)^a$$

En esta expresión, L es la cantidad promedio de horas de día en ese mes, N es la cantidad de días en el mes, T_a es la temperatura media, I es el índice de calor y α se define a partir de I donde $\alpha = 0.000000675 * I^3 - (0.0000771 * I^2) + 0.01792 * I + 0.49239$. Por su parte, I depende de la temperatura promedio de cada mes del año T_{ai} :

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_{ai}}{5} \right)^{1.514}$$

En los datos descargados de temperatura del portal en CCAFS, la temperatura se convirtió a decimales utilizando la función *float* de ArcMap. El programa *Python* fue utilizado para obtener los índices de aridez como Raster tipo ARC GRID en la región de Guatemala a partir de los 36 mapas de temperatura media y 3 mapas de precipitación anual correspondientes a tres escenarios por cada año proyectado en la región B2 (2030, 2050 y 2070).

Resultados y discusión

A continuación se presenta la línea base 1961-1990 de Worldclim (Figura 1) (Hijmans et al., 2005) y los subsecuentes escenarios de índices de aridez proyectados hacia los años 2030, 2050 y 2070 (Figuras de la 2 a la 4) bajo las trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) 2.6, 4.5 y 8.5. Todos los índices se pueden interpretar con la siguiente tabla:

Tabla 1

Clases de aridez generada por la PNUMA 1992

Valor	Clase de Clima
<0.03	Híper Árido
0.03 - 0.2	Árido
0.2 - 0.5	Semi-Árido
0.5 - 0.65	Seco Sub-Húmedo
>0.65	Húmedo

Sin embargo, para visualizar cambios importantes en el régimen hídrico de regiones tradicionalmente húmedas que no se incluyen en esta clasificación y que pierden una fracción importante del recurso se han generado clases artificiales agregando cambios en incrementos de 0.5 a partir de los valores de 0.65. Esto con el objetivo de evidenciar que regiones clasificadas como *húmedas* por el PNUMA podrían perder mucha de esa humedad y sin embargo seguir siendo clasificados como sitios húmedos. Estos cambios de humedad tradicionalmente invisibilizados por la clasificación tradicional se evidencian en este estudio, sobre todo por las implicaciones en regiones de importancia agrícola para el país y de conservación de bosques.

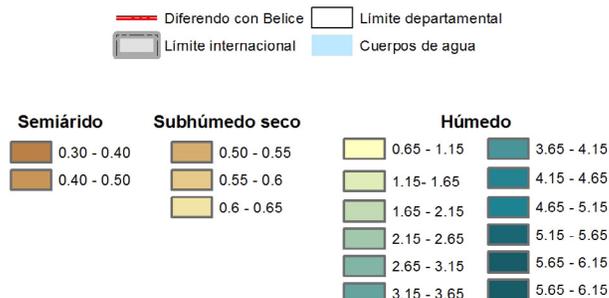


Figura 1. Mapa de línea base de aridez (1960-1990). Edición de los mapas por el Laboratorio SIG del CEAB de la UVG.

Las simulaciones climáticas del modelo utilizado en este estudio sugieren cambios en la precipitación y el incremento de la temperatura del aire incorporados en la estimación de la aridez los cuales podrían afectar los principales sistemas de producción agrícola del país (Figuras 2 a 4). Estos cambios podrían tener un impacto tanto cultivos de subsistencia como el caso de maíz en el sur del departamento de Petén y norte de Alta Verapaz como en cultivos agroindustriales como caña de azúcar y banano en la costa sur.

De darse estos cambios, estos podrían asociarse a un aumento del estrés por sequía (Malhi et al., 2009), el secado o la muerte regresiva en plantas y árboles (Cox, Betts, Jones, Spall y Totterdell, 2000). Estos posibles cambios también podrían tener impactos indirectos en la vegetación, como mayor frecuencia de incendios (Scholze, Knorr, Arnell y Prentice, 2006).

