

## **EL CALENTAMIENTO GLOBAL, ¿AMENAZA PRESENTE O FUTURA PARA EL PARQUE NATURAL PICO DE ORIZABA?**

Carlos Manuel WELSH RODRIGUEZ<sup>1</sup>, Federico CASARIN PUGLIA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Centro de Ciencias de la Tierra. Universidad Veracruzana.*

<sup>2</sup>*Facultad de Economía- Lic. en Geografía. Universidad Veracruzana.*

[cwelsh@uv.mx](mailto:cwelsh@uv.mx)

### **RESUMEN**

El Parque Nacional Pico de Orizaba (PNPO) cuenta con varios microclimas, además incluye en su área el Volcán Citlaltépetl, que cuenta con una altitud de 5675 m.s.n.m. convirtiéndose en la cima más alta de México, y en él -un sistema glaciar- de los últimos en el país, mismo que ha experimentado una recesión enigmática del hielo del glaciar (Weissling, B. & Lewis, M., 2013).

El glaciar Jamapa es el más grande de México, Jamapa del náhuatl Xam-a-pan que significa "en el río de los adobes" nombrado así por el río que nace en las laderas del Pico de Orizaba, alimentado por el deshielo de sus nieves y del glaciar. Éste cuenta con un área de 0.62 kilómetros cuadrados, se establece aproximadamente a partir de una altitud de los 5100 metros sobre el nivel del mar (msnm), sobre la cara norte del Pico de Orizaba ubicado entre los estados de Puebla y Veracruz. Se trata del último de catorce glaciares con que contaba el volcán (Cortés J. y Delgado H. 2015).

El objetivo del presente trabajo es analizar el comportamiento climático de la zona y su relación con el calentamiento global, para ello se ha realizado un estudio en un período de cuatro décadas del comportamiento de la temperatura, que permita observar tendencias y cuantificación de cambios estructurales, así como el posible efecto del calentamiento global sobre la formación de hielo en el glaciar.

**Palabras clave:** Glaciar, calentamiento, cambio climático.

### **ABSTRACT**

Pico de Orizaba National Park (PNPO) has several microclimates, also includes in its area the Citlaltépetl Volcano, which has an altitude of 5675 m.s.n.m. becoming the highest peak in Mexico, and in it -a glacier system- of the last in the country, who has experienced an enigmatic glacier ice recession (Weissling, B. & Lewis, M., 2013).he summary should reflect clearly and briefly the purpose of the research, working method and the main results and conclusions obtained.

The Jamapa glacier is the largest in Mexico, Jamapa del Nahuatl Xam-a-pan which means "in the river of the adobes" named after the river that rises on the slopes of the Pico de Orizaba, fed by the melting of its snows and glacier. This has an area of 0.62 square kilometers, is established approximately from an altitude of 5100 meters above sea level (m.s.n.m.), and on the north face of the Pico de Orizaba located between the states of Puebla and Veracruz. This is the last of fourteen glaciers the volcano had (Cortés J. and Delgado H. 2015).

The objective of this paper is to analyze the climate behavior of the area and its relationship with global warming, for which a study has been made over a period of four decades of the behavior of temperature, to observe trends and quantification of

structural changes, as well as the possible effect of global warming on ice formation in the glacier.

**Key words:** Glacier, warming, climatic change.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El IPCC define al efecto invernadero como el “efecto radiativo infrarrojo de todos los componentes de la atmósfera que absorben en el infrarrojo”, es decir, la atmósfera, al ser una mezcla de gases, absorbe la energía reemitida por el suelo y la almacena generando una especie de invernadero. A lo largo de las últimas décadas, dicho efecto se ha visto modificado por diversas causas, dando como resultado un cambio en el clima, tanto a escala regional como en casos extremos. En el Sexto Informe de Evaluación (2021) del IPCC, se “evalúa nueva evidencia científica relevante de un mundo cuyo clima está cambiando constantemente, abrumadoramente debido a la influencia humana”, refiriéndose a influencia humana por: “Las actividades humanas que lideran o contribuyen a una respuesta climática, tales como las emisiones de gases de efecto invernadero inducidas por el humano, que subsecuentemente alteran las propiedades radiativas de la atmósfera, resultando en un calentamiento del sistema climático. (IPCC, 2021). El cambio climático es el problema más urgente y amenazador al que nos enfrentamos actualmente, se espera que la temperatura promedio de la Tierra aumente de uno a seis grados para el año 2100, dependiendo de la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2013). Sin embargo, el calentamiento global no se produciría de manera uniforme en todo el mundo, sino que algunas zonas corren mucho más riesgo, entre las que se encuentra el Parque Nacional Pico de Orizaba (Cortes et al., 2015).

El Parque Nacional Pico de Orizaba, es considerado un área importante de captación para la recarga de los mantos acuíferos y el mantenimiento de la red hidrológica superficial, cuenta con un gran número de especies de animales y vegetales, además de contar con el mayor glaciar en México (CONANP 2015).

