

ARTÍCULO II. Impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica para uso humano y en el déficit hídrico del cultivo de maíz en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago de Atitlán.

RESUMEN

Se identifica el impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica superficial para uso humano, y en el déficit hídrico del cultivo de maíz en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago de Atitlán. Se usó el modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool) para obtener la disponibilidad de agua superficial en la subcuenca y la evapotranspiración real. Los cambios se obtienen comparando la línea base (1994-2015) con el escenario de cambio climático RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES al 2050, con reducción de escala de MarkSim®. Se utilizó el algoritmo SUFI-2 con el programa SWAT-CUP (SWAT-Calibration Uncertainty Prediction), para evaluar la sensibilidad y optimización de parámetros, utilizando la variable caudal para dicho fin en dos puntos de diferente intervención. Punto en zona con menor intervención presentó ajuste hidrológico muy bueno ($KGE=0.87$), y en punto de alta intervención este fue no satisfactorio ($KGE=-0.8$). Se usó el método de USDA-SCS para calcular la precipitación efectiva del cultivo. Se sugiere que el cambio climático llevará a escasez extrema a cuatro microcuencas (Barreneché, Pamán, Xibalbay y Chuiscalera), dos a escasez crónica (Argueta y Novillero) y mantendrá una microcuenca en escasez extrema (Quiscab). La subcuenca Quiscab pasará de estrés a escasez extrema, considerando $1,700 \text{ m}^3$ per cápita como umbral de estrés hídrico. Se prevé que el déficit hídrico del cultivo de maíz se conserve en el inicio de etapa vegetativa y surge en la parte final del ciclo, pero se presentará un incremento severo del déficit hídrico ($+535 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) en estas etapas debido al cambio climático.

Palabras clave: SWAT, disponibilidad hídrica, déficit hídrico, escasez de agua.

ABSTRACT

The impact of climate change on the surface water availability for human use and on the water deficit of the maize crop in the Quiscab River sub basin, basin of Lake Atitlán, is identified. The SWAT (Soil Water Assessment Tool) was used to obtain surface water availability and actual evapotranspiration in the subbasin. The changes are obtained by comparing the baseline (1994-2015) with the climate change scenario RCP 8.5 of the HadGEM2-ES model to 2050, with MarkSim® scale reduction. The SWAT-CUP (SWAT-Calibration Uncertainty Prediction) algorithm was used to evaluate the sensitivity and optimization of parameters, using the streamflow for this purpose in two points of different intervention. Point in zone with poorly intervention presented very good performance ($KGE = 0.87$), and in point of high intervention was not satisfactory ($KGE = -0.8$). The USDA-SCS method was used to calculate the effective precipitation of the crop. It is suggested that climate change will lead to extreme scarcity in four microbasins (Barreneché, Pamán, Xibalbay and Chuiscalera), two to chronic scarcity (Argueta and Novillero) and maintain a microbasin in extreme scarcity (Quiscab). The subbasin Quiscab will go from stress to extreme scarcity, considering $1,700 \text{ m}^3$ per capita as a threshold

of water stress. The water deficit of the maize crop is expected to be conserved at the beginning of the vegetative stage and appears at the end of the cycle, but there will be a severe increase in the water deficit ($+ 535 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) in these stages due to climate change.

Key words: SWAT, water availability, water deficit, water scarcity.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel global el 70% del agua dulce (2.5%) extraída es utilizada en el sector agrícola, 20% y 10% para uso industrial y doméstico, respectivamente. Adicional a ello, el crecimiento de la población mundial incrementa la demanda del recurso hídrico, y con ello se dan problemas de escasez de agua para satisfacer las necesidades humanas, y ante cambio climático se prevé que se intensifique dicha escasez (FAO 2016b; FAO 2016a). Centro América es un punto caliente tropical emergente dado el cambio en precipitación y temperatura futura (Giorgi 2006). El cambio climático prevé el calentamiento medio en Guatemala a la década de 2060 de menos a 1°C a más de 3°C , con el mayor incremento en las tierras altas según lo propone Oglesby y Rowe (2014) con el modelo CCSM4. Por su parte Schmidt *et al.* (2012), indican que al 2050 el incremento promedio de temperatura del país será 2.4°C , con el enfoque CMIP3.

En Mesoamérica Imbach *et al.* (2012) simularon el comportamiento del ciclo hidrológico con el modelo MAPSS ante escenarios de cambio climático del CMIP3 al 2070-99, donde en la cordillera de Guatemala, Honduras y Nicaragua junto a la Península de Yucatán la escorrentía mostró reducción de más del 80% en comparación al período de referencia 1950-2000. Al existir cambios en el régimen hidrológico de una cuenca, también se darían dinámicas en los servicios ecosistémicos hidrológicos, por ejemplo, disminución de la dotación de agua para uso humano.

El indicador de agua dulce renovable per cápita desarrollado por Falkenmark *et al.* (1989) es un indicador de requerimientos humanos, y toma en consideración el uso doméstico, agrícola e industria. Es uno de los indicadores de escasez más conocido y globalmente utilizado; este relaciona el agua renovable del ciclo hidrológico y la cantidad de habitantes; fijando como límite de estrés hídrico la disponibilidad per cápita anual de $1,700 \text{ m}^3$. Revenga *et al.* (2000) utilizaron este indicador para evaluar la oferta por habitante a escala de cuenca. Mientras que Arnell (2004) indica que para el 2055 Mesoamérica tendrá altas poblaciones en cuencas con estrés hídrico en ausencia de cambio climático y, será mayor la población que incremente su estrés hídrico que las que lo reduzcan, bajo el escenario A2 del HadCM3. El autor usó el umbral de estrés hídrico $1,000 \text{ m}^3 \text{ persona}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

La disponibilidad hídrica per cápita del país al 2014 es $6,818 \text{ m}^3$ (BM y AQUASTAT 2016). Por su parte la disponibilidad hídrica por superficie a nivel nacional se encuentra alrededor de 110 billones de metros cúbicos (IARNA-URL 2015; BM y AQUASTAT 2016), de la cual el 22% representa el consumo (IARNA-URL 2015). Según IARNA-URL (2015), actualmente la cuenca del Lago de Atitlán presenta disponibilidad hídrica per cápita por debajo de $1,700 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$,

mientras que bajo un escenario de cambio climático (A2) del modelo HadCM3 al 2020, sin considerar reforestación la disponibilidad per cápita reduciría entre 10 y 15%.

Zhang y Cai (2013) a escala global encontró sensibilidad del déficit hídrico ante escenarios de cambio climático, tanto en cultivo regados y sin riego. Esto brinda una idea para evaluar el déficit hídrico agrícola en la subcuenca Quiscab ante el cambio climático. La mayor superficie de cultivos anuales en el departamento de Sololá es de granos básicos, siendo maíz el predominante (INE 2004b). El asociado de maíz y otros cultivos representa el 72% y, el monocultivo un 28% en tal departamento (Cifuentes *et al.* 2014). Actualmente el IARNA-URL (2013) muestra que la necesidad potencial de riego según el potencial hortícola en la subcuenca Quiscab es superior a $3,000 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$.