Al mismo tiempo, las simulaciones sugieren una ampliación del área del corredor seco oriental hacia el corredor seco occidental y un incremento de la aridez en ciertas áreas de El Progreso y Zacapa que pasan de la clase "semiárida" a la clase "árida", es decir se podría incrementar el déficit hídrico en dichas regiones en escenarios tan cercanos como el 2050 en bajo la ruta moderada (RCP 4.5) de concentración de gases de efecto invernadero (Figura 3) y que se exacerban hacia el año 2070 bajo el mismo escenario. En otras regiones del país como Sarstún-Motagua (desembocadura del Río Polochic y el área de la frontera con Honduras) podrían ver un incremento significativo de la aridez.

Guatemala también podría estar sujeta a pérdidas significativas de biomasa forestal bajo escenarios de sequía y calentamiento de la temperatura del aire potencialmente incrementados en el siglo XXI en las regiones de la Reserva de Biosfera Maya (RBM) y en regiones montañosas del altiplano como los bosques de pinabete (*Abies guatemalensis*) en Tonicapán (Imbach et al., 2012; Cox et al., 2004; Betts et al., 2004;

Anderson et al., 2018). La tendencia de la reducción de la productividad en el sector forestal se debería al aumento potencial de la temperatura, reducción potencial de la precipitación e incrementos de los periodos secos (Lyra et al., 2016).

Independientemente de la reducción de precipitación y su impacto directo en la escorrentía y caudales de los ríos, el incremento de la aridez y subsecuente degradación de paisajes forestales podría acarrear indirectos en los caudales de los ríos del país. La transpiración por su lado podría actuar sobre los cuerpos de agua directamente transportando más vapor de agua a la atmosfera. Al mismo tiempo, la pérdida de cobertura forestal podría tener un impacto neto negativo en la escorrentía e infiltración del suelo y finalmente en la descarga de ríos. Estos factores eventualmente podrían afectar la productividad hidroeléctrica en ciertas cuencas del país y tener otros impactos fuertes en la biodiversidad y otros sectores igualmente importantes.

Si bien los escenarios a futuro generados en este estudio sugieren cambios en el régimen hídrico del país, no se debe olvidar que la variabilidad climática y eventos meteorológicos extremos que suceden entre uno y otro escenario a escalas inter e intra- anuales tiene un impacto significativo igual o mayor sobre los sistemas productivos del país (agrícola y de producción hidroeléctrica) (INSIVUMEH, 2002).

Es decir, si bien los escenarios sugieren que, por ejemplo, las tierras bajas del norte podrían sufrir un incremento en la aridez, esto no significa que durante años de La Niña no se esperen lluvias torrenciales e inundaciones en la misma región. De la misma forma la costa sur podría seguir experimentando deslaves durante eventos de precipitación extrema y de sequías meteorológicas durante eventos de El Niño. En otras palabras, la variabilidad climática natural y antropogénica se debe seguir considerando entre la línea base y los escenarios generados y entre estos mismos.

