

## **Cambios esperados al uso del suelo en México, según escenario de cambio climático A1F1\***

### **Expected changes in land use in Mexico, according to the climate change scenario A1F1**

**Víctor Manuel Rodríguez Moreno<sup>1§</sup>, José Ariel Ruíz-Corral<sup>2</sup>, Guillermo Medina- García<sup>3</sup>, César Valenzuela Solano<sup>4</sup>, Jorge Ernesto Ruvalcaba Mauricio<sup>1</sup> y Arturo Álvarez Bravo<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Campo Experimental Pabellón-INIFAP. Carretera Ags.-Zac. km 32.5, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes. CP. 20060. Tel. 01(800) 088222, ext. 82525  
<sup>2</sup>Campo Experimental Centro Altos de Jalisco-INIFAP. Carretera Tepatitlán-Lagos de Moreno km 8, Jalisco, México. CP. 47600. Tel. 01(800) 088222, ext. 84503 (ruiz.ariel@inifap.gob.mx). <sup>3</sup>Campo Experimental Zacatecas-INIFAP. Carretera Zacatecas-Fresnillo km 24.5, Calera de Víctor Rosales, Zacatecas, México. CP 98500. Tel. 01(800) 088222, ext. 82306. (medina.guillermo@inifap.gob.mx). <sup>4</sup>Sitio Experimental Costa de Ensenada-INIFAP. Calle del Puerto núm. 375-23, Fracc. Playa Eda. Ensenada, BC. CP. 22880, Tel. 01(800) 0882222, ext. 81951. (valenzuela.cesar@inifap.gob.mx). <sup>5</sup>Campo Experimental Pabellón-INIFAP. Carretera Ags.-Zac. km 32.5, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. CP. 20060. Tel. 01(800) 088222, ext. 8253. (jorge.ernesto.mauricio@gmail.com). <sup>§</sup>Campo Experimental Santiago Ixcuintla-INIFAP. Carretera internacional México-Nogales km 6, Santiago Ixcuintla, Nayarit, México. CP. 63600. Tel. 01(800) 0882222, ext. 84420. <sup>§</sup>Autor para correspondencia: rodriguez.victor@inifap.gob.mx.

## **Resumen**

Embebidos en un esquema robusto de análisis de datos espaciales y utilizando el escenario de cambio climático A1F1 año 2050 como condición de frontera, se generaron e interpretaron las superficies respuesta de semivariogramas de seis índices de humedad (lluvia), el rango anual de temperatura, y los índices de salinidad y compactación del suelo. Se obtuvieron evidencias de afectaciones regionales contrarias a lo descrito por el cambio climático global con relación a la no presencia de eventos extremos de lluvia, pero sí concordantes en aumento de temperatura. Se documentó la influencia en la expresión del clima con referencia a la proximidad de la línea de costa. Se encontró que los ecosistemas abiertos árido y semiárido son más vulnerables a las condiciones declaradas, con la consecuente fragmentación del mismo y un probable aumento en su frontera espacial, desapareciendo algunas especies con menor capacidad de adaptación e incorporándose nuevas a las comunidades bióticas.

## **Abstract**

Embedded in a robust scheme for spatial data analysis and using the climate change scenario A1F1 year 2050 as a condition of border, were generated and interpreted the response surfaces of semivariograms of six indices of humidity (rain), the annual range of temperature, and the indices of salinity and soil compaction. Were obtained evidence of regional effects contrary to what is described by the global climate change with regard to the non-presence of extreme events of rain, but consistent in temperature increase. The influence on the expression of the climate with reference to the proximity of the coast line was outlined. It was found that the open arid and semi-arid ecosystems as the most vulnerable to stated conditions, with the consequent fragmentation of the same and a likely increase in the space frontier, disappearing some species with less capacity of adaptation and new to the biotic communities.

\*Recibido: junio de 2017

Aceptado: septiembre de 2017

**Palabras clave:** covariables, kriging, seguridad alimentaria, semivariograma.

**Keywords:** covariables, food security, kriging, semivariogram.

## Introducción

De acuerdo con el IPCC (2013) los escenarios de cambio climático son descripciones coherentes y consistentes de como el sistema climático de la Tierra puede cambiar en el futuro. El escenario A1F1 se agrupa en la familia de escenarios y línea evolutiva A1. Describe un mundo futuro caracterizado por su énfasis tecnológico, con uso de fuentes de energía intensivas de origen fósil. El crecimiento global de la población y el consecuente aumento en la demanda de alimentos, así como el modelo(s) actuales de producción de alimentos, son indicadores de la necesidad de mejorar el rendimiento de los cultivos, manejar mejor el cada vez más escaso recurso hídrico, y tomar conciencia del agotamiento de la capacidad productiva del suelo.

La extensión territorial de México y la influencia que las masas oceánicas y el georelieve, tienen sobre la expresión climática y el uso del suelo, fundamentan la necesidad de realizar estudios sobre cómo influyen en los procesos de cambio de uso del suelo. Según Pielke *et al.* (2006) los cambios en el paisaje alteran el patrón espacial de lluvias convectivas. Un efecto similar se ha atribuido a algunos factores fisiográficos como elevación, pendiente, exposición, y rugosidad del terreno, asociados mayormente con el flujo radiante, la capacidad de retención de humedad del suelo, la estacionalidad de los ciclos de producción, la acumulación de unidades calor y unidades frío y el índice de área foliar.

La pendiente del suelo favorece la velocidad de escorrentía, así como la pérdida del suelo por erosión hídrica, y el afloramiento de sales. Las exposiciones sur reciben una mayor tasa de energía radiante lo cual genera condiciones ambientales más cálidas, y por lo general más secas y con la tasa de evapotranspiración más alta. De acuerdo con NOAA (2017) la cobertura del suelo se refiere a cuánta superficie de una región está protegida por bosques, humedales, pastizales, agrícola, y otros tipos de tierra y agua. El uso del suelo muestra como la población hace uso del espacio geográfico - bien para desarrollo, conservación, o ambos. La perspectiva de cambios en el uso del suelo se atribuye mayormente a la demanda de alimentos y a cambios en la dieta de la población.

## Introduction

According to the IPCC (2013) climate change scenarios are coherent and consistent descriptions of how the Earth's climate system may change in the future. The A1F1 scenario is grouped into the scenario family and evolutionary line A1. Describes a future world characterized by its technological emphasis, with the use of intensive energy sources of fossil origin. Global population growth and the consequent increase in food demand, as well as the current model(s) of food production, are indicators of the need to improve crop yields, better manage each time more scarce water resource, and become aware of the exhaustion of the productive capacity of the soil.

The territorial extension of Mexico and the influence that the oceanic masses and the georelieve have on the climatic expression and the use of the ground, base the necessity to realize studies on how they influence the processes of change of land use. According to Pielke *et al.* (2006) changes in the landscape alter the spatial pattern of convective rains. A similar effect has been attributed to some physiographic factors such as elevation, slope, exposure, and terrain roughness, associated mainly with radiant flow, soil moisture retention capacity, seasonality of production cycles, accumulation of units heat and cold units and leaf area index.

The slope of the soil favors the runoff velocity, as well as the loss of soil by water erosion, and the upwelling of salts. Southern exposures receive a higher rate of radiant energy which generates warmer, generally drier, and higher evapotranspiration rates. According to NOAA (2017) land cover refers to how much area of a region is protected by forests, wetlands, grasslands, agriculture, and other types of land and water. Land use shows how the population makes use of geographic space-either for development, conservation, or both. The prospect of changes in land use is largely attributed to the demand for food and changes in the population's diet.

