



**A meteorological monitoring system in a temperate forest from  
landscape analysis**  
**Sistema de monitoreo meteorológico en un bosque templado a  
partir de análisis del paisaje**

Gabriel Humberto Virgen-Cobos<sup>1</sup>, Jesús David Gómez-Díaz<sup>2</sup>, Ma. Amparo Borja-  
de la Rosa<sup>1</sup>, Adán Guillermo Ramírez-García<sup>3</sup>, Alejandro Ismael Monterroso-  
Rivas<sup>2\*</sup>

Fecha de recepción/Reception date: 16 de marzo de 2022  
Fecha de aceptación/Acceptance date: 5 de octubre de 2022

<sup>1</sup>División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. México.

<sup>2</sup>Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. México.

<sup>3</sup>Centro Regional Universitario del Noroeste, Universidad Autónoma Chapingo. México.

\*Autor para correspondencia; correo-e: [aimrivas@correo.chapingo.mx](mailto:aimrivas@correo.chapingo.mx)

\*Corresponding author; e-mail: [aimrivas@correo.chapingo.mx](mailto:aimrivas@correo.chapingo.mx)

### Resumen

El monitoreo de variables meteorológicas es importante para el estudio de procesos biofísicos como el desarrollo y crecimiento de plantas, captura y retención de agua, aumento de nutrientes y aprovechamiento de servicios ambientales. El objetivo del estudio fue proponer un sistema de monitoreo meteorológico a partir del análisis del medio natural que proporcione una base de datos representativa. La propuesta se desarrolló en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, en el centro de México. El método incluyó la representatividad de las condiciones biofísicas en un bosque con clima templado semifrío. Primero, se generaron mapas de geoformas, clima y vegetación para delimitar las unidades cartográficas homogéneas de paisaje. Posteriormente, mediante criterios de emplazamiento, se seleccionaron tres unidades cartográficas para el establecimiento de tres estaciones meteorológicas. Los resultados incluyeron la caracterización del paisaje, así como la propuesta para establecer las estaciones meteorológicas. El sistema se integró con dos estaciones automáticas *Davis Instruments* y otra que opera con microcontrolador de código abierto *Arduino*. Los datos se recuperan mensualmente en una computadora portátil con cable *USB*. Antes de la instalación de las estaciones, las mediciones dadas por los sensores se compararon con los valores de una estación de referencia. Los datos de los primeros días de operación revelaron diferencias en las variables de las unidades de paisaje, y se concluye que ubicar las estaciones en una trayectoria altitudinal puede contribuir a relacionar el clima con diferente vegetación y geoformas.

**Palabras clave:** Unidades cartográficas, comparación, geoforma, instalación, estaciones meteorológicas, representatividad. **Abstract**

Monitoring meteorological variables is essential in studying plant biophysical processes such as the development and growth, capture and retention of water, increase of nutrients and use of environmental services. The objective of this work was to propose a meteorological monitoring system based on the analysis of the natural environment to provide a representative database. The proposal was developed in *Zoquiapan* Experimental Forest Station, central Mexico. Methods include the representativeness of the biophysical conditions in a semi-cold temperate forest in central Mexico. First, maps of geoforms, climate and vegetation were generated to delimit the homogeneous cartographic landscape units. Subsequently, utilizing location criteria, three

cartographic units were selected to establish three meteorological stations. The monitoring system has two Davis Instruments automatic stations and another with an Arduino open-source microcontroller. Data is recovered monthly on a laptop with a USB cable. Before the installation of the stations, the sensors were subjected to a comparison with a reference station. It was shown that the data of the first days of operation revealed differences in the climate between the units concluding that locating the stations on an altitudinal trajectory can contribute to relating the climate with different vegetation and geoforms.

**Keywords:** Cartographic units, comparison, geoform, installation, meteorological stations, representativeness.

## Introducción

El cambio climático es un fenómeno que implica un problema global con consecuencias regionales que afectan tanto a los sistemas naturales, como a los antrópicos. Una de las principales causas de este proceso es la concentración de gases de efecto invernadero (IPCC, 2021). Estos cambios han impactado y modificado el entorno natural generando desequilibrio en los ecosistemas y en los recursos naturales (Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007); como consecuencia, la preocupación por los efectos actuales y futuros del cambio climático han propiciado la creación de iniciativas sociales, políticas y científicas que incidan sobre ellos (Reyes *et al.*, 2018).

El monitoreo de variables meteorológicas es importante para el estudio de los procesos biofísicos como el desarrollo y crecimiento de plantas, captura y retención de agua, aumento de nutrientes y aprovechamiento de los servicios ambientales (Brauman, 2015). En este contexto, las variables más críticas son la temperatura y la humedad del aire, la precipitación, radiación solar, radiación fotosintéticamente activa y la evaporación (Li, 2014).

Las observaciones meteorológicas, así como las ambientales y geofísicas, se utilizan para la realización de análisis meteorológicos en tiempo real, en predicciones y alertas meteorológicas, para estudios climáticos, en diversas actividades relacionadas con aspectos meteorológicos como las operaciones de vuelo en aeródromos locales, en la construcción de

instalaciones terrestres y marinas, en disciplinas como la hidrología y agricultura, y en la investigación meteorológica y climatológica (OMM, 2014).

En el estudio de los efectos del clima en el crecimiento de las coníferas, es importante la relación de la temperatura con la precipitación (Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007). Así, se ha determinado que la evaporación anual tiene mayor incidencia en la vegetación durante las temporadas secas que en las estaciones sin limitaciones de humedad, y que la afectan la velocidad del viento, la radiación solar, el déficit de presión de vapor y la humedad relativa, además presenta variaciones en escalas temporales breves (Pompa-García *et al.*, 2013).

Gómez-Mendoza y Arriaga (2007), en su estudio sobre la vulnerabilidad al cambio climático de 34 especies de encino y pino, confirman que la distribución de muchas especies y comunidades está determinada, en gran medida, por las variables climáticas, por lo tanto, los cambios en el clima modificarán su distribución y abundancia. Algunas de esas variables son la precipitación, temperatura y evapotranspiración, además de una mayor frecuencia de incendios y tormentas.

Dado que en la Estación Experimental Forestal Zoquiapan (EFEZ), centro de investigación de la Universidad Autónoma Chapingo, se carecía de registros meteorológicos, se procedió a establecer un sistema práctico, rápido y preciso de monitoreo meteorológico que proporcionara autonomía en el manejo y análisis de datos para los estudios asociados al comportamiento, dinámica de la vegetación y a los servicios ecosistémicos del bosque templado de clima frío localizado en su zona de influencia.

En primera instancia, se zonificó biofísicamente el área, y se seleccionaron tres unidades cartográficas de paisaje homogéneas y representativas en donde se ubicaron igual número de estaciones meteorológicas.

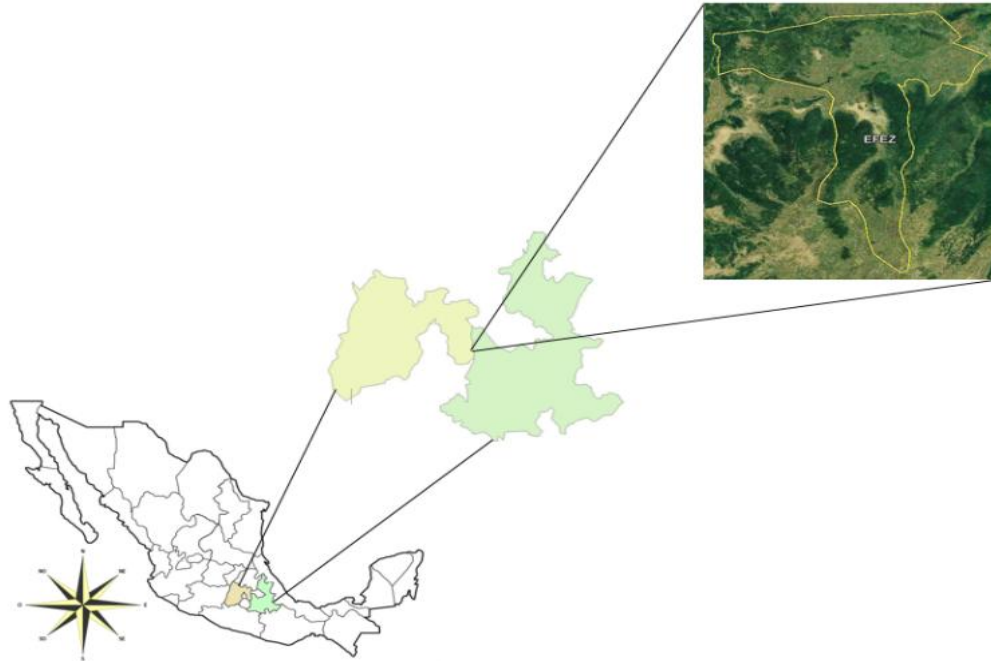
El objetivo del presente estudio fue proponer un sistema de seguimiento meteorológico, a partir del análisis del paisaje natural y de las unidades homogéneas y que proporcione una base de datos representativa de la zona. La hipótesis hace referencia a que es posible analizar el paisaje y, con base en su variabilidad, identificar los sitios para ubicar las estaciones de monitoreo del clima. El sistema meteorológico estaba compuesto por dos estaciones meteorológicas automáticas comerciales de gama media (que incluye registros climáticos e

investigación), y una estación de bajo coste que funciona con un registro *Arduino* de datos de código abierto. Previo a su instalación en los lugares seleccionados, se realizaron pruebas de comparación de sus sensores.