Un cambio significativo en el clima puede tener graves consecuencias, con el simple aumento en la temperatura media y la falta de precipitación pluvial continua puede propiciar la aparición de incendios, plagas y enfermedades, así como la pérdida de biodiversidad, una aceleración del derretimiento del glaciar Jamapa, sin olvidar los problemas socioeconómicos para los municipios conurbanos (Rodríguez et al., 2010). El presente trabajo de investigación tiene como función realizar una zonificación climática que corresponde a la detección de áreas geográficas homogéneas en sus características climáticas establecidas dentro del Parque Nacional Pico de Orizaba, con el objetivo de poder identificar la presencia del cambio climático a través de la detección y cuantificación de tendencias de cambio en las series de tiempo de temperaturas, esto conforme a una selección de estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio.

### **1.1. Parque Nacional Pico de Orizaba**

El Parque Nacional Pico de Orizaba (PNPO) se localiza entre los 19° 00' 01.12" N, 97° 22' 07.07" W; 18° 57' 00.57" N y 97° 17' 17.91" W; 19° 02' 27.57" N, 97° 12' 09.11" W y los 19° 09' 38.04" N y los 97° 15' 35.93" W. (figura 1). Las cotas

altitudinales en las cuales se encuentra en Parque Nacional van de los 3,038 a los 5,636 msnm. Se encuentra dentro del territorio de cinco municipios, al suroeste Chalchicomula de Sesma y Atzizintla; al noroeste, Tlachichuca en el estado de Puebla; al noreste, Calchahuaco y al sureste, La Perla en el estado de Veracruz; aproximadamente a 210 kilómetros al este de la Ciudad de México, en el borde de la Meseta Central (Carrasco et al., 1999).

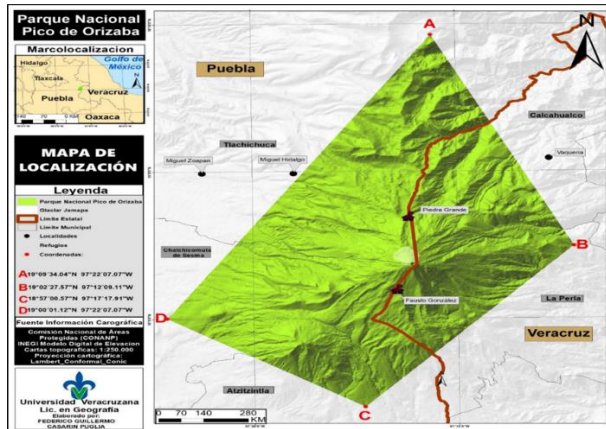


Figura 1. Mapa de Localización, Parque Nacional Pico de Orizaba (Fuente Comisión Nacional de Áreas Protegidas-CONANP)

El PNPO es un estratovolcán cuaternario, que ha sido construido sobre rocas calizas y lutitas de edad Cretácica (Yañez et al., 1982). Se considera un volcán activo, pero en estado de reposo de acuerdo con Mooser (1958). El volcán Citlatepetl, que es la montaña más alta de México y la tercera en Norteamérica, forma parte del Sistema Neovolcánico. En esta provincia atraviesa al estado de Veracruz en su porción central, siguiendo una dirección este-oeste y se extiende desde el sur de Papantla hasta el norte de Córdoba. El PNPO es punto de separación de dos Regiones Hidrológicas y tres Cuencas Hidrográficas de acuerdo con la regionalización de CONAGUA (2018). Una de ellas es la Región Hidrológica Balsas con el No. 18 localizada en el sureste de la república (Oaxaca, Puebla, Guerrero, Tlaxcala y México), que comprende la Cuenca del Río Atoyac y sus afluentes. La siguiente Región Hidrológica es el Papaloapan corresponde a la No. 28, que abarca la Cuenca del Río Papaloapan y sus afluentes, así como la Cuenca del Río Jamapa y sus afluentes (CONAGUA, 2018). Los ríos más importantes que se originan dentro del polígono del Parque Nacional son el Blanco, el Cotaxtla, el Jamapa, el Metlac y el Orizaba.

## 1.2. Antecedentes

La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) define las áreas naturales protegidas como superficies de tierra y/o mar especialmente consagradas a la protección y al mantenimiento de la diversidad biológica, así como de los recursos naturales y los recursos culturales asociados, y manejadas a través de medios jurídicos u otros medios eficaces (UICN, 2011). En ese sentido, este fenómeno del cambio

climático representa una amenaza a la capacidad de las áreas naturales protegidas de poder cumplir su misión de conservación de la biosfera. Los pronósticos de cambio en frecuencia, intensidad y espacio de los fenómenos atmosféricos cuestionan los métodos actuales, las cuales se ven amenazadas por estas variaciones y por la posible ocurrencia de eventos catastróficos. El cambio climático representa una amenaza que pone en riesgo a los ecosistemas y sus componentes (Medina et al., 2013). Según las predicciones, como consecuencia del cambio climático las aéreas protegidas podrían ser afectadas de diversas formas:

- Pérdida de biodiversidad.
- Invasión por nuevas especies de plagas.
- Incremento de ocurrencia de incendios y de inundaciones.
- Migración de especies.
- Aumento de las presiones antrópicas: consumo, contaminación, urbanización.

