



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**CUANTIFICACIÓN DE Hg EN DEPÓSITO HÚMEDO (FRACCIÓN SOLUBLE E  
INSOLUBLE) COLECTADO EN 2 ESTACIONES DE LA RED UNIVERSITARIA  
DE OBSERVATORIOS ATMOSFÉRICOS (RUOA), CIUDAD UNIVERSITARIA  
Y ALTZOMONI**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
QUÍMICO FARMACÉUTICO BIÓLOGO**

**PRESENTA**

**Héctor Rogelio Méndez González**



**Ciudad Universitaria, CD. MX.**

**AÑO 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE: IRMA GARCÍA GAVILÁN GARCÍA**

**VOCAL: GEMA LUZ ANDRACA AYALA**

**SECRETARIO: ROCÍO GARCÍA MARTÍNEZ**

**1er. SUPLENTE: ALEJANDRA MENDOZA CAMPOS**

**2° SUPLENTE: ELIZABETH REYES LÓPEZ**

**EL PRESENTE TRABAJO SE DESARROLLÓ EN EL LABORATORIO DE AEROSOLES  
ATMOSFÉRICOS, DEL CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA (CCA)-UNAM**

---

**ASESOR DEL TEMA:**

**DRA. ROCÍO GARCÍA MARTÍNEZ**

---

**SUSTENTANTE:**

**HÉCTOR ROGELIO MÉNDEZ GONZÁLEZ**

**Agradecimientos:**

Agradezco al proyecto PAPIIT-IA101313-2 por financiar el trabajo desarrollado para esta tesis.

## ÍNDICE

Índice de figuras	i
Índice de tablas	ii
RESUMEN	1
CAPITULO I	2
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 Introducción	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Hipótesis	3
CAPITULO II	4
2. ANTECEDENTES	4
2.1 Mercurio	4
2.2 Geoquímica del mercurio	5
2.3 Fuentes de emisión de mercurio	6
2.3.1 Fuentes de emisión naturales	6
2.3.2 Fuentes de emisión antropogénicas	7
2.3.2 Fuentes intencionales, no intencionales y procesos de remoción	7
2.4 Procesos de combustión del carbón	9
2.5 Toxicidad	10
2.6 Convenio de Minamata	11
2.7 Meteorología y climatología	12
2.7.1 Evaporación	13
2.7.2 Condensación	13
2.7.3 Formación de nubes	14
2.7.3.1 Tipos de nubes	15

2.7.4 Núcleos de condensación	17
2.7.5 Teoría de Bergeron-Findeisen	18
2.7.6 Teoría de la colisión	18
2.7.7 Precipitaciones: tipos	18
2.7.7.1 Convectivo	18
2.7.7.2 Ciclónico	19
2.7.7.3 Orográfica	20
2.7.8 Leyes del movimiento horizontal	21
2.7.8.1 Fuerza del gradiente de presión	21
2.7.8.2 Fuerza de Coriolis	21
2.7.8.3 Aceleración centrípeta	23
2.7.8.4 Fuerza de rozamiento	23
CAPITULO III	24
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	24
3.1 Sitios de muestreo	24
3.1.1 Observatorio Atmosférico UNAM (RUOA)	24
3.1.2 Observatorio Atmosférico Alzomoni (RUOA)	27
3.2 Método analítico	31
3.2.1 Espectrofotómetro de Absorción Atómica	31
3.3 Campaña de muestreo	32
3.3.1 Observatorio Atmosférico UNAM	33
3.3.2 Observatorio Atmosférico Alzomoni	33
3.4 Tratamiento de las muestras	33
3.4.1 Análisis químico de los filtros	34
3.5 Método de preparación de muestras	36
CAPITULO IV	38
4. RESULTADOS	38
4.1 Resultados Observatorio Atmosférico UNAM	38
4.2 Resultados Observatorio Atmosférico Alzomoni	46

CAPITULO V	51
5. Análisis de resultados	51
5.1 Observatorio Atmosférico UNAM	51
5.2 Observatorio Atmosférico Altzomoni	52
CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	55
ANEXO I Concentraciones de Hg, Observatorio Atmosférico UNAM	63
ANEXO II Concentraciones de Hg, Observatorio Atmosférico Altzomoni	65
ANEXO III Meteorología	67
ANEXO IV Validación del método analítico	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo biogeoquímico de Hg	5
Figura 2. Ciclo hidrológico	12
Figura 3. Procesos involucrados en la mezcla de capas	14
Figura 4. Familias de nubes	17
Figura 5. Nubosidad frontal asociado a un frente frío	19
Figura 6. Nubosidad frontal asociado a un frente cálido	20
Figura 7. Proceso orográfico	21
Figura 8. Efecto de Coriolis	22
Figura 9. Clasificación del relieve de la Ciudad de México	25
Figura 10. Observatorio Atmosférico UNAM	27
Figura 11. Relieve Estado de México	28
Figura 12. Localización del estratovolcán Popocatepetl	30
Figura 13. Observatorio Atmosférico Alzomoni	31
Figura 14. EAA-GH y lampara de cátodo hueco	32
Figura 15. Colector automático	33
Figura 16. Filtros	34
Figura 17. Horno de microondas Mars5 y vasos HP-500 para digestión	35
Figura 18. Fracción insoluble, Observatorio Atmosférico UNAM	40
Figura 19. Fracción soluble, Observatorio Atmosférico UNAM	42
Figura 20. Diagrama de caja, Observatorio Atmosférico UNAM	43
Figura 21. Histograma de frecuencias, Observatorio Atmosférico UNAM	44
Figura 22. Fracción insoluble, Observatorio Atmosférico Alzomoni	47
Figura 23. Fracción soluble, Observatorio Atmosférico Alzomoni	48
Figura 24. Diagrama de caja, Observatorio Atmosférico Alzomoni	49
Figura 25. Histograma de frecuencias, Observatorio Atmosférico UNAM	50

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación internacional de nubes	15
Tabla 2. Geografía de la Ciudad de México	26
Tabla 3. Geografía del Estado de México	29
Tabla 4. Parámetros para digestión en horno de microondas	35
Tabla 5. Reactivos utilizados en el método analítico usando EEA-HG	36
Tabla 6. Procedimiento para preparar 25 mL de muestra	36
Tabla 7. Concentración fracción insoluble, Observatorio Atmosférico UNAM	39
Tabla 8. Concentración fracción soluble, Observatorio Atmosférico UNAM	41
Tabla 9. Estadística descriptiva, Observatorio Atmosférico UNAM	43
Tabla 10. Tipos de pruebas t student	45
Tabla 11. Resultados de t student, Observatorio Atmosférico UNAM	45
Tabla 12. Concentración fracción insoluble, Observatorio Atmosférico Altzomoni	46
Tabla 13. Concentración fracción soluble, Observatorio Atmosférico Altzomoni	47
Tabla 14. Estadística descriptiva, Observatorio Atmosférico Altzomoni	48
Tabla 15. Resultados de t student, Observatorio Atmosférico Altzomoni	50
Tabla 16. Concentraciones de Hg en México y el mundo.	54

## RESUMEN

La detección de mercurio (Hg) en la precipitación pluvial debido a las emisiones naturales y antropogénicas en México es limitado, el Hg es un metal altamente tóxico en cualquiera de sus formas en diversas circunstancias, las principales vías de exposición son: el consumo de pescado y marisco contaminado con metilmercurio ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ), la inhalación por vapores de mercurio elemental ( $\text{Hg}^0$ ) desprendidos en procesos industriales; se encuentra en forma natural en el aire, agua y suelo. El desplazamiento de este metal en la atmósfera viene determinado por su alta volatilidad a temperatura ambiente y por la acción del viento, el Hg en la atmósfera es transportado y depositado en seco o húmedo a grandes distancias desde su fuente de origen; por lo anterior se realiza la determinación de la concentración de mercurio total (HgT) en precipitación pluvial durante el periodo de lluvia de mayo a noviembre del 2016, en 2 sitios de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la UNAM, en Ciudad Universitaria ubicada al sur de la Ciudad de México; Sitio 1 – Observatorio Atmosférico UNAM y Sitio 2- Observatorio Atmosférico Altzomoni. En la campaña de muestreo se recolectó un total de 56 muestras (40 muestras en la UNAM y 16 en Altzomoni).

La concentración promedio de Hg en el sitio 1, en la fracción soluble fue de 9.76 mg/L y 13.08 mg/L en la fracción insoluble, mientras que en el sitio 2 se obtuvo 9.15 mg/L en la fracción soluble y 13.17 mg/L en insoluble. Paralelamente se midió el pH y la conductividad de cada una de las muestras; obteniendo en el sitio 1: un pH y conductividad promedio de 6.04 y 33.98  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y para el sitio 2: 5.20 y 20.3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente.

El objetivo del presente estudio no fue comparar los sitios de muestreo, debido a que las muestras del sitio 1 se colectaron por evento, mientras que las muestras colectadas en el sitio 2 fueron acumuladas, lo anterior debido a la dificultad que representó obtener las muestras después del evento de lluvia; las concentraciones de Hg obtenidas en el sitio 1 sugiere que probablemente provienen de la combustión del carbón (Múgica et al., 2003), mientras que en el sitio 2 se podrían relacionar

con las emisiones volcánicas, quema de pastizales o emisiones provenientes de la combustión del carbón (Bell et al., 2014).

## **CAPITULO I**

### **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1 Introducción**

El mercurio (Hg) es un elemento natural en el agua, aire y suelo y es considerado un problema a nivel mundial por sus efectos nocivos para la sociedad, lo que ha provocado que día a día aumente su interés por investigar en academias y diversos países en el mundo (ATSDR, 1999). Al igual que otros metales como plomo (Pb) o arsénico (As), el Hg forma un enlace covalente con el azufre, por lo tanto, la forma más común en la corteza terrestre es el cinabrio (HgS o sulfuro rojo de Hg) y metacinabrio (HgS o sulfuro negro de Hg); otros minerales menos abundantes de Hg son: livinstonita (HgSb<sub>4</sub>S<sub>7</sub>) o coloradita (HgTe) (Ullrich et al., 2001).

En Hg se encuentra como Hg<sup>0</sup> (Morita, 1998). El resto aparece como Hg<sup>2+</sup> unido a partículas en suspensión. Debido a su elevada volatilidad su permanencia en el medio puede ser hasta por 1 año, se favorece que se transporte largas distancias, distribuyéndose a escala global donde puede llegar a acumularse (Pirrone et al., 2005) en la precipitación pluvial. Las formas oxidadas Hg<sup>2+</sup> y Hg<sup>+</sup> suelen encontrarse en las gotas de lluvia o en las partículas, por lo que es removido por deposición húmeda y seca; la seca ocurre por sedimentación gravitacional, mientras que la húmeda los aerosoles y gases se disuelven y adhieren en las gotas de lluvia donde precipitan en un evento de lluvia (Azimi et al., 2003), por lo que su tiempo de residencia es corto ya que tienden a depositarse rápidamente en lugares próximos a la fuente de emisión (IPEN, 2014).

Una vez que el Hg ha sido depositado en los suelos y sedimentos, puede ser parcialmente transportado a los océanos a través de mecanismos de escorrentía superficial y una pequeña parte del Hg que pertenece en el medio acuático es convertido por microorganismos en CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup>; el cual puede bioacumularse y alcanzar elevadas concentraciones en los organismos marinos (IPEN, 2014).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Evaluar la fracción soluble e insoluble del depósito húmedo en 2 sitios de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA): sitio 1: Observatorio Atmosférico UNAM y sitio 2: Observatorio Atmosférico Alzomoni, con el fin de estimar el aporte de Hg en cada una de las fracciones del depósito húmedo.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Cuantificar la concentración de Hg en la fracción soluble e insoluble en una zona urbana y rural, con el fin de investigar el impacto de las emisiones volcánicas producidas por el Volcán Popocatépetl.
- Determinar las diferentes características que involucran que se encuentre concentraciones de Hg en mayor o menor medida en los sitios de estudio.
- Conocer el efecto del viento sobre las concentraciones de Hg detectadas en una zona urbana y rural.

## **1.3 Hipótesis**

Si el Hg se encuentra resuspendido en material particulado entonces, la fracción insoluble presentara una mayor concentración debido a que se adhiere a las gotas de lluvia.

## **CAPITULO II**

### **2. ANTECEDENTES**

#### **2.1 Mercurio (Hg)**

Tiene una masa atómica relativa de 200.61 g/mol, un punto de ebullición de 356.90°C, una temperatura de solidificación de -38.87°C, a temperatura ambiente es un líquido plateado de alta densidad. A 20°C su peso específico es de 13.521 g/cm<sup>3</sup> y una presión de vapor 0.16 Pa. Forma enlaces con grupos sulfuro de las proteínas, también puede formar enlaces con moléculas orgánicas de carbono el más importante y conocido es el metilmercurio (CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup>); esta molécula organometálica es la forma más toxica del Hg encontrada en el medio ambiente. Dado que este compuesto es orgánico y puede unirse a proteínas, se genera acumulándose en los tejidos de organismos vivos (Morita et al., 1998).

Por su característica única de amalgamación con otros metales como oro y plata, el Hg tiene una gran demanda para las actividades de minería del oro artesanal en pequeña escala. En el sector del oro artesanal produce entre 20 y 30 % del oro extraído del mundo, aproximadamente 500-800 toneladas en 2005. De hecho, este sector es el principal consumidor de Hg en la actualidad y también de considerables emisiones de Hg. Otros consumidores de Hg son: producción del monómero cloruro de vinilo, producción de cloro-álcali, odontología, dispositivos de medición y control, dispositivos eléctricos y electrónicos, iluminación y usos culturales y tradicionales, entre otros (Castro, 2013).

Los compuestos de Hg se han utilizado en baterías, productos farmacéuticos, pinturas y como reactivos de laboratorio. El Hg se puede liberar al aire, agua y suelo durante su producción y uso o bien, tras la disposición de productos y desechos con contenido de Hg y es extraído en forma de mineral cinabrio, que contiene HgS; para su refinación se calienta a temperaturas superiores a 538°C, este proceso vaporiza el Hg presente en el mineral y al condensarse produce vapores de Hg líquido, al ser un metal que se produce se forma natural se encuentra en todo el medio ambiente y puede ser liberado por actividad volcánica y por la erosión de rocas y los suelos causada por la exposición al viento y al agua (Castro, 2013).

## 2.2 Geoquímica de mercurio

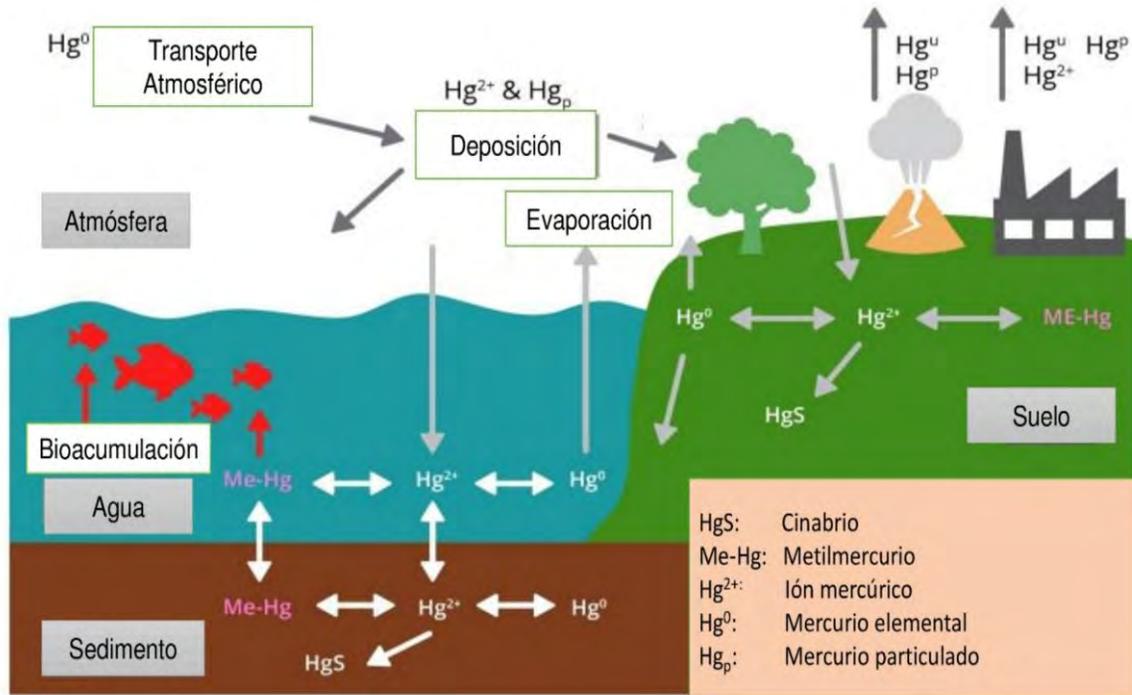


Figura 1. Ciclo biogeoquímico de Hg (Ministerio de Medio Ambiente Brasil, 2013)

El Hg una vez que se encuentra en la atmósfera puede recorrer grandes distancias, transformándose durante el trayecto mediante procesos de fotooxidación en compuesto solubles que precipitan (figura 1).

Las condiciones de pH, temperatura, contenidos de sales y componentes orgánicos del suelo favorecen la formación de complejos de  $Hg^{2+}$  como cloruro de mercurio ( $HgCl_2$ ), hidróxido de mercurio ( $Hg(OH)_2$ ) o complejos orgánicos (Schuster, 1991); por otro lado, el catión Hg presente en suelos y sedimentos en determinadas condiciones se transforma a  $CH_3Hg^+$ , por diversos mecanismos siendo los procesos microbianos el principal de ellos. La metilación se ve favorecida por la ausencia de oxígeno por ello tiene lugar mayoritariamente en las aguas anaerobias y sedimentos por procesos bióticos.

En un ecosistema acuático el Hg presenta una alta solubilidad debido a su alta presión de vapor, mientras que en los ecosistemas terrestres son absorbidos por las arcillas y otros sedimentos, por lo que la dispersión y distribución del Hg dependerá por ejemplo de agentes geológicos como la erosión y los efectos climáticos y ambientales; en la atmósfera también se realiza la oxidación-reducción de Hg aunque en menor medida por medio de los radicales como hidroxilo(OH) y peroxi (HO<sub>2</sub>) o por especies reactivas como peróxido de nitrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) (Lominchar et al., 2010).

### **2.3 Fuentes de emisión de mercurio**

Cuando el Hg entra al aire se desplaza con el viento y eventualmente cae a la superficie, puede viajar a distancias cortas como largas antes de caer en la tierra. Una parte del Hg que cae al océano o sobre la tierra y se revolatilizará, viajará otra vez con el viento y caerá a la tierra, se deposita y no se volatiliza, seguramente se unirá a materiales orgánicos o se escurrirá a los arroyos, ríos lagos y probablemente al océano. En los sistemas acuáticos los microorganismos podrían transformarlo en CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup> (IPEN, 2014).