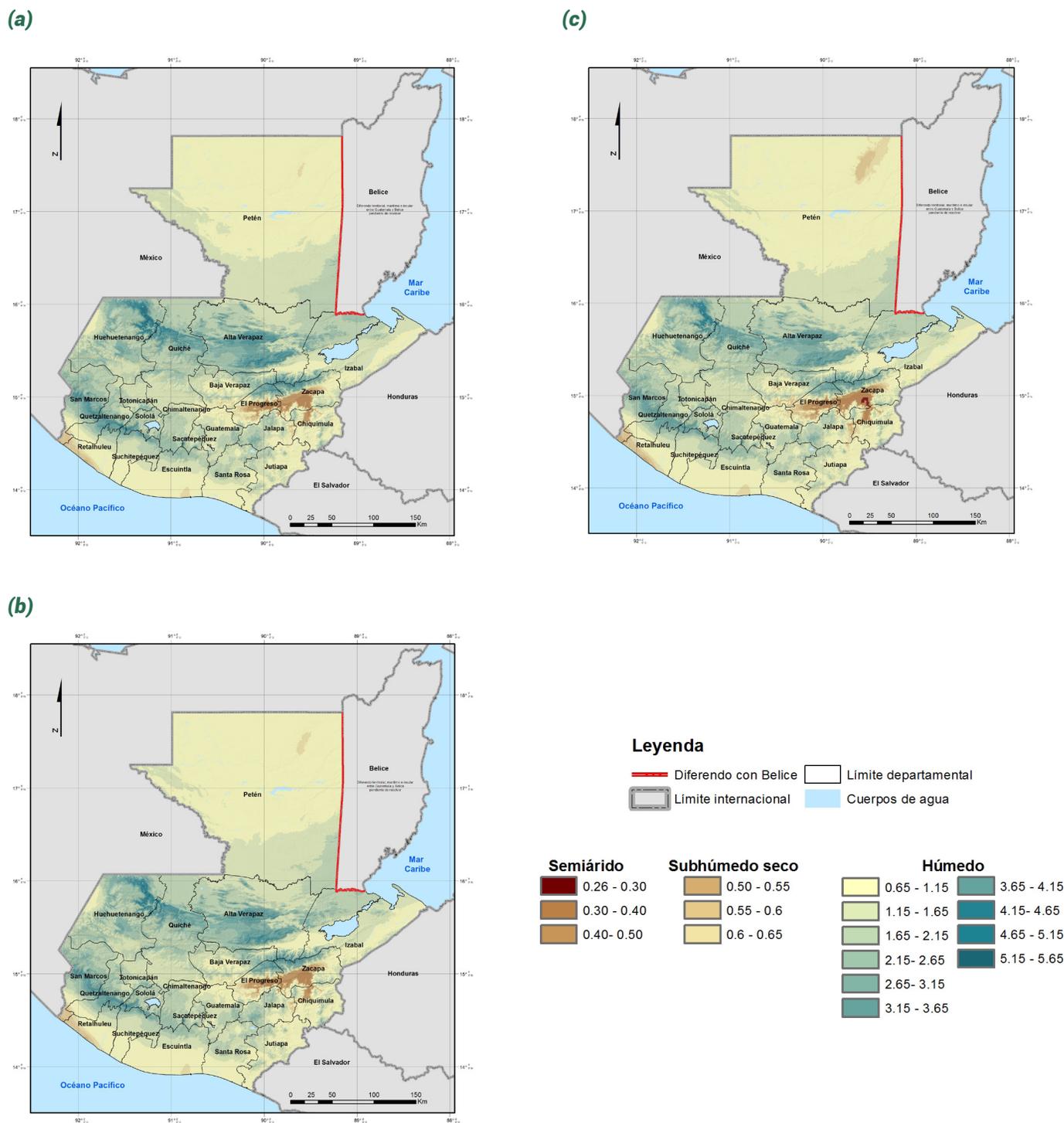
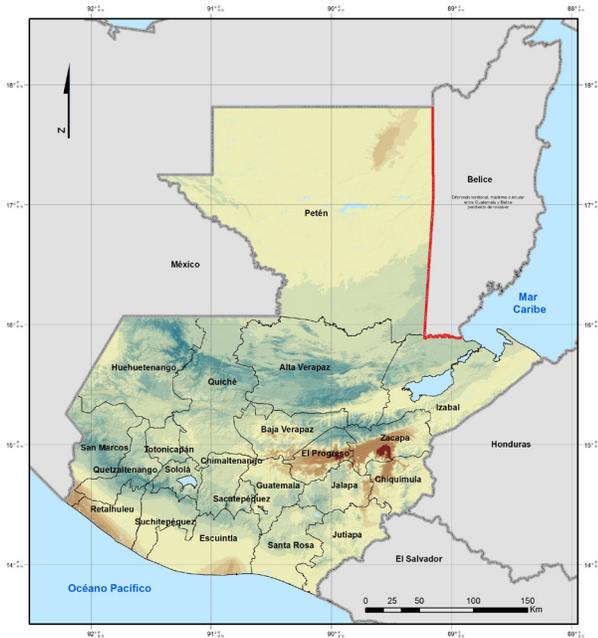
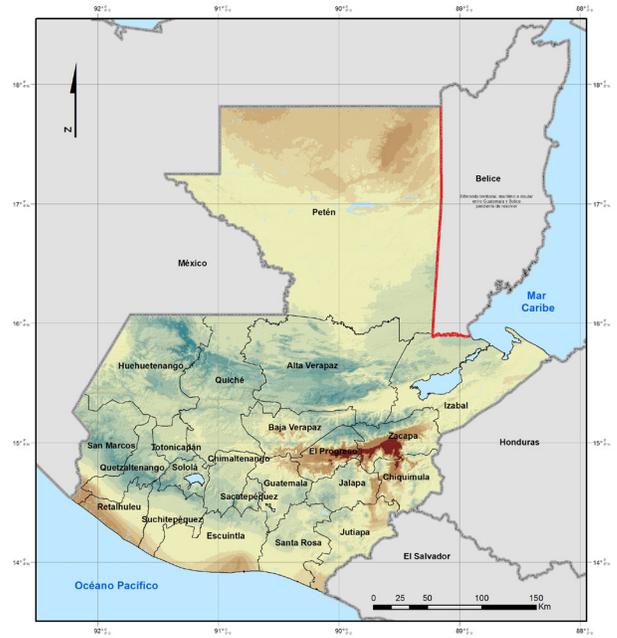