Se utiliza el modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool) (Arnold *et al.* 1998; Neitsch *et al.* 2005), para simular una línea base (1994-2015) y, sobre él se incorporaron anomalías de precipitación y temperatura. El modelo brinda la simulación del ciclo hidrológico particionado, utilizando como insumos la producción de agua (escorrentía superficial, flujo lateral y base) y la evapotranspiración real del cultivo de maíz. Este estudio identifica el impacto del cambio climático, escenario RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES con reducción de escala, en la disponibilidad hídrica superficial para uso humano y en el déficit hídrico del cultivo de maíz en la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

2.1 Área de estudio

Esta investigación se llevó a cabo en la subcuenca del río Quiscab ($14^{\circ} 48' 32.9'' \text{ N}$, $91^{\circ} 13' 51.89'' \text{ O}$), que pertenece a la cuenca del Lago de Atitlán. Tiene un área de 149.7 km^2 , que incluye cinco municipios de dos departamentos (Sololá y Totonicapán), con población total de 101,070 habitantes al 2016 (INE 2004a). La precipitación promedio es de 1,472 mm al año, y la temperatura mínima y máxima promedio es 8.8°C y 20.6°C , respectivamente. Posee un rango altitudinal que va de 1,580 a 3,300 metros sobre el nivel del mar. Los usos y coberturas predominantes en la subcuenca son los bosques (mixto, latifoliado y coníferas) y granos básicos (maíz y frijol), con 35% y 38.6% respectivamente (GIMBOT 2014; INAB y CONAP 2015; MAGA-DIGEGR 2015).

2.2 Modelo SWAT y escenario de cambio climático

Se utilizó el modelo semi-distribuido y de tiempo continuo a escala de cuenca SWAT (Soil and Water Assessment Tool), desarrollado por el Dr. Jeff Arnold del Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-ARS) (Arnold *et al.* 1998; Neitsch *et al.* 2005; Arnold *et al.* 2012). El modelo se elaboró con información de tipo de suelo (MAGA-DIGEGR 2013), uso y cobertura de la tierra (GIMBOT 2014; INAB y CONAP 2015; MAGA-DIGEGR 2015), topografía y pendientes, y clima (precipitación, temperatura mínima y máxima diaria) propia del área de estudio.

La simulación del ciclo hídrico se realizó para el período 1994-2015; con tres años de calentamiento. Se realizó calibración, análisis de incertidumbre y sensibilidad (12 parámetros) con la variable caudal, usando el algoritmo SUFI-2 (Abbaspour *et al.* 2004; Abbaspour *et al.* 2007), incluido en el programa SWAT-CUP. También, la parametrización para dos sitios: microcuencas Pamán y Quiscab, donde el período de calibración para la primera fue de un año, y la segunda de 2.16 años. De ambas microcuencas, la del río Pamán presentó mejor ajuste hidrológico; con los criterios de eficiencia: Nash-Sutcliffe (NS), estandarización de la raíz del error cuadrático medio (RSR) y PBIAS catalogados como muy buenos según Moriasi *et al.* (2007); y el coeficiente de determinación (R^2) muy cercano al límite inferior de satisfactorio de Abbaspour *et al.* (2004); por último, el coeficiente de determinación ponderado (br^2), y Kling-Gupta (KGE) tuvieron comportamiento satisfactorio.

El modelo SWAT permite la incorporación de anomalía de clima para simular el cambio climático y predecir patrones climáticos futuros (Neitsch *et al.* 2005; Gassman *et al.* 2007), con ello permite calcular las modificaciones de los componentes del balance hídrico y demás cargas. Se usó la anomalía de precipitación y temperatura del Modelo de Circulación General (GCM) HadGEM2-ES (Collins *et al.* 2011; Jones *et al.* 2011; Martin *et al.* 2011), con reducción de escala estadística de la plataforma MarkSim® (Jones y Thornton 2013), bajo el escenario RCP 8.5 del CMIP5 (Cubasch *et al.* 2013) al año 2050.

El escenario RCP 8.5 tiene un conjunto de supuestos: rápido incremento de la población, tasa de desarrollo económico lento, ritmo lento de cambio tecnológico y mejoras en la intensidad energética (dominada por combustibles fósiles), donde la combinación de estos a largo plazo incrementará las emisiones de gases de efecto invernadero en ausencia de políticas climáticas (Riahi *et al.* 2011). Este escenario extremo de cambio climático incrementa las emisiones y concentración de gases de efecto invernadero hasta provocar un forzamiento radiativo de 8.5 W m^{-2} y más de 1,370 ppm de CO_2 -eq. al 2100, con tendencia creciente después del 2100 (Moss *et al.* 2008; Moss *et al.* 2010)

Las razones para seleccionar el RCP 8.5 al 2050 son: 1) la similitud del forzamiento radiativo al 2050 entre los RCP's 8.5; 6.0 y 4.5 (Meinshausen *et al.* 2011); 2) el incremento de la temperatura global al 2050 fue 0.42°C y 0.46°C con respecto al periodo de referencia (1981-2010) (Sánchez-Lugo *et al.* 2016); 3) Las estaciones de Guatemala incluidas en el monitoreo de Centro América presentaron frecuencias mayores (días) con temperatura superior a la media del período 1981-2010 (Amador *et al.* 2016); 4) entre menos de 1°C y más de 3°C se prevé el calentamiento para Guatemala, donde el mayor cambio será en las tierras altas para la década de 2060 (Oglesby y Rowe 2014); 5) Schmidt *et al.* (2012) para el país al 2050 prevé un incremento anual promedio de la temperatura de 2.4°C ; 5) finalmente, la anomalía media global al 2050 del RCP 8.5 será 2.0°C (Collins *et al.* 2013).

2.3 Disponibilidad de agua per cápita para uso humano

Se usó el indicador de disponibilidad de agua dulce renovable per cápita (AWR, por sus siglas en inglés), desarrollado por Falkenmark *et al.* (1989), el cual es de fácil cálculo

(FAO2013). Este es un indicador de requerimiento humano que relaciona la cantidad de agua renovable del ciclo hidrológico con la cantidad de personas y categoriza dicha relación en diferentes niveles. Para este estudio se utilizó la producción de agua media (WYLD) de la subcuenca Quiscab obtenida por simulación hidrológica con SWAT, como oferta hídrica superficial; la producción de agua contiene los flujos: escorrentía superficial, flujo lateral y base, mismos que conforman el caudal. La producción de agua promedio de la línea base se utilizó para calcular el indicador de disponibilidad de agua dulce renovable per cápita.

Para la línea base se usó la proyección de población 2000-2020 a nivel municipal del Censo Nacional XI de Población y VI de habitación de 2002 (INE 2004a), para aplicar la misma tasa de incremento anual hasta el 2015 a escala de poblados; sumando la población proyectada al 2015 de todos los poblados dentro de la subcuenca Quiscab. Se utilizó la población al 2015 para integrar el indicador de disponibilidad de Falkenmark *et al.* (1989).

Para el escenario futuro de cambio climático (RCP 8.5 HadGEM2-ES) se realizó regresión lineal simple en función del año, donde la fuente de datos es la proyección de población 2000-2020 del INE (2004a), para obtener la población proyectada a escala municipal al 2050. Luego se calculó la tasa anual de crecimiento aritmética para cada municipio. Finalmente se aplicó la tasa de crecimiento anual aritmético de cada municipio a sus respectivos poblados, hasta obtener la población de la subcuenca al año 2050. No se utilizó la tasa de crecimiento proyectada por el INE (2002) a nivel república para el 2050, ya que los municipios de la subcuenca han presentado tasas de crecimiento históricas superiores a la nacional.

