



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**ESTABLECIMIENTO DE UNA RED DE MONITOREO
METEOROLÓGICO EN LA ESTACIÓN FORESTAL
EXPERIMENTAL ZOQUIAPAN**

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

GABRIEL HUMBERTO VIRGEN COBOS

Bajo la supervisión de:

DR. JESÚS DAVID GÓMEZ DÍAZ



Chapingo, Estado de México, diciembre de 2016



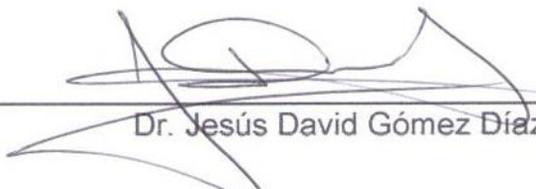
DIRECCION GENERAL ACADÉMICA
DIRECCION DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

**ESTABLECIMIENTO DE UNA RED DE MONITOREO METEOROLÓGICO EN
LA ESTACIÓN FORESTAL EXPERIMENTAL ZOQUIAPAN**

Tesis realizada por **GABRIEL HUMBERTO VIRGEN COBOS** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

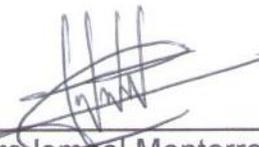
MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Director:



Dr. Jesús David Gómez Díaz

Asesor:



Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas

Asesor:



Dra. Ma. Amparo Máxima Borja de la Rosa

DEDICATORIA

A mis padres Humberto Virgen Alducin y Martha Cobos Ibañez, son un gran cimiento y apoyo para todo lo que he realizado y realizaré en mi vida, le doy gracias a Dios por tenerlos conmigo, los amo mucho.

A mis hermanas Elizabeth Virgen Cobos y Milca Virgen Cobos, las amo hermanitas, son una fuente de alegría y ánimo para mí. Además, doy gracias a Dios porque pronto cada una de ustedes me hará tío de unos perfectos y hermosos niños.

A Guadalupe Olvera Licona, por tu gran amistad, por estar conmigo en momentos importantes y por el gran apoyo y aliento que me brindaste para culminar este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente le doy gracias a Dios, por ser mi fortaleza y por estar conmigo en todos los ámbitos de mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgarme la beca para realizar mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), por ser la institución educativa que me brindó las herramientas para la realización de mi proyecto de tesis.

A la Dirección General de Investigación y Posgrado (DGIP), por su apoyo económico para adquirir el instrumental meteorológico y demás materiales.

A la Coordinación de Estudios de Posgrado de la División de Ciencias Forestales, por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación.

Al Dr. Jesús David Gómez Díaz, por todo su apoyo, por transmitirme sus conocimientos, por su tiempo y comprensión y por ser una excelente persona con la cual sin duda volvería a colaborar.

Al Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas, por brindarme su tiempo, sus consejos y sus conocimientos para el desarrollo de este trabajo.

A la Dra. Ma. Amparo Máxima Borja de la Rosa, por el gran apoyo que me brindó, por sus conocimientos transmitidos y los buenos consejos que me dio.

A los doctores José Luis Romo Lozano e Isidro Villegas Romero, coordinadores del proyecto estratégico E-02-2015 “Manejo forestal y gestión integral de los recursos hídricos en los campos forestales experimentales de la división de Ciencias Forestales”, por su gran apoyo para realizar este proyecto.

Al Dr. Jorge Antonio Torres Pérez y al Ing. Fortino García Moreno por las atenciones y facilidades otorgadas en los trabajos de campo y en la instalación de la red de monitoreo en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez por facilitar el equipo de referencia para las pruebas de calibración de las estaciones meteorológicas de este proyecto.

Especialmente a mis amigos: Guadalupe Olvera, Lizeth Lechuga, Patricia Ruiz, Sonia Jiménez, Susana Madrigal, Ezra Barrera, Moisés Matías, Rene Ríos y Ricardo Montiel por su gran apoyo en los trabajos de gabinete y de campo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Gabriel Humberto Virgen Cobos

Fecha de nacimiento: 02 de junio de 1987

Lugar de nacimiento: Álvaro Obregón, Distrito Federal

No. Cartilla Militar: C-8751309

CURP: VICG870602HDFRBB05

Profesión: Ingeniero en Tecnología Ambiental

Cédula Profesional: 8275730



Desarrollo académico

Licenciatura: Ingeniería en Tecnología Ambiental, Universidad Tecnológica de Nezahualcóyotl, Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México.

Bachillerato: Preparatoria 16, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

Desarrollo Profesional

ECOSFERA, Ingeniería Ambiental y Ecología de México S.A. de C. V.
Jefatura de Impacto Ambiental, oficina oriente.
Ixtapaluca, Estado de México.
Enero 2009 - Diciembre 2014

EARTH TECH MÉXICO
Operador de planta, PTAR ALCOA WHEELS.
Ciénega de Flores, N.L.
Julio 2007 - Enero 2008

SEVEN ELEVEN MEXICO
Jefe de turno, sucursal Clínica 6.
San Nicolás de los Garza, N.L.
Agosto 2004 - Julio 2005

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1	Objetivo general.....	2
1.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Antecedentes.....	2
1.4	Definición del problema	3
1.5	Justificación	3
2	REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1	Unidades cartograficas de paisaje.....	6
2.1.1	Tierras	6
2.1.2	Zonificación biofísica	6
2.2	Importancia del clima.....	7
2.2.1	En la dinámica de la vegetación	7
2.2.2	En los servicios ambientales	9
2.3	El monitoreo meteorológico en sistemas forestales.....	10
2.4	Estaciones meteorológicas.....	12
2.4.1	Estaciones meteorológicas automáticas comerciales.....	12
	Definición de las estaciones meteorológicas	12
	Clasificación de las estaciones meteorológicas.....	12
2.4.2	Estación de código abierto	14
	Software libre y hardware de código abierto (open source).....	14
	Microcontrolador arduino	15
2.5	Literatura citada	16
3	ARTÍCULO CIENTÍFICO	22
3.1	Resumen y abstract.....	23
3.2	Introducción	25
3.3	Materiales y métodos.....	27
3.3.1	Caracterización general de la zona de estudio	27

Ubicación	27
Fisiografía	27
Geología	28
Suelos.....	28
Clima	29
Hidrología	29
Vegetación.....	29
3.3.2 Delimitación de las unidades cartográficas homogéneas de paisaje..	30
Mapa de geoforma.....	30
Mapa de clima	31
Mapa de vegetación	33
Mapa de unidades cartográficas homogéneas de paisaje	34
3.3.3 Criterios de emplazamiento	34
3.3.4 Pruebas de calibración de las estaciones meteorológica	35
3.3.5 Instalación de las estaciones meteorológicas.....	38
3.4 Resultados y discusión	39
3.4.1 Delimitación de las unidades cartográficas homogéneas de paisaje..	39
Mapa de geoformas.....	39
Mapa de clima	41
Mapa de vegetación	44
Mapa de unidades cartográficas homogéneas de paisaje	45
3.4.2 Emplazamiento.....	46
3.4.3 Pruebas de calibración de las estaciones meteorológicas	49
Pruebas de calibración para las estaciones EMZ-01 y EMZ-02	49
Pruebas de calibración para la estación EMZ-03	52
3.4.4 Instalación de las estaciones meteorológicas.....	54
3.5 Conclusiones	58
3.6 Literatura citada	59

4	ANEXO	61
4.1	Código de programación de la estación EMZ-03.....	62

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Descripción de los rangos de pendiente	31
Cuadro 2. Estaciones meteorológicas más cercanas	31
Cuadro 3. Sensores con que cuenta la estación EMZ-01	35
Cuadro 4. Sensores con que cuenta la estación EMZ-02.....	36
Cuadro 5. Sensores con que cuenta la estación EMZ-03.....	37
Cuadro 6. Costos del proyecto.....	37
Cuadro 7. Sensores de la estación de referencia	38
Cuadro 8. Ecuaciones de regresión lineal simple	41
Cuadro 9. Temperaturas medias anuales y mensuales (°C) en la EFEZ.....	41
Cuadro 10. Rangos estimados de precipitación media anual y valores mensuales (mm)	43
Cuadro 11. Tipos de climas presentes en la EFEZ.....	44
Cuadro 12. Unidades homogéneas de paisaje definidas.....	45
Cuadro 13. UCHP propuestas para las estaciones meteorológicas	47
Cuadro 14. Coordenadas de ubicación de las estaciones meteorológicas	48

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la EFEZ	27
Figura 2. Mapa de rangos altitudinales	39
Figura 3. Rangos de pendientes de la EFEZ	39
Figura 4. Curvas de nivel de la EFEZ	40
Figura 5. Mapa de geoformas de la EFEZ	40
Figura 6. Mapa de isotermas anuales de la EFEZ	42
Figura 7. Mapa de isoyetas anuales de la EFEZ	43
Figura 8. Mapa de clima de la EFEZ.....	44
Figura 9. Mapa de vegetación de la EFEZ.....	45
Figura 10. Unidades cartográficas homogéneas de paisaje de la EFEZ	45
Figura 11. Mapa de emplazamiento de las estaciones meteorológicas.....	48
Figura 12. Pruebas de calibración para los sensores: a) Temperatura, b) Humedad, c) Radiación solar y d) Radiación UV	50
Figura 13. Pruebas de calibración para los sensores: a) Presión, b) Precipitación, c) Vel. Viento y d) Dir. Viento	51
Figura 14. Pruebas de calibración para los sensores: a) Temperatura, b) Humedad, c) Presión d) Velocidad del Viento, e) dirección del viento y f) Precipitación	53
Figura 15. Emplazamiento de las estaciones en la EFEZ.....	54
Figura 16. Datos de las tres estaciones de: a) Temperatura, b) Humedad, c) Radiación solar y d) Radiación UV	56
Figura 17. Datos de las tres estaciones de: a) Presión, b) Precipitación, c) Velocidad del viento y d) Dirección del viento.....	57

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Objetivo general

Establecer una red de monitoreo meteorológico práctica, puntual y precisa, mediante criterios de representatividad biofísica en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), para generar datos que sean aplicables a diferentes proyectos de comportamiento y dinámica de la vegetación y de los servicios ambientales.

1.2 Objetivos específicos

- Delimitar las unidades cartográficas homogéneas de paisaje de la EFEZ a partir de los atributos de los componentes del medio biofísico para definir a detalle los sistemas bioproductivos.
- Seleccionar tres unidades cartográficas homogéneas de paisaje representativas a partir de criterios de emplazamiento para establecer las estaciones meteorológicas.
- Instalar dos estaciones meteorológicas automáticas comerciales y una estación meteorológica de código abierto utilizando el microcontrolador arduino, previa calibración de los sensores, en las unidades homogéneas de paisaje representativas, para recabar información meteorológica que permita desarrollar estudios asociados al comportamiento y dinámica de la vegetación y a los servicios ambientales.

1.3 Antecedentes

Pronosticar con precisión el comportamiento del clima, ha llevado al hombre a desarrollar más y mejores instrumentos de medición (Yang & Regan, 2014). En la actualidad se utilizan sensores que permiten tener mayor exactitud en la toma de datos y a su vez ayudan en la toma de decisiones sobre efectos ambientales que inciden en actividades forestales, agrícolas y pecuarias; por ejemplo, heladas, tormentas, huracanes, efectos del niño, entre los más relevantes.

La EFEZ es un centro de investigación de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo, la cual tiene como principal objetivo

desarrollar investigación e innovaciones tecnológicas que permitan el manejo sostenible de los bosques de clima templado y semifrío, incentivando el desarrollo de actividades académicas, de investigación, de servicio y de difusión.

1.4 Definición del problema

Existe la necesidad de registrar datos meteorológicos en la EFEZ, por lo que se propone establecer una red de monitoreo meteorológico que sea práctica, puntual y precisa, y además, que brinde libertad en el manejo y análisis de los datos para estudios asociados al comportamiento y dinámica de la vegetación y a los servicios ambientales.

1.5 Justificación

El monitoreo de variables meteorológicas tiene importancia en el estudio y aprovechamiento de procesos biofísicos, por ejemplo, el desarrollo y crecimiento vegetativo, captura y retención de agua, supervivencia de organismos, desarrollo y crecimiento de nutrientes, aprovechamiento de los servicios ambientales, etc., siendo la temperatura, humedad, precipitación, radiación solar, y evaporación las variables que tienen mayor importancia en estos procesos (Li, 2014).

El clima es el principal factor que determina las pautas de la vegetación, su estructura, la productividad y la presencia de especies animales. Muchas plantas se pueden reproducir y crecer con éxito solo dentro de un rango específico de temperaturas y responder a determinadas cantidades y patrones estacionales de precipitación. También pueden verse desplazadas debido a la competencia con otras plantas, o incluso pueden sobrevivir si el clima cambia. Los cambios de la variabilidad climática, en los extremos y en los valores medios, determinan los impactos del cambio climático sobre los ecosistemas, (Velázquez, 2011).

La formación de una comunidad supone varias tendencias en relación a la transformación que va sufriendo en el proceso sucesional de una comunidad inmadura a una comunidad madura, por ejemplo en el microclima hay una atenuación de las temperaturas extremas, reducción de las fluctuaciones de temperatura y humedad; disminución de la evaporación y la radiación, al menos cerca de la superficie del suelo; aumenta la sombra y amortiguamiento del viento (Granados y López, 2000).

Debido a que los sistemas de monitoreo meteorológico son muy variados y la mayoría de ellos de un costo elevado, se propuso la instalación de dos estaciones meteorológicas automáticas comerciales de gama media y una de bajo costo que opere con un registrador de datos de código abierto (open source), se plantea la instrumentación del microcontrolador arduino*(Arduino, 2016).

En el capítulo uno se presenta la revisión de literatura, resaltando la zonificación biofísica, la importancia del clima en la dinámica de la vegetación y en los servicios ambientales, así como la definición y características de las estaciones meteorológicas.

Por su parte, en el capítulo 3 se presenta el artículo científico, derivado de esta investigación, en el cual destaca la metodología, resultados y conclusiones del proyecto. En el Anexo 4.1 se muestra el código de programación de la estación que se armó con el microcontrolador arduino.

* Es una plataforma electrónica de código abierto basado en hardware y software fácil de usar, dirigido a cualquier persona para hacer proyectos interactivos.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Unidades cartograficas de paisaje

2.1.1 Tierras

Por tierra se entiende el sistema bioproductivo terrestre que comprende el suelo, la vegetación, otros componentes de la biota y los procesos ecológicos e hidrológicos que se desarrollan dentro del sistema (Almorox, López, y Rafaelli, 2010).

La tierra se define como un sistema bioproductivo. Es la infraestructura terrestre para la vida. La tasa y la calidad de la producción generada por la tierra dependen de sus principales componentes, de los suelos y de su fertilidad. La materia orgánica del suelo, derivada de la vegetación que crece en un suelo determinado, es el principal componente que controla la fertilidad de éste (UNCCD, 2011).

Las tierras y los suelos no sólo abastecen a los usuarios directos, sino también a los usuarios indirectos, es decir, a los consumidores de los productos de la tierra que aprovecha los beneficios generados por el suelo como la capa vegetativa, el oxígeno atmosférico, la regulación del clima y las provisiones de agua filtrada. Las funciones y los servicios del suelo adquieren la categoría de bien común, cuya protección nos beneficia a todos (UNCCD, 2011).

2.1.2 Zonificación biofísica

Se define como la división que se hace de una región, territorio o país para establecer la ubicación, actividad o servicio de acuerdo a variables biofísicas, socioeconómicas, institucionales, etc., de dicho espacio geográfico. La zonificación permite establecer unidades de planificación o servicios que son usadas como marco de acción para realizar, de manera concentrada, esfuerzos de los sectores público y privado con la finalidad de incidir en el proceso de desarrollo económico y social de una localidad, además establece el uso racional de los recursos de acuerdo con su capacidad de producción y sirve

como un instrumento organizador para aumentar la producción y productividad de los recursos en funcionamiento (Pérez, 1983).

La zonificación agroecológica (ZAE) se refiere a la división de la superficie de la tierra y el clima, en unidades más pequeñas, que tienen características similares relacionadas con su aptitud, con la producción potencial y con el impacto ambiental, y una zonificación agroclimática es una zona con características relacionadas entre el clima y los sistemas de cultivo (González, Juárez, Aceves, Rivera, y Guerrero, 2015).

2.2 Importancia del clima

2.2.1 En la dinámica de la vegetación

Los ecosistemas están sujetos a una serie de factores que limitan o promueven su desarrollo, tales como el clima, el suelo o la recurrencia de perturbación natural. La sucesión ecológica es una secuencia de reemplazamientos de plantas o tipo de vegetación en diferentes comunidades, guiado por fuerzas ambientales que conducen hacia una comunidad madura, estable y dinámica; se entiende como el camino hacia la formación en el cual se establecen fenómenos de competencia, establecimiento, supervivencia y dominancia, aunado a una dependencia de las interacciones y de las influencias modificadoras de los organismos vivientes que constituye la comunidad (Granados y López, 2000).