Figura 2. (a) Mapas de aridez proyectados para el año 2030 bajo la trayectoria de concentración representativa RCP 2.6 (escenario optimista). (b) Mapa de aridez proyectada para el año 2030 RCP 4.5 (escenario moderado). (c) Mapa de aridez proyectada para el año 2030 RCP 8.5 (escenario pesimista). Edición de los mapas por el Laboratorio SIG del CEAB de la UVG.

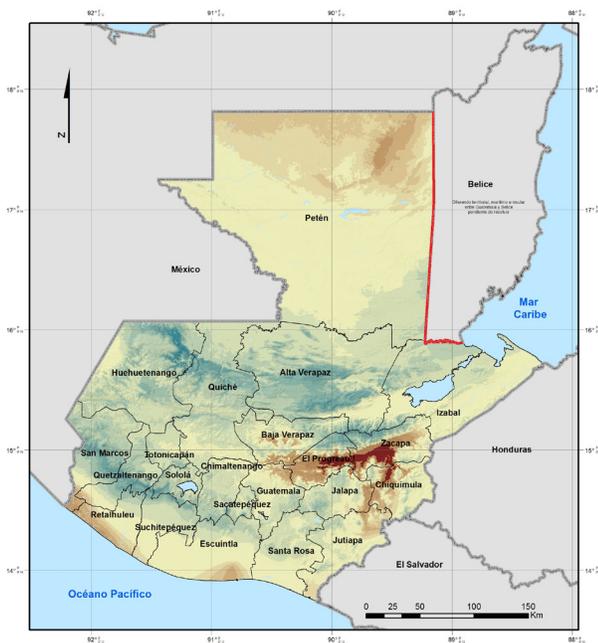
(a)



(c)



(b)



