



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**  
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN  
CIENCIAS AGRICOLAS

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

**“APROVECHAMIENTO DE LA HUMEDAD ATMOSFÉRICA  
COMO FUENTE NO CONVENCIONAL DE AGUA PARA USO  
DOMÉSTICO”**

**ANA LAURA BAUTISTA OLIVAS**

**T E S I S**

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**DOCTORA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

**2013**

La presente tesis titulada: **Aprovechamiento de la humedad atmosférica como fuente no convencional de agua para consumo doméstico**, realizada por la alumna: Ana Laura Bautista Olivas, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobado por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTORA EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS**

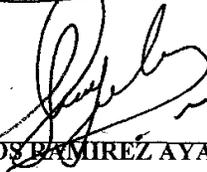
**CONSEJO PARTICULAR**



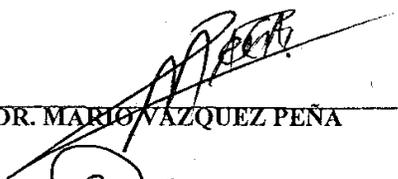
DR. JORGE LEONARDO TOVAR SALINAS



DR. HÉCTOR FLORES MAGDALENO



DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA



DR. MARIO VAZQUEZ PEÑA



DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

Montecillo, Texcoco, México, 2013

## **AGRADECIMIENTOS**

**“El agradecimiento es la memoria del corazón”**

**Anónimo**

A la vida que me ha permitido concluir este sueño.

Al Colegio de Postgraduados por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de Doctorado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado para realizar mis Estudios de Postgrado.

A la unidad de mantenimiento de equipo del Colegio de Postgraduados, Sr. Marcos Arévalo Godínez y Mario Vázquez García por la realización del prototipo con el cual se pudieron obtener las muestras de agua.

Al Dr. Jorge Leonardo Tovar Salinas, por su invaluable participación en el desarrollo de este trabajo de tesis, por su dedicación, por enseñarme con el ejemplo, por su disponibilidad a formarme como una profesionista y una persona de bien. No me cansaré de agradecerle todo lo que me ha otorgado como persona.

Al Dr. Héctor Flores Magdaleno, por su valiosa participación en la revisión de mi tesis, apoyo durante la elaboración de este proyecto.

Al Dr. Carlos Ayala Ramírez, por ser asesor de este trabajo de tesis.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez, por su valiosa participación en la revisión de mi tesis, apoyo durante la elaboración de este proyecto

Al Dr. Mario Alberto Vázquez Peña, por su valiosa participación en la revisión de mi tesis, apoyo durante la elaboración de este proyecto

### **A mi familia:**

**A Oscar Raúl Mancilla Villa**, por su apoyo.

**A mis amigos:** Jesús de Gabriel, José Porfirio Vega Guzmán, que aunque ya no estés, en mi sigues estando, Genaro Contreras, Gustavo Castaño, José Carlos Meneses, Francisco, Oscar Guevara.

**A mis amigas:** Lulú, Jazmín, Violeta, Luz.

Al personal de la Biblioteca del Colegio de Postgraduados. Sra. Anita, Lupita, Sr. Mario.

A todas aquellas personas que de manera directa e indirecta contribuyeron a la culminación de este trabajo de este trabajo y que en este momento no puedo recordar.

## CONTENIDO

Índice de Cuadros	vi
Índice de Figuras	vii
Resumen	viii
Summary	ix
INTRODUCCION GENERAL.....	1
1.Planteamiento del problema .....	2
2.Objetivos .....	3
3.Hipótesis.....	4
4.Revisión de Literatura .....	4
4.1 El agua.....	4
4.1.1Consideraciones importantes del agua .....	5
4.1.2 Cambios de fase del agua .....	5
4.1.3.Diagrama de fase.....	7
4.2 Condiciones para que exista la condensación del agua atmosferica .....	9
4.3Calidad del agua .....	17
4.3.2 Características bacteriológicas, físicas, químicas y radiológicas del agua potable. ....	18
5. Materiales y Métodos .....	26
6. Literatura Citada.....	28
CAPITULO I. MODELO PARA PREDECIR EL VOLUMEN DE AGUA QUE SE PUEDE OBTENER APARTIR DE LA CONDENSACIÓN DE LA HUMEDAD ATMOSFÉRICA .....	32
1.1. Introducción .....	33
1.2. Área de estudio.....	34
1.3. Materiales y Métodos.....	34
1.4. Resultados y Discusión .....	38
1.5. Conclusiones .....	41
1.6. Literatura citada.....	42
CAPITULO II. CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA OBTENIDA POR CONDENSACIÓN DE LA ATMÓSFERA EN TLAXCALA, HIDALGO Y CIUDAD DE MÉXICO .....	43
2.1 Introducción .....	44
2.2 Materiales y métodos .....	45
2.3 Resultados y discusión .....	48
2.4 Conclusiones .....	55

2.5	Literatura Citada.....	56
CAPITULO III. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA CONDENSADA DE LA ATMÓSFERA EN SAN FELIPE HIDALGO, TLAXCALA, HUICHAPAN, HIDALGOY CIUDAD DE MÉXICO, D.F.....		
3.1	Introducción .....	59
3.2	Materiales y métodos .....	60
3.3	Resultados y discusión .....	61
3.4	Conclusiones .....	68
3.5	Literatura citada.....	69
CONCLUSIONES GENERALES .....		71

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Límites permisibles de características microbiológicas .....	19
Cuadro 2. Límites permisibles de características físicas y organolépticas .....	21
Cuadro 3. Límites permisibles de características químicas .....	23
Cuadro 4. Límites permisibles de características radiológicas .....	24
Cuadro 5. Tipos de tratamiento para el consumo humano de agua .....	25
Cuadro 1.1. Modelos que predicen el volumen de agua que se puede obtener con el prototipo en la Ciudad de México, con tres niveles de frío. ....	39
Cuadro 1.2. Índices para la validación de los modelos matemáticos obtenidos .....	41
Cuadro 2.1. Promedio de la humedad relativa y temperatura (8:00 a 20.00 h) de la época de lluvias en los tres sitios de estudio. ....	49
Cuadro 2.2. Promedio de la humedad relativa y temperatura (20:30 a 7:00 h) de la época de lluvias en los tres sitios de estudio. ....	49
Cuadro 2.3. Promedio de la humedad relativa y temperatura (8:00 a 20.00 h) de la época de secas en los tres sitios de estudio. ....	50
Cuadro 2.4. Promedio de la humedad relativa y temperatura (20:30 a 7:00 h) de la época de secas en los tres sitios de estudio. ....	50
Cuadro 2.5. Clasificación de los coliformes totales en las fuentes de agua. ....	53
Cuadro 2.6. Diferencias significativas de coliformes totales y e. Coli entre cada muestreo. ....	54
Cuadro 3.1. pH de las muestras de agua atmosférica en época de lluvias y secas considerando el turno diurno y nocturno. ....	62
Cuadro 3.2. Diferencias significativas de la CE en las muestras de agua atmosférica en época de lluvias y secas considerando el turno diurno y nocturno. ....	63
Cuadro 3.3. Promedio de cationes y aniones de 9 muestras por época del año, en Tlaxcala, Hidalgo y la ciudad de México. ....	67
Cuadro 3.4. Concentración de metales pesados en el agua atmosférica condensada en Tlaxcala, Hidalgo y la ciudad de México. ....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Formación de una molécula del agua .....	5
Figura 2. Los diferentes cambios de fase por lo que una sustancia puede pasar .....	6
Figura 3. Diagrama de fases del agua. ....	8
Figura 4. Evaporación del agua y saturación de humedad a diferentes temperaturas y presiones .....	16
Figura 5. Prototipo Higroiman CP HID-04.....	26
Figura 6. Curva de cambio de estados del agua, desde la fase sólida a la fase gaseosa de una sustancia, pasando por la fase líquida .....	28
Figura 1.1. Volumen de agua obtenido con el modelo matemático contra el volumen observado en campo con el nivel 1 del higroimán.....	39
Figura 1.2. Volumen de agua obtenido con el modelo matemático contra el volumen observado en campo con el nivel 3 del higroimán.....	40
Figura 1.3. Volumen de agua obtenido con el modelo matemático contra el volumen observado en campo con el nivel 7 del higroimán.....	40
Figura. 2.1. Localización de la zona de estudio.....	46
Figura. 2.2. Prototipo del higroimán CP-HI-04.....	47
Figura. 2.4. Presencia de Coliformes totales (izquierda) y E. coli (derecha) en los dos muestreos de agua atmosférica condensada en San Felipe Hidalgo, Tlaxcala en muestras de 100 mL.....	52
Figura. 2.5. Presencia de Coliformes totales (izquierda) y de E. coli (derecha) en los dos muestreos de agua atmosférica condensada en Huichapan, Hidalgo en muestras de 100 mL.....	52
Figura. 2.6. Presencia de Coliformes totales (izquierda) y de E. coli (derecha) en los dos muestreos de agua atmosférica condensada en la Ciudad de México en muestras de 100 mL.....	52
Figura 3.2. CE de los tres sitios de estudios en las muestras de agua atmosférica en época de lluvia (Arriba) época de secas (Abajo).....	64
Figura 3.3. pH de los tres sitios de estudios en las muestras de agua atmosférica en época de lluvia (arriba) época de secas (abajo).....	66

## RESUMEN

### APROVECHAMIENTO DE LA HUMEDAD ATMOSFÉRICA COMO FUENTE NO CONVENCIONAL DE AGUA PARA USO DOMÉSTICO

Ana Laura Bautista Olivas, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2013

En esta investigación se plantearon tres objetivos generales los cuales fueron: 1) Proponer un modelo matemático para predecir la cantidad de agua atmosférica que se puede obtener con el prototipo CP-HID-04 en la Ciudad de México considerando la humedad relativa del ambiente y temperatura ambiental; estos modelos se validaron calculando los siguientes índices: MBE (error medio), RMBE (raíz cuadrada del error cuadrático, D (Índice de acuerdo),  $R^2$  (coeficiente de determinación). 2) Cuantificar la cantidad de coliformes totales y fecales encontradas en muestras de agua atmosférica obtenidos en tres sitios de estudio: San Felipe Hidalgo, Tlaxcala; Huichapan, Hidalgo y en la Ciudad de México. 3) Evaluar la calidad del agua obtenida de la atmósfera, determinando los siguientes metales pesados (Al, As, Ba, Cu, Cd, Cr, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn) así como pH y CE, aniones (Cl,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ) y cationes (Na, K, Ca y Mg) en el agua condensada de los tres sitios de estudio anteriormente mencionados. La toma de datos se realizó en dos épocas del año (agosto-septiembre, 2011) y (Diciembre-enero 2011-2012) las muestras de agua atmosférica se obtuvieron por condensación con el prototipo CP-HID-04. Los resultados más sobresalientes de este estudio indican que los modelos predicen en forma aceptable el volumen de agua que se condensa con el higroimán. En general la cantidad de Coliformes totales y fecales encontrados en el agua atmosférica en los tres sitios de estudio muestran cantidades superiores a las autorizadas por la OMS, por lo que es indispensable desinfectar el agua condensada de la atmósfera. La composición química del agua atmosférica en cuanto a la concentración de metales pesados en los tres sitios de estudio presentó valores por debajo de los límites permisibles, con excepción de la concentración del Fe que en algunas las muestras de agua superó el límite permisible.

**Palabras clave:** agua atmosférica, Modelo matemático, Calidad de agua, coliformes fecales, metales pesados.

## SUMMARY

### ATMOSPHERIC MOISTURE UTILIZATION AS A SOURCE OF WATER FOR UNCONVENTIONAL DOMESTIC

Ana Laura Bautista Olivas, P.H.

Colegio de Postgraduados, 2013

In this research, raised three general objectives which were: 1) to propose a mathematical model to predict the amount of atmospheric water that can be obtained with the prototype CP-HID-04 in Mexico City considering the relative humidity and temperature environment, these models were validated by calculating the following indices: MBE (average error), RMBE (root mean square error, D (agreement index),  $R^2$  (coefficient of determination). 2) To quantify the amount of total and fecal coliforms found in atmospheric water samples obtained in three study sites: San Felipe Hidalgo, Tlaxcala, Huichapan, Hidalgo and Mexico City. 3) Evaluate the quality of the water obtained from the atmosphere, determining the following heavy metals (Al, As, Ba, Cu, Cd, Cr, Fe, Hg, Mn, Pb and Zn) and pH and EC, anions ( $\text{Cl}$ ,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ) and cations (Na, K, Ca and Mg) in the condensation of the three study sites mentioned above. Data collection was conducted in two seasons (August-September 2011) and (December-January 2011-2012) atmospheric water samples were obtained by condensation with the prototype CP-HID-04. The main results of this study indicate that as acceptable models predict the volume of water which is condensed with the higroimán. In general the amount of total and fecal coliforms found in atmospheric water in the three study sites show higher amounts authorized by the WHO, so it is essential to disinfect the water condensed from the atmosphere. The chemical composition of atmospheric water in terms of the concentration of heavy metals in the three study sites showed values below the permissible limits, except for the Fe concentration in some water samples exceeded the allowable limit.

**Palabras clave:** atmospheric water, Mathematical model, water quality, fecal coliform, heavy metals.

## **INTRODUCCION GENERAL**

La humanidad obtiene la mayor cantidad de agua de los ríos, pero casi todos se encuentran con algún grado de contaminación. El agua de mar desalinizada es una fuente potencial, aunque el costo del proceso es diez veces mayor (Monografias, 2010).

La crisis mundial del agua cobrará en los próximos años proporciones sin precedentes y aumentará la creciente penuria por falta de agua para las personas que habitan en muchos países subdesarrollados, como es el caso de algunas zonas de México. Los recursos hídricos disminuirán continuamente a causa del crecimiento de la población, de la contaminación y del cambio climático, si no se toman medidas preventivas (Agua, 2010)

De todas las crisis sociales y naturales que debemos afrontar los seres humanos, la de los recursos hídricos es la que más afecta a nuestra propia supervivencia y a la del planeta.

Ninguna región del mundo podrá evitar las repercusiones de esta crisis que afecta a todos los aspectos de vida, desde la salud de los niños hasta la alimentación de los seres humanos. Los abastecimientos de agua disminuyen, mientras que la demanda crece a un ritmo pasmoso e insostenible. Se prevé que en los próximos veinte años el promedio mundial de abastecimiento de agua por habitante disminuirá en un tercio (Subirons, 2013).

La falta de conciencia sobre la magnitud del problema, la indiferencia de los dirigentes y las actitudes y conductas inapropiadas explican el deterioro progresivo de la situación y la razón de por qué no se adoptan las medidas que se necesitan. (Monografias, 2010).

A mediados del presente siglo millones de personas sufrirán de escasez de agua en todo el mundo. Se calcula que 20% del incremento de la escasez mundial de agua obedecerá al cambio climático. En las zonas húmedas es probable que las precipitaciones aumenten, mientras que en muchas zonas propensas a la sequía, e incluso en algunas regiones tropicales y subtropicales, disminuirán y serán más irregulares. La calidad del agua empeorará con la elevación de su temperatura y el aumento de los índices de contaminación (Proyectopv, 2012).

Otros problemas que se plantean son los de la calidad y la adecuada administración del agua. En el mundo más de 2.2 millones de personas mueren cada año debido a enfermedades causadas por el agua potable contaminada y un saneamiento deficiente. Una gran proporción de esas muertes se debe a las enfermedades ocasionadas por el agua.

Actualmente la industria utiliza 22% del agua consumida en el mundo. En los países ricos ese porcentaje asciende a 59%, mientras que en los países pobres sólo llega a 8%. En el año 2025 esa proporción alcanzará 24%. Se calcula que para ese entonces se gastarán 1 170 km<sup>3</sup> de agua anuales para usos industriales CONAGUA, (2005).

Cuando faltan las infraestructuras y los servicios, las áreas urbanas que carecen de instalaciones para el suministro y el saneamiento de aguas constituyen uno de los entornos más peligrosos para la vida humana. Por otro lado, a medida que la demanda de agua aumenta, proliferan también los rumores sobre las guerras que pueden avecinarse debido a la falta de los recursos hídricos (Proyectopv, 2012) .

En México se presenta una distribución natural del agua en forma desigual, mientras que el sureste presenta precipitaciones mayores a 1000 mm de lluvia, en el norte del territorio nacional se presentan zonas desérticas de apenas 100 mm. La escasez de agua en las zonas áridas de México, representa un problema grave y un reto para satisfacer las necesidades hídricas de la población y sus actividades productivas (CONAGUA, 2005).

En el presente trabajo se plantea una opción para hacer frente a la problemática descrita. Mediante el uso y calibración del higroimán que atrae la humedad atmosférica y la condensa, siendo una opción más para mitigar este grave problema.

## **1. Planteamiento del problema**

En la actualidad principalmente debido al crecimiento demográfico y fuentes de agua contaminadas, la cantidad y calidad del agua se ha convertido en un tema central y de gran importancia a nivel mundial.

Las estadísticas indican que 20 % de la población mundial no tiene acceso de agua de calidad y 50% carece de saneamiento (WHO, 2012). Por lo que los habitantes de esos lugares tienen que recorrer kilómetros para conseguir el vital líquido, otros esperan ser abastecidos por camiones cisterna una vez por semana.

Evenari *et. al.* (1977) reportan que los habitantes en el Desierto del Negev desde la primera mitad de la Edad de Bronce (2100 a 1900 A.C.) utilizaban el agua de la atmosfera para satisfacer diversas necesidades.

En México, los trabajos de investigación sobre la captación de agua atmosférica son escasos. Bautista-Olivas *et. al.* 2011 propone un prototipo que obtiene agua del aire. En tanto, que uno de los países que más reportan trabajos es Chile. Por lo anterior, se plantearon los siguientes objetivos.

## **2. Objetivos**

- ◆ Proponer un modelo matemático para predecir la cantidad de agua atmosférica que se puede obtener con el prototipo CP-HID-04 en la Ciudad de México considerando la humedad relativa del ambiente y temperatura ambiental.
  
- ◆ Cuantificar la cantidad de coliformes totales y fecales encontradas en muestras de agua atmosférica obtenidos en tres sitios de estudio: San Felipe Hidalgo, Tlaxcala; Huichapan, Hidalgo y en la Ciudad de México.
  
- ◆ Evaluar la calidad del agua obtenida de la atmósfera, determinando los siguientes metales pesados (Al, As, Ba, Cu, Cd, Cr, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn) así como pH y CE, aniones (Cl, CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>) y cationes (Na, K, Ca y Mg) en el agua condensada de los tres sitios de estudio anteriormente mencionados.

### 3. Hipótesis

◆Las condiciones de humedad relativa y temperatura ambiental que genera el higroimán CP-HID-04 en un ambiente controlado influye en la cantidad de agua que se obtiene de la atmósfera dependiendo de la humedad relativa y ambiental de un sitio.

◆La calidad del agua condensada de la atmósfera cumple con los límites permisibles bacteriológicos y químicos que establece la OMS.

### 4. Revisión de Literatura

A continuación se desarrolla el fundamento teórico necesario para sustentar los tres artículos que se encuentran en este trabajo de tesis.

Debido a que el agua es el tema prevaleciente en todo este trabajo de investigación, en la primera parte de esta revisión se explican los conceptos básicos del agua los cuales son esenciales para entender la importancia del agua y su función en la naturaleza. La segunda parte de la revisión incluye fundamentos indispensables para comprender la función que tiene el Higroiman CP-HID-04 en la condensación de la humedad atmosférica.

La tercera parte de revisión explica la calidad del agua para consumo humano, lo cual está relacionado con algunos fundamentos teóricos importantes para el artículo calidad microbiológica del agua obtenida por condensación de la atmósfera en Tlaxcala, Hidalgo y Ciudad de México.

#### 4.1 El agua

El agua es la sustancia líquida más común sobre la superficie de la tierra, cubriéndola en dos tercios. En agua en forma de vapor, está siempre presente en la atmósfera, aún en los climas más secos(Luna y Kenneth, 1977).

La molécula del agua está constituida por la combinación de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H<sub>2</sub>O), llamada **punto de hidrógeno**, forma una molécula resistente a la separación. Sin embargo, la unión de estos átomos es fácil. La razón se debe a que el átomo

de hidrogeno tiene un solo electrón alrededor de su núcleo, aunque tiene espacio para dos electrones en su última capa. Y la capa exterior del átomo de oxígeno, con una capacidad para ocho electrones, no contiene sino seis (Luna y Kenneth, 1977). (**Figura 1**).