#### **2.3.1 Fuentes de emisión naturales**

Las fuentes naturales de mayor importancia son la desgasificación natural de la corteza terrestre, las emisiones volcánicas, aguas termales, erosión de depósitos minerales y la evaporación de la masa acuática natural (Boening, 2000). Al aumentar la temperatura el Hg se volatiliza, se estima que las emisiones naturales alcanzan las 2.700 a 6.000 toneladas por año (OMS, 1991). La actividad volcánica es una fuente natural de emisión de Hg a tomar en consideración, dado que es superior a otras fuentes, el mercurio emitido tiene origen magmático, además que las emisiones pueden contaminar lugares aledaños. La cantidad de Hg que se encuentra circulando en la atmósfera, los suelos, lagos, arroyos y océanos del mundo ha aumentado por un factor de entre dos y cuatro desde el inicio de la era industrial. Como resultado, los niveles de Hg son peligrosamente altos (Health Canadá, 2013). La acidificación natural o procedente de la lluvia acida, aumenta la

formación bacteriana de  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  (Campbell, 1999) por lo que la contaminación atmosférica y la lluvia acida han incrementado los niveles de Hg en aguas naturales y animales de su entorno (Zapatero, 1998).

### **2.3.2 Fuentes Antropogénicas**

Cada vez que las personas producen y usan Hg intencionalmente, mucho termina por volatilizarse en la atmósfera. Varios tipos de actividades humanas liberan Hg en el medio ambiente y está presente en pequeñas cantidades en los combustibles fósiles, los minerales metálicos y otros minerales (EPA, 2018). Cuando se quema el carbón, mucho de su contenido entra al medio medioambiente

Es utilizado en pilas, termómetros, interruptores eléctricos, lámparas fluorescentes, amalgamas dentales, preparación de zinc, amalgamado para pilas eléctricas, en la fabricación, reparación de acumuladores eléctricos de mercurio, termostatos, etc.

En la industria textil se utilizó sales de Hg para curtir el cuero en los sombreros, de ahí surge que los fabricantes estuvieran en contacto con grandes concentraciones de  $\text{Hg}^0$ , en la industria farmacéutica se llegó a utilizar el tiomersal (mertiolate), como antiséptico; y quizá uno de los más importantes sucesos fue lo ocurrido en minamata, donde la empresa The Chisso Corporation utilizó cloruro de mercurio ( $\text{HgCl}$ ) y sulfato de mercurio ( $\text{HgSO}_4$ ) como catalizadores (IPEN, 2014)

### **2.3.3 Fuentes intencionales, no intencionales y procesos de remoción.**

Dentro de las fuentes antropogénicas de Hg, se puede dividir en tres categorías:

-Fuentes Intencionales: surgen con la intención directa de producir productos que contienen Hg o de realizar procesos que lo utilizan. Algunos ejemplos de productos que tienen Hg o compuestos de este son: lámparas fluorescentes, algunos termómetros, baterías e interruptores entre otros. En procesos industriales esta por ejemplo la minería en pequeña escala, donde  $\text{Hg}^0$  se utiliza para capturar el oro de la mezcla de rocas pulverizadas, de sedimentos, suelo y otras partículas; otros ejemplos de procesos industriales son: las plantas de fabricación de productos

químicos que usan compuestos de Hg como catalizadores, y algunas plantas de cloro-álcali que utilizan piscinas de Hg<sup>0</sup> como cátodo para electrolisis (IPEN, 2014).

En hospitales y centros de salud se han utilizado instrumentos que contienen Hg, entre ellos están los termómetros, esfigmomanómetro y los dilatadores esofágicos; cuando estos instrumentos se rompen, el Hg puede vaporizarse y exponer a los trabajadores o pacientes. Una encuesta reportó que un hospital de 250 camas en un año se rompieron 4.700 termómetros de mercurio (IPEN, 2014).

Cada termómetro de Hg contiene entre 0.5 g y 3 g de este metal, mientras que el esfigmomanómetro contiene por lo general 100 g y 200g (Bell et al., 2010)

En México, la Comisión Federal para la Protección de Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) a través de la Comisión de Evidencia y Manejo de Riesgos, realiza acciones para reducir el uso de Hg o en su defecto sustituirlo. Se está colaborando con el Centro de Análisis y Acciones sobre Tóxicos y sus Alternativas (CAATA) en el programa hospital libre de Hg, que cuenta con el apoyo de la Comisión de Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA). El Hospital infantil de México (Federico Gómez) y el instituto de Pediatría, son dos Institutos Nacionales de Salud, comprometidos a reemplazar por termómetros digitales el 100% de los termómetros de Hg utilizados en sus instalaciones.

El Convenio de Minamata exige la eliminación progresiva de todos los dispositivos médicos con Hg para el 2020, los países pueden optar por exenciones que retrasen la fecha de eliminación hasta el año 2030. No hay disposiciones que permitan la venta y uso de dispositivos médicos que contengan Hg después de esa fecha.

-Fuentes No Intencionales: las emisiones de Hg emitidas son de manera indirecta, tal es el caso de actividades que queman o procesan combustibles fósiles o minerales que contienen Hg como impureza. Algunos ejemplos son: centrales eléctricas a carbón, hornos de cemento, extracción y refinación de minerales metálicos y la extracción de combustibles fósiles.

La refinación y quema del petróleo contribuye a la contaminación mundial por Hg. Los sistemas para eliminar al Hg en las industrias son comunes, las plantas que carecen de este sistema de eliminación del H generan: lodos, sedimentos y otros flujos de residuos contaminados con Hg. El programa de las naciones unidas para el medio ambiente y el programa de monitoreo y evaluación del ártico (UNEP/AMAP) indican que la evaluación de una amplia gama de petróleos crudo por país de origen revela una gran variación en el contenido de Hg, la gama de variación del Hg en los crudos del petróleo de Tailandia y Vietnam es excepcionalmente alta. La UNEP/AMAP calcula que el 25% del Hg en el petróleo crudo se libera como emisiones al aire durante el proceso de refinación (UNEP/AMAP, 2013).

-Actividades de remobilización: surgen de actividades humanas, las cuales queman bosques o inundan grandes áreas. La biomasa y los suelos superficiales orgánicos suelen contener Hg, la quema de bosques libera grandes cantidades de Hg que regresan a la atmósfera. En las zonas inundadas permite que el Hg que quedo en la biomasa y en los suelos pueda convertirse con mayor facilidad a  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ , el cual puede ser producido por bacterias (IPEN, 2014).

#### **2.4 Procesos de combustión del carbón**

Cuando el carbón es quemado en una central térmica el Hg es liberado como  $\text{Hg}^0$ , cuando se enfrían los gases de la combustión y la interacción del  $\text{Hg}^0$  con otros productos de la combustión da a lugar a su conversión parcial en otras especies. La conversión se da por oxidación homogénea o heterogénea, debido a la variedad de reacciones el Hg en los gases de combustión de carbón puede encontrarse como  $\text{Hg}^0$  y  $\text{Hg}^{2+}$  formándose compuestos como  $\text{HgCl}_2$ , o  $\text{Hg}_2\text{SO}_4$  o unido en la superficie de las partículas de ceniza. El Hg unido a las partículas pueden ser retenidas con el sistema de control de partículas, el  $\text{Hg}^{2+}$  podría ser eliminado en parte en los sistemas de desulfuración; pero el  $\text{Hg}^0$  es muy volátil e insoluble, y será emitido mayoritariamente a la atmósfera (Senior, 2005).

## 2.5 Toxicidad

La toxicidad del Hg varía con la forma fisicoquímica en que se encuentre. Se presenta en formas inorgánicas y orgánicas. La ingesta de Hg líquido o de sus compuestos inorgánicos se excreta rápidamente en más de un 98% bien a través de la orina, de las heces y a no ser que se ingieran repetidamente o en cantidades masivas, son relativamente inocuos. La ingesta continuada de los compuestos inorgánicos más solubles puede afectar al hígado y riñones. Las sales de Hg inorgánico pueden ser altamente tóxicas y corrosivas, la exposición aguda a las sales de Hg inorgánico puede causar daño corrosivo en el estómago y los intestinos y además puede causar daño renal (Gutiérrez, 1997). Distinto es el caso  $\text{Hg}^0$ , se deposita primero en los pulmones donde ya puede producir daño pulmonar; después llegan al torrente sanguíneo y puede cruzar la barrera hematoencefálica y causar daño cerebral. Aproximadamente el 80% de  $\text{Hg}^0$  inhalado es absorbido por el tracto respiratorio a través de las fosas nasales y luego al sistema circulatorio. La exposición crónica a Hg por inhalación, incluso a concentraciones bajas ha demostrado causar efectos tales como temblores, disminución de la habilidad cognitiva y alteraciones del sueño en los trabajadores.

El Hg forma asimismo compuestos orgánicos; el más dañino es el  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  las bacterias metanogénicas y ciertos hongos de los sedimentos acuáticos transforman virtualmente todas las otras formas de Hg en  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ , que es la forma de Hg con mayor responsabilidad por la contaminación en peces y mariscos y las aves y mamíferos que se los comen. Cuando una persona consume  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  el estómago y los intestinos lo absorben de forma más completa. Afecta al cerebro de un adulto, de un niño y de un feto en desarrollo, donde se acumula y se va convirtiendo lentamente en Hg inorgánico. La exposición prenatal a Hg interfiere con el crecimiento de las neuronas en desarrollo del cerebro y tiene la capacidad para causar daño irreversible al sistema nervioso central en desarrollo (IPEN, 2010). Las plantas pueden tomar el Hg del suelo y acumularlo en sus tejidos lo que implica un riesgo debido a su posible transmisión a los animales y seres humanos a través de la cadena alimentaria (Atwood y Hutchison, 2003). Algunos autores han demostrado

la presencia de Hg en plantas cultivables que crecen en suelos contaminados con este metal (Cheng et al., 2006; Feng et al., 2007; Qian et al., 2009); por tal motivo se han llevado a cabo estudios con el objetivo de conocer en profundidad los efectos tóxicos que produce el Hg y sus derivados en los seres vivos. Así (Jan et al. 2009) realizó una revisión extensa sobre la toxicidad de Hg en la cual describe que sus efectos adversos en un organismo dependen del estado químico del Hg, del tiempo y tipo de exposición. La toxicidad se debe a su liposolubilidad que le permite atravesar membranas tales como la placentaria y la hematoencefálica con facilidad, mientras que el Hg inorgánico se transporta a través de las membranas utilizando ciertas proteínas. Ambas formas de Hg como ya se mencionó en capítulos anteriores presenta gran afinidad con grupos tiol (-SH) de las enzimas y proteínas, resultando en su inactivación y la consecuente interrupción de las actividades celulares normales.

## **2.6 Convenio de Minamata**

En 2009 los gobiernos acordaron iniciar negociaciones intergubernamentales con el objetivo de preparar un tratado; la primera reunión para preparar un instrumento legalmente vinculante sobre Hg se llevó a cabo en Estocolmo, Suecia, en junio del 2010. Las negociaciones terminaron tres años después y el Convenio de Minamata sobre Hg fue adoptado en octubre del 2013, en una conferencia en Kumamoto, Japón. El convenio entra en vigor jurídicamente vinculante el 16 de agosto del 2017, debido a que a la fecha 53 partes han ratificado el convenio.

El objetivo del convenio de Minamata es proteger la salud humana y el medio ambiente de las liberaciones antropogénicas de Hg y compuestos de Hg (PNUMA, 2013). En general el convenio busca reducir el suministro y comercio de Hg, eliminar gradualmente o reducir determinados productos y procesos que usan Hg, y controlar las emisiones y liberaciones. El uso de Hg en la extracción de oro artesanal y en pequeña escala está reconocido como una de las mayores fuentes mundiales de contaminación atmosférica en la actualidad. Muchos de los artículos del convenio contienen una mezcla de medidas obligatorias y voluntarias. Sin embargo, muchas de estas disposiciones pueden ser utilizadas por los gobiernos y organizaciones no

gubernamentales (ONG) para reducir su producción. Algunos artículos se relacionan directamente con los temas de contaminación por Hg, por ejemplo:

- Artículo 3 Fuentes de suministro y comercio de Hg
- Artículo 5 Procesos de fabricación en los cuales se usa Hg
- Artículo 8 Emisiones (aire)

## 2.7 Meteorología y climatología

La humedad terrestre se denomina ciclo hidrológico (figura 2), y las tres fases más importantes son evaporación, condensación y precipitación.

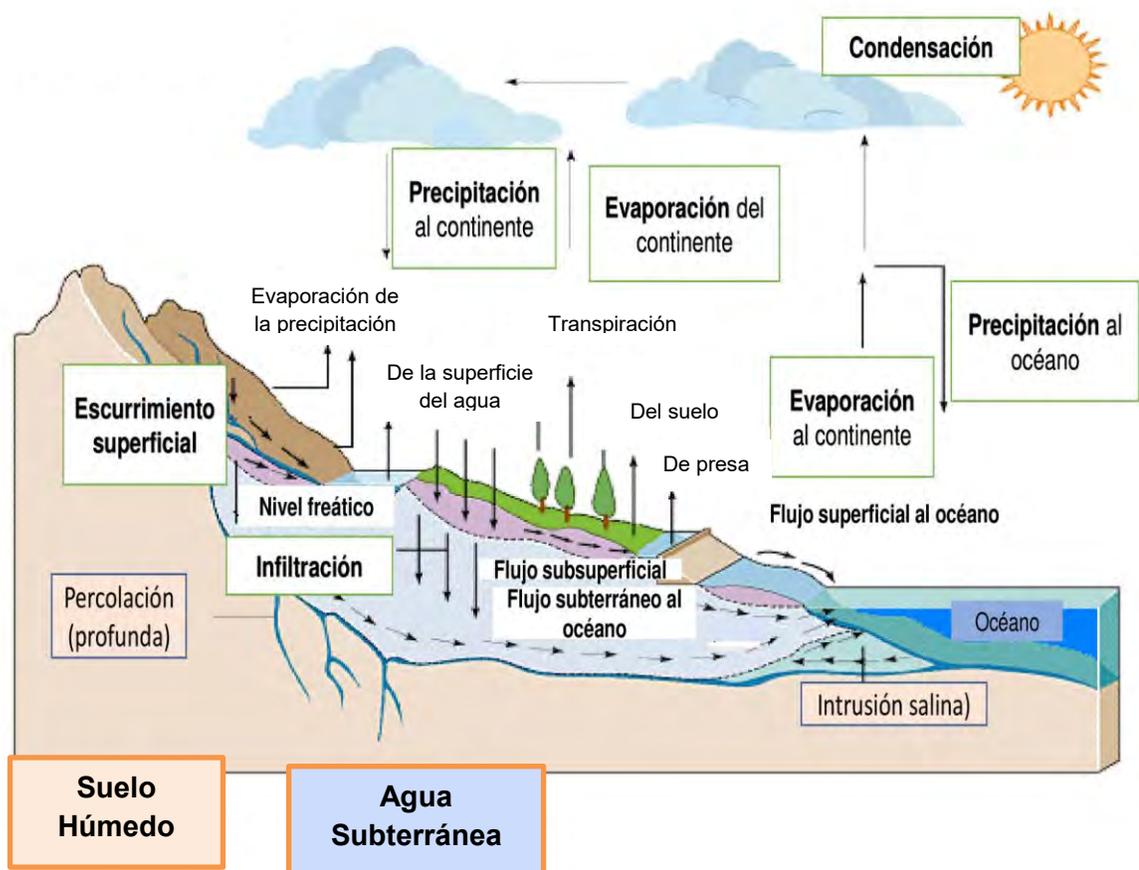


Figura 2. Ciclo Hidrológico (Instituto de geografía, 2017).

### **2.7.1 Evaporación**

El cambio de estado líquido a vapor requiere energía que se emplea para vencer la atracción intermolecular de las partículas de agua. La evaporación implica un aumento de energía cinética de cada molécula de agua y a medida que aumenta su velocidad, incrementa la posibilidad de que algunas moléculas de la superficie escapen a la atmósfera. La velocidad de evaporación depende principalmente de la diferencia entre la presión de vapor de saturación en la superficie del agua y la presión de vapor del aire, y el suministro continuo de energía a la superficie. La velocidad del viento afecta a la velocidad de evaporación ya que al tratarse de la entrada de aire frío y no saturado absorberá humedad (Castillo, 1996).

### **2.7.2 Condensación**

La condensación es causa directa de las precipitaciones y van asociadas a la variación de unos de los siguientes parámetros: volumen el aire, temperatura, presión y humedad. La condensación más común se produce por el descenso de la temperatura del aire; es decir, enfriamiento por contacto, mezcla de masas de aire a distintas temperaturas y enfriamiento dinámico de la atmósfera. El enfriamiento por contacto se produce cuando pasa una masa de aire cálido y húmedo sobre una superficie de tierra fría. La mezcla de dos capas distintas dentro de una sola masa de aire, o la mezcla de dos masas de aire distintas, también pueden producir condensación. En la figura 3 se presenta el proceso físico motor de esa interconexión y paso de una fase a otra y numerado el proceso propiamente dicho haciendo patente como las reacciones químicas pueden ocurrir dentro, fuera y durante el paso de un comportamiento a otro. Uno de los participantes conocido en este proceso son las lluvias acidas, es importante manifestar que casi en su totalidad de los procesos abarcan el caso de la dilución de gases en líquidos y que aplica la ley de Henry, otro proceso de arrastres, pero la mayoría de estos trabajos son tan especializados que caen dentro del área de la física de la atmósfera o de la micrometeorología, y que tienen que ver con la formación de las nubes (Castillo, 1996).

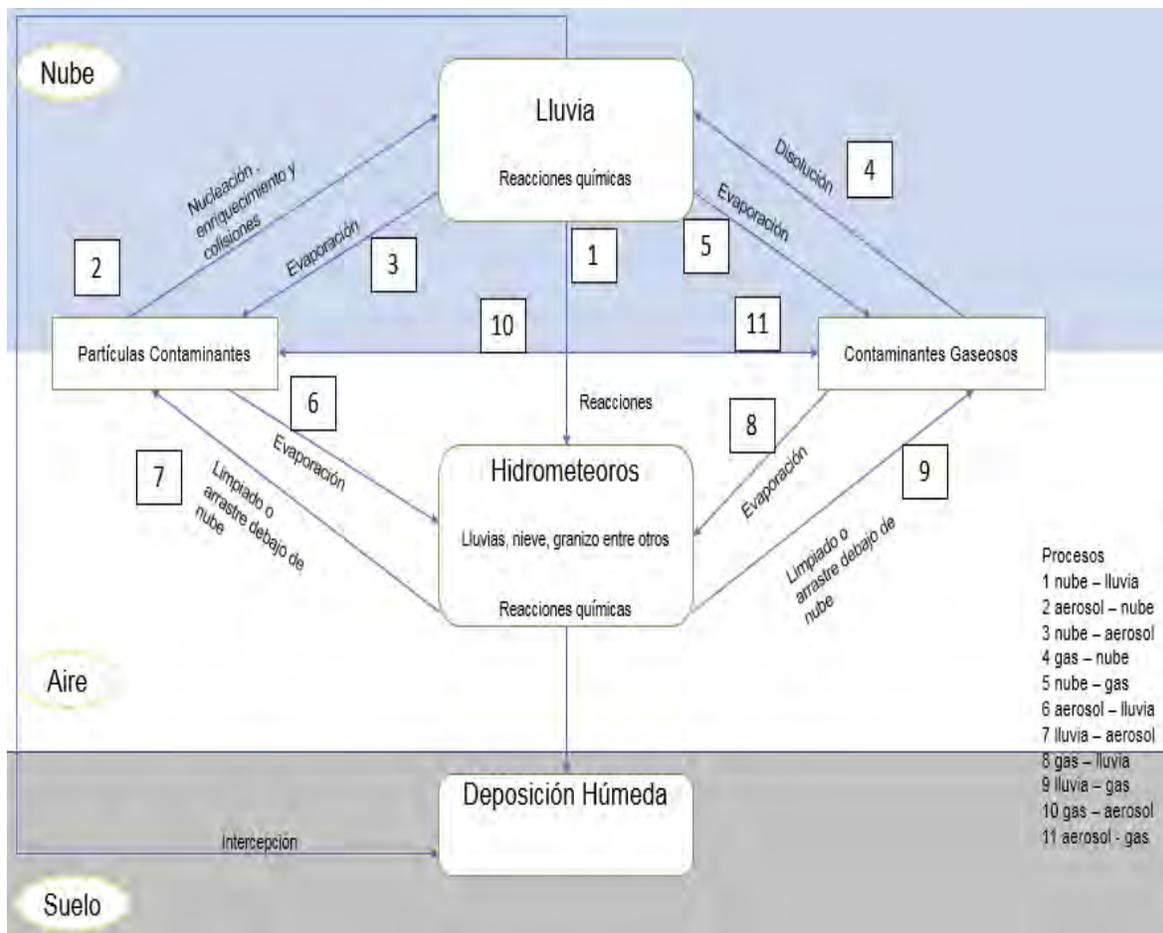


Figura 3. Procesos involucrados en la mezcla de capas, (realizado por Méndez-González, 2017)

### 2.7.3 Formación de nubes

La formación de nubes depende de la inestabilidad atmosférica y del movimiento vertical. Pero también es controlada por procesos a pequeña escala, se sabe de lo complejo que son los sistemas que dan forma y transporte a los cuerpos de nubes que originan la precipitación, además de cómo está involucrado el sitio de donde ocurren sea en la costa, en litoral, en tierra adentro o a gran altitud y latitud. Con estos antecedentes podemos decir que la composición de la lluvia es muy susceptible a la variabilidad y que el resultado de su presencia y los efectos que atrae consigo propicia que no exista propiamente una constante satisfactoria que describa sus componentes y de las cantidades de estas (Figueruelo, 2004).

