



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES

LICENCIATURA EN INGENIERIA GEOLOGÍA AMBIENTAL

**CARACTERIZACIÓN DE LA DEPOSITACIÓN HÚMEDA Y SECA EN EL
PARQUE NACIONAL EL CHICO, MINERAL DEL CHICO, HIDALGO,
MÉXICO: IMPLICACIONES DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.**

TESIS

Que para obtener el título de:

INGENIERO GEÓLOGO AMBIENTAL

Presenta:

P.D.I. XOCHITL PATIÑO HERNÁNDEZ

Director de tesis:

DR. ENRIQUE CRUZ CHÁVEZ

Mineral de la Reforma, Diciembre de 2011.



CERTIFICADO

Certifico que la tesis titulada **“Caracterización de la depositación húmeda y seca, en el Parque Nacional El Chico, Mineral del Chico, Hidalgo, México: Implicaciones de la Contaminación Atmosférica”** presentada por la Pas. Ing. Xochitl Patiño Hernández, ha sido realizada dentro del proyecto de investigación denominado **“Estudio Piloto para la Operación del Red Mexicana de Depositación Atmosférica”**, perteneciente al convenio INE-UNACAR N. INE/A1-007/2009.

DRA. JULIA GRISELDA CERÓN BRETÓN

**Universidad Autónoma del Carmen,
Campeche**

Responsable del proyecto

DR. ENRIQUE CRUZ CHÁVEZ

**Universidad Autónoma del Estado de
Hidalgo**

Responsable de estación de monitoreo

El tema de la presente tesis tuvo participación en:

IV encuentro de Investigación del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales 2011, tema: Caracterización de depositación húmeda en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo: implicaciones de la contaminación atmosférica.

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis con mucho cariño y amor a mi madre, a mi padre fallecido que lamentablemente no está con nosotras y a mis hermanas Kika y Pao, por ser la fuente de mi inspiración y motivación para superarme cada día más y así poder luchar para que la vida nos depare un futuro mejor.

A mi madre por su amor, paciencia, comprensión y motivación, sin lo que hubiese sido imposible lograr terminar estos estudios.

A mis amigos Yliana, Elena, Maricela, Monse, Leo, e Isaac, muchas gracias por estar conmigo en todo este tiempo donde he vivido momentos felices y tristes, gracias por su amistad.

A todos mis profesores, mil gracias porque de alguna manera forman parte de lo que ahora soy.

AGRADECIMIENTO

Primero y como más importante, me gustaría agradecer sinceramente a mi director de tesis Dr. Enrique Cruz Chávez, su esfuerzo y dedicación. Sus conocimientos, su manera de trabajar, su persistencia, su paciencia y su motivación han sido fundamentales para mi formación. Él ha inculcado en mí un sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico sin los cuales no podría tener una formación completa. A su manera, ha sido capaz de ganarse mi lealtad y admiración, así como sentirme en deuda con él por todo lo recibido durante el periodo de tiempo que ha durado esta tesis.

También agradezco al Dr. Otilo por haberme permitido realizar mi servicio social con él y por todo el apoyo recibido.

Gracias a todas y cada una de las personas que participaron en la investigación realizada, ya que invirtieron su tiempo y conocimientos para ayudarme a completar mi proyecto de tesis.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTADO DE TABLAS	V
LISTADO DE FOTOS	V
RESUMEN	1
CAPÍTULO 1.....	3
1. JUSTIFICACIÓN	3
1.1. OBJETIVOS.....	4
1.1.1. OBJETIVO GENERAL	4
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.2. INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO 2.....	6
2. ANTECEDENTES	6
2.1. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1.1. ATMÓSFERA	10
2.1.2. CONTAMINANTES DEL AIRE	11
2.1.2.1. <i>Partículas suspendidas totales (PST)</i>	12
2.1.2.1.1. <i>Partículas menores a 10 micrómetros (PM 10)</i>	12
2.1.2.1.2. <i>Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM 2.5)</i>	13
2.1.2.3. <i>Plomo (Pb)</i>	13
2.1.2.4. <i>Monóxido de carbono (CO)</i>	13
2.1.2.5. <i>Óxidos de azufre (SO_x)</i>	14
2.1.2.6. <i>Óxidos de nitrógeno (NO_x)</i>	15
2.1.2.7. <i>Hidrocarburos no metano (HC)</i>	16
2.1.2.8. <i>Oxidantes fotoquímicos [ozono (O₃), peroxiacetilnitrato (PAN).]</i>	16
2.1.3. EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES A LA SALUD.....	18
2.1.3.1. <i>Partículas PM 10</i>	18
2.1.3.2. <i>Plomo</i>	19
2.1.3.3. <i>Monóxido de carbono</i>	19
2.1.3.4. <i>Dióxido de azufre</i>	20
2.1.3.5. <i>Óxidos de nitrógeno</i>	20
2.1.3.6. <i>Ozono</i>	20
2.1.4. EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EN LA VEGETACIÓN.....	20
2.1.5. EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EN EL SUELO	21
2.1.6. EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO	22
2.1.7. EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES AL AMBIENTE	22
2.1.8. PANORAMA INTERNACIONAL Y NACIONAL DE LAS EMISIONES A LA ATMOSFERA.....	27