El cambio climático puede alterar fundamentalmente muchos de los ecosistemas únicos a nivel mundial; sistemas, especies de plantas y animales en peligro de extinción, recursos que protegen los parques nacionales ya que en ellos contienen espacios naturales relativamente prístino y esto les da la capacidad de ser un recurso esencial para vigilar los efectos de cambio de clima (Scott, 2000). Estudios climáticos en Estados Unidos han detectado el derretimiento de los glaciares en el Parque Nacional Glacier (Vaughan et al., 2013), donde el glaciar Agassiz retrocedió 1,5 km de 1926 a 1979 (Pederson et al., 2004), mientras que en el Parque Nacional Glacier Bay y Preserve, el glaciar Muir registró la mayor pérdida de hielo en donde perdió 640m en sus tramos más bajos desde 1948 hasta 2000 (Lanser et al., 2007). Otros análisis confirman que la pérdida de masa de los glaciares de Alaska y el oeste de América del Norte en el período 1960-2010 (Marzeion et al., 2014). El Parque Nacional Pico de Orizaba se estableció el Decreto del Ejecutivo Federal, publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 4 de enero de 1937 (CONANP, 2015). Para 1964 la climatóloga Enriqueta (García, 1988) realizó un trabajo exhaustivo sobre la aplicación de la clasificación de Köppen a las condiciones climáticas de la República Mexicana utilizando 1900 estaciones meteorológicas operadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). En 1970 sale la primera edición que consta de 45 caratas climáticas, escala 1:500 000 por la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). Posteriormente esta misma dependencia editó otras cartas climáticas a escalas más pequeñas en diferentes fechas. La última edición consta de 16 cartas climáticas a escala 1: 1 000 000 (CONABIO), obteniendo diferentes microclimas para el Parque Nacional, de acuerdo con el gradiente altitudinal va de; clima muy frío (E) con una temperatura media anual menor a los -2 °C, clima frío (F) con una temperatura media anual entre -2 y 5 °C y clima semifrío (G) con temperatura media anual entre los 5 y 12 °C. Esto debido al Volcán Citlaltépetl que cuenta con una altitud de 5636 msnm (INEGI, 2006) convirtiéndose en la cima más alta de México, un factor dominante entre los vientos de sotavento y barlovento. La humedad generada en el Golfo de México choca con el volcán, generando una barrera, propiciando la formación de mantos freáticos, arroyos y ríos que son alimentados por los glaciares (SEMARNAP,1997).

El volcán Citlaltépetl ha sido estudiado en varias ocasiones desde el punto de vista climatológico y meteorológico, ya que cuenta con el mayor glaciar. Con el paso del tiempo, los glaciares en México han sufrido un enorme retroceso, de acuerdo con varios investigadores y no es para menos. De acuerdo con Cortes y Delgado (2015), en 1958 el país contaba con catorce glaciares, repartidos en tres estratovolcanes, el Popocatepetl, el Iztaccíhuatl y el Citlaltépetl. Actualmente se tienen datos de la investigación de Lorenzo. (1964) en el que Citlaltépetl contaba con 9 glaciares. Hoy en día solo queda uno, el glaciar Jamapa, ubicado en la cara norte el volcán.

Una de las primeras caracterizaciones climáticas hechas en el Parque Nacional es de Lorenzo (1969) en su investigación “Condiciones periglaciares de las altas montañas de México” donde describe las características del clima y del glaciar Jamapa. Mas tarde Klaus Heine (1975) en su obra “Permafrost an-Pico de Orizaba/México” asocia las condiciones climáticas con la geomorfología periglacial, donde destaca que partir de los 4600 y los 5000msnm en el volcán Citlaltépetl destaca la presencia de permafrost fósil. Para 1977 Heine, realiza otro estudio climático donde señala que el límite periglacial no se encuentra definido con precisión, pero podría iniciar después de los 4000 msnm donde la vegetación. Por su parte, Palacios, Parilla y Zamorano (1999) estudiaron con base en el análisis de sedimentos y temperatura del suelo, una morrena terminal ocasionada por el glaciar Jamapa del Citlaltépetl, los resultados se publicaron en el trabajo ‘Paraglacialmand postglacial debris flows on a Little Ice Age terminal moraine: Jamapa Glacier, Pico de Orizaba (Mexico)’.