## **Materiales y Métodos**

### **Área de estudio**

La Estación Experimental Forestal Zoquiapan se localiza al noroeste del volcán Iztaccíhuatl y al suroeste del Parque Nacional Zoquiapan, en las siguientes coordenadas: 19°12'30" y 19°20'00" latitud N, y 98°30'00" y 98°42'30" longitud O. Ocupa una superficie de 1 624.23 ha, a una altitud de 3 080 a 3 670 m (Blanco *et al.*, 1981), en los municipios Ixtapaluca y Chalco, Estado de México (Figura 1).



**Figura 1.** Localización de la zona de estudio.

## **Unidades cartográficas homogéneas del paisaje**

Se utilizó la metodología propuesta por Gómez *et al.* (2008) para generar mapas de geformas, clima y vegetación con un Sistema de Información Geográfica (*GIS, ArcMap 10.1*). Las unidades homogéneas de paisaje se definieron como aquellas que comparten los atributos fisiográficos con muy poca variación espacial. Los tres mapas se fusionaron para generar las unidades cartográficas homogéneas del paisaje, a las que se asignó un nombre a partir de los atributos del suelo y la vegetación, el clima y la geforma.

**Mapa de geformas.** Se usó el Modelo de Elevación Digital (INEGI, 2016c) del Estado de México, Puebla y Tlaxcala, a partir del cual se determinaron intervalos altitudinales cada 100 m; para la pendiente, se siguió el criterio del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y otras instituciones en el procedimiento de bases de datos digitales sobre suelos y terrenos (van Engelen y Dijkshoorn, 2013), el cual se basa en la evaluación de la

degradación del suelo (*Global Assessment of Human-Induced Soil Degradation* o *GLASOD*), y las curvas de nivel se establecieron cada 10 m. Posteriormente, se superpusieron los mapas de estructuras geológicas (INEGI, 2016b) y el de cuerpos de agua (INEGI, 2016a) para caracterizar las unidades geomorfológicas de la zona de estudio.

**Mapa climático.** Se aplicó la metodología de Gómez *et al.* (2008), la cual emplea los datos anuales y mensuales de temperatura y precipitación. Para la primera variable, los métodos de interpolación lineal simple se complementaron con el análisis estadístico. Para la segunda, se utilizó un método gráfico con criterio de expertos, y se hicieron analogías con zonas vecinas de las cuales se disponía de información de la precipitación.

A partir del Extractor Rápido de Información Climática (ERIC, versión 1.0) (IMTA, 2016) se obtuvieron las temperaturas máximas y mínimas y la precipitación media anual de las 22 estaciones climatológicas más cercanas a la zona de estudio, con datos completos de al menos los últimos 20 años. Se consideró la cuenca ubicada al oeste (cuenca del río Atoyac) y dentro de la Meseta Central para determinar la influencia de los vientos, y con ello, determinar las estaciones climatológicas de influencia (Juárez *et al.*, 2005).

**Mapa de temperaturas.** Los datos de las temperaturas máximas y mínimas mensuales registradas en las estaciones climatológicas se utilizaron para obtener las temperaturas medias anuales y mensuales de cada estación, las cuales se emplearon en la generación de ecuaciones simples de regresión lineal para calcular los intervalos de variación altitudinales correspondientes a las temperaturas mensuales y la media anual. A partir de la ecuación de regresión lineal anual, se construyó el mapa isotérmico a un grado Celsius; a continuación, se calculó el incremento mensual en función de los intervalos de temperatura. Los polígonos se crearon superponiendo el mapa de curvas de nivel sobre el de temperatura y altitud; las estimaciones se hicieron con el modelo de regresión lineal simple en *GIS Arc Map* 10.1.

**Mapa de precipitaciones.** La precipitación anual se obtuvo de las 22 estaciones climatológicas georreferenciadas en *GIS ArcMap* 10.1; la precipitación se estimó con el Modelo de Elevación Digital y los datos de precipitación anual de las estaciones meteorológicas, para ello se usaron analogías con regiones que tienen estaciones climatológicas, además se consideró la vegetación natural y la influencia de las unidades orográficas en la ocurrencia de lluvias (Gómez *et al.*, 2008).

**Mapa de las zonas de influencia climática.** Las áreas de influencia climática se definen como aquellas zonas que comparten la misma temperatura y precipitación anual (Gómez *et al.*, 2008). Se procedió a la intersección de los mapas de isoterma media anual y de isoyeta media anual en el *GIS ArcMap* 10.1 para crear las zonas de influencia climática; asimismo, se calcularon la temperatura y precipitación mensuales y anuales para cada área, y se determinó el tipo de clima correspondiente, de acuerdo a la clasificación de *Köppen* modificada por García (2004).

**Mapa climático final.** Una vez determinado el tipo de clima, se fusionaron los polígonos que tenían el mismo para obtener el mapa climático.

**Mapa de vegetación.** Se realizó una delimitación detallada de los usos del suelo y tipos de vegetación mediante la Serie V de usos del suelo y vegetación (INEGI, 2016d), a una escala de 1:1 000 000; los rodales se definieron con imágenes de satélite de *Google Earth*, los cuales se nombraron según su tipo de vegetación y uso del suelo, además se verificaron en campo.

Los usos del suelo y tipos de vegetación registrados por el INEGI (2016d) Serie V en la zona de estudio son los siguientes: bosque de abetos, bosque de pinos, bosque de pino-encino y pradera inducida; al comparar las unidades de uso de suelo y vegetación de la Serie V con las imágenes satelitales de *Google Earth*, se observó que los límites de los polígonos del Inegi no coincidían con los conglomerados de vegetación, por lo que se procedió a su redefinición y a precisar con mayor detalle sus fronteras.

**Mapa de unidades cartográficas homogéneas del paisaje.** Por último, se interseccionaron los tres mapas previamente definidos en *GIS ArcMap* 10.1 (geformas, clima y vegetación) para obtener las unidades homogéneas de paisaje.

## **Criterios del sitio**

Dado que no es posible establecer un sistema de vigilancia en todas las zonas resultantes, se eligieron solo tres lugares; esto, principalmente, por limitaciones económicas (Cuadro 1). A continuación, se describen los criterios considerados para la selección de las tres unidades cartográficas homogéneas de paisaje, en donde se ubicaron físicamente las estaciones meteorológicas.

**Cuadro 1.** Costo de las estaciones y gastos.

Concepto	Cantidad (MXN)	Cantidad (USD)
Estación <i>Vantage Pro2 Plus</i> (EMZ-01)	\$20 522.07	\$1 246.03
Estación <i>Vantage Pro2 Plus</i> (EMZ-02)	\$29 013.14	\$1 761.57
Estación <i>Arduino</i> (EMZ-03)	\$7 317.04	\$444.26
Transporte	\$6 347.21	\$385.38
Otros materiales	\$4 415.40	\$268.09
Total	\$67 614.86	\$4 105.33

Tipo de cambio: Dólar (EE.UU.) = \$16.47 Pesos mexicanos (noviembre de 2016).

**Representatividad.** Los lugares tienen características representativas de las geoformas, del clima y del tipo de vegetación de la zona de estudio, además, deben ser de interés para los usuarios. Para ello, se realizó un transecto altitudinal a fin de observar el comportamiento del clima en los tres sitios con diferentes altitudes, vegetación y geoformas. Se utilizó como punto base la zona las instalaciones del área de estudio (valle intermontano), con el objetivo de darle continuidad a los datos meteorológicos registrados, previamente, en ese lugar.