Considered as the largest reservoir of biological diversity, a healthy soil with sufficient organic carbon content is essential to sustain food production, to ensure continuity in the recharge of water to the aquifer, and to regulate gas exchange processes towards the atmosphere. The stability of the soil is compromised by the salt content as it has been found strongly associated with

Considerado como el mayor reservorio de diversidad biológica, un suelo sano, con suficiente contenido de carbono orgánico, es esencial para sustentar la producción de alimentos, asegurar la continuidad en la recarga de agua al acuífero, así como de regular los procesos de intercambio de gases hacia la atmósfera. La estabilidad del suelo está comprometida por el contenido de sales pues se le ha encontrado fuertemente asociada con su tasa de degradación física, química y biológica. Desde el punto de vista sustentable, este proceso dinámico restringe la capacidad del ecosistema de proveer bienes y servicios y de asegurar su funcionalidad en un periodo de tiempo (FAO, 2015).

Según CONAFOR (2010) los procesos de degradación del bosque son más rápidos que los procesos de deforestación. La degradación del suelo en cualquiera de sus formas es un problema global y cuya consecuencia inmediata es evidente en el decremento en la capacidad productiva del suelo agrícola. La tasa de acidificación del suelo, aunque es un proceso natural, puede fomentarse a consecuencia de la implementación de inadecuadas prácticas de producción, por ejemplo, remoción de los residuos de cosecha, aumento en el uso de fertilizantes químicos, o uso inadecuado del agua de riego.

Estas prácticas en conjunto son las causas principales de que en el suelo disminuya el contenido de carbono orgánico, modifique su estructura haciéndolo más vulnerable a erosión eólica e hídrica, aumento en el contenido de sales y a la reducción o hasta casi desaparición de la cobertura vegetal. Según el programa Especial de Cambio Climático (PECC, 2014) las futuras condiciones climáticas están asociadas a variaciones en la tasa de degradación del suelo, el incremento en salinidad de las áreas irrigadas, el incremento en cobertura vegetal por incendios, sequía y deslaves, cambio en los sistemas de producción y dinámica de plagas y enfermedades, y disponibilidad de agua.

La salinidad del suelo es un factor limitante a la producción de biomasa en los ecosistemas abiertos y un exceso en el suelo de uso agrícola ocasiona una disminución en el rendimiento de los cultivos. Según Richards *et al.* (1954) un suelo salino es aquel que tiene un valor de conductividad eléctrica (CE) mayor a  $4 \text{ dS m}^{-1}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Las sales más comunes son: cloruro y sulfato de sodio, calcio y magnesio, siendo el sodio y el calcio los iones dominantes.

Las técnicas de producción aplicadas en los sistemas de producción agrícola, forestal y pecuario están intrínsecamente ligadas a los efectos del cambio climático. La perspectiva

its rate of physical, chemical and biological degradation. From a sustainable point of view, this dynamic process restricts the ecosystem's ability to provide goods and services and ensure their functionality over a period of time (FAO, 2015).

According to CONAFOR (2010), forest degradation processes are faster than deforestation processes. The degradation of the soil in any of its forms is a global problem and whose immediate consequence is evident in the decrease in the productive capacity of the agricultural soil. The rate of soil acidification, although it is a natural process, may be encouraged as a result of inadequate production practices, e.g. removal of crop residues, increased use of chemical fertilizers, or inadequate water use irrigation.

These practices as a whole are the main causes of the decrease in the organic carbon content in the soil, modify its structure making it more vulnerable to wind and water erosion, increase in the content of salts and the reduction or even disappearance of the vegetation cover. According to the Special Climate Change Program (PECC, 2014) future climatic conditions are associated with variations in soil degradation rate, increase in salinity of irrigated areas, increase in vegetation cover by fire, drought and landslides, change in the production systems and dynamics of pests and diseases, and water availability.

Soil salinity is a limiting factor to the production of biomass in open ecosystems and an excess in the soil of agricultural use causes a decrease in the yield of the crops. According to Richards *et al.* (1954) a saline soil is one that has an electrical conductivity value (EC) greater than  $4 \text{ dS m}^{-1}$  at  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . The most common salts are: sodium chloride and sulfate, calcium and magnesium, with sodium and calcium being the dominant ions.

Production techniques applied in agricultural, forestry and livestock production systems are intrinsically linked to the effects of climate change. The future perspective of water use where the current scenario is that aquifers have a deficit between recharge/extraction, more frequent and intense occurrence of periods of drought, as well as extreme events of rain, wind and temperature, cause severe damages to crops and even completely disinherit them.

In this study, it is proposed to jointly use databases of soil salinity and compaction of satellite origin, to simulate their perspective of change according to the expected climatology for the year 2050 of the most catastrophic climate change scenario where the use of fossil fuels is favored. Through the

futura del uso del agua donde el panorama actual es que los acuíferos tienen un déficit entre recarga/extracción, aparición más frecuente e intensa de periodos de sequía, así como eventos extremos de lluvia, viento y temperatura, son causales de daños severos a los cultivos e incluso siniestrarlos por completo.

En este estudio, se propone utilizar conjuntamente bases de datos de salinidad del suelo y compactación de origen satelital, para simular su perspectiva de cambio según la climatología esperada para el año 2050 del escenario de cambio climático más catastrofista donde se privilegia el uso de energías fósiles. A través del análisis interpretativo de las superficies de respuesta, se pretende, por un lado, diferenciar si las prácticas de manejo en los sistemas de producción pueden acelerar el deterioro del suelo, y por el otro evidenciar la influencia de los cambios naturales o inducidos en el uso del suelo en ecosistemas de gran escala como el árido y semiárido.

## Materiales y métodos

Se utilizaron tres fuentes de datos en formato matricial (grid), el índice de compactación (IC) del suelo y el índice de salinidad del suelo (IS), ambas bases de datos resultantes del proyecto land degradation assessment in drylands (LADA) por sus siglas en inglés - Blancalani *et al.* (2013), y el escenario de cambio climático A1F1 según el modelo HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, versión 3) para el año 2050. La base de datos LADA es  $5 \times 5$  minutos de arco ( $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$ ); la cobertura de México se alcanza con 24 958 centroides. Utilizando la técnica de kriging y el modelo de elevación con resolución a 90 m, se interpolaron los datos de los índices de suelo y se obtuvieron las superficies de respuesta respectivas (Figura 1).

De acuerdo con el valor del IC, se propusieron cuatro clases: clase 1 (muy baja -  $\text{IC} < 5$ ); el espacio poroso permite el paso de agua y el movimiento horizontal y vertical de los gases. Clase 2 (Ligera -  $5 < \text{IC} < 10$ ), el horizonte superior es firme -húmedo- y el espacio poroso es de tamaño fino con unas cuantas vacuolas grandes. Clase 3 (moderada -  $10 < \text{IC} < 15$ ); suelo de consistencia firme y moderada presencia de poros, pero muy pocos grandes. Clase 4 (severa -  $\text{IC} > 15$ ), estructura masiva y consistencia de firme a extrema y muy poco o ningún espacio poroso. El IS se clasificó según la propuesta de Shannon (1997) en cuatro categorías. Suelos

interpretative analysis of the response surfaces, it is intended, on the one hand, to differentiate if the management practices in the production systems can accelerate the deterioration of the soil, and on the other to evidence the influence of the natural or induced changes in land use in large-scale ecosystems such as the arid and semi-arid.