2.4 Déficit hídrico del cultivo de maíz

El déficit hídrico se obtuvo relacionando la evapotranspiración actual o real del cultivo de maíz (ET) y la precipitación efectiva (Pef). Existe un déficit hídrico si $ET > Pef$, en condiciones de ausencia de riego. Si $ET \leq Pef$ no existe déficit hídrico. Se definió solo el cultivo de maíz de la categoría de uso granos básicos por las razones siguientes: 1) es la base del sistema milpa del departamento de Sololá, donde en los municipios que convergen en la subcuenca Quiscab, 31% es producido en monocultivo y el 69% en asocio con otros cultivos (Cifuentes *et al.* 2014); 2) en los mapas de uso y cobertura no se puede separar por fotointerpretación el maíz y el frijol (MAGA-DIGEGR 2015); 3) según el IV Censo Agropecuario el cultivo de maíz es el de mayor área cosechada en el departamento (INE 2004b). También se realizó una entrevista para conocer la duración del calendario agrícola (etapas del cultivo), donde el tamaño de la muestra fue 29 poblados, efectuando una entrevista por poblado.

2.4.1 Evapotranspiración del cultivo

Se utilizó el método de Hargreaves y Samani (1985) (Ec. 17) para determinar la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (PET) a escala mensual, mediante la simulación hidrológica del modelo SWAT. Las razones de utilizar este método son: 1) el tipo, calidad y longitud del registro de datos, solo se tienen datos observados temperatura mínima y máxima con registro confiable de 22 años (1994-2015); 2) el uso que se le dará a la

evapotranspiración, como lo menciona Zhang (2015): “los datos de clima proyectados tiene alto riesgo de incertidumbre como para aplicarse en una ecuación tan sensible como lo de Penman-Monteith”; 3) la ecuación de Hargreaves ha producido resultados de “exactitud razonable” validados a nivel global (Hargreaves y Samani 1985; Allen 2006); 4) es un método simple y práctico que calcula la PET solo con el uso de temperatura mínima y máxima, y requiere poca o nula calibración (Hargreaves y Samani 1985).

$$PET = 0.0023 * R_a * (T_{\bar{x}} + 17.8) * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde, R_a es la radiación extraterrestre; $T_{\bar{x}}$ temperatura media; T_{max} y T_{min} temperatura mínima y máxima, respectivamente. Mientras que la evapotranspiración actual (ET) mensual del cultivo maíz se obtuvo a través del algoritmo del modelo SWAT; el cual primero evapora el agua interceptada por el dosel, luego calcula las tasas máximas de transpiración de la vegetación y de evaporación del suelo (Neitsch *et al.* 2005).

2.4.2 Precipitación efectiva

Debido a que el modelo SWAT no calcula la precipitación efectiva necesaria para satisfacer la demanda hídrica de los cultivos, se usó el método de USDA-SCS (Martin y Gilley 1993) para calcular la precipitación efectiva de la línea base (1994-2015) y el escenario de cambio climático futuro al 2050 (Ec. 18 y 193). Se usa este método por ser de cálculo simple al depender solo de la precipitación mensual y evapotranspiración real, y como menciona Hess (2010) no requiere calibración.

$$P_{ef} = SF(0.7091 * Pt^{0.82416} - 0.11556) * (10^{0.02426*ET_c}) \quad \text{Ecuación 18}$$

$$SF = (0.531747 + 0.295164 * D - 0.057697 * D^2 + 0.003804 * D^3) \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde P_{ef} , es la precipitación efectiva mensual, y Pt la precipitación pluvial mensual; ET_c evapotranspiración del cultivo, SF factor de almacenamiento de agua en el suelo, D agua útil almacenada en el suelo.

3. RESULTADOS

3.1 Impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica para uso humano

La disponibilidad hídrica superficial para cada microcuenca de la subcuenca del río Quiscab se muestra en el **Cuadro 1**, actualmente se tiene un promedio de 695,630 m³ km² año⁻¹. Por el contrario, bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES al año 2050 se sugiere que la disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca sería 419,345 m³ km² año⁻¹, representando un cambio de -40%. Las microcuencas que actualmente tienen mayor oferta hídrica superficial son: Barreneché, Argueta y Novillero. El resto de microcuencas se encuentra entre 566,482 m³ km² año⁻¹ (Pamán) y 695,592 m³ km² año⁻¹ (Chiscalera). Las microcuencas que se prevé presentarán mayor cambio en la disponibilidad hídrica superficial al

2050 ante cambio climático son: Pamán (48%); Quiscab (-43%); y Chiscalera (-41%), el resto reducirán su oferta entre 36% (Barreneché) y 38% (Novillero) (**Cuadro 14**).

Cuadro 14. Disponibilidad hídrica superficial ($\text{m}^3 \text{ km}^2 \text{ año}^{-1}$) para cada microcuenca al 2015 y bajo un escenario de cambio climático al 2050 (RCP 8.5) del Modelo de Circulación General HadGEM2-ES con reducción de escala, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.

Microcuenca	2015	2050	
	Disponibilidad hídrica superficial, $\text{m}^3 \text{ km}^2 \text{ año}^{-1}$	Disponibilidad hídrica superficial, $\text{m}^3 \text{ km}^2 \text{ año}^{-1}$	Cambio %
Argueta	735,306	467,233	-37
Barreneché	752,669	478,387	-36
Pamán	566,482	295,794	48
Novillero	720,627	444,645	-38
Xibalbay	736,746	458,811	-38
Chiscalera	695,592	410,577	-41
Quiscab	661,988	379,970	-43
Subcuenca Quiscab	695,630	419,345	-40

Actualmente, la disponibilidad de agua superficial per cápita anual en la subcuenca del río Quiscab es de $1,270 \text{ m}^3$, encontrándose bajo estrés según Falkenmark *et al.* (1989). En los años de incidencia de los eventos meteorológicos extremos, la subcuenca salió de estrés hídrico per cápita, alcanzando valores de $2,382 \text{ m}^3$ en el 2010 (Tormenta Tropical Agatha y Depresión Tropical 11E); y $2,272 \text{ m}^3$ (Huracán Stand). Las microcuencas del río Argueta y Novillero no están en estrés hídrico; Barreneché, Xibalbay y Chiscalera presentan estrés hídrico; Pamán está en escasez crónica; y la microcuenca Quiscab está bajo escasez extrema (**Cuadro 15 y figura 16**).

Ante cambio climático al año 2050 (HadGEM2-ES, RCP 8.5) las microcuencas que actualmente no se encuentran en estrés hídrico, se sugiere pasarán a estar en escasez crónica (Argueta y Novillero), disminuyendo su disponibilidad por arriba del 60%. Mientras que las de estrés y escasez crónica probablemente estarán bajo escasez extrema (Barreneché, Pamán, Xibalbay, Chiscalera); reduciendo su disponibilidad per cápita más allá del 50%. La microcuenca Quiscab se mantendrá en escasez extrema, con reducción de su disponibilidad per cápita del 76.1% en comparación a la línea base. Por su parte la subcuenca del río Quiscab pasará de estrés a escasez extrema, tal desplazamiento de categoría se debe a la reducción del 70% de su disponibilidad actual (**Cuadro 15 y figura 16**).

Cuadro 15. Disponibilidad hídrica per cápita por año ($m^3 km^2 año^{-1}$) para cada microcuenca al 2015 y bajo un escenario de cambio climático al 2050 (RCP 8.5) del Modelo de Circulación General HadGEM2-ES con reducción de escala, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.