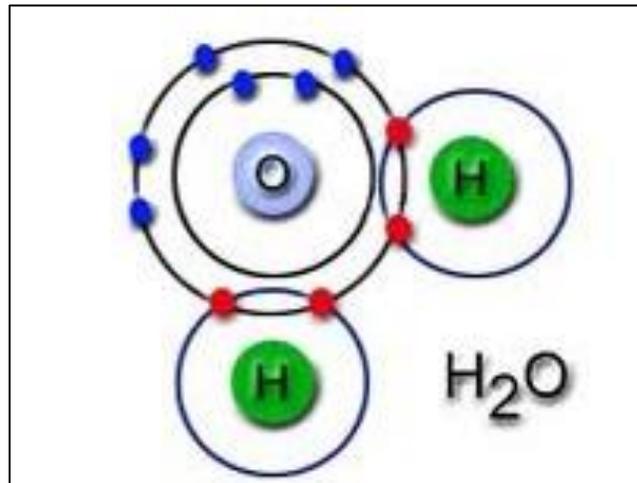


Figura 1. Formación de una molécula del agua (Chang, 2007).

#### **4.1.1 Consideraciones importantes del agua**

El **enlace covalente** es la base de otras características del agua el gran poder solvente. Esta cualidad se debe a la forma de la molécula. Cuando dos átomos de hidrogeno se unen a uno de oxigeno, la unión produce una molécula de forma irregular, pues los átomos de hidrogeno quedan a los lados del átomo de oxigeno y en un ángulo de  $104.5^\circ$  uno de otro (Chang, 2007).

La molécula de agua por su efecto bipolar anula parcialmente la atracción eléctrica entre los iones, de un compuesto. Este debilitamiento permite que se los iones se separen y el agua rodee los iones por separado, es decir disueltos. Por tal razón, el agua se considera un solvente universal, siendo difícil de encontrarla en estado puro (Luna y Kenneth, 1977).

#### **4.1.2 Cambios de fase del agua**

El comprender los cambios de los estados físicos del agua (gas-líquido) resulta indispensable para entender parte del funcionamiento del higrómano al atraer las moléculas de agua dispersas en la atmósfera y cambiar de un estado gaseoso a un estado líquido.

En general, en el agua se pueden distinguir tres estados físicos del agua, que son líquido, sólido y gaseoso. (Figura 2), los cuales se distinguen entre ellos porque cambia el orden molecular, en la fase sólida las moléculas alcanzan el máximo ordenamiento, y en la fase gaseosa tiene el mayor desorden. Para el caso de los cambios de estado sólido, líquido y gaseoso, la temperatura a la que ocurre el cambio depende de la presión a que esté sometida el agua (Chang, 2007).

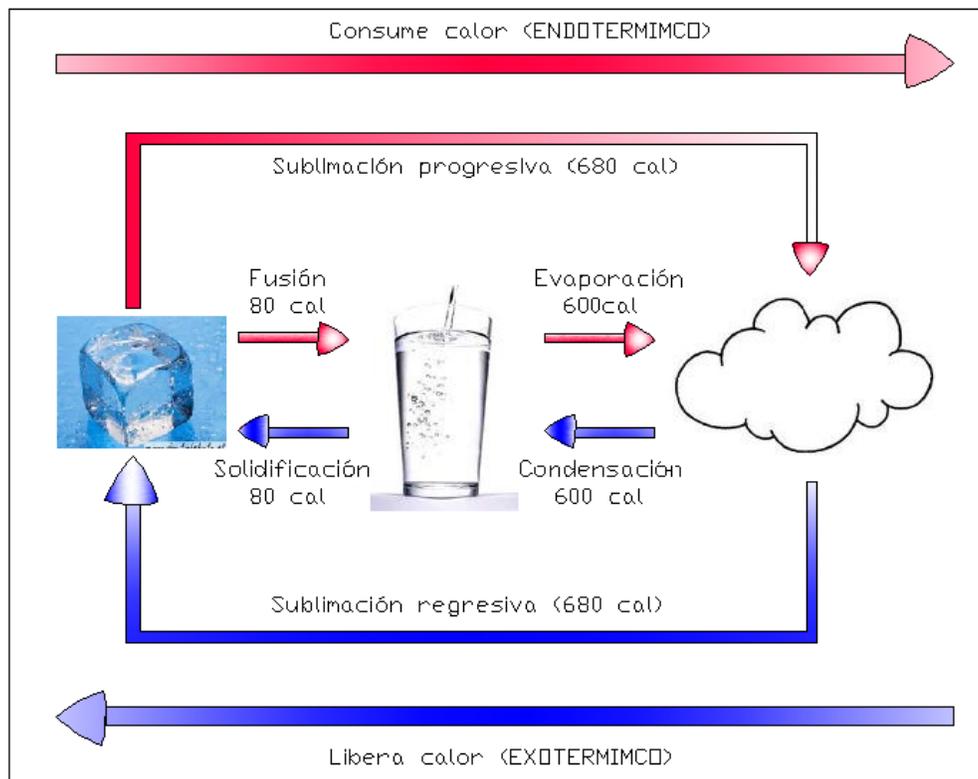


Figura 2. Los diferentes cambios de fase por lo que una sustancia puede pasar (Arteaga, 1993).

Una atmósfera que está en equilibrio con agua libre y pura se considera que está saturada con vapor de agua y la presión parcial del vapor en esa atmósfera es llamada “Presión de vapor de saturación” (equilibrio). La presión de vapor de equilibrio con cualquier cuerpo de agua depende de la condición física del agua (presión y temperatura) y su condición química pero no depende de la cantidad absoluta o relativa de líquido o gas en el sistema.

La presión de vapor de saturación aumenta con el incremento de temperatura. A medida que la energía cinética de las moléculas en el líquido aumenta, la tasa de evaporación aumenta y se requiere una mayor concentración de vapor en la atmósfera para la tasa de retorno al líquido para igualar la tasa de escape del mismo (Hillel, 1971).

Cuando un líquido se evapora, sus moléculas ejercen una presión de vapor, en cuanto unas moléculas dejan el líquido, se establece la fase de vapor.

El proceso de condensación, o el cambio de la fase gaseosa a la fase líquida ocurre cuando una molécula choca en la superficie del líquido y queda atrapada por las fuerzas intermoleculares del líquido (Monografía, 2011).

El punto de condensación es cuando un gas se puede licuar por cualquiera de las dos técnicas siguientes. Al enfriar una muestra de gas disminuye la energía cinética de sus moléculas, por lo que éstas se agregan y forman pequeñas gotas de líquido. De manera alternativa se puede aplicar presión al gas. La compresión reduce la distancia promedio entre las moléculas de tal forma que se mantienen unidas por atracción mutua.

#### **4.1.3. Diagrama de fase**

La Figura 3 se presenta el diagrama de fases del agua y se divide en tres regiones, representando una fase pura. La línea que separa a cualquiera de las dos regiones indica las condiciones en las que estas dos fases pueden estar en equilibrio. Por ejemplo, la curva trazada entre las fases líquida y de vapor muestra la variación de la presión de vapor con la temperatura. Del mismo modo, las otras dos curvas indican las condiciones para que se establezca un equilibrio entre el hielo y el agua líquida, y entre el hielo y el vapor de agua. El punto en el que se unen las tres curvas se denomina punto triple, y corresponde a la única condición en la que las tres fases pueden estar en equilibrio recíproco. Para el agua, este punto está a  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $0.006\text{ atm}$  (Chang R. 2007).

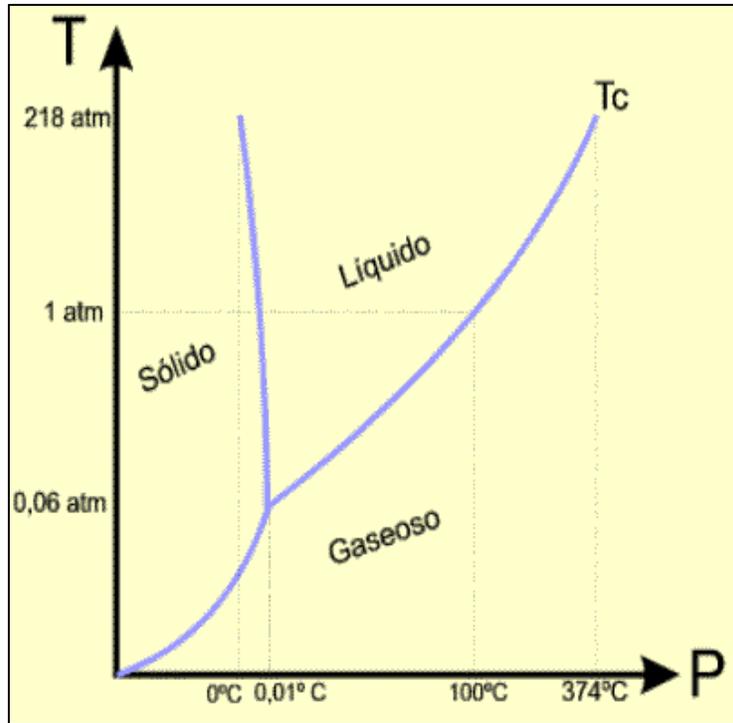


Figura 3. Diagrama de fases del agua. (Wikipedia, 2013)

En ese momento, es posible cambiar el estado de toda la sustancia a hielo, agua o vapor arbitrariamente haciendo pequeños cambios en la presión y la temperatura. Se debe tener en cuenta que incluso si la presión total de un sistema está por encima de 611.73 pascales (es decir, un sistema con una presión atmosférica normal), si la presión parcial del vapor de agua es 611.73 pascales, entonces el sistema puede encontrarse aún en el punto triple del agua. Estrictamente hablando, las superficies que separan las distintas fases también deben ser perfectamente planas, para evitar los efectos de las tensiones de superficie.

A altas temperaturas, incrementando la presión, primero se obtiene agua líquida y, a continuación, agua sólida. Por encima de 109 Pa aproximadamente se obtiene una forma cristalina de hielo que es más denso que el agua líquida. A temperaturas más bajas en virtud de la compresión, el estado líquido deja de aparecer, y el agua pasa directamente de sólido a gas.

A presiones constantes por encima del punto triple, calentar hielo hace que se pase de sólido a líquido y de éste a gas, o vapor. A presiones por debajo del punto triple, como las encontradas en el espacio exterior, donde la presión es cercana a cero, el agua líquida no puede existir (Chang R. 2007).

#### **4.2 Condiciones para que exista la condensación del agua atmosférica**

Para que el vapor de agua se condense, se requieren las siguientes condiciones:

\*El aire debe tener una humedad relativa cercana al 100%

\* Es necesario que se produzca un enfriamiento o que el aire saturado reciba, sin cambiar de temperatura, una aportación mayor de vapor de agua. Entre más caliente sea el aire, mayor cantidad de vapor de agua contendrá y al enfriarse hasta alcanzar el punto de rocío, el aire no podrá mantener todo el vapor de agua, una parte de éste se condensa en pequeñas gotas formando las nubes, la bruma o la niebla.

\*Es indispensable la presencia de una superficie sólida, sobre la cual se condense o sublime el vapor de agua (Arteaga, 1993)

La condensación se produce con mucha mayor dificultad en el aire “limpio”; la humedad, por regla general, debe encontrar una superficie adecuada sobre la que poder condensarse. Si se hace descender la temperatura del aire puro por debajo del punto de rocío, se “sobresatura” (es decir, su humedad relativa se hace superior al 100% (Barry, R. y Chorley, R. 1999).

La condensación tiene lugar generalmente sobre una superficie, que puede ser una porción de tierra o una planta, como ocurre en el caso del rocío o de la escarcha, mientras que en el aire libre la condensación empieza alrededor de los llamados “núcleos higroscópicos”. Estas partículas pueden ser de polvo, humo anhídrido sulfuroso, sales (Cl Na) o sustancias microscópicas similares, cuyas superficies tienen la propiedad de ser higroscópicas. Las sales marinas, que son particularmente higroscópicas, penetran en la atmósfera principalmente cuando explotan las burbujas de aire de la espuma, pero también son fuentes de núcleos igualmente importantes las finas partículas de tierra y los productos de la

combustión química levantados por el viento. Por otro lado, el aire oceánico contiene un millón de núcleos de condensación por litro ( $\text{mil cm}^3$ ) y el aire continental unos cinco o seis millones (Barry, R. y Chorley, R. 1999).

La concentración de los núcleos de condensación depende fundamentalmente de la localización geográfica y de la altitud. Así, en áreas muy pobladas y con elevados índices de contaminación, su concentración es muy alta, mientras que sobre los océanos o en las áreas rurales, su concentración es menor. También se ha observado que la presencia de núcleos de condensación disminuye con la altitud tanto más rápidamente cuanto mayor sea su tamaño (Ecofriend, 2011).

Una vez iniciada la formación de las gotitas de agua, el proceso de su crecimiento dista mucho de ser sencillo y aun no se explica con claridad. En las primeras fases, las gotas pequeñas crecen mucho más rápidamente que las mayores, pero a medida que aumenta el tamaño de una gotita, disminuye su velocidad de crecimiento por condensación. La velocidad de crecimiento radial disminuye a medida que aumenta el tamaño de la gota, ya que a cada incremento del radio la superficie es cada vez mayor. Sin embargo, la velocidad de condensación está limitada por la rapidez con la que la gota puede perder el calor latente que se va desprendiendo, pasando al aire por conducción y reduciendo el gradiente de vapor. Además, la competencia entre las gotas para apoderarse la humedad existente tiende cada vez más a reducir el grado de sobresaturación

En la atmósfera existen muchos tipos de núcleos de condensación; algunos de ellos se humedecen a humedades inferiores al 100%. Los núcleos que alcanzan tamaños relativamente grandes son los que pueden dar lugar a gotas de nube. El aire húmedo al enfriarse por ascenso adiabático, es decir que al ascender no intercambia calor con su entorno, llega a alcanzar una humedad relativa cercana al 100%; en estas condiciones los núcleos más higroscópicos empiezan a actuar de núcleos de condensación (Atmosphere, 2011).

En general los aspectos generales de la formación de nubes son:

Los cambios de fase del agua juegan un papel primordial en la microfísica de la nube.

Los posibles cambios son los siguientes:

Vapor «---» Líquido (condensación, evaporación)

Líquido «---» Sólido (congelamiento, fusión)

Vapor «---» Sólido (condensación, sublimación)

Los cambios de izquierda a derecha son de importancia meteorológica: son los cambios que tienen lugar en orden molecular creciente y que conducen a la formación de la nube. Uno de los problemas de la física de las nubes es que estos cambios tienen lugar en equilibrio termodinámico. Estas transiciones han de superar una "barrera de energía libre" que las dificulta, las gotitas de agua poseen unas intensas fuerzas de tensión superficial que, para aumentar de tamaño por condensación, tienen que ser contrarrestadas por un fuerte gradiente de presión de vapor.

En estas condiciones las gotitas de nube necesitan para formarse humedades relativas de 100%. Así, el problema de la microfísica de nubes es explicar porque se forman las gotas de nubes en la atmósfera real incluso a humedades menores al 100%. La respuesta está basada en la existencia en la atmósfera de partículas de tamaño micrométrico que tienen gran afinidad por el agua y actúan como núcleos de condensación, es lo que recibe el nombre de nucleación heterogénea (la homogénea sería en una atmósfera limpia, pero necesita saturaciones extremas (Atmosphere, 2011).

#### **4.2.1 Formación de gotas de agua de lluvia**

El crecimiento de las gotitas de nube es, por sí solo, un mecanismo insuficiente, por lo que hay que contar con la posibilidad de que intervengan procesos más complicados. Existen varias teorías para explicar este fenómeno, se ha propuesto que las gotitas con distinta carga

eléctrica podían unirse. Sin embargo, posteriormente se explicó que las distancias entre las gotas son demasiado grandes y que la diferencia entre las cargas es demasiado pequeña para que suceda esto. También se sugirió que las gotas grandes podían crecer a expensas de las más pequeñas, pero las observaciones realizadas muestran que la distribución del tamaño de las gotitas en una nube tiende a ser más o menos uniforme, siendo el tamaño medio de los radios de unas 10  $\mu\text{m}$  a 15  $\mu\text{m}$  (Barry, R. y Chorley, R. 1999).

Otras teorías propuestas se basaban en la variación de la presión con la temperatura: si la turbulencia atmosférica acercaba suficientemente las gotitas de nube calientes y frías, la saturación del aire con relación a las superficies de las gotas frías y su subsaturación del aire con relación a las superficies de las gotas frías y su subsaturación con respecto a la superficie de las gotas calientes habrían de causar la evaporación de estas últimas y el crecimiento de las frías a sus expensas. Sin embargo, exceptuando quizás el caso de algunas nubes tropicales, la temperatura de las gotitas de lluvia es demasiado baja que actué dicho mecanismo.

#### **4.2.2 Teoría de Bergeron-Findeisen**

Esta teoría constituye una parte importante para explicar el mecanismo de crecimiento de las gotas de lluvia actualmente aceptada y está basada en el hecho de que la humedad relativa del aire es mayor con respecto a una superficie de hielo que con respecto a una superficie de agua (Barry, R. y Chorley, R. 1999).

Cuando la temperatura del aire baja por debajo de los  $0^{\circ}\text{C}$  la presión de vapor atmosférica 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, sobre todo entre las temperaturas de  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $-25^{\circ}\text{C}$ , en que la diferencia sobrepasa los 0.2 mb (Enciclopedia, 2011). Si coexisten en una nube de cristales de hielo y gotas de agua subenfriadas, éstas tienden a evaporarse y el vapor se deposita directamente sobre los cristales de hielo.

La presencia de los núcleos de condensación es necesaria para la formación de gotitas de agua. Sin embargo, es necesario que existan núcleos de congelación antes de que puedan formarse las partículas de hielo, generalmente a temperaturas muy bajas. Las pequeñas gotas de agua pueden estar subenfriadas en el aire puro hasta  $-40^{\circ}\text{C}$  antes de que tenga lugar la congelación espontánea, pero los cristales de hielo generalmente predominan en las nubes cuya temperatura es inferior a unos  $-22^{\circ}\text{C}$  (Barry, R. y Chorley, R. 1999).

En la atmósfera siempre hay gran cantidad de esas partículas o núcleos sobre los cuales las moléculas de vapor de agua tienden a reunirse para transformarse en líquido, formando diminutas gotas de agua. De estos núcleos hay que destacar, en primer lugar, a los llamados higroscópicos, que tienen gran afinidad por el agua, entre éstos hay que señalar las minúsculas partículas de sal suspendidas en el aire, a causa del oleaje y rompiente de las costas. El tamaño de esos núcleos de sal va desde un diámetro de una centésima de micrón hasta diez micrones (Huschke, R.E.,1980).

Los núcleos de congelación son menos numerosos que los núcleos de condensación. El origen de los núcleos de congelación se considera generalmente que las finas partículas procedentes del suelo son su fuente principal. Otra posibilidad es que sea el polvo meteórico quien proporcione los núcleos, o bien, el polvo volcánico. Una vez que se han formado los minúsculos cristales de hielo, crecen rápidamente por condensación del vapor, desarrollándose distintas formas hexagonales del cristal a distintos intervalos de temperatura. El número de cristales de hielo tienden a aumentar progresivamente, a causa de las corrientes de aire, se desprenden durante su crecimiento pequeñas astillas que actúan como nuevos núcleos (Barry, R. y Chorley, R. 1999).

Otros núcleos de condensación muy activos son las pequeñísimas gotas de ácido nítrico presentes en todo momento en el aire terrestre y cuyo diámetro es inferior a una décima de micrón. El vapor de agua también comienza a condensarse sobre ellas a humedades relativas por debajo del cien por cien. (Enciclopedia, 2011).

Los cristales de hielo se unen rápidamente por colisión, a causa de su frecuente forma ramificada y un solo copo de nieve puede estar formado por decenas de cristales. Las temperaturas comprendidas en el intervalo de  $0^{\circ}$  a  $-5^{\circ}\text{C}$  son especialmente favorables para la unión porque las finas capas de agua que existen sobre las superficies de un cristal se congelan cuando dos cristales entran en contacto. Cuando la velocidad de caída de la masa de hielo que está creciendo sobrepasa las velocidades de las corrientes de aire ascendentes, el copo de nieve cae, convirtiéndose en una gota de lluvia si atraviesa una capa de aire suficientemente espesa de temperatura superior a  $0^{\circ}\text{C}$  (Barry, R. y Chorley, R. 1999).