Las causas que dirigen a la sucesión son numerosas e influyen de forma variada sobre los regímenes ecológicos y las cualidades fisiológicas y evolutivas de las especies, pudiendo producirse una sucesión progresiva. Los efectos que derivan de esta pueden clasificarse de acuerdo al nivel que presenten en el suelo, el microclima y la vegetación (Granados y López, 2000).

El clima influye en la estructura de un bosque a través de efectos tanto en la demografía de especies (reclutamiento y mortalidad) como en los regímenes de perturbación (Brown, 2006).

Entre los factores que condicionan tanto la expresión como la forma del área de distribución de una especie, el clima tiene un gran importancia, concretamente, la temperatura es la mayor responsable de la distribución espacial de los organismos, no se trata de la temperatura en sí, sino más bien de sus variaciones a lo largo del día y del año (Zunino y Zullini, 2003).

La temperatura y precipitación son de los principales factores climáticos que determinan el desarrollo principalmente de las comunidades vegetales, ya que a diferencia de la fauna no pueden emigrar para colonizar lugares más confortables (Gómez-Díaz, Monterroso-Rivas, Tinoco-Rueda, & López-García, 2007).

La temperatura es el elemento climático que más se ha estudiado y que mejor se conocen sus relaciones con el desarrollo de las plantas. La mayoría de procesos fisiológicos que se realizan para el crecimiento y desarrollo de las plantas están fuertemente influenciados por la temperatura, pues ejerce su influencia principal controlando la proporción de reacciones químicas involucradas en varios procesos de crecimiento dentro de la planta. Además la temperatura afecta los mecanismos hormonales involucrados en la floración y fructificación de las plantas (Ortíz, 1987).

En las comunidades ocurren periódicamente cambios debido a condiciones meteorológicas, hidrológicas y otras; a estos cambios se les denomina fluctuaciones, al ocurrir dichas fluctuaciones la comunidad no vuelve a ser exactamente igual, si no que existen pequeñas variaciones, que podrían reconocerse como sucesión y por tanto fluctuaciones y sucesiones ocurren de manera simultánea (Granados y López, 2000).

Las fluctuaciones que coinciden con las sucesiones, influyen de manera que pueden retrasarlas o acelerarlas, en algunos casos, durante las fluctuaciones aparecen nuevas especies que desaparecen al finalizar la fluctuación. Las fluctuaciones pueden originarse por condiciones meteorológicas, condiciones hidrológicas o actividades humanas (Granados y López, 2000).

2.2.2 En los servicios ambientales

Se puede entender que los servicios ambientales son procesos y funciones de los ecosistemas que, además de influir directamente en el mantenimiento de la vida, generan beneficios y bienestar para el clima, las personas y las comunidades (SEMARNAT, 2004).

Es importante tener clara la diferencia entre bienes y servicios ambientales. Los primeros son productos tangibles de la naturaleza (agua, madera, carbón, animales, plantas, semillas) de los que se benefician directamente los seres humanos. Los servicios ambientales, en cambio, son beneficios intangibles cuya utilización, cuando la hay, es indirecta (captura de carbono, regulación del clima, belleza escénica, control de la erosión, etcétera) (SEMARNAT, 2004).

Debido a las complejas interacciones biológicas, físicas y químicas, los ecosistemas proporcionan servicios de gran importancia para el desarrollo y la sustentabilidad de diversos actores a nivel mundial (Figueroa, Reyes, y Rojas, 2009).

Los servicios ambientales proveen bienestar a las personas y al ambiente de manera indirecta; por ejemplo, el secuestro de carbono realizado por los bosques, proveen bienestar a través de la calidad del aire o la composición de la atmósfera que los seres humanos tienen a su disposición y utilizan directamente, se puede considerar como servicio ambiental a cualquier servicio provisto por la naturaleza, que provee bienestar a algunas o muchas personas. Por ejemplo la captación hídrica, protección del suelo, reciclaje de nutrientes, control de inundaciones, retención de sedimentos, secuestro de carbono, belleza escénica y protección de las cuencas (Figueroa et al., 2009).

Una clasificación más de los servicios ecosistémicos es la derivada de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, en la cual definen a los servicios ecosistémicos como “los beneficios que la población obtiene de los ecosistemas”. Dicha clasificación está realizada con propósitos puramente

operacionales, y se basa en cuatro líneas funcionales que incluyen servicios de soporte, regulación, aprovisionamiento y culturales (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Servicios de soporte

Necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos: formación de suelos, reciclaje de nutrientes, producción primaria.

Servicios de regulación

Beneficios obtenidos de la regulación de los procesos del ecosistema: regulación de climas, regulación de enfermedades, regulación y saneamiento del agua, polinización.

Servicios de aprovisionamiento

Productos obtenidos del ecosistema: alimentos, agua dulce, leña, fibras, bioquímicos, recursos genéticos.

Servicios culturales

Beneficios no materiales que la gente obtiene de los ecosistemas: espiritual y religioso, recreativo y turístico, estético, inspirativo, educativo, identidad del sitio, herencia cultural.

2.3 El monitoreo meteorológico en sistemas forestales

Meulenert Peña, Ramírez Sánchez, García Concepción, García Guadalupe, & Alcalá Gutiérrez (2005), describen la implementación una red meteorológica para la predicción de fenómenos meteorológicos extremos e incendios forestales en el Área Natural Protegida “Bosque La Primavera” en el estado de Jalisco; la red consiste en un sistema de vigilancia por medio de cuatro estaciones meteorológicas automáticas Vantage Pro 2 situadas estratégicamente. La compilación de datos existentes y los obtenidos durante el

desarrollo del proyecto fueron procesados con la finalidad de obtener una descripción climática de la zona; como producto final elaboraron mapas climáticos, de incendios forestales y de riesgos meteorológicos.

La evaluación de los impactos potenciales del cambio climático sobre los ecosistemas forestales depende en gran medida de los métodos utilizados y de la información necesaria y disponible para su aplicación. Los estudios de respuesta de los bosques ante cambios climáticos van desde respuestas fisiológicas hasta los cambios a gran escala, de estos estudios se pueden generar mapas de zonas ecoclimáticas de la vegetación y mapas de impacto por el incremento de CO₂ (Villers-Ruiz y Trejo-Vazquez, 1998).

La disminución de la precipitación y el incremento de la temperatura repercuten en la vulnerabilidad de las especies forestales. Es probable que las sequías aumenten en frecuencia e intensidad y plausiblemente provocará que las especies forestales modifiquen su distribución y tiendan a contraerse en sitios con climas propicios para su adaptación (Pompa-García, Rodríguez-Flores, Aguirre-Salado, y Miranda-Aragón, 2013).

Las distribuciones de muchas especies y comunidades están determinadas en gran medida por las variables climáticas, así los cambios en el clima modificarán sus distribuciones y abundancias. Algunas de las variables climáticas esenciales que hacen hincapié en ecosistemas de bosque son los cambios en la precipitación, la temperatura, evapotranspiración, y una mayor frecuencia de incendios y tormentas. Los bosques pueden desaparecer en ciertas áreas a un ritmo más rápido que del que pueden migrar o volver a crecer en nuevas áreas (Gómez-Mendoza & Arriaga, 2007).

2.4 Estaciones meteorológicas

2.4.1 Estaciones meteorológicas automáticas comerciales

Definición de las estaciones meteorológicas

La meteorología estudia los fenómenos físicos en toda la atmósfera, las causas que los originan y los diferentes métodos de medirlos y observarlos. Por lo que la estación meteorológica es un área representativa de una región dotada de equipo meteorológico, en la que se: observan, miden, registran, concentran y procesan los diferentes elementos del estado de la atmósfera reinante durante un lapso por lo general breve o en un instante y en un lugar determinado, a lo que se le conoce como tiempo atmosférico. Al conjunto de estaciones meteorológicas convenientemente ubicadas en sitios representativos de una región se le conoce como red de estaciones meteorológicas (Romo y Arteaga, 1982).

Clasificación de las estaciones meteorológicas

Las estaciones meteorológicas se clasifican de acuerdo a su finalidad y la magnitud de sus observaciones (Romo y Arteaga, 1982).

Por su finalidad.

- Sinópticas

Permiten conocer en una amplia región el estado de la atmósfera en un momento determinado y hacer pronóstico de su evolución y comportamiento.

- Climatológicas

Son estaciones que miden datos meteorológicos con una consistencia, homogeneidad y duración, que permiten determinar el clima de una región.

- Agrícolas

Son estaciones que proporcionan datos meteorológicos, biológicos y fenológicos, útiles en la determinación de los efectos del tiempo y el clima en el proceso evolutivo de las plantas para estudiar las mejores condiciones para su adaptación y óptima producción.

- Especiales

Son estaciones establecidas con carácter temporal o permanente para la medición, observación y procesamiento de uno o varios elementos.

- Aeronáuticas

Están destinadas a efectuar observaciones meteorológicas en superficie como la altura para proporcionar información sobre el estado del tiempo atmosférico, su comportamiento y evolución para servicio de la navegación aérea.

- Satélites meteorológicos

Son plataformas colocadas en órbita terrestre, desde las cuales se toman fotografías a gran escala de la atmósfera y la superficie terrestre para conocer el comportamiento y evolución de los elementos meteorológicos.

Por la magnitud de las observaciones.

- Principales

Estas estaciones están dotadas con casi todos los instrumentos meteorológicos y determinan las condiciones generales del clima de una región.

- Ordinarias

Determinan las condiciones climáticas locales o características especiales de uno o varios elementos.

- Adicionales:

Surgen de la necesidad de información específica en lugares no cubiertos por las estaciones principales u ordinarias.

- Referencia

A las principales y ordinarias se les confiere la categoría de referencia, cuando su entorno no cambia durante muchos años.

Además el instrumental meteorológico se clasifica por:

Precisión

Es la diferencia o relación que existe entre el valor del instrumento patrón y el convencional, se considera como un término de error.

Sensibilidad

Es el nivel de detalle que suministra el instrumento para realizar la lectura por ejemplo un termómetro: 0.01 °C, 0.1 °C, 0.5 °C, 1°C.

Solidez

Es con respecto a la construcción del aparato y debe ser tal que permita resistir los embates del manipuleo, transporte y la intemperie.

Simplicidad

Debe manifestarse en la operatividad como en el mantenimiento del instrumento.

2.4.2 Estación de código abierto

Software libre y hardware de código abierto (open source)

El movimiento del software libre estipula los criterios que un programa debe de cumplir para considerarlo libre, de esta forma el usuario tiene la libertad de

ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, modificar y mejorar el software (Stallman, 2004). Existen programas que son de uso privativo, los cuales son desarrollados bajo la premisa de que no se puede acceder a su código fuente para analizarlos o modificarlos, lo cual priva la libertad de los usuarios de hacer modificaciones a los programas para adaptarlos a las necesidades de los usuarios; gracias a esto surgió la idea de crear software que permitiera a los usuarios adaptarlos a sus necesidades, naciendo así el movimiento del software libre (Stallman, 2004).

El software libre se puede distribuir con o sin modificaciones con la opción de cobrar por ellos. El software libre tiene en esencia 4 libertades:

- Libertad 0: libertad de ejecutar el programa como se desea.
- Libertad 1: libertad de estudiar el programa y modificarlo para que haga lo que el usuario desee.
- Libertad 2: libertad de redistribuir copias del programa para ayudar al prójimo.
- Libertad 3: libertad de distribuir copias de sus versiones modificadas.

El empleo de software libre y hardware de código abierto (open source) en instituciones educativas amplía la perspectiva de libertad para la sociedad creando cimientos para que todo mundo tenga acceso a la ciencia, lo que se puede traducir como mayor productividad, impulsando el libre pensamiento y acceso a la información en las instituciones educativas como herramienta de aprendizaje. Además, el código abierto promueve la defensa del lenguaje de programación a través de la educación, la colaboración y la infraestructura (Lin & Zini, 2008).

Microcontrolador arduino

Recientemente Ali, Zanzinger, Debose, & Stephens (2016), describen el proyecto Open Source Building Science Sensors (OSBSS), en el cual se demuestra cómo construir sensores ambientales y operativos de bajo costo

para los estudios a largo plazo del ambiente interior utilizando el hardware y software de código abierto, basándose en la plataforma arduino. El objetivo de OSBSS es permitir una mayor flexibilidad para la sincronización de un gran número de mediciones con alta resolución espacial y resolución temporal de manera que sea rentable para ser usada en proyectos de investigación.

El proyecto incluye una variedad de sensores y registradores de datos diseñados para medir una serie de parámetros importantes en edificios, como son la temperatura del aire y de la superficie, la humedad relativa del aire, la intensidad de la luz, concentraciones de CO₂ y un registrador de datos de tensión genérica que tiene la posibilidad de registrar datos de otros sensores como los sensores de presión diferencial.

En el desarrollo de tecnología para monitoreo de temperatura y humedad, Ferdoush & Li (2014), hablan del manejo de placas de microprocesamiento y microcontroladores de código abierto, como Raspberry Pi y Arduino respectivamente, que permiten desarrollar proyectos tecnológicos de gran nivel sin la necesidad de ser un experto programador o contar con elevados recursos económicos para construir un prototipo de cualquier equipo convencional y además ofrecen gran libertad de manipulación, existiendo una amplia gama de dispositivos que son compatibles con él.

Por su parte Faugel & Bobkov (2013), hablan sobre la versatilidad de los microcontroladores arduino para reemplazar tarjetas lógicas antiguas que debido a la evolución de las tecnologías han quedado obsoletas, lo cual amplía el criterio de la versatilidad y amplia compatibilidad de estos controladores con otros circuitos electrónicos.

2.5 Literatura citada

Ali, A., Zanzinger, Z., Debose, D., & Stephens, B. (2016). Open source building science sensors (OSBSS): A low-cost arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. *Building and Environment*, 100, 114-

126. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.010>

Almorox, J., López, F., & Rafaelli, S. (2010). *La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación*. (Edit.um, Ed.) (1.^a ed.). España.

ArcGIS. (2016). ArcMap 10.1. EUA.

Arduino. (2016). Integrated development environment. Italia.

Blanco, S., Ceballos, G., Galindo, C., Maass, J. M., Ptatrón, R., Pescador, A., & Suárez, A. I. (1981). *Ecología de la estación experimental Zoquiapan* (1.^a ed.). México: Serie Agronomía 2, Universidad Autónoma Chapingo.

Brown, P. (2006). Climate effects on fire regimes and tree recruitment in Black Hills ponderosa pine forests. *Ecology*, 87(10), 2500-2510. [http://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[2500:CEOFRA\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[2500:CEOFRA]2.0.CO;2)

DAVIS. (2015). Weather Instruments. Recuperado 20 de octubre de 2016, a partir de <http://www.davisnet.com/weather-monitoring/>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1996). Bases digitales de datos de suelos y terreno a nivel mundial y nacional (SOTER): manual de procedimientos. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Faugel, H., & Bobkov, V. (2013). Open source hard- and software : Using arduino boards to keep old hardware running. *Fusion Engineering and Design*, 88, 1276-1279. <http://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2012.12.005>

Ferdoush, S., & Li, X. (2014). Wireless sensor network system design using raspberry Pi and arduino for environmental monitoring applications. *Procedia Computer Science*, 34, 103-110. <http://doi.org/10.1016/j.procs.2014.07.059>

Figuroa, E., Reyes, P., & Rojas, J. (2009). *Pago por servicios ambientales en*

áreas protegidas en América Latina. (M. Vergara, Ed.) Programa FAO/OAPN (1.^a ed.). FAO.

García, E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. (SIGSA, Ed.) (4.^a ed.). México: Instituto de geografía de la UNAM.

García, K. (2011). *Caracterización ecológica de la avifauna de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), Estado de México*. Universidad Autónoma Chapingo.

Gómez, J. D., Etchevers, J. D., Monterroso, A. I., Gay, C., Campo, J., & Martínez, M. (2008). Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera*, 21(1), 35-56.

Gómez-Díaz, J. D., Monterroso-Rivas, A. I., Tinoco-Rueda, J. A., & López-García, J. (2007). Comportamiento de la vegetación bajo escenarios de cambio climático en la reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán , Hidalgo , México. *Zonas áridas*, 11(1), 61-69.

Gómez-Mendoza, L., & Arriaga, L. (2007). Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pine species of Mexico. *Conservation Biology*, 21(6), 1545-1555. <http://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00814.x>

González, R., Juárez, J., Aceves, L., Rivera, B., & Guerrero, A. (2015). Zonificación edafoclimática para el cultivo de *Jatropha curcas* L., en Tabasco, México. *Investigaciones geográficas*, 86, 25-37.

Google. (2016). Google Earth. EUA.

Granados, D., & López, G. (2000). *Sucesión ecológica, dinámica del ecosistema*. (A. González, Ed.) (1.^a ed.). México: Universidad Autónoma Chapingo.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2006). Extractor rápido de

información climática (ERIC) versión 3. México: Servicio Meteorológico Nacional.