Microcuenca	$m^3 persona^{-1} año^{-1}$ Cambio, %			Categoría estrés	
	2015	2050		2015	2050
Argueta	2,138	657	-69	No estrés	Escasez crónica
Barreneché	1,651	496	-70	Estrés hídrico	Escasez extrema
Pamán	727	337	-55	Escasez crónica	Escasez extrema
Novillero	1,751	681	-61	No estrés	Escasez crónica
Xibalbay	1,004	260	-74	Estrés hídrico	Escasez extrema
Chuiscalera	1,334	384	-71	Estrés hídrico	Escasez extrema
Quiscab	285	68	-76	Escasez extrema	Escasez extrema
Subcuenca Quiscab	1,270	412	-70	Estrés hídrico	Escasez extrema

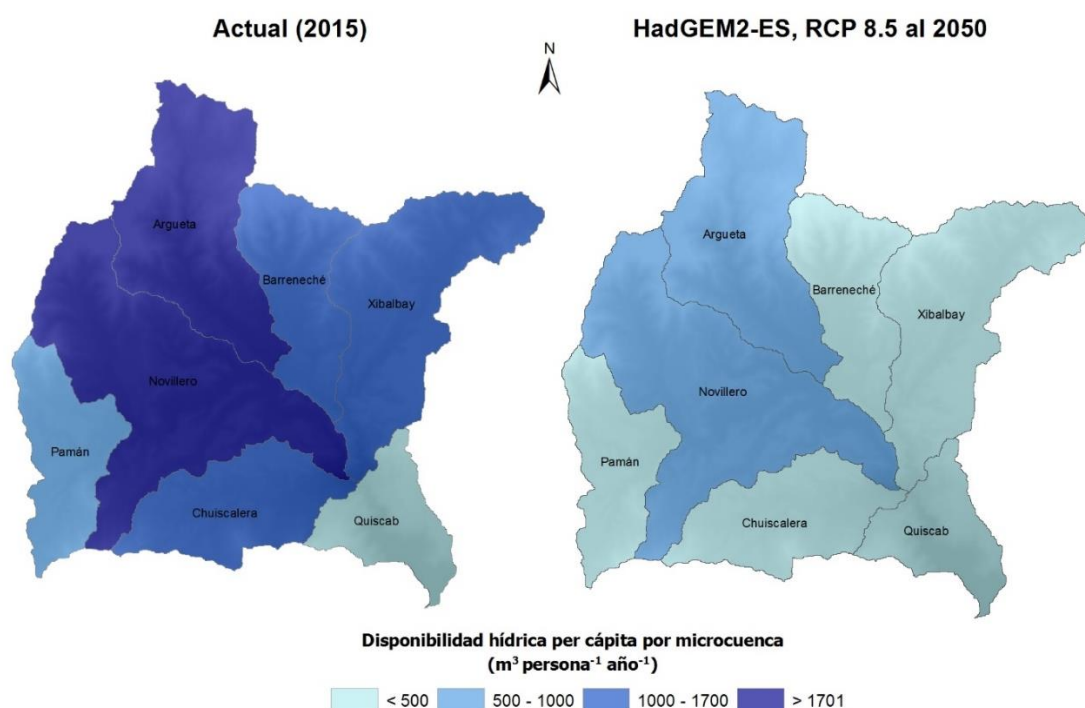


Figura 16. Disponibilidad hídrica per cápita ($m^3 persona^{-1} año^{-1}$) al 2015 y para el escenario futuro de cambio climático RCP 8,5 del Modelo de Circulación General con reducción de escala HadGEM2-ES al año 2050, para las microcuencas de la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.

3.2 Impacto del cambio climático en el déficit hídrico del maíz.

La siembra en los primeros días de marzo presenta la mayor frecuencia en la entrevista realizada ($n=24$), y la duración promedio del ciclo es 270 días. Por este motivo se estableció para el presente análisis, el 1 de marzo como fecha de siembra del cultivo de maíz en la subcuenca Quiscab. Actualmente (línea base) se evidencia déficit hídrico únicamente en la parte inicial de la etapa vegetativa del cultivo. Donde el total de déficit hídrico del cultivo de maíz es $-8.4 mm$ de agua, lo que equivale a $84 m^3 ha^{-1} año^{-1}$, en el área cubierta por granos básicos (maíz y frijol) (**Cuadro 16**). Bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del Modelo de

Circulación General HadGEM2-ES, se sugiere que el déficit hídrico del cultivo de maíz incrementa en la etapa inicial vegetativa $496 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (50mm; marzo y abril). Se prevé el surgimiento de déficit hídrico en la parte final del ciclo del cultivo (noviembre), representando $39 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (3.9 mm). El déficit hídrico total durante el ciclo del cultivo será $619 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (-62 mm) (**Cuadro 16**).

Cuadro 16. Déficit hídrico del cultivo de maíz ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) para la línea base (1994-2015), y bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del Modelo de Circulación General con reducción de escala HadGEM2-ES al 205; y el cambio en el déficit hídrico, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.

Mes	Déficit hídrico del maíz				
	mm		$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$		Cambio
	Línea base	RCP 8.5	Línea base	RCP 8.5	
Marzo	-4.7	-13.6	47	136	89
Abril	-3.7	-44.4	37	444	407
Noviembre	0.0	-3.9	0	39	39
Total	-8.4	-61.9	84	619	535

Espacialmente, el déficit actual es mayor en la dirección Sur Oeste de la subcuenca Quiscab, alcanzando valores inferiores a -40 mm; mientras que en el resto de superficie cultivada es menor a -20 mm. Ante cambio climático la mayor superficie del área cultivada con maíz (granos básicos) presenta déficit hídrico menor a -40 mm (**Figura 17**). Recordando que el déficit hídrico al 2050 bajo cambio climático se ubica en la etapa inicial vegetativa y en la parte final del ciclo (**Figura 17**).

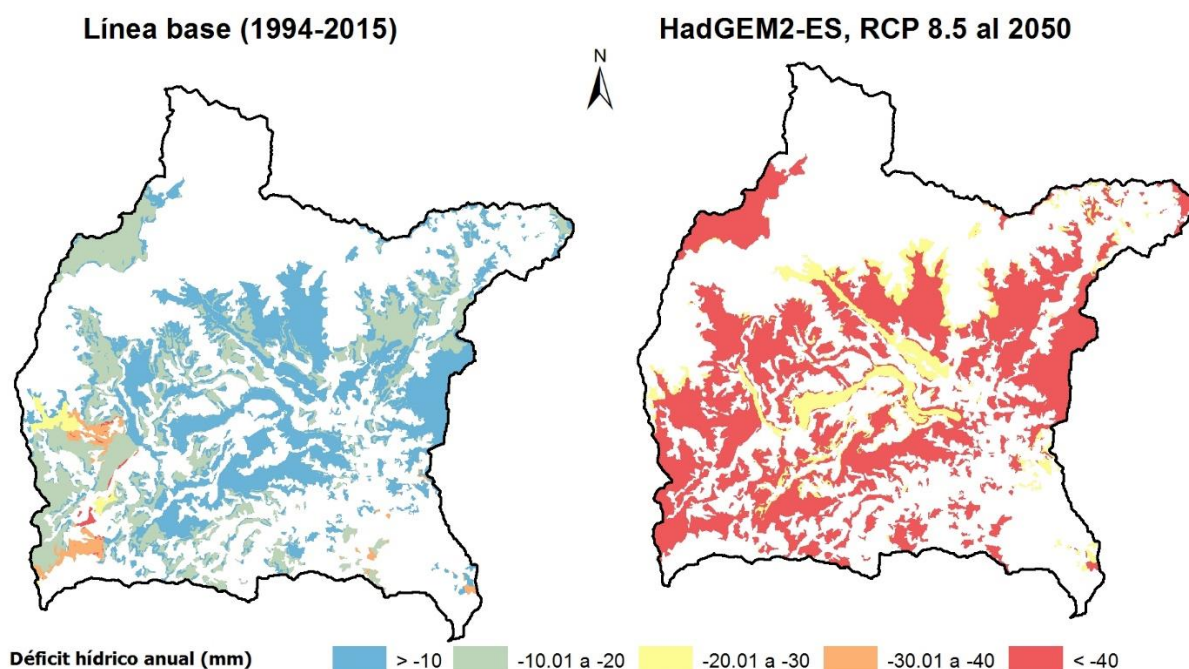


Figura 17. Déficit hídrico del cultivo de maíz (mm) para la línea base (1994-2015), y bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del Modelo de Circulación General con reducción de escala HadGEM2-ES al 2050, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.