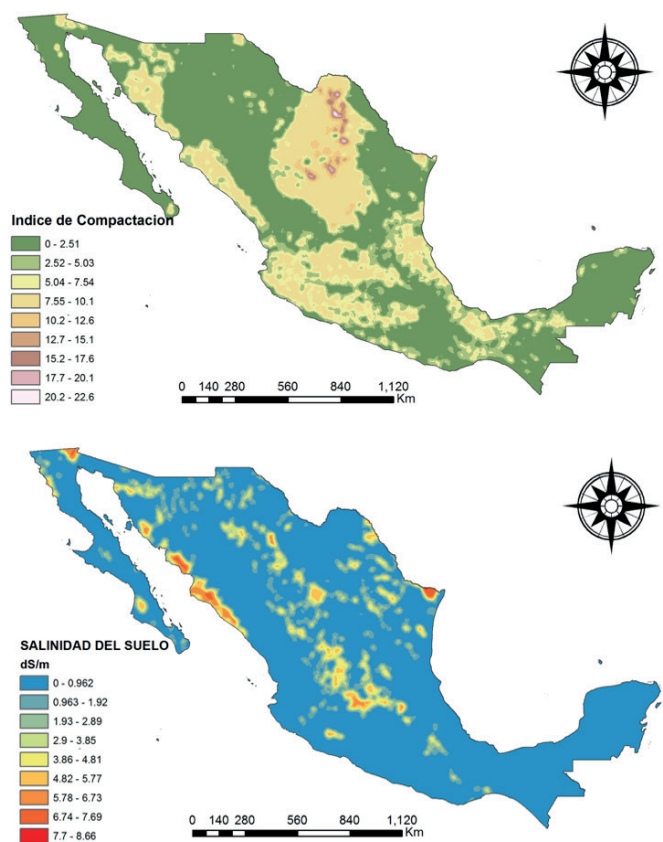


Figura 1. Índices LADA de compactación del suelo (izquierda) y salinidad (derecha).

Figure 1. LADA indices of soil compaction (left) and salinity (right).

## Materials and methods

Three data sources were used in grid format (grid), soil compaction index (IC) and soil salinity index (IS), both databases resulting from the project land degradation assessment in drylands (LADA), Blancalani *et al.* (2013), and the A1F1 climate change scenario according to HadCM3 (Hadley Center Coupled Model, version 3) by 2050. The LADA database is  $5 \times 5$  minutes arc ( $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$ ); the coverage of Mexico is reached with 24 958 centroides.

“no salinos” con conductividad eléctrica (CE)  $<4 \text{ dS m}^{-1}$ . Suelos “moderadamente salinos”,  $>4 \text{ CE} < 16 \text{ dS m}^{-1}$ . Suelos “altamente salinos”,  $\text{CE} > 16 \text{ dS m}^{-1}$ .

Los mapas temáticos HadCM3 (Collins *et al.*, 2001) son de  $2.5^\circ \times 3.75^\circ$  (latitud por longitud) de resolución espacial. Esto corresponde a una distribución regular de 3 687 centroides, con los cuáles se cubre la plataforma continental del país. En el escenario A1F1 a 2050 (uso intensivo de energías fósiles - fossil fuel intensive), se proyecta un crecimiento económico muy rápido, disminución en la tasa de nacimientos, y adopción rápida de nuevas y más eficientes tecnologías. En este escenario la población prefiere más su bienestar personal y tiene poco interés en el cuidado del ambiente. Los valores globales esperados para el escenario, así como los años previos, se muestran en el Cuadro 1.

Using the kriging technique and the elevation model with resolution at 90 m, the soil index data were interpolated and the respective response surfaces were obtained (Figure 1).

According to the IC value, four classes were proposed: class 1 (very low -  $\text{IC} < 5$ ); the porous space allows the passage of water and the horizontal and vertical movement of the gases. Class 2 (Light -  $>5 \text{ IC} < 10$ ), the upper horizon is firm - wet - and the pore space is fine in size with a few large vacuoles. Class 3 (moderate -  $>10 \text{ IC} < 15$ ); soil of firm consistency and moderate presence of pores, but very few. Class 4 (severe -  $\text{IC} > 15$ ), massive structure and consistency from firm to extreme and very little or no pore space. The IS was classified according to the proposal of Shannon (1997) in four categories. Soils “non-saline” with electrical conductivity (CE)  $<4 \text{ dS m}^{-1}$ . Soils “moderately saline”,  $>4 \text{ CE} < 16 \text{ dS m}^{-1}$ . Soils “highly saline”,  $\text{CE} > 16 \text{ dS m}^{-1}$ .

**Cuadro 1. Valores frontera del escenario A1F1 2050 y escenarios anteriores.**

**Table 1. Border values of the A1F1 2050 scenario and previous scenarios.**

	Unidad	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
CF CO <sub>2</sub>	Gt C	5.99	6.9	8.65	11.19	14.61	18.66	23.1
Otro CO <sub>2</sub>	Gt C	1.11	1.07	1.08	1.55	1.57	1.31	0.8
CO <sub>2</sub> Total	Gt C	7.1	7.97	9.73	12.73	16.19	19.97	23.9
CH <sub>4</sub> total	Mt	310	323	359	416	489	567	630
N <sub>2</sub> O total	Mt	6.7	7	8	9.3	10.9	12.8	14.5
SO <sub>x</sub> total	Mt	70.9	69	80.8	86.9	96.1	94	80.5
CFC/HFC/HCFC	Mt eq C	1672	883	791	337	369	482	566
PFC	Mt eq C	32	25	31	43	61	77	89
SF <sub>6</sub>	Mt eq C	38	40	43	48	66	99	119
CO	Mt eq C	879	877	1020	1204	1436	1726	2159
COVDM	Mt	139	141	166	192	214	256	322
O <sub>3</sub> tropósfera	DU		34	35.8	38.4	41.5	45.1	49.6
NO <sub>x</sub>	Mt	31	32	40	50	63	77	95

CF= combustible de origen fósil; CO<sub>2</sub>= dióxido de carbono; CH<sub>4</sub>= metano; N<sub>2</sub>O= óxido nitroso; SO<sub>x</sub>= óxido de azufre; CO= monóxido de carbono; COVDM= compuestos orgánicos volátiles distintos del metano; SF<sub>6</sub>= hexafluoruro de azufre; O<sub>3</sub>= ozono; PFC= perfluorcarbonos; CFC/HFC/HCFC= clorofluorcarbonos/hidroclorofluorcarbonos/hidrofluorcarbonos; DU= unidades Dobson, cantidad equivalente a  $2.7 \times 10^{20}$  moléculas de ozono por cada metro cuadrado; Gt C= gigatonelada de carbono; Mt= megatonelada; Mt eq C= megatonelada equivalente de carbono.

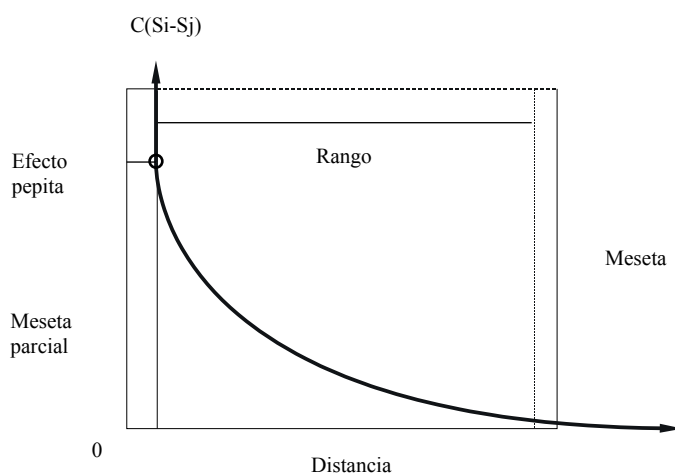
De la Figura 1, la interpretación general del IC es que va de muy leve (menor a 5), a severa (mayor que 20), las áreas más compactadas son las áreas agrícolas. El IS, va desde suelos no salinos hasta moderadamente salinos, es en las regiones agrícolas donde se observan los extremos altos de ambos índices y se asume que son a consecuencia de las prácticas de producción y al manejo del agua de riego.