Instituto Nacional de Ecología (INE). (2010). *Manual 4. Operación de estaciones de medición de la calidad del aire, mantenimiento y calibración de sus componentes* (1.ª ed.). México: INECC.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016a). Cuerpos de agua. Recuperado 18 de julio de 2016, a partir de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/hidrologia/infoescala.aspx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016b). Estructuras geológicas. Recuperado 18 de julio de 2016, a partir de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/geologia/infoescala.aspx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016c). Modelo de elevación digital. Recuperado 18 de julio de 2016, a partir de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016d). Uso de suelo y vegetación. Recuperado 22 de agosto de 2016, a partir de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/ususuelo/>

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

Lin, Y., & Zini, E. (2008). Free/libre open source software implementation in schools : Evidence from the field and implications for the future. *Computer & education*, 50, 1092-1102. <http://doi.org/10.1016/j.compedu.2006.11.001>

Meulenert Peña, Á. R., Ramírez Sánchez, H. U., García Concepción, F. O., García Guadalupe, M. E., & Alcalá Gutiérrez, J. (2005). Implementación de un sistema de alerta temprana contra fenómenos meteorológicos extremos

e incendios forestales del Área Natural Protegida « Bosque de la Primavera » Jalisco , México , como parte de un proyecto de desarrollo y monitoreo sistemático e inte. México: Instituto de Astronomía y Meteorología, Universidad de Guadalajara.

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis*. World Resources Institute. EUA: World Resources Institute. <http://doi.org/10.1057/9780230625600>

Ortíz, C. A. (1987). *Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana* (1.^a ed.). México: Universidad Autónoma Chapingo.

Pérez, A. (1983). *Marco de referencia para un proyecto de zonificación para el desarrollo agropecuario y rural* (1.^a ed.). Republica Dominicana: Instituto interamericano de cooperación para la agricultura.

Pompa-García, M., Rodríguez-Flores, F. J., Aguirre-Salado, C. A., & Miranda-Aragón, L. (2013). Influencia de la evaporación en el crecimiento forestal. *Agrociencia*, 47(8), 829-836.

Rey, C. (1975). *Estudios de suelo de la Estación de Enseñanza Investigación y Servicios Forestales de Zoquiapan, departamento de enseñanza e investigación en bosques* (1 (4) ed.). Estado de México: Información técnica de bosques.

Romo, J. R., & Arteaga, R. (1982). *Meteorología agrícola*. Estado de México: Departamento de irrigación, Universidad Autónoma Chapingo.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2004). *Introducción a los servicios ambientales* (2.^a ed.). México.

Sparkfun. (2013). Sparkfun. Recuperado 17 de octubre de 2016, a partir de <https://learn.sparkfun.com/tutorials/weather-shield-hookup-guide>

- Stallman, R. M. (2004). *Software libre para una sociedad libre*. Madrid, España: Traficantes de sueños.
- United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). (2011). *Las tierras y los suelos en el contexto de una economía verde para lograr el desarrollo sostenible, la seguridad alimentaria y la erradicación de la pobreza*. Germany.
- Velázquez, V. (2011). *Efectos del cambio climático en el sector primario de dos especies de importancia económica para el estado de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Villers-Ruiz, L., & Trejo-Vazquez, I. (1998). Impacto del cambio climático en los bosques y áreas naturales protegidas de México. *Interciencia*.
- Yang, C. H., & Regan, A. C. (2014). Methodology for the prioritization of environmental sensor station installation (case study of South Korea). *Transport Policy*, 32, 53-59. <http://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.12.012>
- Zavala, F. (1984). *Sinecología de la vegetación de la Estación de Enseñanza e Investigación Forestal Zoquiapan, Estados de México y Puebla*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Zunino, M., & Zullini, A. (2003). *Biogeografía: la dimensión espacial de la evolución* (1.^a ed.). México: Fondo de la cultura Económica.

3 ARTÍCULO CIENTÍFICO

3.1 Resumen y abstract

SISTEMA DE MONITOREO METEOROLÓGICO EN UN BOSQUE TEMPLADO EN MÉXICO

RESUMEN

Se estableció un sistema de monitoreo meteorológico práctico, puntual y preciso mediante criterios de representatividad biofísica en un bosque con clima templado del centro de México. Primeramente, se realizó la caracterización de las unidades cartográficas homogéneas de paisaje, definiendo a detalle los componentes del medio geomorfológico, climático y vegetal. Se caracterizaron 38 unidades y se seleccionaron tres que tienen representatividad biofísica y son de interés para conocer el tiempo atmosférico que se presenta en ellas. El sistema cuenta con dos estaciones meteorológicas automáticas de la marca Davis Instruments, modelo Vantage Pro2 Plus, y otra que opera con el microcontrolador de código abierto arduino. El almacenamiento de los datos de las tres estaciones es interno y son recuperados mensualmente en una computadora portátil. Se realizaron pruebas de calibración de los sensores de las tres estaciones sometiendo a comparación sus datos con una estación de referencia modelo Vantage Vue del Departamento de Meteorología de la Universidad Autónoma Chapingo. Se instalaron cercas de malla ciclónica en los sitios seleccionados y finalmente las estaciones meteorológicas fueron instaladas y puestas en operación.

Palabras clave: estaciones meteorológicas, representatividad, unidades cartográficas, instalación, arduino, calibración.

WEATHER MONITORING SYSTEM IN A TEMPERED FOREST IN MEXICO

ABSTRACT

A practical, timely and accurate meteorological monitoring system was established by biophysical representation criteria in a forest with temperate climate of central Mexico. First, the characterization of landscape homogeneous cartographic units was performed, defining in detail the components of the geomorphological environment, climate and vegetation. A total of 38 units were characterized and three were chosen considering its biophysical representation and the interest to know the weather that occurs in them. The system has two automatic weather stations Davis Instruments brand, Vantage Pro2 Plus model, and one that operates with open source microcontroller arduino. Storage of data of the three stations is internal and are recovered monthly in a laptop. Calibration tests of the sensors of the three stations were performed comparing their data with a reference station Vantage Vue model, from the Meteorology Department, Chapingo University. Wire fences were installed at selected sites, and finally the weather stations were installed and started its operation.

Key words: weather stations, representativeness, cartographic units, installation, arduino, calibration.

3.2 Introducción

El clima es el principal factor que determina las pautas de la vegetación, su estructura, la productividad y la presencia de especies animales y vegetales. Muchas plantas se pueden reproducir y crecer con éxito solo dentro de un rango específico de temperaturas y responder a determinadas cantidades y patrones estacionales de precipitación. También pueden verse desplazadas debido a la competencia con otras plantas, o incluso pueden sobrevivir si el clima cambia. Los cambios de la variabilidad climática, en los extremos y en los valores medios, determinan los impactos del cambio climático sobre los ecosistemas, (Velázquez, 2011).

El monitoreo de variables meteorológicas tiene importancia en el estudio y aprovechamiento de procesos biofísicos, por ejemplo, el desarrollo y crecimiento vegetativo, captura y retención de agua, supervivencia de organismos, desarrollo y crecimiento de nutrientes, aprovechamiento de los servicios ambientales, etc., siendo la temperatura, humedad, precipitación, radiación solar, y evaporación las variables que tienen mayor importancia en estos procesos (Li, 2014).

La asociación entre temperaturas y precipitación es valiosa para estudiar la sensibilidad al clima del crecimiento de las coníferas. Diversos procedimientos se han desarrollado para cuantificar la sequía, cada uno con sus fortalezas y debilidades. La influencia de evaporación anual en la vegetación en tiempos de sequía puede ser mayor que en las temporadas sin limitaciones de humedad. La evaporación anual es influenciada por elementos climáticos, como la velocidad del viento, la radiación solar y la humedad relativa, y puede variar en escalas temporales breves por tanto tiene una función relevante en las relaciones clima-planta (Pompa-García et al., 2013).

Gómez-Mendoza y Arriaga (2007), realizaron un estudio para determinar la vulnerabilidad al cambio climático de 34 especies de encinos y pinos en México, en el cual definen que las distribuciones de muchas especies y comunidades

están determinadas en gran medida por las variables climáticas, así los cambios en el clima modificarán sus distribuciones y abundancias. Algunas de las variables climáticas esenciales que hacen hincapié en ecosistemas de bosque son los cambios en la precipitación, la temperatura, evapotranspiración, y una mayor frecuencia de incendios y tormentas. Los bosques pueden desaparecer en ciertas áreas a un ritmo más rápido que del que pueden migrar o volver a crecer en nuevas áreas.

Debido a la necesidad de datos meteorológicos fue necesario establecer un sistema de monitoreo meteorológico práctico, puntual, preciso y que brinde libertad en el manejo y análisis de los datos para estudios asociados al comportamiento y dinámica de la vegetación y de los servicios ambientales en un bosque de clima templado y semifrío.

Se definió como zona de estudio a la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ) que es un centro de investigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Primeramente se realizó una zonificación biofísica del área de estudio, división de un territorio para establecer una ubicación o actividad de acuerdo a variables biofísicas (Pérez, 1983), a partir de la cual se realizó la selección de tres unidades cartográficas homogéneas de paisaje (UHP) representativas a partir de criterios de emplazamiento con la finalidad de establecer tres estaciones meteorológicas.

El objetivo de este estudio es la instalación de un sistema de monitoreo meteorológico con dos estaciones meteorológicas automáticas comerciales de gama media y una de bajo costo que opera con el registrador de datos de código abierto arduino. Se realizaron pruebas de calibración a los sensores de las tres estaciones meteorológicas automáticas para finalmente instalar las tres estaciones en los sitios seleccionados.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Caracterización general de la zona de estudio

Ubicación

La EFEZ se ubica al noroeste del Iztaccíhuatl en la parte suroeste del Parque Nacional Zoquiapan con las siguientes coordenadas: paralelos 19°12'30'' y 19°20' 00'' de latitud norte, y los meridianos 98°42'30'' y 98°30'00'' de longitud oeste, cubre una superficie de 1624.23 ha, y el rango altitudinal es de 3080 a 3670 msnm (Blanco et al., 1981).

Se encuentra en los municipios de Ixtapaluca y Chalco en el Estado de México, en los límites con el estado de Puebla. Limita al norte con el ejido Río Frío y el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas; al sur con el ejido de Tlalmanalco; al este con el ejido de San Martín Cuautlalpan; y al oeste con el ejido Nuevo Centro de Población San Gabriel y ejido de Río Frío (Blanco et al., 1981), ver Figura 1.

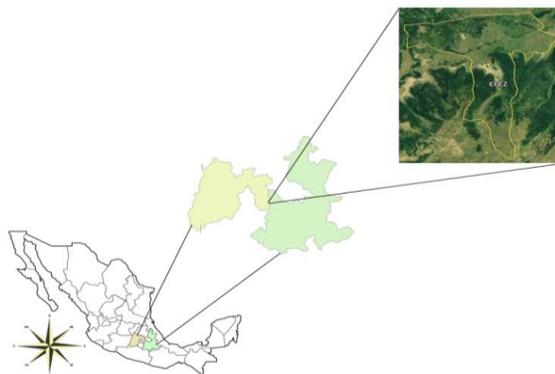


Figura 1. Ubicación de la EFEZ

Fisiografía

El área de estudio está comprendida dentro de la provincia fisiográfica denominada Cordillera Neovolcánica y a su vez en la subprovincia Lagos y volcanes del Anáhuac. La zona se caracteriza por la presencia de conos volcánicos altos, moderadamente erosionados, áreas planas, montañas con

crestas agudas y romas alineadas en forma de cordilleras, cañadas y lomeríos (García, 2011).

Geología

La EFEZ se localiza al norte de las faldas del Iztaccíhuatl, el cual junto con el Popocatepetl, el Ajusco y Zempoala, nacen durante el origen y formación del fraccionamiento Humboldt, a fines del terciario superior (Blanco et al., 1981).

De todos los afloramientos, los más abundantes en el área son los de origen volcánico. Tal es el caso de las rocas volcánicas que, en ocasiones, se encuentran fuertemente intemperizadas y erosionadas, y los derrames lávicos (basaltos y andesitas) que predominan por su gran extensión. La andesita Iztaccíhuatl es la roca más abundante de todo el parque de Zoquiapan. Los depósitos de talud y conos aluviales representan los materiales más jóvenes del área. Procesos tectónicos, fenómenos volcánicos, glaciaciones, conos aluviones, taludes y erosión por corrientes de agua, produjeron las geoformas que predominan actualmente en el área (Blanco et al., 1981).

Suelos

Los suelos de la EFEZ se clasifican como andosoles mólicos. Rey (1975), realizó un levantamiento a nivel descriptivo, en donde utilizó términos geomorfológicos, describiendo dos tipos de suelo: suelos sobre circo glacial en embudo y suelos sobre meseta volcánica.

Los suelos de la EFEZ tienen una buena aeración, buen drenaje, consistencia friable y ligeramente pegajosos y plástica; pH cercano a la neutralidad, buena disponibilidad de nutrientes, contenido de materia orgánica que disminuye con la profundidad, buena retención de humedad, ambiente favorable para microorganismos, buena disponibilidad de nitrógeno y baja concentración de fosforo en forma asimilable, dichos suelos son de desarrollo pedogenético incipiente, con un adecuado nivel de fertilidad y con susceptibilidad a la erosión (Blanco et al., 1981).

Clima

El clima de la zona corresponde a la clasificación Cb'(w₂)(w)igw'', es decir, un clima semifrío con verano fresco largo, el más húmedo de los subhúmedos con régimen de lluvias de verano y un porcentaje de precipitación invernal menor de 5, con oscilación anual de las temperaturas medias mensuales menor a 5°C, presentándose el mes más caliente antes del solsticio de verano y presencia de canícula. La temperatura media anual es de 10.4° C y la precipitación total anual es de 1,074.3 mm (García, 2011).

Hidrología

La EFEZ se encuentra en dos cuencas: la mayor parte pertenece a la cuenca del Río Atoyac, de la Región Hidrológica No. 18 (RH-18) Río Balsas; y la menor parte, a la cuenca del Río Moctezuma de la Región Hidrológica No. 26 (RH-16) Río Pánuco, concretamente en la subcuenca del arroyo Aculco que nace en las estribaciones del Iztaccíhuatl (García, 2011).

Las corrientes superficiales que existen en el área pueden ser permanentes o intermitentes y se forman principalmente por la abundante precipitación pluvial (mayor a 1,000 mm anuales) y por el deshielo de los glaciares (García, 2011).

Vegetación

En el área se pueden distinguir seis asociaciones vegetales, las cuales se describen a continuación (Zavala, 1984):

- Asociación de *Abies religiosa*.
- Asociación de *Alnus jorullensis* ssp. *zorullensis*.
- Asociación de *Pinus hartwegii*.
- Asociación de *Pinus hartwegii*-*Alnus jorullensis* ssp. *zorullensis*.
- Asociación de *Pinus montezumae*.
- Asociación de *Pinus montezumae*-*Alnus jorullensis* ssp. *zorullensis*.

En la EFEZ también existe pastizal en un llano que se inunda parcialmente durante la época de lluvias. El pastizal sólo presenta estrato herbáceo, predominando las siguientes especies gramíneas: *Calamagrostis tolucensis*, *Festuca tolucensis*, *Muhlenbergia qadriidentata*, *M. montana*, *M. macroura* y *Piptochaetium fimbriatum*.

3.3.2 Delimitación de las unidades cartográficas homogéneas de paisaje

Para caracterizar las unidades cartográficas homogéneas de paisaje se utilizó la metodología propuesta por Gómez et al. (2008) para generar los mapas de geoforma, clima y vegetación utilizando el Sistema de Información Geográfico (SIG) ArcMap 10.1 (ArcGIS, 2016). Los tres mapas se unieron para generar las unidades cartográficas homogéneas de paisaje. A las cuales se les asignó un nombre, comenzando por los atributos de suelo y vegetación, clima y geoforma. El proceso detallado se describe a continuación.

Mapa de geoforma

Se utilizó el Modelo de Elevación Digital (MED) (INEGI, 2016c) de los estados de México, Puebla y Tlaxcala para destacar los rangos altitudinales, porcentaje de pendiente y curvas de nivel. Los rangos altitudinales que se usaron fueron cada 100 msnm. Los rangos de pendiente fueron de acuerdo con el criterio establecido por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y otras instituciones en el procedimiento de bases digitales de datos de suelos y terreno (SOTER) (FAO, 1996) con base en la Evaluación del estado de la degradación del suelo inducida por el hombre, por sus siglas en inglés GLASOD (ver Cuadro 1) y las curvas de nivel se manejaron cada 10 metros. Posteriormente se sobrepuso el mapa de estructuras geológicas (INEGI, 2016b) y de cuerpos de agua (INEGI, 2016a) para caracterizar las unidades geomorfológicas de la zona de estudio.

Cuadro 1. Descripción de los rangos de pendiente

Rango de Pendiente (%)	Descripción
0 - 2	Plano
2 - 8	Moderadamente inclinado
8 - 15	Inclinado
15 - 40	Moderadamente escarpado
> 40	Escarpado

Mapa de clima

El mapa de clima se caracterizó mediante la metodología de Gómez et al. (2008) que consiste en determinar datos de temperatura y precipitación anual y mensual utilizando para la primera variable métodos de interpolación lineal simple complementada con análisis estadístico y para la segunda un método gráfico con criterio de experto realizando analogías con áreas aledañas que tienen información de esta variable.

Primeramente se obtuvieron del Extractor Rápido de Información Climática (ERIC) versión 3 (IMTA, 2006), las temperaturas máximas y mínimas, así como la precipitación media anual de 22 estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio, con datos completos de por lo menos los últimos 20 años. Para esto se consideró el parteaguas localizado al poniente (Cuenca del Río Atoyac) y dentro de la Mesa del Centro, para determinar la influencia de los vientos y con ello poder determinar las estaciones meteorológicas de influencia (Cuadro 2).