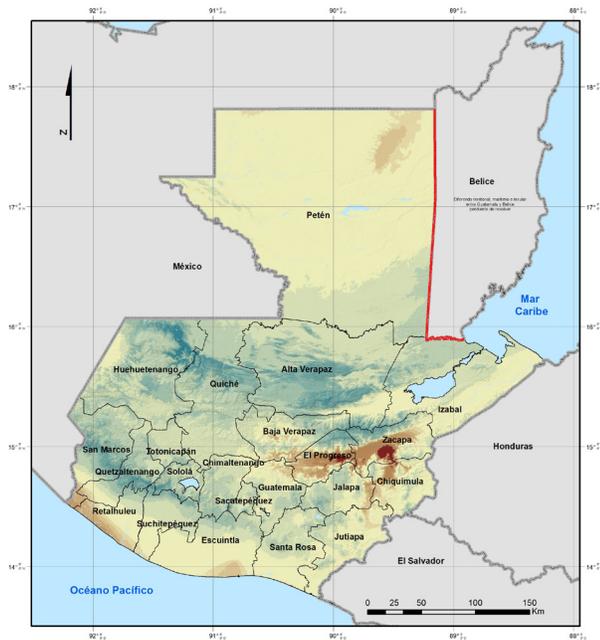
Leyenda

- Diferendo con Belice
- Limite departamental
- Limite internacional
- Cuerpos de agua

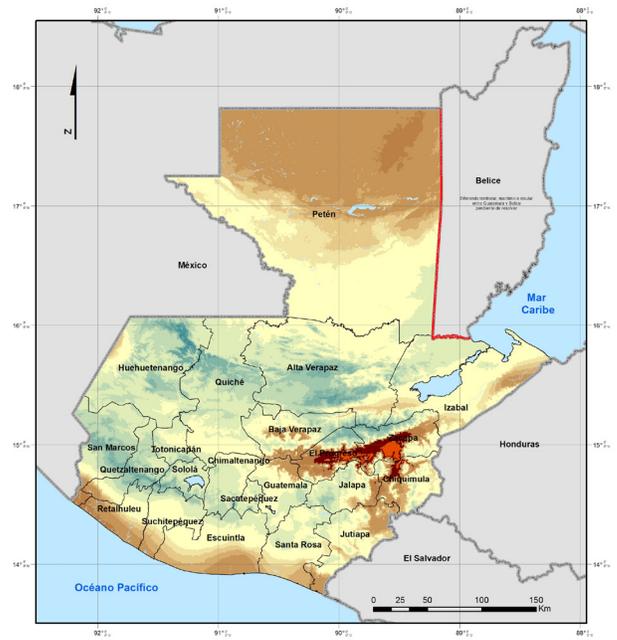
Árido	Semiárido	Subhúmedo seco	Húmedo
0.19 - 0.20	0.20 - 0.30	0.50 - 0.55	0.65 - 1.15
	0.30 - 0.40	0.55 - 0.6	1.15 - 1.65
	0.40 - 0.50	0.6 - 0.65	1.65 - 2.15
			2.15 - 2.65
			2.65 - 3.15
			3.15 - 3.65
			3.65 - 4.15
			4.15 - 4.65
			4.65 - 5.15

Figura 3. (a) Mapas de aridez proyectados para el año 2050 RCP 2.6 (escenario optimista). (b) Mapa de aridez proyectada para el año 2050 RCP 4.5 (escenario moderado). (c) Mapa de aridez proyectada para el año 2050 RCP 8.5 (escenario pesimista). Edición de los mapas por el Laboratorio SIG del CEAB de la UVG.

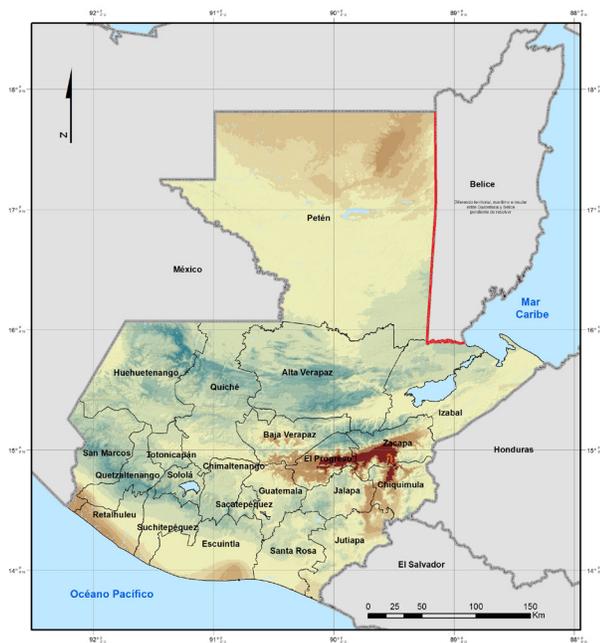
(a)