### 2.7.3.1 Tipos de nubes

Es importante conocer los tipos de nubes para entender la composición de la lluvia y los sistemas que la forma (tabla 1 y figura 4)

Existe una gran variedad de formas de nubes, el sistema adoptado internacionalmente se basa en la forma general, estructura y la extensión vertical de las nubes, y en su altitud (Ledesma, 2011).

Según la altura a la que se formen:

-Nubes altas: se forman a unos 6000 m de altura.

-Nubes medias: se forman entre 2000 y 6000 m.

-Nubes bajas: hasta una altura de 2000 m.

-Nubes de desarrollo vertical: nubes de gran espesor que van desde cerca del suelo hasta grandes alturas.

Familia	Símbolo	Género	Base media (metros)	Tope medio (metros)
Nubes altas	Ci	Cirros	6,000	12,000
	Cs	Cirrostratos		
	Cc	Cirro cúmulos		
Nubes medias	As	Altostratos	2,500	6,000
	Ac	Altocúmulos		
Nubes bajas	St,	Estratos	150-600	750
	Sc	Estratocúmulos	600-1,500	2,400
	Ns	Nimbostratos	0-2,500	6,000
Nubes de desarrollo vertical	Cu	Cúmulos	300-2,400	6,000
	Cb	Cumulonimbos	600-2,400	12,00

Según su forma:

-Cúmulos (Cu): nubes densas, contornos definidos que se desarrollan verticalmente. Presentan formas redondeadas de color blanco, aspecto algodónoso.

-Estratocúmulos (Sc): Nubes bajas al estar situada su base a 2000 m de altura como máximo.

- Cumulonimbos: Nubes típicas de tormenta, se producen fuertes corrientes ascendentes y descendentes y su espesor puede alcanzar los 10.000 m; la parte superior se caracteriza por tener protuberancias formadas por cristales de hielo, las fuertes corrientes ascendentes provocan congelación de las gotas de agua que frecuentemente llegan al suelo en forma de granizo.

-Altocúmulos (Ac): Nubes medias, base aproximadamente a 3000 m.

-Estratos (St): Nubes bajas y medias dispuesta en bandas horizontales superpuestas unas a otras, formando una capa gris y uniforme. Las bases están aproximadamente a 3000 m formando en este caso nubes medias llamadas Altoestratos (As). Este tipo de nubes se asocian al empeoramiento del clima, la capa nubosa aumenta de espesor al mismo tiempo que desciende su base, formándose Nimboestratos (Ns).

-Nimbos: Nubes grises, espesas y muy bajas que suelen producir lluvias.

-Cirros (Ci): Nubes altas cuya base esta alrededor de los 6000 m de altura y están formadas por cristales de hielo ya que el vapor de agua a esas alturas se condensa en forma sólida.

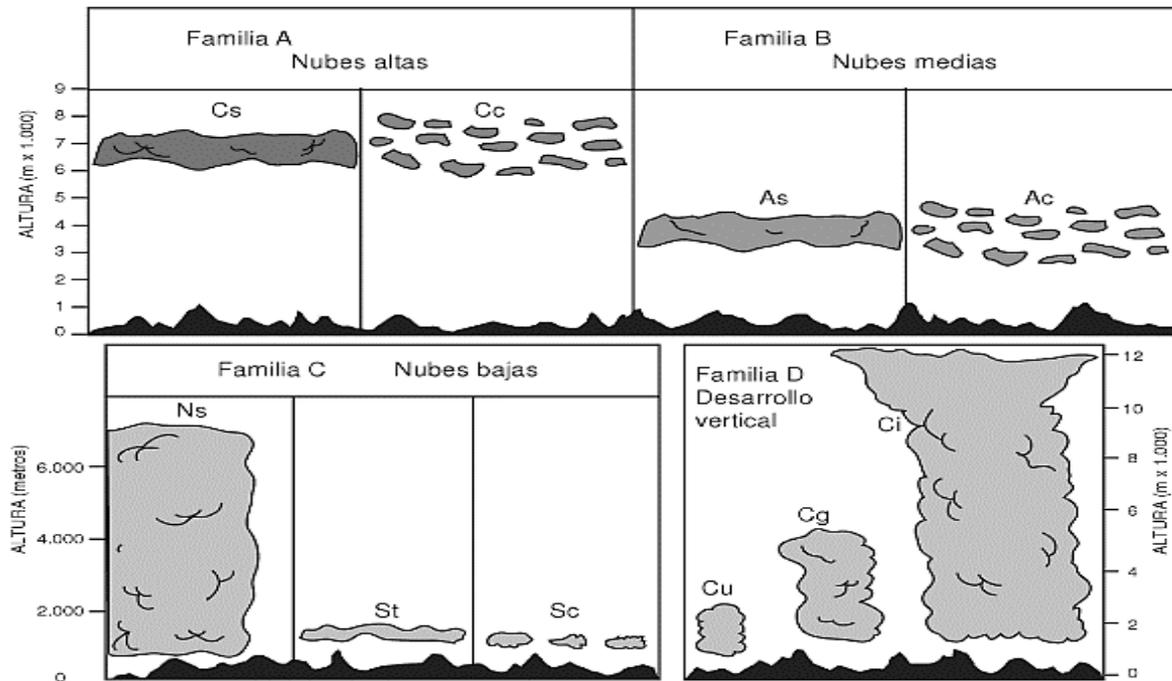


Figura 4. Familia de nubes (Ledesma, 2011)

### 2.7.4 Núcleos de condensación

La condensación tiene lugar sobre una superficie ajena al aire, por medio de los núcleos higroscópicos (por su capacidad de absorber humedad) estas pueden ser: partículas de polvo, humo, sales o sustancias microscópicas similares cuya superficie tiene la propiedad de ser higroscópicas (Figueruelo, 2004).

Los núcleos de condensación tienen tamaños comprendidos entre  $0,001 \mu\text{m}$  de radio y  $10 \mu\text{m}$  que no permanecen en el aire mucho tiempo. Los núcleos que alcanzan tamaño relativamente grande son los que pueden dar lugar a gotas de nube (Takahashi, 1976). Una vez iniciada la formación de las gotas de agua, en las primeras fases las gotas pequeñas crecen bastante más que las mayores, pero a medida que aumenta de tamaño disminuye la velocidad de crecimiento por condensación. La velocidad de condensación está limitada por la rapidez con que la gota puede perder el calor latente que va desprendiendo, pasando aire por conducción y reduciendo el gradiente del vapor.

### **2.7.5 Teoría de Bergeron-Findeisen**

Cuando la temperatura del aire baja de 0°C, la presión de vapor atmosférico disminuye más rápidamente sobre una superficie de hielo que sobre el agua. Esto hace que la presión de vapor de saturación sobre el agua sea mayor que sobre el hielo. Al igual que los núcleos de condensación es necesario para la formación de gotas de agua un núcleo de congelación antes que puedan formarse las partículas de hielo. Cuando se hayan formado los cristales de hielo crecerán rápidamente por condensación del vapor, estos cristales se unen por colisión a causa de su frecuente forma ramificada y un solo copo de nieve puede estar formado por decenas de cristales (Olsina, 2017).

### **2.7.6 Teoría de la colisión**

La formación de las gotas de agua por colisión y coalescencia causan el crecimiento de esta. Las gotas tienen una velocidad límite que están directamente relacionadas con sus diámetros, de manera que las gotas de mayor tamaño pueden alcanzar y absorber las gotas pequeñas. Aunque el proceso de coalescencia es al principio bastante lento la gota puede alcanzar 200 µm de radio en sólo 50 minutos. Si hay cristales de hielo en la nube pueden llegar a caer en forma de gotas y entra en acción el mecanismo de coalescencia.

### **2.7.7 Precipitaciones: tipos**

#### **2.7.7.1 Convectivo**

Presenta inestabilidad de una masa de aire más caliente que las circundantes. La masa de aire caliente asciende se enfría se condensa y se forma la nubosidad de tipo cumuliforme, origen de las precipitaciones en forma de chubasco o tormentas. El ascenso de la masa de aire se debe a un mayor calentamiento en la superficie (Maderey et al., 2005).

### 2.7.7.2 Ciclónico

Está asociada a una perturbación ciclónica. Se presenta en precipitación frontal (Ahrens, 2003):

-Frontal: resulta en el ascenso debido a la convergencia de masas de aire que tienden a rellenar la zona de baja presión, se asocia a un frente frío o a un frente cálido. En los frentes fríos el aire cálido es desplazado hacia arriba por el aire frío dando lugar a nubosidad acompañada de chubascos que a veces son intensos (figura 5).

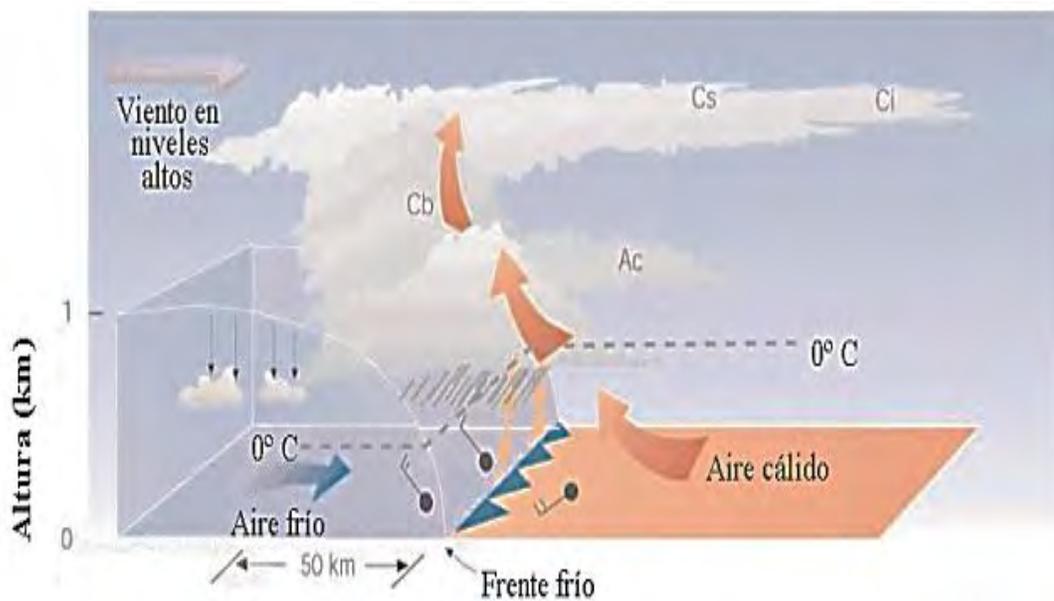


Figura 5. Nubosidad frontal asociada a un frente frío. (Ahrens, 2003)

En los frentes cálidos el aire asciende sobre la cuña fría dando lugar a nubosidad lluvias y lloviznas más continuas y prolongadas, pero de menor intensidad (figura 6).

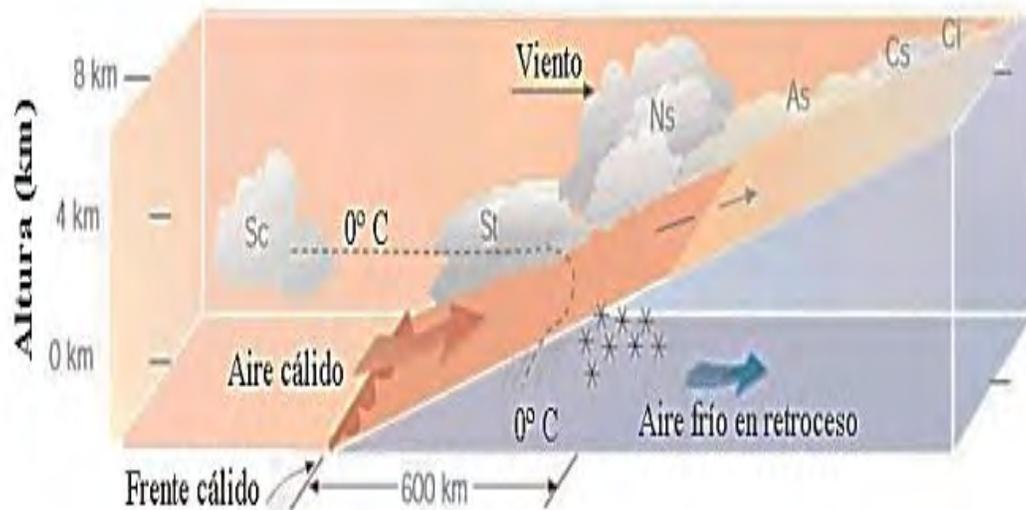


Figura 6. Nubosidad frontal asociada a un frente cálido. (Ahrens, 2003).

### 2.7.7.3 Orográfica

La barrera natural obliga al aire a ascender y enfriarse frecuentemente, el resultado es la formación de nubosidad de carácter orográfica (Maderey et al., 2005).

Provoca la inestabilidad condicional o convectiva por dar al aire un movimiento inicial ascendente, también aumenta la precipitación ciclónica frenando la velocidad con que se mueve el sistema y puede causar convergencia y elevación por el efecto embudo que ejercen los valles sobre las corrientes de aire (figura 7)

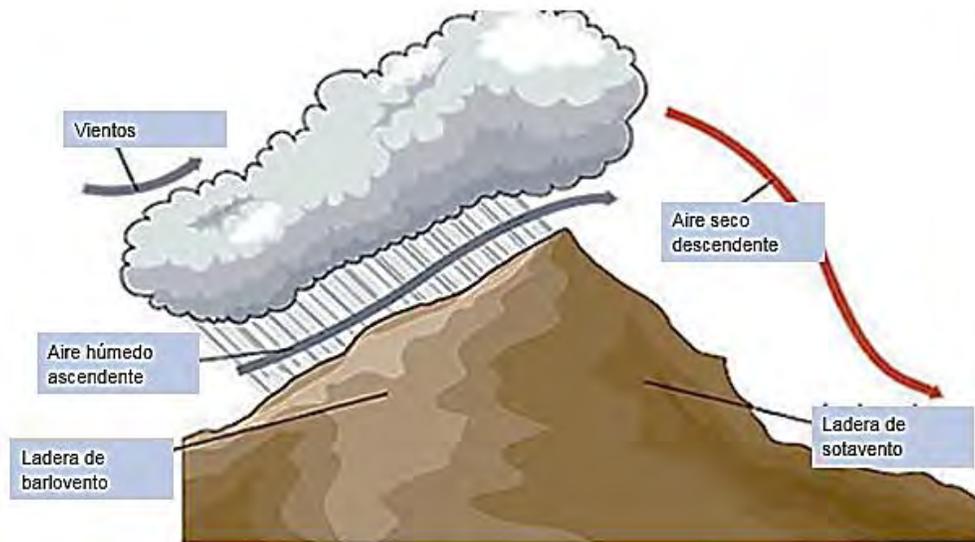


Figura 7. Proceso orográfico (realizado por Méndez-González, 2018)

## 2.7.8 Leyes del movimiento Horizontal

El movimiento del aire en la superficie terrestre está controlado por cuatro componentes: la fuerza del gradiente de presión, la fuerza de Coriolis, la aceleración centrípeta y las fuerzas de rozamiento.

### 2.7.8.1 Fuerza del gradiente de presión

El gradiente de presión es la fuerza que ocasiona el movimiento del aire desde zonas de alta presión hacia las de baja presión. El gradiente de presión por unidad de masa perpendicular a las isobaras se expresa matemáticamente como:  $-1/\rho dp/dn$ , donde  $\rho$  = densidad del aire y  $dp/dn$  = gradiente horizontal de presión (Martínez, 2003).

### 2.7.8.2 Fuerza de Coriolis

La rotación de la tierra genera la fuerza de Coriolis que se produce de forma perpendicular a la dirección del movimiento.

Debido al movimiento de rotación de la tierra todos los fluidos tienden a desviarse hacia la derecha en el hemisferio norte y a desviarse hacia la izquierda en el hemisferio sur; si la tierra permaneciera inmóvil los vientos se desplazarían siguiendo su dirección inicial. Sin embargo, los vientos se desplazan desde los centros de altas presiones hacia los de bajas presiones desviándose por el efecto de Coriolis (figura 8).

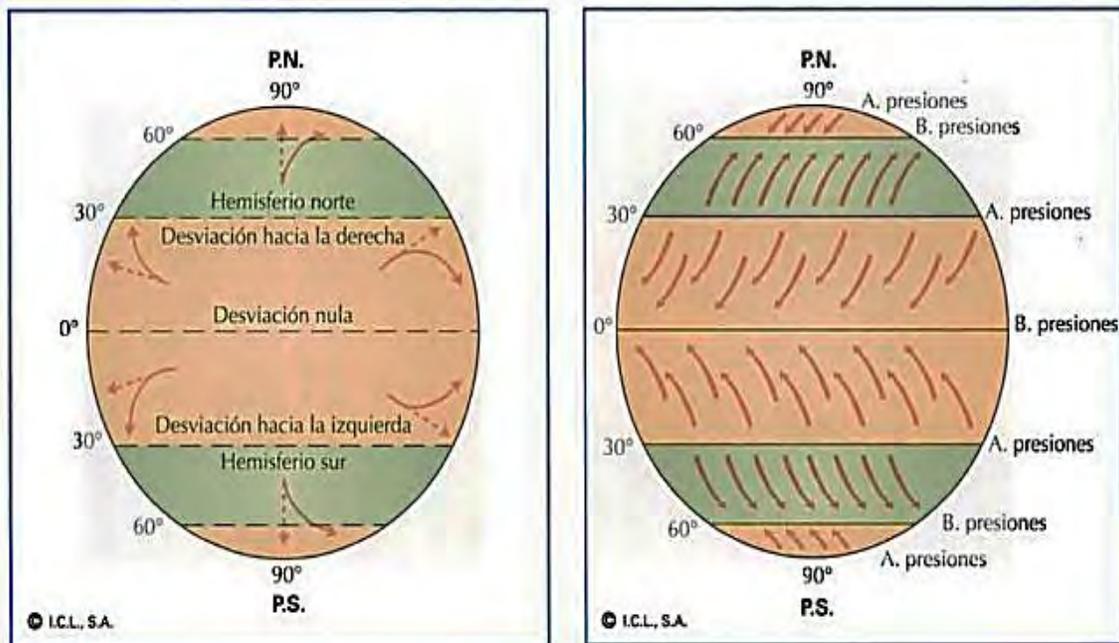


Figura 8. Efecto de Coriolis (Benejam, 2000)

Este efecto denominado ley de Buys-Ballot dice que los vientos soplan desde las áreas de alta presión hacia las áreas de baja presión, en otras palabras, el desplazamiento de los vientos se produce desde los anticiclones hacia los ciclones; como consecuencia la intensidad de los vientos dependerá del gradiente barométrico que es la diferencia de presión existente entre dos lugares.