The HadCM3 maps (Collins *et al.*, 2001) are  $2.5^\circ \times 3.75^\circ$  (latitude by longitude) of spatial resolution. This corresponds to a regular distribution of 3 687 centroids, with which the continental shelf of the country is covered. In the scenario A1F1 to 2050 (intensive use of fossil fuel intensive), economic growth is projected very fast, declines in the birth rate, and rapid adoption of new and more efficient

El escenario A1FI agrupa hasta veintiún índices ambientales. De entre éstos se eligieron siete, que consideramos son de mayor relevancia para evaluar la respuesta del uso del suelo y que abordan su dinamismo desde las perspectivas agrícola, pecuaria y forestal: 1) rango anual de temperatura; 2) lluvia diaria en el cuatrimestre más húmedo; 3) lluvia diaria en el mes más seco; 4) lluvia diaria en el cuatrimestre más seco; 5) lluvia diaria en el mes más frío; 6) lluvia diaria en el semestre más frío; y 7) lluvia diaria en el mes más húmedo.

De acuerdo con George *et al.* (2001) las lluvias determinan el inicio y el final de la temporada de crecimiento de los cultivos, mientras que la temperatura, la productividad del ecosistema, el rendimiento de los cultivos, y en gran medida es responsable del afloramiento de sales en el suelo. En el criterio de selección el factor humedad, asociada a los eventos de lluvia y la temperatura fueron los referentes, pues representan por un lado la estabilidad climática, la biodiversidad y la conformación de las comunidades bióticas en los ecosistemas abiertos, el manejo y uso del agua en los sistemas de producción agrícola, la sustentabilidad de los ecosistemas, y la conservación del suelo.

Un estudio de esta escala sobre la variabilidad/continuidad espacial de índices climáticos, necesariamente demanda aplicar técnicas de análisis espacial. Se obtendrá el semivariograma de cada índice para evaluar la correlación espacial de las variables y covariables en función de la distancia y simulación estocástica. Según Bohling (2005) al promediar las diferencias al cuadrado de la variable esta tiende a filtrar la influencia de la media variante, y de acuerdo con Rasmussen y Williams (2006) convierte a la matriz de covarianza en un elemento crucial como predictor (Figura 2).



**Figura 2. Representación típica de la función de covarianza.**  
**Figure 2. Typical representation of the covariance function.**

technologies. In this scenario the population prefers more their personal well-being and has little interest in the care of the environment. The expected global values for the scenario, as well as the previous years, are shown in Table 1.

From Figure 1, the general interpretation of the IC is from very mild (less than 5), to severe (greater than 20), the most compacted areas are agricultural areas. The IS ranges from non-saline to moderately saline soils, it is in agricultural regions where the high extremes of both indices are observed and are assumed to be due to production practices and irrigation water management.

The A1FI scenario groups up to twenty-one environmental indices. Among these, seven were chosen, which we consider to be of greater relevance for evaluating the response of land use and which address its dynamism from the agricultural, livestock and forestry perspectives: 1) annual temperature range; 2) daily rainfall in the wettest quarter; 3) daily rain in the driest month; 4) daily rainfall in the driest quarter; 5) daily rain in the coldest month; 6) daily rainfall in the coldest semester; and 7) daily rain in the wettest month.

According to George *et al.* (2001) the rains determine the beginning and end of the growing season of crops, while temperature, ecosystem productivity, crop yield, and to a large extent is responsible for outcrops of salts in the soil. In the selection criterion, the humidity factor, associated with rainfall events and temperature were the referents, since they represent on the one hand the climatic stability, biodiversity and the conformation of the biotic communities in the open ecosystems, the management and use of the water in agricultural production systems, the sustainability of ecosystems, and soil conservation.

A study of this scale on spatial variability/continuity of climatic indices necessarily demands the application of spatial analysis techniques. The semivariogram of each index will be obtained to evaluate the spatial correlation of variables and covariables as a function of distance and stochastic simulation. According to Bohling (2005), averaging the squared differences of the variable tends to filter the influence of the mean variant, and according to Rasmussen and Williams (2006) makes the covariance matrix a crucial element as a predictor (Figure 2).

The semivariogram and the resulting response surface show the similarity between centroids (sampling sites), assuming that the points with input  $x$  and that are closer to each other,

El semivariograma y la superficie de respuesta resultante muestra la similaridad entre centroides (sitios de muestreo) ajustándose al supuesto de que los puntos con entrada  $x$  y que están más cercanos entre sí, son más probables que sean parecidos a su valor de respuesta  $y$ . Se reconocen tres componentes (Figura 2): sill, range y nugget effect; meseta, rango y efecto pepita. El valor meseta tiene dos componentes: una discontinuidad al origen, a menudo llamado efecto pepita, y uno parcial, el valor de meseta es aquel donde el valor de la semivarianza deja de ser representativo. Rango es la distancia en la cual la curva del modelo es igual a meseta. Con respecto a la función de covarianza, se le considera una función escalada de la correlación (Figura 2).

Para explorar el efecto conjunto de los índices del suelo y los de humedad y temperatura del escenario A1F1, se obtuvieron las superficies de respuesta por el método de co-kriging. Esta técnica geostatística interpola los datos punto de la variable (mapeo y curvas) de un área. No obstante que es similar a otros métodos lineales que promedia el peso de los elementos, éste, el peso no depende solo de la distancia, sino que incluye dirección y orientación de los datos punto vecinos.

## Resultados y discusión

Para apoyo interpretativo de las superficies de respuesta, se sobrepuso una capa vectorial del área agrícola de riego (AA-riego.shp).

### Rango anual de temperatura (RAT)

De acuerdo con la Sociedad de Meteorología en América (American Meteorological Society) el rango anual de temperatura es la diferencia entre la temperatura promedio del mes más caluroso y el mes más frío.

De la Figura 3, se esperaría un gradiente decreciente en el RAT de hasta 28 °C por latitud en dirección Norte-Sur. La superficie de respuesta se clasificó en nueve categorías sin un rango establecido. Por el factor cercanía a la plataforma oceánica, las regiones costeras del Pacífico central al Pacífico Sur, Mar Caribe y el Golfo de México tendrían el RAT más bajo (13-19 °C), mientras que las regiones geográficas centro (34-38 °C) y norte (38-41) es donde sucedería el RAT más alto. La capacidad calórica de océano es determinante para interpretar la Figura 3. La plataforma continental se calienta más rápido que la oceánica en el día y se enfría más rápido durante la noche.

are more likely to be similar to their response value  $y$ . Three components are recognized (Figure 2): sill, range and nugget effect; plateau, range and nugget effect. The plateau value has two components: a discontinuity at the origin, often called a nugget effect, and a partial one, the plateau value is one where the value of the semivariation ceases to be representative. Range is the distance at which the model curve equals plateau. With regard to the covariance function, it is considered a scalar function of the correlation (Figure 2).

In order to explore the joint effect of the soil indices and the moisture and temperature of the A1F1 scenario, the response surfaces were obtained by the co-kriging method. This geostatistical technique interpolates the point data of the variable (mapping and curves) of an area. Although it is similar to other linear methods that averages the weight of the elements, this, the weight does not only depend on the distance, but includes direction and orientation of neighboring point data.

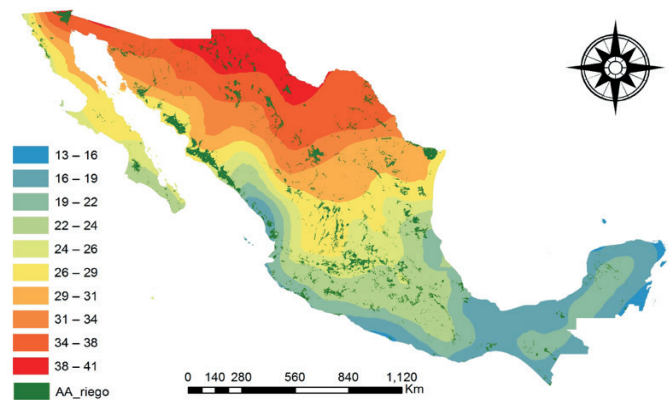


Figura 3. Superficie de respuesta. RAT (°C).  
Figure 3. Response surface. RAT (°C).