**Sitio despejado.** Los lugares están libres de obstáculos naturales o artificiales que obstruyan el libre tránsito de los elementos meteorológicos, preferiblemente, un terreno despejado en un radio de 20 m.

**Terreno nivelado.** Lugares sin depresiones ni pendientes que puedan limitar la instalación de las estaciones, o que dificulten el acceso para el registro de datos durante la temporada de lluvias.



**Distancia respecto al observador.** Las estaciones están cerca del lugar donde se encuentra el operador.

**Acceso fácil.** Se dispone de una vía de acceso sin obstáculos para facilitar el funcionamiento, el mantenimiento y la recolección periódica de datos, así como la vigilancia constante de las estaciones.

El primer criterio se estableció para el registro de información meteorológica valiosa y de utilidad para los proyectos de investigación que se lleven a cabo en la Estación Experimental Forestal de Zoquiapan. Los otros criterios se definieron según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Romo y Arteaga, 1989).

## Pruebas de calibración de las estaciones meteorológicas

El sistema de vigilancia se conformó por tres estaciones meteorológicas denominadas EMZ-01, EMZ-02 y EMZ-03. Las estaciones EMZ-01 y EMZ-02 son automáticas de la marca *Davis Instruments*, modelo *Vantage Pro2 Plus Wireless* (Davis, 2019); se integran por una consola *Vantage Pro2* y un registrador de datos *WeatherLink* para recibir, visualizar y almacenar datos, así como un panel solar de 7 vatios y una batería de 6 voltios y 1.4 amperios que proporciona energía constante a la consola. En el Cuadro 2 se describen los sensores de las consolas. EMZ-03 es una estación meteorológica automática construida con un microcontrolador *Arduino* conectado a un panel solar de 10 vatios y a una batería de 12 voltios y 7 amperios para un suministro constante de energía. Un módulo *microSD* funciona como registrador de datos.

**Cuadro 2.** Sensores de la estación EMZ-01, EMZ-02 y EMZ-03.

Sensor	Tipo	Intervalo	Precisión
Temperatura	Diodo de silicóna <sup>1,2,3</sup>	-40 a 65 °C <sup>1,2</sup>	± 0.5 °C <sup>1,2,3</sup>
Humedad	Condensador de película <sup>1,2,3</sup>	0 a 100 % <sup>1,2,3</sup>	± 3 % <sup>1,2,3</sup>

Dirección del viento	Potenciómetro <sup>1,2,3</sup>	0 a 365° <sup>1,2,3</sup>	± 3° <sup>1,2,3</sup>
Velocidad del viento	Sensor magnético <sup>1,2,3</sup>	1 a 89.44 m/s <sup>1,2</sup>	0.00055 m/s <sup>1,2</sup>
Radiación solar	Fotodiodo de silicona <sup>1,2</sup>	1 a 1 800 W/m <sup>2</sup> <sup>1,2</sup>	±5 % <sup>1,2</sup>
Radiación UV	Transductor <sup>1,2</sup>	0 a 199 MEDs <sup>1,2</sup>	±/-5 % <sup>1,2</sup>
Presión	Transductor <sup>1,2,3</sup>	-	± 0.05 kPa <sup>1,2,3</sup>
Pluviómetro	Balancín de descarga <sup>1,2,3</sup>	-	0.2 mm <sup>1,2,3</sup>
Humedad de la hoja	Monitor de superficie <sup>1</sup>	0 a 15 % <sup>1</sup>	-
Humedad del suelo	Resistencia Watermark <sup>1</sup>	0 a 100% <sup>1</sup>	± 0.5°C <sup>1</sup>
Temperatura del suelo	Sonda de acero <sup>1</sup>	-50 a 60°C <sup>1</sup>	± 3% <sup>1</sup>

Fuente: Sparkfun (2013) y DAVIS (2019).

1 = EMZ-01; 2 = EMZ-02; 3 = EMZ-03.

El registrador *WeatherLink* de las estaciones EMZ-01 y EMZ-02 proporciona los datos de temperatura, la humedad interior y exterior, la sensación térmica y el punto de rocío, la presión atmosférica actual y su tendencia, la precipitación actual y precipitación acumulada diaria, mensual y anual, la intensidad de la lluvia, radiación solar y UV, evapotranspiración, dirección y la velocidad del viento, las ráfagas de viento, la fase lunar y la hora de salida y puesta del sol. En el microcontrolador *Arduino* de la estación EMZ-03 se han programado los sensores con el entorno de desarrollo integrado *Arduino* para la obtención de datos sencillos referentes a temperatura, humedad, precipitación actual y diaria, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento. El costo de las estaciones y los gastos incurridos se muestran en el Cuadro 1.

Hay dos formas de verificar los sensores de las estaciones meteorológicas. La primera es la comparación de la respuesta del sensor con una medición de referencia conocida, cuando el sensor y el dispositivo de referencia están sometidos a las mismas condiciones ambientales. La segunda consiste en colocar el sensor en una condición artificial en la que su respuesta es teóricamente predecible (INE, 2010).

Se optó por utilizar el equipo de referencia del Departamento de Meteorología de la Universidad Autónoma Chapingo, una estación *Davis Instruments*, modelo *Vantage Vue Wireless*, con las mismas características que las estaciones EMZ-01 y EMZ-02. Para

comparar la medición de las estaciones, estas se colocaron a 5 m de la estación de referencia durante una semana. Las pruebas de comparación se realizaron con un muestreo cada 30 minutos, lo que dio lugar a una muestra de 336 datos, que se registraron en una hoja de cálculo de Excel 2010. Los datos se compararon mediante una prueba *t* para dos muestras, bajo el supuesto de varianzas desiguales. Los sensores probados fueron los de temperatura, humedad, presión, radiación solar, precipitación, radiación UV, dirección y velocidad del viento.

## **Instalación de las estaciones meteorológicas**

Las estaciones meteorológicas se instalaron al centro de un área de 25 m<sup>2</sup>, alrededor de la cual se colocó una valla ciclónica con una altura de 1.5 m desde el nivel del suelo, con una puerta y cerradura. Los trípodes se anclaron con tornillos al suelo con bases construidas para tal efecto; las veletas se orientaron hacia el norte, las celdas solares al sur para garantizar un uso eficiente de la radiación solar, ya que la mayor parte del año el sol está al sur de la latitud en la que se encuentran las estaciones. Los pluviómetros se nivelaron manualmente para asegurar que el soporte no estuviera inclinado hacia los lados y garantizar un registro preciso de los datos. Los sensores de radiación solar y de radiación UV se nivelaron con su burbuja de nivel.

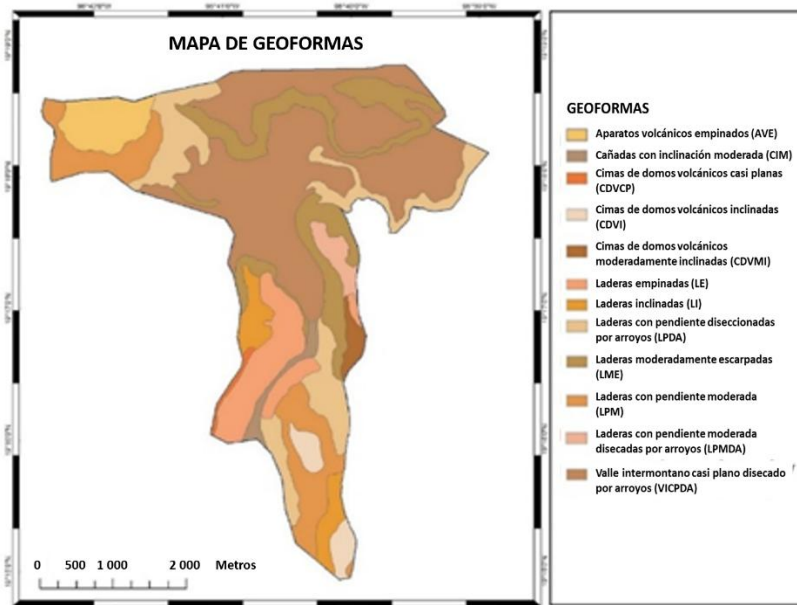
La estación EMZ-01 se instaló el 22 de julio de 2016, y las estaciones EMZ-02 y EMZ-03 el 16 de agosto de 2016. Una vez colocadas, se configuraron para empezar a funcionar y se recabaron los datos de los primeros 20 días de funcionamiento (del 20 de agosto al 8 de septiembre de 2016) para comparar el tipo de clima que se obtuvo en las tres unidades cartográficas seleccionadas.