Existen recientes investigaciones, en el 2010 se publica la investigación “Estudio de los posibles impactos del cambio climático en zonas cercanas al volcán Citlaltépetl” (Rodríguez et al., 2010) donde se correlacionaron las variables climatológicas con efectos locales en el glaciar además de integrar variables biofísicas con aspectos sociales del cambio global. Para el 2013 Weising y Lewis; analizaron imágenes LandSat y MODIS con el propósito de evaluar la recesión del hielo del glaciar. Posteriormente para el 2020, Víctor H. Soto y Hugo Delgado G. publican “Dos años de observaciones de temperatura superficial del aire y del suelo en la vertiente norte del volcán Pico de Orizaba, México”; donde observaron durante dos años la temperatura del aire y de la superficie del suelo en cuatro distintas altitudes entre el límite superior del bosque y el límite inferior del glaciar en la vertiente norte del volcán Pico de Orizaba.

## **2. MÉTODOS**

En el desarrollo del estudio se utilizaron diversos métodos cuantitativos con la intención de cumplir con el objetivo planteado, desde el análisis de datos climatológicos históricos, interpolación y generación de escenarios de futuro para la construcción de hipótesis. Para este trabajo de investigación los datos espaciales (temperatura-precipitación) tienen una gran importancia en el proceso de análisis, ya que los modelos climáticos usan métodos de investigación cuantitativa para simular las interacciones atmosféricas con la topografía, en donde los datos recabados de las estaciones meteorológicas seccionadas se incorporan a los Sistemas de Información Geográfica, y con ello poder lograr un acercamiento a la justificación, que permitirá integrar la información obtenida mediante la observación directa, para abordar los

procesos climáticos en el Parque Nacional y corroborar la presencia de alguna transición de clima como consecuencia del cambio climático.

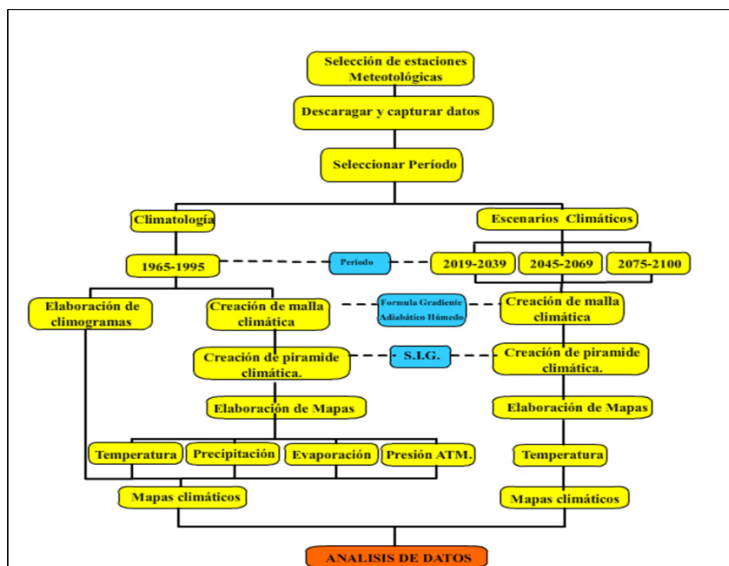


Figura 2. Diagrama metodológico. Fuente: Elaboración propia

## 2.1 Estaciones Meteorológicas

Para esta parte se utilizaron datos generados por el *Climate Computing Project* (CLICOM) administrado por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1994), para cumplir con el mínimo parámetro atmosférico cada estación se deben cubrir 250 km<sup>2</sup>, equivalente a un radio de 8.92km. Sin embargo, el área de estudio de esta investigación no cuenta con las estaciones meteorológicas de acuerdo con la norma de la OMM (1994). Por ello, se estableció un radio no máximo de 40 kilómetros, a partir de la cima del volcán Citlaltépetl, ubicada en la coordenada 19° 1'46.88"N- 97°16'12.73"O, con el fin de tener un mejor resultado a la hora de hacer la zonificación climática. Como consecuencia, entre mayor sea la distancia del punto de referencia mayor será el grado de error a la hora de hacer la interpolación. La estación meteorológica más cercana está a 10.1 km, mientras que la más alejada está a 40.1 km. A pesar de que rebasa el límite establecido solo por 100 metros, fue tomada en cuenta debido al gran porcentaje de datos observados. Se procedió a dividir la zona de estudio en 4, conforme a una mejor distribución a la hora de seleccionar las estaciones, debido a que del Parque Nacional cuenta con microclimas en las diferentes vertientes.

## 2.2 Período de estudio

Una vez localizadas las estaciones meteorológicas dentro del radio establecido, con un total de 31, se emprendió a recabar la información en cada una de ellas, para seleccionar el periodo conveniente conforme al mayor número de datos reales, descartando a su vez las estaciones que contaran con menos de 20 años de datos. En la primera exploración se alcanzaron los siguientes periodos 1965-1995, 1970-2000,

1975-2005, 1960-1990, para después concluir con los periodos 1965-1995, 1975-2005. Era indispensable que se pudiera contar con datos de 30 años, para tener fiabilidad del estudio, pero también se usaron aquellas con datos de 26 a 29 y de 25 a 20. Como resultado final, el periodo con mayor número de datos reales para el análisis fue 1965 – 1995, con un total de 12 estaciones meteorológicas, de las cuales 8 cuentan con la variable temperatura, 12 con precipitación, y 5 más únicamente con la variable evaporación distribuidas 6 en el Estado de Veracruz y 6 en el Estado de Puebla. Se extrajeron los datos mensuales de precipitación, evaporación temperatura mínima y máxima generados por el *Climate Computing Project (CLICOM)*.

