

Sensibilidad de zonas bioclimáticas de México frente al cambio climático*

Sensitivity of bioclimatic zones of Mexico facing climate change

Álvaro Agustín Chávez Durán^{1§}, Hugo Ernesto Flores López¹, Celia de la Mora¹, José Ariel Ruíz Corral¹, Gabriela Ramírez Ojeda¹ y Ernesto Rubio Camacho¹

¹Campo Experimental Centro Altos de Jalisco-INIFAP. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. C. P. 47600. Tel: 01 378 7820355. (flores.hugo@inifap.gob.mx; delamora.celia@inifap.gob.mx; ruiz.ariel@inifap.gob.mx; ramirez.gabriela@inifap.gob.mx; rubio.ernesto@inifap.gob.mx). [§]Autor para correspondencia: chavez.alvaro@inifap.gob.mx.

Resumen

El clima es determinante en el desarrollo de los ecosistemas y la vida en el planeta, cambios prolongados en sus componentes provocarán alteraciones en todos los seres vivos. En nuestro país la información referente a estudios sobre la vulnerabilidad de los ecosistemas frente al cambio climático es muy escasa, generalmente enfocada a especies muy particulares de plantas o animales. El presente trabajo tiene como propósito delimitar zonas de la república mexicana que sean sensibles al cambio climático. Para ello se realizó una zonificación bioclimática basada en la metodología de Holdridge, identificando las áreas que corresponden a las zonas de transición cálida y cálida - seca dentro de las zonas de vida. Se obtuvo que 29.61% de la superficie continental de la república mexicana se encuentra en zonas de transición, en las que incrementos de temperatura estipuladas en el escenario RCP2.6 para el periodo 2016 - 2035 del IPCC provocará cambios considerables en la clasificación bioclimática. Un incremento de temperatura de 0.3 °C provocará cambios en 17.25% del total de la superficie estimada en zonas de transición y de 34.65% si el incremento fuera de 0.7 °C, provocando que sus características climáticas las ubiquen en regiones latitudinales más cálidas y regiones de humedad más secas. La delimitación de zonas sensibles a las variaciones climáticas proporciona una

Abstract

The weather is critical for the development of ecosystems and life on the planet, prolonged changes in its components cause changes in all living beings. In our country, concerning studies on the vulnerability of ecosystems against climate change information is scarce, usually focused on particular plant or animal species. This paper aims to delineate areas of the Mexican Republic that are sensitive to climate change. For this reason, we made a bioclimatic zoning based on the methodology Holdridge, identifying areas that correspond to transitional zones warm and dry-warm within the living spaces. We found that 29.61% of the continental area of the Mexican Republic is within transitional zones, where the temperature increases stipulated in RCP2.6 scenario for the period 2016 to 2035 of the IPCC cause considerable changes in the bioclimatic classification. A temperature increase of 0.3 °C will bring about changes in 17.25% of the estimated transition zones and 34.65% area if the increase was 0.7 °C, causing that its climatic characteristic locate them in warmer latitudinal regions and regions of drier humidity. The demarcation of sensitive areas to climate changes provides valuable information for research concerning adaptive capacity of ecosystems and the effects that climate change can cause a large scale.

* Recibido: octubre de 2014
Aceptado: enero de 2015

valiosa información para investigaciones referentes a las capacidades de adaptación de los ecosistemas y los efectos que el cambio climático puede causar a gran escala.

Palabras clave: cambio climático, sensibilidad, transición, zonas de vida.

Introducción

El clima es un conjunto de condiciones atmosféricas propias de un lugar, constituido por la cantidad de precipitación y temperatura cuya acción influye en la existencia de los seres sometidos a ella. Las modificaciones que experimenta el clima respecto al historial climático en una región y que persiste durante un periodo prolongado son llamadas cambio climático y es debido tanto a causas naturales como antropogénicas (Crowley y North, 1988).

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013) en la actualidad está ocurriendo un cambio climático que impactará las diferentes regiones del mundo, el calentamiento del sistema climático es inequívoco y desde la década de 1950's, muchos de los cambios observados no tiene precedentes. Para todos los escenarios considerados de trayectorias de concentración representativas (RCP), excepto para el escenario RCP2.6, es probable que la temperatura tenga un incremento superior a 2 °C para el año 2100.

Estimaciones futuras sobre los efectos del cambio climático pronostican que en América Latina son muy significativos, afectando de manera irreversible los ecosistemas y los servicios que éstos proporcionan (Vergara *et al.*, 2007). Las cifras del Banco Mundial (BM) para la reducción del riesgo de desastres indican que México se ubica entre los países con mayor vulnerabilidad ya que su territorio se encuentra altamente expuesto al riesgo de efectos adversos directos del cambio climático. Dentro de los efectos del cambio climático se encuentran la reducción de la disponibilidad de agua, aumento de inundaciones, sequías, reducción de rendimiento de la agricultura y pérdida de biodiversidad (Herrán, 2012).

En países de centro y Sudamérica se han realizado estudios sobre la afectación del cambio climático sobre las zonas de vida de Holdridge (Mendoza *et al.*, 2001), con estimaciones plasmadas en su afectación sobre los ecosistemas. Esto

Keywords: climate change, living areas, sensitivity, transitional.

Introduction

The climate is a set of weather conditions specific to a place, consisting of the amount of precipitation and temperature whose action influences the existence of beings subject to it. The changes experienced by the climate on climate history in a region and that persists for an extended period are called climate change and is due to both natural and anthropogenic causes (Crowley and North, 1988).