## **Resultados y Discusión**

## Unidades cartográficas homogéneas del paisaje

Un mapa de intervalo altitudinal elaborado con base en el Modelo Digital de Elevación del INEGI (2016c) varía de 3 000 m a 3 700 m. El mapa de pendientes evidenció que en la parte sur de la zona de estudio predominan las pendientes moderadas, en las partes central y occidental las hay muy pronunciadas que disminuyen hacia el este, aunque la parte central es casi plana, y hacia el norte predominan las pendientes moderadamente inclinadas.

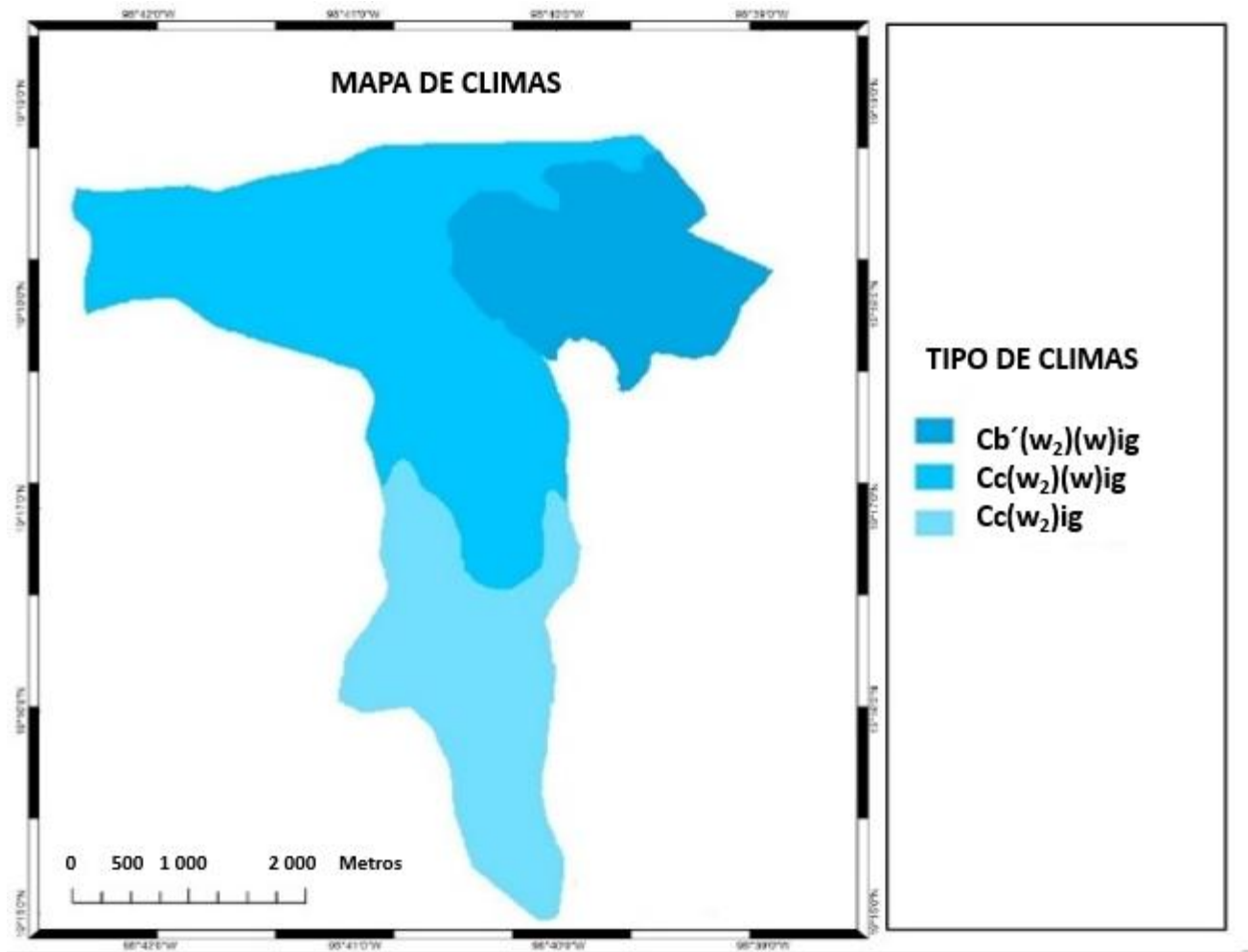
Estos mapas anteriores se superpusieron a los de las estructuras geológicas (INEGI, 2016b) y de cuerpos de agua (INEGI, 2016a) para caracterizar las unidades geológicas de la zona de estudio. Las geoformas definidas se muestran en la Figura 2.



**Figura 2.** Mapa de geoformas del área de estudio.

Los resultados indicaron las siguientes geoformas: 4.82 % de aparatos volcánicos empinados (AVE), 1.41 % de cañadas con inclinación moderada (CIM), 0.46 % de cimas de domos volcánicos casi planas (CDVCP), 2.40 % de cimas de domos volcánicos inclinadas (CDVI), 1.15 % de cimas de domos volcánicos moderadamente inclinadas (CDVMI), 8.11 % de laderas empinadas (LE), 3.87 % de laderas inclinadas (LI), 13.57 % de laderas con pendiente diseccionadas por arroyos (LPDA), 14.07 % de laderas moderadamente escarpadas (LME), 10.74 % de laderas con pendiente moderada (LPM), 1.73 % de laderas con pendiente moderada disecadas por arroyos (LPMDA) y 37.66 % de valle intermontano casi plano disecado por arroyos (VICPDA).

**Mapa de las zonas de influencia climática.** Los polígonos de las zonas de influencia climática se presentan en la Figura 3 y el Cuadro 3. Los tipos de clima según la clasificación de *Köppen* modificada por García (2004) corresponden a los templados: Cb'(w<sub>2</sub>)(w)ig (22.37 %), Cc(w<sub>2</sub>)ig (26.38 %) y Cc(w<sub>2</sub>)(w)ig (51.26 %). La ubicación y la altura influyen en la temperatura, mientras que la ubicación y la orientación en la precipitación.



**Figura 3.** Mapa de climas del área de estudio.

**Cuadro 3.** Principales climas en el área de estudio.

Tipo de clima	Descripción
$Cb'(w_2)(w)ig$	Templado Semifrío con un verano largo y fresco; el más húmedo de los climas subhúmedos, con lluvias en verano y un porcentaje de precipitaciones en invierno inferior al 5; isotérmico; con marcha de la temperatura tipo Ganges
$Cc(w_2)ig$	Templado Semifrío con verano corto y fresco; el más húmedo de los climas subhúmedos, con lluvias en verano y porcentaje de precipitaciones en invierno entre el 5 y el 10.2 por año; isotérmico; con marcha de la temperatura tipo Ganges
$Cc(w_2)(w)ig$	Templado semifrío con verano corto y fresco; el más húmedo de los climas subhúmedos, con lluvias en verano y porcentaje de precipitaciones en invierno inferior al 5%; isotérmico; con marcha de la temperatura tipo Ganges

**Mapa isotérmico.** En el Cuadro 4 se presentan los intervalos de temperatura anual y mensual estimados a partir de los modelos de regresión lineal simple para el área de estudio. En las zonas de menor altitud, la temperatura media anual estimada está en el intervalo de 10-11 °C, y en las de mayor altitud, en el de 6-7 °C.

