

**RÉGIMEN DE HUMEDAD DE LOS SUELOS DE MÉXICO
CONSIDERANDO UN INCREMENTO DE LA TEMPERATURA MEDIA
GLOBAL DE 1.5°C**

Jesús David GÓMEZ DÍAZ¹, Alejandro Ismael MONTERROSO RIVAS¹, Patricia
RUÍZ GARCÍA¹, Lizeth Margarita LECHUGA GAYOSSO¹, Cecilia CONDE
ÁLVAREZ²

¹*Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.*

²*Centro de Ciencias de la Atmosfera. Universidad Nacional Autónoma de México.*

**dgomez@correo.chapingo.mx, aimrivas@correo.chapingo.mx,
cometapat18@hotmail.com, liz_260291@hotmail.com, conde@unam.mx**

RESUMEN

En este estudio se determinaron los regímenes de humedad del suelo de México usando el modelo de simulación Newhall con la base de datos generada a escala 1:250 000, esto para las condiciones actuales y con un incremento de la temperatura media global de 1.5°C, con los RCPs de 4.5 and 8.5 W/m² usando los Modelos GFDL, HADGEM y MPI. El 38.8% de los suelos del país tienen régimen *Aridic*, menos del 1% *Xeric*, el 36.4% *Ustic* y 24.1% *Udic*. Para el RCP de 4.5, en los modelos HADGEM y MPI se prevé que se dé un incremento considerable en el déficit hídrico en los suelos. En el Modelo GFDL se presenta esta tendencia, pero en proporciones menores. En el RCP 8.5 W/m², en el modelo GFDL se estima una disminución de la superficie con mayor estrés hídrico, con incrementos de la superficie de regímenes de humedad intermedios y un decremento en la superficie de los más húmedos. El modelo HADGEM es el que presenta mayores diferencias entre los dos RCP con mayores incrementos de la superficie con regímenes secos e intermedios y mayor disminución en la superficie con regímenes más húmedos. Para el modelo MPI no se presentan variaciones considerables entre los dos RCP. En general hay una tendencia marcada en el incremento del estrés hídrico en los suelos del país y un desplazamiento hacia regímenes más secos en todas las clases, con mayor proporción en los modelos HADGEM y MPI.

Palabras clave: Modelo de simulación Newhall, Sección Control de humedad, estrés hídrico, cambio climático.

ABSTRACT

In this study, the soil moisture regimes of Mexico were determined using the Newhall simulation model with the database generated at a scale of 1: 250 000, this for actual conditions and with an increase in the global average temperature of 1.5°C, with the RCPs of 4.5 and 8.5 W/m² using the Models GFDL, HADGEM and MPI. The *Aridic* soil moisture regime is in the 38.8% of the country's surface, less than 1% *Xeric*, 36.4% *Ustic* and 24.1% *Udic*. For the RCP of 4.5, in the HADGEM and MPI models almost in all the country it is expected that there will be a considerable increase in the moisture deficit in the soils. In the GFDL model, this tendency is presented, but in

smaller proportions. In the RCP 8.5 W/m², the GFDL model estimates a decrease in the area with the greatest moisture stress, with increases in the area of intermediate soil moisture regimes and a decrease in the surface area of the wettest ones. The HADGEM model shows the greatest differences in the two RCPs with greater increases in the surface area with dry and intermediate regimes and greater decrease in the surface with a more humid regime. For the MPI model there are no significant variations between the two RCPs. In general, there is a marked trend in the increase of water stress in the country's soils and a shift towards drier soil moisture regimes in all classes, with a greater proportion in the HADGEM and MPI models

Key words: Newhall simulation model, Moisture control section, moisture stress, climate change.