4. DISCUSIÓN

4.1 Impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica para uso humano

La subcuenca del río Quiscab actualmente se encuentra bajo estrés hídrico, esto significa que su población está por debajo del umbral de 1,7000 metros cúbicos por persona por año para satisfacer las necesidades de uso en el hogar, agricultura e industria (Falkenmark *et al.* 1989; Falkenmark 1991). Pero al ir a escala de microcuencas encontramos escasez crónica y extrema, con ello se ve limitada la satisfacción de sus necesidades de consumo de agua para los usos mencionados.

El impulsor de dicho estrés hídrico actual es la presión demográfica sobre el territorio de estudio. Por ello, en los municipios que comparten superficie en la subcuenca se calculó la tasa de crecimiento exponencial promedio anual, donde la población base fue la del último censo (INE 2002), y la población más reciente aquella proyectada al 2015 sobre el mismo censo (INE 2004a). De esto, cuatro municipios (San José Chacayá 6.01%; Sololá 5.85%; Totonicapán 3.16%; y Santa Lucía Utatlán 2.80%) presentan tasa de crecimiento exponencial anual superior en comparación a la tasa exponencial de la República de Guatemala para el período 2000 – 2015 (2.44%) presentada por INE (2004a). La densidad demográfica de los cinco municipios a 2015 se encuentra entre 340 habitantes km⁻² (San José Chacayá) y 905 habitantes km⁻² (Sololá), con base en la proyección de población de INE (2004a).

Mientras que el impulsor de cambio a futuro además del crecimiento poblacional es el cambio climático, donde al combinarse con la presión demográfica se sugiere llevaría a la subcuenca Quiscab a la escasez absoluta o extrema (< 500 m³ persona⁻¹ año⁻¹). Esto sucedería si el cambio en la disponibilidad hídrica superficial en la subcuenca (-40%) sugerido por el escenario de cambio climático RCP 8.5 del HadGEM2-ES al año 2050 se lleva a cabo, y la población incrementa su presión. Es así que al incorporar este segundo impulsor se hace presente el factor climático inductor de escasez de agua, que a su vez modifica la oferta hídrica superficial debido a anomalías de precipitación y temperatura. Ambas son muy importantes en la movilidad del ciclo hidrológico; la precipitación es el principal componente de este que dota de agua a los ecosistemas (Brutsaert 2005; Vörösmarty *et al.* 2005; Davie 2008; Han 2010), y la temperatura en conjunto con la humedad del aire, agua disponible en la superficie y subsuelo son los principales factores que rigen la evapotranspiración (Fitts 2012).

Considerando que la subcuenca Quiscab actualmente se encuentra en estrés hídrico, misma situación para tres microcuencas (Barreneché, Xibalbay y Chuiscalera); una con escasez crónica (500-1000 m³ persona⁻¹ año⁻¹); y otra con escasez extrema (< 500 m³ persona⁻¹ año⁻¹), y que esta situación se sugiere se agravaría por el cambio climático y aumento poblacional, llevando las microcuencas sin estrés hídrico a la escasez, es imperativo prestar atención desde ya a los potenciales riesgos derivados de dicha situación. Es así que los riesgos potenciales relacionados con la problemática actual y futura de estrés y escasez de agua en las microcuencas de la subcuenca del río Quiscab, son y podrían ser: cambio en la dotación de agua, lo cual promovería conflictos sociales por el acceso al agua; el incremento de la población aumentaría la contaminación de las fuentes de agua; inseguridad alimentaria, degradación de

las tierras, inseguridad hídrica y pobreza, y disminución de los niveles de agua subterránea (Falkenmark y Widstrand 1992; Rijsberman 2004; UN-WATER 2007; PNUMA 2010a).

Este complejo de riesgos latentes incrementaría el deterioro del bienestar humano, por el impacto de sus impulsores de cambio directo e indirecto; cambio climático y crecimiento poblacional, respectivamente (MEA2005a; Carpenter *et al.* 2009). Es probable que los riesgos se acentúen e incrementen durante la época seca (noviembre-abril) ante el cambio climático, ya que la proporción de producción de agua en la época seca es 15% y 16%, en el escenario base y escenario de cambio climático al 2050, respectivamente. Por ello, el adecuado manejo y gestión del recurso hídrico es y será fundamental para establecer medidas de adaptación y mitigación al cambio climático y crecimiento poblacional, esto conduciría a reducir el impacto real de estos dos impulsores de cambio sobre la disponibilidad hídrica superficial en las microcuencas de la subcuenca Quiscab.

En el manejo y gestión del agua se debe considerar que este recurso es complejo por la dinámica de sus flujos (Rijsberman 2004), y que participa en distintos procesos biológicos (Vörösmarty *et al.* 2005), por ello Rippl (2003) le denomina la "corriente sanguínea de la biosfera". Por otro lado, y que queda fuera del alcance del indicador de Falkenmark *et al.* (1989), se debe evidenciar el acceso real de agua para los usos característicos de cada microcuenca.

Finalmente, queda fuera de análisis en el presente estudio las consideraciones siguientes: 1) la oferta de agua dulce almacenada en el acuífero; 2) capital construido para almacenamiento de agua; 3) importación de agua de cuencas adyacentes; 4) acceso real de agua para los diferentes usos, que al considerarse se tendría una perspectiva más amplia del contexto del manejo y gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Lago de Atitlán, sin olvidar que los dos departamentos que comparten superficie con la subcuenca Quiscab presentan los mayores niveles de pobreza al 2014 (> 75%); pobreza extrema (~ 40%); y brecha de pobreza (34%), y el departamento de Sololá es uno de los de mayor acceso a agua mejorada (tubería dentro y fuera del hogar, y chorro público) según INE (2015); PNUD (2016).

4.2 Impacto del cambio climático en el déficit hídrico del maíz.

El déficit hídrico del cultivo de maíz se incrementaría severamente en el inicio de la etapa vegetativa y se propiciaría el surgimiento en la última fase del ciclo. Esto sugiere sucedería en la época seca del régimen pluvial, ante cambio de precipitación en esta época de -61% y temperatura (+1.72°C) propiciado por el escenario RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES con reducción de escala. Este cambio de intensidad de déficit hídrico en la fase vegetativa afectaría la densidad de plantas por falta de agua para la germinación y emergencia, se disminuiría el crecimiento foliar lo que reduciría la interceptación de radiación solar (Lafitte 1994). Dicha reducción de radiación solar interceptada podría limitar el rendimiento, por el papel de esta en el proceso fotosintético.