According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2013) the occurring climate change will impact different regions of the world, the warming of the climate system is unequivocal and since the 1950's, many observed changes is unprecedented. For all scenarios considered representative concentration pathways (RCP), except for RCP2.6 scenario is likely to have a temperature higher than 2 °C increase by 2100.

Future estimates of the effects of climate change predict that in Latin America are significant, irreversibly affecting ecosystems and the services they provide (Vergara *et al.*, 2007). Figures from the World Bank (Bank) for disaster risk reduction indicate that Mexico is among the countries most vulnerable because its territory is highly exposed to the risk of direct adverse effects of climate change. Among the effects of climate change are reducing the availability of water, increased flooding, droughts, reduced agricultural yields and loss of biodiversity (Herran, 2012).

In countries within Central and South America have been studies on the effect on climate change on life zones Holdridge (Mendoza *et al.*, 2001), with estimates reflected in his involvement on ecosystems. This is because in the living areas of Holdridge partnership as a natural unit proposed in which vegetation, animal activity and climate are all interrelated in a single recognized combination (Holdridge, 1996).

It is important to consider that a life zone represents the climatic conditions that influence the potential vegetation and ecosystem functioning and not the state of vegetation cover in a given time. The variables used for classification are factors that represent ecophysiological restrictions on plant growth (Lugo *et al.*, 1999).

es debido a que en las zonas de vida de Holdridge se propone la asociación como una unidad natural en la cual la vegetación, la actividad animal y el clima están todos interrelacionados en una combinación reconocida única (Holdridge, 1996).

Es importante considerar que una zona de vida representa las condiciones climáticas que influyen en la vegetación potencial y el funcionamiento de los ecosistemas y no el estado de la cubierta vegetal en un tiempo determinado. Las variables utilizadas para su clasificación son factores que representan restricciones ecofisiológicas para el crecimiento de las plantas (Lugo *et al.*, 1999).

En nuestro país se han realizado esfuerzos importantes con la finalidad de estimar la distribución espacial de las condiciones climáticas bajo distintos modelos y escenarios desarrollados por el IPCC (Roeckner *et al.*, 1996; UNIATMOS, 2014) en donde se evidencian las tendencias generales de incrementos en la temperatura (Trejo *et al.*, 2007); sin embargo, la información referente a estudios sobre la vulnerabilidad de los ecosistemas es muy escasa, generalmente enfocada a especies muy particulares de plantas o animales.

Una de las principales limitantes que existen, incluso en los trabajos en donde se ha utilizado el sistema de zonificación bioclimática de Holdridge, como unidad experimental ante los escenarios de cambio climático, es la omisión de las zonas de transición bioclimática, donde los ecosistemas son particularmente sensibles a los cambios climáticos (Jiménez *et al.*, 2010). Un ecosistema es el conjunto de especies de un área determinada que interactúan entre ellas y con su ambiente. México cuenta con una superficie continental de 1 964 375 km² por lo tanto, para análisis enfocados al comportamiento de los ecosistemas ante cambios en el clima, es conveniente delimitar zonas de estudio que arrojen información significativa aún con variaciones pequeñas de incrementos de temperatura y disminución de precipitaciones.

En respuesta a esta necesidad, el objetivo del presente estudio es realizar una zonificación bioclimática basada en el modelo de zonas de vida de Holdridge, delimitando las zonas de transición con tendencia a cálidas y cálidas secas las cuales, son especialmente sensibles a incrementos en la temperatura y reducciones de precipitación.

In our country there have been significant efforts in order to estimate the spatial distribution of climatic conditions under different models and scenarios developed by the IPCC (Roeckner *et al.*, 1996; UNIATMOS, 2014) where the general trends are evident of increases in temperature (Trejo *et al.*, 2007); however, information regarding studies on the vulnerability of ecosystems is quite low, usually focused on very particular plant or animal species.

One of the main constraints that exist, even in works where we have used the bioclimatic zoning system Holdridge experimental unit to the climate change scenarios, is the omission of the bioclimatic zones of transition, where ecosystems are particularly sensitive to climate change (Jiménez *et al.*, 2010). An ecosystem is the set of species in a given area interacting with each other and with their environment. Mexico has a land area of 1 964 375 km² therefore for analysis focused on the behaviour of ecosystems to changes in climate, it is convenient to define areas of study that yield meaningful information even with small variations of temperature increase and decrease rainfall.

In response to this need, the objective of this study is to perform a bioclimatic zoning based on model life zones Holdridge, defining the transition areas prone to warm-dry and warm which are particularly sensitive to increases in temperature and decreases in precipitation.

Materials and methods

A computer system bioclimatic zoning for the Mexican republic based on the methodology of Holdridge (Holdridge, 1996) was conducted. Biotemperature, potential evapotranspiration and the average annual precipitation was calculated. The estimation of climatic factors for zoning as a source of information was the data contained in the Quick Climatological Information Extraction (ERIC, III), container for the stations of the Mexican Institute of Water Technology (IMTA, 2013).

A historical series of climatological data was processed 1961-2003 range and spatial distribution of monthly maximum temperature, monthly minimum temperatures and

Materiales y métodos

Se realizó un sistema informático de zonificación bioclimática para la república mexicana basada en la metodología de Holdridge (Holdridge, 1996). Se calculó la biotemperatura, la evapotranspiración potencial y el promedio de la precipitación anual total. La estimación de los factores climáticos para la zonificación tuvo como fuente de información los datos contenidos en el Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC, III), contenedor de las estaciones climatológicas del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2013).