#### **4.2.3 Teoría de colisiones y adhesiones**

Otras teorías sobre la formación de la gota de lluvia suponen que la colisión, la coalescencia y el barrido causan el crecimiento de la misma. Originalmente se pensó que la turbulencia atmosférica, por ocasionar choques entre partículas de la nube, sería responsable de gran parte de la coalescencia y el aumento de tamaño inicial de las gotas de agua o cristales de hielo, sin embargo, se encontró que las partículas pueden romperse con igual facilidad cuando están sujetas a choques y se observó que a menudo no hay precipitación desde nubes turbulentas (Barry, R. y Chorley, R. 1999).

Una variación de la teoría de colisión considerando que las gotas que caen tienen velocidades límites que están directamente relacionadas con sus diámetros, de manera que las gotas de mayor tamaño pueden alcanzar y absorber las gotas pequeñas y que estas últimas pueden también ser barridas hacia la estela de la primera y ser absorbidas por ellas.

Los resultados experimentales de la velocidad de crecimiento de las gotas de agua por coalescencia y también la de las partículas de hielo por condensación de vapor a partir de un radio inicial de  $20\ \mu\text{m}$ . Aunque la coalescencia es al principio bastante lenta, la gota puede alcanzar  $200\ \mu\text{m}$  de radio en 50 min. Las gotas deben tener radios mayores de  $19\ \mu\text{m}$  para que puedan soldarse con otras. La presencia inicial de algunas gotas más grandes provocará la formación de núcleos gigantes si la parte superior de la nube no está por encima del nivel de congelación (Barry, R. y Chorley, R. 1999)..

Sin embargo, si hay algunos cristales de hielo en una parte de la nube, pueden llegar a caer a través de la nube en forma de gotas y entra en acción del mecanismo de la coalescencia. La electrificación de las nubes, aumenta la eficiencia de la coalescencia, este proceso permite un crecimiento más rápido que el que puede proporcionar la simple condensación (Barry, R. y Chorley, R. 1999).

#### **4.2.4Ciclo hidrológico**

El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte recirculatorio e indefinido y permanente, este movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: La primera, el sol que proporciona la energía para elevar el agua (evaporación); la segunda; la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda (precipitación escurrimiento) Chow et al, 1988.

La parte del ciclo del agua que explica que explica porque aún en los desiertos más secos hay agua en forma de vapor, es la evaporación.

La evaporación del océano depende de la humedad relativa del aire, la cual a su vez depende de su temperatura. Si la temperatura del aire aumentará a lo largo del camino A-D Figura 4, de tal forma que el aire nunca satura, la evaporación continuaría hasta que los océanos desaparecerían.

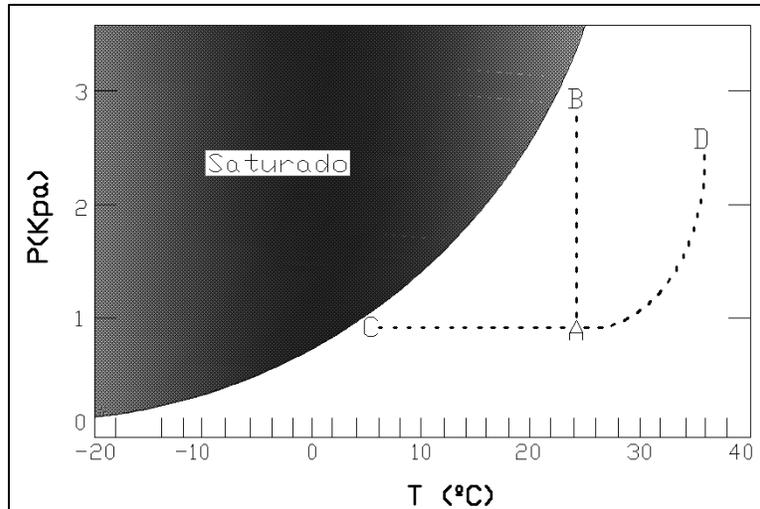


Figura 4. Evaporación del agua y saturación de humedad a diferentes temperaturas y presiones (Fisica.edu, 2011).

Como el vapor de agua es un gas de efecto invernadero, cuanto más vapor de agua haya en la atmosfera, mayor es este efecto y la temperatura de la atmosfera aumenta. Si este incremento de temperatura es tal que la atmosfera no satura, la evaporación continuaría indefinidamente hasta que no haya más agua para evaporar (Fisica.edu 2011). El proceso A-C genera rocío: al anochecer la temperatura baja considerable por el efecto de la radiación, por lo que disminuye su capacidad de contener vapor de agua.

La evaporación es un fenómeno de la naturaleza que ocurre cuando la radiación solar hace subir el agua en forma de vapor o humedad desde el mar hasta la atmósfera. Aunque la mayor cantidad de evaporación sale del mar, también se da en toda la superficie de la tierra donde hay agua estancada, por ejemplo, los lagos, lagunas, ríos y embalses. Toda el agua que es evaporada y llevada hacia arriba en forma de humedad se aglomera y forma las nubes (Arteaga, R. 1993).

El ciclo hidrológico es un proceso continuo pero irregular en el espacio y en el tiempo. Una gota de lluvia puede recorrer todo el ciclo o una parte de él. El ciclo hidrológico además de mantener en movimiento el agua, cumple con una función importante, colaborando en mantener la superficie de la Tierra más fría y la atmósfera más caliente.

### **4.3 Calidad del agua**

El término calidad de agua es relativo porque está relacionado con el uso del recurso, mientras una fuente de agua permite la vida de los peces puede no ser apta para la natación y un agua útil para el consumo humano puede resultar inadecuada para la industria.

Para decidir si un agua califica para un propósito particular, su calidad debe especificarse en función del uso que se le va a dar. Bajo estas consideraciones, se dice que un agua está contaminada cuando sufre cambios que afectan su uso real o potencial (Castro de Esparza, M. 1987). Por lo común la calidad se juzga como el grado en el cual se ajusta a los estándares físicos, químicos y biológicos fijados por normas nacionales e internacionales (Orellana, J. 1990).

#### **4.3.1 Calidad de agua para uso y consumo humano**

La Organización Mundial de la Salud (OMS) en el 2002, indica que los suministros domésticos de agua son uno de los requisitos fundamentales para la vida humana. Y la calidad de agua entregada en los hogares es un importante aspecto el cual está relacionado con la higiene y por lo tanto con la salud pública. Sin agua la vida no puede sostenerse más allá de unos pocos días y la falta de acceso al agua potable conduce a la propagación de las enfermedades (Ford, 1999; Payment y Hunter, 2001) afectando tanto ha países desarrollados como en los países en vías de desarrollo, (Prüss et al, 2000).

Borchardt y Walton, 1971 definen la calidad de agua para consumo humano como aquella libre de microorganismos patógenos, de minerales y sustancias orgánicas que puedan producir efectos fisiológicos adversos. Debe ser estéticamente aceptable y, por lo tanto, debe estar exenta de turbidez, color, olor y sabor desagradable. Puede ser ingerida o utilizada en el procesamiento de alimentos en cualquier cantidad sin temor, por efectos adversos sobre la salud.

## **4.3.2 Características bacteriológicas, físicas, químicas y radiológicas del agua potable.**

### **4.3.2.1 Características biológicas del agua**

Las aguas poseen en su constitución una gran variedad de elementos biológicos desde los microorganismos hasta los peces. El origen de los microorganismos puede ser natural es decir constituyen su hábitat natural, pero también provenir de contaminación por vertidos industriales, como también por arrastre de los existentes en el suelo por acción de la lluvia (Orellana, J. 1990).

El análisis bacteriológico de los abastecimientos de agua es la característica de calidad más sensible. Ya que casi todos los desechos orgánicos contienen grandes cantidades de microorganismos. Tanto las aguas naturales como las residuales varían mucho en sus características; físicas, químicas y biológicas, indicando contaminación orgánica y biológica; tanto la actividad natural como la humana contribuyen a la contaminación orgánica de las aguas: la descomposición animal y vegetal, los residuos domésticos, detergentes y otros (SSA, 2000).

Sin embargo, en México la modificación en el año 2000 de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, solo considera los siguientes análisis microbiológicos para consumo humano, lo que se observa en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Límites permisibles de características microbiológicas

Característica	Límites Permisibles
Mesofilicos Aerobios	100
Coliformes totales (NMP/100mL)	Ausencia o no detectables
Coliformes totales (UCF/100mL)	Ausencia o no detectables

Nota: Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 mL (número más probable por 100 mL), si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 mL (unidades formadoras de colonias por 100 mL), si se utiliza la técnica de filtración por membrana (SSA, 2000).

#### 4.3.2.2 Características físicas y organolépticas

Son aquellas que se detectan sensorialmente. Para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos y el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio (SSA, 2000).

##### Color

El color es la capacidad del agua para absorber ciertas radiaciones del espectro visible. El color natural en el agua existe debido al efecto de partículas coloidales cargadas negativamente. En general, el agua presenta colores inducidos por materiales orgánicos de los suelos como el color amarillento debido a los ácidos húmicos. La presencia de hierro puede darle un color rojizo y la del manganeso, un color negro.

Normalmente el color se mide en laboratorio por comparación de un estándar arbitrario a base de cloruro de cobalto,  $\text{Cl}_2\text{Co}$  y Cloroplatinato de potasio,  $\text{Cl}_6\text{PtK}_2$  y se expresa en una escala de unidades de Pt-Co (unidad Hazen) o Pt, las aguas superficiales pueden alcanzar, varios centenares de ppm de Pt. La eliminación suele hacerse por coagulación-floculación con posterior filtración (disminuyendo a menos de 5 ppm) o la absorción con carbón activado.

### Olor y sabor

Estas son debidas a las impurezas disueltas, casi siempre de naturaleza orgánica, los compuestos químicos presentes en el agua como los fenoles, diversos hidrocarburos, cloro, materias orgánicas en descomposición o esencias liberadas por diferentes algas u hongos pueden dar olores y sabores muy fuertes al agua, aunque estén en muy pequeñas concentraciones. Las sales o los minerales dan sabores salados o metálicos, en ocasiones sin ningún olor y son propiedades subjetivas difíciles de medir.

### Turbidez

Se entiende por turbidez a la falta de transparencia de un líquido, debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el líquido, generalmente se hace referencia al agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad del agua, cuanto más turbia, menor será su calidad. Las aguas subterráneas suelen tener valores inferiores a 1 ppm de sílice, pero las superficiales pueden alcanzar varias decenas. Las aguas con 1 ppm son muy transparentes hasta profundidades de 4 a 5 m. Con 10 ppm, que sería el máximo deseable para una buena operación de los filtros, la transparencia se acerca al metro de profundidad. Por encima de 100 ppm las transparencias están por debajo de los 10 cm y los filtros se obstruyen rápidamente. Con Turbidez mayor de 5 ppm es detectable, para lo cual se debe disminuir mediante los procesos de coagulación, decantación y filtración y debe disminuir a menos de 5 ppm y en plantas que operan con agua de pozo deben disminuirla a menos de 1 ppm (Castro de Esparza, M. 1987). Actualmente la turbidez se mide con un nefelómetro expresando los resultados como; Unidad de Turbidez Nefelométrica (UTN).

La NOM-127-SSA1-1994, considera las siguientes características físicas y organolépticas para utilizar el agua para uso y consumo humano Cuadro 2.

Cuadro 2. Límites permisibles de características físicas y organolépticas

Características	Límites permisibles
Color	15 Unidades de color verdadero en la escala Pt-Co
Olor y sabor	Incoloro e Insípido
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas UNT

Fuente: SSA, 2000

#### 4.3.2.3 Características químicas

Diversas investigaciones muestran los riesgos en la salud por metales pesados encontrados en el agua (Lucho *et al.*, 2005; Mapanda *et al.*, 2005; Tahri *et al.*, 2005; Spain, 2003). La importancia de estudiar los metales pesados radica en su capacidad de combinarse con una gran variedad de moléculas orgánicas y su fácil incorporación en el agua de lluvia y el agua atmosférica. De éstos, los más peligrosos son Pb, Mg, Cd, As, Cu, Zn y Cr, ya que influyen en diversas formas en los procesos fisiológicos de los organismos en los que tienden a bioacumularse (Marcovecchio *et al.*, 1999).

Por otra parte, el objeto de estudio en este trabajo es el agua condensada de la atmósfera la cual no está exenta de traza de metales. Schemenauer y Cereceda (1992), Muselli *et al.* (2006) y Gandhidasan y Abualhamayel (2007) mencionan que la calidad del agua condensada de la atmósfera depende de varios factores: la composición de la humedad atmosférica, el material del condensador atmosférico, la cantidad y la composición química del material que se deposita en los condensadores. Además, Jacob *et al.* (1985) y Fuzzi *et al.* (1984) señalan que la temperatura del aire y la radiación solar influyen en la concentración de los compuestos químicos en el agua atmosférica.

En general, el agua obtenida de la humedad atmosférica tiene bajo contenido de minerales y metales, en zonas poco contaminadas (Gandhidasan y Abualhama, 2007). Sin embargo, en sitios de alta contaminación se incorporan los elementos traza y partículas presentes en el aire en las gotas de agua (Fuzzi *et al.*, 1992).

Por lo que es indispensable considerar en el Cuadro 3, los límites permisibles de las características químicas necesarias para cumplir con la modificación de la NOM-127-SSA1-1994 y decidir si una agua es apta o no para el consumo humano.

Cuadro 3. Límites permisibles de características químicas

Característica	Límite permisible mg L <sup>-1</sup>	Característica	Límite permisible mg L <sup>-1</sup>
Aluminio	0.2	Nitrogeno Amoniacal	0.5
Arsénico	0.05	pH	6.5-8.5*
Bario	0.7	Plaguicidas en microgramos/l aldrín y dieldrin	0.03
Cadmio	0.005	Clordano	0.3
Cianuro	0.05	DDT	1
Cloro residual libre	0.1	Gamma-HCH	2
Cloruros	250	Heptacloro y epoxido de heptacloro	
Cobre	1	Metoxicloro	20
Cromo total	0.05	2,4 -D	30
Dureza total	200	Hexaclorobenceno	0.01
Fenoles	0.001	Plomo	0.02
Fierro	0.3	Sodio	200
Floururos	0.7	Sólidos disueltos totales	500
Manganeso	0.05	Sulfatos	250
Mercurio	0.001	Sustancias activas al azul el metileno	0.5
Nitratos	10	Trihalometanos totales	0.1
Nitritos	0.05	Zinc	3

Fuente: SSA, 2000

**\*El pH mide la concentración de iones de H<sup>+</sup>**

#### 4.3.2.4 Características radiológicas

En la actualidad se ha reconocido la necesidad de implantar normas alimentarias internacionales en consecuencia, se han establecido el programa conjunto FAO y OMS sobre normas alimentarias, y la comisión de codex alimentarius es el órgano encargado de su ejecución, esto debido a que en ciertos lugares del mundo la irradiación natural de fondo es considerable, algunos peces pueden concentrar metales pesados y de la misma manera radioisótopos como el  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  3.5.1 contaminantes radiactivos (Castro de Esparza, M. 1987). En el Cuadro 4 se observan los límites permisibles de las características radiológicas necesarias para cumplir con la modificación de la NOM-127-SSA1-1994.

Cuadro 4. Límites permisibles de características radiológicas

<b>Característica</b>	<b>Límite permisible</b>
Radiactividad alfa global	0.1
Radiactividad beta global	1

Fuente: SSA, 2000

### 4.3. 3Tratamientos de agua sugeridos por la Modificación Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994

En esta norma se establece que el agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas.

Con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor, se debe someter a tratamientos de potabilización En el Cuadro 5 se señala los tratamientos que se deben seguir en caso que el agua tenga características fuera de los límites establecidos.

Cuadro 5. Tipos de tratamiento para el consumo humano de agua

Características del agua	Tratamientos para eliminar las características encontradas en una muestra de agua												
	CL	CA	F	CO	FL	PRE	IO	AQ	OI	UV	O	D	DC
Contaminación biológica													
Bacterias, helmintos, protozoarios y virus	■									■	■		
Físicas y organolépticas													
Color			■	■	■	■							
Olor			■	■	■	■							
Sabor			■	■	■	■							
Turbiedad			■	■	■	■							
Químicas													
Arsénico			■	■	■	■	■		■				
Aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total y plomo							■		■				
Cloruros							■		■			■	
Dureza							■	■					
Fenoles o compuestos fenólicos		■									■		
Fierro y/o manganeso			■				■		■		■		
Fluoruros					■				■				
Materia orgánica		■	■								■		
Mercurio			■	■	■	■							
Nitratos y nitritos			■	■	■								■

Cloro = CL, Carbón activado = CA, Filtración = F, Coagulación = CO, Floculación = FLO, Precipitación = PRE, Intercambio iónico = IO, Ablandamiento químico = AQ, Osmosis inversa = OI, Ultra violeta = UV, Ozono = O, Destilación = D, Desorción encolumna = DC.

Fuente: Juan M. J. 2006

## 5. Materiales y Métodos

En este apartado se describe el higroiman CP-HID-04 el cual fue utilizado para obtener los datos necesarios para la elaboración de los tres artículos científicos que constituye esta investigación. En cada uno de ellos se describe los sitios de estudio y los materiales correspondientes.

El higroiman CP-HID-04 es una modificación propuesta por el Dr. Jorge L. Tovar Salinas del modelo anterior CP-HID-03 (Bautista-Olivas, *et. al.* 2011), la innovación en este modelo es la introducción de aire a través de un ventilador. El cual tiene como finalidad inyectar una mayor cantidad de volumen de aire para condensar mayor cantidad de agua del aire, en la superficie activa del higroiman (Figura 5).



Figura 5. Prototipo HIgroiman CP HID-04

Los principios teóricos de este prototipo son:

\* Las moléculas de agua que se encuentran en la atmósfera en estado gaseoso y el higroiman atrae estas moléculas condensándolas. El agua al pasar de un estado líquido se

caracteriza por ser más densa que el agua en forma de gas, y la velocidad de colisión entre las moléculas es menor en la fase líquida que en la gaseosa.

\*Las moléculas en un líquido están en movimiento constante, es una expresión de su energía térmica. Estas moléculas chocan frecuentemente, y ocasionalmente alguna de ellas absorbe suficiente energía para saltar del líquido hacia la atmosfera. Tal molécula, por virtud de su energía cinética en la fase líquida, cambió entonces de la fase líquida a la gaseosa. Esta energía cinética es entonces perdida en la superación de la energía potencial de la atracción intermolecular mientras escapa del líquido. Al mismo tiempo, algunas de las moléculas en la fase gaseosa pueden golpear la superficie del líquido y son absorbidas en él.

\*El proceso que realiza el higroíman para atraer moléculas de agua, en forma de gas para pasar al estado líquido, se da a nivel molecular durante la evaporación el tráfico de moléculas es en un solo sentido, es decir, las moléculas se desplazan desde el líquido hacia el espacio. Cuando aumenta la concentración de las moléculas en la fase de vapor, algunas se condensan, regresan a la fase líquida.

\*Para que el agua en forma líquida permanezca en este estado es indispensable tener una temperatura que mantenga unidas a las moléculas de agua evitando que pase a la fase gaseosa Hillel, 1971, por lo que el higroíman cumple esta función. La temperatura a la que debe estar la parte que condensara el agua depende de la temperatura ambiente y la humedad atmosférica que se tenga.

\* Los investigadores Barry, R. y Chorley, R. 1999 mencionan que en las nubes, la sobresaturación sobrepasa raramente 1% y puesto, que la presión de vapor de saturación es mayor sobre la superficie curva de una gotita que sobre una superficie plana de agua, las gotitas muy pequeñas (de radio  $<0.1\mu\text{m}$ ) se evaporan rápidamente. Este fenómeno fue observado en el proceso de la obtención del agua con el higroíman, por lo que con mayor tiempo de funcionamiento del aparato las gotitas de agua aumentan de tamaño y son menos susceptibles a la evaporación atmosférica (Barry, R. y Chorley, R. 1999).