### 3. RESULTADOS

En la primera etapa se elaboraron los climogramas de cada estación, en la construcción de la base de datos indispensable para el mapeo altitudinal, mediante una hoja de cálculo convencional.

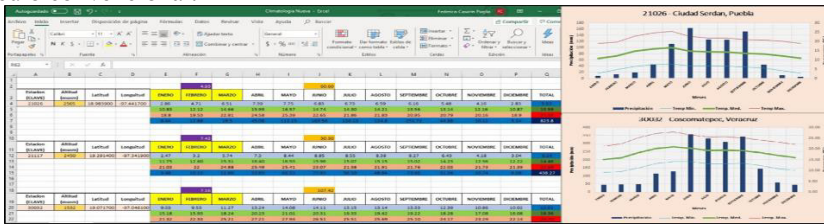


Figura 3. Elaboración de climogramas. Fuente: Elaboración propia

En la segunda etapa la tarea fue construir la malla climática, se determinó la temperatura a partir de la relación entre las diferencias altitudinales de las estaciones, se ocupó la tasa de caída adiabática estándar donde la temperatura disminuye 6.5 °C por 1,000 m de acuerdo con la International Standard Atmosphere (ISA) (ISO, 1973). Con esto la temperatura varía linealmente con un gradiente térmico constante, a partir de esta estimación, se obtuvo la siguiente formula:

$$T = T_a - \gamma(h - h_a) \text{ Ecuación 1}$$

Donde  $T_a$  es la temperatura real (°C) de la estación meteorológica,  $\gamma$  es el gradiente térmico estándar,  $(h - h_a)$  son la altitud de la estación meteorología con la altitud deseada (OACI,1993).

$$p = p_0 * \left( 1 + \frac{\gamma * h}{T - \gamma * h} \right)^{-\frac{g}{R\gamma}} \text{ Ecuación 2}$$

Para conseguir los mapas de isobaras se empleó la de presión atmosférica, se requieren varios valores como la gravedad ( $g$ ), el gradiente térmico estándar ( $\gamma$ ), la temperatura ( $T$ ), altitud ( $h$ ), el gas constante del aire seco ( $Rd$ ) que su valor es 287 J/kg/K, una atmosfera ( $p_0$ ) equivalente a 1,013.25 mb (OACI,1993).

En la tercera etapa se georreferenciaron todos los puntos altitudinales con sus respectivos datos, para realizar la interpolación Kriging de manera horizontal (franjas A-H). Con el programa de ARCGIS, se realizaron 24 interpolaciones por cada mes (temperatura mínima-media-máxima) así como 24 más para el periodo 65-95 haciendo un total de 312 en esta primera sección. Para continuar con el modelo

climático, se analizó de nuevo la topografía del área de estudio con el fin de seleccionar varios puntos geográficos superficie para la elaboración de la pirámide. En la cuarta etapa se construyen los mapas térmicos considerando el gradiente altitudinal en los sistemas de información geográfica (argis 10). El procedimiento comienza capturando los datos (temperatura-latitud-longitud-altitud) de las estaciones geográficas y de los puntos geográficos seleccionados en una hoja de cálculo estándar. La distribución altitudinal de la temperatura se reconstruye utilizando el modelo digital de elevación (DEM) del Parque Nacional Pico de Orizaba (Fries et al., 2012).

$$T_d = T_m + (R(z_d - z)) \text{ Ecuación 3}$$

Donde  $T_m$  es la temperatura mensual ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $z_d$  es la altitud determinada. Para este trabajado de investigación se seleccionó una altitud de 3300 msnm y  $z$  en la fórmula es la altitud de la estación climática o punto geográfico,  $R$  es el gradiente. Teniendo la temperatura a una altitud de 3300 msnm en cada una de las estaciones meteorológicas y puntos geográficos.

Finalmente se construyen los escenarios climáticos, se seleccionaron los siguientes modelos y escenarios climáticos; *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *Daily Surface Weather and Climatological Summaries* (Daymet-NASA), Atlas climático digital de México (Fernandez et al., 2012), MPI-ESM-LR (Max-Planck Institute), GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), y CNRMCM5 (*Centre National de Recherches Météorologiques*), estos últimos tres modelos se referenciaron con datos observados del país (Fernandez et al., 2020). Para hacer la comparación se eligió de referencia la coordenada  $19.029689^{\circ}\text{N}$  y  $-97.270203^{\circ}\text{O}$  que representa la cima del volcán Citlaltépetl.