Otro efecto de la falta de agua en el establecimiento del cultivo podría ser la modificación del calendario agrícola, cambiando la fecha de siembra; considerando que el cultivo de maíz continúe su producción sin riego a futuro. Además el incremento de temperatura podría propiciar acortar el ciclo de los cultivares nativos, que en el departamento representan más del 90% (Cifuentes *et al.* 2014). También, el déficit hídrico en la etapa vegetativa puede reducir la producción de materia seca entre 28-32% (Cakir 2004), y 17% cuando el déficit ocurre 3 semanas previo al 75% de floración (Claassen y Shaw 1970a). Además, la falta de agua en esta etapa podría reducir el número de granos, pero tener poco efecto sobre su peso (Eck 1986).

En la época lluviosa (mayo-octubre) el cultivo de maíz mantendrá su estatus de no déficit hídrico al 2050, ante una reducción de precipitación pluvial y temperatura en la misma de 19% y 2.75°C, respectivamente. Durante esta temporada se da la finalización de la etapa vegetativa y se lleva a cabo la etapa reproductiva. Siendo en esta última más sensible y crítico el maíz al déficit hídrico, especialmente en la floración y llenado de granos (Claassen y Shaw 1970b; Hall *et al.* 1982; Otegui *et al.* 1995; Schussler y Westgate 1995), ya que en esta etapa se determina el número y peso final de los granos de la mazorca (Bolaños y Edmeades 1993).

Los hallazgos de este estudio puede relacionarse con el estudio de Bouroncle *et al.* (2016), donde se encontró un incremento de la aptitud climática del cultivo de maíz en los municipios que convergen en la subcuenca Quiscab para el período 2020-2049 (2030); ante el escenario A1B de 24 Modelos Generales de Circulación. Por otro lado, Schmidt *et al.* (2012) muestra que para el departamento Sololá el cambio de aptitud del maíz será positivo, pero muy marginal (<20) al año 2050, ante un cambio de la temperatura media del país de +2.4°C, y reducción de la precipitación (3%).

Por lo tanto, el no presentarse déficit hídrico del cultivo ante cambio climático en la época lluviosa es probable que se deba al metabolismo del cultivo, siendo el maíz una planta de metabolismo C4 que posee alta eficiencia del uso del agua, altas tasa de crecimiento y fotosíntesis asociadas a mayor exposición a luz y temperatura (Hesketh 1963; Waggoner *et al.* 1963; Hatch 2002). Esta idea no brinda una respuesta sobre lo que sucederá con el rendimiento de grano de maíz, el que actualmente en el departamento de Sololá es 2.9 ton ha⁻¹ (Cifuentes *et al.* 2014) y a nivel nacional es de 1.62 ton ha⁻¹ (INE 2004b). Lo anterior provoca incertidumbre sobre el futuro de la seguridad alimentaria de los habitantes de la subcuenca, quienes destinan para autoconsumo el 85% y 96% de la producción de maíz y frijol, respectivamente, según Cifuentes *et al.* (2014).

5. CONCLUSIONES

En cuanto a las necesidades humanas el presente estudio aporta la existencia de puntos críticos en la disponibilidad hídrica superficial en la subcuenca Quiscab, donde por el impacto del cambio climático (RCP 8.5 HadGEM2-ES) y presión demográfica al 2050 la llevarán a escasez extrema, misma situación en el 70% de microcuencas. El 30% de microcuencas restantes pasarán a escasez crónica, con ello se reducirá la disponibilidad hídrica per cápita anual.

Espacialmente los cambios en la disponibilidad per cápita anual son más acentuados en las zonas que experimentarán mayor presión demográfica con menor producción de agua, destacan la microcuenca del río Quiscab.

Se resalta el déficit hídrico potencial actual del cultivo de maíz en el establecimiento del cultivo (inicio de etapa vegetativa, además del surgimiento en la última parte del ciclo del cultivo ante el escenario de cambio climático RCP 8.5 del HadGEM2-ES, y se prevé un incremento severo del déficit hídrico estas dos etapas. Este incremento severo es generalizado espacialmente en las áreas destinadas al cultivo de granos básicos en la subcuenca Quiscab.

Esto contribuye identificando los puntos de potencial interés que actualmente y a futuro provocarán estrés hídrico al cultivo de maíz, aportando elementos para combinarse con la capacidad adaptativa y resiliencia de los productores para determinar la vulnerabilidad de su producción ante la amenaza de cambio climático latente modelada en este estudio, y las repercusiones que tendría en la seguridad alimentaria de sus habitantes, por afectar la producción.

Al combinar la dinámica de disponibilidad hídrica per cápita y el déficit hídrico del cultivo de maíz entre la situación actual y futura, se hace evidente las implicaciones negativas potenciales que tiene el cambio climático en la disponibilidad hídrica para las necesidades humanas (industria, agricultura y del hogar), que pueden contribuir a la conflictividad del paisaje social. Es por ello la necesidad imperativa de una gestión integral del recurso hídrico inclusiva, participativa y activa en esta subcuenca que descarga sus aguas hacia el Lago de Atitlán, escenario de alto atractivo turístico para el país.

Los puntos fuertes del estudio se refieren a la solidez y estrecho uso del modelo hidrológico SWAT, al ser un modelo físicamente basado y que requiere información detallada del área de interés. Mientras que las limitaciones están relacionadas a la deficiencia temporal y espacial de datos pluviales, fluviales y de extracción para calibración y validación.

6. RECOMENDACIONES

Monitorear las fluctuaciones de la tabla de agua permanentemente y en varios puntos de la cuenca Atitlán, con el fin de determinar la recarga neta de agua subterránea, ya que a futuro la presión sobre esta fuente de agua dulce será mayor, por el cambio climático y demográfico. La gestión integral de los recursos hídricos en esta cuenca debe ir a sensibilizar a la población sobre el papel del agua subterránea que se obtiene de los manantiales y a través de pozos artesanales.

Promover e implementar prácticas de conservación de suelo y agua en la cuenca Atitlán, que puedan brindar mejores condiciones de humedad en el suelo y favorecer los cultivos. Las medidas agronómicas que buscan incrementar la rugosidad del terreno en combinación con

métodos del suelo, como la incorporación de materia orgánica, en conjunto mejoran la estabilidad de los agregados del suelo y la infiltración. También los métodos mecánicos ayudan como barrera en el proceso de transporte de la pérdida del suelo, tal es el caso de las terrazas que en años anteriores se han implementado en la zona de estudio.

Promover prácticas de cosecha de agua para uso en los hogares, y de reservorios comunitarios para uso agrícola. La implementación de ambas necesitará de un proceso de planificación adaptado a las condiciones locales de pendiente, características del suelo, régimen pluvial y escala de usuarios, además de la participación de actores locales.

Promover el mejoramiento genético comunitario de los cultivos criollos de maíz y frijol, ya que ante cambio climático serán necesarios cultivos precoces. Se sugiere iniciar pronto, ya que el mejoramiento genético es un proceso largo.

Construir una estrategia local de adaptación al cambio climático con énfasis en los recursos hídricos, involucrando a diferentes actores e insertarla en las agendas de desarrollo de las entidades participantes. Esta permitirá conocer la percepción local sobre exposición, sensibilidad y adaptación al cambio climático de los recursos hídricos en la zona.

Se sugiere elaborar el índice de pobreza de agua (WPI, por sus siglas en inglés) para relacionar la disponibilidad hídrica con el bienestar de los habitantes, y determinar, así como la escasez de agua afecta a la población local.