### **2.7.8.3 Aceleración centrípeta**

Los cuerpos que se mueven siguiendo una trayectoria curva están sometidos a una aceleración dirigida hacia su centro de rotación. La ecuación de la aceleración se expresa:  $c = -mv^2/r$  donde  $m$  = masa en movimiento,  $V$  = velocidad y  $r$  = radio de la curvatura.

Solo será necesario considerar las fuerzas que intervienen (Fuerza de Coriolis y Fuerza de gradiente de presión) en la rotación del aire alrededor de un eje de bajas o altas presiones (Martínez, 2003).

### **2.7.8.4 Fuerza de rozamiento**

En las proximidades de la superficie (debajo de 500 metros), el rozamiento del aire con la superficie hace que disminuya la velocidad del viento, esto influye sobre la fuerza deflectora de la rotación de la tierra, que depende de la velocidad, por consiguiente, disminuye también (Martínez, 2003).

## **CAPITULO III**

### **3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

#### **3.1 Sitios de muestreo**

La UNAM establece la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) con el fin de impulsar la investigación y la docencia de las ciencias atmosféricas en el país. A través de la cooperación entre diversas instituciones, se pone a la disposición de la comunidad científica y público en general información atmosférica relevante y confiable en tiempo real y su libre descarga.

Los diversos parámetros pueden ser utilizados para fines educativos, así como para investigaciones en meteorología, contaminación, cambio climático y disciplinas afines (RUOA, 2018).

Los sitios de muestreo elegidos para el muestreo son: Observatorio Atmosférico UNAM y Observatorio Atmosférico Alzomoni (pertenecientes a la RUOA).

##### **3.1.1 Observatorio Atmosférico UNAM (RUOA)**

La Ciudad de México abarca una superficie de 1,499 km<sup>2</sup> que representa el 0.08% del territorio nacional (Tabla 2) y está ubicado en una cuenca con una altitud promedio de 2240 metros sobre el nivel del mar y con coordenadas 19°25'42'' latitud norte y 99°07'40'' longitud oeste (Figura 9); está limitada en su crecimiento al sur por las sierras del Ajusco y Chichinautzin cercanas a los 4,000 metros de altura; al oriente por Sierra Nevada, con los picos del Popocatepetl y el Iztaccíhuatl, que superan los 5,000 metros y hacia el poniente por las sierras de Las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo (INEGI, 2016).

La parte media de la cuenca está bloqueada por la Sierra de Guadalupe, la cuenca se localiza en el corazón del eje, lo cual da a la región condiciones atmosféricas distintas debido a su altitud.

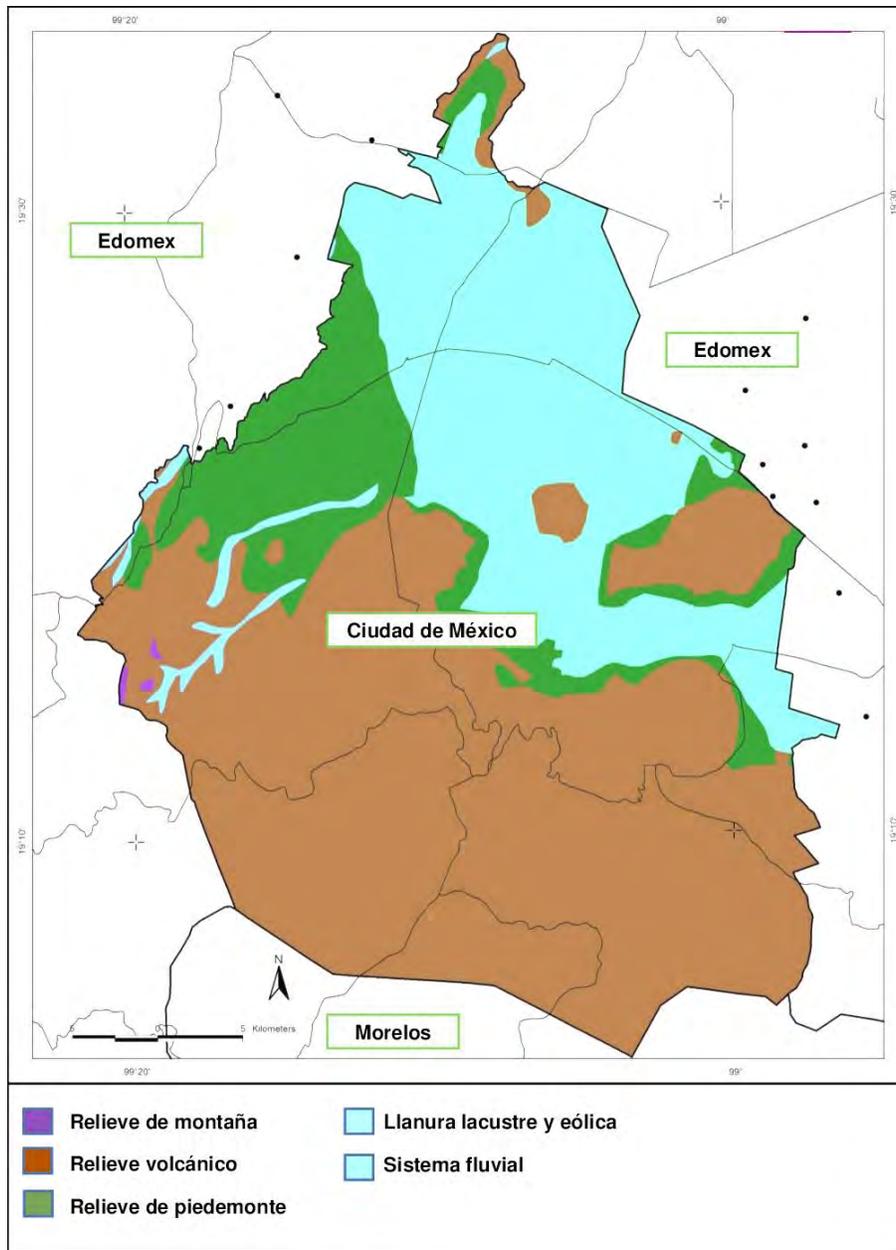


Figura 9. Clasificación del relieve de la Ciudad de México (INEGI, 2016).

Tabla 2. Geografía de la Ciudad de México

Nombre oficial del estado	Ciudad de México
Porcentaje Territorial	1,499 Km <sup>2</sup> (representa el 0.08% del territorio nacional)
División Delegacional	16 delegaciones
Clima	En la mayor parte se presenta clima templado subhúmedo (87%), y el resto clima seco y semiseco (7%) y templado húmedo (6%)
Precipitación	Precipitación total: En la región seca es 600mm y en la parte templada húmeda (Ajusco) de 1200 mm anuales (Tabla 2).
Población Total	8 918 653 habitantes
Población Hombres	4 231 450 hombres
Población Mujeres	4 687 003 mujeres
Fuente: INEGI. Marco Geoestadístico, Superficie de la República Mexicana por Estados y Censo General de Población y Vivienda, 2016	

La presencia de altas montañas impide el paso de las nubes de lluvia provenientes del Golfo de México o del océano Pacífico, por ello las lluvias en la ciudad de México no son abundantes. La temporada de lluvias abarca de mayo a noviembre, aunque la pluviosidad es mayor entre junio y agosto.

Las temperaturas más bajas pueden ir de -2 a -5°C en los meses de enero y febrero acompañadas de nevada en la zona del Ajusco, mientras que las máximas pueden alcanzar los 32°C (INEGI, 2016).

El muestreo se realizó en la Ciudad de México y más concretamente en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (figura 10) de Ciudad Universitaria, utilizando un

colector automático; el centro se encuentra rodeado de construcciones académicas con alta vegetación, zonas residenciales y comercios.



Figura 10. Observatorio Atmosférico UNAM (realizado por Méndez-González, 2017)

Sus coordenadas son 19.3262 N, 99.1761 W, se encuentra a una altitud de 2,280 m.s.n.m.

### 3.1.2 Observatorio Atmosférico Alzomoni (RUOA)

El Estado de México se localiza en la altiplanicie mexicana, la altitud promedio de las cabeceras municipales es de 2320 metros sobre el nivel del mar y está comprendido entre los meridianos 98°36' y 100°37' de longitud oeste del meridiano de Greenwich y los paralelos 18°22' y 20°17' de latitud norte (figura 11).

Presenta una superficie de 22,35 km<sup>2</sup>, que representa el 1.14% del territorio nacional (Tabla 3), Colinda al norte con el estado de Querétaro e Hidalgo; al este con Puebla y Tlaxcala; al sur con Morelos y Guerrero; y al oeste con Michoacán y una pequeña porción de Guerrero. Limita además con la Ciudad de México, rodeándola en sus porciones norte, oriente y occidente.

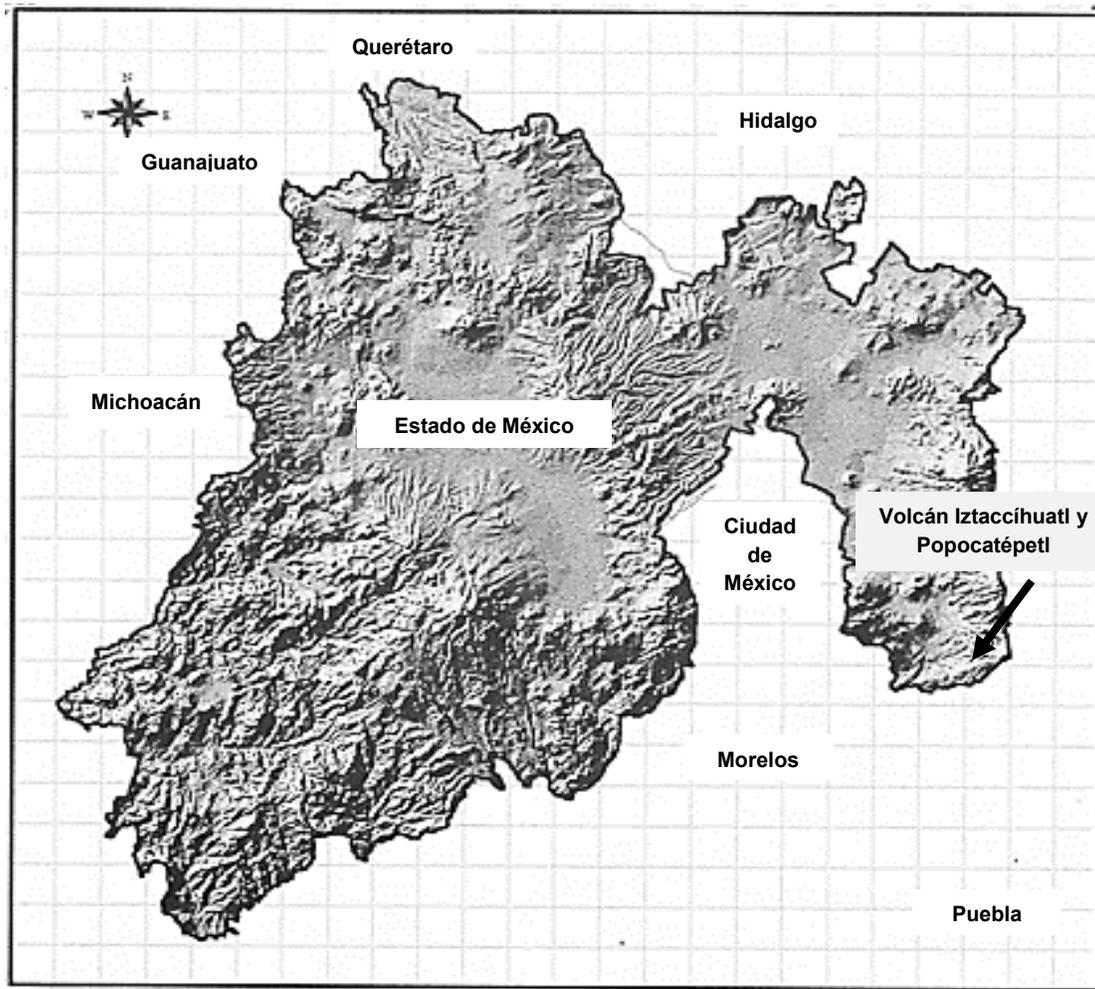


Figura 11. Relieve del Estado de México, (INEGI, 2016)

En el suroeste se encuentra la sierra conformada por rocas metamórficas, sedimentarias, ígneas intrusivas e ígneas extrusivas o volcánicas; con un valle ubicado entre serranías, donde se encuentra la altura más baja (400m) en el cañón que ha formado el río San Pedro. En el centro hay un lomerío con sierras de origen ígneo volcánico, al sureste está la elevación más importante, el volcán Popocatepetl con 5480 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 2016).

Tabla 3. Geografía del Estado de México

Nombre oficial del estado	Estado de México
Porcentaje Territorial	22,35 Km <sup>2</sup> (representa el 1.14% del territorio nacional)
División Delegacional	125 municipios
Clima	El 73% presenta clima templado subhúmedo (en los valles altos del norte y este), el 21% es cálido subhúmedo(suroeste), el 6% seco y semiseco (noroeste), y 0.16% clima frío (partes altas de los volcanes)
Precipitación	Precipitación media de 900 mm anuales (Tabla 4).
Población Total	16 187 608 habitantes
Población Hombres	7 834 068 hombres
Población Mujeres	8 353 540 mujeres
Fuente: INEGI. Marco Geoestadístico, Superficie de la República Mexicana por Estados y Censo General de Población y Vivienda, 2016	

En el suroeste se encuentra la sierra conformada por rocas metamórficas, sedimentarias, ígneas intrusivas e ígneas extrusivas o volcánicas; con un valle ubicado entre serranías, donde se encuentra la altura más baja (400m) en el cañón que ha formado el río San Pedro. En el centro hay un lomerío con sierras de origen ígneo volcánico, al sureste está la elevación más importante, el volcán Popocatepetl con 5480 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 2016)

Se encuentra dentro del parque Nacional Izta-Popo, abarca tres estados de la República Mexicana, Morelos, Puebla y el Estado de México, tiene una superficie de 171,774 hectáreas (figura 12)

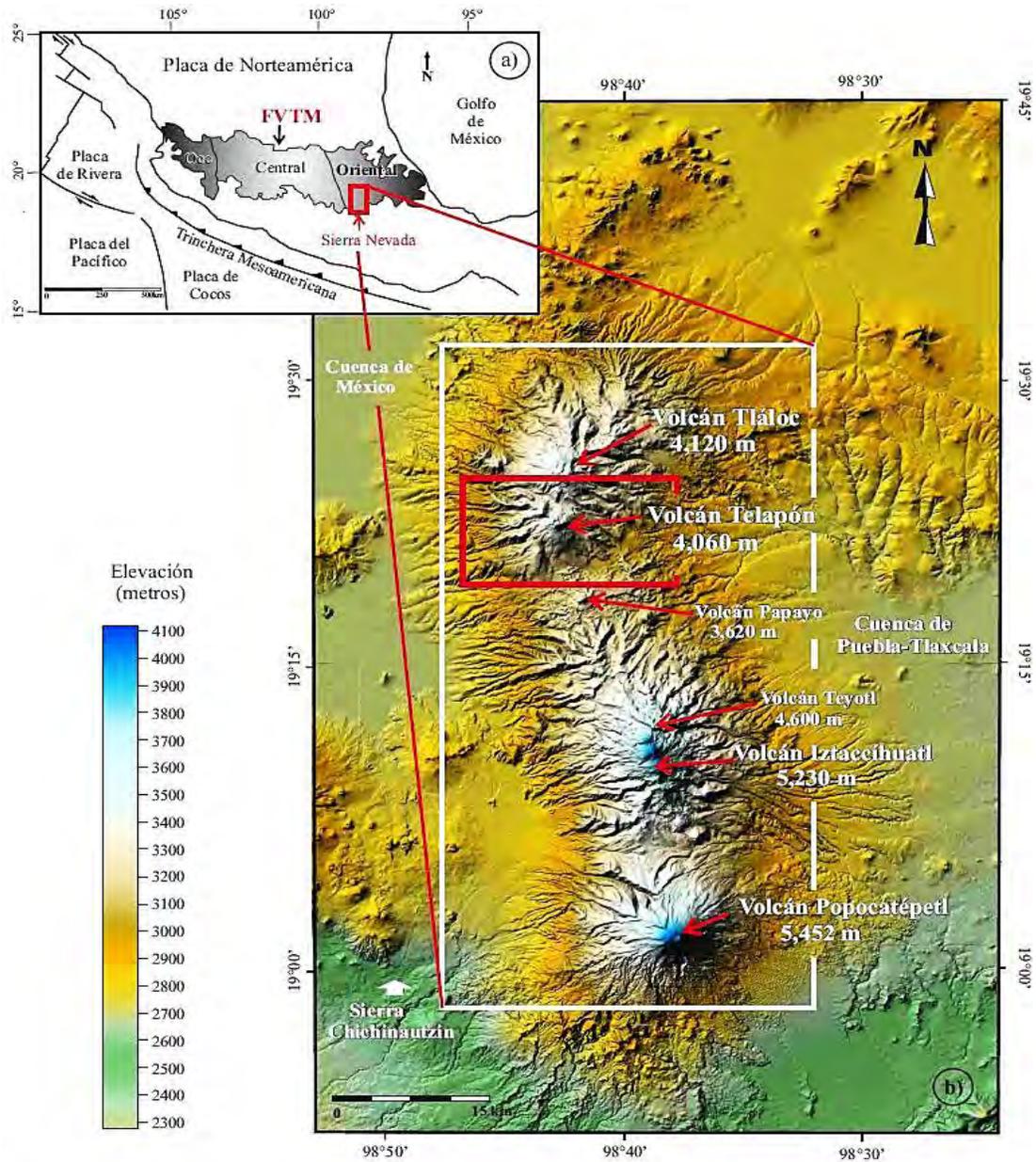


Figura 12. Localización del estratovolcán Popocatepetl (Gómez-Tuena et al., 2005)

El muestreo se realiza en el Parque Nacional Izta-Popo localizado en el municipio de Amecameca en el Estado de México y más concretamente en el Observatorio Alzomoni (figura 13) ubicado en el cerro de Alzomoni utilizando un colector automático.