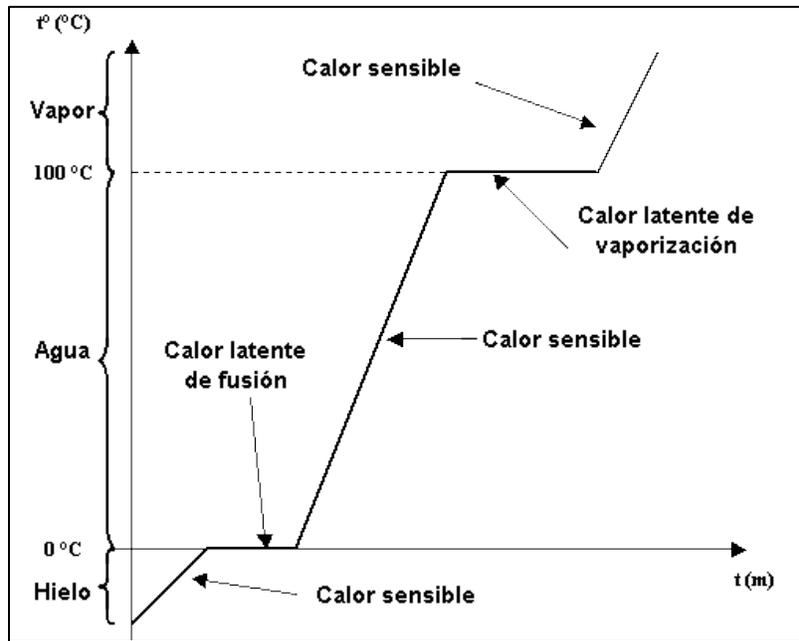


Figura 6. Curva de cambio de estados del agua, desde la fase sólida a la fase gaseosa de una sustancia, pasando por la fase líquida (Chang, 2007).

En la figura 6, se ubica el funcionamiento del higrómetro en la parte donde el agua está en forma de gas y cambia a su fase líquida. Si se elimina calor de una muestra de gas a una velocidad uniforme, su temperatura disminuye. Conforme se forma el líquido, se libera calor del sistema porque su energía potencial está disminuyendo. A esto se debe que la temperatura del sistema permanezca constante durante la condensación. Una vez que todo el vapor se ha condensado, la temperatura del líquido comienza a bajar. Por último, al continuar el enfriamiento del líquido se llega a la condensación.

## 6. Literatura Citada

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.(EPA) 1999 Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire; manual de autoinstrucción.Lima: CEPIS.

Agua, 2010 <http://www.agua.org.mx>. Consultado en línea 14 febrero 2010

Arteaga, R. 1993 Introducción a la meteorología UACH, Chapingo, Mex.

Atmosphere,2011 [http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds\\_tratocumulus.html&lang=sp](http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds_tratocumulus.html&lang=sp) Consultado 9 de junio de 2011

Barry, R. y Chorley, R. 1999 Atmosfera, tiempo y clima Editorial Omega E.U.

Bautista-Olivas A. L., Tovar-Salinas J. L., Palacios-Vélez O. L., Mancilla-Villa O. R. 2011. La humedad atmosférica como fuente opcional de agua para uso doméstico. *Agrociencia*. 45, 293-301.

Borchardt y Walton, 1971 Pollution status of swimming pools in south-south zone of south-eastern nigeria using microbiological and physicochemical índices Department of Microbiology, University of Uyo, Uyo, Akwa Ibon State, Nigeria 35 (2):34-39

Castro de Esparza 1987. Parámetros físico-químicos que influyen en la calidad y en el tratamiento del agua. Lima CEPIS

Chang R. 2007 Química Mc Graw Hill Novena edición

Chow, V. T. 1988. Handbook of applied hydrology: a compendio of water resources

CONAGUA, 2005 Compendio Básico del Agua en México, México, Comisión

Ecofriend 2011, <http://www.ecofriend.org/entry/water-conservation-made-easy-with-the-latest-fog-and-dew-collectors/>. Consultado 21 de Junio 2011

Enciclopedia, 2011 [http://enciclopedia.us.es/index.php/Teor%C3%ADa\\_de\\_Bergeron\\_y\\_Findeisen](http://enciclopedia.us.es/index.php/Teor%C3%ADa_de_Bergeron_y_Findeisen) Consultado 14 de junio 2011 España. Disponible en <http://web.usal.es/javisan/hidro>

Evenari, M. Shanan, L, and Tadmor, N. 1977. The Negev The Cahllenge of a Desert Harvard University Press. Cambridge, Massachusets. USA

Física.edu,2011 <http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/climatologia/teorico/climatologia/Clase4.pdf> Consultado 25 de junio de 2011

Ford T E, 1999, Microbiological safety of drinking water: United States and global perspectives, *Environmental Health Perspectives*, 107 (S1): 191-206

Fuzzi, S., Castillo, R.A., Jiusto, J.E., Lala, G.C. 1984 Chemical composition of radiation fog at Albany, New York and its relationship to fog microphysics. *J. Geophys. Res.* 85,7159-7164

Fuzzi, S., Facchini, M.C., Orsi, g., Lind, J.A., 1992 The Po valley fog experiment, An overview. 44b,448-469

Gandhidasan, P. Abualhamayel H.,2007. Fog collection as a source of fresh water supply in the kigdom of Saudi Arabia. *Water Environ. J.* 21,19-25.

Hillel, Daniel 1971 Soil and water physical properties and processes Edition Former Mishawaka, IN, U.S.A

- Huschke, R.E.,1980. “*Glossary of Meteorology*” American Meteorology Soc. Boston, Massachussets. USA. pág. 279.
- Jacob, D.J., Waldman, J.M. Munger, J.W., Hofftmann, M. R., 1985 Chemical composition of fog water collected along the California coast. *Environ. Sci. Technol.* 19,730-736
- Juan M. J. 2006 Captación y purificación de agua de lluvia para consumo humano Tesis de Maestría Colegio de Postgraduados Montecillos.
- Lucho C.A., Prieto, F., Del Razo, L.M., Rodríguez, R, Poggi, H., 2005. Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. *Agric. Ecotsyst. Environ.* 108, 57–71.
- Luna B., y Kenneth S. D. 1977 El agua Colección científica de Time-Life Editado por Offset Larios
- Mapanda F., Mangwayana, E.N., Nyamangara, J., Giller, K.E; 2005.The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe. *Agric. Ecosyst. Environ.* 107,151-165.
- Marcovecchio, J.E.; Moreno, V.J., A. Pérez, 1991. Metal accumulation in tissues of sharks from the Bahía Blanca Estuary, Argentina. *Marine Environ. Res.* 31, 263-274.
- Monografía 2010 <http://www.monografias.com/trabajos14/propiedades-agua/propiedades-agua.shtml> Consultado 4 de junio 2010
- Monografias, 2013 <http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/escazes-agua/escazes-agua.pdf> Consultado en línea 10 de septiembre 2010
- Muselli M., Beysens D., Soyeux E. and Clus O. 2006. Is Dew Water Potable? Chemical and Biological Analyses of Dew Water in Ajaccio (Corsica Island, France) 32,1812-1817.
- OMS, 2002 Domestic Water Quantity, Service, Level and Healt
- Orellana, J. 1990. Calidad del agua. Ingeniería Sanitaria UTN FRRO.
- Payment P and Hunter P R, 2001, Endemic and epidemic infectious intestinal disease and its relationship to drinking water, In Fewtrell L and Bartram J (eds.) *Water quality: guidelines, standards and health*, IWA, London, pp 61-88.
- Proyectopv, 2012 Consultado en línea 25 de agosto 2012 <http://www.proyectopv.org/1-verdad/escasezagua.htm>

- Prüss A and Mariotti S P, 2000, Preventing trachoma through environmental sanitation: a review of the evidence base, *Bulletin of the World Health Organization*, 78(2): 258-264.
- Schemenauer, R S and Cereceda, P., 1992 The quality of fog water collected for domestic and agricultural use In chile. *J. Appl. Meteorol.*, 31, 275-290
- Spain A. 2003. Implications of microbial heavy metals tolerance in the environment. reviews in Undergraduate Res. 2,1-6.
- Sresty, T.V.S, Rao, Kvm., 1999. Ultrastructural alterations in response to zinc and nickel stress in the root cells of pigeon pea. *Environ. Exp. Bot.* 41,3-13
- SSA, 2000 NOM-127-SSA1-1994 <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html> Consultado el día 26 de abril del 2011
- Subirons V. 2013. Consultado el 3 de enero de 2013. Disponible en: <http://www.proyectopv.org/0-present/marcoszonadescarga.htm>.
- Tahri M., Benyaïch, F., Bounakhla, M., 2005. Multivariate analysis of heavy metal contents in soils, sediments and water in the region of Meknes (central Morocco). *Environ. Monit. Assess.* 102,405-417
- WHO, 2012 [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/es/](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/es/) Consultado en línea 4 de septiembre 2012
- Wikipedia, 2013 [http://es.wikipedia.org/wiki/Punto\\_triple](http://es.wikipedia.org/wiki/Punto_triple) Consultado en línea 13 de enero 2013.

## **CAPITULO I. MODELO PARA PREDECIR EL VOLUMEN DE AGUA QUE SE PUEDE OBTENER APARTIR DE LA CONDENSACIÓN DE LA HUMEDAD ATMOSFÉRICA**

### **Resumen**

El aprovechamiento de la humedad atmosférica es una técnica cada vez más empleada en el mundo para satisfacer las necesidades de agua sobre todo en zonas rurales. Sin embargo, es indispensable pronosticar el volumen de agua que se puede obtener con los condensadores de humedad basándose en las condiciones climáticas del lugar (humedad relativa, temperatura ambiental y altitud), así como en las características de estos dispositivos, con la finalidad de determinar una cantidad mínima y máxima de agua dependiendo de las condiciones ambientales, para que las comunidades organicen el consumo del volumen de agua del que pueden disponer. Por lo que el objetivo de la presente investigación fue desarrollar un modelo que prediga la cantidad de agua atmosférica que se puede obtener utilizando un prototipo que induce el punto de rocío para condensar la humedad atmosférica. Las variables climáticas consideradas para estimar el volumen de agua a obtener son: temperatura y humedad relativa dentro y fuera del prototipo. El estudio se realizó en la Ciudad de México. La toma de datos fue entre agosto y septiembre 2011. Se generaron tres diferentes modelos matemáticos uno por cada nivel de frío utilizado, correspondientes a los niveles 1, 3 y 7 del higroimán y uno general. Estos modelos se validaron con los datos obtenidos en el sitio en época de secas (diciembre 2011 y enero 2012) calculando los siguientes índices: MBE (error medio), RMBE (raíz cuadrada del error cuadrático, D (Índice de acuerdo),  $R^2$  (coeficiente de determinación). Los resultados de este estudio indican que los modelos predicen en forma aceptable el volumen de agua predicha.

**PALABRAS CLAVE:** humedad relativa, condensación atmosférica, higroiman,modelos.

## **1.1.Introducción**

El agua potable es un recurso cada vez más escaso. Por lo que hoy en día el aprovechamiento de la humedad atmosférica es una realidad para mitigar en lo posible este problema. Sin embargo, se han realizado pocos trabajos donde se pronostique el volumen de agua que se obtiene con los condensadores de humedad teniendo en cuenta las condiciones climáticas (altitud, humedad relativa y temperatura ambiental).

El desarrollo de modelos numéricos ayuda a simular el comportamiento de diversos procesos físicos, químicos y atmosféricos lo que constituye un aspecto cada vez más importante en la comunidad científica (Willcott, *et. al.*, 1985)

Por otro lado, la necesidad de evaluar el modelo matemático propuesto resulta indispensable para verificar la confiabilidad de las estimaciones cuantitativas del modelo que predicen el comportamiento de algún fenómeno, en este caso del volumen de agua condensada de la atmósfera, que se estima con las variables climatológicas de humedad relativa y temperatura dentro y fuera del prototipo.

La evaluación objetiva de estos modelos se realiza mediante la estimación del error entre los valores simulados y los observados. Los criterios de la eficiencia es la medida matemática de cómo un modelo de simulación ajusta las observaciones disponibles (Beven, 2001).

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue obtener un modelo matemático para la zona centro de la Ciudad de México que prediga la cantidad de agua obtenida con un prototipo que induce el punto de rocío considerando los datos de humedad relativa y temperatura ambiente y el volumen de agua obtenido cada hora, así como la humedad relativa y temperatura generada en el interior del prototipo considerando el nivel de temperatura que se utilice en el condensador del prototipo. Lo anterior permite proponer la utilización del prototipo en zonas climáticas donde según sus condiciones de humedad relativa y temperatura ambiental sea factible obtener agua en cantidad suficiente para cubrir las necesidades básicas de los pobladores.

## **1.2. Área de estudio**

El estudio se realizó en la zona centro de la Ciudad de México, en las coordenadas 19° 24' 26.51" N y 99°08'36.95" O, con una altitud de 2233m, temperatura ambiental y precipitación promedio anual de 16.5 °C y 573 mm respectivamente, con un clima BS<sub>1</sub>kw(w)(i') (García, 1988).

## **1.3. Materiales y Métodos**

Para lograr el objetivo, que se planteó en el presente trabajo los materiales empleados fueron: un prototipo que condensa la humedad atmosférica (CP-HI-04), 2 dataloggers y un waththorimetro.

### **Materiales**

#### **Higroimán CP-HI-04**

Es un prototipo mejorado del modelo CP-HI-03 (Bautista-Olivas *et al.*, 2011), el cual consiste en un circuito cerrado herméticamente, consta de los siguientes componentes: 1) compresor, 2) filtro, 3) tubo capilar, 4) condensador 5) Evaporador 6) termostato, 7) dos termómetros, 8) gas freón. Además tiene un ventilador que inyecta aire a un tanque e induce el punto de rocío del aire del tanque condensado en una superficie de contacto (Evaporador).

#### **Data loggers**

La mini estación WatchDog serie 1000 fue el sistema que se utilizó para medir las variables climáticas: la humedad relativa y temperatura.

#### **Instalación del equipo**

El higroimán **CP-HI-04** se instaló al aire libre en una casa habitación del centro de la Ciudad de México en dos épocas del año (agosto-septiembre de 2011 y enero de 2012). Los dataloggers se programaron para tomar los datos de humedad relativa y temperatura y se instalaron dentro y fuera del higroimán.

## **Método para la toma de datos**

### **Diseño experimental**

Para el desarrollo de este trabajo se consideró 3 diferentes rangos de temperatura (Correspondientes a los niveles 1, 3 y 7 del higroimán), cada rango fue trabajado por 3 días de forma aleatoria (3 días por tratamiento y 9 días en total).

Se obtuvieron 18 datos diarios durante tres días de cada una de las siguientes variables: cantidad de agua colectada, humedad relativa promedio, temperatura del interior y exterior del higroimán promedio, dando un total de 54 datos en la Ciudad de México y por nivel del frío.

### **Operación del higroiman**

El higroimán se trabajo de la siguiente forma:

1. La operación del higroimán fue manual
2. La condensación del agua atmosférica se llevo acabo durante 60 min, transcurrido este tiempo se tomó los datos del volumen de agua condensada con el higroimán y la lectura del watorimetro. La colecta de muestra se llevo en 20 min.
3. Los datos de humedad relativa y temperatura dentro y fuera del higroimán se registraron cada minuto con los dataloggers, esta información se promedio cada hora para relacionarla con el volumen de agua que se obtuvo y la cantidad de energía utilizada en este proceso.

### **Calculo del índice para predecir el volumen de agua que se puede obtener a partir de la condensación de la humedad atmosférica**

Para poder elaborar un modelo matemático fue indispensable primero buscar un índice que relacione las 4 variables climatológicas registradas con los data loggers.

## **Modelos que predicen el volumen de agua atmosférica.**

Al encontrar el índice que permite predecir el volumen de agua que se puede obtener a partir de la condensación de la humedad atmosférica, se consideró esta como una variable independiente (X) y el volumen de agua condensado como la variable dependiente (Y). Utilizando el programa Excel se relacionaron estos valores para obtener el modelo que mejor predijera el fenómeno.

## **Validación de los modelos**

Una vez obtenidos los modelos matemáticos se procedió a validarlos por lo que fue necesario tomar datos en los meses de diciembre 2011 y enero 2012 en este sitio y con los 3 diferentes niveles de frío empleados por lo que considerando el volumen de agua observada  $V_o$  y el Volumen estimado  $V_e$  en cada sitio de estudio y por cada nivel de frío se evaluó el desempeño de los modelos obtenidos. Para esto Fox 1981 recomienda cuatro tipos de cálculo del error que deben determinarse y reportarse: MBE, RMBE, D,  $R^2$ :

### **Error medio (MBE)**

$$MBE = N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)$$

Este tipo de error es conocido como la distancia dirigida que tiene el dato  $X_i$  de la media aritmética muestral o poblacional (promedio), es decir, es un promedio de los errores de cada medición. Si es positivo indica que el dato  $X$  es mayor que la media, o bien si es negativo indica que el dato  $x$  es menor que la media.

Donde,  $N^{-1}$  es el número de observaciones;  $O_i$  y  $P_i$  son respectivamente el  $i$ -ésimo dato observado con los datos predichos por el modelo.

### **Error cuadrático medio (RMBE)**

$$RMBE = \left[ N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5}$$

El error medio cuadrático consiste en elevar al cuadrado el error medio de cada dato i-estimó lo que provoca que todos los valores se vuelvan positivos y de esta manera la suma no es cero sino generan una suma de cuadrados que si se divide entre el numero de datos generan la varianza que es un indicador de dispersión al igual que el error medio.

Donde,  $N^{-1}$  es el numero de observaciones;  $O_i$  y  $P_i$  son respectivamente el i-ésimo dato observado con los datos predichos por el modelo.

### **Índice de acuerdo (D)**

$$D = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| - |O_i|)^2} \right] \quad 0 \leq D \leq 1$$

Willcott (1981), propone este índice denominado “D” que pretende que sea una medida descriptiva y se puede aplicar a fin de hacer comparaciones cruzadas entre los modelos.

Donde,  $|P_i| = P_i - O_i$  y  $|O_i| = O_i - \hat{O}$ . El valor debe ser más cercano a la unidad; con esto se busca que los errores elevados al cuadrado entre la suma elevada al cuadrado de las desviaciones de los valores estimados ( $P_i$ ) y observados ( $O_i$ ) con respecto a la media de los valores observados ( $\hat{O}$ ) sea lo más aproximada a cero (Anconelli and Battilani, 2000; Cai *et al*, 2007). Para encontrar el valor de este estadístico se sustituyen en la ecuación anterior los valores de  $P_i$  y  $O_i$  conociendo que ( $\hat{O}$ ) es el promedio.

### **Coefficiente de determinación $R^2$**

$$R^2 = \frac{[\sum (P_i - P)(O_i - O)]^2}{[\sum (P_i - P)^2 \sum (O_i - O)^2]}$$

Donde, P y O son los promedio del arreglo de datos  $i$ -ésimo  $O_i$  y  $E_i$ . Este estadístico es un indicador menos flexible que el coeficiente de correlación, ya que al elevar al cuadrado un valor menor que la unidad el resultado es un valor más pequeño (Cai *et al.*, 2007)

#### 1.4. Resultados y Discusión

Para obtener los modelos matemáticos, primero fue necesario proponer una ecuación que involucré las variables de humedad relativa, temperatura ambiental así como la humedad relativa y temperatura que induce el sistema de refrigeración del higroimán, con los datos que se obtuvieron en agosto-septiembre del 2011. A continuación se presenta el índice (relación entre las variables).

$$I = \left| \frac{H_{ind} - H_{at}}{T_{ind} - T_{at}} \right|$$

Donde:

$H_{ind}$ =Humedad relativa inducida por el prototipo (%)

$H_{at}$ =Humedad relativa atmosférica (%)

$T_{ind}$ =Temperatura inducida por el prototipo (°C)

$T_{am}$ =Temperatura ambiental (°C)

Se obtuvo un índice por nivel de frío y un índice general, que involucrara todo los datos del experimento, es decir de los 9 días, en los cuales se condensó agua de la atmósfera con el higroimán.