1. INTRODUCCIÓN

Para un aumento dado en la temperatura media global, los impactos climáticos regionales y las capacidades locales para adaptarse varían enormemente de una región a otra, como tal, existe un debate sobre qué nivel de cambio climático se considera peligroso. Los impactos locales proyectados para el calentamiento de 2°C están más allá de lo que muchas sociedades pueden enfrentar (Mahlstein et al., 2011), por lo que la comunidad científica ha pedido un nivel de calentamiento más bajo y el histórico Acuerdo de París respondió con un objetivo ambicioso de 1.5°C de incremento en la temperatura media global (UNFCCC, 2015). Limitar el calentamiento a 1.5°C reduciría la frecuencia proyectada de extremos de calor en un 50% de la asociada con el calentamiento a 2°C, y reduciría el derretimiento de las capas de hielo en los polos, lo que contribuye directamente a disminuir el riesgo de un aumento global del nivel del mar (Meinshausen et al., 2009; Schleussner et al., 2016). Sin embargo, solo hay un número limitado de estudios que han examinado los impactos asociados con el calentamiento de 1.5° C, y la mayoría de los estudios se han llevado a cabo en el contexto del calentamiento de 2° C (Wang et al., 2017)

Una de las principales funciones del suelo es la producción de biomasa al proporcionar agua, nutrientes, aire y la base física para el crecimiento de las plantas, lo que influye directamente en la cadena alimentaria. Todos los procesos de este sistema dependen en gran medida de la temperatura, la disponibilidad de agua y, especialmente, de las actividades biológicas, todo esto determina las características de los suelos y sus funciones para las sociedades humanas y el medio ambiente. Esta función está severamente amenazada por el cambio climático a través de los cambios en los procesos del suelo sus características, así como los bienes y servicios proporcionados por el suelo (Blum, 2005).

La humedad del suelo es el principal recurso natural de agua para la agricultura y la vegetación natural, y está directamente relacionado con la sequía agrícola (Heim, 2002). En consecuencia, los cambios en la humedad del suelo son vitales para evaluar los impactos del cambio climático en la producción agrícola y los ecosistemas naturales (Kim y Wang, 2012), considerando que el cambio climático es uno de los principales factores que influye en la humedad del suelo (Seneviratne et al., 2010). Varios estudios han investigado las respuestas de la humedad del suelo al cambio

climático reciente o futuro (Seager et al., 2013), sin embargo, debido a la escasez de mediciones in situ, la humedad del suelo ha sido simulada por modelos de circulación global (GCM) o modelos de superficie terrestre (LSM) en la mayoría de las investigaciones sobre el cambio climático (Seager et al., 2013).

Uno de los modelos usados para simular los cambios de la humedad del suelo asociada al cambio climático es el Modelo de Simulación Newhall (MSN). El modelo tiene varias limitantes, pero genera una aproximación mesoescalar del clima del suelo que es aplicable al estudio del suelo y la clasificación taxonómica (Smith, 1986). El MSN no requiere datos meteorológicos diarios intensos y completos en serie, sino más bien datos resumidos mensuales de la precipitación atmosférica y la temperatura del aire. Por el contrario, los modelos a escala de campo suelen ser más complejos desde el punto de vista computacional y generalmente requieren medidas adicionales de velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa y otros parámetros en sus subrutinas de evapotranspiración que no se adquieren fácilmente para estudios a nivel regional, particularmente en regiones con relieve complejo aisladas (Costantini et al., 2002).

Por las anteriores consideraciones, es relevante desarrollar un estudio para México en donde se estime a nivel regional el impacto de un incremento de 1.5°C en la temperatura media global en los regímenes de humedad de los suelos y hacer un análisis en las implicaciones para los diferentes ecosistemas del país. Para ello el Modelo de Simulación Newhall es una herramienta útil en el análisis del régimen de humedad actual de los suelos de México y el impacto del cambio climático en estos para las Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs) 4.5 y 8.5 W/m^2 para dicho incremento de temperatura media global con los Modelos Generales de Circulación Atmosférica GFDL, HADGEM y MPI.

2. MÉTODOS

El trabajo se dividió en dos partes, primero en determinar los regímenes de humedad del suelo con la base de datos de precipitación y temperatura media mensual de las 594 995 Áreas de influencia Climática (AIC) elaboradas por Gomez et al., (2011) a escala 1: 250 000. Segundo, en estimar las razones de cambio de la temperatura media del aire y de la precipitación media mensual para los escenarios de cambio climático asociados a un incremento de la temperatura media global de 1.5°C para el país y aplicarlas a las bases de datos promedio de las AIC y posteriormente determinar los regímenes de humedad del suelo para los escenarios de cambio climático.