Se procesó una serie histórica de datos climatológicos con rango 1961-2003 y se estimó la distribución espacial de las temperaturas máximas mensuales, temperaturas mínimas mensuales y la precipitación anual total, el resultado fue un conjunto de archivos ráster con resolución espacial de 0.001665 grados de unidades de arco. La secuencia de estimación de las zonas de vida se realizó como se muestra en la Figura 1.

Se realizó la estimación de la Biotemperatura, la cual se entiende como la temperatura del aire, aproximadamente entre 0 °C y 30 °C, que determina el ritmo e intensidad de los procesos fisiológicos de las plantas (fotosíntesis de las plantas, respiración y transpiración) y la tasa de evaporación directa del agua contenida en el suelo y en la vegetación (Crivelli y Dzendoletas, 2002).

Para el cálculo de la Biotemperatura Media Mensual (BMM), se tienen tres casos usando la temperatura media mensual (TMM):

- a) Si la TMM está entre 6°C y 24°C, la BMM es igual a la TMM
- b) Si la TMM es mayor a 24°C, la BMM es igual a la siguiente fórmula:

$$BMM = TMM - (3 * Lat * (TMM - 24)^2 / 100) \quad 1)$$

Donde: BMM= biotemperatura media mensual; TMM= temperatura media mensual; y Lat= latitud de la zona de estudio en grados.

- c) Si la TMM es menor a 6 °C, la BMM es igual a la siguiente fórmula:

total annual precipitation was estimated, the result was a set of raster files with spatial resolution of 0.001665 degrees of units arc. Estimating the sequence of the living areas was performed as shown in Figure 1.

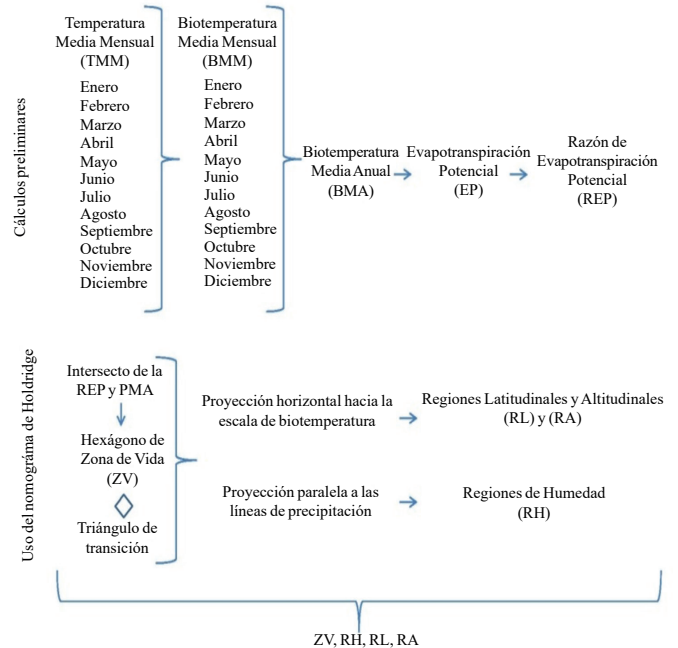


Figura 1. Diagrama descriptivo de la secuencia de estimación de las zonas de vida (ZV), regiones de humedad (RH), regiones latitudinales (RL) y regiones altitudinales (RA).

Figure 1. Diagram of the sequence descriptor estimation living areas (CU) regions of humidity (RH), latitudinal regions (RL) and altitudinal regions (RA).

Biotemperature estimation, which is defined as the air temperature, about 0 °C and 30 °C, which determines the rate and intensity of the physiological processes of the plants (plant photosynthesis, respiration and transpiration are performed) and the rate of direct evaporation of water contained in the soil and vegetation (Crivelli and Dzendoletas, 2002).

To calculate the average monthly biotemperature (BMM), there are three cases using the average monthly temperature (TMM):

- a) If TMM is between 6 °C to 24 °C, the BMM equals TMM
- b) If TMM is higher than 24 °C, the BMM equals f or the following formula:

$$BMM = TMM - (3 * Lat * (TMM - 24)^2 / 100) \quad 1)$$

$$BMM = TMaxM^{^2} / 2(TMaxM - TMinM) \quad 2)$$

Donde: BMM= biotemperatura media mensual; TMaxM= temperatura máxima mensual; y TMinM= temperatura mínima mensual

La biotemperatura media anual (BMA) se estimó mediante la siguiente ecuación.

$$BMA = (\sum_{i=0}^n BMM) / n \quad 3)$$

Donde: BMA= biotemperatura media anual; BMM= biotemperatura media mensual; y n= número de meses.

Se calculó la evapotranspiración potencial, que es la cantidad de agua que sería evaporada directamente del suelo y la transpira por la vegetación natural en un estado estable que se encuentra sobre un suelo de buenas características y con un contenido óptimo de humedad (Samani, 2000). Se estimó mediante la siguiente ecuación.

$$EP = BMA * 58.93 \quad 4)$$

Donde: EP= evapotranspiración potencial; y BMA= biotemperatura media anual.

La razón de evapotranspiración potencial, está en función de la biotemperatura y la precipitación, es un índice de las condiciones de humedad que refleja la disponibilidad de agua para el crecimiento de las plantas y los procesos ecológicos (Holdridge, 1996; Lugo *et al.*, 1999). Se estimó mediante la siguiente ecuación.

$$REP = EP / PMA \quad 5)$$

Donde: REP= razón de evapotranspiración potencial; EP= evapotranspiración potencial; y PMA= precipitación media anual.