**Cuadro 4.** Temperaturas medias anuales y mensuales en el área de estudio (°C).

Intervalo	Anual	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
6-7	7	5.4	5.7	6.5	8.1	8.0	8.4	7.1	7.7	7.6	3.6	6.5	3.1
7-8	8	6.2	6.6	7.6	9.2	9.2	9.5	8.2	8.7	8.7	4.6	7.2	3.9
8-9	9	7.0	7.5	8.7	10.3	10.4	10.6	9.4	9.8	9.7	5.5	8.0	4.6
9-10	10	7.7	8.4	9.7	11.4	11.5	11.6	10.5	10.9	10.7	6.5	8.7	5.4
10-11	11	8.5	9.4	10.8	12.4	12.7	12.4	11.6	12.0	11.8	7.5	9.4	6.1

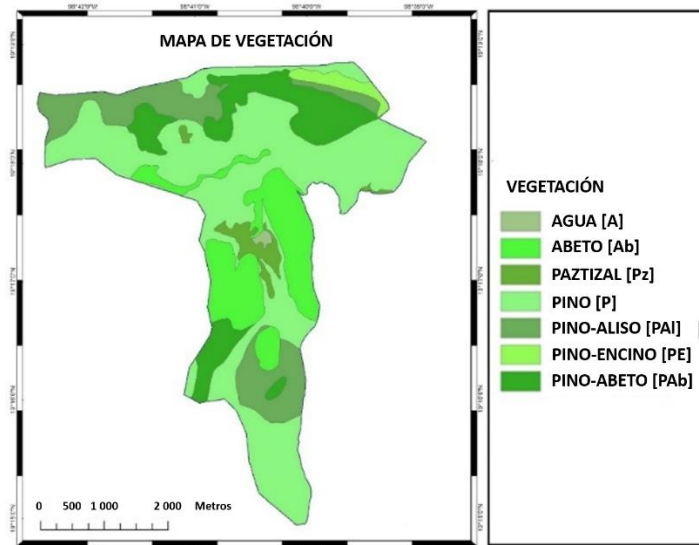
**Mapas de isoyetas.** Los vientos dominantes asociados a la formación de los sistemas nubosos que generan la mayor parte de las precipitaciones en la EFEZ provienen principalmente del Golfo de México con una trayectoria de noreste a suroeste. Por ello, en el análisis de las analogías de las estaciones climatológicas con la información de la precipitación media anual, y de la interacción de los sistemas de viento con la orografía del terreno, se estimaron valores de precipitación media anual de entre 1 000 y 1 100 mm en la parte del valle intermontano, en el cual los vientos descienden desde las laderas situadas al norte y noreste de la zona de estudio y posteriormente ascienden siguiendo el contorno de las laderas del sur-sureste, donde aumenta la condensación del vapor de agua del aire, y en consecuencia, la precipitación se presenta en un intervalo superior de 1 300-1 400 mm.

Los datos de precipitación anual de cada polígono generaron una tabla con los valores de precipitación media mensual, los intervalos de precipitación mensual y la precipitación mensual estimada para cada uno. Los intervalos de precipitación media mensual para cada intervalo de precipitación media anual se asignaron de acuerdo con la tendencia y los valores de precipitación media por grupo de estaciones climatológicas (Cuadro 5); en cada intervalo se incluyeron los promedios de los diferentes grupos de estaciones.

**Cuadro 5.** Estimación de los rangos de las precipitaciones medias anuales y de los valores mensuales en la zona de estudio (mm).

Intervalo	Anual	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1 000-1 100	1 044.8	16. 0	13.3	17.9	50.0	90.0	186.7	206.7	190.0	166.7	86.7	13.3	7.5
1 100-1 200	1 122.4	17. 0	17.5	19.2	55.0	106.7	193.3	213.3	200.0	173.3	93.3	17.5	16.3
1 200-1 300	1 234.7	18. 0	21.7	22.5	70.0	113.3	210.0	226.7	220.0	186.7	106.7	21.7	17.5
1 300-1 400	1 331.9	19. 0	23.3	27.5	90.0	130.0	230.0	233.3	230.0	193.3	113.3	23.3	18.8

**Mapa de la vegetación.** Se obtuvieron siete categorías: 0.29 % de agua (A), 16.60 % de abeto (Ab), 2.69 % de pastizal (Pz), 49.64 % de pino (P), 14.63 % de pino-aliso (PAI), 1.89 % de pino-encino (PE) y 14.26 % de pino-abeto (PAb) (Figura 4).

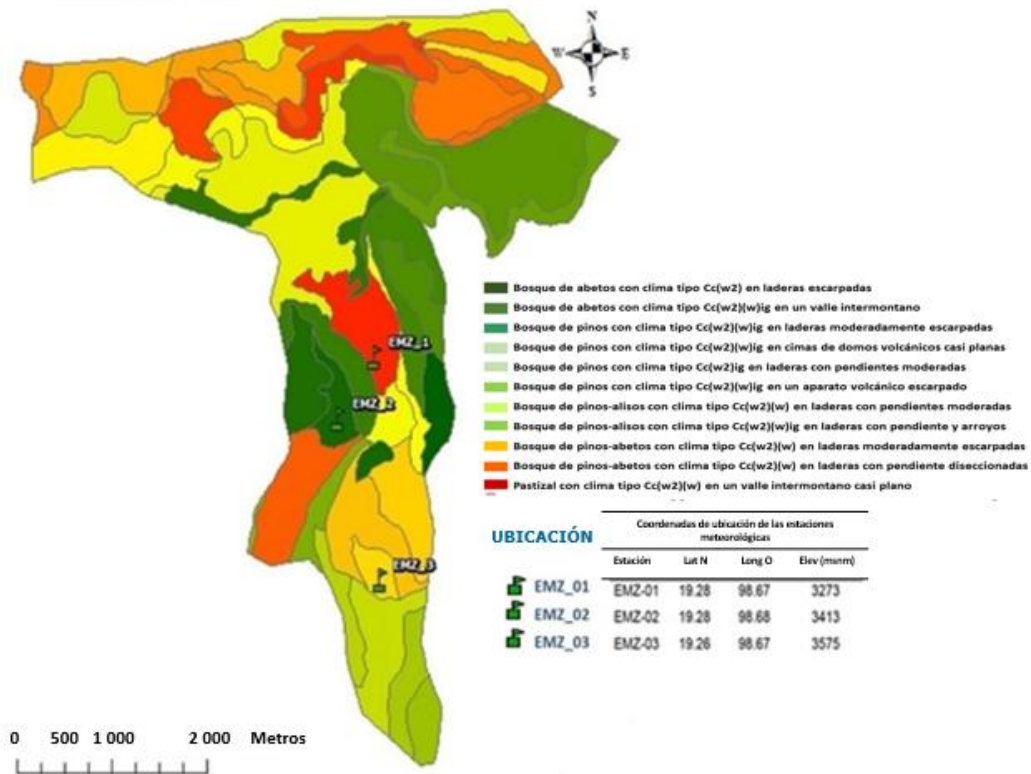


**Figura 4.** Mapa de vegetación del área de estudio.

**Mapa de unidades cartográficas homogéneas del paisaje.** Al fusionar los mapas de geformas, clima y vegetación, se obtuvieron 38 unidades cartográficas homogéneas de



paisaje a las que se asignaron nombres de acuerdo con los atributos de la vegetación, el tipo de clima y la geoforma (Figura 5).



**Figura 5.** Unidades cartográficas homogéneas del paisaje y localización de estaciones meteorológicas.

En el Cuadro 6 se presentan los criterios de selección de los emplazamientos en los que se instalaron las estaciones meteorológicas.

**Cuadro 6.** Unidades seleccionadas para las estaciones meteorológicas.

Criterios	EMZ-01	EMZ-02	EMZ-03
Representatividad biofísica			
Altitud (m)	3 273	3 413	3 575

Pendiente (%)	0-2	>40	8-15
Geoformas	Valle intermontañoso casi plano disecado por arroyos [VICPDA]	Laderas escarpadas [LE]	Cimas de domos volcánicos inclinadas [CDVI]
Tipo de clima	Cc(w <sub>2</sub> )(w)ig	Cc(w <sub>2</sub> )(w)ig	Cc(w <sub>2</sub> )ig
Vegetación	Pastizal	Abeto	Pino-aliso
Ubicación clara	Sí	Sí	Sí
Suelo plano	Sí	Sí	Sí
Cerca del operador	Sí	Sí	Sí
Acceso fácil	Sí	Sí	Sí

La estación EMZ-01 se situó a una altitud de 3 273 m en un valle intermontano casi plano, atravesado por arroyos con vegetación de pradera y un clima templado semifrío.

La estación EMZ-02 se ubicó en una ladera empinada, con una altitud de 3 413 m, 140 m más alta que la EMZ-01. Esto es relevante para el conocimiento del comportamiento climático en el cinturón térmico que puede presentarse en el intervalo altitudinal de esta unidad. La vegetación corresponde a un bosque de oyamel, especie muy importante para la investigación que se realiza sobre la planificación ecológica del paisaje (Lomas-Barrié *et al.*, 2005), la investigación forestal (Martínez-Santiago *et al.*, 2017) o el cambio de uso del suelo (Paredes-González *et al.*, 2018). Tiene el mismo tipo de clima que la EMZ-01.

La estación EMZ-03 se encuentra en una ladera escarpada a una altitud de 3 575 m, 162 m más alta que la EMZ-02 y 302 m por arriba de la EMZ-01. La cubierta vegetal natural es un bosque con asociación de pinos y sauces, también importante para las investigaciones que se llevan a cabo en la zona. La Figura 1 muestra la ubicación de las tres estaciones en los lugares que cumplían los criterios de selección.