El régimen de humedad del suelo se determinó utilizando el modelo de simulación de Newhall modificado por Van Wambeke (2000), que es programable y permite clasificar varios suelos al mismo tiempo. El modelo de simulación de Newhall considera que el suelo es un depósito de agua que se extiende desde la superficie hasta la profundidad de una capacidad de retención de agua disponible de 200 mm o el valor específico de acuerdo con el espesor del suelo. El agua puede ser incorporada al suelo a través de la lluvia; sin embargo, puede perderse por lixiviación o escorrentía si se excede la capacidad de retención del suelo o puede eliminarse por evapotranspiración. El régimen de humedad del suelo está determinado por las condiciones de humedad en la Sección de Control de Humedad (SCM) durante un período de un año o más.

Las condiciones de humedad del SCM, a su vez, se determinan a partir de los estados de humedad de todo el perfil de humedad del suelo. El modelo de computadora calcula tres estados de humedad del suelo por mes (seco, húmedo en algunas de sus partes y el húmedo en toda la SCM) a partir de la precipitación mensual y la Evapotranspiración potencial (PE) mensual estimada con el procedimiento de Thornthwaite (1948) utilizando datos sobre la temperatura promedio mensual y la duración de la insolación (Newhall y Berdanier, 1996).

Para los escenarios de cambio climático asociados a un incremento de la temperatura media global de 1.5°C, se consideraron los RCPs, de 4.5 y 8.5 W/m² y determinados con tres Modelos Generales de Circulación Atmosférica el GFDL, HADGEM y MPI.

3. RESULTADOS

La distribución geográfica de los regímenes actuales de humedad del suelo de México se muestra en la figura 1 y en la figura 2 se muestra la superficie para los diferentes regímenes de humedad de los suelos del país para el escenario base y con el incremento de 1.5°C para los RCP de 4.5 y 8.5 W/m² estimados con los tres modelos considerados en el estudio. Del total de la superficie del país (196 437 500 ha), el 38.8% de los suelos corresponde al régimen de humedad *Aridic*, de los cuales 7.1% corresponde al subgrupo *Extreme Aridic*, donde la sección de control de humedad del suelo está completamente seca durante todo el año. Se asocia principalmente con las áreas climáticas áridas e hiperáridas delimitadas por Gómez y Monterroso (2012). Dentro de este régimen, la mayor proporción (23.9%) de suelos fue el *Typic Aridic*, y el subgrupo *Weak Aridic* representa 7.8%; estos dos últimos subgrupos están asociados a áreas de clima semiárido.

El régimen *Xeric* representa menos del 1% del país y está dominado por el subgrupo *Dry Xeric* y se encuentra en el Noroeste de la península de Baja California.

El régimen *Ustic* representa el 36.4% del área y está asociado a los climas subhúmedos, de los cuales el 28.0% corresponde a los subgrupos *Tropustic*, ubicados principalmente al sur del trópico de Cáncer, donde la diferencia entre las temperaturas medias de verano e invierno es menos de 6°C. El 8.4% corresponde al subgrupo *Tempustic*, asociado principalmente a climas subhúmedos localizados al norte del trópico de Cáncer, cuyas temperaturas medias en verano e invierno oscilan 6°C o más. El 3.1% del área corresponde al subgrupo *Aridic Tropustic*, el más seco de este grupo, y se asocia con climas subhúmedos secos. Los subgrupos *Typic* de este régimen (*Typic Tropustic* y *Typic Tempustic*) representan el 17.4% del área en el país, estos subgrupos se asocian principalmente con los climas subhúmedos. Los subgrupos más húmedos de este régimen son *Udic Tropustic* y *Wet Tempustic*, que representan el 15.9% del área del país; estos regímenes están asociados con los climas subhúmedos húmedos y también los climas húmedos que tienen un período seco durante el año.