Una vez estimados cada uno de los componentes necesarios se procedió a utilizar el nomograma de Holdridge para identificar las zonas bioclimáticas. Uno de los principales inconvenientes del sistema de clasificación de Holdridge es el uso de progresiones logarítmicas en el nomograma, lo que limita su uso prácticamente a solo interpretaciones gráficas. Para corregir esta situación se transformaron las unidades logarítmicas del nomograma a unidades lineales utilizando las siguientes ecuaciones:

Where: BMM= monthly average biotemperature; TMM= Monthly average temperature; and Lat= latitude of the study area in degrees.

c) If TMM is less than 6 °C, the BMM equals f or the following formula:

$$BMM = TMaxM^{^2} / 2(TMaxM - TMinM) \quad 2)$$

Where: BMM= monthly average biotemperature; TMaxM= maximum monthly temperature; and TMinM= minimum monthly temperature

The mean annual bio-temperature (BMA) was estimated using the following equation.

$$BMA = (\sum_{i=0}^n BMM) / n \quad 3)$$

Where: BMA= annual average biotemperature; BMM= monthly average biotemperature; and n= number of months.

Potential evapotranspiration, which is the amount of water that can be evaporated directly from the soil and transpires natural vegetation in a stable state that is located on a soil of good characteristics and optimum moisture content was calculated (Samani, 2000). It was estimated by the following equation.

$$EP = BMA * 58.93 \quad 4)$$

Where: EP= potential evapotranspiration; and BMA= annual average biotemperature.

The ratio of potential evapotranspiration is a function of biotemperature and precipitation, is an index of the humidity that reflects the availability of water for plant growth and ecological processes (Holdridge, 1996; Lugo *et al.*, 1999). It was estimated by the following equation.

$$REP = EP / PMA \quad 5)$$

Where: REP= ratio of potential evapotranspiration; EP= potential evapotranspiration; and PMA= annual rainfall.

Once estimated each of the components required proceeded to use the nomogram "Holdridge" to identify bioclimatic zones. One of the main drawbacks of the classification system Holdridge is the use of logarithmic progressions

$$Da = \log \frac{Vb}{Li} * \frac{2}{\log 2} \tag{6}$$

Donde: Da= distancia en escala lineal; Vb= valor a transformar; Li= límite inferior de cada rango de escalas logarítmicas; y $2/\log 2$ = constante asociada al espaciamiento entre los valores de las escalas logarítmicas. 2 garantiza que la distancia gráfica entre intervalos logarítmicos sea de 2 cm.

$$Ci = Da + Di \tag{7}$$

Donde: Ci= distancia lineal corregida; Da= distancia en escala lineal; y Di= espaciamiento acumulado de los intervalos desde el origen hasta la posición deseada.

La conversión de las unidades permitió reproducir en nomograma gráfico a un plano cartesiano con unidades lineales desde sus estructuras básicas. El software que se utilizó para esa actividad fue el AutoCad®. Asignando una coordenada de inicio (x, y) fue posible reconstruir cada uno de los componentes del nomograma en un ambiente que conjunta las utilidades gráficas y analíticas (Figura 2).

Una vez graficados los hexágonos que componen a las zonas de vida y plasmados en un plano cartesianos de unidades lineales fue posible obtener los centroides en coordenadas x, y de cada uno de ellos, así como los rangos que delimitan cada una de las regiones latitudinales, altitudinales y de humedad del sistema de clasificación.

Se desarrolló un método que permite estimar la ubicación espacial de las unidades REP y PMA en coordenadas x, y. Para ello, primeramente es necesario encontrar la ubicación de cada valor sobre su recta de origen del nomograma mediante las ecuaciones.

$$xa = \text{Seno}(\theta \frac{1}{2}) * Di \tag{8}$$

Donde: xa= coordenada X sobre la recta de origen del nomograma; θ = ángulo formado entre las rectas REP y PMA (60°); y Di= espaciamiento acumulado de los intervalos desde el origen hasta la posición deseada.

$$ya = \text{Coseno}(\theta \frac{1}{2}) * Di \tag{9}$$

Donde: ya= coordenada Y sobre la recta de origen del nomograma; θ = ángulo formado entre las rectas REP y PMA (60°); y Di= espaciamiento acumulado de los intervalos desde el origen hasta la posición deseada.

in the nomogram, which limits its use practically only graphic interpretations. To correct this situation logarithmic nomogram units were transformed to linear units using the following equations:

$$Da = \log \frac{Vb}{Li} * \frac{2}{\log 2} \tag{6}$$

Where: Da= distance in linear scale; Vb value= transform; Li= lower limit of each range logarithmic scales; and $2/\log 2$ = constant associated with the spacing between the values of the logarithmic scales. 2 ensures that the distance between logarithmic graphs is 2 cm intervals.

$$Ci = Da + Di \tag{7}$$

Where: Ci= corrected linear distance; Da= distance in linear scale; and Di= cumulative spacing intervals from the origin to the desired position.

The units conversion chart nomogram allowed to play in a Cartesian plane with linear units since its basic structures. The software used for this activity was the AutoCad®. Start assigning a coordinate (x, y) was possible to reconstruct each of the components of the nomogram in an environment that combines graphical and analytical tools (Figure 2).