## Pruebas de calibración de las estaciones meteorológicas

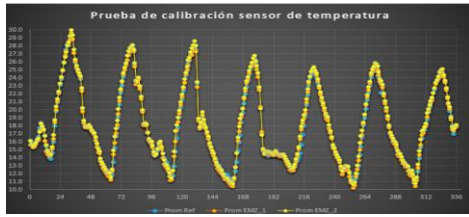
Las pruebas de calibración de las estaciones se hicieron con equipos de referencia pertenecientes al Departamento de Meteorología de la Universidad Autónoma Chapingo; se

aplicó una prueba  $t$  para dos muestras, bajo el supuesto de varianzas desiguales para cada uno de los sensores, con intervalos de 30 minutos entre las tomas de datos, durante una semana. Se obtuvieron 336 muestras para el análisis estadístico. Las pruebas comprendieron los períodos del 8 al 14 de julio de 2016 para las estaciones EMZ-01 y EMZ-02, mientras que para la estación EMZ-3, fue del 2 al 8 de junio de 2016.

En las estaciones EMZ-01 y EMZ-02 se efectuaron pruebas de calibración de los sensores de temperatura, humedad, radiación solar, radiación UV, presión atmosférica y velocidad y dirección del viento. Los datos de la estación de prueba se compararon con los de la estación de referencia. El valor estadístico  $t$  de los sensores de las dos estaciones estuvo muy por debajo del valor crítico  $t$  de dos colas (1.96). Por lo tanto, la prueba de las medias demostró que los datos son estadísticamente iguales, ya que no hay diferencias significativas entre muestras.

Se realizaron pruebas de calibración en los sensores de cada estación. Se comprobó que había diferencias significativas para los sensores de temperatura y humedad, y se procedió a calibrarlos. La calibración es un proceso frecuente para la modelización de variables climáticas (Torres-Quezada *et al.*, 2021) o la predicción agronómica de cultivos (Corvino *et al.*, 2018). Los sensores de presión atmosférica, velocidad y dirección del viento no fueron significativamente diferentes en el análisis estadístico. Los datos del sensor de precipitación se validaron con la estación de referencia mediante una prueba de lluvia artificial con un equipo simulador de lluvia, porque durante el periodo de prueba no se registró ninguna precipitación. Además, la prueba de la lluvia artificial ofrece más seguridad para el registro de datos.

Hubo diferencia significativa entre las muestras con el sensor de temperatura, por lo que se hizo un ajuste de  $-0.78$  °C en el código de programación *Arduino*. Se realizaron, nuevamente, pruebas durante una semana y se efectuó el análisis estadístico. Los resultados evidenciaron que no había diferencias significativas entre las muestras, y el sensor se consideró calibrado (Figura 6). En el caso del sensor de humedad, se determinó diferencia significativa entre las muestras; por ello, se hizo un ajuste de  $+2.34$  % en el código de programación *Arduino* y se repitieron las pruebas de calibración durante una semana. El valor estadístico de  $t$  fue inferior al valor crítico de la  $t$  de dos colas; por tanto, no hubo diferencias significativas entre las muestras.



Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales  
 Sensor de temperatura

	Referencia	EMZ_01
Media	18.053125	18.055506
Varianza	23.6164007	24.4793203
Observaciones	336	336
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	670	
Estadístico t	-0.0062931	
P(T<=t) una cola	0.49749036	
Valor crítico de t (una cola)	1.64713108	
P(T<=t) dos colas	0.99498071	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96351098	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales  
 Sensor de temperatura

	Referencia	EMZ_02
Media	18.053125	18.3674107
Varianza	23.6164007	24.4675392
Observaciones	336	336
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	670	
Estadístico t	-0.8307957	
P(T<=t) una cola	0.20319249	
Valor crítico de t (una cola)	1.64713108	
P(T<=t) dos colas	0.40638499	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96351098	

## Humedad relativa



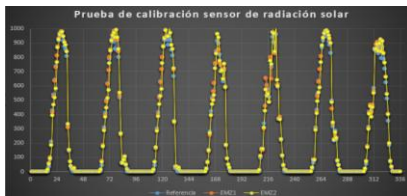
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales  
 Sensor de humedad relativa

	Referencia	EMZ_01
Media	63.9642857	65.4375
Varianza	436.589765	419.034888
Observaciones	336	336
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	670	
Estadístico t	-0.923196	
P(T<=t) una cola	0.17811871	
Valor crítico de t (una cola)	1.64713108	
P(T<=t) dos colas	0.35623741	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96351098	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales  
 Sensor de humedad relativa

	Referencia	EMZ_02
Media	63.9642857	62.6904762
Varianza	436.589765	452.315849
Observaciones	336	336
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	670	
Estadístico t	0.78315244	
P(T<=t) una cola	0.21690717	
Valor crítico de t (una cola)	1.64713108	
P(T<=t) dos colas	0.43381433	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96351098	

## Radiación solar



Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales  
 Sensor de radiación solar

	Referencia	EMZ_01
Media	252.044643	257.895833
Varianza	120916.132	126887.932
Observaciones	336	336
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	670	
Estadístico t	-0.2154565	
P(T<=t) una cola	0.41473849	
Valor crítico de t (una cola)	1.64713108	
P(T<=t) dos colas	0.82947697	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96351098	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales  
 Sensor de radiación solar

	Referencia	EMZ_02
Media	252.044643	252.973214
Varianza	120916.132	123291.507
Observaciones	336	336
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	670	
Estadístico t	-0.0344433	
P(T<=t) una cola	0.48626694	
Valor crítico de t (una cola)	1.64713108	
P(T<=t) dos colas	0.97253388	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96351098	

## Presión



Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales  
 Sensor de presión

	Referencia	EMZ_01
Media	1009.43445	1009.60089
Varianza	4.79670623	9.76892457
Observaciones	336	336
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	600	
Estadístico t	-0.7994282	
P(T<=t) una cola	0.21217926	
Valor crítico de t (una cola)	1.64739719	
P(T<=t) dos colas	0.42435852	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96392562	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales  
 Sensor de presión

	Referencia	EMZ_02
Media	1009.43899	1009.44583
Varianza	4.81498285	8.11562438
Observaciones	336	336
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	629	
Estadístico t	-0.0348938	
P(T<=t) una cola	0.48608773	
Valor crítico de t (una cola)	1.64727975	
P(T<=t) dos colas	0.97217546	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96374263	

## Lluvia



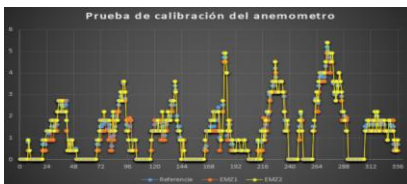
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales  
 Sensor de precipitación

	Referencia	EMZ_01
Media	0.00169643	0.00166667
Varianza	8.6964E-05	8.2387E-05
Observaciones	336	336
Varianza agrupada	8.4776E-05	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	670	
Estadístico t	0.04189689	
P(T<=t) una cola	0.48329677	
Valor crítico de t (una cola)	1.64713108	
P(T<=t) dos colas	0.96593954	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96351098	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales  
 Sensor de precipitación

	Referencia	EMZ_02
Media	0.00169643	0.00166667
Varianza	8.6964E-05	8.8557E-05
Observaciones	336	336
Varianza agrupada	8.7761E-05	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	670	
Estadístico t	0.041178	
P(T<=t) una cola	0.48558313	
Valor crítico de t (una cola)	1.64713108	
P(T<=t) dos colas	0.96716626	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96351098	

## Viento



Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales  
 Sensor de velocidad de viento

	Referencia	EMZ_01
Media	1.24985119	1.16845238
Varianza	1.56560446	1.50550924
Observaciones	336	336
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	670	
Estadístico t	0.85141196	
P(T<=t) una cola	0.19742237	
Valor crítico de t (una cola)	1.64713108	
P(T<=t) dos colas	0.39484475	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96351098	

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales  
 Sensor de velocidad del viento