El régimen de humedad del suelo de *Udic* representa el 24.1% del territorio del país y está asociado con los climas húmedos. De esta área, el 9.9% corresponde a los subgrupos que experimentan un período corto de déficit de humedad (*Dry Tropudic* y *Dry Tempudic*). El subgrupo *Typic Udic* cubre 13.5% del área de México y se encuentra en regiones de clima húmedo con muy poco déficit de humedad durante

todo el año. Finalmente, las áreas donde el agua se mueve a través del suelo durante todo el año y nunca se congela son *Perudic*, representando el 0.7% del área del país.

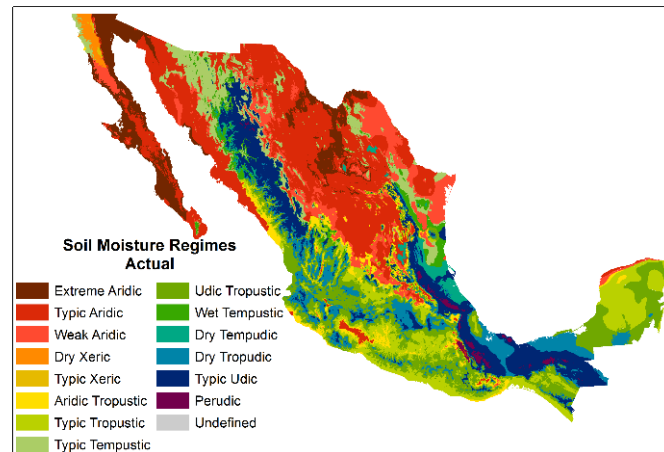


Fig. 1: Regímenes de humedad de los suelos de México para las condiciones promedio. Fuente: elaboración propia.

Para el RCP de 4.5, la superficie del país con regímenes de humedad del grupo *Aridic* se incrementa ligeramente en el modelo GFDL y un poco más para los modelos HADGEM y MPI, sin embargo, la proporción entre los subgrupos presenta mayor variación. En los modelos HADGEM y MPI la superficie del subgrupo más seco (*Extreme Aridic*) presenta incrementos de más del doble de la superficie original, esto como consecuencia de mayor déficit hídrico en las áreas de los otros dos subgrupos de este régimen.

Para el régimen *Xeric* de humedad del suelo se presenta una disminución en el modelo GFDL y HADGEM, mientras que en el modelo MPI no hay cambios.

En los regímenes de humedad del suelo intermedio (*Ustic*), se presenta un incremento en la superficie para los tres modelos. En los modelos HADGEM y MPI el comportamiento es similar, con incrementos en la superficie del subgrupo con mayor restricción de humedad (*Aridic Tropustic*), así como las del *Typic Tropustic*, mientras que en el modelo GFDL no hay cambios sustanciales en las áreas de estos subgrupos. Los regímenes de humedad del suelo *Udic* presentan una disminución en la superficie para los tres modelos, con mayor proporción en los modelos MPI y HADGEM.

Para los modelos HADGEM y MPI casi en la totalidad del país se prevé que se dé un incremento considerable en el déficit hídrico en los suelos y parte de las áreas de cada régimen de humedad se desplacen al régimen inmediato más seco. En el Modelo GFDL se presenta esta tendencia, pero en proporciones menores, por lo que es el modelo que estima los menores cambios en los regímenes de humedad de los suelos de México para este RCP.

En el RCP 8.5 W/m^2 , la superficie del país con regímenes secos (*Aridic*) aumenta en los tres modelos. Sin embargo, la superficie con el subgrupo de mayor déficit de humedad (*Extreme Aridic*) se incrementa en los modelos HADGEM y MPI, pero disminuye en el GFDL.

El régimen *Xeric* disminuye en el modelo GFDL, no cambia en el modelo HADGEM y aumenta en MPI.

Los regímenes de humedad del suelo *Ustic* presentan incrementos en la superficie del país en los tres modelos, con mayor proporción para HADGEM.

Los regímenes de humedad del suelo *Udic* presentan una disminución en la superficie para los tres modelos, con mayor proporción en el modelo HADGEM que reduce su superficie a la mitad.