## Results and discussion

For interpretive support of the response surfaces, a vector layer of the agricultural irrigation area was superimposed (AA-riego.shp).

### Annual temperature range (RAT)

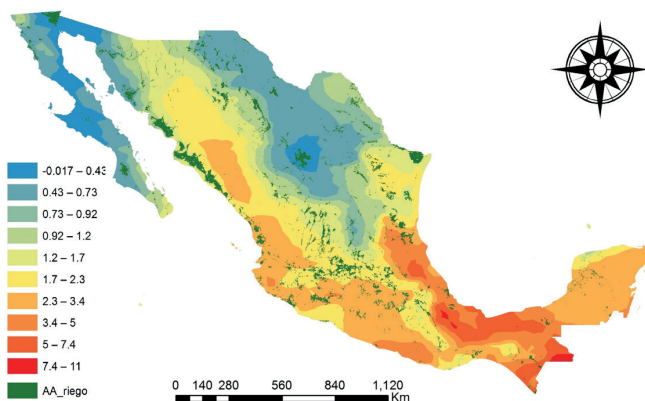
According to the American Meteorological Society the annual temperature range is the difference between the average temperature of the hottest month and the coldest month.

Lo opuesto ocurre con la plataforma oceánica que se calienta y enfría relativamente más lento. Esta es la razón por la cual las zonas geográficas cercanas a la costa tienen un RAT de moderado a bajo mientras que en las regiones alejadas a ella tienen un clima más extremo. Según Pickard y Emery (1990) la temperatura y salinidad promedio del agua oceánica es de 3.5 °C y 34.7, respectivamente. Entre los efectos que se espera sucedan es que aumente el número de especies mejor adaptadas a la variación de temperatura y que decrezca el de aquellas con menos capacidad de tolerancia a la temperatura (Acklerly *et al.* (2015). El espacio geográfico de la región norte centro está dominado por comunidades vegetales características de zonas áridas y semiáridas.

Rzedowski (2006) agrupa los tipos de vegetación en las regiones árida y semiárida en matorral xerófilo, chaparral, y pastizales (navajita y amacollado); sin embargo, la descriptiva ecofisiológica de las comunidades bióticas, así como los requerimientos agroecológicos de los cultivos trasciende los objetivos del presente trabajo.

### Lluvia diaria esperada para el mes más frío

De la Figura 4, se puede destacar que las regiones árida y semiárida (desierto sonorense, desierto chihuahuense y península de Baja California) es donde se esperarían lluvias menores que 2 mm. En la región costa del Pacífico Sur se esperarían lluvias diarias del orden desde 1.7 mm hasta 11 mm; este volumen de lluvia no representa *per se* un evento extremo, lo cual sugiere una baja probabilidad de ocurrencia de lluvias torrenciales. La superficie árida y semiárida en México cubre más de 40% del total del territorio.



**Figura 4. Promedio diario de lluvia (mm) para el mes más frío de la temporada.**

**Figure 4. Average daily rainfall (mm) for the coldest month of the season.**

From Figure 3, a decreasing gradient in the RAT of up to 28 °C by latitude in the North-South direction would be expected. The response surface was classified into nine categories without a set range. Due to the proximity factor to the oceanic platform, the coastal regions of the central Pacific to the South Pacific, Caribbean Sea and Gulf of Mexico would have the lowest RAT (13-19 °C), while the geographic regions center (34-38 °C) and north (38-41) is where the highest RAT would happen. The caloric capacity of the ocean is decisive for interpreting Figure 3. The continental shelf warms faster than oceanic at daytime and cools faster at night.

The opposite happens with the ocean platform that is heated and cooled relatively slower. This is the reason why the geographic areas near the coast have a RAT of moderate to low whereas in the regions remote to her they have a more extreme climate. According to Pickard and Emery (1990) the average temperature and salinity of oceanic water is 3.5 °C and 34.7, respectively. Among the expected effects is that the number of species better adapted to the temperature variation increases and that of those with less capacity to tolerate temperature (Acklerly *et al.* (2015). The geographic space of the northern region is dominated by plant community's characteristic of arid and semi-arid zones

Rzedowski (2006) groups vegetation types in the arid and semi-arid regions in xerophilous scrub, chaparral, and grasslands (navajita and amacollado); however, the descriptive ecophysiological of the biotic communities, as well as the agroecological requirements of the crops transcend the objectives of the present work.

### Daily rainfall expected for the coldest month

From Figure 4, it can be noted that the arid and semi - arid regions (Sonoran desert, Chihuahua desert and Baja California peninsula) are where rainfall of less than 2 mm would be expected. In the South Pacific coast region, daily rains of the order of 1.7 mm to 11 mm would be expected; this volume of rain does not *per se* represent an extreme event, which suggests a low probability of occurrence of torrential rains. The arid and semi-arid surface in Mexico covers more than 40% of the total territory.

Arid and semi-arid terrestrial ecosystems water is the master limiting factor and in the absence of surface runoff primary production is linearly related to rainfall (Pianka, 2012). This relation of cold with light rains is relevant for



Los ecosistemas terrestres áridos y semiáridos el agua es el factor limitante maestro y en ausencia de escorrentía (superficial) la producción primaria está relacionada linealmente con la lluvia (Pianka, 2012). Esta relación de frío con lluvias ligeras es relevante para ecosistemas abiertos donde el crecimiento de las plantas es más lento en comparación cuando la temperatura es alta. Ante la prevalencia de estas condiciones meteorológicas por un periodo de tiempo corto, la germinación de las semillas y el crecimiento de la planta es más dinámico (George *et al.*, 2006) y al afectar la lluvia el contenido de humedad en el suelo, bajan la temperatura superficial, la evaporación y evapotranspiración (Cong y Brady, 2012).

### Promedio de lluvia diaria esperada para el mes más caluroso

En las regiones árida y semiárida, los eventos pulso de lluvia ocurren en la temporada de verano y no son infrecuentes. Los eventos pulso son importantes porque disparan la actividad biológica (Huxman *et al.*, 2014) y la consecuencia más evidente es generan falsos brotes en la germinación de semillas en el suelo.

La secuela inmediata es que estas semillas germinadas no sobrevivirán a los días subsiguientes una vez agotada la reserva de humedad del suelo ante la prevalencia de alta temperatura. En ecosistemas áridos y semiáridos esta concurrencia de lluvia temprana, alta temperatura y decaimiento rápido es más perjudicial para especies efímeras.

Según Turner y Jones (1980) y Levitt (1980), estas especies son de ciclo de vida corto, el cual completan antes de desarrollar sintomatología típica por deficiencia hídrica severa y no poseen mecanismos morfológico, fisiológico o bioquímico de resistencia a la sequía. De la Figura 5, en la Península de Baja California es donde se espera ocurran condiciones homogéneas de baja probabilidad de ocurrencia de lluvia en verano. Se espera una contracción importante en los eventos pulso en especial en las regiones árida y semiárida, el Bajío y la región Centro.

### Promedio de lluvia diaria esperada para el cuatrimestre más húmedo

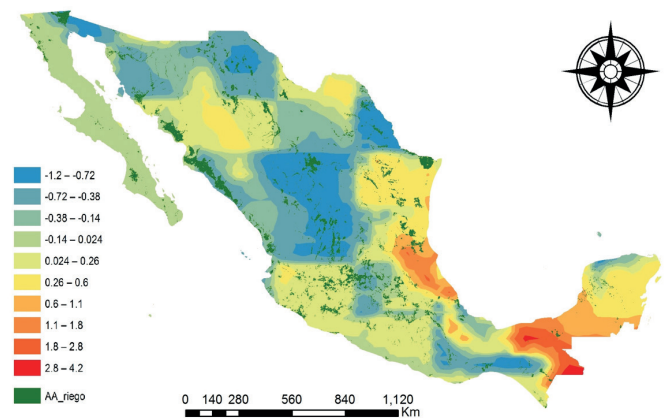
La temporada de lluvias es el periodo trascendental para los procesos ecosistémicos (secuestro de carbono, crecimiento de las plantas, composición biótica) y por ende el factor que define los límites espaciales del uso del suelo. En regiones

open ecosystems where the growth of the plants is slower in comparison when the temperature is high. Given the prevalence of these meteorological conditions for a short period of time, seed germination and plant growth are more dynamic (George *et al.*, 2006) and when rainfall affects the moisture content in the soil, surface temperature, evaporation and evapotranspiration (Cong and Brady, 2012).