### 3.1 Temperatura Mínima

Por cuestiones de espacio sólo se presentan los resultados de temperatura mínima, sin embargo se realizaron los análisis de temperatura máxima, precipitación, evaporación y presión atmosférica en superficie, e igualmente los mapas de la dinámica de la isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$ .

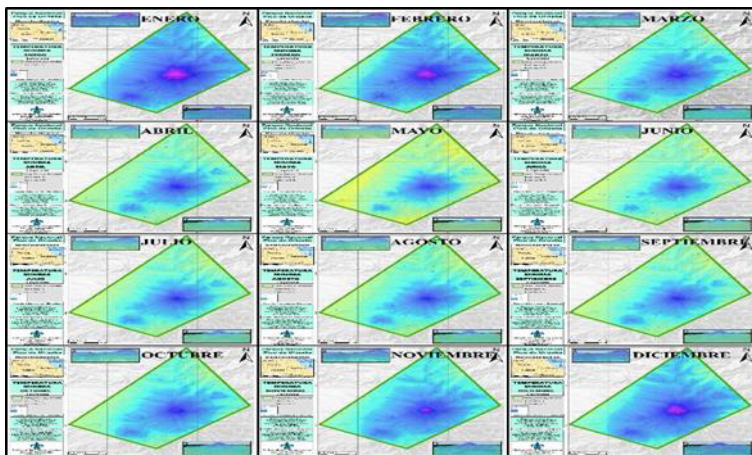


Figura 4. Temperatura Mínima. Fuente: Elaboración propia



El promedio anual obtenido para el periodo 1965-1995 en el Parque Nacional es de  $-3.1^{\circ}\text{C}$ , la temperatura en la cima del volcán Citlaltépetl es de  $-14.31^{\circ}\text{C}$ , mientras que el mayor registro se presenta en la zona baja al noroeste del Parque Nacional con una temperatura de  $2.76^{\circ}\text{C}$ . El GTV en el Parque Nacional desciende  $-0.64$  por cada 100 metros. En la zona Oeste se presenta un gradiente vertical de  $0.65^{\circ}\text{C}$  mientras que la zona Este de  $0.63^{\circ}\text{C}$ , ambas zonas tienen una diferencia de  $0.02^{\circ}\text{C}$ . La altitud promedio para la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$  con base en la temperatura mínima anual en el Parque Nacional es de 3375msnm, acorde a 3420 msnm en la zona Oeste y de 3330 msnm en la zona Este, ambas zonas tienen una diferencia de 90 metros. Los meses en que las temperaturas mínimas alcanza sus mayores niveles son diciembre, enero y febrero (figura 32), estableciendo el mes de enero como el más frío, con una temperatura promedio de  $-5.9^{\circ}\text{C}$  en el Parque Nacional (tabla 8), la temperatura mínima en la cima del volcán Citlaltépetl es de  $-16.71^{\circ}\text{C}$  mientras que en la zona baja al noreste es de  $-0.04^{\circ}\text{C}$ .

#### **4. Discusión**

La clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García (1988), es un sistema de clasificación climática ampliamente utilizada en la República mexicana su importancia es sirve para el desarrollo de políticas locales y nacionales para mitigar y adaptarse a la amenaza del cambio climático. La climatología elaborada en este trabajo de investigación presenta un modelo climático local próximo a las condiciones climáticas del periodo 1965-1995, basado en observaciones de estaciones meteorológicas instaladas en un rango menor a 40 Km, con una metodología que distribuye puntos de medidas de temperatura, en donde a primera vista corresponde con los valores de temperatura que señala Enriqueta García (1988) en su adaptación del modelo climático de Köppen, aproximándose con la transición de un tipo de clima a otro. La importancia de los modelos climáticos se suele evaluar analizando su capacidad para reproducir el clima presente, la habilidad para simular los cambios climáticos observados en las últimas décadas y el grado de ajuste entre las proyecciones de cambio climático futuro (Raisänen, 2006).

Los modelos climáticos globales son capaces de reproducir bastante bien la distribución a gran escala de las principales variables climáticas, que simulan de forma muy aceptable los grandes rasgos del cambio climático observado y que una gran parte de ellos coinciden cuantitativamente sobre muchos aspectos del cambio climático futuro (AchutaRao et al., 2004; IPCC, 2007). No obstante, a escalas espaciales pequeñas se perciben algunas diferencias entre observaciones y resultados, así como discrepancias entre los propios modelos. Por el contrario, existen modelos climáticos más certeros a la hora de representar las condiciones atmosféricas locales, como el Atlas climático digital de México (Fernandez et al., 2012), donde registra una temperatura media de  $-2.16$  en la cima, así como el modelo climático de la NOAA que tiene un registro de  $-4.12$ . En los escenarios de cambio climático de temperatura máxima y mínima para mediano y largo plazo se observa que la amenaza sobre el área glaciar es mayor de lo establecido en la literatura.