Para el modelo GFDL en el RCP de mayor forzamiento radiativo se estima una disminución de la superficie con mayor estrés hídrico, con incrementos de la superficie de regímenes de humedad intermedios y un decremento en la superficie de los más húmedos. El modelo HADGEM es el que presenta mayores diferencias en los dos RCP con mayores incrementos de la superficie con regímenes secos e intermedios y mayor disminución en la superficie con régimen más húmedo. Para el modelo MPI no se presentan variaciones considerables entre los dos RCP:

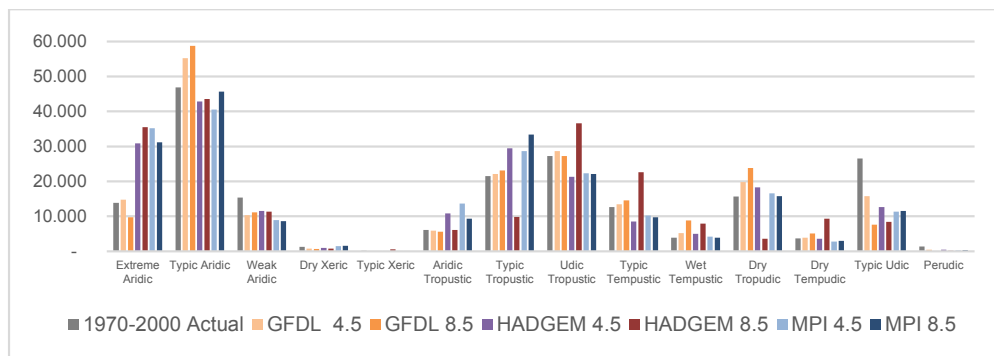


Fig. 2: Superficie (miles de hectáreas) de los regímenes de humedad de los suelos de México para las condiciones promedio y con el incremento de 1.5°C para los RCP de 4.5 y 8.5 W/m^2 estimados con los modelos GFDL, HADGEM y MPI. Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN

Es importante recalcar que estos resultados deben considerarse como proyecciones plausibles de los cambios en la temperatura y la precipitación en México. En general hay una tendencia marcada en el incremento del estrés hídrico en los suelos del país y un desplazamiento hacia regímenes más secos en todas las clases, con mayor proporción en los modelos HADGEM y MPI, particularmente más alta en el primero. En el modelo GFDL disminuye ligeramente la superficie más seca y aumenta la de humedad intermedia con disminuciones de las superficies más húmedas.

Se estiman incrementos de la temperatura para todo el país, con diferencias en las distintas regiones. Para el RCP 4.5, el modelo con los menores incrementos es el GFDL con valores de 1.1 a 1.3°C en el sur-sureste y de 1.9 a 2.2°C en el Norte del país. El modelo HADGEM estima los mayores incrementos de temperatura de los tres modelos con valores de 1.4°C en la parte sur de la Península de Baja California y de 2.1 a 2.4°C en el Norte del país. Para el modelo MPI el menor incremento es para la

parte sur de la Península de Baja California con valores de 1.2°C y los mayores son también en el Norte del país con valores de 1.8 a 2.1°C. Para el RCP de 8.5 en los tres modelos los incrementos son mayores que en el de menor forzamiento radiativo. En el modelo GFDL el menor incremento es 1.7 a 1.9°C para la misma región del RCP 4.5 y los mayores también en el Norte del país con valores que van de 2.5 a 2.7°C. El modelo HADGEM también reporta los mayores incrementos en la temperatura con valores de 1.8°C en la parte sur de la Península de Baja California y de 2.7 a 3.2°C en el norte del país con 2.7 a 3.2°C. En el modelo MPI los menores incrementos son también para la parte sur de la Península de Baja California con valores de 1.40°C y mayores en el Norte del país con 2.2 a 2.4°C.

Las anomalías en la precipitación para el modelo GFDL en ambos RCP se estima que serán de incremento en la mayor parte del país, con excepción del norte centro y noreste del país en donde se estiman reducciones en la precipitación, los incrementos y decrementos son mayores en el RCP de mayor forzamiento radiativo. Para el modelo HADGEM se estiman reducciones en la precipitación en prácticamente todo el país con excepción de la parte sur de la península de Baja California y la disminución será mayor en el RCP 8.5. Para el modelo MPI, se estiman incrementos en la precipitación en ambos RCP para el centro del país y el sureste y decrementos para el resto del país, también los incrementos estimados y decrementos son mayores para el RCP de 8.5, sin embargo, el aumento en la precipitación es menor a los estimados por el modelo GFDL para estas zonas.