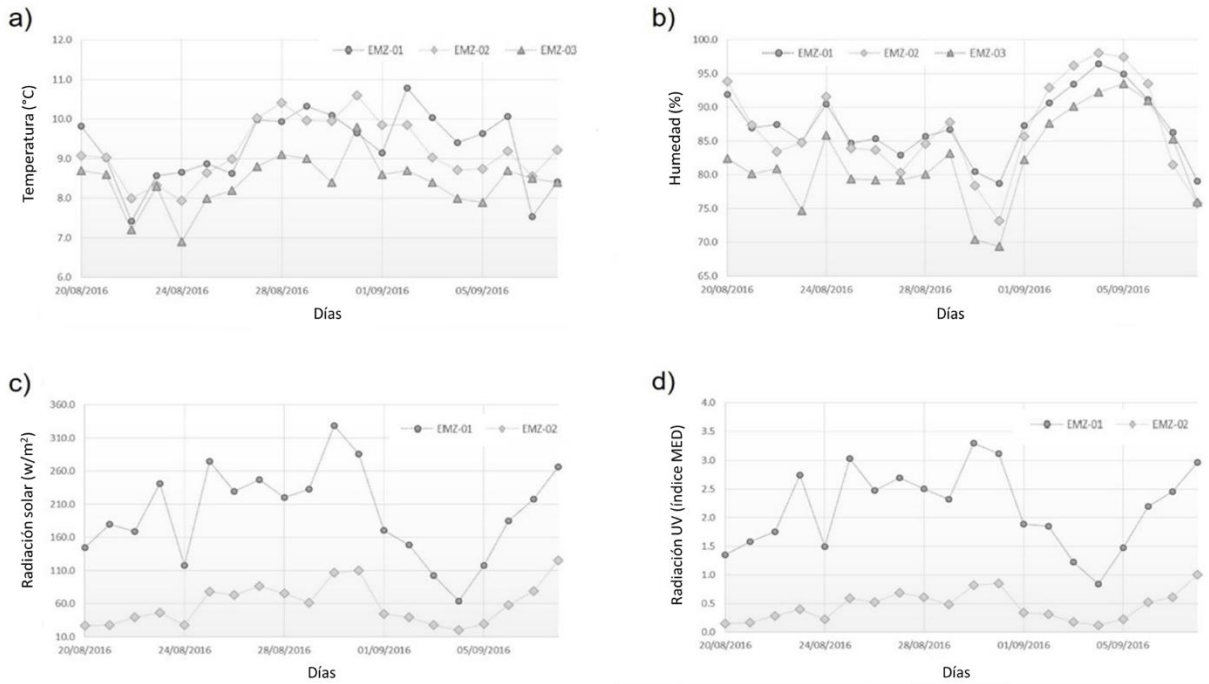
	Referencia	EMZ_02
Media	1.24985119	1.27410714
Varianza	1.56560446	1.65308875
Observaciones	336	336
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	670	
Estadístico t	-0.2478267	
P(T<=t) una cola	0.40217219	
Valor crítico de t (una cola)	1.64713108	
P(T<=t) dos colas	0.80434439	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96351098	

**Figura 6.** Prueba de calibración de los sensores de temperatura.

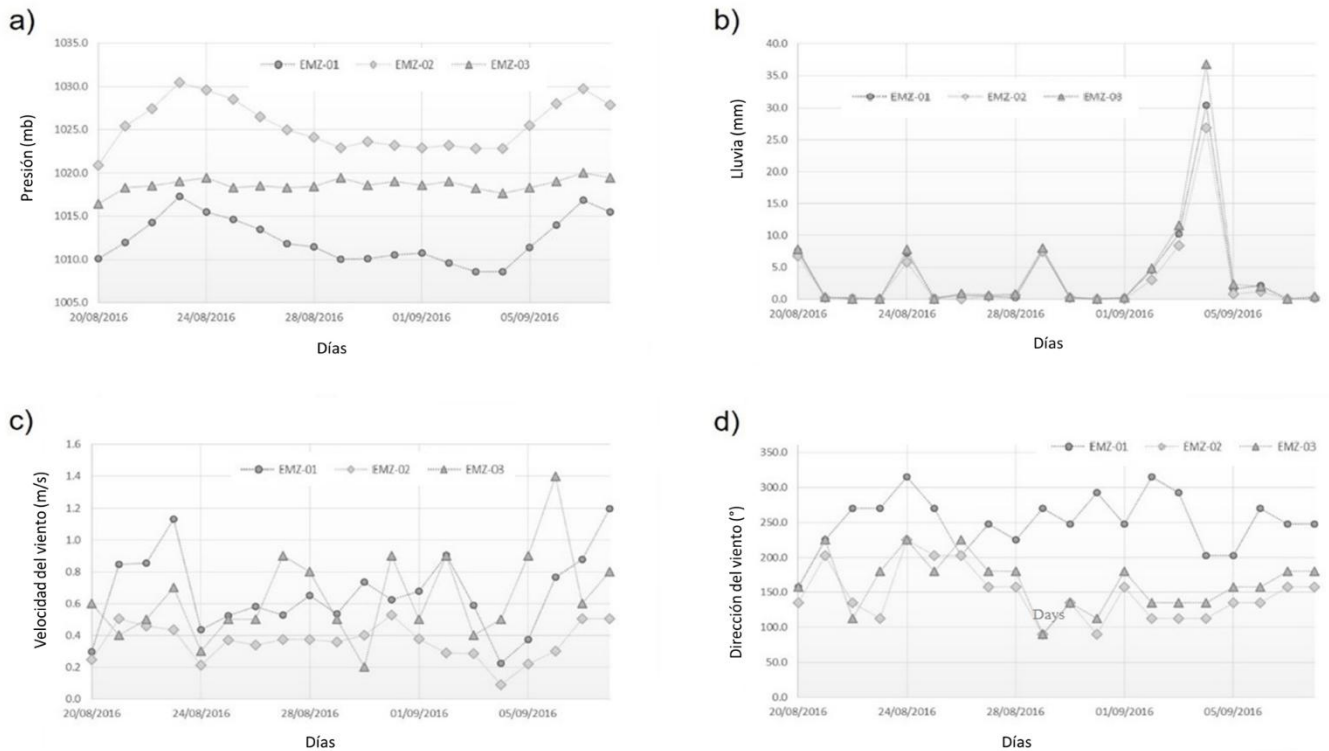
Los valores estadísticos  $t$  de los sensores de presión atmosférica y velocidad y dirección del viento, estuvieron muy por debajo del valor  $t$  crítico (de dos colas). Por lo tanto, se asumió que la prueba de las medias demuestra que no hay diferencias significativas en las muestras. En cuanto al sensor de precipitación, los datos se validaron comparando las lecturas del equipo de precipitación artificial con las registradas en la estación EMZ-03, y las cantidades de lluvia registradas resultaron similares.

## **Primera calibración de datos**

Una vez instaladas las estaciones, se procedió a configurar las consolas *WeatherLink* de las estaciones EMZ-01 y EMZ-02. Para la estación EMZ-03, se descargó el código del programa *Arduino*. Posteriormente, se verificó que el registro de datos era correcto. En las figuras 7 y 8 se exhiben los datos de los primeros 20 días de funcionamiento de las estaciones meteorológicas. En los gráficos se observan las diferencias meteorológicas en cada unidad; destacan las derivadas de las diferentes altitudes, la vegetación y la geoforma en las que se instalaron las estaciones.



**Figura 7.** Datos de las tres estaciones meteorológicas: a) Temperatura, b) Humedad, c) Radiación solar, y d) Radiación UV.



**Figura 8.** Datos de las tres estaciones meteorológicas: a) Presión, b) Precipitación, c) Velocidad del viento, y d) Dirección del viento.

Se programó un calendario de recolección manual de datos durante la primera semana de cada mes; es decir, el operador debe descargar los datos mensualmente en una computadora portátil con puerto *USB*. Los datos se transfieren automáticamente al conectar el cable *USB* del registrador de datos a una computadora portátil. En el caso de la estación EMZ-03 hay que extraer la memoria *microSD* de la estación para copiar los datos en la computadora y, posteriormente, devolverlos a la estación y programarla con el código de programación *Arduino*.

Los resultados se traducen en el desarrollo de sistemas de vigilancia climática de código abierto, lo que fomenta la colaboración y mejora las infraestructuras (Lin y Zini, 2008). El uso del *software* libre permite adaptar las estaciones meteorológicas modificando y adaptando sus componentes (Stallman, 2004). Además, el uso del sistema *Arduino* facilitó alcanzar el objetivo, aun cuando se es un experto programador, ni se dispone de recursos económicos altos, lo que constituye una de sus ventajas (Ferdoush y Li 2014; Katyal *et al.*, 2016). Los resultados facilitarán establecer las bases de un sistema de monitoreo climático en el área experimental de Zoquiapan, que proporcione información detallada y que contribuya a la construcción de mejores mapas de riesgo climático, de incendios forestales y meteorológicos (Meulenert *et al.*, 2005; Adepoju *et al.*, 2020).