Cuantificar otras dimensiones de la escasez de agua, como la disponibilidad de calidad, infraestructura y acceso a los servicios hídricos, escasez económica, política e institucional.

7. LITERATURA CITADA

- Abbaspour, K; Johnson, C ; Van Genuchten, MT. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal* 34:1340-1352.
- Abbaspour, KC; Yang, J; Maximov, I; Siber, R; Bogner, K; Mieleitner, J; Zobrist, J ; Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333:413-430.
- Allen, RG. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Food & Agriculture Org.
- Amador, J; Hidalgo, H; Alfaro, E; Durán-Quesada, A ; Calderón, B. 2016. Regional Climate: Central America and the Caribbean. (en línea). *Bulletin of the American Meteorological Society* 978:S178-S181. Disponible en <https://www.ametsoc.org/ams/index.cfm/publications/bulletin-of-the-american-meteorological-society-bams/state-of-the-climate/>
- Arnell, NW. 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global environmental change* 14:31-52.
- Arnold, J; Moriasi, D; Gassman, P; Abbaspour, K; White, M; Srinivasan, R; Santhi, C; Harmel, R; Van Griensven, A ; Van Liew, M. 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation.

- Arnold, JG; Srinivasan, R; Muttiah, RS ; Williams, JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development1.
- Assessment, ME. 2005a. Ecosystems and human well-being : health synthesis : a report of the Millennium Ecosystem Assessment. Eds. J. Sarukhán; P. Weinstein. Washington, United States of America, Board of Review Editors.
- BM, (Banco Mundial, US) ; AQUASTAT, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, datos de AQUASTAT, IT). 2016. Datos de libre acceso del Banco Mundial: Guatemala. Disponible en <http://datos.bancomundial.org/pais/guatemala>
- Bolaños, J ; Edmeades, GO. 1993. La fenología del maíz.
- Bouroncle, C; Imbach, P; Rodríguez-Sánchez, B; Medellín, C; Martínez-Valle, A ; Läderach, P. 2016. Mapping climate change adaptive capacity and vulnerability of smallholder agricultural livelihoods in Central America: ranking and descriptive approaches to support adaptation strategies. (journal article). Climatic Change:1-15. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-016-1792-0>
- Brutsaert, W. 2005. Hydrology: an introduction. Wiley Online Library.
- Cakir, R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. Field Crops Research 891:1-16.
- Carpenter, SR; Mooney, HA; Agard, J; Capistrano, D; DeFries, RS; Díaz, S; Dietz, T; Duraiappah, AK; Oteng-Yeboah, A ; Pereira, HM. 2009. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. Proceedings of the National Academy of Sciences 1065:1305-1312.
- Cifuentes, R; Sierra, C; Arévalo, LA; Beteta, C; Herrera, E ; Alvarez, MR. 2014. El sistema Milpa del departamento de Sololá visto desde la experiencia y vivencia de los productores de maíz de la región. (en línea). Revista de la Universidad del Valle de Guatemala 27:11-30. Consultado 28 abril. Disponible en <http://www.uvg.edu.gt/publicaciones/revista/volumenes/Revista-27.pdf>
- Claassen, M ; Shaw, R. 1970a. Water deficit effects on corn. I. Vegetative components. Agronomy Journal 625:649-652.
- Claassen, M ; Shaw, RH. 1970b. Water deficit effects on corn. I. Grain components. Agronomy Journal 625:652-655.
- Collins, M; Knutti, R; Arblaster, J; Dufresne, J-L; Fichet, T; Friedlingstein, P; Gao, X; Gutowski, W; Johns, T ; Krinner, G. 2013. Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In T. Stocker; D. Qin; G. Plattner; M. Tignor; S. Allen; J. Boschung; A. Nauels; Y. Xia; B. Bex; B. Midgley. eds. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK. p. 1029-1136.
- Collins, W; Bellouin, N; Doutriaux-Boucher, M; Gedney, N; Halloran, P; Hinton, T; Hughes, J; Jones, C; Joshi, M ; Liddicoat, S. 2011. Development and evaluation of an Earth-system model—HadGEM2. Geoscientific Model Development 44:1051-1075.
- Cubasch, U; Wuebbles, D; Chen, D; Facchini, M; Frame, D; Mahowald, N ; Winther, J. 2013. Introduction. In T. Stocker; D. Qin; G. Plattner; M. Tignor; S. Allen; J. Boschung; A. Nauels; Y. Xia; B. Bex; B. Midgley. eds. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK. p. 119-158.
- Davie, T. 2008. Fundamentals of hydrology. Taylor & Francis.
- Eck, HV. 1986. Effects of water deficits on yield, yield components, and water use efficiency of irrigated corn. Agronomy Journal 786:1035-1040.
- Falkenmark, M; Lundqvist, J ; Widstrand, C. 1989. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches. In, Blackwell Publishing Ltd. p. 258-267.

- Falkenmark, M. 1991. The Ven te Chow memorial lecture: environment and development: urgent need for a water perspective. *Water International* 164:229-240.
- Falkenmark, M ; Widstrand, C. 1992. Population and water resources: a delicate balance. *Population bulletin* 473:1-36.
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2013. Afrontar la escasez de agua Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>
- _____. 2016a. Coping with water scarcity in agriculture: a global framework for action in a changing climate. (en línea). 4 p. Disponible en <http://www.fao.org/documents/card/en/c/8dd680fd-70d3-4725-8d9f-30f9a02455a0/>
- _____. 2016b. Soils, Land and Water for climate change adaptation and mitigation. (en línea). 16 p. Disponible en http://www.fao.org/documents/card/en/c/68b10350-9839-4759-94ba-0cb866cfde80/?utm_source=facebook&utm_medium=social+media&utm_campaign=ao+facebook
- Fitts, CR. 2012. *Groundwater science*. 2 ed ed. Academic press. 639 p.
- Gassman, PW; Reyes, MR; Green, CH ; Arnold, JG. 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions.
- GIMBOT, (Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra, GT). 2014. Mapa de bosques y uso de la tierra 2012. Guatemala, Guatemala, Esc. 1:50.000. color.
- Giorgi, F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 338:
- Hall, A; Vilella, F; Trapani, N ; Chimenti, C. 1982. The effects of water stress and genotype on the dynamics of pollen-shedding and silking in maize. *Field Crops Research* 5:349-363.
- Han, D. 2010. *Concise hydrology*. Bookboon.
- Hargreaves, GH ; Samani, ZA. 1985. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. American Society of Agricultural Engineers (Microfiche collection)(USA). no. fiche no. 85-2517.:
- Hatch, MD. 2002. C4 photosynthesis: discovery and resolution. *Photosynthesis Research* 731-3:251-256.
- Hesketh, JD. 1963. Hesketh JD & Moss D N. Variation in the response of photosynthesis to light. *Crop Sci*. 3: 107-10, 1963. *Crop Sci* 3:107-10.
- Hess, T. 2010. Estimating green water footprints in a temperate environment. *Water* 23:351-362.
- IARNA-URL, (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, GT). 2013. Evaluación Regional de los Recursos Hídricos y las Necesidades de Gestión para apoyar la Agricultura de pequeños productores: Enfoque de gestión y adaptación a las amenazas inducidas por el cambio y la variabilidad climática en el Altiplano Occidental de Guatemala. Guatemala, 296 p. Disponible en http://www.infoiarna.org.gt/rediarna/Informe_Final_PRS/Adjuntos/Parte%202.pdf
- IARNA-URL, IdA, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar, GT). 2015. Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala: Bases fundamentales para la gestión del agua con visión a largo plazo. Guatemala, Disponible en <http://www.url.edu.gt/publicacionesurl/pPublicacion.aspx?pb=16>
- Imbach, P; Molina, L; Locatelli, B; Rouspard, O; Mahé, G; Neilson, R; Corrales, L; Scholze, M ; Ciais, P. 2012. Modeling potential equilibrium states of vegetation and terrestrial water cycle of Mesoamerica under climate change scenarios*. *Journal of Hydrometeorology* 132:665-680.
- INAB, (Instituto Nacional de Bosques, GT) ; CONAP, (Consejo Nacional de Áreas Protegidas, GT). 2015. Mapa Forestal por Tipo y Subtipo de Bosque, 2012. Guatemala, Esc. 1:25.000. color.