Cuadro 2. Estaciones meteorológicas más cercanas

Clave	Nombre	Latitud (°)	Longitud (°)	Elevación (msnm)
15007	Amecameca de Juárez	19.133	98.767	2479
15017	Coatepec de los olivos	19.383	98.85	2410
15018	Col. Ávila Camacho	19.317	98.767	2900
15020	Chalco	19.267	98.9	2280
15080	Atlautla Repetidora T.V.	19.117	98.633	3750
15082	Rio Frio	19.35	98.667	3000
15083	San Andrés	19.517	98.883	2268
15094	San Luis Ameca	19.183	98.967	2450

Clave	Nombre	Latitud (°)	Longitud (°)	Elevación (msnm)
15101	S.M. Tlaxpan	19.517	98.817	2420
15103	S. Pedro Nexapa	19.083	98.733	2650
15106	San Rafael	19.2	98.75	2530
15170	Chapingo	19.5	98.883	2250
21012	Atlixco	18.917	98.45	1840
21034	Echeverría	18.983	98.283	2170
21046	Huejotzingo	19.142	98.412	2291
21163	El Batán	18.967	98.183	2138
29002	Apizaco	19.428	98.131	2410
29003	San José Atlanga	19.556	98.203	2489
29004	Cuamancingo	19.55	98.25	2500
29010	Hueyotlipán	19.483	98.35	2545
29017	Nanacamilpa (SMN)	19.467	98.55	2734
29034	Zoquiapan-Calpulalpan	19.583	98.45	2496

Mapa de temperatura

Se utilizaron los datos de temperaturas máximas y mínimas de las estaciones meteorológicas de influencia, para obtener la temperatura promedio anual y mensual de cada estación. Lo anterior con la finalidad de elaborar ecuaciones de regresión lineal simple para calcular los rangos de variación a partir de la elevación para cada mes y para el promedio anual. La ecuación de regresión lineal anual fue utilizada para realizar el mapa de isotermas, calculando con ella la elevación de cada mes aumentando la temperatura a un grado centígrado, identificando la cota menor y mayor de temperatura para generar rangos de temperatura.

De esta manera se crearon polígonos sobreponiendo el mapa de curvas de nivel contra los rangos de temperatura y elevación calculados con el modelo de regresión lineal simple, utilizando el SIG ArcMap 10.1.

Mapa de precipitación

Mediante la metodología de Gómez et al. (2008), se obtuvo la cantidad de precipitación anual de las 22 estaciones meteorológicas para georeferenciarlas

de acuerdo a sus coordenadas en el SIG ArcMap 10.1. Con ayuda del MED y los datos de precipitación anual de las estaciones, se estimó la cantidad de precipitación que podría existir en la EFEZ.

Mapa de áreas de influencia climática

Se procedió a intersectar los mapas de isotermas e isoyetas medias anuales en el SIG ArcMap 10.1 para crear áreas de influencia climática. A cada área se le estimó los valores mensuales y anuales de temperatura y precipitación para determinar el tipo de clima utilizando según el sistema de clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García, (García, 1988).

Mapa final de clima

Una vez determinado el tipo de clima se unieron los polígonos que presentan un mismo tipo climático para obtener el mapa de clima.

Mapa de vegetación

Se realizó una delimitación detallada de los tipos de uso de suelo y vegetación utilizando la Serie V de Uso de Suelo y Vegetación (USV) (INEGI, 2016d) en escala (1:1,000,000), así como imágenes de satélite de Google Earth (Google, 2016), para definir los rodales de la vegetación de la EFEZ, y fueron nombrados conforme al tipo de uso de suelo y vegetación, además éstos fueron verificadas en campo.

Las unidades de uso suelo y vegetación que se tienen registrados en la Serie V de USV del INEGI en el área de estudio son: Bosque de Oyamel, Bosque de Pino, Bosque de Pino-Encino y Pastizal inducido. Comparando las unidades de uso de suelo y vegetación de la Serie V de USV con lo representado en la imagen satelital de Google Earth se observó que los linderos de los polígonos del INEGI no coinciden con los conglomerados de vegetación, por lo que se procedió a redefinir y detallar con mayor precisión los linderos así como agregar otras categorías de uso del suelo y vegetación.

Mapa de unidades cartográficas homogéneas de paisaje

Finalmente se realizó la intersección de los tres mapas antes definidos en el SIG ArcMap 10.1, es decir, geoformas, clima y vegetación. De esta unión se obtuvieron las unidades homogéneas de paisaje.

3.3.3 Criterios de emplazamiento

Los criterios de emplazamiento que se consideraron para seleccionar las tres unidades cartográficas homogéneas de paisaje donde se ubicaron físicamente las estaciones meteorológicas que conforman la red son los siguientes.

Representatividad: Los sitios tienen características representativas de las geoformas, tipos climáticos y vegetación de la EFEZ, además deben ser de interés para los usuarios que realizan investigación en este lugar. Por lo cual, se realizó un transecto altitudinal pues se desea conocer el comportamiento del tiempo atmosférico en tres sitios con diferente altitud, vegetación y geoforma, para ello se tomó como punto base el área donde se ubican las instalaciones de la EFEZ (valle intermontano), con el propósito de dar continuidad a los datos meteorológicos que anteriormente se han tomado en este sitio.

Emplazamiento despejado: Los sitios están libres de obstáculos naturales o artificiales ya que estos pueden obstruir el libre trayecto de los elementos meteorológicos, preferentemente se busca tener un terreno despejado a 20 metros de radio.

Terreno nivelado: Los sitios no presentan depresiones o desniveles que puedan ocasionar problemas al acceso a la toma de datos en la época lluviosa.

Cercanía al observador: Las estaciones están cercanas al lugar donde se encuentra el operador.

Fácil acceso: Los sitios tienen un camino de acceso despejado para facilitar la operación, mantenimiento y la recolección periódica de datos, así como la constante vigilancia de las estaciones.

3.3.4 Pruebas de calibración de las estaciones meteorológica

La red de monitoreo consta de tres estaciones meteorológicas que fueron nombradas como EMZ-01, EMZ-02 y EMZ-03, las cuales se describen a continuación:

Estación EMZ-01: Se trata de una estación meteorológica automática de la marca Davis Instruments modelo Vantage Pro2 Plus inalámbrica (DAVIS, 2015), la cual ya era propiedad a la EFEZ desde hace varios años pero fue necesario darle limpieza, mantenimiento y se cambiaron 4 sensores de humedad de suelo. Cuenta con una consola Vantage Pro2 y un datalogger WeatherLink para recepción, visualización y almacenamiento de datos, además de un panel fotovoltaico de 7 watts y batería de 6 voltios y 1.4 amperes para alimentar constantemente de energía a la consola y cuenta con los siguientes sensores.

Cuadro 3. Sensores con que cuenta la estación EMZ-01

Sensor	Tipo	Rango	Precisión
Temperatura	Diodo de silicón	-40 a 65°C	+/- 0.5°C
Humedad	Film capacitor	0 a 100%	+/- 3%
Dirección de viento	Potenciómetro	0 a 365°	+/- 3°
Velocidad de viento	Sensor magnético	1 a 89.44 m/s	0.00055 m/s
Radiación solar	Fotodiodo de silicón	1 a 1800 W/m ²	+/-5%
Radiación UV	Transductor	0 a 199 MEDs	+/-5%
Presión	Transductor	-	+/- 0.05 kPa
Pluviómetro	Balancín de volcado	-	0.2 mm
Humedad de hoja	Monitor de superficie	0 a 15 %	-
Humedad de suelo	Resistencia Weatermark	0 a 100%	+/- 0.5°C
Temperatura de suelo	Sonda de acero	-50 a 60°C	+/- 3%

Fuente: (DAVIS, 2015).

Estación EMZ-02: Es una estación meteorológica automática comercial nueva de la marca Davis Instruments modelo Vantage Pro2 Plus inalámbrica (DAVIS, 2015). Cuenta con una consola Envoy y datalogger WeatherLink para recepción y almacenamiento de datos, también se adquirió un panel fotovoltaico de 7 watts y batería de 6 voltios y 1.4 amperes para alimentar constantemente de energía a la consola y cuenta con los siguientes sensores.

Cuadro 4. Sensores con que cuenta la estación EMZ-02

Sensor	Tipo	Rango	Precisión
Temperatura	Diodo de silicón	-40 a 65°C	+/- 0.5°C
Humedad	Film capacitor	0 a 100%	+/- 3%
Dirección de viento	Potenciómetro	0 a 365°	+/- 3°
Velocidad de viento	Sensor magnético	1 a 89.44 m/s	0.00055 m/s
Radiación solar	Fotodiodo de silicón	1 a 1800 W/m ²	+/-5%
Radiación UV	Transductor	0 a 199 MEDs	+/-5%
Presión	Transductor	-	+/- 0.05 kPa
Pluviómetro	Balancín de volcado	-	0.2 mm

Fuente: (DAVIS, 2015).

Los datalogger WeatherLink de las estaciones EMZ-01 y EMZ-02 permiten tener pronósticos de: temperatura y humedad interior y exterior; temperatura de sensación y punto de rocío; presión atmosférica actual y tendencia; precipitación actual, acumulada diaria, mensual y anual; intensidad de lluvia, radiación solar y UV; evapotranspiración; dirección y velocidad del viento; ráfagas de viento; fase lunar y hora de puesta y salida del sol. Es importante señalar que la recuperación de los datos es mediante la conexión de un cable USB a una computadora, lo cual se realiza de forma manual una vez al mes.

EMZ-03. Se trata de una estación meteorológica automática construida con el microcontrolador arduino. Cuenta con un panel fotovoltaico de 10 watts y batería de 12 voltios y 7 amperes para alimentar constantemente de energía a la estación, un módulo microSD que funciona como un datalogger de almacenamiento, ver Cuadro 5.

Los sensores se han programado mediante el entorno de desarrollo integrado de arduino (Arduino, 2016), para tener datos simples de temperatura, humedad, precipitación actual y diaria, presión atmosférica, dirección del viento y velocidad del viento, de acuerdo al código de programación del Anexo 4.1. De la misma forma que las estaciones EMZ-01 y EMZ-02 la descarga de datos es de forma manual mediante un cable USB y se realiza una vez al mes.

Cuadro 5. Sensores con que cuenta la estación EMZ-03

Sensor	Tipo	Rango	Precisión
Temperatura	Diodo	-40 a 125°C	+/- 0.2°C
Humedad	Film capacitor	0 a 100%	+/- 3%
Dirección de viento	Potenciómetro	0 a 365°	+/- 3°
Velocidad de viento	Swich magnético	-	0.6669 m/s
Presión	Transductor	-	+/- 0.05 kPa
Pluviómetro	Balancín de volcado	-	0.2794 mm

Fuente: (Sparkfun, 2013).

El costo de las estaciones y gastos realizados para desarrollar este proyecto se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 6. Costos del proyecto

Concepto	Monto
Estación Vantage Pro2 Plus (EMZ-01)	\$20,522.07
Estación Vantage Pro2 Plus (EMZ-02)	\$29,013.14
Estación Arduino (EMZ-03)	\$7,317.04
Transporte	\$6,347.21
Otros materiales	\$4,415.40
TOTAL	\$67,614.86

Tipo de cambio: Dólar (EUA) = 16.49 pesos mexicanos (noviembre 2015)

Existen dos formas para verificar los sensores de las estaciones meteorológicas: la primera es aquella donde la respuesta del sensor puede compararse contra una medida de referencia de valor conocido mientras el sensor y el dispositivo de referencia se someten a una misma condición ambiental; la segunda consiste en someter el sensor a una condición artificial en la cual la respuesta es predecible teóricamente (INE, 2010).

Por lo anterior, se optó por utilizar un equipo de referencia del Departamento de Meteorología de la UACH, se trata de una estación marca Davis Instruments modelo Vantage Vue inalámbrica con las mismas características que las estaciones EMZ-01 y 02, para hacer la comparación de las mediciones de las estaciones, las estaciones se ubicaron a 5 metros de distancia de la estación de referencia durante un periodo de una semana.

Las pruebas de calibración fueron realizadas en un periodo de una semana con muestreo cada 30 minutos lo que resulto en una muestra de 336 datos, comparados mediante una prueba de t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales en la Hoja de Cálculo Excel 2010, los sensores probados fueron el de temperatura, humedad, presión, precipitación, radiación solar, radiación UV y dirección y velocidad del viento (ver Cuadro 7).

Cuadro 7. Sensores de la estación de referencia

Sensor	Tipo	Rango	Precisión
Temperatura	Diodo de silicón	-40 a 65°C	+/- 0.5°C
Humedad	Film capacitor	0 a 100%	+/- 3%
Dirección de viento	Potenciómetro	0 a 365°	+/- 3°
Velocidad de viento	Sensor magnético	1 a 89.44 m/s	0.00055 m/s
Radiación solar	Fotodiodo de silicón	1 a 1800 W/m ²	+/-5%
Radiación UV	Transductor	0 a 199 MEDs	+/-5%
Presión	Transductor	-	+/- 0.05 kPa
Pluviómetro	Balancín de volcado	-	0.2 mm

Fuente: (DAVIS, 2015).

3.3.5 Instalación de las estaciones meteorológicas

Para realizar la instalación de las estaciones meteorológicas fue necesario delimitar en cada sitio propuesto un área de 25 m² para instalar una cerca de malla ciclónica con puerta, para salvaguardar cada una de las estaciones de cualquier riesgo de maltrato o robo. Una vez instaladas las cercas se procedió a ubicar las estaciones y a configurarlas para ponerlas en operación. Adicionalmente, se presentan datos de los primeros 20 días de operación de las estaciones, los cuales comprenden el periodo del 20 de agosto al 8 de septiembre del 2016, con la finalidad de representar los diferentes tiempos atmosféricos que se presentan en las tres unidades cartográficas seleccionadas.

3.4 Resultados y discusión

3.4.1 Delimitación de las unidades cartográficas homogéneas de paisaje

Mapa de geoformas

Se realizó el mapa de rangos altitudinales (Figura 2) en el cual se muestran los rangos altitudinales que van desde los 3000 msnm hasta los 3700 msnm, con base en el Modelo de Elevación Digital del INEGI.

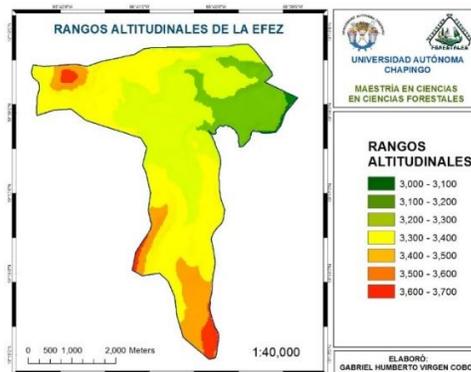


Figura 2. Mapa de rangos altitudinales

Posteriormente se realizó el mapa de porcentajes de pendiente, donde se observa al sur de la EFEZ pendientes predominantes moderadamente escarpadas y en la parte central al oeste pendientes muy escarpadas que disminuyen hacia el este, además en la parte central se tienen pendientes casi planas y hacia el norte predominan las pendientes de moderadamente inclinada a inclinada, ver Figura 3.

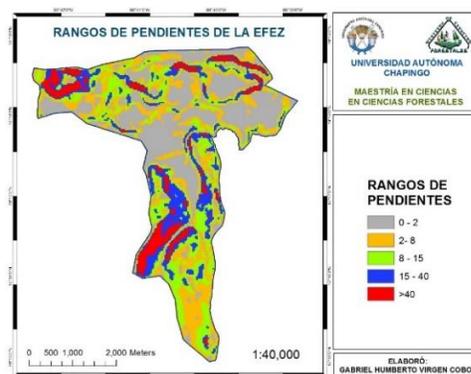


Figura 3. Rangos de pendientes de la EFEZ

Después se elaboró el mapa de curvas de nivel con base en el Modelo de Elevación Digital del INEGI, sobrepuesto con los cuerpos de agua (Figura 4).

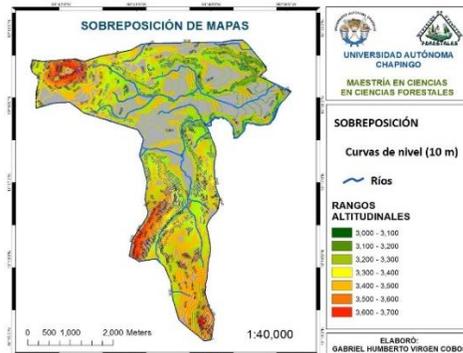


Figura 4. Curvas de nivel de la EFEZ

Los mapas anteriores se sobrepusieron con el mapa de estructuras geológicas (INEGI) y de cuerpos de agua (INEGI), para caracterizar las unidades geológicas de la zona de estudio.

Las geoformas generadas con porcentaje de la EFEZ son: aparato volcánico escarpado (4.82%), cañada moderadamente inclinada (1.41%), cima de domo volcánico casi plana (0.46%), cima de domo volcánico inclinada (2.40%), cima de domo volcánico moderadamente inclinada (1.15%), ladera escarpada (8.11%), ladera inclinada (3.87%), ladera inclinada disectada por arroyos (13.57%), ladera moderadamente escarpada (14.07%), ladera moderadamente inclinada (10.74%), ladera moderadamente inclinada disectada por arroyos (1.73%), valle intermontano disectado por arroyos casi plano (37.66%), ver Figura 5.