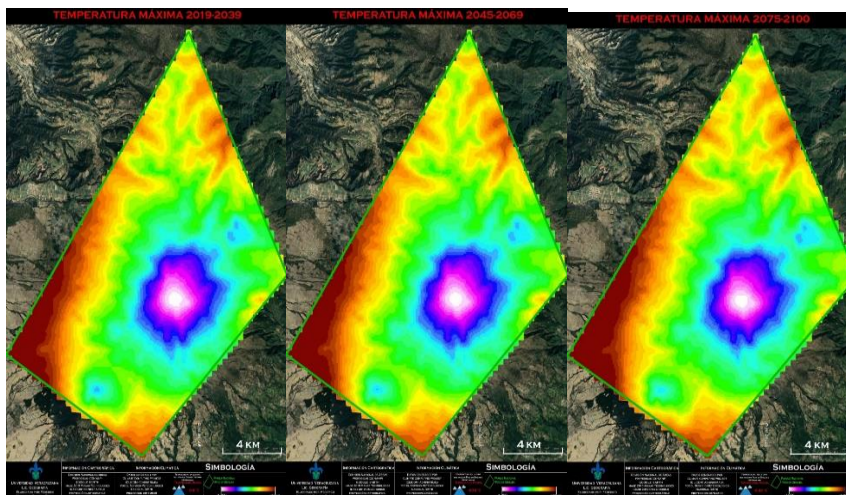


Figura 5. Escenarios de cambio climático de temperatura máxima en el PNPO.  
Fuente: Elaboración propia

## 5. CONCLUSIONES

Si continúa el aumento de la temperatura media (figura 5) de acuerdo con las proyecciones de los modelos climáticos, se desplazará el tipo de clima EFH altitudes más elevadas reduciendo su área en el Parque Nacional, lo que concuerda con estudios criosféricos mayormente dentro del ámbito glaciológico esto sobre el volcán Citlaltépetl, como lo fijan investigaciones recientes “*The recent retreat of Mexican glaciers on Citlaltépetl Volcano detected using ASTER data*” (Cortes. et al., 2012) donde se determina la altitud del frente glaciar en 4980 msnm para el año 2001, 4995 msnm para el año 2002, 4998 msnm para el año 2003, 5014 msnm para el año 2004, 5042 msnm para el año 2005 y 5065 msnm para el año 2007.

Con respecto en el análisis de la precipitación, la temperatura y la evaporación en el PNPO, fue posible evidenciar un proceso similar al efecto *Foehn*, entre los meses de abril y octubre, con una mayor intensidad en los meses de abril julio y agosto. En estos meses se observa cómo la precipitación queda concentrada en su mayoría en la zona del Este del Parque Nacional y cómo los niveles de precipitación disminuyen de forma significativa durante el descenso de las masas de aire en la zona Oeste. Además, se aprecia que, en el mes de abril y mayo el gradiente de temperatura es mayor en la zona Oeste (sotavento) que en la zona Este (barlovento), con diferencias de 0.08 °C (temperatura media) y 0.12 °C (temperatura máxima).

Respondiendo a la hipótesis, el análisis de los mapas climatológicos resultantes para ambos periodos (2019-2039, 2045-2069, 2075-2100) destaca cambios significativos en las zonas climáticas tipo E y EFH sobre el Parque Nacional. Las zonas frías disminuirán en términos relativos un 13% equivalente a 15.57 km<sup>2</sup> para el tipo de clima E (frio) y un 17% equivalente a 1.57 km<sup>2</sup> para el tipo de clima EFH (muy frio) esto en el periodo 2075-2100. Existen limitaciones a la hora de querer simular espacialmente el clima y tener una mejor precisión; algunas de ellas son: el número de estaciones meteorológicas, la cantidad de datos observados y la distancia donde se

encuentren en el área de estudio. Hay que mencionar que no es posible hacer predicciones definitivas sobre cómo evolucionará el clima durante el próximo siglo y más allá, como ocurre con los pronósticos meteorológicos a corto plazo, es posible comprender el cambio climático futuro utilizando modelos (IPCC, 2013).

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro más sentido agradecimiento por el apoyo y formar parte del proyecto *Hydrometeorologic and geologic hazards at Pico de Orizaba volcano, Mexico*, coordinado desde el centro de Ciencias de la Tierra por la Doctora Katrin Sieron.