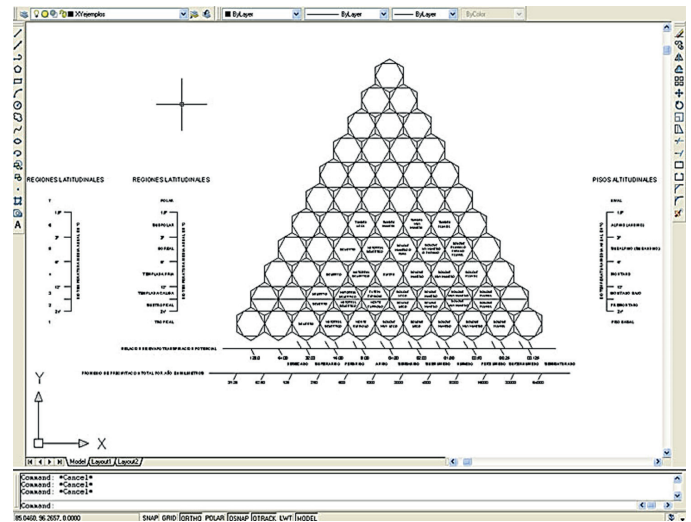


Figura 2. Nomograma de holdridge completo en AutoCad®.
Figure 2. Nomogram full Holdridge in AutoCAD®.

Once plotted hexagons that make up the living areas and expressed in a Cartesian plane linear units was possible to obtain the centroides in x, y coordinates of each of them as well as the ranges that define each of the latitudinal regions altitudinal and moisture classification system.

Tenemos que:

$$b = -(m * x_0) + y_0 \tag{10}$$

Donde: b= ordenada al origen; m= pendiente de la recta; y₀= ordenada del origen del nomograma.

Obtenidos los valores de (x_a, y_a y b) para REP y PMA se procede a hacer uso de la ecuación de la recta para cada uno de ellos.

$$y = (m * x_a) + b \tag{11}$$

Donde: y= valor correspondiente al eje de las ordenadas; x_a= coordenada X sobre la recta de origen; nomograma; m= pendiente de la recta; y b= ordenada al origen.

Finalmente se resuelve el sistema de ecuaciones obtenido y el resultado es un par de coordenadas (x,y) que corresponden a una ubicación dentro del nomograma.

Cada uno de los hexágonos de zonas de vida cuenta con un centroide de coordenadas (x, y) por lo tanto, el centroide más cercano al par de coordenadas resultante del sistema de ecuaciones REP y PMA será el correspondiente al hexágono de la zona de vida que le atañe. Los pisos altitudinales y latitudinales se encuentran bien definidos por el eje de coordenadas “y” dentro del plano cartesiano mientras que la región de humedad se encuentra definida directamente por los valores de REP (Figura 3).

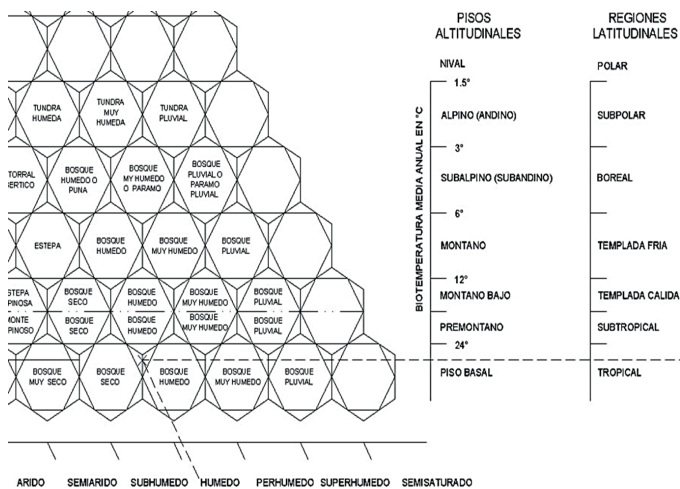


Figura 3. Ejemplificación de un par de coordenadas que permiten la ubicación de una zona de vida.
Figure 3. Modelling of a pair of coordinates that allow the location of a living area.

A method to estimate the spatial location of the REP and PMA units developed coordinates x, y. For this it is first necessary to find the location of each value on its line of origin of the nomogram by equations.

$$x_a = \text{Seno}(\frac{\theta}{2}) * D_i \tag{8}$$

Where: x= X coordinate of the line of origin of the nomogram; θ = angle between the lines REP and PMA (60°); and D_i= spacing intervals accumulated from the source to the desired position.

$$y_a = \text{Coseno}(\frac{\theta}{2}) * D_i \tag{9}$$

Where: y_a= Y coordinate of the line of origin of the nomogram; θ = angle between the lines REP and PMA (60°); and D_i= spacing intervals accumulated from the source to the desired position.

We have that:

$$b = -(m * x_0) + y_0 \tag{10}$$

Where: b= intercept m= slope of the line; and 0= ordinate of the origin of the nomogram.

Obtained values (x_a, y_a and b) for REP and PMA proceed to make use of the equation of the line for each of them.

$$y = (m * x_a) + b \tag{11}$$

Where: y= value corresponding to the y-axis, x= X coordinate of the line of origin; nomogram; m= slope of the line; and b= intercept.

Finally, the equation system is solved and the result is a pair of coordinates (x, y) corresponding to a location within the nomogram.

Each of the hexagons of living areas has a centroid coordinates (x, y) therefore, the closest pair of coordinates resulting system of equations REP and PMA centroid will correspond to hex the living area that concerns. The altitudinal and latitudinal soils are well defined by the coordinate axis and within the grid while the moisture region is defined directly by the values of REP (Figure 3).

One of the most important characteristics of the nomogram Holdridge is the ability to identify areas hexagons transitional living areas (Figure 4). The main lines of

Una de las características más importantes del nomograma de holdridge es la posibilidad de identificar en los hexágonos áreas de transición de las zonas de vida (Figura 4). Las líneas principales de los hexágonos son los límites de cada zona de vida. Las líneas guía de biotemperatura, precipitación y relación de evapotranspiración potencial, forman seis triángulos en cada hexágono. Estos triángulos son las áreas de transición. Dentro de cada triángulo, dos de los tres factores principales, corresponden a la misma región, la misma provincia de humedad o la banda de precipitación a que corresponde el cuerpo principal del hexágono. El tercer factor corresponde a la región, faja, provincia o régimen de precipitación del hexágono vecino (Jiménez, 1993).