- INE, (Instituto Nacional de Estadística, GT). 2002. XI Censo nacional de población y VI de habitación.
- _____. 2004a. Proyecciones de Población con Base al XI Censo de Población y VI de Habitación 2002, Período 2000 - 2020. (CD). Guatemala,
- _____. 2004b. IV Censo Nacional Agropecuario, Tomo II. Guatemala,
- _____. 2015. República de Guatemala: Encuesta Nacional de Condiciones de Vida 2014. Guatemala, 47 p. Disponible en <https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2015/12/11/vjNVdb4IZswOj0ZtuivPicaAXet8LZqZ.pdf>
- Jones, C; Hughes, J; Bellouin, N; Hardiman, S; Jones, G; Knight, J; Liddicoat, S; O'Connor, F; Andres, RJ ; Bell, C. 2011. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development* 43:543-570.
- Jones, PG ; Thornton, PK. 2013. Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications. *Agricultural Systems* 114:1-5.
- Lafitte, H. 1994. Identificación de problemas en la producción de maíz tropical: Guía de campo. CIMMYT.
- MAGA-DIGEGR, (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación; Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgo, GT). 2015. Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra República de Guatemala, año 2010. Guatemala Esc. 1:50.000. color.
- MAGA-DIGEGR, (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgo, GT). 2013. Estudio Semidetallado de suelos del departamento de Sololá, Guatemala. Guatemala, GT, 948 p.
- Martin, D ; Gilley, J. 1993. Irrigation water requirements: Chapter 2, Part 623. *National Engrg. Handbook*, USDA, Soil Conservation Service 284:
- Martin, G; Bellouin, N; Collins, W; Culverwell, I; Halloran, P; Hardiman, S; Hinton, T; Jones, C; McDonald, R; McLaren, A; O'Connor, F; Roberts, M; Rodriguez, J; Woodward, S; Best, M; Brooks, M; Brown, A; Butchart, N; Dearden, C; Derbyshire, S; Dharssi, I; Doutriaux-Boucher, M; Edwards, J; Falloon, P; Gedney, N; Gray, L; Hewitt, H; Hobson, M; Huddleston, M; Hughes, J; Ineson, S; Ingram, W; James, P; Johns, T; Johnson, C; Jones, A; Joshi, M; Keen, A; Liddicoat, S; Lock, A; Maidens, A; Manners, J; Milton, S; Rae, J; Ridley, J; Sellar, A; Senior, C; Totterdell, I; Verhoef, P ; Wiltshire, A. 2011. The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations. *Geoscientific Model Development* 43:723-757.
- Meinshausen, M; Smith, SJ; Calvin, K; Daniel, JS; Kainuma, M; Lamarque, J; Matsumoto, K; Montzka, S; Raper, S ; Riahi, K. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* 1091-2:213-241.
- Moriasi, DN; Arnold, JG; Van Liew, MW; Bingner, RL; Harmel, RD ; Veith, TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 503:885-900.
- Moss, RH; Nakicenovic, N ; O'Neill, B. 2008. Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies.
- Moss, RH; Edmonds, JA; Hibbard, KA; Manning, MR; Rose, SK; Van Vuuren, DP; Carter, TR; Emori, S; Kainuma, M ; Kram, T. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 4637282:747-756.
- Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, J; Williams, J ; King, K. 2005. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. . Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX:
- Oglesby, R ; Rowe, C. 2014. Impactos climáticos para Guatemala: Resultados preliminares de los modelos climáticos regionales y globales IPCC AR5. (en línea). Guatemala, 35 p. p. Consultado 01 nov 2015. Disponible en <http://www.marn.gob.gt/Multimedios/1442.pdf>

- Otegui, ME; Andrade, FH ; Suero, EE. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research* 402:87-94.
- PNUD, (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, GT). 2016. Más allá del conflicto, luchas por el bienestar: Informe Nacional de Desarrollo Humano 2015/2016. Guatemala, Guatemala, 404 p.
- PNUMA, (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, KE). 2010a. El enverdecimiento del derecho de aguas: la gestión de los recursos hídricos para los seres humanos y el medioambiente. (en línea). Disponible en http://www.unep.org/delc/Portals/119/UNEP_Greening_water_law_spanish.pdf
- Revenga, C; Brunner, J; Henninger, N; Kassem, K ; Payne, N. 2000. PILOT ANALYSIS OF GLOBAL ECOSYSTEM. (en línea). Ed. W. R. I. a. W. Institute. Washington, US, Disponible en http://www.wri.org/sites/default/files/pdf/page_freshwater.pdf
- Riahi, K; Rao, S; Krey, V; Cho, C; Chirkov, V; Fischer, G; Kindermann, G; Nakicenovic, N ; Rafaj, P. 2011. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 1091-2:33-57.
- Rijsberman, FR. 2004. Water scarcity: fact or fiction? New directions for a diverse planet. *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress* 1:14.
- Ripl, W. 2003. Water: the bloodstream of the biosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 3581440:1921-1934.
- Sánchez-Lugo, A; Morice, C ; Berrisford, P. 2016. Temperature: Surface Temperature. (en línea). *Bulletin of the American Meteorological Society* 978:S12-S13. Disponible en <https://www.ametsoc.org/ams/index.cfm/publications/bulletin-of-the-american-meteorological-society-bams/state-of-the-climate/>
- Schmidt, A; Eitzinger, A; Sonder, K; Sain, G; Rizo, L; Rodriguez, B; Hellin, J; Fisher, M; Laderach, P ; San Vicente, F. 2012. Tortillas on the roaster (ToR) Central America maize-beans systems and the changing climate: full technical report.
- Schussler, J ; Westgate, M. 1995. Assimilate flux determines kernel set at low water potential in maize. *Crop Science* 354:1074-1080.
- UN-WATER, (United Nations Water, IT). 2007. Coping with water scarcity: challenge of the twenty-first century. Prepared for World Water Day:
- Vörösmarty, CJ; Léveque, C; Revenga, C; Bos, R; Caudill, C; Chilton, J; Douglas, EM; Meybeck, M ; Prager, D. 2005. Fresh Water. In M. H. Rashid; R. Scholes; A. Neville. eds. *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment*. Washington, United States of America. p. 165-207.
- Waggoner, PE; Moss, D ; Hesketh, J. 1963. Radiation in the plant environment and photosynthesis. *Agronomy Journal* 551:36-39.
- Zhang, X ; Cai, X. 2013. Climate change impacts on global agricultural water deficit. *Geophysical Research Letters* 406:1111-1117.
- Zhang, X. 2015. Integrated assessment of global agricultural land and water resources in a changing world. University of Illinois at Urbana-Champaign.