### Average daily rainfall expected for the hottest month

In arid and semi-arid regions, rainfall events occur in the summer season and are not infrequent. Pulse events are important because they trigger biological activity (Huxman *et al.*, 2014) and the most obvious consequence is that they generate false outbreaks in seed germination in the soil.

The immediate sequel is that these germinated seeds will not survive the subsequent days once the reserve of soil moisture has been exhausted before the high temperature prevalence. In arid and semi-arid ecosystems this concurrence of early rainfall, high temperature and rapid decay is more detrimental to ephemeral species.



**Figura 5. Promedio de lluvia diaria (mm) esperada en el verano.**  
**Figure 5. Average daily rainfall (mm) expected in the summer.**

According to Turner and Jones (1980) and Levitt (1980), these species are short-lived, which they complete before developing symptoms typical of severe water deficiency and do not possess morphological, physiological or biochemical mechanisms of resistance to drought. From Figure 5, in the Baja California Peninsula it is expected that homogeneous conditions of low probability of occurrence of rain in summer will occur. A major contraction in pulse events is expected, especially in the arid and semi-arid regions, the Bajío and the Central region.

agrícolas identifica el inicio y término de la temporada de crecimiento en zonas de temporal, así como la idoneidad en el uso del agua en zonas de riego, el volumen de escorrentía, la tasa de recarga del manto freático, así como un número de actividades antropogénicas relacionadas con el ecoturismo y los programas de sustentabilidad del ecosistema y del cambio climático.

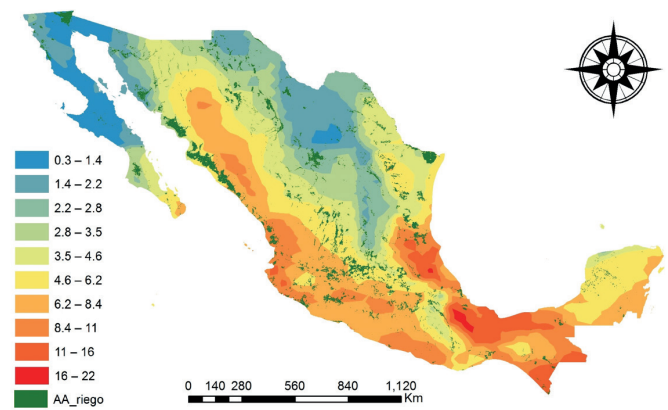
Para el escenario A1FI 2050 se esperan mayormente lluvias ligeras en la mayor parte del territorio, destacándose dos zonas, la Península de Baja California donde se observa un gradiente latitudinal Norte-Sur (0.3 a 11 mm día<sup>-1</sup>), la región Pacífico desde Sinaloa hasta Oaxaca y Chiapas con lluvias de mediana intensidad (6.2 a 16 mm día<sup>-1</sup>). Algunas zonas de alta montaña en Veracruz, Estado de México y Puebla es donde se esperaría ocurriesen los eventos de máxima intensidad, con lluvias del orden de los 16 a 22 mm día<sup>-1</sup>. Con excepción de las regiones central de Sonora y sur de Chihuahua, las regiones Centro y Norte se esperan lluvias ligeras.

En la Figura 6 se muestra la heterogeneidad en la distribución espacial de los eventos de lluvia. Sin embargo, es importante mencionar que el mapa *per se* excluye el factor de eventos extremos. Huber y Gullede (2011) documentan en un análisis de tendencia de lluvias torrenciales extremas, y que el aumento es a consecuencia del calentamiento de la atmósfera, las ondas de calor se volverán más húmedas con el consecuente aumento en el estrés abiótico. Estas condiciones dinámicas cambiantes sugieren la implementación de sistemas de alertamiento como pronóstico de corto plazo, así como pronósticos del clima de alcance regional con actualización mensual. Medvigy y Beaulieu (2012) el patrón errático en los eventos de lluvia debiera darse seguimiento día-a-día debido a que las fluctuaciones en el flujo radiante afectan a todo el planeta.

### Promedio de lluvia diaria esperada para el cuatrimestre más seco

La temporada de verano en México es distintiva por: a) aumento en la demanda de agua en específico en las zonas industriales y de agricultura de riego; y b) aumento en la demanda de energía para comodidad en actividades antropogénicas. México es de especial interés científico en esta temporada por la presencia del monzón.

Según Guido (2016) la temporada del monzón es una condición de eventos dramáticos, con lluvias intensas, rebrote de la vegetación, vientos fuertes, y un gran número



**Figura 6. Distribución espacial de lluvia diaria (mm) esperada en la temporada de lluvias.**

**Figure 6. Spatial distribution of daily rainfall (mm) expected in the rainy season.**

### Average daily rainfall expected for the wetter semester

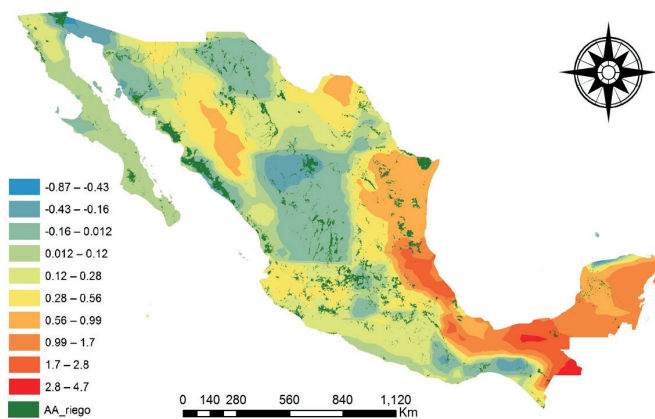
The rainy season is the transcendental period for ecosystem processes (carbon sequestration, plant growth, biotic composition) and therefore the factor that defines the spatial limits of land use. In agricultural regions, it identifies the beginning and end of the growing season in temporary areas, as well as the suitability of water use in irrigation areas, the volume of runoff, the recharge rate of the water table, as well as a number of anthropogenic activities related to ecotourism and ecosystem sustainability and climate change programs.

For the A1FI 2050 scenario, light rains are expected mostly in most of the territory, with two areas being the Baja California peninsula where the North-South latitudinal gradient (0.3 to 11 mm day<sup>-1</sup>) is observed, the Pacific region from Sinaloa to Oaxaca and Chiapas with medium intensity rains (6.2 to 16 mm day<sup>-1</sup>). Some high mountain areas in Veracruz, State of Mexico and Puebla are where the highest intensity events are expected to occur, with rains ranging from 16 to 22 mm day<sup>-1</sup>. Except for the central regions of Sonora and south of Chihuahua, the Central and North regions expect light rains.

Figure 6 shows the heterogeneity in the spatial distribution of rainfall events. However, it is important to mention that the *per map* excludes the extreme event factor. Huber and Gullede (2011) document in a trend analysis of extreme torrential rains, and that the increase is due to the warming of the atmosphere, the heat waves will become more humid with the consequent increase in the abiotic stress. Medvigy and Beaulieu (2012) the erratic pattern in rainfall events should be monitored day-to-day because fluctuations in radiant flux affect the entire planet.

de golpes de calor. El monzón inicia en mayo en la región Norte. Aumenta la evaporación en las zonas costeras (Golfo de México y Golfo de California), y genera condiciones de humedad en la plataforma continental, que eventualmente producirán lluvias. Esta perspectiva puede identificarse mejor en las zonas planas del país y el contraste en zonas altas donde se espera lluvia diaria promedio de hasta 4.7 mm.