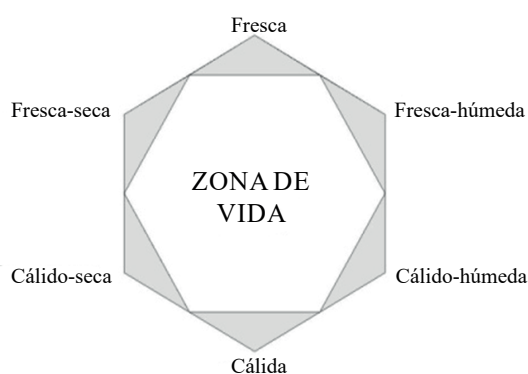


Figura 4. Zonas de transición en una zona de vida.
Figure 4. Transition zones in a living area.

Se desarrolló un sistema informático escrito en lenguaje C, que realiza las operaciones antes descritas a nivel píxel, una vez que se le proporciona la información climática en formato ráster. Esto permite reproducir el procedimiento de manera automatizada estando en posibilidad de probar repetidamente tanto los datos actuales como los escenarios futuros de precipitación y temperatura causados por el cambio climático. En el análisis no fueron consideradas las correcciones por asociaciones edáficas, hídricas y atmosféricas.

Validación del modelo

Para verificar la veracidad de las zonas de vida se realizó una comparación entre las zonas estimadas e información medida directamente en campo a través de los levantamientos del proyecto Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) (CONAFOR, 2011). Se seleccionaron 24 sitios de muestreo, para cada uno se extrajo información referente a localización geográfica, dominancia y riqueza de especies (Cuadro 1). Utilizando la localización geográfica de cada sitio se extrajo del mapa de zonas de vida la clasificación correspondiente y se procedió a hacer una evaluación de la concordancia como se muestra en el Cuadro 2.

the hexagons are the limits of each area of life. The biotemperature guide, precipitation and potential evapotranspiration ratio, lines form six triangles in each hexagon. These triangles are the transition areas. Within each triangle, two of the three main factors correspond to the same region, the same province of moisture or precipitation band corresponding to the main body of the hexagon. The third factor relates to the region, girdle, province or precipitation regime of the neighbour hexagon (Jiménez, 1993).

A software system written in C language, which performs the operations described above to pixel level, once we supply climate information in raster format was developed. This allows us to play the automated procedure being in a position to repeatedly test data both current and future scenarios of precipitation and temperature caused by climate change. In the analysis were not considered corrections for soil, water and atmospheric associations.

Validation of the model

In order to verify the veracity of the living areas, a comparison between the estimated and measured data areas directly in the field through the upheavals of the National Forest Inventory and Soil Project (INFyS) (CONAFOR, 2011) was performed. 24 sampling sites for each information regarding geographic location, dominance and species richness were selected (Table 1). By using the geographic location of each site was removed from the map of life zones and grade accordingly proceeded to make an assessment of the correlation as shown in the Table 2.

Concordance evaluation was performed by the Kappa coefficient (Cohen, 1960), using equation 12.

$$K = \frac{(N * \sum x_{ij}) - \sum (X_c * X_l)}{N^2 - \sum (X_c * X_l)} \quad 12$$

Where: K = Kappa coefficient, N = number of elements; X_{ij} = sum of the diagonal; X_c = sum of columns; and X_l = sum of lines.

According to the evaluation of agreement made, a value of 0.95 was obtained. The theoretical Kappa coefficient takes values between 0 (total disagreement) to 1 (full agreement) thus obtained the degree of agreement is almost perfect (Landis and Koch, 1977), demonstrating the validity of bioclimatic zoning.

La evaluación de concordancia se realizó mediante el coeficiente Kappa (Cohen, 1960), haciendo uso de la ecuación 12.

$$K = \frac{(N \cdot \sum x_{ij}) - \sum (X_c \cdot X_l)}{N^2 - \sum (X_c \cdot X_l)} \quad (12)$$

Donde: K= coeficiente Kappa; N= número de elementos; X_{ij} = sumatoria de la diagonal; X_c = sumatoria de columnas; y X_l = sumatoria de renglones.

De acuerdo a la evaluación de concordancia realizada, se obtuvo un valor de 0.95. El coeficiente Kappa toma valores teóricos entre 0 (total desacuerdo) y 1 (máximo acuerdo) por lo tanto, el grado de concordancia obtenido es casi perfecto (Landis y Koch, 1977), lo que demuestra la validez de la zonificación bioclimática.

De igual forma, para evaluar el grado de sensibilidad de las zonas de transición al cambio climático, se procedió a realizar una comparación del estado actual de las zonas bioclimáticas respecto a los cambios esperados con las variaciones de temperatura estipuladas en el escenario RCP2.6 para el periodo 2016 - 2035 del IPCC (IPCC, 2013).

Resultados y discusión

Resultado de la zonificación bioclimática se obtuvo un mapa con las zonas de vida que le corresponden a la república mexicana, otro con las regiones de humedad y un más con las regiones latitudinales acorde a sus características climáticas.

De acuerdo con la clasificación de zonas de vida actual, la clasificación bosque domina en la República Mexicana con 56.58% del territorio, seguido por el monte espinoso con 30.56%, 8.69% es matorral desértico, 4.05% está constituido por desierto y finalmente 0.12% corresponde a estepa (Figura 5).