El índice calculado se sustituyó con los datos obtenidos en la primera etapa del trabajo, y se obtuvieron los modelos matemáticos cuadráticos donde el valor de  $c$  es el valor independiente de la ecuación cuadrático con el ajuste indicado por  $R^2$ , lo que se observan en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1. Modelos que predicen el volumen de agua que se puede obtener con el prototipo en la Ciudad de México, con tres niveles de frío.

Sitio		Ecuaciones			
		$X^2$	X	C	$R^2$
Distrito Federal	Nivel 1	0.021	3.354	26.93	0.64
	Nivel 3	0.002	3.031	22.48	0.802
	Nivel 7	-0.003	3.363	33.68	0.834
	General	-0.015	3.614	21.31	0.7

En las **Figuras 1.1, 1.2, y 1.3** se observa como los volúmenes de agua atmosférica obtenidos con el higroimán en la etapa de validación concuerda con los volúmenes predichos por los modelo matemáticos.

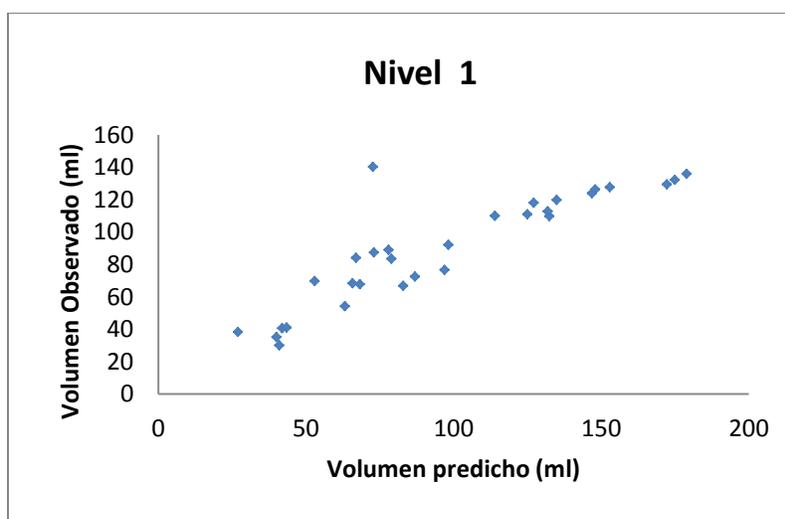


Figura 1.1. Volumen de agua obtenido con el modelo matemático contra el volumen observado en campo con el nivel 1 del higroimán.

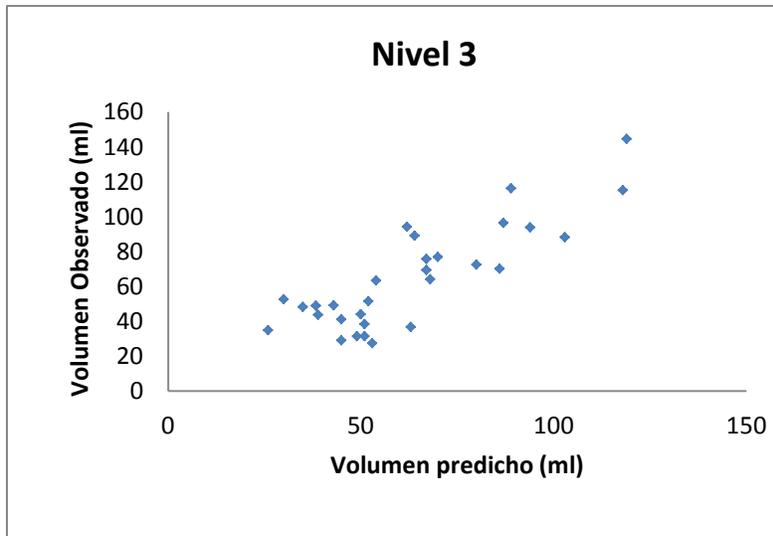


Figura 1.2. Volumen de agua obtenido con el modelo matemático contra el volumen observado en campo con el nivel 3 del higrómetro.

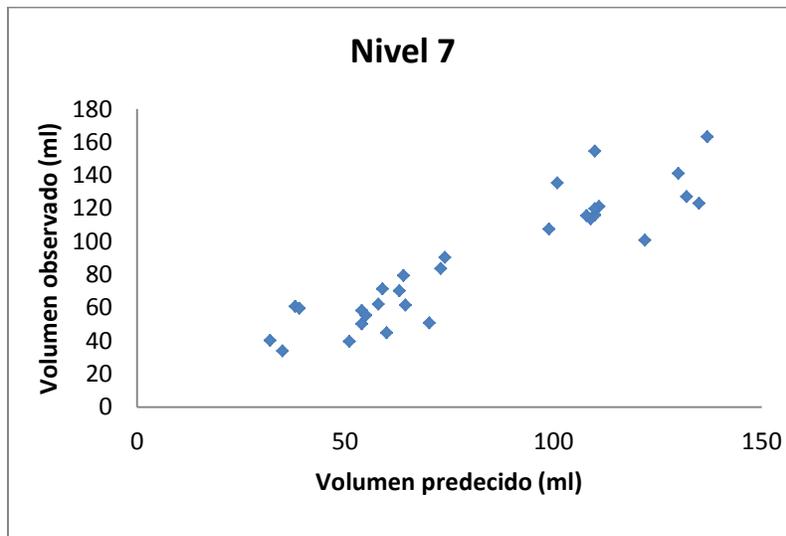


Figura 1.3. Volumen de agua obtenido con el modelo matemático contra el volumen observado en campo con el nivel 7 del higrómetro.

**Cuadro 1.2. Índices para la validación de los modelos matemáticos obtenidos**

	Ciudad de México		
	Nivel 1	Nivel 3	Nivel 7
MBE	-7.48	1.30	6.40
RMSE	22.61	15.66	15.91
D	0.91	0.90	0.94
R <sup>2</sup>	0.77	0.71	0.84

En el Cuadro 1.2 se observa como los modelos matemáticos ajustan a los estándares establecidos por MBE, RMSE, D, R<sup>2</sup>. Lo que indica que los modelos pueden predecir de forma aceptable el volumen de agua en este sitio de estudio bajo las condiciones ambientales estudiadas.

### **1.5.Conclusiones**

Este trabajo cumple el objetivo de obtener un modelo que predice el volumen de agua atmosférico con el higrómetro. Los volúmenes predichos con los volúmenes observados se validaron mediante RMSE, MBE, D, R<sup>2</sup> lo que indica que los modelos son una herramienta que en cierta medida ayudan a cuantificar los volúmenes de agua que se puede obtener del aire dependiendo de la humedad relativa y temperatura ambiental y de la humedad relativa y temperatura ambiental que genera el aparato. Por lo que, en los sitios que tengan estas condiciones meteorológicas utilizando estos modelos matemáticos se pueden predecir los volúmenes de agua que se obtendrían.

## 1.6.Literatura citada

- Anconelli, S. and Battilani, A. 2000. Use of leaf temperature to evaluate grapevine (*Vitisvinifera*) yield and quality response to irrigation. *Acta Hort.* 537:124-138
- Bautista-Olivas A. L., Tovar-Salinas J. L., Palacios-Vélez O. L., Mancilla-Villa O. R. 2011 La humedad atmosférica como fuente opcional de agua para uso doméstico. *Agrociencia.* 45, 293-301.
- Beven, J.K. 2001. Rainfall-runoff modeling- The primer John Wiley Sons Ltd., Chichester, 319
- Fox, D.G., 1981 Judging air quality model performance: A summary of the AMS workshop on dispersion model performance. *Bull Am. Meteorol. Soc.* 62, 599-609.
- Cai, J.; Yu, L.; Tingwu, L. and Pereira, L. S. 2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology.* Elsevier. 347:169-180.
- Fox, D.G., 1981. Judging air quality model performance. A summary of the AMS Workshop on Dispersion Model Performance *Bull Am. Meteorol. Soc.*, 62, 599-609
- García E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificaciones Climáticas de Köppen. 4ta. Ed. UNAM.México D.F. 217 p.
- Willcott, CJ, Ackleson SG, Davis RE, Feddema JJ, Klink KM, Legates DR, O'Donnell J, Rowe CM., 1985. Statistics for the evaluation of model performance *Journal of geophysical research* 90 (5): 8995-9005

## **CAPITULO II. CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA OBTENIDA POR CONDENSACIÓN DE LA ATMÓSFERA EN TLAXCALA, HIDALGO Y CIUDAD DE MÉXICO**

### **Resumen**

La disponibilidad de agua potable en cantidad y calidad, es un problema grave en el mundo. Hoy en día existen técnicas para obtener agua del aire y mitigar esta situación. Sin embargo, conocer la calidad microbiológica del agua proveniente de la atmósfera resulta relevante, debido al riesgo asociado con la ingesta de agua contaminada con bacterias provenientes de las heces de humanos y animales. No obstante, el diagnóstico de estos microorganismos, requiere de laboratorios especializados y representa varios días de análisis y costos elevados. El objetivo de esta investigación consistió en evaluar la cantidad de colonias de coliformes totales y fecales encontradas en el agua atmosférica condensada utilizando pruebas rápidas. El estudio se realizó en tres zonas: San Felipe Hidalgo, Tlaxcala; Huichapan, Hidalgo y en la Ciudad de México. En cada sitio se tomaron 9 muestras diurnas y 9 nocturnas con tres repeticiones, en dos épocas del año (agosto-septiembre, 2011) y (diciembre-enero 2011-2012). El agua se captó con el prototipo de un aparato denominado higroimán, el cual disminuye la temperatura de la superficie de contacto con el ambiente para inducir el punto de rocío y condensar la humedad de la atmósfera. Se aplicó una prueba de medias (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) en los resultados obtenidos y se compararon con los límites permisibles de agua potable de acuerdo con la OMS. La ciudad de México presentó la mayor cantidad de colonias de coliformes totales y *Escherichia coli* en los dos muestreos. Mientras que Huichapan, Hidalgo presentó la menor cantidad de coliformes totales y fecales. El agua atmosférica en los tres sitios mencionados no se considera potable sin previo tratamiento.

**Palabras clave:** agua atmosférica, *E. coli*, Coliformes fecales, Coligel, agua potable.

## 2.1 Introducción

El agua es una de las principales fuentes de vida en el planeta. Sin embargo, puede ser uno de los principales transmisores de enfermedades si se llega a consumir en estado contaminado (OMS 1995).

La OMS (1994) establece que el agua es apta bacteriológicamente para consumo humano si se encuentra exenta de microorganismos patógenos de origen entérico y parasitario intestinal. Sin embargo, la presencia de coliformes en una muestra de 100 mL no siempre indica que el agua está contaminada con microorganismos patógenos, sino que, en términos estadísticos, su concentración es una característica que alerta sobre la existencia de contaminación fecal y de microorganismos patógenos (Campos 1999). Además, la densidad del grupo de los coliformes es un indicador del grado de contaminación y por lo tanto, de la calidad sanitaria que determina el uso que se le dará al agua (doméstico, industrial, agrícola entre otros) (APHA 2000; Laws 1981; APHA 1989).

Debido a que determinar la presencia de todos los organismos patógenos implicados en la contaminación ambiental es un proceso complicado y costoso, se analizan organismos indicadores de contaminación los cuales tienen un comportamiento similar a los organismos patógenos, siendo la detección más sencilla y económica (UM-FDA 2002).

Los microorganismos indicadores de la calidad de agua, se encuentran en las bacterias del grupo coliformes, que son patógenos de transmisión fecal-oral perteneciendo a este grupo especies como: *Escherichiacoli*, entre otras. Estos organismos generalmente se pueden encontrar en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo (OMS 1995; Pettibone *et al.* 1987; Wyer *et al.* 1995).

Los coliformes fecales también denominados termotolerantes, llamados así porque soportan temperaturas de hasta 45°C, comprenden un grupo reducido de microorganismos los cuales son indicadores de calidad, ya que son de origen fecal (Hayes 1993; Grabow 1996; Ashbolt *et al.* 2001; George 2001; Sueiro 2001).

Este tipo de microorganismos pertenecen al grupo de los coliformes totales, pero se diferencian de los demás, en que son indol positivo, su presencia indica contaminación fecal de origen humano o animal, ya que las heces contienen dichos microorganismos, presentes en la microbiota intestinal y de ellos entre 90 y 100% son *E. coli* (Gómez *et al.* 1999).

Por otro lado, las heces de animales y humanos pueden contaminar el suelo con microorganismos potencialmente patógenos Tallon *et al.* (2005), existe la posibilidad de que sean suspendidos posteriormente en la atmósfera. Incluso en diversas muestras de polvo urbano de la Ciudad de México se ha aislado la bacteria *Escherichia coli*, indicadora de contaminación fecal, que constituye 40% del total de bacterias coliformes aisladas en el polvo (Rosas *et al.* 1997) lo que indica un riesgo potencial de contaminación por ésta y otras bacterias patógenas, así como por virus o parásitos.

Fuzzi *et al.* (1997) mencionan que las bacterias que se encuentran en el aire se asocian con los núcleos de condensación y congelación, por lo que la presencia de los indicadores de contaminación fecal en el agua atmosférica resulta evidente. Además, la concentración de microorganismos aumenta durante la época de secas, debido al transporte convectivo de las partículas provenientes de las superficies secas y durante la época de lluvias su número disminuye significativamente debido al lavado de la atmósfera (OPS 1997).

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue detectar y cuantificar la cantidad de coliformes totales y fecales en el agua atmosférica captada con un condensador de la humedad atmosférica para evaluar la calidad bacteriológica en tres sitios de estudio.

## 2.2 Materiales y métodos

La investigación se efectuó en tres sitios: San Felipe Hidalgo, Tlaxcala, se localiza a 19° 29' 34.14" N, 98°35'51.73" O (**Figura. 2.1**), con una altitud de 2 920 m, temperatura media anual de 13.9 °C, precipitación promedio anual de 1 133.7 mm y clima C(w<sub>2</sub>)(w)big; Huichapan, Hidalgo, a 20°22'06.31" N, 99°39'00.56" O, una altitud de 2 131 m , temperatura y precipitación media anual de 16 °C y 437 mm, y clima BS<sub>1</sub>kw''(w)(i')g; Ciudad de México, a 19° 24' 26.51" N, 99°08'36.95." O, una altitud 2 233m, temperatura y precipitación promedio anual de 16.5 °C y 573 mm, y clima BS<sub>1</sub>kw(w)(i') (García 1988).

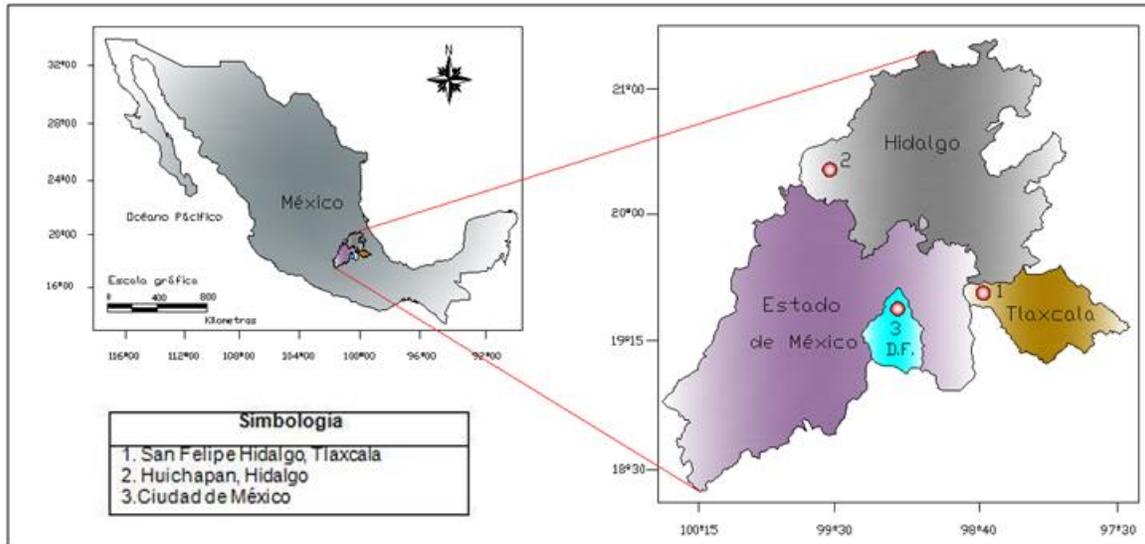


Figura. 2.1. Localización de la zona de estudio.

### Obtención de muestras de agua.

El agua condensada de la humedad atmosférica se obtuvo con un prototipo de higroimán que atrapa el vapor de agua presente en la atmósfera, similar al propuesto por Bautista *et al.* (2011). Con la diferencia que este nuevo condensador higroimán modelo CP-HI-04 tiene un ventilador que inyecta aire a un tanque e induce el punto de rocío del aire del tanque condensando en una superficie de contacto (**Figura 2. 2**). Previo a la toma de muestras, se aplicó aire a presión para la limpieza del higroimán además de esterilizar la superficie de contacto del agua atmosférica con una lámpara de luz ultravioleta a 260 nm. La humedad relativa y temperatura se midieron con una mini estación Watch Dog serie 1000, la cual se programó para medir estas variables cada hora y se obtuvo un promedio de las horas en que se tomaron las muestras diurnas y nocturnas del agua atmosférica.



Figura. 2.2. Prototipo del higroimán CP-HI-04

## **Muestreo**

Para analizar el agua atmosférica se realizaron dos muestreos: el primero en época de lluvias (agosto y septiembre de 2011) y el segundo en época de secas (diciembre de 2011 y enero de 2012). Por cada sitio y época del año se muestreó durante 9 días con sus noches con un horario de 8:00 a las 20:00 h y de 20:30 a 7:30 h respectivamente, condensando aproximadamente 2 L de agua atmosférica por horario, obteniendo 2 muestras por día. Cada muestra se obtuvo por triplicado y un blanco para garantizar la veracidad de la prueba. Dando un total de 18 muestras triples por sitio con sus respectivos blancos. Como resultado de este trabajo se tomaron un total de 108 muestras.

## **Material utilizado para la prueba microbiológica**

Con el objetivo de detectar y cuantificar la presencia de coliformes totales y *E. coli* en el agua atmosférica se utilizó una prueba microbiológica de detección rápida, llamada Coligel, la cual está reconocida internacionalmente para obtener los mismos resultados que aplicando la técnica del número más probable en unidades formadoras de colonias (UFC) por 100 mL (Montville y Matthews 2005).

Este medio de cultivo se aprueba como una prueba de la de detección y cuantificación de Coliformes totales y *E. coli* bajo la regulación de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 1999). Para realizar esta prueba se agregan 100 mL de la muestra de agua sin ninguna preparación, la bolsa de la prueba actúa como envase de muestra, posteriormente se enrolla el sobrante de la bolsa y se impulsa el agua hasta romper el contenedor donde se encuentra el medio de cultivo.

El ColiGel cuenta con un gelificante capaz de provocar que las colonias de bacterias formen puntos visibles para la lectura de los resultados, después de incubar a 35°C por 21 h la bolsa de prueba, detecta hasta una colonia de coliformes totales en forma de manchas de color azul y después de 7 h más de incubación detecta *E. coli* fecales siempre y cuando, se observen manchas azules fluorescentes bajo luz ultravioleta. Siendo el número de manchas igual al número de coliformes totales y fecales en una muestra de 100 mL de agua.

### **Análisis de resultados**

La información sobre la cantidad de coliformes totales y *E. coli* se comparó con los lineamientos estipulados por la OMS (1994) donde se menciona que no debe de existir ninguna colonia en una muestra de agua de 100 mL para considerar un agua apta para consumo humano. A las variables de humedad relativa y temperatura y al número de microorganismos que se obtuvieron en este trabajo se aplicó un análisis de covarianza. Además, se aplicó la técnica de Tukey para determinar si hay diferencia significativa en el contenido de coliformes totales entre los 3 sitios de estudio, entre época del año y entre horario (diurno, nocturno).

### **2.3 Resultados y discusión**

Debido a que cada día es un evento independiente, con respecto al comportamiento de las variables de humedad relativa y temperatura, se consideró necesario tomar los datos promedio diurnos y nocturnos de cada sitio y en cada época (seca y lluvias), cuando se recolectaron las muestras de agua atmosférica que se presentan en los **Cuadros 2.1, 2.2, 2.3y2.4.**

Cuadro 2.1. Promedio de la humedad relativa y temperatura (8:00 a 20.00 h) de la época de lluvias en los tres sitios de estudio.