De la interpretación de la Figura 7, la mayor intensidad de lluvias en verano se espera ocurra en la región costera del Golfo de México y la península de Yucatán, Tabasco y levante de Chiapas. Por otra parte, el déficit de lluvia que se espera ocurra tendría sus mayores efectos en las zonas agrícolas de Sonora (Valle Yaqui- Mayo, Caborca y Valle de Mexicali), Sinaloa (toda el área agrícola) y Comarca Lagunera. El análisis de esta superficie de respuesta es un llamado de atención para promover mejoras en las prácticas de los sistemas de producción que tiendan a eficientar el uso del agua, así como a la selección de materiales tolerantes a sequía, como medidas de mitigación a los efectos del cambio climático.



**Figura 7. Distribución espacial del promedio de lluvia (mm) esperada en época de secas.**

**Figure 7. Spatial distribution of the average rainfall (mm) expected in the dry season.**

### **Promedio de lluvia diaria esperada en el cuatrimestre más frío**

El inicio de la temporada invernal y su duración es importante para el desarrollo de los cultivos, especialmente frutales que demandan un determinado número de unidades frío para completar su ciclo, la condición de humedad del suelo y su almacenamiento, la recarga del manto freático, la distribución de especies en ecosistemas abiertos (bosque, agostadero, o

### **Average daily rainfall expected for the driest quarter**

The summer season in Mexico is distinctive because of: a) increase in the demand of water in specific in the industrial zones and of agriculture of irrigation; and b) increased demand for energy for comfort in anthropogenic activities. Mexico is of special scientific interest this season by the presence of the monsoon.

According to Guido (2016) the monsoon season is a condition of dramatic events, with heavy rains, regrowth of vegetation, strong winds, and a large number of heat strokes. The monsoon begins in May in the northern region. Increases evaporation in coastal areas (Gulf of Mexico and Gulf of California), and generates moisture conditions on the continental shelf, which will eventually produce rainfall. This perspective can be better identified in the flat areas of the country and contrast in high areas where average daily rainfall of up to 4.7 mm is expected.

From the interpretation of Figure 7, the highest rainfall intensity in summer is expected to occur in the coastal region of the Gulf of Mexico and the Yucatan peninsula, Tabasco and Chiapas uprising. On the other hand, the expected rainfall deficit would have its greatest effects in the agricultural areas of Sonora (Valle Yaqui- Mayo, Caborca and Valley of Mexicali), Sinaloa (all agricultural area) and Comarca Lagunera. The analysis of this response area is a call for attention to promote improvements in the practices of production systems that tend to be efficient in the use of water, as well as the selection of drought tolerant materials, as mitigation measures of climate change.

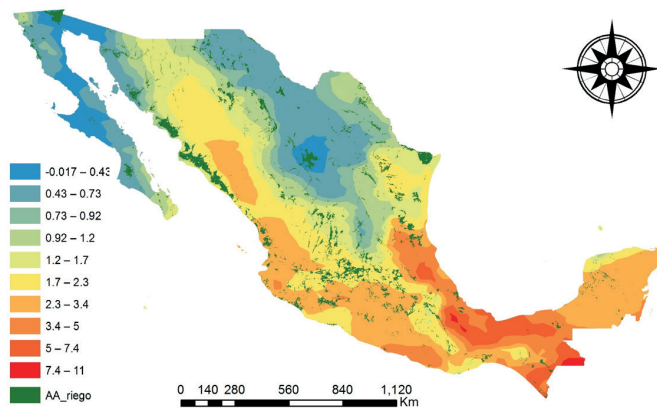
### **Average daily rainfall expected in the coldest quarter**

The beginning of the winter season and its duration is important for the development of crops, especially fruit trees that demand a certain number of cold units to complete their cycle, the condition of soil moisture and its storage, the recharge of the water table, the distribution of species in open ecosystems (forest, rangeland, or grassland), as well as in the provision of environmental services (biomass production, carbon sequestration, water harvesting, and organic carbon formation, among others).

In Figure 8, a decrease in rainfall would be expected and arid and semi-arid ecosystems would be expected to be the most affected, resulting in fragmentation of the geographic landscape, where biotic communities would

pastizal), así como en la proveeduría de servicios ambientales (producción de biomasa, secuestro de carbono, cosecha de agua, y formación de carbono orgánico, entre otros).

En la Figura 8, se esperaría una disminución en el agua de lluvia y se esperaría que los ecosistemas árido y semiárido fueran los más afectados, dándose así una fragmentación del paisaje geográfico, donde las comunidades bióticas tenderían a migrar hacia zonas de clima más estable. Esto favorecería la integración en la comunidad biótica de nuevas especies y la desaparición de algunas otras sin el tiempo suficiente para adaptarse. En los ecosistemas forestales y pecuarios, la baja disponibilidad de agua en el suelo y el muy probable aumento en la temperatura del aire, afectarían su capacidad de proveer servicios ambientales



**Figura 8. Pronóstico esperado para el promedio de lluvia (mm) en época de invierno.**

**Figure 8. Expected forecast for rainfall average (mm) in winter time.**

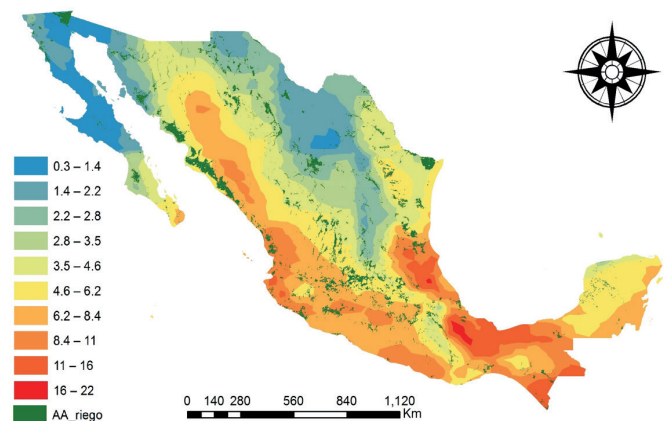
### Promedio de lluvia diaria esperada en el mes más húmedo

Fuertemente asociada a la estación de crecimiento y a la demanda de agua por las especies cultivadas, la información representada en la Figura 9 es clave para plantear programas apropiados sobre cambio climático y seguridad alimentaria. Para ecosistemas abiertos, la previsión de eventos de lluvia de baja intensidad es clave para que suceda la dominancia de especies. Tormentas intensas infiltran más que lluvias ligeras; sin embargo, eventos recurrentes de lluvia ligera pueden infiltrar a mayor profundidad que un solo evento, si la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo favorece su acumulación entre eventos. Esto sucede cuando la lluvia es mayor que la tasa de evapotranspiración.

tend to migrate to more stable climate zones. This would favor the integration in the biotic community of new species and the disappearance of some others without sufficient time to adapt. In forest and livestock ecosystems, the low availability of water in the soil and the very likely increase in air temperature would affect their ability to provide environmental services

### Average daily rainfall expected in the wettest month

Strongly associated with the growing season and the demand for water by cultivated species, the information represented in Figure 9 is key to appropriate programs on climate change and food security. For open ecosystems, forecasting low-intensity rainfall events is key to species dominance. Heavy storms infiltrate more than light rains; however, recurrent events of light rain can infiltrate at greater depth than a single event, if the soil moisture storage capacity favors its accumulation between events. This happens when rainfall is greater than the evapotranspiration rate.