(c)



(b)



Legenda

- Diferendo con Belice
- Limite departamental
- Limite internacional
- Cuerpos de agua

Árido		Semiárido		Subhúmedo seco		Húmedo	
	0.17 - 0.20		0.20 - 0.30		0.5 - 0.55		0.66 - 1.15
			0.30 - 0.40		0.55 - 0.6		1.15 - 1.65
			0.40 - 0.50		0.6 - 0.65		1.65 - 2.15
							2.15 - 2.65
							2.65 - 3.15
							3.15 - 3.65
							3.65 - 4.15
							4.15 - 4.65
							4.65 - 5.15
							5.15 - 5.65

Figura 4. (a) Mapas de aridez proyectados para el año 2070 RCP 2.6 (escenario optimista). (b) Mapa de aridez proyectada para el año 2070 RCP 4.5 (escenario moderado). (c) Mapa de aridez proyectada para el año 2070 RCP 8.5 (escenario pesimista). Edición de los mapas por el Laboratorio SIG del CEAB de la UVG.

Implicaciones para el manejo del recurso hídrico

Estas proyecciones de aridez para Guatemala son consistentes con otros escenarios publicados en la literatura para el país (ver MARN, 2015; INSIVUMEH, 2018), y pueden ser utilizadas como referencia para la formulación de políticas públicas para administrar de la mejor manera el recurso hídrico en el país sobre todo en regiones críticas para la agricultura y la cobertura forestal, pero también en cuencas de importancia hidroeléctrica.

Debe considerarse, además de las estrategias de adaptación al cambio climático a largo plazo, un plan de manejo del recurso hídrico en el país que permita afrontar la variabilidad climática en el corto plazo incluida una ley de aguas que regule el uso del recurso incorporando no solo los cambios potenciales a futuro sino el manejo de la variabilidad que se experimenta ya históricamente en el país pero que ha sido sujeta de más eventos extremos asociados posiblemente a forzamientos antropogénicos del sistema climático. El afrontar los cambios asociados a esta variabilidad ya observada en el presente (por ejemplo, aquellos asociados a eventos de El Niño) puede generar lecciones aprendidas que incrementen

la resiliencia de comunidades climáticamente vulnerables en el futuro. Es necesario ampliar la red de estaciones meteorológicas en todo el país, pero sobre todo en las regiones donde se proyectan los cambios más severos para poder establecer un sistema de monitoreo de variables climáticas críticas. Esto permitirá no sólo verificar la ruta del cambio en el clima (a largo plazo) a través del análisis de tendencias sino también establecer sistemas de alerta temprana (corto plazo) que pueden ayudar al manejo de riesgo de la variabilidad climática y eventos meteorológicos extremos. Por otro lado, se deben realizar ejercicios con ensambles de modelos climáticos para poder estimar la incertidumbre asociada a las proyecciones de aridez.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por FAO Guatemala por medio del estudio: Aumento de la resiliencia climática de familias rurales a través de restauración de paisajes hidrológicos estratégicos en Guatemala durante los años 2017-2018.