Rodeado por extensa vegetación y un sistema montañoso que incluye los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl.



Figura 13. Observatorio Atmosférico Altzomoni (realizado por Méndez-González, 2017)

## 3.2 Método Analítico

### 3.2.1 Espectrofotómetro de Absorción Atómica

Cuando se presenta la absorción de radiaciones a determinadas longitudes de onda en el caso particular en que el medio absorbente sean los átomos en estado fundamental, se le conoce como Espectroscopía de Absorción Atómica. El Fundamento del método es que a muestra se oxida por la acción del permanganato de potasio y después se tratan con una mezcla de ácidos, el mercurio iónico se reduce a mercurio elemental por medio de la acción del hidrogeno proveniente de la reacción de borohidruro de sodio en un medio ácido (INSHT, 2000)

El funcionamiento del equipo Espectrofotómetro de Absorción atómica acoplado con un generador de hidruros (EAA-GH) consta de : (1) La bomba peristáltica que tiene un desplazamiento positivo que permite el paso de un fluido por el sistema (2) se realiza la mezcla de la muestra con el agente reductor y el ácido (3) en el proceso de separación, los hidruros volátiles producidos por la adición del borohidruro de

sodio y el ácido son arrastrados por el gas inerte y el ácido bórico es desechado (4) en la lámpara de Hg la muestra se atomiza y genera una señal en forma gaussiana cuya altura es proporcional a la cantidad de analito en la muestra (5) para ello se utiliza una celda de cuarzo donde el Hg elemental transita para su cuantificación (6) el detector cuantifica la señal emitida y (7) en la computadora se representa de una manera visual los resultados obtenidos (figura 14).



Figura 14. EAA-GH y lámpara de cátodo hueco (realizado por Méndez-González, 2017)

### 3.3 Campaña de muestreo

Las muestras fueron recolectadas durante el periodo de lluvia comprendido entre mayo-noviembre del 2016, las muestras recolectadas del Observatorio Atmosférico UNAM son diarias (lunes a viernes), mientras las del Observatorio Atmosférico Alzomoni fueron acumuladas; esto debido a la dificultad que presentaba poder trasladarse diariamente y el difícil acceso al Observatorio Atmosférico Alzomoni.

### 3.3.1 Observatorio Atmosférico UNAM

El periodo de muestreo abarca del 27 de mayo al 2 de noviembre del 2016, obteniendo un total de 40 muestras, utilizando un colector automático marca N-CON-SYSTEM el cual consta de un sensor infrarrojo que al detectar un evento de lluvia la compuerta se desliza y destapa el recipiente de polietileno de alta densidad (HDPE) con capacidad para 20 litros que se encarga de almacenar la muestra y al finalizar el evento la compuerta se cierra y la muestra queda tapada impidiendo su contaminación (figura 15). Las muestras se trasladan al laboratorio cada día.



Figura 15. Colector automático (realizado por Méndez-González, 2017)

### 3.3.2 Observatorio Atmosférico UNAM

El periodo de muestreo abarca del 19 de mayo al 3 de noviembre del 2016 obteniendo un total de 16 muestras, utilizando un colector automático explicado anteriormente (figura 15). Las muestras se trasladan al laboratorio cada semana.

### 3.4 Tratamiento de las muestras

La integridad de las muestras incluye: tipo y lavado de material, método de filtración y uso de reactivos en la conservación de mercurio en solución.

Indiferentemente del sitio de muestreo a las muestras se le mide previamente el pH y la conductividad, después se filtran al vacío con un sistema de filtración magnético (GAST) utilizando filtros de policarbonato de 0.45 micrómetros y se vuelve a medir el pH y la conductividad. Los filtros recolectados se usarán posteriormente en un horno de microondas para su digestión y corresponderán a la fracción insoluble, mientras que el filtrado pertenece a la fracción soluble y se le acidifica con 1mL de  $\text{HNO}_3$  ; las muestras se refrigeran a  $4^\circ\text{C}$  hasta su preparación.

#### **3.4.1 Análisis químico de los filtros**

Los filtros (figura 16) se colocan en vasos de digestión HP-500, se adicionan 10 mL de  $\text{HNO}_3$  3.2M. Se dejan los vasos en reposar por 24 horas para estabilizar la reacción.



Figura 16. Filtros (realizado por Méndez-González, 2017)

Después de 24 horas los vasos fueron introducidos en el horno de microondas Mars5 (figura 17) bajo las condiciones descritas en la tabla 4.



Figura 17. Horno de microondas Mars5 y Vasos HP-500 para digestión.

Tabla 4. Parámetros para la digestión en horno de microondas (realizado por Méndez-González, 2017)

Potencia (watts)	Tiempo de rampa (min)	Presión (psi)	Temperatura (°C)	Tiempo a temperatura constante (°C)	Tiempo total (min)
1200	20	200	180	10	30

Las muestras son sometidas a una rampa de temperatura durante 20 min hasta alcanzar los 180°C, posteriormente 10 min adicionales a temperatura constante de 180°C. El proceso dura 30 min.

Al terminar las muestras se dejan en reposo hasta que se estabilicen los vasos debido a la alta presión y temperatura. A continuación, la muestra se decanta en matraces aforados de 100 mL y se les agrega agua desionizada hasta la marca del aforo.

### 3.5 Método de preparación de muestras

Se utilizó el método 7470A de la Agencia de Protección Ambiental Estadounidense (USEPA, 1995), modificada por (Rangel, 2015).

En la tabla 5 se nombran los reactivos y las concentraciones utilizadas.

Tabla 5. Reactivos para utilizar en el análisis.

Reactivo	Concentración	Unidades
Agua	Tipo ASTM II	
Ácido nítrico (HNO <sub>3</sub> )	50	%
Permanganato de potasio (KMnO <sub>4</sub> )	5	% m/v
Clorhidrato de hidroxilamina (NH <sub>2</sub> OH·HCl)	10	% m/v

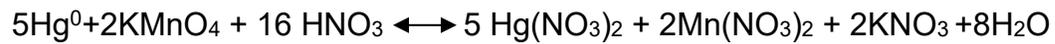
En la tabla 6 se describen los pasos a seguir por el método.

Tabla 6. Procedimiento para preparar 25 mL de muestra

Paso	Reactivo	Alícuota (mL)
1	HNO <sub>3</sub> (conc)	1.5
2	KMnO <sub>4</sub>	1.25
3	Dejar reposar 15 minutos	
4	NH <sub>2</sub> OH·HCl	Aproximadamente 8 gotas (hasta eliminar exceso de KMnO <sub>4</sub> )

Las muestras se leen a 253 nm y la cuantificación se realiza por la interpolación en una curva de calibración.

La reacción que se lleva a cabo en el equipo es:



El ácido clorhídrico se mezcla con el borohidruro, esta reacción produce hidrogeno atómico que reacciona con el metal en su forma oxidada más estable con la finalidad de formar hidruros volátiles que son transportados por el gas inerte a la cámara de ionización.

## **CAPITULO IV**

### **4. RESULTADOS**

A los resultados obtenidos se les aplicó como base estadística descriptiva se ordenaron y clasificaron los datos y se obtuvieron medidas de tendencias central y de dispersión para comparar los resultados.

En el Anexo I y II observan las concentraciones de Hg en  $\mu\text{g/L}$  de cada uno de los sitios de muestreo, adicionalmente se les determinó en el laboratorio el pH y la conductividad. En el Anexo III están las rosas de viento para cada sitio y mes del año de muestreo 2016 y el Anexo IV un resumen de la validación del método analítico (Rangel, 2017).

En las tablas de la 7 a la 10 se presenta la media de las concentraciones de Hg con su incertidumbre asociada. A los datos se les aplicó una prueba de Grubbs al 95% la cual se utiliza para detectar valores atípicos (y pudieran ser rechazados) en un conjunto de datos univariantes y se basa en el supuesto de normalidad, para ello los datos se ordenan de menor a mayor, se estima la desviación estándar de todos los datos, se selecciona el porcentaje de confianza y se compara el valor obtenido con el tabulado. La prueba de Grubbs maneja un límite superior e inferior de 1.97 (parámetro utilizado en el software estadístico XLSTAT) para determinar si un dato se considera atípico.

También se realizó estadística descriptiva con base a los diagramas de cajas con el fin de estudiar la dispersión de los datos, además de prueba de normalidad y T student que permite comparar las medias de dos series de mediciones realizadas sobre las mismas unidades estadísticas.

#### **4.1 Resultado Observatorio Atmosférico UNAM**

En la tabla 7 se presenta la media de la concentración de la fracción insoluble de Hg, su incertidumbre y el valor de la prueba de Grubbs (dato sombreado valor atípico)

Tabla 7. Concentración fracción insoluble, Observatorio Atmosférico UNAM

Muestra	Concentración Insoluble Hg ( $\mu\text{g/L}$ )	Incertidumbre	Prueba de Grubbs
CU-1	12.37	0.71	-0.22
CU-2	12.52	0.56	-0.17
CU-3	12.32	0.76	-0.23
CU-4	10.44	2.64	-0.79
CU-5	10.26	2.82	-0.85
CU-6	12.83	0.25	-0.08
CU-7	8.75	4.33	-1.30
CU-8	9.57	3.51	-1.06
CU-9	9.59	3.49	-1.05
CU-10	11.77	1.31	-0.39
CU-11	9.76	3.32	-1.00
CU-12	9.89	3.19	-0.96
CU-13	9.38	3.70	-1.11
CU-14	9.71	3.37	-1.01
CU-15	9.09	3.99	-1.20
CU-16	8.68	4.40	-1.32
CU-17	5.88	7.20	-2.16
CU-18	9.73	3.35	-1.01
CU-19	11.71	1.37	-0.41
CU-20	9.49	3.59	-1.08
CU-21	18.76	5.68	1.71
CU-22	16.14	3.06	0.92
CU-23	16.66	3.58	1.07
CU-24	16.00	2.92	0.88
CU-25	15.14	2.06	0.62
CU-26	17.72	4.64	1.39
CU-27	15.17	2.09	0.63
CU-28	17.56	4.48	1.34
CU-29	16.67	3.59	1.08
CU-30	14.71	1.63	0.49
CU-31	14.82	1.74	0.52
CU-32	17.19	4.11	1.23
CU-33	14.38	1.30	0.39
CU-34	14.44	1.36	0.41
CU-35	13.24	0.16	0.05
CU-36	15.80	2.72	0.82
CU-37	17.02	3.94	1.18

Tabla 7. Concentración fracción insoluble, Observatorio Atmosférico UNAM para (continuación).			
CU-38	14.56	1.48	0.44
CU-39	15.04	1.96	0.59
CU-40	18.59	5.51	1.65

En la figura 18 se muestra el diagrama de caja de los resultados obtenidos del muestreo fracción insoluble (tabla 7).

La concentración de la muestra 17 se considera un valor atípico.

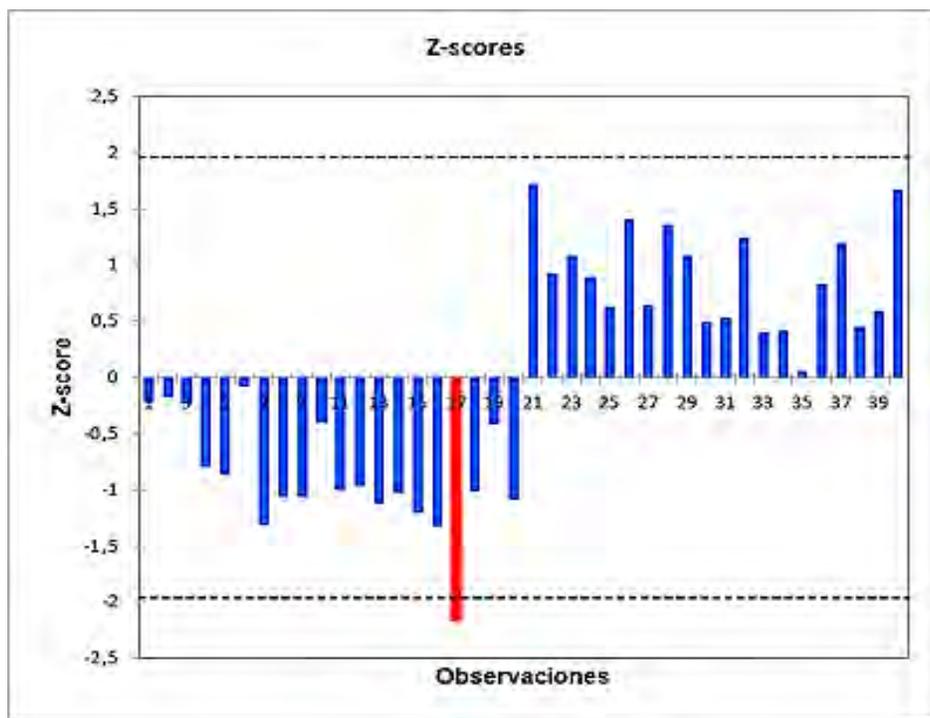


Figura 18. Fracción Insoluble, Observatorio Atmosférico UNAM

Tabla 8. Concentración fracción soluble en el Observatorio Atmosférico UNAM

Muestra	Concentración Soluble Hg ( $\mu\text{g/L}$ )	Incertidumbre	Prueba de Grubbs
CU-1	6.88	2.88	-0.80
CU-2	5.51	4.25	-1.19
CU-3	7.34	2.42	-0.68
CU-4	5.95	3.82	-1.07
CU-5	5.58	4.18	-1.17
CU-6	4.65	5.11	-1.43
CU-7	8.94	0.82	-0.23
CU-8	7.18	2.58	-0.72
CU-9	6.78	2.98	-0.83
CU-10	7.25	2.51	-0.70
CU-11	2.17	7.59	-2.12
CU-12	8.61	1.15	-0.32
CU-13	7.86	1.90	-0.53
CU-14	7.22	2.54	-0.71
CU-15	6.08	3.68	-1.03
CU-16	11.24	1.48	0.41
CU-17	13.03	3.27	0.91
CU-18	15.22	5.46	1.52
CU-19	16.00	6.24	1.74
CU-20	15.20	5.44	1.52
CU-21	13.04	3.28	0.91
CU-22	2.55	7.21	-2.01
CU-23	11.37	1.61	0.45
CU-24	13.20	3.44	0.96
CU-25	11.35	1.59	0.44
CU-26	13.41	3.65	1.02
CU-27	9.44	0.33	-0.09
CU-28	13.46	3.70	1.03
CU-29	14.10	4.34	1.21
CU-30	12.81	3.05	0.85
CU-31	7.05	2.71	-0.76
CU-32	10.45	0.69	0.19
CU-33	13.51	3.75	1.05
CU-34	12.27	2.51	0.70
CU-35	13.46	3.70	1.03
CU-36	10.47	0.71	0.20
CU-37	13.46	3.70	1.03

CU-38	9.59	0.17	-0.05
CU-39	8.63	1.13	-0.32
CU-40	8.26	1.50	-0.42

En la gráfica 19 se muestra el diagrama de caja de los resultados obtenidos del muestreo de la fracción soluble (tabla 8).

La concentración de la muestra 11 y 22 se consideran unos valores atípicos.

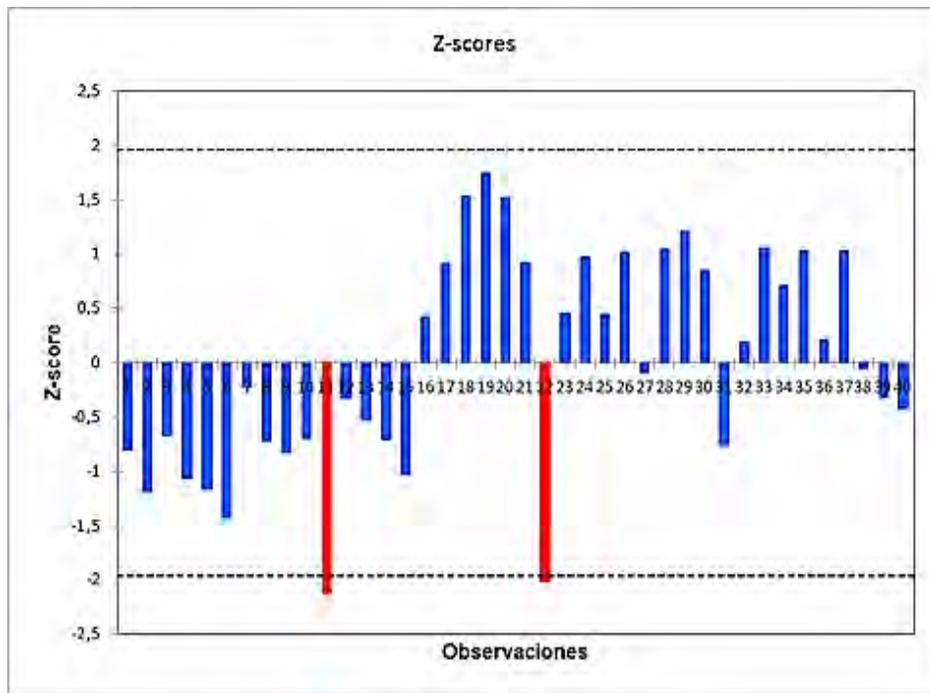


Figura 19. Fracción Soluble, Observatorio Atmosférico UNAM.

En la tabla 9 están los resultados de la estadística descriptiva de la fracción soluble, insoluble y  $\Sigma$  (sol+ insol), donde: CP (Concentraciones promedio), DECP (desviación estándar de la concentración promedio), MEDC (mediana de las concentraciones), MIN (mínimo) y MAX (máximo).

Tabla 9. Estadística descriptiva, Observatorio Atmosférico UNAM

		Concentraciones de Hg en el Observatorio Atmosférico UNAM en $\mu\text{g/L}$					
		N	CP	DECP	MEDC	Mín.	Máx.
Hg	Insoluble	40	13.08	3.33	13.03	5.88	18.76
	Soluble	40	9.76	3.58	9.51	2.17	16
	$\Sigma$ (sol+ insol)	40	22.85	5.49	23.91	11.93	31.8

En la figura 20 se muestra la gráfica de caja de los resultados obtenidos del muestreo (tabla 9).