## **REFERENCIAS**

- AchutaRao, K., C. Covey, C. Doutriaux, M. Fiorino, P. Gleckler, T. Phillips, K. Sperber, K. Taylor, 2004, An Appraisal of Coupled Climate Model Simulations. Lawrence Livermore National Laboratory UCRL-TR-202550, (disponible en [www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/aboutipcc.php](http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/aboutipcc.php)).
- Carrasco-Nuñez, G. (1999). Holocene block-and-ash flows from summit dome activity of Citlaltépetl volcano, Eastern Mexico. 88:47-66 pp
- CLICOM (Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de su plataforma web del CICESE (<http://clicom-mex.cicese.mx>))
- CONAGUA. (2018). Estadísticas del Agua en México, edición 2018. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. México.
- CONANP. (2015). Programa de Manejo Parque Nacional El Pico de Orizaba, Primera edición diciembre 2015. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México.
- Cortes-Ramos, J.; Delgado-Granados, H. (2012). The recent retreat of Mexican glaciers on Citlaltépetl Volcano detected using ASTER data. Universidad Nacional Autónoma de México. The Cryosphere Discussions, 6(4), 3149-3176.
- Cortes-Ramos, J.; Delgado-Granados, H. (2015). Reconstruction of glacier area on Citlaltépetl volcano, 1958 and implications for Mexico's deglaciation rates. En: Geofísica International num. 54 Mexico pp 111-125.
- Fernandez-Eguiarte A., J. Zavala-Hidalgo, R. Romero-Centeno 2020. Atlas Climático Digital de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/>
- Fernández Eguiarte, Zavala Hidalgo, J., y Romero Centeno, R. (2012) Atlas climático de México-Climatología de Referencia periodo 1961-2000 temperatura promedio (°C) resolución espacial 30" x30" Obtenido de Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional de Agua. ISBN: 978-607-02-3314-2: <http://atlasclimatico.unam.mx/ACM/>
- García, E., 1988, Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen, México.
- Heine, K. (1975). Permafrost am Pico de Orizaba/ Mexiko. Eiszeitalter u. Gegenwart, 26, 212-217.
- Heine, K. (1977). Zur morphologischen Bedeutung des Kammeises in Mexiko. Beobachtungen aus den Jahren 1971-1975. Zeitschrift für Geomorphologie, 21, 57-78.
- INEGI, (Instituto de Estadística, Geografía e Informática) (2006). Red Hidrográfica Digital de México, Conjunto Nacional, Esc. 1:250 000.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2007a). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III para el cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Programa de las Naciones Unidas (PNUMA).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2007b). Climate Change 2007. Synthesis report. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar4/syr/ar4_syr.pdf)

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, [doi:10.1017/CBO9781107415324](https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324).
- Lanser, C. F., R. J. Motyka, A. A. Arendt, K. A. Echelmeyer, and P.E. Geissler. (2007). Glacier changes in southeast Alaska and northweest British Columbia and contribution to sea level rise. *Journal of Geophysical Research* 112: F01007.
- Lorenzo, J. L. (1964). Los glaciares de México (segunda edición). Monografías del Instituto de Geofísica. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lorenzo, J. L. (1969). Condiciones periglaciares de las altas montañas de México. Serie Paleocología 4: México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Marzeion, B., J. G. Cogley, K. Richter, and D. Parkes. (2014). Attribution of global glacier mass loss to anthropogenic and natural causes. *Science* 345:919-921.
- Medina E.C., Taveras M.A., McCarthy R., Lucas S. (2013). Áreas protegidas y cambio climático: Perspectivas legales y acciones de gestión en República Dominicana. UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza) (2013) Editor | Lugar de publicación IUCN | Gland, Switzerland.
- Mooser, F., Meyer-Abich, H., McBirney, A. R., (1958), Catalogue of the active volcanoes of the world including solfatar fields. Part VI Central America: Napoli International Volcanology Association, 1-36p.
- OMN (1994) (Organización Meteorológica Mundial) Informe anual 1993. N°800 ISBN: 978-92-63-30800-9
- Pederson, G. T., D. B. Fagre, S. T. Gray, and L. J. Graumlich. (2004). Decadal-scale climate drivers for glacial dynamics in Glacier National Park, Montana, USA. *Geophysical Research Letters* 31:L12203.
- Räisänen, J., 2006, How reliable are climate models?, *Tellus*, 59A, 2-29
- Scott, D. and R. Suffling. (2000). Climate Change and Canada's National Park System. Adaptation and Impacts Research. Quebec, Canada.
- SEMARNAP. (1997). Programa de Conservación de la Vida Silvestre y Diversificación Productiva en el Sector Rural. SEMARNAP. Instituto Nacional de Ecología México, D.F. 207p
- UICN, (2011) Las áreas protegidas de América Latina. Situación actual y perspectivas para el futuro. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, Quito, Ecuador.
- Vaughan, D. G., J. C. Comiso, I. Allison, J. Carrasco, G. Kaser, R. Kwork, P. Mote, et al. (2013). Observations: cryosphere. Pages 317-382 in T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, et al., eds. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, New York.
- Weissling, B. y Lewis, M. (2013). Recesión del hielo enigmática en un glaciar subtropical Pico de Orizaba, México. USTA Mexico Center, Xalapa, Veracruz.
- Yáñez-García C., García-Durán, S., (1982), Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz: México, Comisión Federal de Electricidad, Reporte Técnico, 96 p.