**Figura 9. Lluvia promedio (mm) diaria esperada en el mes más húmedo de la temporada de lluvias.**

**Figure 9. Average daily rainfall (mm) expected in the wettest month of the rainy season.**

In agricultural areas, some indirect effects that would cause light and frequent rains would be expected to be reflected in the migration, incidence, and population dynamics of pests and diseases (Villalobos and Retana, 2017), soil moisture content and dynamics, among others. From Figure 9, rainfall of less than 6 mm/day is expected for the north central region of the country, including the Baja California Peninsula, up to 11 mm in the southern Pacific coastal region and up to 22 mm in specific regions of Veracruz and North of Puebla.

En zonas agrícolas algunos efectos indirectos que ocasionarían lluvias ligeras y frecuentes se esperaría se reflejen en la migración, incidencia, y dinámica poblacional de plagas y enfermedades (Villalobos y Retana, 2017), contenido y dinámica de la humedad del suelo, lámina de riego, entre otros. De la Figura 9, se esperan lluvias menores a 6 mm/día para la región centro norte del país, incluyendo la Península de Baja California, de hasta 11 mm en la región costera del Pacífico sur y de hasta 22 mm en regiones específicas de Veracruz y Norte de Puebla. Lo observado en el mapa es contradictorio con la tendencia global que han documentado el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos de lluvia.

## Conclusiones

El cambio climático y sus efectos sinérgicos son un factor determinante en definir el dinamismo y frontera espacial del uso del suelo. Esta realidad ha sido ampliamente documentada en éste y otros trabajos. El escenario de cambio climático más catastrofista A1F1 2050 ha arrojado importantes evidencias de como la confluencia de factores del clima y de manejo del suelo, están deteriorando a gran velocidad los ecosistemas ya de por sí inestables.

Las mejores proyecciones dan indicios de un aumento en la escasez del agua, lluvias ligeras y esporádicas y anticipadas en las regiones árida y semiárida de México, que anteceden la consecuente fragmentación del ecosistema donde se incorporarían nuevas especies a las comunidades bióticas y desaparición de aquellas con reducida capacidad de adaptación a las condiciones imperantes.

El uso del suelo agrícola demandaría disponer de un volumen mayor de agua de riego con la explotación de un ya sobreexplotado manto freático, mientras que las áreas productoras de temporal estarían bajo la influencia de un régimen de lluvias cada vez más errático. El suelo se erige como un recurso estratégico esencial sobre el que, a diferencia de los factores climáticos, no existe conciencia de su degradación.

## Agradecimiento

Los autores hacen manifiestan su agradecimiento al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por las facilidades otorgadas para la realización de este manuscrito.

What is observed on the map is contradictory to the global trend that has documented the increase in the frequency and intensity of extreme rainfall events.

## Conclusions

Climate change and its synergistic effects are a determining factor in defining the dynamism and spatial boundary of land use. This reality has been amply documented in this and other works. The most catastrophic climate change scenario A1F1 2050 has provided important evidence of how the confluence of climate and soil management factors are rapidly deteriorating already unstable ecosystems.

The best projections give evidence of an increase in water scarcity, light and sporadic and anticipated rains in the arid and semi-arid regions of Mexico, which precede the consequent fragmentation of the ecosystem where new species would be incorporated into the biotic communities and disappearance of those with reduced adaptability to prevailing conditions.

The use of agricultural land would require a greater volume of irrigation water with the consequent exploitation of an already overexploited water table, while the areas producing rainforest would be under the influence of an increasingly erratic rainfall regime. Soil stands as an essential strategic resource on what, unlike climatic factors, there is no awareness of its degradation.

*End of the English version*



## Literatura citada

- Ackerly, D. D.; Cornwell, W. K.; Weiss, S. B.; Flint, L. E. and Flint, A. L. 2015. A geographic mosaic of climate change impacts on terrestrial vegetation: which areas are most at risk? *PLOSone*, 10(6):1-30. doi 10.1371/journal.pone.0130629.
- Blancalani, R.; Nachtergaele, F.; Petri, M. and Bunning, S. 2013. Land degradation assessment in drylands. Methodology and results. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome
- Bohling, G. 2005. Introduction to geostatistics and variogram analysis. <http://people.ku.edu/~gbohling/cpe940/variograms.pdf>.
- Collins, M.; Tett, S. and Cooper, C. 2001. The internal climate variability of hadcm3, a version of the Hadley centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*. 17:61-68.

- CONAFOR. 2010. Comisión Nacional Forestal. México-readiness preparation proposal (R-PP). Forest Carbon Partnership Facility (FCPF). 100 p.
- Cong, R. G. and Brady, M. 2012. The interdependence between rainfall and temperatura Copula Analyses. The Scientific World Journal, ID405675, <http://dx.doi.org/10.1100/2012/405675>.
- FAO. 2015. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. FAO statistical pocket book. Rome.
- George, M.; Bartolome, J.; McDougald, N.; Connor, M.; Vaughn, C. and Markegard, G. 2001. Annual range forage production. University of California, Division of Agriculture and Natural Resources. Publication 8018. <http://sfrec.ucanr.edu/files/183301.pdf>
- Guido, Z. 2016. Understanding the Southwestern monsoon. <http://www.southwestclimatechange.org/feature-articles/southwest-monsoon>.
- Huber, D. and Gulledege, J. 2011. Extreme weather and climate change. Center for climate and energy solutions. <http://www.c2es.org/publications/extreme-weather-and-climate-change>.
- Huxman, T. E.; Travis, E.; Snyder, K. A.; Tissue, D.; Leffler, A. J.; Ogle, K.; Pockman, W. T.; Sandquist, D. R.; Potts, D. L. and Schwinning, S. 2004. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecología*. 141(2):254-268.
- IPCC. 2016. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2013. The physical science basis, working group contributions to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Bern, Switzerland.
- Levitt, J. 1980. Stress and strain terminology. *In*: Levitt, J. (Ed.). Responses of plants to environmental stresses. 2<sup>nd</sup> (Ed.). Academic Press, London New York. 1:3-19 pp.
- Medvigy, D. and Beauliu, C. 2012. Trends in daily solar radiation and precipitation coefficients of variation since 1984. *J. Climate*. 29(24):1330-1339.
- NOAA. 2017. What is the difference between land cover and land use? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/lclu.html>.
- PECC (Programa especial de cambio climático). 2014-2018. DOF28/04/2014.
- Pianka, E. R. 2012. Can human share spaceship earth (point of view) Amphibian and reptile conservation. 6(1):1-24.
- Pickard, G.L. and Emery, W. J. 1990. Descriptive physical oceanography. An introduction. Pergamon Press, Great Britain. 36 p.
- Pielke, R. A.; Sr, Beltrán-Przekurat, A.; Hiemstra, C. A.; Lin, J.; Nobis, T. E.; Adegoke, J.; Nair, U. S. and Niyogi, D. Climate variability and change-hydrological impacts (proceedings of the fifth FRIEND World Conference, Havana, Cuba, IAHS Publ. 308.
- Rasmussen, C. E. and Williams, C. K. I. 2006. Gaussian processes for machine learning, the MIT Press, ISBN 026218253X. Massachusetts Institute of Technology. <http://www.gaussianprocess.org/gpml/chapters/RW4.pdf>.
- Richards, L. A.; Allison, L. E.; Brown, J. W.; Hayward, H. E.; Bernstein, L.; Fireman, M.; Pearson, G. A.; Wilcox, L. V.; Bower, C. A.; Hatcher, J. T. and Reeve, R. C. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. United States department of Agriculture, United States Salinity Laboratory. 60.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México 1<sup>a</sup>. (Ed.). Digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México, D. F.
- Turner, N. C. and Jones, M. M. 1980. Turgor maintenance by osmotic adjustment: a review and evaluation. *In*: Turner, N. C. and Kramer, P. J. (Eds.). Adaptation of plants to water and high temperature stress. Wiley and Sons, New York. 87-103 p.
- Villalobos, F. R. y Retana, B. J. 2017. Efecto del cambio climático en la agricultura. Experiencias en Costa Rica, <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20913/cambio+clim+c3%a1tico+y+agricultura+en+costa+rica>.