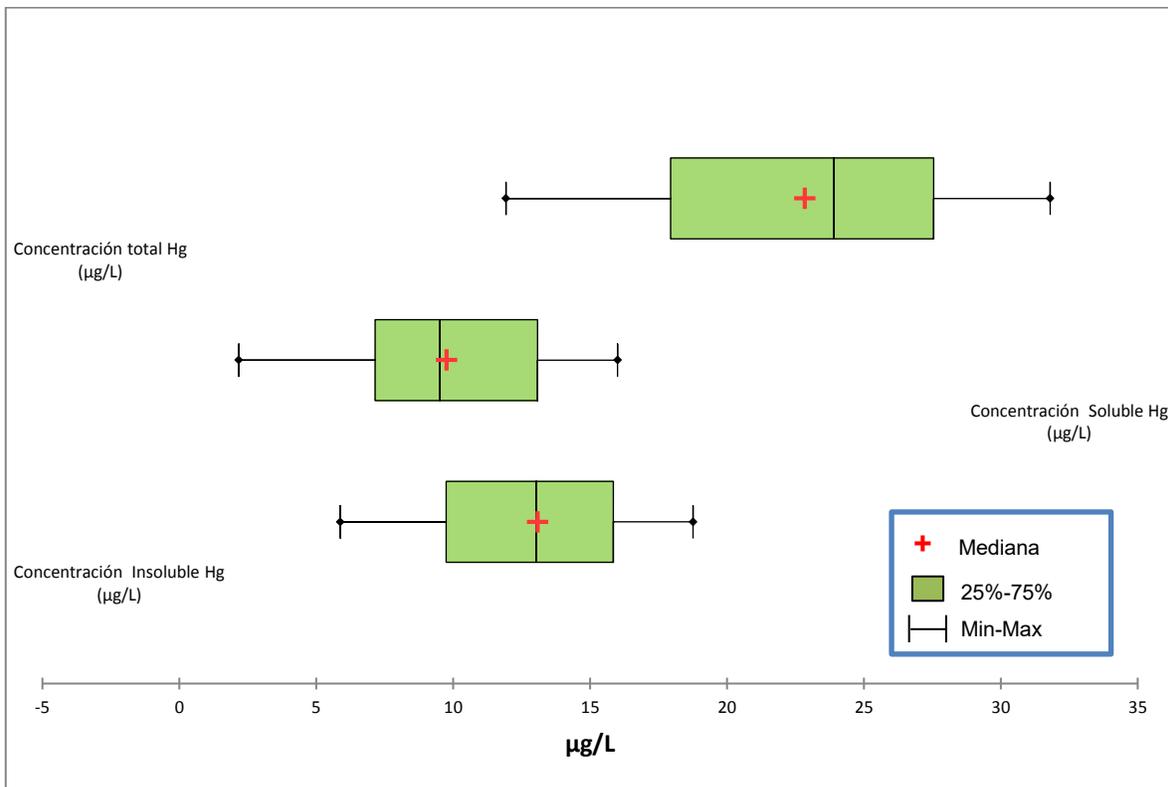


Figura 20. Diagrama de caja, Observatorio Atmosférico UNAM.

Se realizó una prueba de normalidad para corroborar que efectivamente los datos presentaban una distribución normal (figura 21)

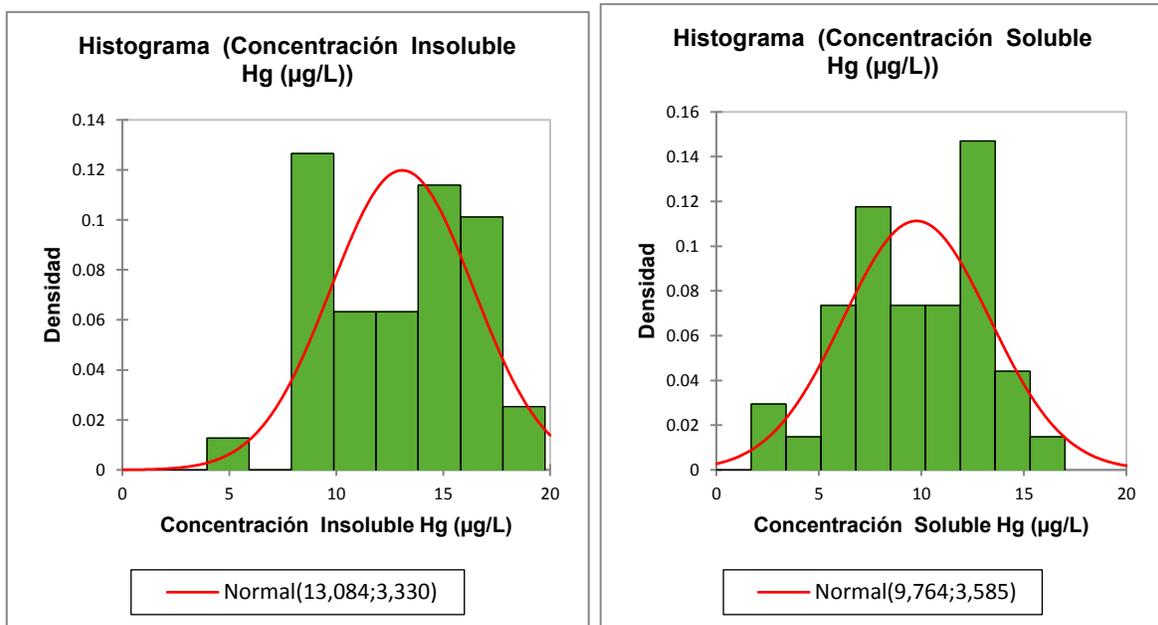


Figura 21. Histograma de frecuencias, Observatorio Atmosférico UNAM.

### Prueba t de student

Es una prueba paramétrica de hipótesis de la media de una o dos poblaciones distribuidas normalmente; para muestras mayores a 30 datos.

La interpretación de la prueba es:  $H_0$  la diferencia entre las medias es igual a 0,  $H_a$  la diferencia entre las medias es diferente de 0; cuando el valor-p es menor que el nivel de significancia se debe rechazar la hipótesis nula  $H_0$  y aceptar la hipótesis alterna  $H_a$ . Existen varios tipos de prueba t. pero en todas se utiliza un estadístico de prueba que sigue una distribución t bajo la hipótesis nula (tabla 10):

Tabla 10. Tipos de pruebas t student

Prueba	Propósito
t de 1 muestra	Prueba si la media de una población individual es igual a un valor específico.
t de 2 muestras	Prueba si la diferencia entre las medias de dos poblaciones independientes es igual a un valor específico.
t pareada	Prueba si la media de las diferencias entre las observaciones dependientes o pareadas es igual a un valor específico.
Prueba t en la salida de regresión	Prueba si los valores de los coeficientes en la ecuación de regresión difieren significativamente de cero

En la tabla 11 se presenta los resultados de la t student para dos muestras relacionadas obtenidas con el programa XLSTAT, 2018.

Variable	Observaciones	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
Concentración Insoluble Hg ( $\mu\text{g/L}$ )	40	5.878	18.761	13.084	3.330
Concentración Soluble Hg ( $\mu\text{g/L}$ )	40	2.173	16.003	9.764	3.585
				GL	39
				Valor-p	< 0.0001
				alfa	0.05

## 4.2 Resultados Observatorio Atmosférico Altzomoni

En la tabla 12 se presenta la media de la concentración de la fracción insoluble de Hg, su incertidumbre y el valor de la prueba de Grubbs (dato sombreado valor atípico)

Tabla 12. Concentración fracción insoluble, Observatorio Atmosférico Altzomoni

Muestra	Concentración Insoluble Hg ( $\mu\text{g/L}$ )	Incertidumbre	Prueba de Grubbs
ALT-1	14.56	1.39	0.97
ALT-2	13.67	0.50	0.35
ALT-3	13.22	0.05	0.04
ALT-4	14.87	1.70	1.18
ALT-5	12.62	0.55	-0.38
ALT-6	9.72	3.45	-2.39
ALT-7	12.54	0.63	-0.43
ALT-8	15.88	2.71	1.88
ALT-9	13.26	0.09	0.06
ALT-10	12.34	0.83	-0.58
ALT-11	12.34	0.83	-0.58
ALT-12	12.81	0.36	-0.25
ALT-13	12.24	0.93	-0.64
ALT-14	12.24	0.93	-0.64
ALT-15	13.52	0.35	0.25
ALT-16	14.84	1.67	1.16

En la figura 22 se muestra el diagrama de caja de los resultados obtenidos del muestreo fracción insoluble (tabla 12).

La concentración de la muestra 6 se considera un valor atípico.

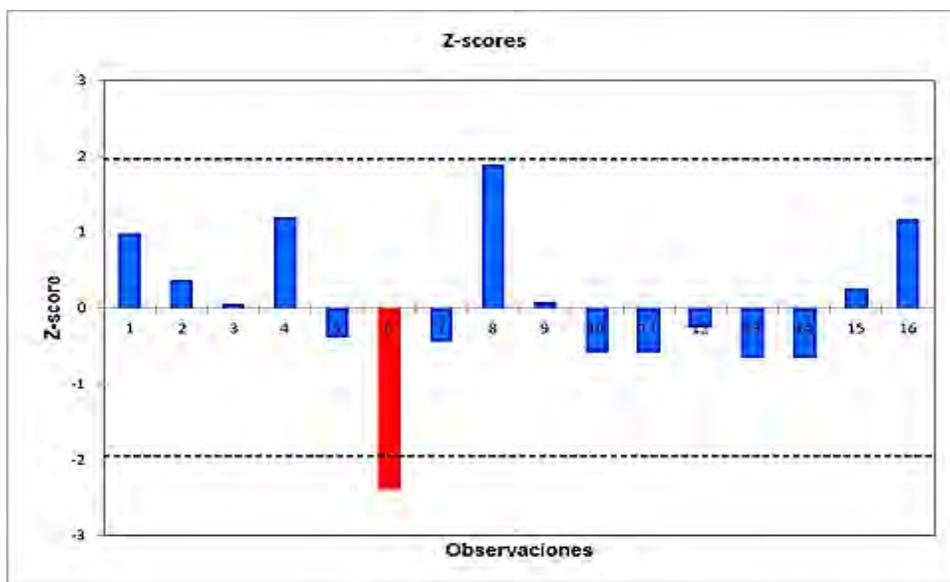


Figura 22. Fracción insoluble, Observatorio Atmosférico Alzomoni

Tabla 13. Concentración fracción soluble, Observatorio Atmosférico Alzomoni

Muestra	Concentración Soluble Hg ( $\mu\text{g/L}$ )	Incertidumbre	Prueba de Grubbs
ALT-1	11.77	2.62	2.40
ALT-2	10.31	1.16	1.06
ALT-3	10.12	0.97	0.88
ALT-4	10.66	1.51	1.38
ALT-5	8.12	1.03	-0.95
ALT-6	8.77	0.38	-0.35
ALT-7	8.33	0.82	-0.76
ALT-8	7.62	1.53	-1.41
ALT-9	9.61	0.46	0.42
ALT-10	8.62	0.53	-0.49
ALT-11	8.62	0.53	-0.49
ALT-12	8.80	0.35	-0.33
ALT-13	8.93	0.22	-0.21
ALT-14	8.93	0.22	-0.21
ALT-15	8.08	1.07	-0.98
ALT-16	9.18	0.03	0.02

En la figura 23 se muestra el diagrama de caja de los resultados obtenidos del muestreo fracción insoluble (tabla 13).

La concentración de la muestra 1 se considera un valor atípico

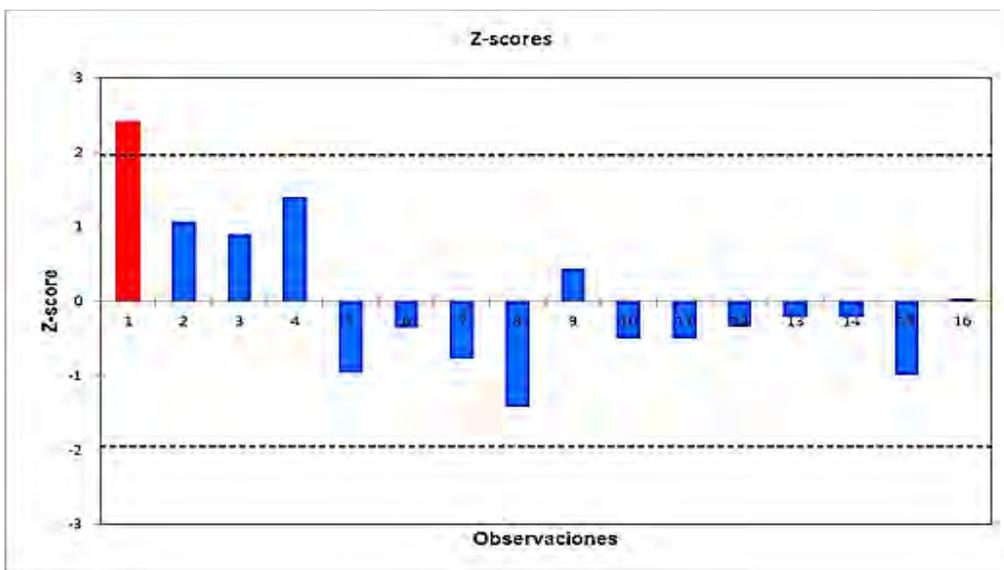


Figura 23. Fracción soluble, Observatorio Atmosférico Altzomoni

En la tabla 14 están los resultados de la estadística descriptiva de la fracción soluble, insoluble y  $\Sigma$  (sol+ insol), donde: CP (Concentraciones promedio), DECP (desviación estándar de la concentración promedio), MEDC (mediana de las concentraciones), MIN (mínimo) y MAX (máximo).

Tabla 14. Estadística descriptiva, Observatorio Atmosférico Altzomoni

		Concentraciones de Hg en el Observatorio Atmosférico Altzomoni					
		N	CP	DECP	MEDC	Mín.	Máx.
Hg	Insoluble	16	13.17	1.41	13.01	9.72	15.88
	Soluble	16	9.15	1.09	8.86	7.62	11.72
	$\Sigma$ (inso + sol)	16	22.32	2.02	21.60	18.50	26.33

En la figura 24 se muestra la gráfica de caja de los resultados obtenidos del muestreo (tabla 14).

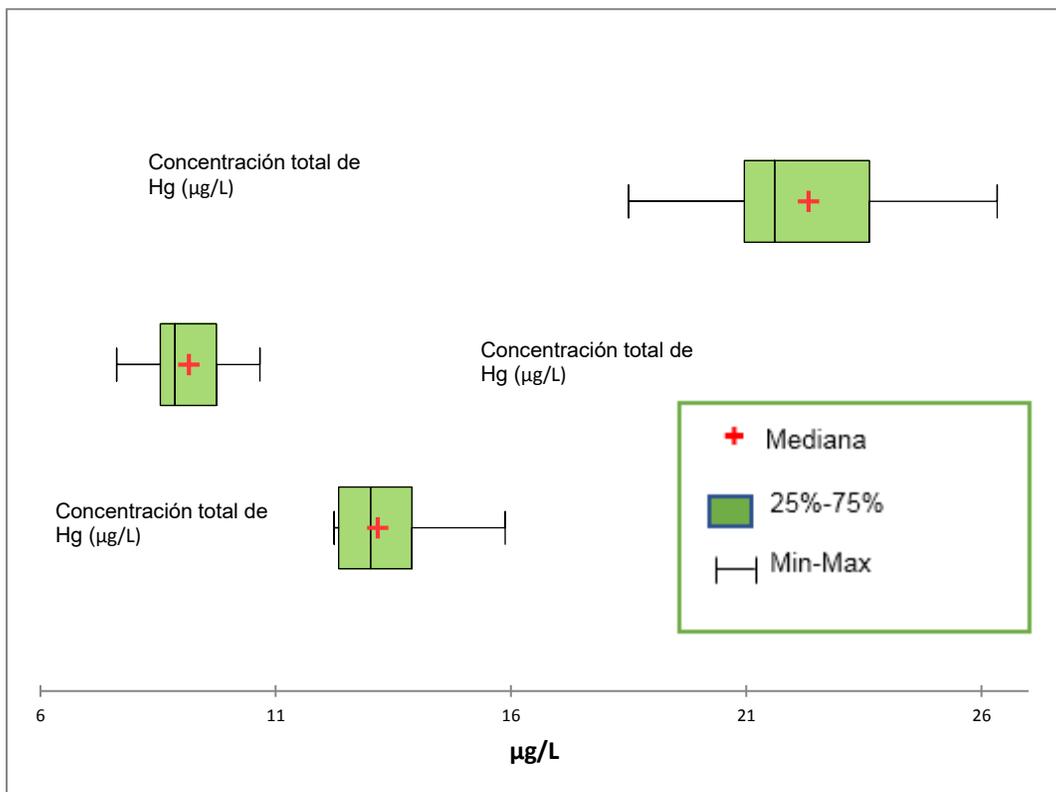


Figura 24. Diagrama de caja, Observatorio Atmosférico Alzomoni.

Se realizó una prueba de normalidad para corroborar que efectivamente los datos presentaban una distribución normal (figura 25)

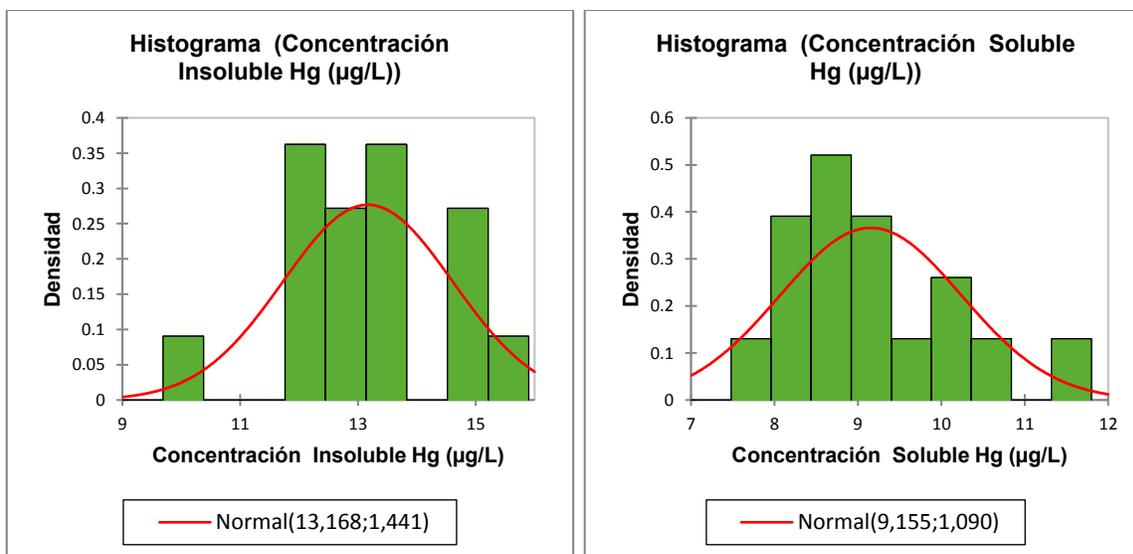


Figura 25. Histograma de frecuencias, Observatorio Atmosférico Altzomoni

### Prueba t student de dos muestras relacionadas

En la tabla 15 se presenta los resultados de la t student para dos muestras relacionadas obtenidas con el programa XLSTAT, 2018.

Tabla 15. Resultados de t student, Observatorio Atmosférico Altzomoni					
Variable	Observaciones	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
Concentración Insoluble Hg (µg/L)	16	9.724	15.876	13.168	1.441
Concentración Soluble Hg (µg/L)	16	7.618	11.772	9.155	1.090
				GL	15
				valor-p	< 0.0001
				alfa	0.05

## **CAPITULO V**

### **5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **5.1 Observatorio Atmosférico UNAM**

La Ciudad de México se encuentra en una cueca impidiendo que el viento alcance velocidades que permitan la difusión y diseminación de contaminantes e incluso presenta velocidades constantes (1.5 m/s) los vientos predominantes tienden a circular con dirección norte a sur de acuerdo con las rosas de viento observadas en la zona de estudio (Anexo II), esto provoca que los contaminantes provenientes de la zona norte ( proveniente de: industrias, densidad vehicular , etc.) viajen grandes distancias acumulándose y se depositen por deposición húmeda. Además, que cerca del Observatorio Atmosférico hay avenidas congestionadas diariamente. La capital probablemente se vea un poco afectada por las cenizas provenientes del volcán Popocatepetl debido a que los vientos predominantes viajan dirección al oeste y la capital se encuentra al noroeste de la fuente de emisión.