Literatura citada

- Anchukaitis, K. J., Taylor, M. J., Martin-Fernandez, J., Pons, D., Dell, M., Chop, C. and Castellanos, E. (2013). Annual chronology and climate response in *Abies guatemalensis* rehder (pinaceae) in Central America. *The Holocene* 23 (2): 270–77.
- Anchukaitis, K.J., Taylor, M. J., Leland, C., Pons, D. Martin-Fernandez, J., and Castellanos, E. (2014). Tree-ring reconstructed dry season rainfall in Guatemala, *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-014-2407-y.
- Anderson, T., Anchukaitis, K.J., Griffin, D., Pons, D. and Taylor, M.J. (2018). Climate sensitivity and potential vulnerability of Guatemalan fir (*Abies guatemalensis*) forests in Totonicapán, Guatemala" in *Journal of Latin American Geography*.
- Betts, R.A., Cox, P.M., Collins, M., Harris, P.P., Huntingford, C. and Jones, C.D. (2004). The role of ecosystem–atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease and forest dieback under global climate warming. *Theor Appl Climatol* 78:157–175
- Comisión Económica para América Latina y El Caribe [CEPAL]. (2005). *Efectos en Guatemala de las lluvias torrenciales y la tormenta tropical Stan, octubre de 2005*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Sistema de Naciones Unidas.
- CEPAL. (2018). *La economía del Cambio Climático*. Documento técnico. Naciones Unidas, 263 pp.
- Consejo Nacional de Cambio Climático (CNCC). (2017). *Líneas de investigación en cambio climático*.
- Cox, P.M., Betts, R.A., Jones, C.D., Spall, S.A. and Totterdell, I.J. (2000). Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408:184–187
- DesInventar. (2017). *DesInventar Disaster Information Management System*. Recuperado de: <http://www.desinventar.net>.

- FEWS NET. (2015). *Continuing El Niño drives increased food insecurity across many regions*. Recuperado de: <http://www.fews.net/global/alert/october-8-2015>.
- Eckstein, D., Künzel, V., and Schäfer, L. (2018). *Global climate risk index 2018. Who Suffers Most From Extreme Weather Events? Weather-related Loss Events in 2016 and 1997 to 2016*. Bonn: Germanwatch e.V. Recuperado de: <https://germanwatch.org/en/download/20432.pdf>
- Giannini, A., M. Cane, and Kushnir, Y. (2001). Interdecadal changes in the ENSO teleconnection to the Caribbean region and the North Atlantic Oscillation. *Journal of Climate* 14 (13): 2867–79.
- Hannah, L., Donatti, C.I., Harvey, C.A., Alfaro, E., Rodriguez, D.A., Bouroncle, C., Castellanos, E., Diaz, F., Fung, E., Hidalgo, H.G., Imbach, P., Läderach, P., Landrum, J.P. and Solano, A.L. (2017). Regional modeling of climate change impacts on smallholder agriculture and ecosystems in Central America. *Clim Chang*. doi:10.1007/s10584-016-1867-y.
- Hidalgo, H. G., y Alfaro, E. J. (2015). Skill of CMIP5 climate models in reproducing 20th century basic climate features in Central America. *International Journal of Climatology*, 35(12): 3397-3421
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., and Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 25(15): 1965-1978.
- Imbach, P., Molina, L., Locatelli, B., Rouspard, O., Mahé, G., Neilson, R., Corrales, L., Scholze, M. and Ciais, P. (2012). Modeling potential equilibrium states of vegetation and terrestrial water cycle of Mesoamerica under climate change scenarios. *J Hydrometeor* 13:665–680. doi:10.1175/JHM-D-11-023.1
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). (2002). *Mejoramiento de la Capacidad Técnica para Mitigar los Efectos de Futuros Eventos de la Variabilidad Climática (El Niño)*. Estudio Técnico. 176 pp.
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). (2018). *Mapa de Isoyetas Promedio Anual*. Recuperado de: http://www.insivumeh.gob.gt/?page_id=987.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático [IPCC]. (2013). *Summary for Policymakers*. In: *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 and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Karmalkar, A.V., Bradley, R.S. and Díaz, H.F., (2011). Climate change in Central America and Mexico: regional climate model validation and climate change projections, *Climate Dynamics* 37: 605-629.
- Knutti, R., & Sedláček, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3(4), 369-373.
- Li, W., Li, L., Fu, R., Deng, Y., & Wang, H. (2011). Changes to the north Atlantic subtropical high and its role in the intensification of summer rainfall variability in the southeastern United States. *Journal of Climate*, 24(5): 1499-1506. doi:10.1175/2010JCLI3829.1
- Lyra, A., Imbach, P., Rodriguez, D., Chou, S. C., Georgiou, S., & Garofolo, L. (2017). Projections of climate change impacts on Central America tropical rainforest. *Climatic Change*, 141(1): 93-105.

- Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAGA]. (2002). *Estimación de Amenazas Inducidas por Fenómenos Hidrometeorológicos en la República de Guatemala*. Elaborado por Programa de Emergencia por Desastres Naturales e Instituto de Sismología, Vulcanología Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). Recuperado de: <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0026/doc0026-parte01.pdf>
- Magrin, G., Marengo, J.A., Boulanger, J.P., Buckeridge, M.S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F.R. and Viciña, S. (2014). *Central and South America*. In: Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds) *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Malhi, Y., Aragao, L.E.O.C., Galbraith, D., Huntingford, C., Fisher, R. and Zelazowski, P. (2009). Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. *Proc Natl Acad Sci U S A* 106:20610–20615.
- MARN. (2015). *Segunda Comunicación Nacional Sobre Cambio Climático, Guatemala*. 250 pp.
- Marengo, J. A., & Bernasconi, M. (2015). Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. *Climatic change*, 129(1-2), 103-115.
- Nastos, P., Kapsomenakis, J., Kotsopoulos, S. and Poulos, S. (2015). Present and future projected reference evapotranspiration over Thessaly plain, Greece, based on regional climate models' simulations. *European Water*. 51:63-72.
- Neelin, J.D., Münnich, M., Su, H., Meyerson, J.E. and Holloway, C.E. (2006). Tropical drying trends in global warming models and observations. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103: 6110–6115.
- Oglesby, R., Rowe, C., Grunwaldt, A., Ferreira, I., Ruiz, F., Campbell, J., Alvarado, L., Argenal, F., Olmedo, B., del Castillo, A., Lopez, P., Matos, E., Nava, Y., Perez, C. and Perez, J. (2016) A High-Resolution Modeling Strategy to Assess Impacts of Climate Change for Mesoamerica and the Caribbean. *American Journal of Climate Change*, 5: 202-228. doi: 10.4236/ajcc.2016.52019
- Pons, D., Taylor, M.J., Griffin, D., Castellanos, E. and Anchukaitis, K.J. (2017). On the production of climate information in the high mountain forests of Guatemala. *Annals of the American Association of Geographers. Special Edition on Mountains*. 2:324-335.
- Ramirez-Villegas, J., & Jarvis, A. (2010). Downscaling global circulation model outputs: the delta method decision and policy analysis Working Paper No. 1. *Policy Analysis*, 1: 1-18.
- Scholze M, Knorr W, Arnell NW, Prentice IC. (2006). A climate change risk analysis for world ecosystems. *Proc Natl Acad Sci U S A* 103:13116–13120
- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38, 55–94.
- United Nations Environment Programme [UNEP]. (1992). *World Atlas of Desertification*.
- United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs [UNOCHA]. (2016). *Humanitarian needs overview: Central America*. Recuperado de: <https://www.humanitarianresponse.info/en/system/files/documents/files/2016-hno-centralamerica-7jan.pdf>.
- Villanueva-Díaz, J., Luckman, B. H., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., Cerano-Paredes, J., . . . Jasso-Ibarra, R. (2005). Hydroclimatic variability of the upper nazas basin: Water management implications for the irrigated area of the comarca lagunera, Mexico. *Dendrochronologia*, 22(3): 215-223. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2005.04.005>
- Xu, Y.P., Pan, S., Fu, G., Tian, Y. and Zhang, X. (2014). Future potential evapotranspiration changes and contribution analysis in Zhejiang Province, East China, *J. Geophys. Res. Atmos.* 118:2174–2192, doi:10.1002/2013JD021245.