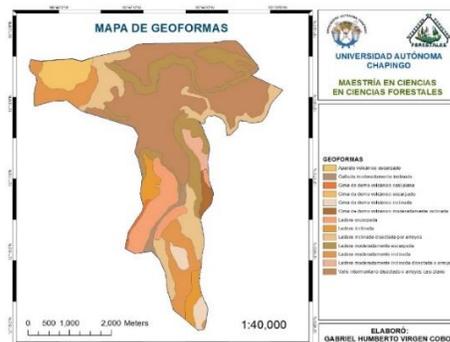


Figura 5. Mapa de geoformas de la EFEZ

Mapa de clima

Mapa de isotermas

Los modelos de temperatura anual y mensual generados con base en la metodología de Gómez et al. (2008), se presentan en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Ecuaciones de regresión lineal simple

Parámetro	Ecuación de regresión lineal	R ²
Anual	$T = 31.30 - 0.0069 h$	0.95
Enero	$T = 24.73 - 0.0055 h$	0.92
Febrero	$T = 27.89 - 0.0063 h$	0.94
Marzo	$T = 32.57 - 0.0074 h$	0.93
Abril	$T = 34.20 - 0.0074 h$	0.93
Mayo	$T = 36.86 - 0.0082 h$	0.95
Junio	$T = 35.92 - 0.0080 h$	0.96
Julio	$T = 34.57 - 0.0078 h$	0.96
Agosto	$T = 38.74 - 0.0074 h$	0.95
Septiembre	$T = 32.97 - 0.0072 h$	0.95
Octubre	$T = 30.70 - 0.0066 h$	0.94
Noviembre	$T = 27.01 - 0.0057 h$	0.91
Diciembre	$T = 24.42 - 0.0052 h$	0.90

A partir de las ecuaciones anteriores se calcularon los rangos de temperatura anual y mensual, ver Cuadro 9. El mapa de isotermas anual se muestra en la Figura 6, donde se observan cinco rangos de temperatura que van desde los 6°C hasta los 11°C de temperatura anual.

Cuadro 9. Temperaturas medias anuales y mensuales (°C) en la EFEZ

Rango	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
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

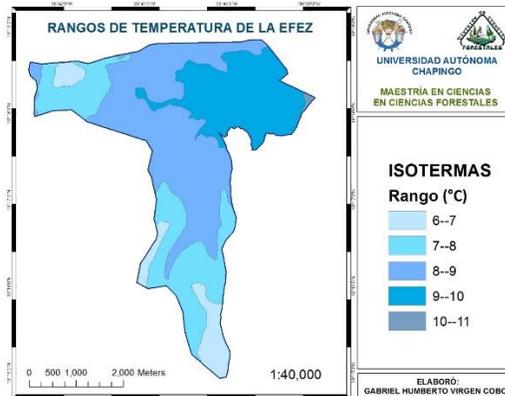


Figura 6. Mapa de isotermas anuales de la EFEZ

Mapa de isoyetas

Con forme a la metodología de Gómez et al. (2008), se identificaron las estaciones más cercas a la EFEZ, las cuales son la estación meteorológica Río Frío que tiene 972 mm anuales y la Ávila Camacho que tiene 774 mm de precipitación anual.

La dirección de los vientos que generan los sistemas nubosos con los que se asocian las precipitaciones, fue un elemento muy importante para analizar cuanta precipitación anual podría caer en la EFEZ. Como los vientos dominantes para esa región provienen principalmente del Golfo, llevan nubes con mayor humedad principalmente a la región del parteaguas con orientación al este y al noreste, además a mayor elevación habrá mayor precipitación. Por lo que se estima que la precipitación anual irá incrementando de norte a sur.

Los datos de precipitación anual de cada polígono se generaron mediante una tabla donde se calcularon datos del valor promedio de precipitación para cada mes, intervalos de precipitación mensual y la precipitación mensual estimada para cada rango. Los intervalos de precipitación media mensual para cada rango de precipitación media anual se asignaron de acuerdo a la tendencia y valores de la precipitación promedio de cada grupo de estaciones meteorológicas, estableciendo rangos en los que queden incluidos los valores promedios de los diferentes grupos de estaciones.

Después se eligieron cuatro rangos de precipitación anual y mensual para el área de la EFEZ, que van desde los 1000 mm hasta los 1400 mm de precipitación. Finalmente se procedió a delimitar las isoyetas anuales en el SIG ArcMap 10.1, con ayuda de los rangos altitudinales y las curvas de nivel se generaron los polígonos de precipitación identificando la isoyeta mayor y la menor entre cada polígono, ver Cuadro 10 y Figura 7.

Cuadro 10. Rangos estimados de precipitación media anual y valores mensuales (mm)

Rango	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1000-1100	1044.8	16.0	13.3	17.9	50.0	90.0	186.7	206.7	190.0	166.7	86.7	13.3	7.5
1100-1200	1122.4	17.0	17.5	19.2	55.0	106.7	193.3	213.3	200.0	173.3	93.3	17.5	16.3
1200-1300	1234.7	18.0	21.7	22.5	70.0	113.3	210.0	226.7	220.0	186.7	106.7	21.7	17.5
1300-1400	1331.9	19.0	23.3	27.5	90.0	130.0	230.0	233.3	230.0	193.3	113.3	23.3	18.8

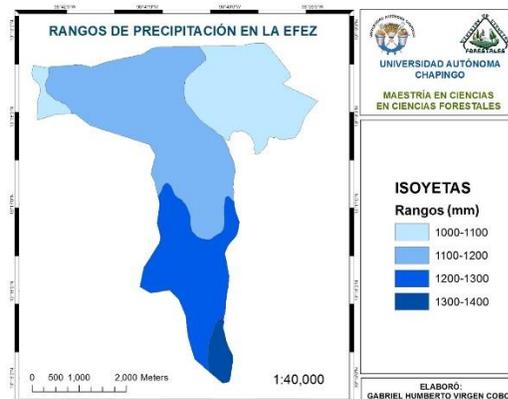


Figura 7. Mapa de isoyetas anuales de la EFEZ

Mapa de áreas de influencia climática

Se procedió a unir los mapas de isotermas e isoyetas mediante el ArcMap 10.1, para generar los polígonos de las áreas de influencia climática y después se determinaron los tipos de clima utilizando el sistema de clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García (García, 1988), y se obtuvieron tres tipos de climas, Cb' (w₂)(w) ig que representa al 22.37%, Cc (w₂) ig el 26.38% y Cc (w₂)(w) ig el 51.26% de la EFEZ, ver Figura 8 y Cuadro 11.

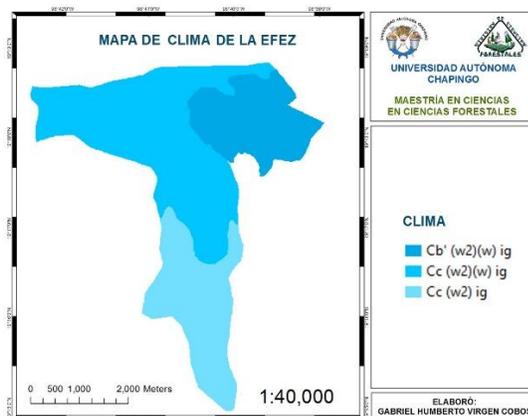


Figura 8. Mapa de clima de la EFEZ

Cuadro 11. Tipos de climas presentes en la EFEZ

Clima	Descripción
Cb' (w ₂)(w) ig	Semifrío del grupo de los templados con verano fresco largo; el más húmedo de los subhúmedos, con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal menor de 5; isotermal; con marcha de temperatura tipo ganges.
Cc (w ₂) ig	Semifrío del grupo de los templados con verano fresco corto; el más húmedo de los subhúmedos, con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10.2 anual; isotermal; con marcha de temperatura tipo ganges
Cc (w ₂)(w) ig	Semifrío del grupo de los templados con verano fresco corto; el más húmedo de los subhúmedos, con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal menor de 5; isotermal; con marcha de temperatura tipo ganges

Mapa de vegetación

Se modificó el mapa de vegetación a partir de los rodales de las unidades de vegetación, con base a la imagen de satélite de Google Earth, después se digitalizo en el SIG ArcMap 10.1 y se obtuvieron 7 unidades: agua (0.29%) oyamel (16.60%), pastizal (2.69%), pino (49.64%), pino-aile (14.63%), pino-encino (1.89%) y pino-oyamel (14.26%), ver Figura 9.

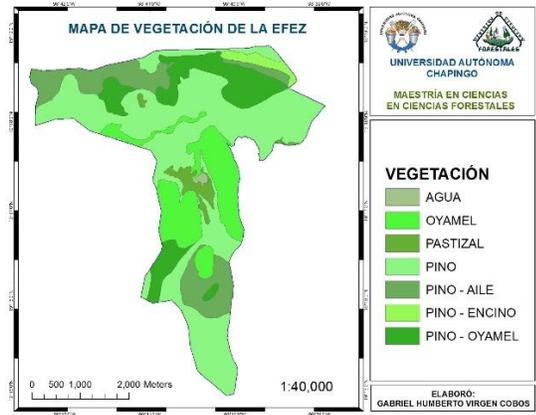


Figura 9. Mapa de vegetación de la EFEZ

Mapa de unidades cartográficas homogéneas de paisaje

Con la unión de los mapas de geoformas, climas y vegetación se obtuvieron 38 unidades cartográficas homogéneas de paisaje las cuales se les dio nombre conforme a los atributos de vegetación, tipo de clima y geoforma, ver Figura 10 y Cuadro 12.

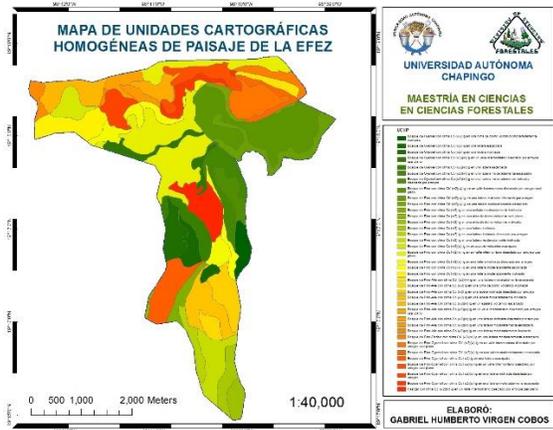


Figura 10. Unidades cartográficas homogéneas de paisaje de la EFEZ

Cuadro 12. Unidades homogéneas de paisaje definidas

UCHP

Bosque de Oyamel con clima Cc (w ₂) ig en una cima de domo volcánico moderadamente inclinada
Bosque de Oyamel con clima Cc (w ₂) ig en una ladera escarpada
Bosque de Oyamel con clima Cc (w ₂) ig en una ladera inclinada
Bosque de Oyamel con clima Cc (w ₂)(w) ig en un valle intermontano disectado por arroyos casi plano
Bosque de Oyamel con clima Cc (w ₂)(w) ig en una ladera escarpada

Bosque de Oyamel con clima Cc (w_2)(w) ig en una ladera moderadamente escarpada

Bosque de Oyamel con clima Cc (w_2)(w) ig en una ladera moderadamente inclinada disectada por arroyos

Bosque de Pino-Aile con clima Cb' (w_2)(w) ig en una ladera moderadamente escarpada

Bosque de Pino-Aile con clima Cc (w_2) ig en una cima de domo volcánico inclinada

Bosque de Pino-Aile con clima Cc (w_2) ig en una ladera inclinada disectada por arroyos

Bosque de Pino-Aile con clima Cc (w_2) ig en una ladera moderadamente inclinada

Bosque de Pino-Aile con clima Cc (w_2)(w) ig en un aparato volcánico escarpado

Bosque de Pino-Aile con clima Cc (w_2)(w) ig en un valle intermontano disectado por arroyos casi plano

Bosque de Pino-Aile con clima Cc (w_2)(w) ig en una ladera inclinada disectada por arroyos

Bosque de Pino-Aile con clima Cc (w_2)(w) ig en una ladera moderadamente escarpada

Bosque de Pino-Aile con clima Cc (w_2)(w) ig en una ladera moderadamente inclinada

Bosque de Pino-Encino con clima Cb' (w_2)(w) ig en una ladera moderadamente escarpada

Bosque de Pino-Oyamel con clima Cb' (w_2)(w) ig en un valle intermontano disectado por arroyos casi plano

Bosque de Pino-Oyamel con clima Cb' (w_2)(w) ig en una ladera moderadamente escarpada

Bosque de Pino-Oyamel con clima Cc (w_2) ig en una ladera escarpada

Bosque de Pino-Oyamel con clima Cc (w_2)(w) ig en un valle intermontano disectado por arroyos casi plano

Bosque de Pino-Oyamel con clima Cc (w_2)(w) ig en una ladera inclinada disectada por arroyos

Bosque de Pino-Oyamel con clima Cc (w_2)(w) ig en una ladera moderadamente escarpada

Bosque de Pino con clima Cb' (w_2)(w) ig en un valle intermontano disectado por arroyos casi plano

Bosque de Pino con clima Cb' (w_2)(w) ig en una ladera inclinada disectada por arroyos

Bosque de Pino con clima Cb' (w_2)(w) ig en una ladera moderadamente escarpada

Bosque de Pino con clima Cc (w_2) ig en una cañada moderadamente inclinada

Bosque de Pino con clima Cc (w_2) ig en una cima de domo volcánico casi plana

Bosque de Pino con clima Cc (w_2) ig en una cima de domo volcánico inclinada

Bosque de Pino con clima Cc (w_2) ig en una ladera inclinada

Bosque de Pino con clima Cc (w_2) ig en una ladera inclinada disectada por arroyos

Bosque de Pino con clima Cc (w_2) ig en una ladera moderadamente inclinada

Bosque de Pino con clima Cc (w_2)(w) ig en un aparato volcánico escarpado

Bosque de Pino con clima Cc (w_2)(w) ig en un valle intermontano disectado por arroyos casi plano

Bosque de Pino con clima Cc (w_2)(w) ig en una ladera inclinada disectada por arroyos

Bosque de Pino con clima Cc (w_2)(w) ig en una ladera moderadamente escarpada

Bosque de Pino con clima Cc (w_2)(w) ig en una ladera moderadamente inclinada

Pastizal con clima Cc (w_2)(w) ig en un valle intermontano disectado por arroyos casi plano

3.4.2 Emplazamiento

En el Cuadro 13 se muestra la relación de los criterios de emplazamiento utilizados para seleccionar los sitios donde se instalaron las estaciones meteorológicas.

Cuadro 13. UCHP propuestas para las estaciones meteorológicas

Criterio	EMZ-01	EMZ-02	EMZ-03
Representatividad biofísica			
Altitud (msnm)	3273	3413	3575
Pendiente (%)	0 - 2	> 40	8 - 15
Geoforma	Valle intermontano casi plano disectado por arroyos	Ladera escarpada	Cima inclinada de domo volcánico
Clima	Cc(w ₂)(w)ig	Cc(w ₂)(w)ig	Cc(w ₂)ig
Vegetación	Pastizal	Oyamel	Pino-Aile
Emplazamiento despejado	Si	Si	Si
Terreno nivelado	Si	Si	Si
Cercanía al operador	Si	Si	Si
Fácil acceso	Si	Si	Si

La primer unidad propuesta para la instalación de la EMZ-01 es la base para definir a las demás debido a que se desea dar continuidad a los registros que se tienen de datos meteorológicos anteriores, esta unidad corresponde a un pastizal, que representa un 2.69% de la superficie de la EFEZ, tiene un clima semifrío del grupo de los templados con verano fresco corto, el más húmedo de los subhúmedos, con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal menor de 5% anual, isotermal y con marcha de temperatura tipo ganges que representa una superficie de 51.26% de la EFEZ, se ubica en un valle intermontano casi plano disectado por arroyos con una altitud de 3273 msnm.

La unidad propuesta para la EMZ-02 corresponde a un bosque de oyamel, especie de gran importancia para la investigación que se realiza en este lugar, representa el 16.60% de la superficie de la EFEZ, tiene un clima semifrío del grupo de los templados con verano fresco corto, el más húmedo de los subhúmedos, con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal menor de 5% anual, isotermal y con marcha de temperatura tipo ganges que representa una superficie de 51.26% de la EFEZ, se ubica en una ladera escarpada con una altitud de 3413 msnm, 140 metros más elevado que la EMZ-01 lo cual es relevante para conocer el comportamiento del clima en el

cinturón térmico que se presenta en el rango altitudinal correspondiente a esta unidad.

La unidad propuesta para la EMZ-03 corresponde a un bosque con asociación de pino-aile que representa el 14.63% de la superficie de la EFEZ y que de igual manera son especies que tienen mucha importancia para la investigación que se realiza en este lugar, tiene un clima semifrío del grupo de los templados con verano fresco corto, el más húmedo de los subhúmedos, con régimen de lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal entre 5% y 10.2% anual, isotermal y con marcha de temperatura tipo ganges que representa una superficie de 51.26% de la EFEZ, se ubica en una ladera escarpada con una altitud de 3575 msnm, 162 metros más elevado que la EMZ-03 lo cual es relevante para conocer el comportamiento del clima que se presenta en el rango altitudinal correspondiente a esta unidad.