2.1.9.	POLÍTICAS Y NORMATIVAS SOBRE CALIDAD DEL AIRE	30
2.1.10.	NORMATIVAS INTERNACIONALES Y NACIONALES	31
2.2.	GEOLOGÍA REGIONAL DE LA ZONA DE ESTUDIO	32
2.2.1.	GEOLOGÍA LOCAL	33
2.3.	CLIMA	36
2.4.	HIDROLOGÍA	37
2.5.	CARACTERÍSTICAS EDAFOLÓGICAS	38
2.6.	VEGETACIÓN	40
2.7.	FAUNA	41
CAPÍTULO 3.....		43
3.	METODOLOGÍA.....	43
3.1.	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	43
3.1.1.	VÍAS DE ACCESO	43
3.2.	SELECCIÓN DE SITIO	45
3.3.	RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	47
3.3.1.	COLECTOR AIRMETRICS AEROCHMEN 301.....	48
3.3.2.	PREPARACIÓN DEL MATERIAL PARA LA DEPOSITACIÓN HÚMEDA Y SECA	50
3.4.	MUESTREO DE DEPOSITACIÓN HÚMEDA	51
3.5.	MUESTREO DE DEPOSITACIÓN SECA.....	52
3.6.	EQUIPO DE LABORATORIO PARA ANÁLISIS DE DEPOSITACIÓN HÚMEDA Y SECA.....	53
3.7.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS PARA LA DEPOSITACIÓN HÚMEDA Y ACONDICIONAMIENTO DE LAS MUESTRAS	55
3.7.1.	<i>Determinación de pH.....</i>	56
3.7.2.	<i>Determinación de conductividad específica.....</i>	56
3.8.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS PARA LA DEPOSITACIÓN SECA	56
3.9.	AJUSTE Y PONDERACIÓN DE RESULTADOS.....	57
CAPÍTULO 4.....		59
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	59
4.1.	RESULTADOS DE LA DEPOSITACIÓN HÚMEDA.....	59
4.1.1.	CÁLCULOS PARA LA CONCENTRACIÓN PROMEDIO PONDERADO POR VOLUMEN Y TASA DE DEPOSITACIÓN HÚMEDA.....	61
4.1.2.	PH.....	63
4.1.3.	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	65
4.1.4.	ANIONES.....	65
4.1.4.1.	SO_4^{-2}	65
4.1.4.2.	NO_3^-	66
4.1.4.3.	Cl^-	66
4.1.5.	CATIONES	67
4.2.	RESULTADOS DE LA DEPOSITACIÓN SECA	68
4.2.1.	PH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	69
4.2.2.	<i>Aniones y cationes.....</i>	70
4.3.	FLUJOS DE DEPOSITACIÓN SECA	71
4.4.	ANÁLISIS METEOROLÓGICO	72

4.5. MODELO DE TRAYECTORIA	75
CAPÍTULO 5.....	77
5. CONCLUSIONES	77
5.1. DEPOSITACIÓN HÚMEDA	77
5.2. DEPOSITACIÓN SECA	79
BIBLIOGRAFÍA	81
ANEXO 1	88
HOJA DE TRABAJO DEL SITIO.....	88
<i>ANEXO 1a.....</i>	95
ANEXO 2	99
FORMA DE REPORTE DEL OBSERVADOR DE CAMPO (FOC).....	99