La instalación de equipos automáticos ha demostrado que son eficaces para obtener información climática. En el presente trabajo se muestra que las estaciones automáticas programadas con *Arduino* son útiles en zonas de relieve complejo y de difícil acceso, donde constituyen una opción viable (Martínez del Castillo *et al.*, 2012).

Se observó que los registros fueron suficientes para evidenciar la representatividad de la complejidad del paisaje y el clima en los tres sitios estudiados. La representatividad es un criterio fundamental para la planificación urbana y rural, porque permite hacer más eficientes los procesos (Yang y Regan, 2014). Además, la instalación de equipos con *Arduino* hace posible la actualización de las estaciones meteorológicas con muchos años de funcionamiento (Faugel y Bobkov, 2013).

## **Conclusiones**

Se instaló un sistema de vigilancia meteorológica integrado por tres estaciones meteorológicas con buen rendimiento que sigue el paisaje y la representatividad. Los datos de los primeros 20 días de funcionamiento revelaron diferencias entre las estaciones meteorológicas, por lo que el transecto altitudinal seleccionado para la instalación es aceptable. La estación meteorológica de bajo costo, basada en el sistema *Arduino*, es eficaz para registrar y almacenar información en formato digital. Los resultados contribuyen al debate y al establecimiento de estaciones meteorológicas de bajo costo para la obtención de datos meteorológicos locales. Los nuevos estudios deben incluir un mayor número de sensores, así como conexiones inalámbricas, que incluyan la transferencia de datos.

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), a la Universidad Autónoma Chapingo, a la Dirección de Ciencias Forestales y al Programa de Maestría en Ciencias Forestales. Agradecemos los comentarios y sugerencias de los revisores anónimos, cuyos comentarios han mejorado sustancialmente este documento.

## **Conflicto de Intereses**

Los autores manifiestan no tener conflicto de intereses.



## Contribución por autor

Todos los autores participaron por igual en el diseño, elaboración, escrito y revisión del manuscrito.

## Referencias

Adepoju, T. M., M. O. Oladele, A. A. Kasali and G. J. Fabiyi. 2020. Development of a Low-Cost Arduino-Based weather station. *FUOYE Journal of Engineering and Technology* 5(2):69-73. Doi: [10.46792/fuoyejet.v5i2.508](https://doi.org/10.46792/fuoyejet.v5i2.508).

Blanco Z., S., G. Ceballos G., C. Galindo L., J. M. Maass M., R. Patrón S., A. Pescador y A. I. Suárez G. 1981. *Ecología de la estación experimental Zoquiapan (descripción general, vegetación y fauna)*. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. Méx., México. 114 p.

Brauman, K. A. 2015. Hydrologic ecosystem services: linking ecohydrologic processes to human well-being in water research and watershed management. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 2(4):345-358. Doi: [10.1002/wat2.1081](https://doi.org/10.1002/wat2.1081).

Corvino, G., A. Lessio and E. Borgogno M. 2018. FRPI-PF.5: Monitoring rice crops in Piemonte (Italy): Towards an operational service based on free satellite data. In: *Institute of Electrical and Electronics Engineers. IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium: Observing, understanding and forecasting the dynamics of our planet. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Valencia, V, Spain*. pp. 9070-9073.

DAVIS. 2019. *Weather Instruments*. <http://www.davisnet.com/weather-monitoring/>. (October 20, 2019).

Faugel, H. and V. Bobkov. 2013. Open source hard-and software: Using Arduino boards to keep old hardware running. *Fusion Engineering and Design* 88(6-8):1276-1279. Doi: [10.1016/j.fusengdes.2012.12.005](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2012.12.005).

Ferdoush, S. and X. Li. 2014. Wireless sensor network system design using raspberry Pi and Arduino for environmental monitoring applications. *Procedia Computer Science* 34:103-110. Doi: [10.1016/j.procs.2014.07.059](https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.07.059).

García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía y Universidad Nacional Autónoma de México. Coyoacán, D. F., México. 90 p.

Gómez, J. D., J. D. Etchevers, A. I. Monterroso, C. Gay, J. Campo and M. Martínez. 2008. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera* 21(1):35-56. <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8596>. (October 20, 2019).

Gómez-Mendoza, L. and L. Arriaga. 2007. Modelling the effect of Climate Change on the distribution of oak and pine species of Mexico. *Conservation Biology* 21(6):1545-1555. Doi: [10.1111/j.1523-1739.2007.00814.x](https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00814.x).

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2016. SIG ERIC v 1.0. Jiutepec, Mor., México. Servicio Meteorológico Nacional (SMN) e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). [http://hidrosuperf.imta.mx/sig\\_eric/](http://hidrosuperf.imta.mx/sig_eric/). (July 18, 2019).

Instituto Nacional de Ecología (INE). 2010. Manual 4. Operación de estaciones de medición de la calidad del aire, mantenimiento y calibración de sus componentes. Instituto Nacional de Ecología. Coyoacán, D. F., México. 75 p.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2016a. *Hidrografía*. <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/>. (July 18, 2016)

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2016b. *Geología*. <https://www.inegi.org.mx/temas/geologia/>. (July 18, 2016).

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2016c. *Relieve continental*. <https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/>. (July 18, 2016).

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2016d. *Uso de suelo y vegetación*. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>. (August 22, 2016).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2021. Summary for policymakers. In: Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, ... and B. Zhou (eds.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, CB, United Kingdom. pp. 3–32.

Juárez, A., C. Gay and Y. Flores. 2005. Impact of the Popocatepetl's volcanic activity on the air quality of Puebla City, México. *Atmósfera* 18(1):57-69. <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8537>. (July 18, 2019).

Katyal, A., R. Yadav and M. Pandey. 2016. Wireless Arduino based weather station. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering* 5(4):274-276. Doi: 10.17148/IJARCCCE.2016.5470.

Li, D. 2014. Assessing the impact of interannual variability of precipitation and potential evaporation on evapotranspiration. *Advances in Water Resources* 70:1-11. Doi: [10.1016/j.advwatres.2014.04.012](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.04.012).

Lin, Y. W. and E. Zini. 2008. Free/libre open source software implementation in schools: Evidence from the field and implications for the future. *Computer & Education* 50(3):1092-1102. Doi: [10.1016/j.compedu.2006.11.001](https://doi.org/10.1016/j.compedu.2006.11.001).

Lomas-Barrié, C. T., S. Terrazas-Domínguez y H. Tchikoué M. 2005. Propuesta de ordenamiento ecológico territorial para el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 11(1):57–71. <https://revistas.chapingo.mx/forestales/?section=articles&subsec=issues&numero=31&articulo=431>. (October 20, 2019).

Martínez del Castillo, E., R. Serrano-Notivoli, K. Novak, L. A. Longares A., ... y M. A. Saz S. 2012. Cuantificación de los gradientes climáticos altitudinales en la vertiente norte del Macizo del Moncayo a partir de una nueva red de estaciones automáticas en altura. In: Rodríguez P., C., A. Ceballos B., N. González R., E. Morán T. y A. Hernández E. (eds.). *Cambio Climático, extremos e impactos*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC), Serie A. Salamanca, SA, España. pp. 519-528.



Sparkfun. 2013. Sparkfun Weather Shield Hookup Guide. Niwot, CO, EE.UU. Sparkfun Start Something. <https://learn.sparkfun.com/tutorials/weather-shield-hookup-guide>. (October 17, 2016).

Stallman, R. M. 2004. Software libre para una sociedad libre. Traficantes de sueños. Madrid, MA, España. 317 p.

Torres-Quezada, J., H. Coch and A. Isalgué. 2021. Data set of climatic factors measured in a low latitude region with warm and humid climate: Solar radiation, cloud cover and sky temperature. Data in Brief 38:107404. Doi: [10.1016/J.DIB.2021.107404](https://doi.org/10.1016/J.DIB.2021.107404).

van Engelen, V. W. P. and J. A. Dijkshoorn. 2013. Global and National Soils and Terrain Databases (SOTER). Procedures Manual, Version 2.0. International Soil Reference and Information Centre World Soil Information. Wageningen, GE, The Netherlands. 198 p. [https://www.isric.org/sites/default/files/isric\\_report\\_2013\\_04.pdf](https://www.isric.org/sites/default/files/isric_report_2013_04.pdf). (August 22, 2016).

Yang, C. H. and A. C. Regan. 2014. Methodology for the prioritization of environmental sensor station installation (case study of South Korea). Transport Policy 32:53–59. Doi: [10.1016/j.tranpol.2013.12.012](https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.12.012).



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.