La ubicación de las tres estaciones en los lugares que cumplieron con los criterios de emplazamiento se muestra en la Figura 11 y las coordenadas se muestran en el Cuadro 14.

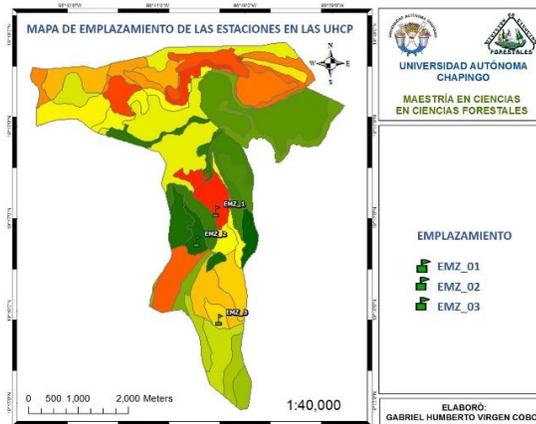


Figura 11. Mapa de emplazamiento de las estaciones meteorológicas

Cuadro 14. Coordenadas de ubicación de las estaciones meteorológicas

Estación	Lat N	Long W	Altitud (msnm)
EMZ-01	19.28	98.67	3273
EMZ-02	19.28	98.68	3413
EMZ-03	19.26	98.67	3575

3.4.3 Pruebas de calibración de las estaciones meteorológicas

Se realizaron pruebas de calibración de las estaciones con equipo de referencia del Departamento de Meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo, mediante una prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales para cada uno de los sensores con intervalos de toma de datos cada 30 minutos durante una semana obteniendo 336 muestras para el análisis estadístico. Las pruebas comprendieron los periodos del 08/05/2016 al 14/05/2016 para las estaciones EMZ-01 y EMZ-02, mientras que para la estación EMZ-03 fue del 02/06/2016 al 8/06/2016.

Pruebas de calibración para las estaciones EMZ-01 y EMZ-02

Se realizaron las pruebas de calibración para las estaciones EMZ-01 y EMZ-02, para los sensores de temperatura, humedad, radiación solar, radiación UV, presión, precipitación, velocidad del viento y dirección del viento, comparando los datos de la estación de referencia contra los datos de las estaciones a prueba, ver Figura 12 y Figura 13.

En las gráficas de las pruebas de calibración de los sensores se puede observar que el valor estadístico t para los sensores de las dos estaciones resultó muy por debajo del valor crítico de t de dos colas (1.96). Por lo que se asume que la prueba de diferencia de medias demuestra que los datos son estadísticamente iguales, debido a que no existe diferencia significativa entre las muestras.

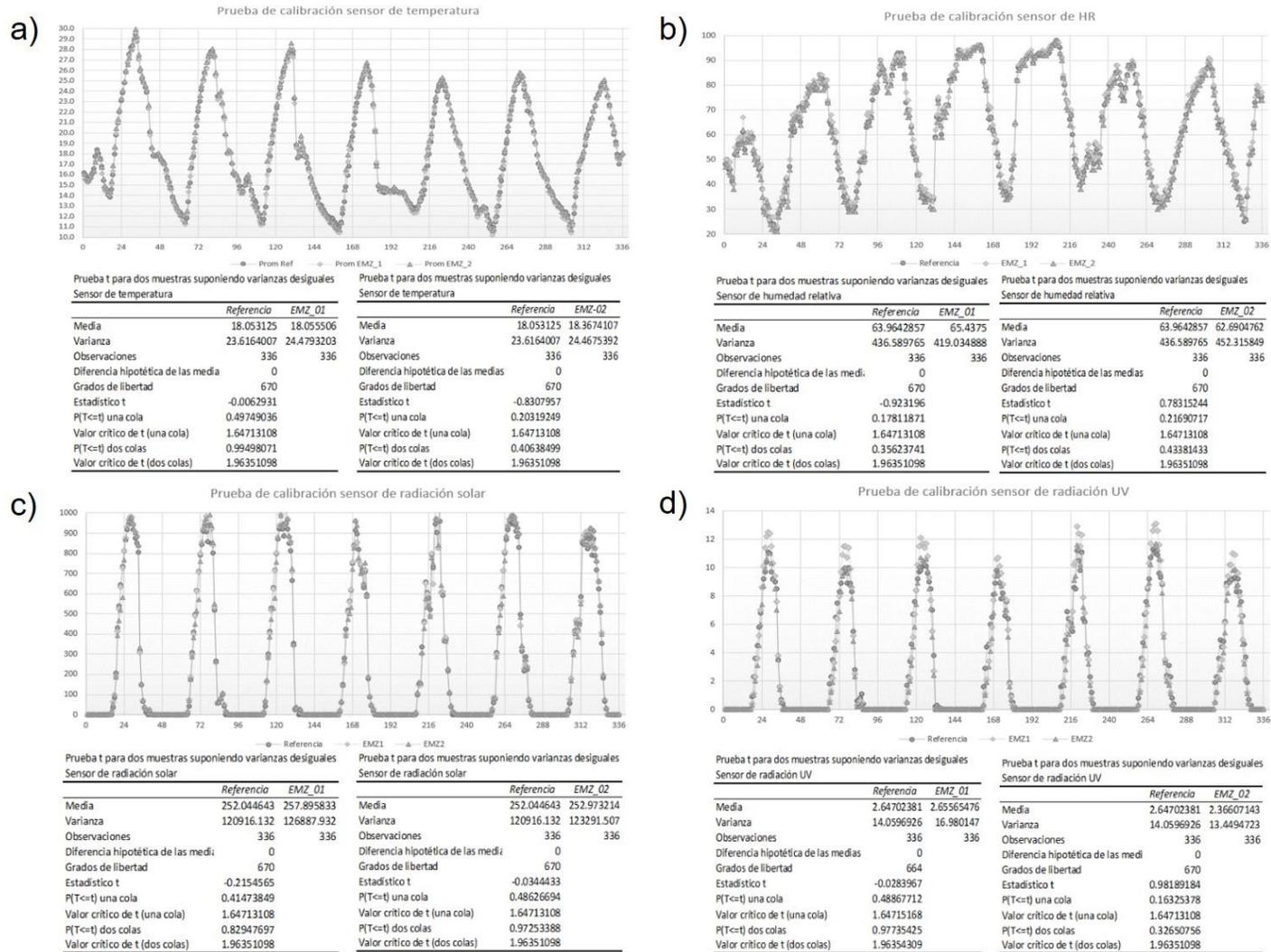


Figura 12. Pruebas de calibración para los sensores: a) Temperatura, b) Humedad, c) Radiación solar y d) Radiación UV

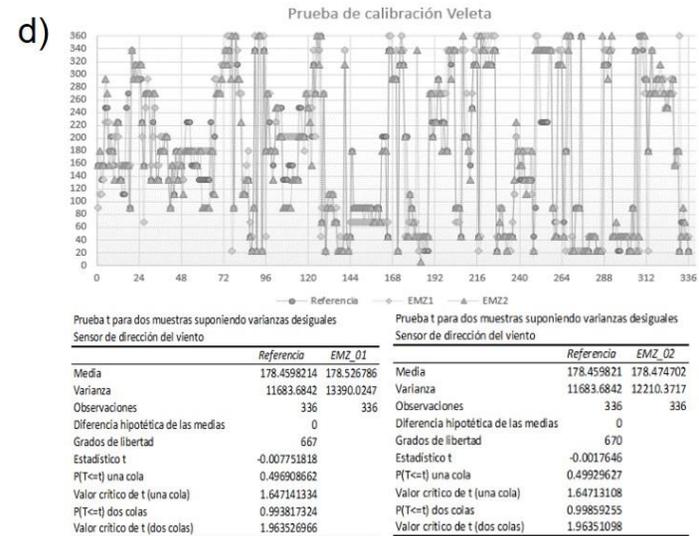
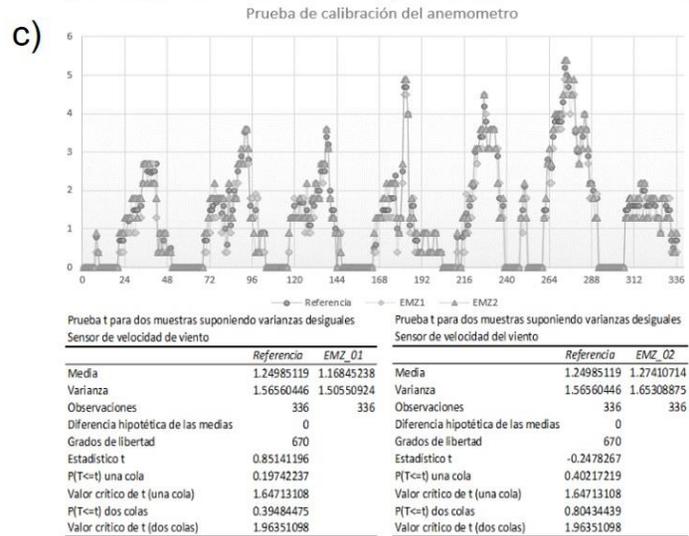
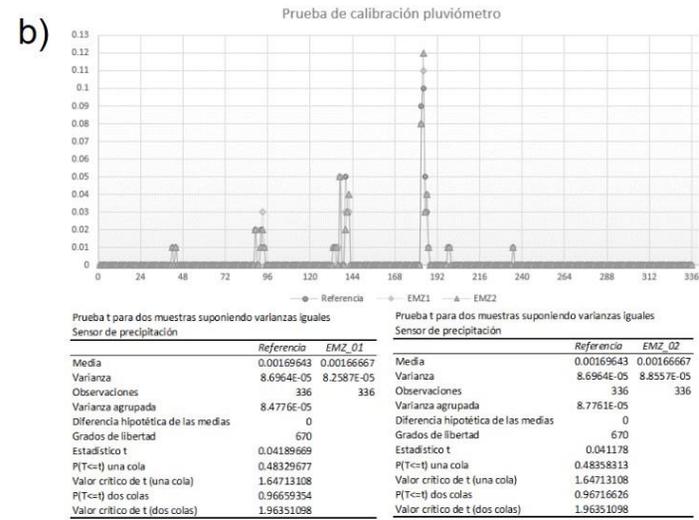
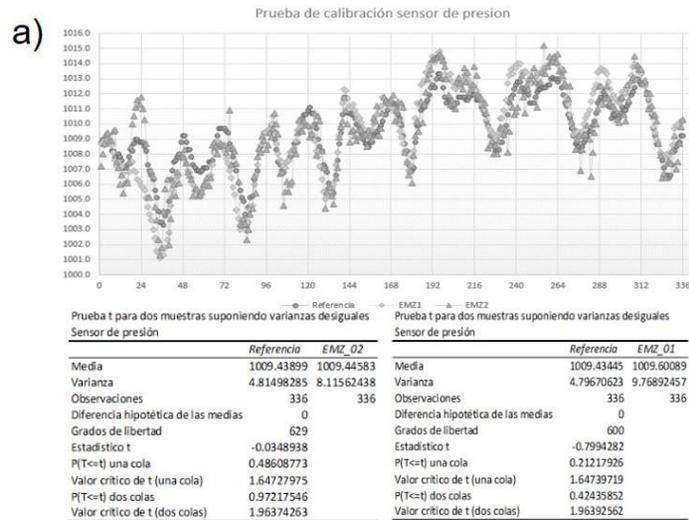


Figura 13. Pruebas de calibración para los sensores: a) Presión, b) Precipitación, c) Vel. Viento y d) Dir. Viento

Pruebas de calibración para la estación EMZ-03

Se realizaron las pruebas de calibración a los sensores de la estación, encontrando que en los sensores de temperatura y humedad existía una diferencia significativa y se procedió a calibrar; por su parte los sensores de presión, velocidad del viento y dirección del viento, no muestran diferencia significativa en el análisis estadístico. Por su parte, para el sensor de precipitación los datos fueron validados con la estación de referencia mediante una prueba de lluvia artificial con un equipo del Departamento de Suelos de la UACH, debido a que en el periodo de prueba no se registró precipitación además de que esta prueba daría más certeza en la toma de datos, (ver Figura 14).

En el sensor de temperatura se encontró una diferencia significativa entre las muestras por lo cual se realizó un ajuste de -0.78°C en el código de programación del arduino. Se volvió a poner a prueba durante un periodo de una semana, se realizó nuevamente el análisis estadístico y los resultados demostraron que no se existe diferencia significativa entre las muestras, por lo que el sensor ya se encuentra calibrado. En el sensor de humedad se encontró diferencia significativa entre las muestras y de la misma forma se realizó un ajuste en este caso de $+2.34\%$, en el código de programación del arduino, por lo que al correr nuevamente las pruebas de calibración durante una semana se encontró que el valor estadístico t es inferior al valor crítico de t de dos colas, lo que supone que no existe diferencia significativa en las muestras.

Por su parte, los valores estadísticos de t para los sensores de presión, velocidad y dirección del viento resultaron muy por debajo del valor crítico de t (de dos colas). Por lo que se asume que la prueba de diferencia de medias demuestra que no se rechaza la hipótesis de que los datos son estadísticamente iguales, debido a que no existe diferencia significativa en las muestras. Respecto al sensor de precipitación se validaron los datos mediante la comparación de las lecturas con un equipo de lluvia artificial, lo que resulto en que la cantidad de lluvia es similar con lo que registro la estación EMZ-03.

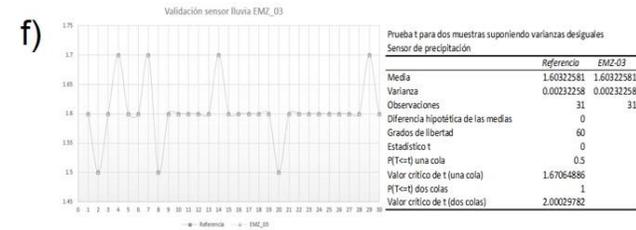
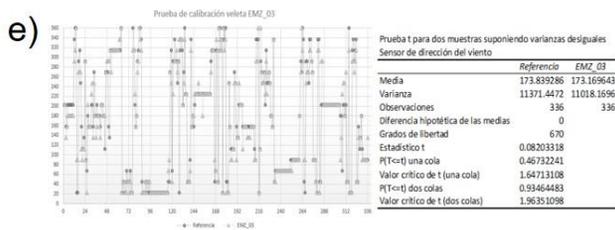
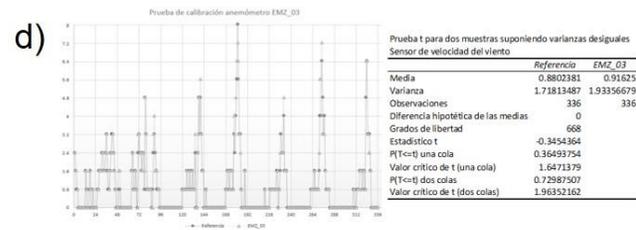
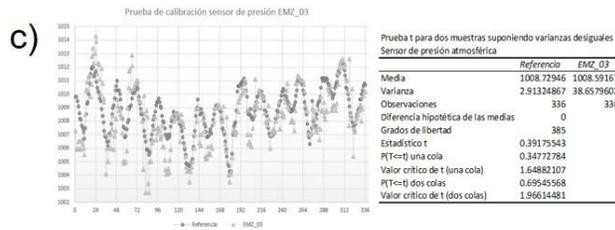
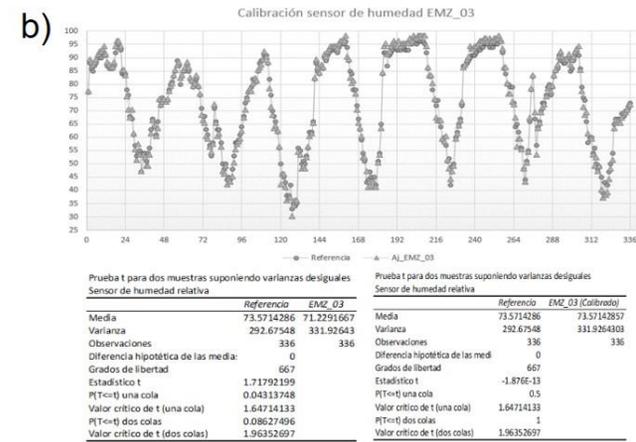
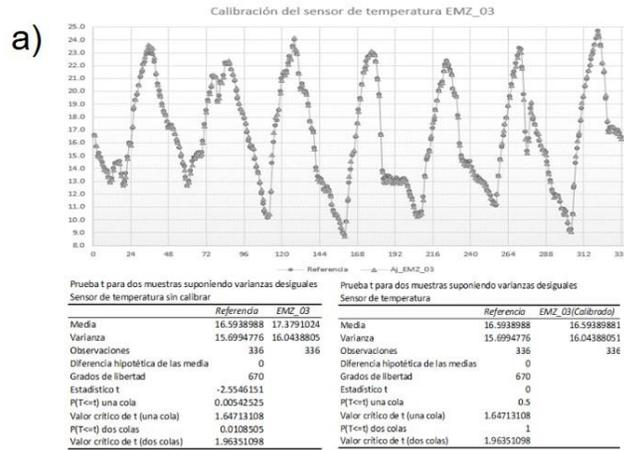


Figura 14. Pruebas de calibración para los sensores: a) Temperatura, b) Humedad, c) Presión d) Velocidad del Viento, e) dirección del viento y f) Precipitación

3.4.4 Instalación de las estaciones meteorológicas

En cada sitio seleccionado se delimitó un área de 25 m² en la cual se instaló una cerca de malla ciclónica pegada al suelo con una altura de 1.5 m, la cual cuenta con una puerta con candado para salvaguardar cada una de las estaciones de cualquier riesgo de maltrato o robo. La instalación de la EMZ-01 fue el 22/07/2016, mientras que las EMZ-02 y EMZ-03 fue el 16/08/2016.