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 PRINCIPALES ALTERACIONES ATMOSFÉRICAS PRODUCIDAS POR LOS CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO.....	29
FIGURA 2.2 GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	35
FIGURA 2.3 PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA REGISTRADA DESDE 1990 AL 2009 (CONAGUA, 2010).....	36
FIGURA 2.4 PRECIPITACIÓN PARA EL AÑO DE MUESTREO 2009.....	37
FIGURA 2.5 PRINCIPALES CUENCAS HIDROLÓGICAS DEL PARQUE NACIONAL EL CHICO (MODIFICADO DE MELO Y LÓPEZ, 1994).	38
FIGURA 2.6 ASOCIACIÓN DE SUELOS DEL PARQUE NACIONAL EL CHICO (MODIFICADO DE MELO Y LÓPEZ, 1994).....	39
FIGURA 3.1 UBICACIÓN DEL SITIO DE MUESTREO.....	44
FIGURA 3.2 SELECCIÓN DEL SITIO.	46
FIGURA 3.3 OPERACIÓN DEL COLECTOR ACM 301.....	49
FIGURA 4.1 HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS DEL PH EN LAS MUESTRAS DE PRECIPITACIÓN.	64
FIGURA 4.2 HISTOGRAMA DE FRECUENCIA PARA EL PH.....	69
FIGURA 4.3 CONCENTRACIÓN DE ANIONES PARA LA DEPOSITACIÓN SECA.....	70
FIGURA 4.4 CONCENTRACIÓN DE CATIONES PARA LA DEPOSITACIÓN SECA.	71
FIGURA 4.5 ROSA DE LOS VIENTOS DEL MES DE OCTUBRE.....	73
FIGURA 4.6 ROSA DE LOS VIENTOS DEL MES DE NOVIEMBRE.	74
FIGURA 4.7 ROSA DE LOS VIENTOS DEL MES DE DICIEMBRE.....	74
FIGURA 4.8 FRECUENCIA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS VIENTOS.	75
FIGURA 4.9 TRAYECTORIA DEL VIENTO PARA EL PARQUE NACIONAL EL CHICO, HIDALGO DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO.	76

LISTADO DE TABLAS

TABLA 2.1 COMPOSICIÓN DEL AIRE (MODIFICADA DE GARCÍA, 1986).....	10
TABLA 2.2 EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES SOBRE LA VEGETACIÓN (MODIFICADO DE STRAUSS Y MAINWARING, 2001).	21
TABLA 2.3 COMPARACIÓN DE LÍMITES PERMISIBLES EN MÉXICO, ESTADOS UNIDOS Y LA UNIÓN EUROPEA (SSA, 2009; WHO, 2005; EPA, 2009)	31
TABLA 4.1 RESULTADOS DE LA DEPOSITACIÓN HÚMEDA.....	60
TABLA 4.2 CÁLCULO DE CPPV.	61
TABLA 4.3 CONCENTRACIÓN PROMEDIO PONDERADA (CPPV) Y TASA DE DEPOSITACIÓN HÚMEDA (TDH). 63	
TABLA 4.4 COMPOSICIÓN DE LA DEPOSITACIÓN HÚMEDA EN VARIOS LUGARES ($\mu\text{Eq/L}$).	66

LISTADO DE FOTOS

FOTO 2.1 TOBA RIOLÍTICA INTEMPERIZADA.	33
FOTO 2.2 BOSQUE DE OYAMEL.	41
FOTO 2.3 FAUNA DEL PARQUE NACIONAL EL CHICO.....	42
FOTO 3.1 BOSQUE DE TLAXCAL.	47
FOTO 3.2 BOTELLAS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE).....	50
FOTO 3.3 COLECTOR ACM 301.	51
FOTO 3.4 FILTROS CONTENIDOS EN EL SOPORTE DE ALUMINIO.	52
FOTO 3.5 CROMATOGRAMA DE LÍQUIDOS DE ALTA RESOLUCIÓN (HPLC).	53
FOTO 3.6 ESPECTROFOTÓMETRO, THERMO SCIENTIFIC ICE 3300.	54
FOTO 3.7 ESPECTROFOTÓMETRO UV MODELO HACH DR. 2800.....	55
FOTO 3.8 BAÑO ULTRASÓNICO.	57
FOTO 4.1 ESTACIÓN METEOROLÓGICA METONE.....	72

RESUMEN

Los contaminantes atmosféricos derivados de emisiones naturales y antropogénicas, reaccionan y se incorporan a gotas de lluvia, como resultado de procesos fisicoquímicos durante la precipitación causando el fenómeno llamado lluvia ácida; los estudios existentes en México sobre este tema son insuficientes debido a su corta duración y/o localización regional. En el estado de Hidalgo es necesario tener registros de dicho fenómeno para comprender mejor la depositación húmeda y seca y poder mitigar los impactos.

En el presente trabajo se caracterizó la depositación húmeda en el periodo comprendido entre los meses de agosto-diciembre de 2009, en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo (La Chamusquina). La recolección de muestras se llevó a cabo con un colector automático modelo Airmetrics Aerochmen 301. Un total de 27 muestras de depositación húmeda colectadas y 16 para depositación seca fueron determinadas sus propiedades: pH, temperatura en °C, conductividad eléctrica (μS) y volumen (ml). Asimismo se determinaron las concentraciones en $\mu\text{Eq/L}$ de SO_4^{-2} , NO_3^- , Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} , NH_4^+ . Los aniones fueron determinados por cromatografía de líquidos de alta resolución (Agilent 1100 con detector de conductividad), cationes por espectrofotometría de absorción atómica (Thermo scientific ice 3000) y NH_4^+ por colorimetría con detección UV (HACH DR 280).