Número de muestra	Fecha	San Felipe Hidalgo, Tlaxcala		Fecha	Huichapan, Hidalgo		Fecha	Ciudad de México	
		Humedad Relativa %	Temperatura °C		Humedad Relativa %	Temperatura °C		Humedad Relativa %	Temperatura °C
1	14-14 agosto 2011	53.88	17.51	24-24 agosto 2011	40.16	23.41	16-16 sep 2011	32.68	27.71
2	15-15 agosto 2011	59.95	17.23	25-25 agosto 2011	51.04	21.82	17-17 sep 2011	40.73	23.33
3	16-16 agosto 2011	56.28	17.89	26-26 agosto 2011	58.7	21.53	18-18-sep 2011	28.77	27.09
4	17-17 agosto 2011	55.24	17.42	27- 27 agosto 2011	64.9	19.64	19-19 sep 2011	29.83	26.21
5	18-18 agosto 2011	54.2	19.59	28-28 agosto 2011	42.84	24.32	26-26 sep-2011	31.1	25.35
6	19-19 agosto 2011	58.74	15.19	29-29 agosto 2011	43.08	23.52	27-27 sep 2011	38.81	22.84
7	20- 20 agosto 2011	62.34	16.43	30-30 agosto 2011	50.82	22.16	28-28 sep 2011	45.32	19.76
8	21-21 agosto 2011	56.08	17.75	31-31 agosto 2011	41.42	23.89	29-29 sep 2011	40.17	20.23
9	22-22 agosto 2011	63.01	15.06	1-1 septiembre 2011	43.24	23.94	30-30 sep 2011	37.56	23.29

Cuadro 2.2. Promedio de la humedad relativa y temperatura (20:30 a 7:00 h) de la época de lluvias en los tres sitios de estudio.

Número de muestra	Fecha	San Felipe Hidalgo, Tlaxcala		Fecha	Huichapan, Hidalgo		Fecha	Ciudad de México	
		Humedad Relativa %	Temperatura °C		Humedad Relativa %	Temperatura °C		Humedad Relativa %	Temperatura °C
1	14-15 agosto 2011	64.32	10.31	24-25- agosto 2011	57.94	18.15	16-17 sep-2011	58.97	18.35
2	15-16 agosto 2011	74.15	8.87	25-26 agosto 2011	67.6	17.28	17-18 sep-2011	62.1	16.23
3	16-17 agosto 2011	75.75	9.02	26-27 agosto 2011	75.77	17.04	18-19 sep-2011	52.27	16.55
4	17-18 agosto 2011	69.44	10.61	27- 28 agosto 2011	55.16	18.16	25-26 sep-2011	35.61	19.15
5	18-19 agosto 2011	73.03	10.28	28-29 agosto 2011	59.27	18.6	26-27 sep-2011	40.36	18.64
6	19-20 agosto 2011	71.29	10.08	29-30 agosto 2011	70.79	17.01	27-28 sep-2011	55.98	16.24
7	20-21 agosto 2011	64.46	9.40	30-31 agosto 2011	59.33	17.92	28-29 sep-2011	57.52	15.17
8	21-22 agosto 2011	78.60	8.81	31 ag.-1 sep. 2011	54.23	19.7	30 sep-1 Oct-2011	55.67	16.33
9	22-23 agosto-2011	76.72	8.90	1-2 sep-2011	71.2	17.03	1-2 oct-2011	60.1	15.6

Cuadro 2.3. Promedio de la humedad relativa y temperatura (8:00 a 20.00 h) de la época de secas en los tres sitios de estudio.

Número de muestra	Fecha	San Felipe Hidalgo, Tlaxcala		Fecha	Huichapan, Hidalgo		Fecha	Ciudad de México	
		Humedad Relativa %	Temperatura °C		Humedad Relativa %	Temperatura °C		Humedad Relativa %	Temperatura °C
1	8-8 dic. 2011	41.20	11.76	16-16 dic. 2011	45.23	16.23	14-14 enero-2011	38.69	18.49
2	9-9 dic. 2011	40.20	12.62	17-17 dic. 2011	36.03	17.77	15-15 enero-2011	44.01	19.87
3	10-10 dic. 2011	42.99	10.62	18-18 dic. 2011	40.61	16.4	16-16 enero-2011	39.97	18.81
4	11-11 dic. 2011	43.37	11.37	19-19 dic. 2011	42.1	15.67	17-17 enero 2011	37.06	19.65
5	12-12 dic. 2011	44.55	11.12	20-20 dic. 2011	39.2	16.7	18-18-enero-2011	34.24	20.47
6	13-13 dic. 2011	41.10	13.32	21-21 dic. 2011	41.02	17.54	19-19-enero-2011	32.05	20.84
7	14-14 dic. 2011	39.70	13.10	22-22 dic. 2011	45.12	15.98	20-20 enero 2011	25.13	22.76
8	15-15 dic. 2011	42.87	11.48	23-23 dic. 2011	37.83	16.89	21-21 enero 2011	18.22	26.88
9	16-16 dic 2011	40.91	10.41	24-24 dic. 2011	42.45	17.45	22-22 enero 2011	30.81	24.25

Cuadro 2.4. Promedio de la humedad relativa y temperatura (20:30 a 7:00 h) de la época de secas en los tres sitios de estudio.

Número de muestra	Fecha	San Felipe Hidalgo, Tlaxcala		Fecha	Huichapan, Hidalgo		Fecha	Ciudad de México	
		Humedad Relativa %	Temperatura °C		Humedad Relativa %	Temperatura °C		Humedad Relativa %	Temperatura °C
1	8-9 dic. 2011	55.03	2.64	16-17 dic. 2011	61.83	11.02	13-14 enero 2011	35.5	13.11
2	9-10 dic. 2011	48.1	9.79	17-18 dic. 2011	50.12	12.55	14-15 enero 2011	57.64	12.4
3	10-11 dic. 2011	55.16	4.05	18-19 dic. 2011	63.85	11.04	15-16 enero-2011	41.53	19.31
4	11-12 dic. 2011	57.02	2.78	19-20 dic. 2011	59.03	12.06	16-17 enero 2011	41.17	19.57
5	12-13 dic. 2011	50.28	7.14	20-21 dic. 2011	49.1	10.09	17-18 enero 2011	36.25	20.76
6	13-14 dic. 2011	47.09	4.90	21-22 dic. 2011	63.12	10.20	18- 19 enero 2011	35.19	21.19
7	14-15 dic. 2011	57.28	3.87	22-23 dic. 2011	60.09	12.43	19-20 enero 2011	32.66	21.61
8	15-16 dic. 2011	58.11	5.20	23-24 dic. 2011	57.23	10.98	20-21 enero 2011	41.8	13.79
9	16-17 dic 2011	57.04	5.7	24-25 dic 2011	59.11	11.03	21-22 enero 2011	38.27	13.7

Al hacer un análisis de covarianza, entre la humedad relativa y la temperatura con los datos de coliformes totales en los tres sitios de estudio, indica que estos dos factores no explican el número de microorganismos obtenidos del agua atmosférica.

Sin embargo, al estudiar la correlación entre la temperatura y el número de coliformes totales en las muestras de agua atmosférica del sitio de San Felipe Hidalgo, Tlaxcala, en los datos de la época de secas y lluvia en los turnos diurnos y nocturno se obtiene cierta relación confirmada por el p-valor que se obtiene indicando que hay una significativa regresión lineal, confirmada por el coeficiente de determinación igual a  $r^2 = 0.3521$ .

Por otro lado, al analizar la temperatura de la época de lluvias (turno diurno y nocturno) así como en la época de secas (turno diurno y nocturno) con los coliformes totales se obtuvo que en el sitio de San Felipe Hidalgo, Tlaxcala, presentó los p-valor de 0.02 y 0.03, así como los coeficientes de determinación de 0.2712 y 0.2403. Lo que indica que la temperatura influye de alguna manera en la cantidad de microorganismos en el agua.

En cuanto a Huichapan, Hidalgo y la Ciudad de México los resultados de la correlación de la época de lluvias y secas en ambos turnos, los p-valores y el coeficiente de determinación no señalan relación entre la temperatura y los microorganismos en el agua.

Por otra parte, se observa en las **Figura 2.4, 2.5y2.6**, que en los tres sitios de estudio hubo presencia de coliformes totales y fecales. En San Felipe Hidalgo, Tlaxcala en 100 y 69.4% de la muestras de agua se presentaron coliformes totales y *E. coli*. En 50 y 22% de las muestras de Huichapan, Hidalgo hay presencia de coliformes y *E. coli* respectivamente. En el caso de la Ciudad de México en 100% de las muestras se presentan coliformes totales y *E. coli*. Al agua atmosférica de estos tres sitios es necesario aplicarle algún método de desinfección para que sea bacteriológicamente apta para consumo humano.

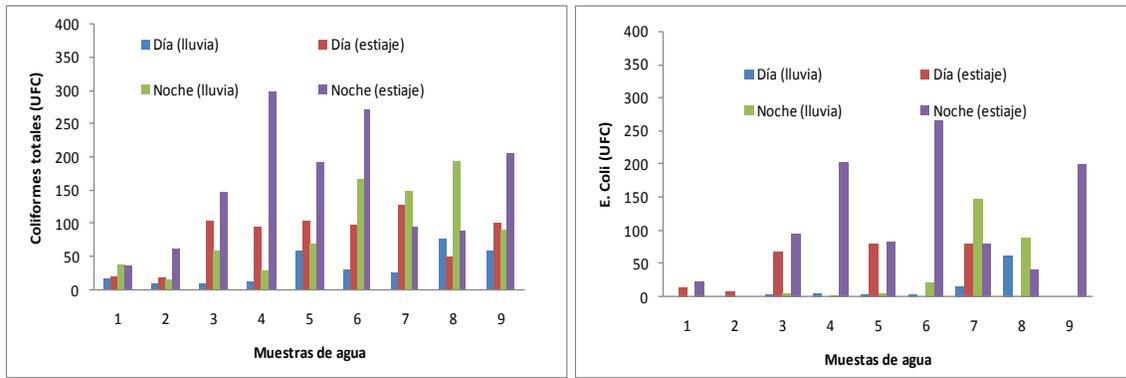


Figura. 2.4. Presencia de Coliformes totales (izquierda) y E. coli (derecha) en los dos muestreos de agua atmosférica condensada en San Felipe Hidalgo, Tlaxcala en muestras de 100 mL.

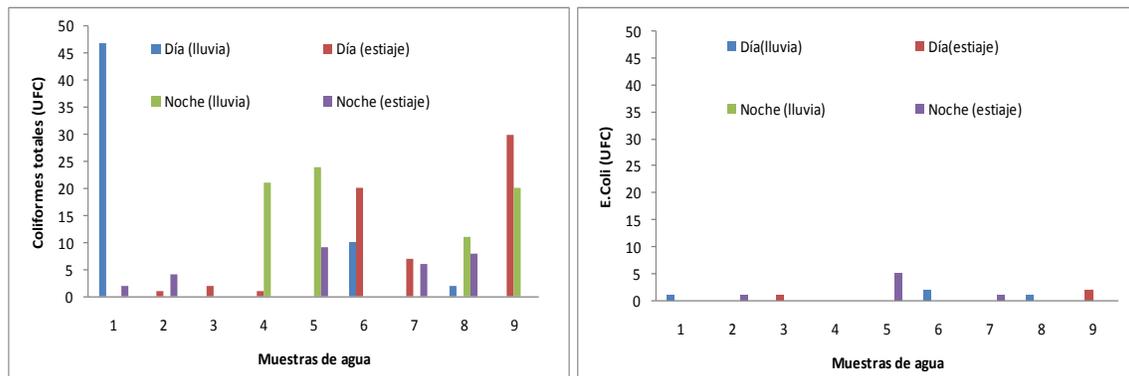


Figura. 2.5. Presencia de Coliformes totales (izquierda) y de E. coli (derecha) en los dos muestreos de agua atmosférica condensada en Huichapan, Hidalgo en muestras de 100 mL.

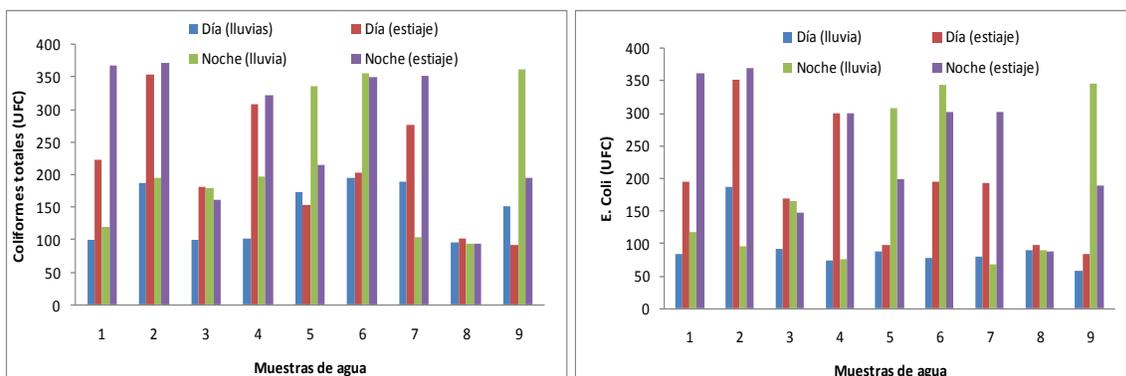


Figura. 2.6. Presencia de Coliformes totales (izquierda) y de E. coli (derecha) en los dos muestreos de agua atmosférica condensada en la Ciudad de México en muestras de 100 mL.

Del total de las muestras de agua atmosférica de San Felipe Hidalgo, Tlaxcala, el 5.5, 61.1 y 33.4% se clasifican como agua de bajo, intermedio y alto riesgo respectivamente. Mientras que el agua de Huichapan se clasifica en 55 y 45% en bajo e intermedio riesgo. Para la Ciudad de México 86.12 y 13.88% de las muestras son de alto e intermedio riesgo para la salud. Por lo que Huichapan, Hidalgo es el sitio donde hay menor concentración de coliformes totales en las muestras colectadas.

A pesar de que San Felipe Hidalgo, Tlaxcala se caracteriza por ser una zona boscosa y con escasa urbanización se observa presencia de coliformes totales y *E. coli* en las muestras de agua atmosférica. Esto se puede explicar por la cercanía de un relleno sanitario en el Municipio de Nanacamilpa, además de la colindancia con la Ciudad de México y el Estado de México donde se presenta el fecalismo canino en las calles con mayor densidad que en San Felipe, Tlaxcala, y estos contaminantes son transportados por las corrientes de aire. Considerando el **Cuadro 2.5**, se corrobora que el consumo del agua condensada en este sitio sería de alto riesgo para la salud humana.

Cuadro 2.5. Clasificación de los coliformes totales en las fuentes de agua.

Número de Coliformes totales en 100 mL de agua	Observación
0.0	Cumple con las normas de la OMS
1.0 -10.0	Bajo riesgo para la salud
10.0-100.0	Riesgo intermedio
100.0-1000.0	Alto riesgo
>1000.0	Muy alto riesgo

Fuente: (WHO, 1997)

En el **Cuadro 2.6** se observa la concentración de coliformes totales en el sitio de San Felipe Hidalgo, Tlaxcala; en este sitio hay diferencias significativas en las muestras tomadas en el horario diurno y nocturno en época de secas. Mientras que en la época de lluvia la concentración de las colonias guarda cierta relación con los datos obtenidos en la época de secas (AB). La concentración máxima de *E. coli* se obtuvo en la época de secas y por la noche (109.4 UFC) y este es diferente significativamente al resto de los resultados del muestreo en este sitio.

En la zona de Huichapan, Hidalgo la concentración de coliformes totales y *E. coli* no indican diferencias significativas entre las épocas y los horarios de muestreo. Además el agua de la atmosfera es de bajo riesgo para la salud (WHO 1997). Esto se explica por las características de planicie que tiene esta zona por donde corre libremente el aire dispersando los contaminantes, además de ser una ciudad con baja cantidad de población canina en las calles y se encuentra a distancias importantes de rellenos sanitarios u otro tipo de foco de contaminación atmosférica.

En la Ciudad de México, en el comportamiento de los coliformes totales y *E. coli*, se observa que hay diferencias significativas entre las dos épocas de muestreo y entre el horario diurno y nocturno (letra A y B), y guarda cierta relación con los resultados obtenidos de Coliformes totales y *E. coli* en la época de secas en el sitio de San Felipe Hidalgo, Tlaxcala.

Esto se puede explicar, debido a que el Distrito Federal se caracteriza por ser una cuenca cerrada, rodeada por una cadena montañosa, que constituye una barrera natural que dificulta la libre circulación del viento y la dispersión de los contaminantes. Aunado a lo anterior, la 36 ton de heces fecales diarias producidas por la población canina en la vía pública de la ciudad (Promoción-salud, 2013), generan partículas suspendidas con un alto contenido de coliformes totales y otro tipo de bacterias lo que se ve reflejado en los resultados obtenidos en las muestras de agua atmosférica.

Cuadro 2.6. Diferencias significativas de coliformes totales y e. Coli entre cada muestreo.

Sitio	Coliformes totales				E. Coli			
	Lluvia		Secas		Lluvia		Secas	
	Día	Noche	Dia	Noche	Día	Noche	Dia	Noche
San Felipe Hidalgo, Tlaxcala	32.2 d	89.5 dc	79.6 dc	154.7 bc	10.4 cd	30 cd	27.6 cd	109.4 bc
Huichapan, Hidalgo	6.5 d	8.4 d	6.7 d	3.2 d	0.4 d	0.0 d	0.3 d	0.77 d
Ciudad de México	144.0 bc	215.8 ab	210.1 ab	270.1 a	92 b	178 ab	186.4 ab	250.4 a
	*DMS =100.4				*DMS=98.1			

\*DMS=Diferencia mínima significativa

En el **Cuadro 2.6** se observa que el menor contenido de coliformes totales y de *E. coli* (UFC) se encuentra en la época de lluvias, debido a que las precipitaciones provocan lavado troposférico lo que se ve reflejado en los resultados de este estudio.

Otro factor en la concentración de UFC en época de secas es la inversión térmica que provoca una mayor concentración de UFC. En la ciudad de México las inversiones térmicas son un fenómeno natural que se presenta con mayor frecuencia en los meses de noviembre a abril, lo que se aprecia en los resultados de este trabajo en relación con la concentración de coliformes totales.

Asimismo, las concentraciones de coliformes totales en San Felipe Hidalgo, Tlaxcala indican que no hay diferencias significativas entre las dos épocas analizadas. Por otro lado, este lugar no presenta diferencias en obtener agua en época de lluvias o secas. No obstante, la Ciudad de México sí muestra las diferencias entre las dos épocas de estudio.

El comportamiento de las diferencias entre época de estudio y horario en la concentración de coliformes totales es similar a las muestras diurnas en Huichapan, Hidalgo. Sin embargo, en los resultados de la Ciudad de México no hay diferencia significativa en muestrear en época de lluvias y secas.

La concentración de *E. coli* indica que en la Ciudad de México entre las dos épocas del muestreo hay diferencias y el resto de los datos se pueden considerar significativamente iguales.

Por último, se observa que hay diferencias entre los sitios de estudio. Sin embargo, entre la época de lluvias y secas en que se tomaron los datos por sitio, no hay diferencias significativas y los resultados de la época de secas de San Felipe Hidalgo, Tlaxcala son similares con los de la época de lluvia de la Ciudad de México.

## **2.4 Conclusiones**

En los tres sitios de estudio se encontró contaminación por coliformes totales y fecales. Huichapan, Hidalgo fue el sitio donde hubo muestras con ausencia de UFC de coliformes totales y fecales.

Los niveles de contaminación de origen fecal hacen necesario un estricto control de la calidad microbiológica del agua atmosférica.

El agua condensada de la humedad atmosférica representa una alternativa viable como agua para consumo humano aplicándole algún método de desinfección.