Se instalaron las estaciones en el centro de cada área cercada, anclando los tripies al suelo con unas bases que se les construyeron para asegurarlas al suelo, así mismo fue necesario ajustar los tornillos de los tripies para que quedaran firmemente anclados al suelo. Las veletas de dirección del viento se instalaron con orientación al norte. Las celdas fotovoltaicas de los equipos se instalaron hacia el sur para garantizar la eficiencia de energía solar, debido a la mayor parte del año el sol se encuentra al sur de la latitud en la que se encuentran las estaciones.

Los pluviómetros se nivelaron con una niveleta de mano para asegurar que los balancines no tengan más inclinación a los lados y con esto asegurar una adecuada toma de datos. Los sensores de radiación solar y radiación UV se nivelaron correctamente con base a su la burbuja de nivel que estos tienen para que la radiación solar llegue adecuadamente a los sensores, (Figura 15).



Figura 15. Emplazamiento de las estaciones en la EFEZ

Una vez instaladas las estaciones se procedió a la configuración de las consolas WeatherLink de las estaciones EMZ-01 y EMZ-02, y para la estación EMZ-03 se cargó el código del programa en el arduino. Posteriormente se verifico la correcta toma de datos.

Se elaboró un calendario para la recolección de los datos, de tal forma que la recolección se realizara durante la primera semana de cada mes. Esta recolección de datos se llevará a cabo de manera manual, es decir, el operador tendrá que acudir mensualmente con una laptop con puerto USB para descargar los datos. Para el caso de las estaciones EMZ-01 y EMZ-02, por medio del software WeatherLink, se realiza la transferencia de datos a la computadora de forma automática conectando el cable USB del datalogger a la computadora portátil. Para la EMZ-03 se retira la memoria microSD de la estación para posteriormente copiar los datos en la computadora, después se vuelve a colocar la memoria en la estación y se vuelve a programar el arduino con el código de programación (Anexo 4.1).

En la Figura 16 y Figura 17 se presentan los datos de los primeros 20 días de operación de las estaciones meteorológicas, en las gráficas se aprecian las diferencias del tiempo atmosférico que se presenta en cada unidad, lo cual destaca por las diferentes altitudes, vegetación y geoforma en las que se encuentran las estaciones.

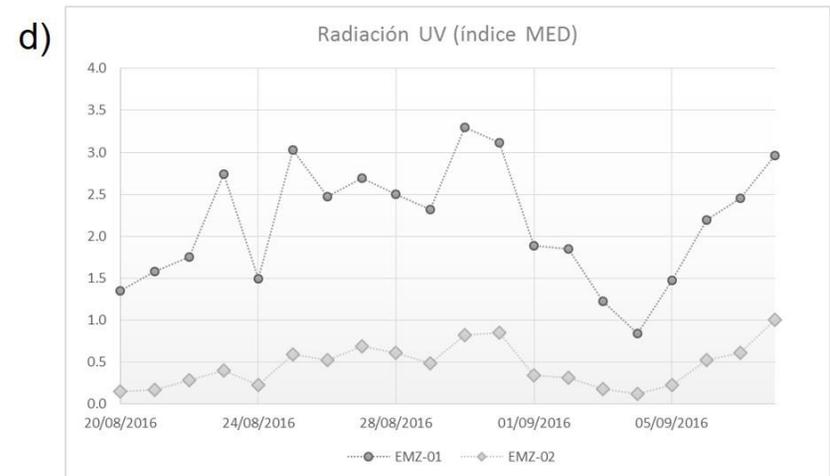
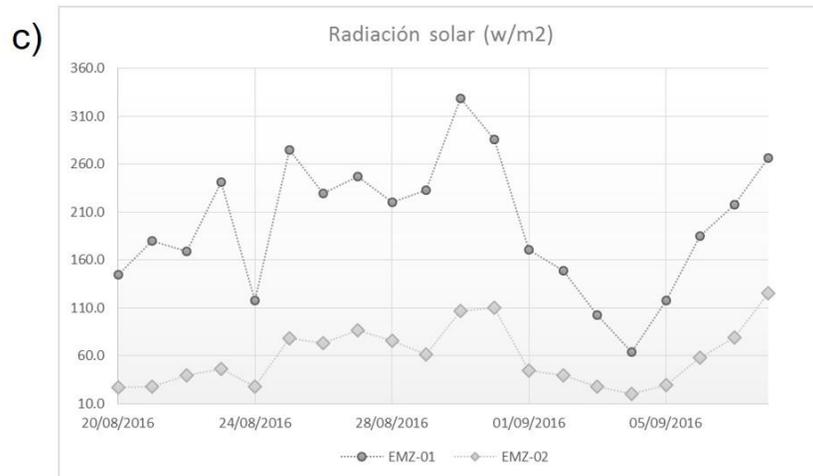
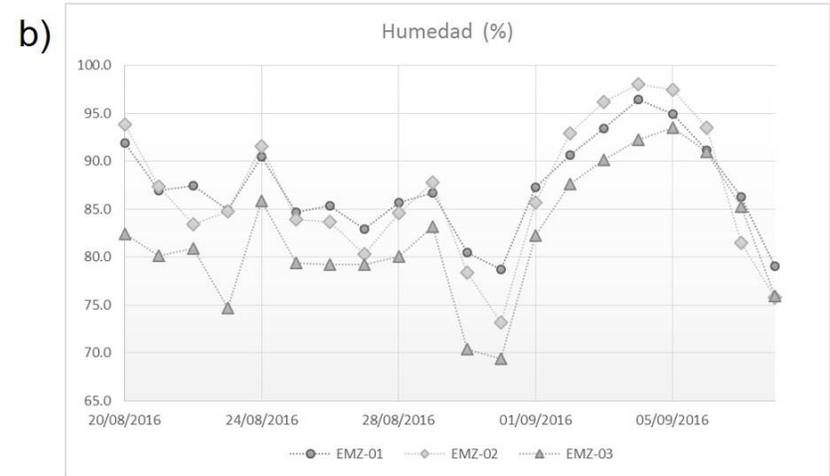
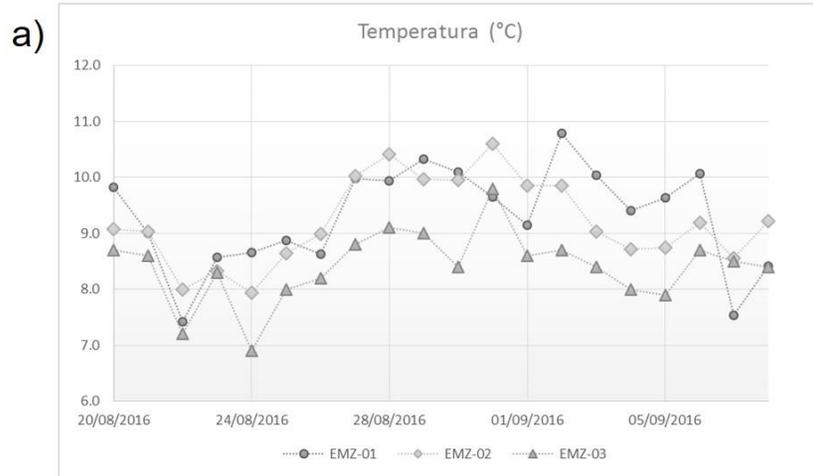


Figura 16. Datos de las tres estaciones de: a) Temperatura, b) Humedad, c) Radiación solar y d) Radiación UV

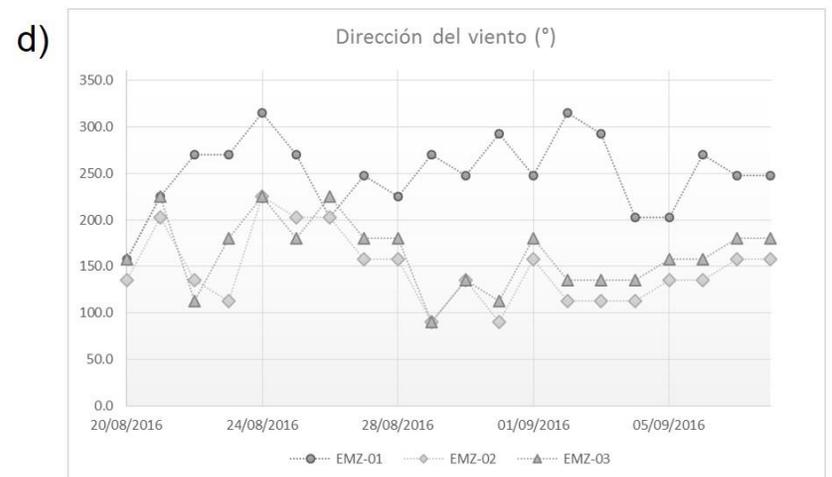
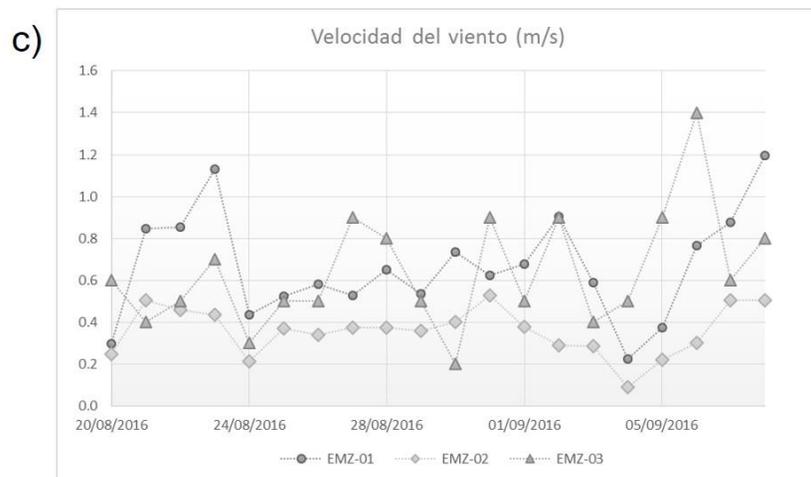
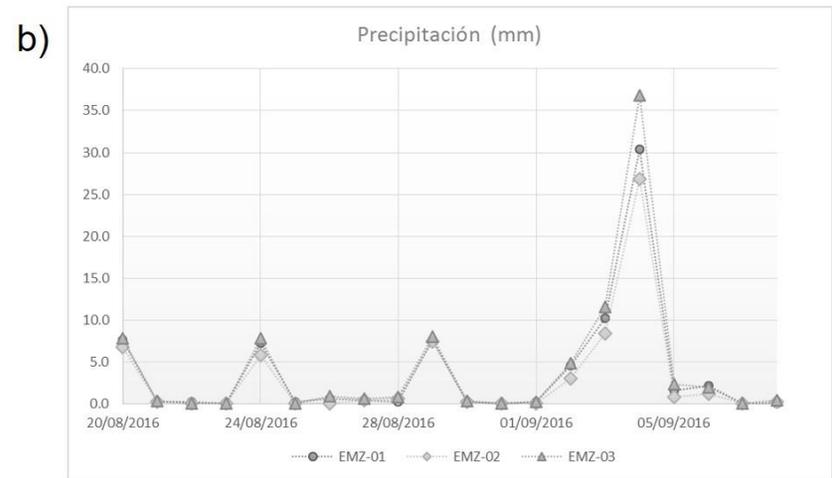
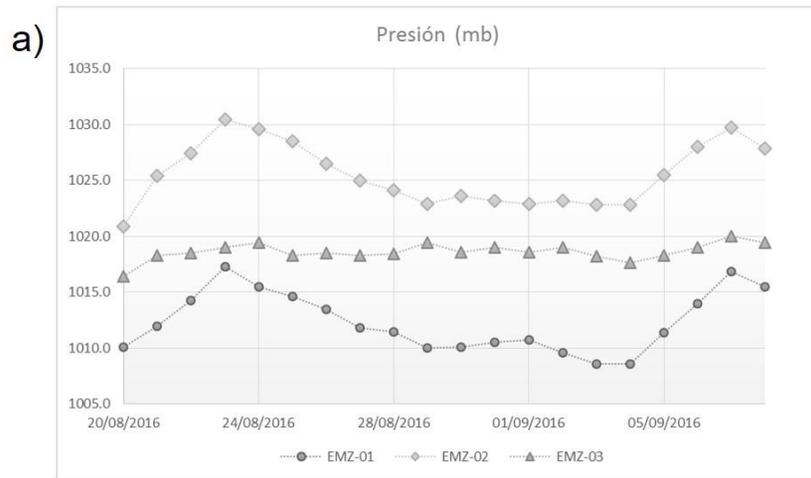


Figura 17. Datos de las tres estaciones de: a) Presión, b) Precipitación, c) Velocidad del viento y d) Dirección del viento

3.5 Conclusiones

Se logró generar el mapa de unidades cartográficas homogéneas de paisaje a partir de la caracterización de los componente biofísicos de la EFEZ con ayuda de herramientas digitales y con base en la metodología de Gómez et al. (2008). A partir de las unidades cartográficas homogéneas de paisaje se seleccionaron tres unidades que tienen relevancia de acuerdo a los criterios de emplazamiento y al interés de los usuarios, para conocer el tiempo atmosférico que se asocia al comportamiento y dinámica de la vegetación y a los servicios ambientales.

Debido a que ya se contaba con una estación meteorológica automática comercial de la marca Davis Instruments modelo Vantage Pro2 Plus se procedió a darle mantenimiento y a reemplazar unos sensores que estaban descompuestos para ponerla en funcionamiento. Por su parte, se adquirió una estación de la misma marca modelo Vantage Pro2 Plus para contar con dos estaciones similares. Fue necesario tomar un curso de programación en arduino para para conocer cómo funciona la placa y saber que sensores eran compatibles con él microcontrolador, además se adquirieron otros materiales necesarios para armar una la tercer estación meteorológica.

Fue necesario poner a prueba de calibración los sensores de las tres estaciones, lo cual sirvió para conocer más sobre el funcionamiento de las mismas y para confirmar que las estaciones comerciales ya vienen calibradas de fábrica y que la de código abierto si era necesario hacer una calibración a los sensores de temperatura y humedad.

Finalmente se puso en operación la red de monitoreo meteorológico y se encontró en los datos de los primeros 20 días de operación que existen diferencias en el tiempo atmosférico de cada unidad, por lo que tuvo sentido ubicarlas conforme a un trayecto altitudinal donde se buscó tener diferente vegetación y geofoma.

3.6 Literatura citada

ArcGIS. (2016). ArcMap 10.1. EUA.

Arduino. (2016). Integrated development environment. Italia.

Blanco, S., Ceballos, G., Galindo, C., Maass, J. M., Ptatrón, R., Pescador, A., & Suárez, A. I. (1981). *Ecología de la estación experimental Zoquiapan* (1.^a ed.). México: Serie Agronomía 2, Universidad Autónoma Chapingo.

DAVIS. (2015). Weather Instruments. Recuperado 20 de octubre de 2016, a partir de <http://www.davisnet.com/weather-monitoring/>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1996). Bases digitales de datos de suelos y terreno a nivel mundial y nacional (SOTER): manual de procedimientos. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

García, E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. (SIGSA, Ed.) (4.^a ed.). México: Instituto de geografía de la UNAM.

Gómez, J. D., Etchevers, J. D., Monterroso, A. I., Gay, C., Campo, J., & Martínez, M. (2008). Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera*, 21(1), 35-56.

Gómez-Mendoza, L., & Arriaga, L. (2007). Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pine species of Mexico. *Conservation Biology*, 21(6), 1545-1555. <http://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00814.x>

Google. (2016). Google Earth. EUA.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2006). Extractor rápido de información climática (ERIC) versión 3. México: Servicio Meteorológico Nacional.

Instituto Nacional de Ecología (INE). (2010). *Manual 4. Operación de estaciones de medición de la calidad del aire, mantenimiento y calibración de sus componentes* (1.^a ed.). México: INECC.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016a). Cuerpos de agua. Recuperado 18 de julio de 2016, a partir de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/hidrologia/infoescala.aspx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016b). Estructuras geológicas. Recuperado 18 de julio de 2016, a partir de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/geologia/infoescala.aspx>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016c). Modelo de elevación digital. Recuperado 18 de julio de 2016, a partir de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016d). Uso de suelo y vegetación. Recuperado 22 de agosto de 2016, a partir de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/usosuelo/>
- Li, D. (2014). Assessing the impact of interannual variability of precipitation and potential evaporation on evapotranspiration. *Advances in Water Resources*, 70, 1-11. <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.04.012>
- Pérez, A. (1983). *Marco de referencia para un proyecto de zonificación para el desarrollo agropecuario y rural* (1.^a ed.). Republica Dominicana: Instituto interamericano de cooperación para la agricultura.
- Pompa-García, M., Rodríguez-Flores, F. J., Aguirre-Salado, C. A., & Miranda-Aragón, L. (2013). Influencia de la evaporación en el crecimiento forestal. *Agrociencia*, 47(8), 829-836.
- Sparkfun. (2013). Sparkfun. Recuperado 17 de octubre de 2016, a partir de <https://learn.sparkfun.com/tutorials/weather-shield-hookup-guide>
- Velázquez, V. (2011). *Efectos del cambio climático en el sector primario de dos especies de importancia económica para el estado de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.