Varios estudios han investigado las respuestas de la humedad del suelo ante el cambio climático (Seager et al., 2013; Yang et al., 2011; Peng et al., 2017) y los resultados han revelado que la humedad media anual del suelo se reduciría en algunas regiones y en otras se incrementaría. Estudios de simulación con Modelos Globales de Circulación Atmosférica en los Estados Unidos de América estimaron que la humedad media anual del suelo se reduciría en el futuro cercano en los estados fronterizos con México (Seager et al., 2013; SWCS, 2003), lo que es concordante con los resultados de este estudio.

Los impactos físicos asociados con el cambio climático incluyen regímenes de precipitación alterados, un fuerte aumento en los extremos de calor, mayores riesgos de sequía y el aumento de la aridez (Reyer et al., 2017) situaciones que aumentarían el riesgo de erosión eólica (Asensio et al., 2015). Además, se prevé un aumento de la intensidad media de los ciclones tropicales que pueden afectar al país, así como de la frecuencia de las tormentas más intensas (INE-SEMARNAT, 2012). Esta tendencia hacia la precipitación que ocurre en eventos más extremos debe aumentar la erosión del suelo, ya que la mayoría de las pérdidas de suelo son causadas por tormentas severas e infrecuentes (Edwards y Owens, 1991). Los estudios, como el que aquí se presenta, que revelen los impactos del cambio climático en cambios específicos de las propiedades del suelo y que indiquen donde se presentarán estos cambios son un avance en el conocimiento de la vulnerabilidad de los suelos al cambio climático (Blum, 2005), estas estimaciones son vitales para establecer los impactos en la productividad agrícola y de los ecosistemas naturales (Kim y Wang, 2012; Seager et al., 2013).

Estos resultados proporcionan una herramienta indicativa, para ser utilizada junto con el conocimiento de otros factores del medio natural y de sistemas de manejo, al

considerar las posibles limitaciones climáticas futuras y las oportunidades para la conservación y cambio ecológico y también una base para desarrollar estrategias de adaptación climática que incluyen prácticas que favorecen el almacenamiento de la humedad del suelo y eviten su pérdida.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, particularmente al Centro de Investigación de Recursos Naturales y Medio Ambiente por el apoyo financiero y logístico para la realización del Proyecto “Régimen de humedad de los suelos de México considerando un incremento de la temperatura media global de 1.5°C”, del cual forma parte este trabajo.

REFERENCIAS

- Asensio, C.; F.J. Lozano, E. Ortega, Z. Kikvidze. 2015. Study on the effectiveness of an agricultural technique based on aeolian deposition, in a semiarid environment. *Environmental Engineering and Management Journal* 14 (5), 1143-1150.
- Blum, W.E.H. 2005. Soil and climate change. 2005. *J. Soils & Sediments* 5 (2), 67-68. DOI: <http://dx.doi.org/10.0165/jss2005.02.006>.
- Costantini, E.A.C., F. Castelli, S. Raimondi, and P. Lorenzoni. 2002. Assessing soil moisture regimes with traditional and new methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1889–1896. doi:10.2136/sssaj2002.1889
- Edwards, W.M., L.B. Owens. 1991. Large storm effects on total soil erosion. *J. Soil and Water Conservation* 46 (1), 75-78
- Gómez-Díaz, J., A. Monterroso-Rivas, J. Tinoco-Rueda, M. Toledo-Medrano, C. Conde-Alvarez, & C. Gay-García. 2011. Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera*, 24(1), 31–52.
- Gómez, J.D., y A.I. Monterroso. 2012. Actualización de la delimitación de las zonas áridas, semiáridas y sub-húmedas secas de México a escala regional. Reporte final de proyecto de investigación Fondo SEMARNAT-CONACYT. Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo
- Heim, R.R., 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 83, 1149–1165.
- INE-SEMARNAT. 2012. Quinta Comunicación Nacional Ante la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México, D.F.
- Kim, Y., G. Wang. 2012. Soil moisture-vegetation-precipitation feedback over North America: its sensitivity to soil moisture climatology. *J. Geophys. Res. Atmos.* 117, D18115. doi:10.1029/2012JD017584
- Mahlstein, I., R. Knutti, S. Solomon, and R.W. Portmann. 2011. Early onset of significant local warming in low latitude countries. *Environ. Res. Lett.* 6, 1-6. doi:10.1088/1748-9326/6/3/034009