## 2.5 Literatura Citada

- APHA (1989). Standard methods for the examination of water and wastewater. 17a. ed. 1220 pp
- APHA (2000). Métodos normalizados para el análisis de agua potable y residual. 17 Edición. Editorial Díaz de Santos. Madrid, España 1147 pp.
- Ashbolt N.J., Grabow W. y Snozzi M. (2001). Indicators of microbial water quality. Water quality: Guidelines, standards and health –Assessment of risk and risk management for water-related infectious disease. Londres (Reino Unido), IWA Publishing, 289–315.
- Bautista O. A., Tovar S.J., Palacios V. O. y Mancilla V. O. (2011). La humedad atmosférica como fuente opcional de agua para uso doméstico. *Agrociencia* 45, 293-301.
- Campos C. (1999). Indicadores de contaminación fecal en la reutilización de aguas residuales para riego agrícola. Tesis doctoral. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona. 250 pp.
- Fuzzi S., Mandreoli P. y Perferetto, A. (1997). Fog droplets an atmospheric source of secondary biological aerosol particles. *Atmos. Environ. Elsev.* 31, 267-290.
- García E. (1988). Modificaciones al Sistema de Clasificaciones Climáticas de Köppen. 4a. Ed. UNAM. Méx. D.F. 217 pp.
- George I. (2001). Use of rapid enzymatic assays to study the distribution of faecal coliforms in the Seine river (France). *WST* 43, 77-80.
- Gómez M., Peña P. y Vázquez M. (1999). Determinación y diferenciación *Escherichia coli* y coliformes totales usando un sustrato cromógeno. Laboratorio Centra. Aquzgest. Galicia, España.
- Grabow W. (1996). Waterborne diseases: Update on water quality assessment and control. *water SA.* 22,193–202.
- Hayes (1993). Microbiología e higiene de los alimentos. Acribia. Zaragoza, España.
- Laws E.A. (1981). Aquatic Pollution. Wiley, Nueva York, 482 pp.

- Montville T.J. and Matthews K.R. (2005). Food Microbiology An introduction Second edition.
- OMS (1994). Lineamientos del agua potable (En línea) [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/GDWAN4rev1and2.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/GDWAN4rev1and2.pdf) 2/01/2012.
- OMS (1995). Guía sobre los requisitos de las prácticas adecuadas de fabricación segunda parte, validación Ginebra. Resolución 2115, 2007.
- OPS (1997) Guías para la calidad del agua potable. Vol. 2, criterios relativos a la salud y otra información base. Organización Mundial de la Salud, Publicación Científica N° 506 Washington D.C.
- Pettibone G.W., Sullivan S.A. y Shiaris M.P. (1987). Comparative Survival of antibioticresistant and sensitive fecal indicator bacteria in estuarine water. Appl. Environ. Microbiol. 53, 1241-1245.
- Rosas I., Salinas E., Yela A., Calva E., Eslava C. y Cravioto A. (1997). *Escherichia coli* in settled dust and air samples collected in residential environments in Mexico city. Applied Environ. Microbiol. 63, 4093-4095.
- Promoción salud (2013) (en línea) <http://www.promocion.salud.gob.mx/cdn/?p=3614>. 16/04/2013.
- Sueiro R.A. (2001). Evaluation of Coli-ID and MUG Plus media for recovering *Escherichia coli* and other coliform bacteria from groundwater samples. WST 43, 213–216.
- Tallon P., Magajna, B., Lofranco C. and Leung K.T. (2005). Microbial indicators of faecal contamination in water: a current perspective. Water, Air, and Soil Pollut. 166, 139-166.
- UM-FDA (2002). Buenas Prácticas Agrícolas. Sección II. (En línea) [http://jifsan.umd.edu/pdf/gaps\\_es/SECCI\\_N\\_II.pdf](http://jifsan.umd.edu/pdf/gaps_es/SECCI_N_II.pdf) 10/1/2012
- WHO (1997). Guidelines for Drinking Water Quality. (En línea) [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/fulltext.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/fulltext.pdf) 15/2/2012.
- Wyer M.D., Kay D., Jackson G.F., Dawson H.M., Yeo J. y Tanguy L. (1995). Indicator organism sources and coastal water quality: a catchment study on the island of Jersey. J. Appl. Bacteriol. 78, 290-296.

### **CAPITULO III. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA CONDENSADA DE LA ATMÓSFERA EN SAN FELIPE HIDALGO, TLAXCALA, HUICHAPAN, HIDALGOY CIUDAD DE MÉXICO, D.F**

#### **Resumen**

Los estudios sobre la composición química del agua atmosférica son relevantes por considerar el agua obtenida del aire como una opción más para mitigar la escasez de este vital líquido. Sin embargo, es necesario garantizar que esta agua tenga la calidad suficiente para ser empleada sin comprometer la salud de quien la utilice. Por lo anterior, el objetivo general de esta investigación fue evaluar la calidad del agua obtenida de la atmósfera, determinando los siguientes metales pesados (Al, As, Ba, Cu, Cd, Cr, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn) así como pH y CE, aniones (Cl, CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>) y cationes (Na, K, Ca y Mg) en el agua condensada de tres sitios de estudio: San Felipe Hidalgo, Tlaxcala, Huichapan, Hidalgo y Ciudad de México y analizar las diferencias que hay entre cada sitio, época de muestreo y horario en que se tomaron las muestras de agua. El agua se obtuvo con un prototipo que induce el punto de rocío para condensar la humedad atmosférica, en dos épocas del año: época de lluvias (agosto-septiembre 2011) y época de secas (diciembre-enero 2011-2012). Por cada sitio (3) y época del año (2) se tomaron: nueve muestras por duplicado, 2 de 1 litro, por cada turno (diurno y nocturno). El número de muestras fue de 216 en todo el estudio. Los metales pesados se analizaron con un ICP (“Espectrofotómetro de plasma acoplado inductivamente”) Perkin Elmer Optima 5300 utilizándose la metodología recomendada por la EPA (Environmental Protection Agency) y APHA (American Public Health Association). Los aniones y cationes con un IC (“Cromatógrafo Ionico”). El pH y CE con un potenciómetro/conductímetro marca Beckman, modelo Hoffman Pinther Boswork.

**Palabras Clave:** Metales pesados, condensación de agua, calidad de agua

### 3.1 Introducción

La composición química del agua atmosférica es el conjunto de sustancias generalmente inorgánicas (gases, aerosoles, polvo y sales diversas) presentes en la atmosfera que se incorporan al agua de forma natural por su elevado poder disolvente y a sus propiedades de combinación (Ramos et al., 2003).

Según Wetzel, (1981) las especies iónicas en orden de abundancia presentes en el agua atmosférica son las siguientes:  $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+$ . No obstante, Domènech y Peral, (2006) indican que este orden es cierto cuanto mayor sea la influencia de las aguas marinas, en zonas continentales, lejos de la influencia de mares y océanos, los iones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , y  $\text{Mg}^{2+}$  suelen ser los predominantes.

Los primeros estudios sobre la composición química del agua de la niebla se realizaron en la montaña Geising, al este de Ergebirge, Alemania en las décadas de 1950 (Mrose, 1961). Besler, (1972) reporta que se han encontrado altas concentraciones iónicas en el agua de niebla que se utiliza como fuente alternativa de agua para consumo humano en el Desierto central de Namibia, en el continente de África.

Igawa, *et al.* (1998) mencionan que la concentración de iones en el agua de niebla depende de la concentración de contaminantes en el aire y de la altitud del sitio. Además Schemenauer y Cereceda (1992), Muselli *et al.* (2006) y Gandhidasan y Abualhamayel (2007) dicen que además de los factores mencionados, depende del material donde se condense la humedad atmosférica. Jacob *et al.* (1985) y Fuzzi *et al.* (1984) señalan que la temperatura del aire y la radiación solar influyen en la concentración de los compuestos químicos en el agua atmosférica.

Por otro lado, las ciudades industrializadas y con una alta densidad de población tienen un efecto adverso sobre la química de la precipitación (Nriagu, 1996; Padilla, 1989). Muchos agentes contaminadores de aire se depositan en las gotitas de la niebla, además la deposición del nitrógeno en esta agua está en los mismos niveles que el agua de lluvia (Igawa, *et al.* 1998).

En México, se tienen pocos estudios que evalúen la composición química del agua condensada de la atmosfera. Por lo que el objetivo de este estudio fue conocer la concentración de los siguientes metales pesados totales: Al, As, Ba, Cu, Cd, Cr, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn) así como pH, CE, aniones ( $\text{Cl}$ ,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ) y cationes (Na, K, Ca y Mg)

en San Felipe Hidalgo, Tlaxcala; Huichapan, Hidalgo y Ciudad de México, con el fin de tener un marco de referencia de las diferencias significativas de condensar agua obtenida de la humedad atmosférica en distintas zonas y épocas del año.

### **3.2 Materiales y métodos**

#### **Área de estudio**

El presente trabajo se realizó en tres sitios: 1) San Felipe Hidalgo, Nanacamilpa Tlaxcala, latitud norte 19° 29' 34.14", longitud oeste 98°35'51.73", altitud 2920 m; 2) Huichapan, Hidalgo, latitud norte 20°22'06.31", longitud oeste 99°39'00.56", altitud 2131 m; 3) Ciudad de México, latitud norte 19° 24' 26.51", longitud oeste 99°08'36.95.", altitud 2233m

#### **Obtención de muestras de agua**

Las muestras de agua atmosférica se obtuvieron con un prototipo que atrapa la humedad atmosférica para condensarla, modificación del modelo CP-HI-03 (Bautista-Olivas, *et. al.* 2011). Este nuevo diseño tiene un ventilador que inyecta aire a un tanque esto junto con el sistema de refrigeración induce el punto de rocío de la humedad atmosférica condensada en el evaporador obteniendo agua del aire.

#### **Época del muestreo**

El muestreo de agua se llevó a cabo en dos épocas del año, lluvias (agosto y septiembre 2011) y secas (diciembre y enero 2011-2012). Por cada sitio (3) y época del año (2) se tomaron: nueve muestras dobles por cada turno (diurno y nocturno). El número de muestras fue de 216, en todo el estudio.

#### **Conservación de muestras**

Las muestras de agua se guardaron en recipientes de polipropileno de alta densidad de 100 mL. A 108 de las muestras se les agregó ácido nítrico concentrado a  $\text{pH} < 2$ , para evitar la precipitación de los elementos pesados (EPA, 1983), para determinar los metales pesados totales (Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn). El resto de ellas, sin ningún tratamiento previo, se utilizaron para medir pH, CE, aniones ( $\text{Cl}$ ,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ) y cationes (Na, K, Ca y Mg) se colocaron en hieleras junto con las otras muestras para transportarlas al laboratorio con base en los lineamientos de EPA (1983) y APHA (1995).

### **Determinación de la composición química**

En la determinación de los metales traza Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn, se empleó un espectrofotómetro de plasma acoplado inductivamente Perkin-Elmer 5300 Optima, cabe mencionar que para asegurar la confiabilidad de los resultados de metales traza se utilizó un blanco, es decir bidestilada. Para el pH y CE un potenciómetro/conductímetro marca Beckman, modelo Hoffman Pinther Boswork y los aniones y cationes se utilizó un IC (“Cromatógrafo Ionico”) del IC, en el laboratorio de Ciencias Ambientales del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

Para garantizar la calidad de la calibración y la eficiencia del ICP durante el análisis de los metales traza, se consideraron muestras control en las que se obtuvieron los siguientes valores de recuperación: Al, 99.4%; As, 98.27%; Ba, 98.7%; Cd, 100.35%; Cr, 107.29%; Cu, 99.25 %; Fe, 106.29%; Hg, 106.15%; Mn, 96.4%; Pb, 98.83 y Zn, 98.21%. Dichos porcentajes se encuentran dentro del rango +/- 10%, lo que indica que no hubo interferencia en la determinación de los metales traza en las muestras analizadas (EPA, 1996).

### **Análisis de resultados**

La información obtenida se comparó con los lineamientos estipulados por la OMS (1994) donde se menciona los límites máximos permisibles para considerar un agua apta para consumo humano. Además, se aplicó la técnica de Tukey para determinar si hay diferencia significativa en el contenido de los metales traza Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn, así como el pH entre los 3 sitios de estudio, entre época del año y entre horario (matutino, nocturno).

### **3.3 Resultados y discusión**

En el Cuadro 3.1, se presentan los resultados de los pH medidos en las muestras de agua en los tres sitios de estudio. Los datos presentaron diferencia significativa entre sitios y en épocas del año excepto para Huichapan donde los pH fueron estadísticamente iguales.

Al observar los resultados en las 2 épocas del año donde se obtuvieron las muestras de la atmósfera, el pH se encuentra en los tres sitios de estudio con una tendencia de ser alcalino, lo que difiere de los resultados obtenidos en las muestras de niebla en la montaña Oyama en el trabajo presentado por Igama *et al.* (1998).

Cuadro 3.1. pH de las muestras de agua atmosférica en época de lluvias y secas considerando el turno diurno y nocturno.

Sitio	Lluvia	Lluvia	Secas	Secas
	matutino	nocturno	matutino	nocturno
pH				
San Felipe Hidalgo, Tlaxcala	7.29 bc	7.15 c	7.89 ab	7.90ab
Huichapan, Hidalgo	8.29 a	8.08 a	8.14 a	8.15 a
Ciudad de México	7.90ab	7.82 abc	8.25 a	7.91 ab

\* DMS= 0.7048

\*\*Las letras significan el resultado de la aplicación de la prueba de Tukey y medias con distinta letra son significativamente diferentes.

En el Cuadro 3.2, se presentan los resultados de la CE determinada en las muestras de agua condensada. El rango de CE para San Felipe Hidalgo, Tlaxcala fue de 45.87 a 473.22  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , para Huichapan, Hidalgo fue de 312.13 a 541.67  $\mu\text{S cm}^{-1}$  y para la Ciudad de México el rango fue de 287.00 a 588.22  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

En los tres sitios de estudio la CE se incrementó en época de secas, las diferencias significativas se presentaron para todos los sitios, en las dos épocas del año, excepto para San Felipe Hidalgo que presentó valores de CE estadísticamente iguales en época de lluvias en turno matutino y nocturno, así como valores sin diferencia significativa en época de secas para los turnos respectivos. Lo anterior puede deberse a la intensa contaminación ambiental en los sitios urbanos, en este caso Huichapan, Hidalgo y el centro de la Ciudad de México, que en épocas de lluvia se genera un lavado atmosférico a los contaminantes al precipitar junto con el agua pluvial. Mientras que para el caso de San Felipe, Tlaxcala, las condiciones atmosféricas no representan cambios significativos en cuanto a la cantidad de contaminantes, tanto en época de lluvias como en época de secas.

El pH del agua condensada de la atmósfera en los tres sitios de estudio son neutros y alcalinos por la presencia de carbonatos y bicarbonatos que neutralizan la acidez.

Cuadro 3.2. Diferencias significativas de la CE en las muestras de agua atmosférica en época de lluvias y secas considerando el turno diurno y nocturno.

Sitio	Lluvia	Lluvia	Secas	Secas
	matutino	nocturno	matutino	nocturno
CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )				
San Felipe Hidalgo,				
Tlaxcala	64.27 d	45.87 d	473.22 ab	465.69 ab
Huichapan, Hidalgo	347.34 bc	312.13 c	376.56 bc	541.67 a
Ciudad de México	287.00 c	359.63 bc	529.44 a	588.22 a

\* DMS= 147.13

En la **Figura 3.2**, se presenta la distribución cuartil de la CE en los tres sitios de estudio para las dos épocas del año en las que se midió esta variable. Se observa que los valores más altos en época de lluvias se presentaron en Huichapan con  $600 \mu\text{S cm}^{-1}$  y los valores más bajos se obtuvieron en el agua condensada en Tlaxcala con valores menores a  $100 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Para la época de secas los valores promedio más altos se presentaron en la ciudad de México con  $580 \mu\text{S cm}^{-1}$  y los valores más bajos se obtuvieron en Huichapan con  $450 \mu\text{S cm}^{-1}$ .

Además se observa que la dispersión de los datos de CE fue mayor en la ciudad de México para la época de lluvias y en Huichapan para la época de secas. La dispersión menor se presentó en Tlaxcala en la época de lluvias y en la ciudad de México en la época de secas. Lo que se debe a la variación en la densidad de contaminantes en la atmósfera de los distintos sitios.

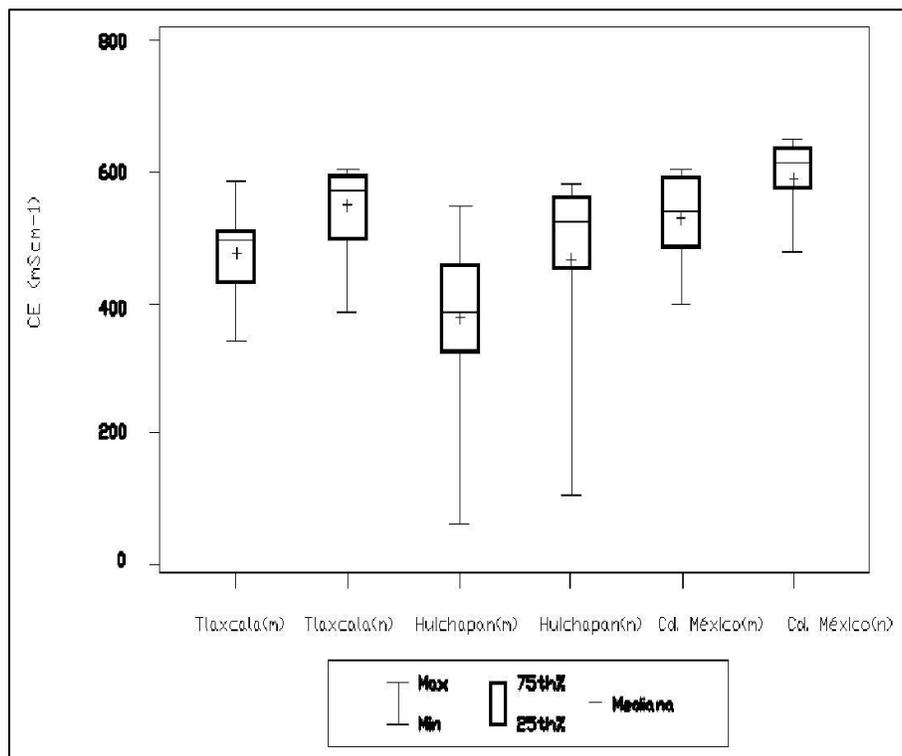
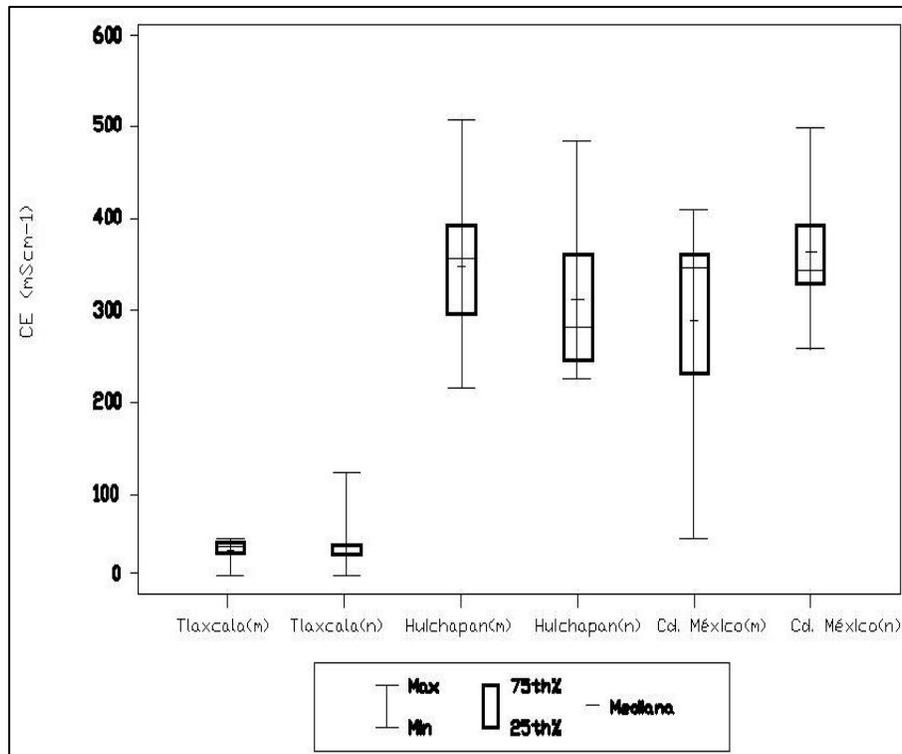
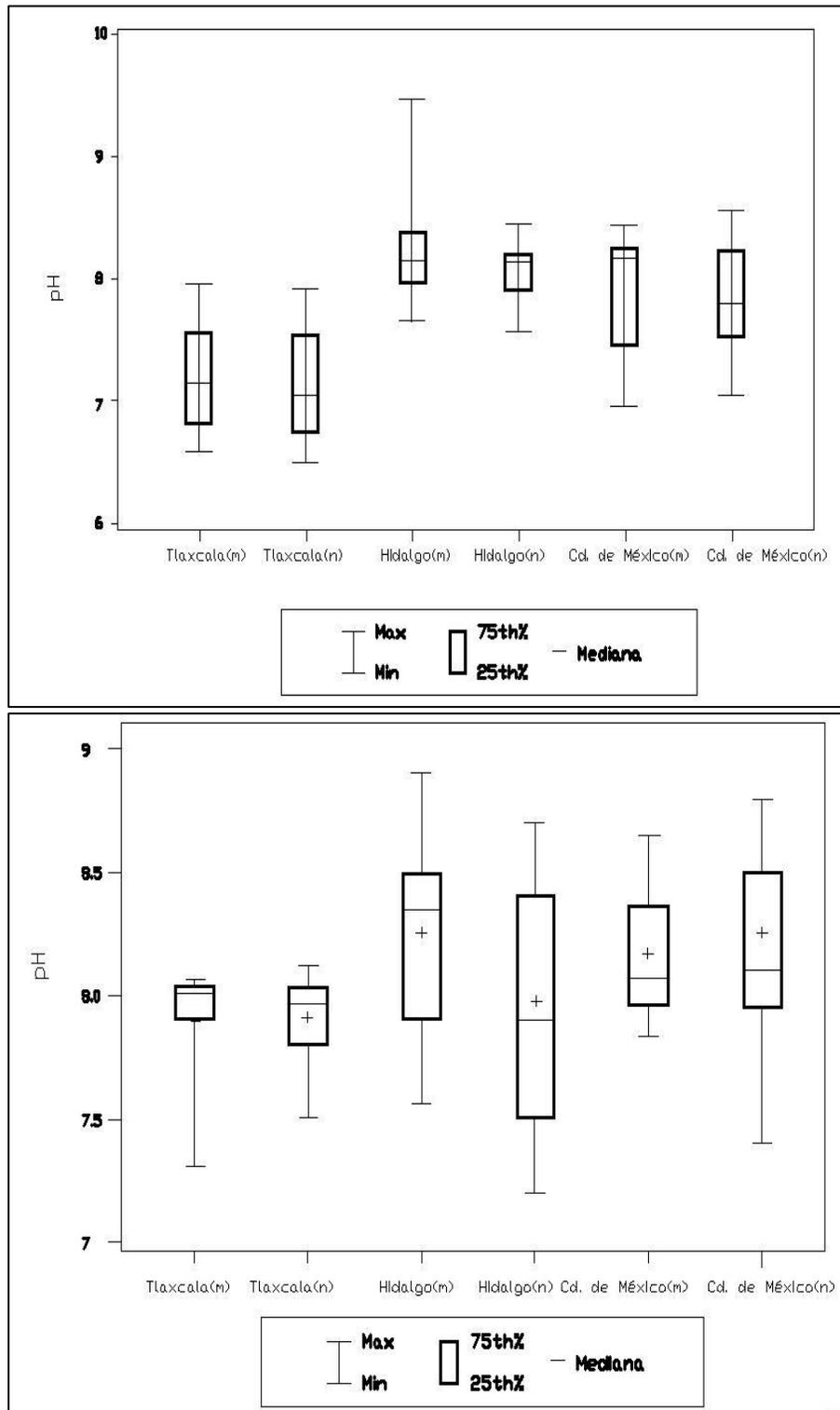