Las tablas 7 y 8 corresponden a la fracción soluble e insoluble del Observatorio Atmosférico UNAM, se obtienen valores en la fracción insoluble mayores que la fracción soluble esto debido probablemente al lavado atmosférico y a la resuspensión del material particulado.

En la prueba de Grubbs las dos fracciones presentan valores atípicos, pero no influyen de manera significativa al resto de datos. En la figura 18 y 19 se muestra los diagramas de cajas y se puede apreciar de manera visual y clara los datos atípicos que están por arriba del límite establecido por la prueba.

En la figura 20 se observa la gráfica de caja de los resultados obtenidos en la estadística descriptiva (tabla 9). mostrando que solo el 50% de las concentraciones de Hg soluble se encuentran en el intervalo de 7.08 a 13.16  $\mu\text{g/L}$ , presentando un máximo de 16  $\mu\text{g/L}$  y un promedio de 9.76  $\mu\text{g/L}$ . Por otro lado, en la fracción insoluble se encuentran en los intervalos de 9.73 y 15.95  $\mu\text{g/L}$  con una concentración promedio de 13.08  $\mu\text{g/L}$  y un máximo 18.76  $\mu\text{g/L}$ . La desviación

estándar de la concentración promedio de mercurio total fue de 5.49 por lo que la dispersión de los datos no es grande.

La figura 21 muestra un histograma de frecuencias que se realizó para ver el comportamiento de los datos y se presentó una distribución normal en las dos fracciones, con un sesgo a la derecha en la fracción insoluble debido a que la mayoría de los datos presentan concentraciones altas.

En la tabla 14 muestra la T student de dos muestras relacionadas, el valor-p es igual 0.0001. Puesto que el valor-p es menor que 0.05, hay una diferencia significativa entre las medias de las concentraciones con un nivel de significancia del 95% y se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

## **5.2 Observatorio Atmosférico Altzomoni**

El Observatorio Atmosférico Altzomoni está localizado en las faldas del cerro Altzomoni, por lo que no cuenta con brechas naturales que detenga la velocidad del viento, los vientos predominantes circulan dirección oeste; por lo que se ve afectado probablemente por los contaminantes provenientes de la industria automotriz y textil (INEGI, 2011), además de alguno de los 16 parques industriales de la misma región. También hay que tener en cuenta que al encontrarse en una zona recreativa se ve afectada por la quema intencional de pastizales y matorrales, además de los incendios que se producen.

Las tablas 12 y 13 corresponden a la fracción soluble e insoluble del Observatorio Atmosférico UNAM, se obtienen valores en la fracción insoluble mayores que la fracción soluble esto debido probablemente al lavado atmosférico y a la resuspensión del material particulado.

En la prueba de Grubbs las dos fracciones presentan valores atípicos, pero no influyen de manera significativa al resto de datos. En la figura 22 y 23 se muestra los diagramas de cajas y se puede apreciar de manera visual y clara los datos atípicos que están por arriba del límite establecido por la prueba.

En la figura 24 se observa la gráfica de caja de los resultados obtenidos en la estadística descriptiva (tabla 14) mostrando que solo el 50% de las concentraciones de Hg se encuentran en los intervalos de 8.40 y 9.99  $\mu\text{g/L}$ , presentando un máximo de 11.72  $\mu\text{g/L}$  y un promedio de 9.15  $\mu\text{g/L}$ . Por otro lado, la fracción insoluble se encuentran entre los intervalos de 12.34 y 14.34  $\mu\text{g/L}$  con una concentración promedio de 13.17  $\mu\text{g/L}$  y un máximo de 15.88  $\mu\text{g/L}$ . La desviación estándar de la concentración de promedio de Hg total fue de 2.02 un valor pequeño por lo que la dispersión de los datos no es grande.

La figura 25 muestra un histograma de frecuencias que se realizó para ver el comportamiento de los datos y se presentó una distribución normal en las dos fracciones, además de sesgo a la derecha para la fracción insoluble y a la derecha para la fracción soluble esto debido a que si la mayoría de los datos presentan valores altos presentara sesgo a la izquierda y a la derecha si hay más valores con concentraciones bajas.

En la tabla 15 muestra la t student de dos muestras, el valor-p es igual 0.0001. Puesto que el valor-p es menor que 0.05, hay una diferencia significativa entre las medias de las concentraciones con un nivel de significancia del 95% y se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

Las concentraciones de Hg obtenidas en este muestreo están por arriba de lo reportado por Sakata y Marumoto, (2005); Gerald, (2006) donde las concentraciones se analizaron en precipitación pluvial por evento y se les atribuyen a contaminantes antropogénicos como la combustión del carbón.

Un estudio realizado por (García et al., 2018) midió la concentración de mercurio en precipitación pluvial en una zona minera y un área urbana. Obteniendo en la zona minera 86.97  $\mu\text{g/L}$  y en san Joaquín zona urbana 81.51  $\mu\text{g/L}$ .

Otro estudio de Prestbo y Gay (2009) donde de igual manera se analizó Hg en precipitación pluvial por evento obtuvieron una concentración máxima de 0.77  $\mu\text{g/L}$  y un promedio de 0.0096  $\mu\text{g/L}$ ; estas concentraciones son aún más bajas. que las de este trabajo. por lo que hay que tomar en cuenta. es el grave problema de

contaminación que presenta la ciudad de México, además de la contribución del transporte público o privado; además que en Altzomoni se ve afectada en cierta medida por la acción del volcán y por los contaminantes de las zonas aledañas como la ciudad de Puebla también con un problema de contaminación importante.

Otro trabajo realizado por Patiño (2011). en el que se obtuvieron concentraciones promedio de mercurio total de 93.62. 91. 98 y 105.29 µg/L para una zona rural con zonas mineras. estos valores se encuentran muy por arriba que se obtuvieron en el presente estudio. En la tabla 16 comparación de la concentración de Hg en depósito húmedo realizada en otros estudios en ng/L.

Tabla 16. Concentraciones de Hg en México y el mundo.

Sitio de muestreo	Ciudad de México. México	Estado de México, México	Querétaro, México	Kashima. Ishikawa  (Japón)	Steubenville . Ohio  EE. UU.	Querétaro (zona minera y rural), México	Nueva Inglaterra  EE. UU.
Hg (ng/L)	22,850	22,320	93,630	16.7	14	86,970 81,510	9.6
Autor	Méndez 2016	Méndez 2016	Patiño 2011	Sakata y Marumoto 2005	Gerald 2006	García 2018	Prestbo y Gay. 2009

## CONCLUSIONES

- Se evaluó el aporte de Hg en el sitio 1 y probablemente se ve afectado por la densidad vehicular de la zona, así como los contaminantes transportados por la acción del viento del norte de la ciudad y en cierta medida por las cenizas provenientes del volcán Popocatepetl; mientras que el en sitio 2 se podría ver afectada por los contaminantes transportados de los parques industriales del estado de Puebla, las cenizas del volcán Popocatepetl y la quema de pastizales y matorrales.

- Se cuantificó la concentración de Hg en la zona urbana y rural, y probablemente se ven afectadas un poco por las emisiones de ceniza del volcán Popocatepetl.
- El sitio 1 presentó mayores concentraciones de Hg, esto debido probablemente a que este sitio tiene avenidas con grandes cargas vehicular diariamente, además de estar en una cuenca que impide la dispersión de contaminantes; mientras que el sitio 2 al no tener congestionamiento vehicular y no presentar brechas naturales los contaminantes se dispersan a zonas aledañas.
- Se cumplió la hipótesis propuesta, dado que se encontró concentraciones de Hg mayores en la fracción insoluble que la soluble motivado por el lavado atmosférico y la resuspensión de material particulado.
- El viento juega un papel importante en el transporte y dispersión de los contaminantes. En la zona urbana los contaminantes se desplazan al sur y por la topografía del lugar no permite que se dispersen y al llover se depositan en lugares cercanos a las fuentes de emisión; mientras que en la zona rural los vientos pueden transportar los contaminantes a grandes distancias de las fuentes de emisión, por lo que las concentraciones de Hg pueden aumentar.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Agency for toxic substances and disease registry (ATSDR); (1999) toxicological profile for mercury .US department of health and human services EUA.
- Ahrens, D. (2003). Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment, 293-319.
- Atwood, D. A. & Hutchison, A. R. (2003). Mercury pollution and remediation: the chemist's response to a global crisis. Journal of Chemical Crystallography, 33 (8), 631-645.

- Azimi, S., Ludwig, A., Thévenot, D.R. Colin, J.L (2003). Trace metal determination in total atmospheric deposition in rural and urban area. 247-256
- Baird, Colin. (2001). Environmental Chemistry. Second Edition. W.H Freeman and Company, 23.
- Bell, L. DiGangi, Weinberg, J. (2014) Introducción a la contaminación por mercurio y al convenio de minamata sobre mercurio para las ONG, 55-108.
- Benejam, P. (1996) Horizonte: Historia y Geografía, Volumen 1. Editorial Andrés Bello, 202-230.
- Boening, DW. (2000). Ecological effects. transport and fate of mercury: a general review. Chemosphere, 40, 1335-1351
- Caffrey, J. M., Landing, W. M., Nolek, S. D., Gosnell, K., Bagui, S. and Bagui. S. C. (2010): Atmospheric deposition of mercury and major ions to the Pensacola Bay (Florida) watershed: spatial. seasonal. and inter-annual variability". Atmospheric Chemistry and Physics ,10, 4593-4616
- Campbell, BG. (1999) Mercury, cadmium and arsenic: Toxicology and laboratory investigation, Pathology 31,17-22.
- Casas, C., Carmen y Alarcón, J. (1999). Meteorología y clima. Edicions UPC, 1-13.
- Castro, D. (2013). Evaluación de los suministros de mercurio primario y secundario en México. Comisión para la cooperación Ambiental,1-6
- Cereced, P., Larraín. H., Osses, P., Schemenauer, R.S., Farías M & M. Lagos (2002). Radiation. advective and orographic fog in the Tarapacá Region. Chile. Atmospheric Research. 64 (1-4), 261-271
- Cereceda, P., Schemenauer, R. S., & Velásquez. F. (1997). Variación temporal de la niebla en El Tofo-Chungungo. Región de Coquimbo. Chile, 1-6
- Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) (2011). Criterios para la validación de métodos fisicoquímicos,1-25.
- Cheng, J., Yuan, T., Wang, W., Jia, J., Lin, X., Qu, L., Ding, Z. (2006). Mercury pollution in two typical areas in Guizhou province. China and its

neurotoxic effects in the brains of rats fed with local polluted rice. *Environ Geochem Health* 28,499-507.

- Colín, A. & Jiménez, M. (2003) Principios básicos de contaminación ambiental. 1 edición. Universidad autónoma del estado de México, 61.
- Eley, BM. (1997) The future of dental amalgam: a review of the literature. Part 2: Mercury exposure in dental practice. *Br Dent J* 182(8),293-297.
- Environmental Protection Agency (2017). Mercury in your Environment.
- Erickson, P., Lin, V. (2015) Research highlights: elucidation of biogeochemical factors influencing methylmercury production. *Environment. Science. Processes Impacts*.17,1708-1711.
- Feng, X., Li, P., Qiu, G., Wang, S., Li, G., Shang, L., Meng, B., Jiang, H., Bai, W., Li, Z. (2007). Human exposure to methylmercury through rice intake in mercury mining areas. Guizhou Province. China. *Environment Science Technology* 42,326-332.
- Figueruelo, J y Dávila, M. (2004) Química física del ambiente y de los procesos medioambientales. Editorial Reverte, 537-540
- Fishman, Jack. (2003). Overview: Atmospheric Chemistry. En *Handbook of Weather. Climate and water*. Thomas D. Potter y Bradley R. Colman. Eds. John Wiley & Sons. Hoboken. NJ. EEUUA, 3-28.
- Gallowa, J. N. (2001): "Acidification of the world: Natural and Anthropogenic". *Water, Air, and Soil Pollution*. 130, 17–24.
- García, C. (1993) Mercurio en: *Medicina del Trabajo*. Editorial Masson 2ª Edición, 1-14.
- García, R., Pérez, R., Kotsarenko, A., Álvarez, H., Barrera, H., Carrillo-Chávez, A., Peralta, O., Campos, J., Torres, R., y Hernández, G. (2018). Concentrations of Mercury and Other Inorganic Ions in Wet Precipitation Collected from Mountain Mining Zone and an Urban Area in Central México. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* vol 101, 145-152.
- García, R y Martínez, I (2018). Title of Contribution: Mercury concentrations in Hair due to environment on two populations in México. *Sustainable*

Development Research and Practice in México and Selected Latin American Countries, 1-25

- García, G y Martínez, R. (2011). Geología y Geoquímica de las lavas pleistocénicas del estratovolcán Telapón, Sierra Nevada. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas volumen 28 N°2, México
- Gerald, J., Matthew, S., Landis, Gay A., Norris, Emily M., Christianson, and J. Timothy Dvonch. (2006). "Sources of Mercury wet deposition in eastern ohio. USA. Environment Science thenology, 40, 5874-5881.
- Gutierrez, M. (1997). Efectos Tóxicos del Mercurio. Revista de la Facultad de Medicina, Universidad Nacional de Colombia. Vol. 45 N°3 139-143
- Hemond, Harold F., Fechner-Levy, Elizabeth, J. (2000). The Atmosphere. En Chemical Fate and Transport in the Environment. Academic Press. 2a. Nueva York. EEUUA, cap 4.
- Hutchison, A.R., Atwood, D.A. (2003). Mercury pollution and remediation: the chemist's response to a global crisis. Journal Chemistry Crystal 33,631-645.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2016)
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Determinación de Mercurio en Orina. España
- Jacobson, M. (2002): Atmospheric Pollution: history. science. and regulation. 1st ed. Cambridge University Press, 399.
- Jan, A., Murtaza, I., Ali, A., Mohd, A.Q., Haq, R. (2009). Mercury pollution: an emerging problem and potential bacterial remediation strategies. World Journal Microbiololy Biotechnology 25,1529-1537.
- Kruse-Jarres, JD. Rukgauer, M. (2000) Trace elements in diabetes mellitus. peculiarities and clinical validity of determinations in blood cells. Journal Trace Elements Medical Biology 14,21-27
- Ladrón, G., Moya, Pueyo V. (1995) Mercurio y sus compuestos En Toxicología Médica. Ladrón de Guevara J. Moya Pueyo V. Editorial Interamericana de España-McGraw-Hill, 169-178.
- Ledesma, M (2011) principios de meteorología y climatología. Paraninfo. España, 130-136.

- Maderey, R., L. E. y Jiménez, R., A. (2005) Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. a) Publicado en la Página Web del Instituto de Geografía, UNAM. México, octubre. b) Editado en la Serie Textos Universitarios, Núm. 1. Geografía para el Siglo XXI, Instituto de Geografía, UNAM. ISBN 970-32-2812-7. México
- Manahan, E. S. (2007). Introducción a la Química Ambiental. Editorial Reverté UNAM, 230-250.
- Martínez, F. (2003). Meteorología aplicada a la navegación. Editorial Universitat Politècnica de Catalunya. 45-93
- Michalovic, M. (2003). News from Online: Ina Planet. Not a test Tube: Atmospheric Chemistry. Journal of Chemical Education, 80, 362. 364-365
- Morales, R. (2006). Contaminación atmosférica urbana: episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Editorial universitaria, 101
- Morel, F.M.M., Kraepie, A.M.L., Amyot, M., Annu. (1998) Review Ecology. evolution and Systematics, 29. 543.
- Morita, M., Yoshinaga, J., y Edmonds., J (1998) the determination of mercury species in environmental and biological samples. Pure & appl.chem. vol 70. No 8,1585-1615.
- Múgica, V., Amador, Ma., Torres, M., Figueroa. J.J.(2003). Mercurio y Metales tóxicos en cenizas provenientes de combustión e incineración. Revista internacional de contaminación ambiental,19 (2) 93-100
- Munth, J., (1992). Atmospheric Environment,26A. 1461.
- Novelli, P. (2003). Carbon monoxide in the atmosphere. En Handbook of Weather. Climate and Water. Chapter 5. Thomas D. Potter. Bradley R. Colman. Eds.. Wiley,79-88.
- Occupational Safety & Health Administration (OSHA). US Department of Labor. Analytical method ID-140 (1991) Mercury vapor in workplace atmospheres
- OMS. (1991). Inorganic Mercury. Environmental Health Criteria 118. Ginebra. Organización Mundial de la Salud.

- Patiño, P. (2011). Distribución y deposición de Hg total en agua de lluvia en la zona de san Joaquín. QRO. En el periodo de secas frías y secas calientes (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Peralta-Videa, J.R., Lopez. M.L., Narayan. M., Saupe, G., Gardea-Torresdey. J. (2009). The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain. *Int Journal Biochemical Cell Biology* 41,1665-1677
- Piédrola, Gil G y cols. (2001) Aditivos alimentarios en: Medicina Preventiva y Salud Pública. Ediciones Científicas y Técnicas SA. Barcelona. 10ª Edición.
- Pirrone, N., Mahaffey, K. R. (2005). Dynamics of mercury pollution on regional and global scales: atmospheric processes and human exposures around the world. Ed. Springer NY, 744
- PNUMA. 2008: Evaluación mundial sobre el mercurio. OMS. Ginebra.
- Prestbo, E. M., Gay, D. A., (2009): Wet deposition of mercury in the U.S. and Canada. 1996–2005: Results and analysis of the NADP mercury deposition network (MDN). *Atmospheric Environment* 43, 4223–4233.
- Qian, J., Zhang, L., Chen, H., Hou, M., Niu, Y., Xu, Z., Liu, H. (2009). Distribution of mercury pollution and its source in the soils and vegetables in Guilin Area. China. *Bull Environment Contamination Toxicology* 83,920-925.
- Rangel. M. (2017). Análisis de Mercurio en Aerosoles Atmosféricos de una Zona Urbana y una Semi-Rural. Ciudad de México.
- RECT(2013) : Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes.
- RUOA: Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- *Revista de Geografía Norte Grande* (2010) , 24, 103–111.
- Sakata, M., Marumoto, K (2005): Wet and dry deposition fluxes of mercury in Japan. *Atmospheric Environment*. 39: 3139 – 3146.
- Sanei, H., Outridge, P.M., Goodarzi, F., Wang, F. (2010) Wet deposition mercury fluxes in the Canadian sub-arctic and southern Alberta. measured

using an automated precipitation collector adapted to cold regions". Atmospheric environment. volume 44. issue 13, 1672-1681.