La distribución de las regiones de humedad estimadas del territorio nacional corresponden al 37.32% a la región sub húmedo; 33.61% es semiárido; 9.88% corresponde a la región árida; 4.01% es súper árido y 0.5% es desecado. Por otra parte, 1.21% el territorio nacional pertenece a la región húmedo y tan solo el 0.0005% corresponde a la región súper húmedo (Figura 6).

Similarly, to assess the sensitivity of the transition zones to climate change, we proceeded to make a comparison of the current status of bioclimatic zones regarding expected changes with temperature variations specified in the scenario for RCP2.6 period 2016 - 2035 the IPCC (IPCC, 2013).

Results and discussion

As a result of bioclimatic zoning a map was obtained with the areas of life that correspond to the Mexican republic, with other regions with humidity and latitudinal regions according to climatic characteristics.

According to the classification of areas of modern life, the classification forest dominates Mexico with 56.58% of the territory, followed by the thorny bush with 30.56%, 8.69% is desert scrub, 4.05% is made up of desert and finally 0.12% corresponds to steppe (Figure 5).



Figura 5. Zonas de vida actuales de la República Mexicana.
Figure 5. Areas of current life in Mexico.

The distribution of moisture regions of the country are estimated at 37.32% in the humid sub region; 33.61% is semiarid; 9.88% is the arid region; 4.01% is extremely arid and 0.5% is dried. Furthermore, 1.21% the country belongs to the humid region and only 0.0005% is super humid region (Figure 6).

The estimated latitudinal regions correspond to 21.96% of the country as tropical; 48.44% were classified as subtropical; 28.25% corresponds to the warm temperate region; 1.28% belongs to the cold temperate region and finally 0.07% correspond to boreal regions, subpolar and polar (Figure 7).



Figura 6. Regiones de humedad de la República Mexicana.
Figure 6. Regions humidity of the Mexican Republic.

Las regiones latitudinales estimadas corresponden a 21.96% del territorio nacional como tropicales; 48.44% fue clasificado como subtropical; 28.25% corresponde a la región templado cálida; 1.28% pertenece a la región templado fría y finalmente 0.07% corresponden a las regiones boreal, subpolar y polar (Figura 7).

Haciendo uso de los triángulos que corresponden a las zonas de transición cálida y cálida - seca dentro de las zonas de vida, se obtuvo que casi una tercera parte del territorio nacional (29.61%), se localiza en estas zonas de transición; es decir, 581 613.86 km² de nuestro país son especialmente vulnerables a los cambios climáticos, considerando pequeñas reducciones en la precipitación o elevaciones de temperatura, provocarán grandes cambios en la composición de los ecosistemas que las componen (Figura 8).

Resultado de la comparación del estado actual de las zonas bioclimáticas respecto a los cambios esperados con las variaciones de temperatura estipuladas en el escenario RCP2.6 para el periodo 2016 - 2035 del IPCC, se presentan en el Cuadro 3. Puede observarse como un incremento de temperatura de 0.3 °C provocará cambios en las zonas bioclimáticas actuales en 17.25% del total de la superficie estimada como zona de transición, causando que sus características climáticas las ubiquen como regiones latitudinales más cálidas y regiones de humedad más secas. Cuando el incremento es de 0.7 °C, los cambios en la superficie de transición aumentan a 34.65%. En las Figuras 9, 10 y 11, se pueden visualizar la distribución de las regiones bioclimáticas que experimentaría la república mexicana, pero estos cambios son más acentuados en las zonas de transición.



Figura 7. Regiones latitudinales de la República Mexicana.
Figure 7. Latitudinal regions of the Mexican Republic.

Using triangles correspond to areas of warm and dry-warm transition within areas of life, it was found that almost a third of the country (29.61%) is located in these transition zones; i.e. 581 613.86 km² of our country are particularly vulnerable to climate change, they consider small reductions in rainfall or temperature rises, will cause great changes in the composition of the ecosystems (Figure 8).



Figura 8. Localización de superficies en zonas de transición cálida y cálida - seca.
Figure 8. Location of surfaces in transition areas of warm and dry-warm.

Result of the comparison of the current status of bioclimatic zones regarding expected changes with temperature variations stipulated in the scenario RCP2.6 for the period 2016 to 2035 the IPCC are presented in Table 3. We can see the temperature increase of 0.3 °C will cause changes in current bioclimatic zones in 17.25% of the estimated surface as a transition zone, causing to locate its climatic latitudinal regions as warmer and drier regions of moisture. When the

Cuadro 3. Porcentaje de cambio que sufren las zonas de transición ante la presencia de pequeñas variaciones de temperatura y precipitación.

Table 3. Percentage of change experienced by transition zones in the presence of small variations in temperature and precipitation.

Incremento de temperatura	0 °C	0.3 °C	0.7 °C
(%) cambio	0	17.2455	34.6484



Figura 9. Zonas de vida de la República Mexicana una vez incrementados 0.7 °C de temperatura.

Figure 9. Life zones of the Mexican republic once increased 0.7 °C.

De acuerdo con lo anterior se pudo observar la sensibilidad de las zonas de transición bioclimática frente a pequeños cambios en la precipitación y temperatura, confirmándose de esta manera la importancia de su delimitación.