Figura 3.2. CE de los tres sitios de estudios en las muestras de agua atmosférica en época de lluvia (Arriba) época de secas (Abajo).

Al comparar las épocas del año en cuanto a los valores de CE se observan valores menores para la época de lluvias, situación que es más marcada en Tlaxcala debido a que en época de lluvias presentó valores de CE cercanos a  $10 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Esto se explica porque en época de lluvias, entre mayo y octubre ocasiona un lavado de contaminantes y con ello un descenso de sus niveles, reportándose en los meses de agosto y septiembre como los de menor concentración de contaminantes en el Valle de México (S.M.A., 1998). Mientras que para la época de secas los valores menores fueron cercanos a  $400 \mu\text{S cm}^{-1}$ , mientras que la mayor dispersión de los datos se presentó en la Ciudad de México. El aumento en la CE en época de secas se debe a una mayor concentración de partículas suspendidas en la atmósfera en esta época del año a diferencia de la época de lluvias que las partículas se precipitan en dilución junto con las moléculas de agua de la lluvia lo que se ve reflejado en los resultados obtenidos.

En la **Figura 3.3**, se presentan los resultados de pH obtenidos en Tlaxcala, Huichapan, Hidalgo y la ciudad de México para las dos épocas del año. El pH de los tres sitios de estudio presentó valores neutros a ligeramente alcalinos. La mayor dispersión de los valores de pH se presentó en época de secas en Huichapan, mientras que la menor dispersión se presentó en Tlaxcala para la misma época del año. En época de lluvia la mayor dispersión la presentó la ciudad de México, mientras que la menor dispersión se observó en Huichapan. Gandhidasan y Abualhamayel (2007) detectaron muestras de agua de niebla cuyo pH se encontraba entre 7.23 y 8.02, a diferencia de Kulshrestha *et al.* (2005), quienes reportan que en el noreste de la India el promedio de pH de 10 muestras de agua de niebla fue de 5.6, por lo que se considera ligeramente ácida. Dichas diferencias de pH se deben a la contaminación de la atmósfera local de cada sitio mencionado, a mayor contaminación menor pH y viceversa.

En el Cuadro 3.3, se presentan los resultados de los contenidos de aniones y cationes en el agua condensada de la atmósfera en Tlaxcala, Hidalgo y la Ciudad de México. La concentración mayor por parte de los cationes la presentó el sodio ( $\text{Na}^+$ ) y por parte de los aniones los bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^+$ ) lo que explica que el pH de las muestras de agua sea ligeramente alcalino por la presencia de  $\text{HCO}_3^+$  (Covington AK, *et al.* 1985). El  $\text{Na}^+$  llega a la atmósfera debido al uso excesivo de productos de limpieza que contienen hidróxido de sodio (NaOH), principalmente en urbes de tamaño importante como lo es la ciudad de México (Santana *et al.* 2005). El catión que presentó menor concentración en el agua condensada fue el  $\text{Ca}^{2+}$ , por su parte el anión de menor concentración fue el  $\text{CO}_3^{2-}$ . La concentración de  $\text{Ca}^{2+}$ , no presentó diferencia significativa en los tres sitios, mientras que el  $\text{SO}_4^{2-}$ , presentó diferencia significativa en los tres sitios de estudio y en las dos épocas del año. Parte de los iones de cloro encontrados en el agua atmósfera tiene su origen en los aditivos de gasolina bromo-cloruro de plomo (Hirshler *et al.*, 1957)



**Figura 3.3.** pH de los tres sitios de estudios en las muestras de agua atmosférica en época de lluvia (arriba) época de secas (abajo).

Cuadro 3.3. Promedio de cationes y aniones de 9 muestras por época del año, en Tlaxcala, Hidalgo y la ciudad de México.

Iones (meq L <sup>-1</sup> )	SAN FELIPE HIDALGO, TLAXCALA				HUICHAPAN, HIDALGO				CIUDAD DE MEXICO				DMS
	LLUVIA		SECAS		LLUVIA		SECAS		LLUVIA		SECAS		
	DÍA	NOCHE	DÍA	NOCHE	DÍA	NOCHE	DÍA	NOCHE	DÍA	NOCHE	DÍA	NOCHE	
Ca	0.01 a	0.01 a	0.03 a	0.02 a	0.02 a	0.12 a	0.02 a	0.02 a	0.01 a	0.031 a	0.01 a	0.013 a	0.122
Mg	0.04 ab	0.03 b	0.05 b	0.06 ab	0.03 b	0.12 a	0.01 b	0.03 b	0.03 b	0.01 b	0.02 b	0.054 b	0.0904
K	0.11 c	0.09 c	0.80 ab	0.91 a	0.44 bc	0.45 bc	0.82 ab	0.84 ab	0.42 bc	0.25 c	1.12 a	1.173 a	0.438
Na	0.43 e	0.51 ed	3.33 ab	3.78 a	2.75 abc	2.56 abc	2.70 abc	3.32 ab	2.15 bc	1.79 dc	2.74 abc	3.554 a	1.35
CO <sub>3</sub>	0.01 d	0.01 d	0.67 b	1.07 a	0.02 d	0.12 cd	0.20 cd	0.23 cd	0.01 d	0.018 d	0 d	0.415 bc	0.3341
HCO <sub>3</sub>	0.04 b	0.03 b	2.3 a	2.71 a	0.03 b	0.12 a	2.43 a	3.04 a	0.032 a	0.018 a	2.65 a	2.82 a	0.915
SO <sub>4</sub>	0.11 f	0.09 f	0.76 bcd	1.04 ab	0.43 def	0.45 def	0.51 cdef	0.64 bcd	0.41 def	0.25 ef	0.92 bc	1.38 a	0.4364
Cl	0.43 b	0.51 b	0.24 b	0.34 b	2.75 a	2.56 a	0.19 b	0.21 b	2.15 a	1.79 a	0.30 b	0.23 b	1.0314

Cuadro 3.4. Concentración de metales pesados en el agua atmosférica condensada en Tlaxcala, Hidalgo y la ciudad de México.

ELEMENTO (mg L <sup>-1</sup> )	SAN FELIPE HIDALGO, TLAXCALA				HUICHAPAN, HIDALGO				CIUDAD DE MEXICO				DMS
	LLUVIA		ESTIAJE		LLUVIA		ESTIAJE		LLUVIA		ESTIAJE		
	DÍA	NOCHE	DÍA	NOCHE	DÍA	NOCHE	DÍA	NOCHE	DÍA	NOCHE	DÍA	NOCHE	
Al	0.2045b	0.2256ab	0.5608a	0.3214ab	0.211b	0.1694b	0.4484ab	0.2425 ab	0.1994b	0.2405ab	0.4286ab	0.3761ab	0.3403
As	0.002088abc	0.02522abc	0c	0c	0.0037ab	0.0027abc	0.0004bc	0c	0.00041bc	0.00436a	0.000648bc	0c	0.0034
Ba	0.03011a	0.02367a	0.11609a	0.14213a	0.02056a	0.014a	0.04059a	0.0211a	0.0133a	0.0227a	0.035a	0.0372a	0.1592
Cd	0.0061 <sup>a</sup>	0.0036a	0.003723a	0.004a	0.0010a	0.00075a	0.0119 <sup>a</sup>	0.00331a	0.0015a	0.0022a	0.0039a	0.0023a	0.0119
Cu	0.798ab	0.64ab	1.2 <sup>a</sup>	1.02ab	0.4588b	0.503b	0.5946b	0.8124ab	0.74ab	0.6615ab	1.056ab	0.9943ab	0.606
Cr	0.00034e	0.00043e	0.022ab	0.0258ab	0.0104dc	0.01846bc	0.00195bc	0.00216de	0.0055de	0.006311de	0.0207ab	0.0279a	0.009
Fe	0.327c	0.247c	0.9019ab	1.142a	0.233c	0.189c	0.377c	0.542bc	0.1871c	0.2408c	1.05a	0.9734a	0.4005
Hg	0a	0a	0a	0a	0a	0a	0a	0a	0a	0a	0a	0a	0
Mn	0.02ab	0b	0.04707ab	0.065a	0.00922b	0.0085b	0.0196ab	0.0243ab	0.0094b	0.011b	0.065a	0.067a	0.0521
Pb	0.06368a	0.01907b	0.0201b	0.02615ab	0.0137b	0.0126b	0.0081b	0.0149b	0.0149b	0.01663b	0.0249ab	0.02383ab	0.0421
Zn	0.453 <sup>a</sup>	0.2963ab	0.2456ab	0.3783ab	0.3086ab	0.4655a	0.1015b	0.209ab	0.093b	0.1047b	0.198ab	0.3254ab	0.3466

En el Cuadro 3.4, se presenta la concentración de metales pesados en el agua atmosférica condensada en Tlaxcala, Hidalgo y la ciudad de México, los valores presentaron diferencia significativa en cuanto a sitios y en cuanto a época del año, la tendencia de la concentración de metales pesados fue mayor en temporada de secas debido al incremento de contaminantes en la atmósfera en esta temporada. El elemento que menor concentración presentó fue el Hg mientras que el de mayor concentración fue Fe.

El Fe que presentó los valores más altos de concentración total en las muestras de agua, supera el límite permisible para agua potable de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994. Por lo que no se recomienda el uso del agua condensada de la atmósfera en los sitios de estudio de acuerdo con el uso como agua potable. Se sugiere anexar un sistema de filtrado al condensador de la humedad atmosférica, para garantizar una calidad del agua aceptable y recomendable como agua potable.

En este trabajo se detectaron As, Cd y Cr en cantidades mínimas, lo que concuerda con Gandhidasan y Abualhamayel (2007), quienes reportaron ausencia de estos metales traza en Kingdom, Arabia Saudita. Sin embargo, en la investigación de Patel *et al.* (1998) se observan concentraciones de Cr que superan los estándares de la OMS (1994) y su presencia está relacionada con el proceso de productos de la manufactura (ATSDR, 2008). La presencia del Cd y Pb estos elementos en las muestras de agua atmosférica analizadas fue de concentraciones bajas. La presencia de Pb en cantidades menores se adjudica a la disminución del uso de gasolina con plomo y el incremento de combustibles libres de este elemento.

En el presente estudio el Cd presentó cantidades menores al límite permisible establecido en la NOM-041-SSA1-1994, de  $0.005 \text{ mg L}^{-1}$ , con excepción de la muestra de San Felipe Hidalgo, Tlaxcala para el día, que superó el límite permisible, puesto que presentó  $0.006 \text{ mg L}^{-1}$  de Cd.

### **3.4 Conclusiones**

En lo general el agua obtenida de la humedad atmosférica cumple con la NOM 127-SSA1-1997 previo tratamiento.

En lo particular, la conductividad eléctrica del agua condensada presentó valores bajos menores a  $600 \mu\text{S cm}^{-1}$ , por lo que se recomienda el uso de esta agua en consumo doméstico.

Las cantidades presentes de  $\text{Na}^+$  en el agua atmosférica de la Ciudad de México, Huichapan, Hidalgo y San Felipe, Tlaxcala, no limita su uso en consumo doméstico.

Los aniones y cationes presentes en el agua condensada no presentaron concentraciones altas, por lo que el agua es recomendable como potable al considerar esta característica de contenido de aniones y cationes.

### 3.5 Literatura citada

APHA (1989). Standard methods for the examination of water and wastewater. 17a. ed. 1220 pp

APHA (2000). Métodos normalizados para el análisis de agua potable y residual. 17 Edición. Editorial Díaz de Santos. Madrid, España 1147 pp.

ATSDR, 2008. [http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts13.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts13.html) (Consultado en línea el 1 de agosto 2011).

Bautista-Olivas A. L., Tovar-Salinas J. L., Palacios-Vélez O. L., Mancilla-Villa O. R. 2011. La humedad atmosférica como fuente opcional de agua para uso doméstico. Agrociencia. 45, 293-301.

Besler, H., 1972 Klimaverhältnisse und Klimageomorphologische Zonierung der Zentralen Namib. Stuttg Geogr. Stud 83

Covington AK, Bates RG, Durst RA 1985 Definition of pH scales , standards reference values, measurement of pH and related terminology. Pure & Appl. Chem. 57:531

Domènech, X. y Peral, J. 2006. Química ambiental de sistemas terrestres Editorial Reverté España 247 p.

EPA (Environmental Protection Agency). 1996. Method 6010B. Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry. Revision 20. EPA Las Vegas, Nevada, USA.

- EPA, 1983 Methods for chemical analysis of water and wastes (Report No. EPA-600/4-79-020), EPA
- Fuzzi, S., Castillo, R.A., Justo, J.E., Lala, G.C. 1984 Chemical composition of radiation fog at Albany, New York and its relationship to fog microphysics. *J. Geophys. Res.* 85:7159-7164.
- Gandhidasan, P. Abualhamayel H., 2007. Fog collection as a source of fresh water supply in the kingdom of Saudi Arabia. *Water Environ. J.* 21:19-25.
- Hirschler, D.A., Gilbert, F.W., Lamb, F.W. Niebylski, L.M. 1957 Particulate lead compounds in automobile exhaust gas. *Indust. And engng chem.* 49(7).
- Igawa, M. Tsutsumi Y. Mori T and Okochi H. 1998. Fogwater chemistry at a mountainside forest and the estimation of the air pollutant deposition via fog droplets based on the atmospheric quality at the mountain base *Environ. Sci. Technol.* 32:1566-1572
- Jacob, D.J., Waldman, J.M. Munger, J.W., Hoffmann, M. R., 1985. Chemical composition of fog water collected along the California coast. *Environ. Sci. Technol.* 19:730-736.
- Kulshrestha, M., Sekar R., Krishna D., Hazarika K., Dey N., Rao P., 2005. Deposition fluxes of chemical components of fog water at a rural site in north-east India. *Tell.* 57,436-439.
- Mrose, H., 1961. Ergebnisse von Spurenstoff-Bestimmungen im Niederschlag. *Zeitschrift Für Meteorologie* 15:46-54.
- Muselli M., Beysens D., Soyeux E. and Clus O. 2006. Is Dew Water Potable? Chemical and Biological Analyses of Dew Water in Ajaccio (Corsica Island, France) 32,1812-1817.
- Nriagu, J.O. 1996. A history of global metal pollution. *Science.* 272: 223-224.
- OMS (1994). Lineamientos del agua potable (En línea) [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/GDWAN4rev1and2.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/GDWAN4rev1and2.pdf) 2/01/2012.
- Padilla, G.H. 1989. Estudio analítico de la composición química de la precipitación pluvial en el Valle de México. Tesis de maestría. División de estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F
- Patel, K S, Tripathi, An, Chandrawanshi, C K, Aggarwal S G, Patel, R M, Deb M K, Agnihotri, P. K. Patel, V. K., 1998. Yellowish fog precipitation In Central India

proceeding of the first international conference on fog and fog Collection, Vancouver, Canada. July 19-24, 1998. 309-312.

Ramos, O.R., R.Sepúlveda y F. Villalobos. 2003. El agua en el medio ambiente: Muestreo y análisis. Plaza y Valdés Editores. Mexicali, Baja California. 210 p.

S. M. A. (Secretaría del Medio Ambiente). 1998. Informe anual de la calidad del aire en el Valle de México

Santana, M.; Pacheco, M.y Sanhueza E. "2005 Composicion ionica y características acidas básicas de la lluvia 30:10 618-622pp

Schemenauer, R S and Cereceda, P., 1992 The quality of fog water collected for domestic and agricultural use In Chile. J. Appl. Meteorol., 31:275-290.

Wetzel, R. 1981. Limnología. Ediciones Omega. Barcelona España 666 p.

## **CONCLUSIONES GENERALES**

1. Con el modelo matemático generado en la presente investigación, es posible estimar los volúmenes de agua que pueden obtenerse de la condensación atmosférica en diferentes zonas geográficas de México y el mundo. Lo que constituye una herramienta fundamental para sugerir estudios similares en zonas geográficas que sean de interés para los investigadores.
2. La presencia de coliformes totales en las muestras de agua obtenidas principalmente en la Ciudad de México y Tlaxcala sugieren la excesiva contaminación en la atmósfera de estos sitios. Por su parte la atmósfera de Huichapan, Hidalgo se encuentra libre de contaminantes como los coliformes totales o en menor grado que en los otros dos sitios de estudio.
3. La condensación del agua atmosférica representa una alternativa viable para obtener agua para consumo humano.
4. Las características fisicoquímicas analizadas en las muestras de agua condensada, presentan valores aceptables para recomendar el agua para consumo humano.
5. La concentración de metales pesados por debajo de los límites permisibles representa la recomendación del agua para utilizarla en el consumo doméstico sin riesgos de toxicidad por los elementos pesados.