4 ANEXOS

4.1 Código de programación de la estación EMZ-03

```
#include <Wire.h>           //Comunicación I2C necesitado para los sensores
#include "MPL3115A2.h"      //Sensor de presión
#include "HTU21D.h"        //Sensor de humedad y temperatura
#include "RTCLib.h"        //Librería para el reloj en tiempo real
#include <SD.h>             //Tarjeta SD
#include <SPI.h>            // Comunicación con SD
const int chipSelect = 53; //Pin para grabación de datos en SD
RTC_DS1307 RTC;
MPL3115A2 myPressure;     //Crea un caso para la presión del sensor de presión
HTU21D myHumidity;       //Crea un caso para la presión del sensor de humedad
/
/Definición de los pines del hardware
// digital I/O pines
const byte WSPEED = 3;
const byte RAIN = 2;
const byte STAT1 = 7;
const byte STAT2 = 8;

// analog I/O pins
const byte REFERENCE_3V3 = A3;
const byte LIGHT = A1;
const byte BATT = A2;
const byte WDIR = A0;

//Variables Globales
long lastSecond;         //Contador millis para ver un segundo rol
byte seconds;           //Cuando llegue a 60, aumentar los minutos actuales
byte seconds_2m;        // Realiza un seguimiento de la "velocidad del viento /
                        // dir promedio" durante 2 minutos de la última serie de datos
byte minutes;           //Realiza un seguimiento de dónde nos encontramos
                        // en diversas matrices de datos
byte minutes_10m;       // Realiza un seguimiento de dónde estamos en
                        // ráfagas de viento / dir durante los últimos 10 minutos matriz de datos
int Hora;
int Minuto;
int Segundo;
long lastWindCheck = 0;
volatile long lastWindIRQ = 0;
volatile byte windClicks = 0;
unsigned long TiempoDeMuest = 120000; //2 min, Tiempo De Muestreo
                        // en milisegundos
byte windspdavg[120];   //120 bytes para realizar un seguimiento de 2 minutos
                        // en promedio
```

```

int winddiravg[120];          //120 enteros para realizar un seguimiento promedio
de 2 minuto
float windgust_10m[10];      //10 flotantes para realizar un seguimiento del 10
minuto máx
int windgustdirection_10m[10]; //10 enteros para realizar un seguimiento del 10
minuto máx
volatile float rainHour[60];  //60 flotantes para realizar un seguimiento de 60
minutos de lluvia

//Estos son los valores del clima en espera:
int winddir = 0;              //[0-360 dirección instantánea de la dirección de
viento]
float windspeedmph = 0;       //[mph, velocidad instantánea del viento]
float windgustmph = 0;        //[mph, ráfagas de viento, usando el periodo de
tiempo especificado]
int windgustdir = 0;          //[0-360 using software specific time period]
float windspeedmph_avg2m = 0; //[mph, promedio velocidad del viento en 2
minutos]
int winddir_avg2m = 0;        //[0-360, promedio dirección del viento en 2
minutos]
float windgustmph_10m = 0;    //[mph, últimos 10 minutos de velocidad de
ráfagas de viento]
int windgustdir_10m = 0;     //[0-360, últimos 10 minutos de dirección de
viento]
float humidity = 0;           //[% humedad relativa]
float tempf = 0;              //[Temperatura en grados Fahrenheit]
float tempC = 0;              //[Temperatura en grados centígrados]
float rainin = 0;             //[pulgadas de lluvia en la ultima hora] --
precipitación acumulada en los últimos 60 minutos
volatile float dailyrainin = 0; //[pulgadas de lluvia hasta la fecha de hoy en la
hora local]
float incrluvia;              //[Incremento de lluvia por cada tiempo de
sensado]
float antlluvia=0;           //[Cantidad de lluvia a restar cada cierto tiempo de
sensado]
float pressure = 0;          //[Presión]
float batt_lvl = 11.8;       //[valor analógico de 0 a 1023]
float light_lvl = 455;       //[valor analógico de 0 a 1023]

// Los datos volátiles son sujetos a IRQs
volatile unsigned long raintime, rainlast, raininterval, rain;

//Rutinas de interrupción (estos son llamados por las interrupciones de
hardware, no por el código principal)
void rainIRQ(){

// Conteos del medidor de lluvia a medida que ocurren

```

```

// Activado por el imán y el interruptor de lámina en el medidor de lluvia, que se
adjunta a la entrada D2
raintime = millis();           // Toma la hora actual
raininterval = raintime - rainlast; // Calcula el intervalo entre esta y el ultimo
evento

if (raininterval > 10)         //Ignorar interruptor-rebote cuando tenga parpadeo
menos de 10 ms después del borde inicial
{dailyrainin += 0.2794;       //Cada volcado es 0.011 in ó 0.2794 mm de agua
  rainHour[minutes] += 0.2794; //Aumentar esta pequeña cantidad de lluvia
mm
  rainlast = raintime;       // Configuración para el próximo evento
}
}
void wspeedIRQ(){

//Activado por el imán en el anemómetro (2 ticks por rotación), que se adjunta a
la entrada D3
if (millis() - lastWindIRQ > 10) // Ignorar interruptor-rebote tenga parpadeo
menos de 10 ms (lectura max 142 millas por hora) después de que se cierre el
interruptor de láminas
{
  lastWindIRQ = millis();       //Graba el tiempo actual
  windClicks++;                //Hay 1.492 m/s por cada clic por segundo.
}
}
void setup(){
  Wire.begin();
  RTC.begin();
  RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));

  Serial.begin(9600);           // Inicializa la comunicación serial

  // Verificar si la SD Card puede ser inicializada correctamente
  Serial.print("Inicializando la tarjeta SD...");
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Fallo en la SD");
    return;                     // No hacer nada y volver a comprobar
  }
  Serial.println("Tarjeta inicializada.");

  pinMode(STAT1, OUTPUT);       //Status LED Blue
  pinMode(STAT2, OUTPUT);       //Status LED Green

  pinMode(WSPPEED, INPUT_PULLUP); // Entrada del sensor de la velocidad
del viento en metros.
  pinMode(RAIN, INPUT_PULLUP);  // Entrada del sensor del pluviómetro

```

```

pinMode(REFERENCE_3V3, INPUT);
pinMode(LIGHT, INPUT);

//Configuración del sensor de presión
myPressure.begin();           // Obtener el sensor
myPressure.setModeBarometer(); // Obtener el sensor
myPressure.setOversampleRate(7); // Serie de submuestreo recomendado
128
myPressure.enableEventFlags(); // Activar todas las bandas de eventos
eventos temporales y tres de presión

//Configuración del sensor de humedad
myHumidity.begin();
seconds = 0;
lastSecond = millis();

// Agregar funciones a los pines de interrupción externa IRQ
attachInterrupt(0, rainIRQ, FALLING);
attachInterrupt(1, wspeedIRQ, FALLING);

// Activar las interrupciones
interrupts();

Serial.println("Estación meteorológica inicializada");
}
int ii=0;

void loop(){
  // Se adquiere la fecha y hora en el reloj
  DateTime now=RTC.now();
  // se adquiere la hora del reloj y se muestra en el monitor serial
  Serial.print(now.year(),DEC); //año
  Serial.print('/');
  Serial.print(now.month(),DEC); //mes
  Serial.print('/');
  Serial.print(now.day(),DEC); //dia
  Serial.print(' ');
  Serial.print(now.hour(),DEC); //hora
  Serial.print(':');
  Serial.print(now.minute(),DEC); //minuto
  Serial.print(':');
  Serial.print(now.second(),DEC); //segundo
  Serial.println();

  //Keep track of which minute it is
  if(millis() - lastSecond >= 1000) {
    digitalWrite(STAT1, HIGH); //Parpadeo inicial del LED
  }
}

```

```

lastSecond += 1000;

//Tome una lectura promedio de velocidad y dirección cada segundo durante
2 minutos
if(++seconds_2m > 119) seconds_2m = 0;

//Calcula la velocidad y dirección del viento todos los segundos por 120
segundos para obtener el promedio en 2 minutos
float currentSpeed = windspeedmph;
int currentDirection = get_wind_direction();
windspdavg[seconds_2m] = (int)currentSpeed;
winddiravg[seconds_2m] = currentDirection;

// Checa y visualiza si esta es una racha por minuto
if(currentSpeed > windgust_10m[minutes_10m]) {
  windgust_10m[minutes_10m] = currentSpeed;
  windgustdirection_10m[minutes_10m] = currentDirection;
}

//Checa y visualiza si esta es una racha por día
if(currentSpeed > windgustmph) {
  windgustmph = currentSpeed;
  windgustdir = currentDirection;
}
if(++seconds > 59) {
  seconds = 0;
  if(++minutes > 59) minutes = 0;
  if(++minutes_10m > 9) minutes_10m = 0;
  rainHour[minutes] = 0;
  windgust_10m[minutes_10m] = 0;
}

Hora = now.hour();
Minuto = now.minute();
Segundo = now.second();

if (Hora==0 && Minuto==0){
  dailyrainin=0;          //Pone en cero la lluvia diaria
}
incrlluvia=dailyrainin-antlluvia; // Incremento de lluvia actual por minuto de
sensado
antlluvia=antlluvia+incrlluvia;   //Lluvia del minuto anterior registrado por el
sensor

//Reporta todas las lecturas
printWeather();

```

```

digitalWrite(STAT1, LOW);    //Apaga el LED de estatus
}
//GUARDA VALORES EN ARCHIVO TXT EN SD CARD
File dataFile = SD.open("arduino.txt", FILE_WRITE);
if (dataFile)
{
  int DateYear = now.year();
  int DateMonth = now.month();
  int DateDay = now.day();
  int DateHour = now.hour();
  int DateMinute = now.minute();
  int DateSecond = now.second();

  dataFile.print(DateDay);
  dataFile.print('/');
  dataFile.print(DateMonth);
  dataFile.print('/');
  dataFile.print(DateYear);
  dataFile.print(" ");
  dataFile.print(DateHour);
  dataFile.print(":");
  dataFile.print(DateMinute);
  dataFile.print(",");
  dataFile.print(winddir);
  dataFile.print(" ");
  dataFile.print(windspeedmph);
  dataFile.print(" ");
  dataFile.print(humidity);
  dataFile.print(" ");
  dataFile.print(tempC);
  dataFile.print(" ");
  dataFile.print(rainin);
  dataFile.print(" ");
  dataFile.print(dailyrainin);
  dataFile.print(" ");
  dataFile.print(pressure);
  dataFile.print(" ");
  dataFile.print(light_lvl);
  dataFile.print(" ");
  dataFile.println();
  dataFile.close();
  Serial.println("Datos guardados en SD");
}
else{
  Serial.println("Error abriendo arduino.txt");
}
}

```

```

delay(TiempoDeMuest);
}

// Calcula cada una de las variables que se tiene previsto
void calcWeather()
{
    // Calculo de la dirección delo viento
    winddir = get_wind_direction();

    // Calculo de la velocidad del viento
    windspeedmph = get_wind_speed();

    //Reporte de rafagas de viento diario
    windgustmph = 0;
    windgustdir = 0;

    //Calculo de velocidad más alta de ráfagas de viento promedio en 2 minutos
    float temp = 0;
    for(int i = 0 ; i < 120 ; i++)
        temp += windspdavg[i];
    temp /= 120.0;
    windspdmph_avg2m = temp;

    // Calculo de la dirección del viento promedio (winddir_avg2m)
    temp = 0; //Can't use winddir_avg2m because it's an int
    for(int i = 0 ; i < 120 ; i++)
        temp += winddiravg[i];
    temp /= 120;
    winddir_avg2m = temp;

    //Busca de mas alta rafaga de viento en los últimos 10 minutos
    windgustmph_10m = 0;
    windgustdir_10m = 0;

    // Medición hasta por 10 minutos (Pasos a través de 10 minutos)
    for(int i = 0; i < 10 ; i++) {
        if(windgust_10m[i] > windgustmph_10m) {
            windgustmph_10m = windgust_10m[i];
            windgustdir_10m = windgustdirection_10m[i];
        }
    }

    // Calculo de la humedad relativa
    humidity = myHumidity.readHumidity();

    //Calculo de tempf desde el sensor de presión
    tempf = myPressure.readTemp();    // Celsius

```

```

tempC=tempf-0.7852; // 0.7852 factor de calibración para la
temperatura en grados centígrados

//Total de lluvia en un día
//Calcular la cantidad de lluvia durante los últimos 60 minutos
rainin = 0;
for(int i = 0 ; i < 60 ; i++)
    rainin += rainHour[i];

//Calculo de la presión
pressure = myPressure.readPressure();

//Calculo del nivel del luz
light_lvl = get_light_level();

// Calculo del nivel de batería
batt_lvl = get_battery_level();
}
//Devuelve el voltaje del sensor de luz basado en el pin de 3.3V
float get_light_level(){
    float operatingVoltage = analogRead(REFERENCE_3V3);
    float lightSensor = analogRead(LIGHT);
    operatingVoltage = 3.3 / operatingVoltage; //El voltaje de referencia es
3.3V
    lightSensor = operatingVoltage * lightSensor;
    return(lightSensor);
}
// Devuelve el voltaje de la clavija en bruto basado en el pin de 3.3V
// Esto nos permite ignorar lo que podría ser VCC (un Arduino USB conectado a
VCC tiene de 4,5 a 5,2 V)
// Nivel de la batería está conectado al pin RAW en Arduino y se alimenta a
través de dos resistencias 5%:
// 3.9K En el lado alto (R1), y 1K en el lado bajo (R2)
float get_battery_level() {
    float operatingVoltage = analogRead(REFERENCE_3V3);
    float rawVoltage = analogRead(BATT);
    operatingVoltage = 3.30 / operatingVoltage; //El voltaje de referencia es
3.3V
    rawVoltage = operatingVoltage * rawVoltage; //Convertir de 0 a 1023 enteros
de tensión real en el pin BATERÍA
    rawVoltage *= 4.90; //((3.9k+1k)/1k - voltaje múltiple
BATT por el divisor de voltaje para obtener el voltaje del sistema real
    return(rawVoltage);
}
//Devuelve la velocidad instantánea del viento
float get_wind_speed(){
    float deltaTime = millis() - lastWindCheck; //750ms

```

```

    deltaTime /= 1000.0; //Convierte a segundos
    float windSpeed = (float)windClicks / deltaTime; //3 / 0.750s = 4
    windClicks = 0; //Restablecer a cero el contador
    lastWindCheck = millis();
    windSpeed *= 1.492; //4 * 1.492 m/S = 5.968MPH
    return(windSpeed);
}
//Leer el sensor de dirección del viento, devuelve el rumbo en grados
int get_wind_direction() {
    unsigned int adc;
    adc = analogRead(WDIR); // Obtener la lectura actual del
    sensor

    // La siguiente tabla es lecturas ADC para la salida del sensor de dirección del
    viento, ordenados de menor a mayor.
    // Cada umbral es el punto medio entre las partidas adyacentes. La salida es
    grados para que la lectura ADC.

    if (adc < 380) return (113); //ESE
    if (adc < 393) return (68); //ENE
    if (adc < 414) return (90); //E
    if (adc < 456) return (158); //SSE
    if (adc < 508) return (135); //SE
    if (adc < 551) return (203); //SSO
    if (adc < 615) return (180); //S
    if (adc < 680) return (23); //NNE
    if (adc < 746) return (45); //NE
    if (adc < 801) return (248); //OSO
    if (adc < 833) return (225); //SO
    if (adc < 878) return (338); //NNO
    if (adc < 913) return (0); // N
    if (adc < 940) return (293); //ONO
    if (adc < 967) return (315); //NO
    if (adc < 990) return (270); //O
    return (-1); // error, sensor desconectado!
}
// Imprime las diversas variables directamente al puerto
void printWeather() {
    calcWeather(); //lr al cálculo de todos los sensores

    Serial.println();
    Serial.print(",DirViento=");
    Serial.print(winddir);
    Serial.print(",WindSpeed=");
    Serial.print(windspeedmph, 1);
    Serial.print(",humedad=");
    Serial.print(humidity, 1);

```

```
Serial.print(",TempC=");  
Serial.print(tempC, 1);  
Serial.print(",lluvia=");  
Serial.print(rainin, 2);  
Serial.print(",lluviaDia=");  
Serial.print(dailyrainin, 2);  
Serial.print(",Presion=");  
Serial.print(pressure, 2);  
Serial.print(",Luz=");  
Serial.print(light_lvl, 2);  
Serial.print(".");  
Serial.println("#");  
}
```