Conclusiones

Se desarrolló un sistema de zonificación bioclimática bajo la metodología de Holdridge. Mediante la zonificación se obtuvo que 29.61% de la superficie continental de la República Mexicana se localizó en zonas de transición, lo que las vuelve especialmente sensibles a las variaciones climáticas. Un incremento de 0.7 °C es capaz de producir cambios hasta 34.65% de dichas superficies provocando que se ubiquen en regiones latitudinales más cálidas y regiones de humedad más secas. La delimitación de zonas sensibles a las variaciones climáticas proporciona una valiosa información para investigaciones futuras referentes a las capacidades de adaptación de los ecosistemas y los efectos que el cambio climático puede causar a gran escala.

increase is 0.7 °C, changes in the transition surface increases to 34.65%. In Figures 9, 10 and 11, we can display the distribution of bioclimatic regions that would experience the Mexican republic, but these changes are more pronounced in the transition zones.



Figura 10. Regiones de humedad de la República Mexicana una vez incrementados 0.7 °C de temperatura.

Figure 10. Regions of moisture from the Mexican republic once increased 0.7 °C.



Figura 11. Regiones latitudinales de la República Mexicana una vez incrementados 0.7 °C de temperatura.

Figure 11. Latitudinal regions of the Mexican republic once increased 0.7 °C.

Literatura citada

- Centro de Ciencias de la Atmósfera Universidad Nacional Autónoma de México (UNIATMOS). 2014. Escenarios de cambio climático. 65 p.
- Cohen, J. 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educ. Psycho. Meas.* 20:37-46.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2011. Manual y procedimientos para el muestreo de campo re-muestreo 2011. Dirección Nacional. Guadalajara, Jalisco. 54 p.
- Crivelli, E. y Dzendoletas, M. 2002. Una propuesta para extender el rango de aplicación de la clasificación climática de Holdridge. *Ecología Austral.* 12(1):49-53.
- Crowley, T.J. and North, G. R. 1988. Abrupt climate change and extinction events in earth history. *Science.* 240:1095-9203.
- Herrán, C. 2012. El cambio climático y sus consecuencias para América Latina. Proyecto Energía y Clima de la Fundación Friedrich Ebert - FES. México. 321 p.
- Holdridge, L. R. 1996. *Ecología basada en zonas de vida*. Editorial IICA. San José, Costa Rica. 219 p.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2013. Extractor rápido de información climatológica. Eric III Versión 3.2.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. *Climate Change 2007, synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland. 104 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Stocker, T. F.; Qin, D.; G.-K.; Plattner, M. Tignor, S.; Allen, K. Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y. Bex, V. and Midgley, P. M. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
- Jardel, P. E.; Morfin, R. E.; Alvarado, C. E.; Pérez, S. D. y Rodríguez, G. J. 2011. Memoria técnica caracterización, clasificación y mapeo de los regímenes potenciales de incendios en los ecosistemas forestales de México. 65 p.
- Jiménez, M.; Chain, A. y Locatelli, B. 2010. Efectos del cambio climático en la distribución de zonas de vida en Centroamérica. *Rec. Nat. Amb.* 59(60):32-40.
- Landis, J. R. and Koch, G. G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics.* 33:159-174.
- Lugo, A. E.; Baron, J. S.; Frost, T. P.; Cundy, T. W. and Dittberner, P. 1999. *Ecosystem processes and functioning. Ecological stewardship: a common reference for ecosystem management*. 2. Elsevier Science, New York. 30 p.
- Mendoza, F.; Chévez, M. y González, B. 2001. Sensibilidad de las zonas de vida de Holdridge en Nicaragua en función del cambio climático. *Revista Forestal Centroamerica.* 443 p.
- According to the above, sensitivity was observed for bioclimatic transition zones against small changes in temperature and precipitation, thus confirming the importance of its delimitation.

Conclusions

Bioclimatic zoning system under the methodology of Holdridge was developed. By zoning was obtained 29.61% of the land area of Mexico was located in transitional areas, which makes them particularly sensitive to climate variations. An increase of 0.7 °C can produce changes to 34.65% causing said surfaces located in warmer regions and regions latitudinal drier moisture. The demarcation of sensitive areas to climate changes provides valuable information for future research concerning the adaptive capacities of ecosystems and the effects that climate change may cause on a large-scale.

End of the English version



- Oreskes, N. 2004. Beyond the ivory tower. The scientific consensus on climate change. *Science.* 1103618.
- Roeckner, E.; Arpe, K.; Bengtsson, L.; Christoph, M.; Claussen, M.; Dümenil, L.; Esch, M.; Giorgetta, M.; Schlese, U. and Schulzweida, U. 1996. The atmospheric general circulation model ECHAM-4: model description and simulation of present-day climate Max-Planck Institute for Meteorology, Report Núm. 218. Hamburg, Germany. 90 p.
- Samani, Z. 2000. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *J. Irrig. Drainage Eng.* 126(4):265-267.
- Tosi, J. A. 1997. An ecological model for the prediction of carbon offsets by terrestrial biota. Tropical Science Center. San José, Costa Rica. 32 p.
- Trejo, I.; Hernández, L. J. y Villers, L. 2007. Afectación de las comunidades vegetales de México ante el cambio climático. *Geopolítica, globalización y cambio ambiental: retos para el desarrollo latinoamericano*. Bogotá, Colombia. 45 p.
- Vergara, W.; Kondo, H.; Pérez, E.; Méndez, P. J.; Magana, R. V.; Martínez, A. M.; Ruiz, M. J.; Ávalos, R. G. and Palacios, E. 2007. Visualizing future climate in Latin America: results from the application of the earth simulator. *In: Latin America and Caribbean Region Sustainable Development Working Paper No. 30*. The World Bank, Washington, DC. 82 p.