- Schaefer, J. K., Yagi, J., Reinfelder, J. R., Cardona, T., Ellickson, K. M., Tel-Or, S., Barkay, T. (2004) Role of the bacterial organomercury lyase (MerB) in controlling methylmercury accumulation in mercury-contaminated natural waters. Environment Science Technology, 38. 4304-4311
- Schuster, E. (1991) Water. Air and Soil Pollution, 56. 667. Sci. Total Environment 308. 247-254.
- Senior, C., Chen, Z y Sarofim, A. (2002) Proceedings of the air & waste management association`s annual conference & exhibition. 95<sup>th</sup>, 443-460
- Sipin, F., Guazzotti, A., Prather, K. (2003). Recent Advances and Some Remaining Challenges in Analytical Chemistry of the Atmosphere. Analytical Chemistry, 75. 2929-2940.
- Sociedad Española de Bioquímica Clínica y Patología Molecular. (1998), 559-570
- Takahashi, T (1976) Warm rain. giant nuclei and chemical balance in a numerical model. Atmospheric Science. 33, 269-286.
- Ullrich, S.M., Tanton, T.W., (2001) Abdrashitova. S.A. Mercury in the aquatic environment: a review of factors affecting methylation. Review Environment Science Technology, 31, 200. 241-293.
- UNEP/AMAP (2013) a. Global Mercury Assessment 2013: Sources. Emissions. Releases and Environmental Transport. UNEP Chemicals Branch. Geneva. Switzerland, 1-267.
- Venegas, L., Maezzeo, N. (2002) La velocidad del viento y la dispersión de contaminantes en la atmósfera. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina, 1-11
- Zapatero, MD., García de Jalón A. (1998) Mercurio en: Análisis de Elementos traza: aspectos bioquímicos. analíticos y clínicos. Cocho JA. Escanero JF. González de Buitrago JM, 1-201

**Anexo I Concentraciones de Hg, Observatorio Atmosférico UNAM**

Muestra	Pluviómetro (mm)	pH	Cond (µS/cm)	Concentración Insoluble Hg (µg/L)	Concentración Soluble Hg (µg/L)	Concentración total Hg (µg/L)
CU-1	9.40	5.45	38.70	12.37	6.88	19.25
CU-2	9.00	4.52	46.30	12.52	5.51	18.03
CU-3	10.60	4.25	59.30	12.32	7.34	19.66
CU-4	7.00	3.60	91.70	10.44	5.95	16.39
CU-5	11.00	4.77	42.20	10.26	5.58	15.84
CU-6	9.60	6.23	21.80	12.83	4.65	17.48
CU-7	9.00	4.84	15.10	8.75	8.94	17.69
CU-8	3.20	6.47	19.40	9.57	7.18	16.75
CU-9	16.40	3.91	50.10	9.59	6.78	16.37
CU-10	8.20	7.23	30.20	11.77	7.25	19.02
CU-11	16.00	7.14	31.60	9.76	2.17	11.93
CU-12	8.20	6.07	30.70	9.89	8.61	18.50
CU-13	8.40	6.21	32.90	9.38	7.86	17.24
CU-14	6.20	6.52	32.10	9.71	7.22	16.93
CU-15	10.20	7.78	30.70	9.09	6.08	15.17
CU-16	6.00	7.04	40.10	8.68	11.24	19.93
CU-17	23.60	4.70	41.30	5.88	13.03	18.91

## ANEXO I (continuación)

CU-18	3.20	7.13	39.80	9.73	15.22	24.95
CU-19	17.60	6.84	13.20	11.71	16.00	27.71
CU-20	3.60	8.69	17.10	9.49	15.20	24.69
CU-21	4.80	6.12	21.50	18.76	13.04	31.80
CU-22	16.00	6.92	14.20	16.14	2.55	18.70
CU-23	26.40	4.51	29.80	16.66	11.37	28.02
CU-24	22.80	4.22	41.40	16.00	13.20	29.21
CU-25	12.40	5.48	21.40	15.14	11.35	26.49
CU-26	2.80	4.92	32.50	17.72	13.41	31.14
CU-27	21.20	7.01	23.90	15.17	9.44	24.61
CU-28	3.20	6.61	37.00	17.56	13.46	31.02
CU-29	2.40	7.31	44.60	16.67	14.10	30.76
CU-30	16.80	4.82	45.90	14.71	12.81	27.52
CU-31	40.00	7.50	15.40	14.82	7.05	21.87
CU-32	1.20	7.18	30.80	17.19	10.45	27.64
CU-33	2.60	7.23	34.80	14.38	13.51	27.89
CU-34	3.80	7.10	21.70	14.44	12.27	26.71
CU-35	43.40	4.63	38.80	13.24	13.46	26.69
CU-36	2.80	6.92	35.90	15.80	10.47	26.27

ANEXO I (continuación)

CU-37	8.70	7.00	22.20	17.02	13.46	30.48
CU-38	7.00	3.90	70.10	14.56	9.59	24.15
CU-39	6.80	6.31	17.40	15.04	8.63	23.67
CU-40	4.40	6.71	35.50	18.59	8.26	26.86

**Anexo II Concentraciones de Hg, Observatorio Alzomoni**

Muestra	Pluviómetro (mm)	pH	Cond ( $\mu$ S/cm)	Concentración Insoluble Hg ( $\mu$ g/L)	Concentración Soluble Hg ( $\mu$ g/L)	Concentración total Hg ( $\mu$ g/L)
ALT-1	23.80	3.78	46	14.56	11.77	26.33
ALT-2	20.00	3.74	56.8	13.67	10.31	23.99
ALT-3	105.40	4.27	33.6	13.22	10.12	23.34
ALT-4	108.50	4.69	23.4	14.87	10.66	25.54
ALT-5	16.40	6.06	9.9	12.62	8.12	20.74
ALT-7	190.07	6.32	6.7	9.72	8.77	18.50
ALT-8	71.85	5.25	10.8	12.54	8.33	20.87
ALT-9	43.60	4.93	15.9	15.88	7.62	23.49
ALT-10	54.80	5.86	5.2	13.26	9.61	22.87
ALT-11	55.60	5.8	14.3	12.34	8.62	20.96

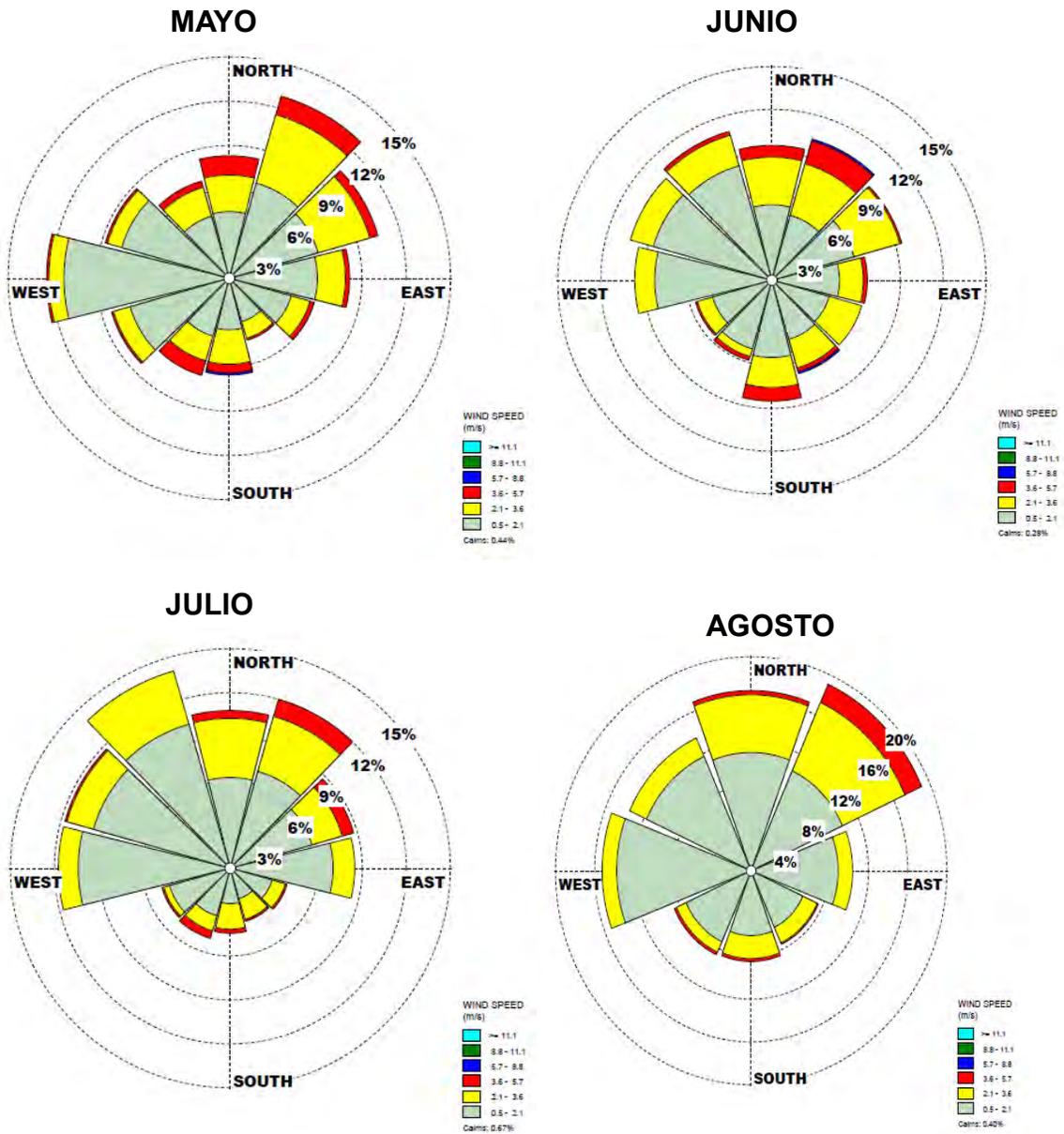
Anexo II (continuación)

ALT-12	55.60	5.8	14.3	12.34	8.62	20.96
ALT-13	25.60	4.24	28.1	12.81	8.80	21.60
ALT-14	22.40	6.01	7.4	12.24	8.93	21.17
ALT-15	22.40	6.01	7.4	12.24	8.93	21.17
ALT-16	25.48	5.51	24.5	13.52	8.08	21.61
ALT-17	12.85	5	20.5	14.84	9.18	24.03

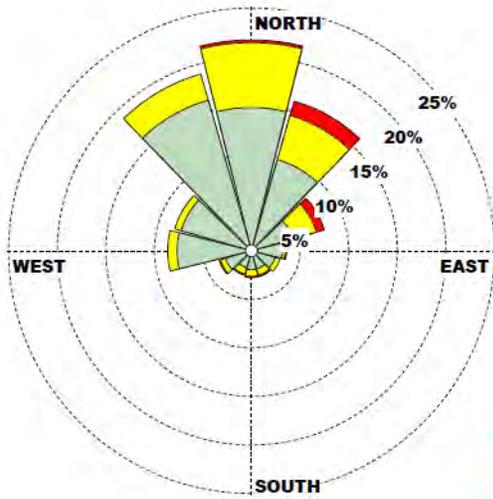
### Anexo III Meteorología

Se presentan las rosas de viento del Observatorio Atmosférico UNAM y Altzomoni. para el año 2016 de mayo a noviembre.

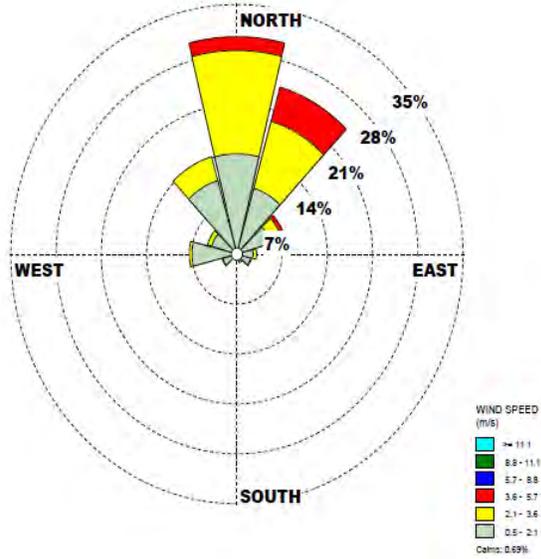
#### Observatorio Atmosférico UNAM



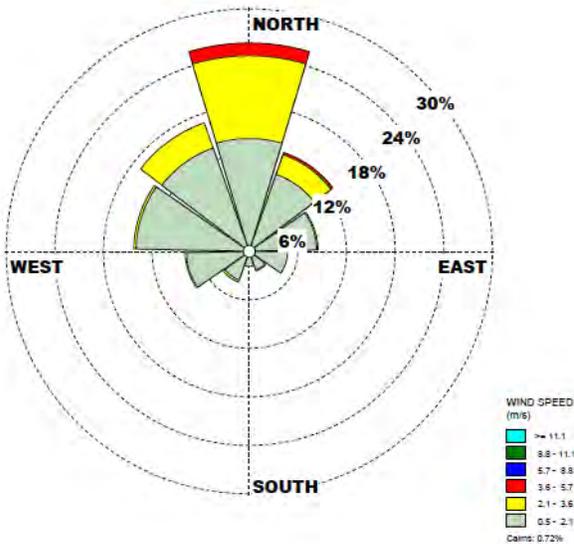
### SEPTIEMBRE



### OCTUBRE

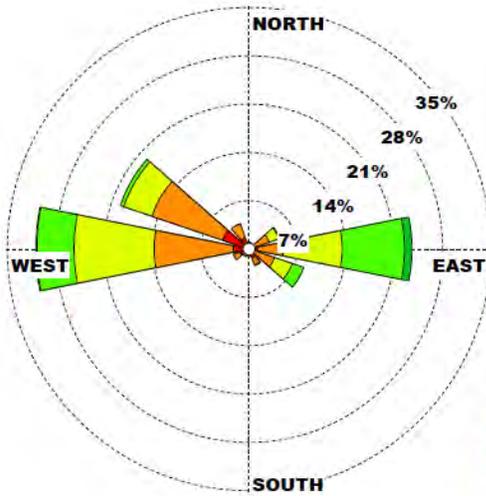


### NOVIEMBRE

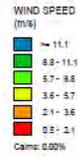
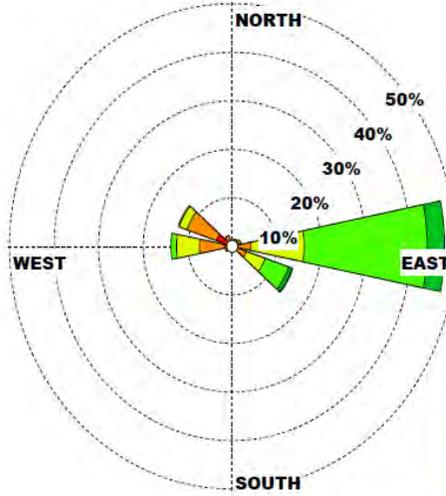


# Observatorio Atmosférico Altzomoni

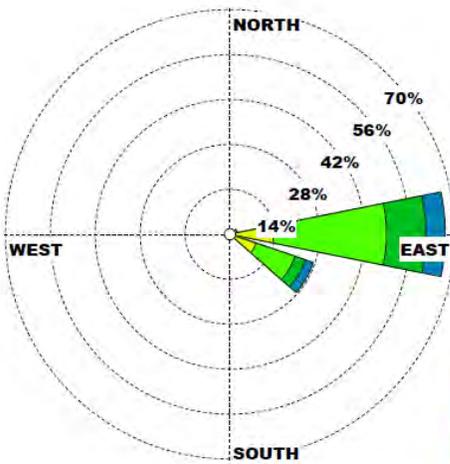
## MAYO



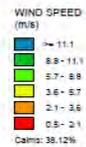
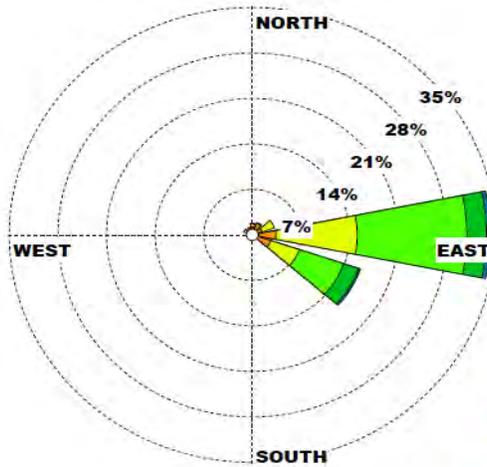
## JUNIO



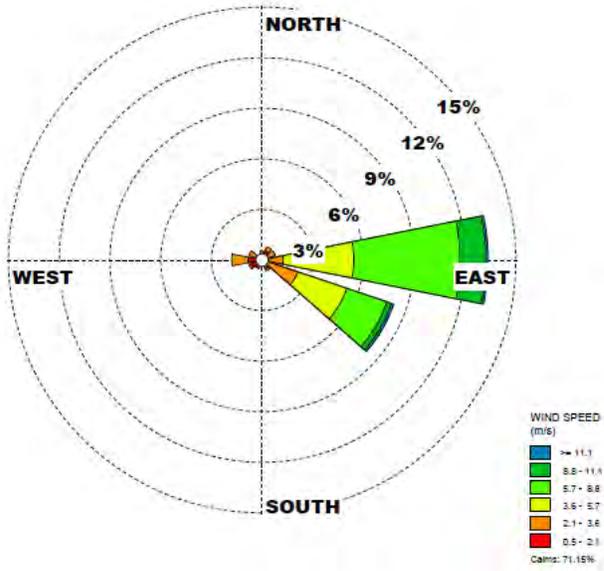
## JULIO



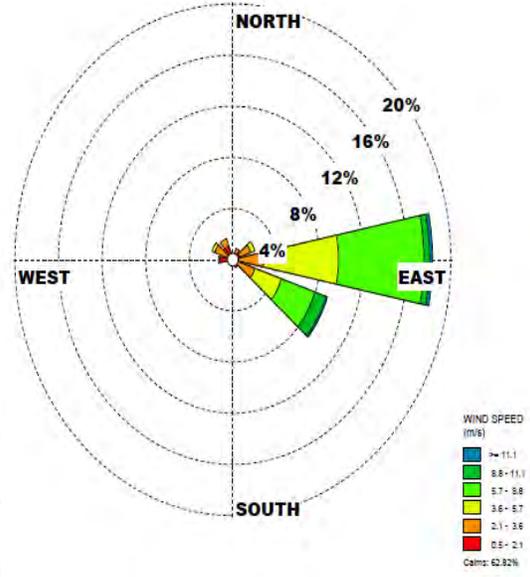
## AGOSTO



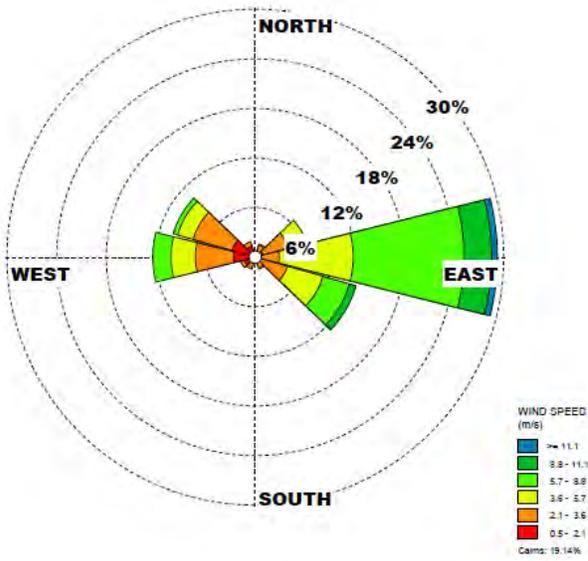
### SEPTIEMBRE



### OCTUBRE



### NOVIEMBRE



## Anexo IV

### Validación del Método Analítico

Realizado por (Rangel, 2017).

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Robustez	Las variables que causaron un efecto estadísticamente considerable fueron: marca del estándar y concentración del borohidruro de sodio.
Intervalo lineal	(2-12) µg/L
Intervalo de trabajo	(6-8) µg/L
Sensibilidad	(0.0089 ± 0.0002) µg/L
Límite de detección	(1.1 ± 0.16) µg/L
Límite de cuantificación	(3.6 ± 0.16) µg/L
Reproducibilidad	(4.08 ± 1.36) %
Repetibilidad	(0.19 ± 0.06) %