- Meinshausen, M., N. Meinshausen, W. Hare, S.C.B. Raper, K. Frieler, R. Knutti, D.J. Frame, and M.R. Allen. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. *Nature*, 458, 1158–1162, doi:10.1038/nature08017, 2009.
- Newhall, F., and C.R. Berdanier. 1996. Calculation of soil moisture regimes from the climatic record. Soil Survey Investigations Report No. 46, National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service, Lincoln, NE.
- Peng, F., M. Mub, G. Sun. 2017. Responses of soil moisture to climate change based on projections by the end of the 21st century under the high emission scenario in the ‘Huang–Huai–Hai Plain’ region of China. *Journal of Hydro-environment Research* 14, 105–118
- Reyer, C.P.O., S. Adams, T. Albrecht, F. Baarsch, A. Boit, N.C. Trujillo, M. Carlsburg, D. Coumou, A. Eden, E. Fernandez, F. Langerwisch, R. Marcus, M. Mengel, D. Mira-Salama, M. Perette, P. Pereznieta, A. Rammig, J. Reinhardt, A. Robinson, M. Rocha, B. Sakschewski, M. Schaefer, C.F. Schleussner, O. Serdeczny, K. Thonicke. 2017. Climate change impacts in Latin America and the Caribbean and their implications for development. *Reg. Environ. Change* 17, 1601-1621 doi:10.1007/s10113-015-0854-6
- Schleussner, C. F., T.K. Lissner, E.M. Fischer, J. Wohland, M. Perrette, A. Golly, J. Rogelj, K. Childers, J. Schewe, K. Frieler, M. Mengel, W. Hare, and M. Schaeffer. 2016. Differential climate impacts for policy relevant limits to global warming: the case of 1.5°C and 2°C. *Earth Sys. Dynam.* 7, 327-351. doi:10.5194/esd-7-327-2016
- Seager, R., M. Ting, C. Li, N. Naik, B. Cook, J. Nakamura, H. Liu. 2013. Projections of declining surface-water availability for the southwestern United States. *Nat. Clim. Change* 3, 482-486
- Seneviratne, S.I., T. Corti, E.L. Davin, M. Hirschi, E.B. Jaeger, I. Lehner, B. Orlowsky, A.J. Teuling. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth Sci. Rev.* 99, 125-161.
- Smith, G.D. 1986. The Guy Smith interviews: Rationale for concepts on soil taxonomy. SMSS Technical Monogr. 11. Cornell University, Ithaca, NY.
- SWCS. 2003. Conservation implications of climate change: soil erosion and runoff from cropland. Soil and Water Conservation Society. Ankeny, Iowa, USA.
- Thorntwaite, C.W. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geogr. Rev.* 38 (1), 55-94. Doi:10.2307/210739
- UNFCCC: Decision 1/CP.21. The Paris Agreement, 2015.
- Van Wambeke, A. R. 2000. The Newhall Simulation Model for estimating soil moisture & temperature regimes. Department of Crop and Soil Sciences. Cornell University, Ithaca, NY.
- Wang, G. W. Cai, B. Gan, L. Wu, A. Santoso, X. Lin, Z. Chen, and M. J. McPhaden. 2017. Continued increase of extreme El Niño frequency long after 1.5°C warming stabilization. *Nature Climate Change* 7, 568-573 doi: 10.1038/NCLIMATE3351
- Yang, K., B. Ye, D. Zhou, B. Wu, T. Foken, J. Qin, Z. Zhou. 2011. Response of hydrological cycle to recent climate change in the Tibetan Plateau. *Clim. Change* 109, 517-534