El volumen total colectado fue de 30256 ml, los valores del pH para la depositación húmeda oscilaron de 2.8-6.2, con valor promedio de 4.7 considerándose ligeramente ácida con respecto de 5.6 como el pH natural del agua de lluvia. Para la conductividad eléctrica los valores oscilaron entre 7 a 218 μS , con respecto a la temperatura se registraron valores de 22 a 28°C. Los valores obtenidos para los aniones fue de 133.1 $\mu\text{Eq/L}$ para SO_4^{-2} , 98.4 $\mu\text{Eq/L}$ para el NO_3^- y el Cl^- presentó un valor de 74.0 $\mu\text{Eq/L}$, para los cationes se obtuvo un valor de 111.4 $\mu\text{Eq/L}$ para el Na^+ , 34.4 $\mu\text{Eq/L}$, 27.4 $\mu\text{Eq/L}$, 4.9 $\mu\text{Eq/L}$, para el Mg^{+2} , Ca^{+2} , K^+ respectivamente y el NH_4^+ con 58.8 $\mu\text{Eq/L}$.

Para la depositación seca el pH presentó valores entre 4.4-7.4 y un promedio de 6.0, la abundancia de aniones fue de 245.0 $\mu\text{Eq/L}$ para el NO_3^- , 44.8 $\mu\text{Eq/L}$ para el Cl^- y 15.8 $\mu\text{Eq/L}$ de SO_4^{-2} , para los cationes fue 119.2 $\mu\text{Eq/L}$ para el Ca^{+2} , 54.8 $\mu\text{Eq/L}$ para el Na^+ , 49.5 $\mu\text{Eq/L}$ para el Mg^{+2} , 4.8 $\mu\text{Eq/L}$ para el K^+ y 39.6 $\mu\text{Eq/L}$ NH_4^+ .

Las altas concentraciones de SO_4^{-2} , son atribuidas a la dispersión de partículas provenientes de los depósitos de jales del municipio de Omitlán por acción del viento el cual se orienta hacia al Parque Nacional El Chico.

CAPÍTULO 1

1. JUSTIFICACIÓN

Los materiales formados de partículas y gases que se adicionan a la atmósfera mediante las actividades del hombre, se consideran contaminantes cuando sus concentraciones son suficientes para producir efectos nocivos. Los contaminantes forman parte de un ciclo en la atmósfera que inicia con su emisión y termina con su remoción de la atmósfera por medio de la depositación sobre la superficie terrestre. Las consecuencias de la contaminación no sólo se traducen en efectos directos al ser humano, sino también, en la generación de fenómenos que afectan el ambiente, tal es el caso de la lluvia ácida, la cual incide en efectos dañinos a la mayoría de los seres vivos, así como en las edificaciones construidas con mármol o caliza, se pueden presentar afectaciones a la vegetación adquiriendo las hojas un color café, los bosques crecen más lentamente y también se presentan afectaciones a la fertilidad del suelo.

Los estudios existentes en México no son suficientes para comprender el fenómeno de la lluvia ácida en el país, dado que la mayoría de los artículos existentes se centran en la valoración de sitios impactados (zonas urbanas) y/u orientados a daños a la infraestructura de monumentos históricos, siendo en menor proporción los orientados a su efecto al hombre y nulo hacia los ecosistemas; la complejidad de este tipo de estudios radica en que este fenómeno es de corta duración y/o localización regional.

Considerando que la depositación atmosférica es un problema ambiental de tipo regional, cuyos efectos inciden en una amplia variedad de receptores, es necesario iniciar con un monitoreo cuya cobertura incluya sitios no impactados, tal es el caso de la Estación el Chico, el cual permitirá evaluar las tendencias y valores de fondo, así como las variaciones espaciales y temporales en la composición química de la lluvia ácida de manera regional y contribuir, junto con estaciones distribuidas en diferentes regiones geográficas del país a entender el fenómeno de manera más amplia.

Actualmente, en el estado de Hidalgo son escasos los estudios sobre contaminación atmosférica y aunque no es considerado como uno de los principales estados que registre elevada contaminación del aire, es importante tener antecedentes de los principales elementos que generan dicha contaminación. Dadas las condiciones de conservación y bajo impacto del ecosistema, se decidió la realización de este proyecto en el Parque Nacional El Chico, con la intención de caracterizar la depositación húmeda y

seca y esta sirva para establecer valores de referencia y/o antecedentes para futuros estudios.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Caracterizar físico químicamente la deposición húmeda y seca del “Parque Nacional El Chico”, Mineral del Chico, Hidalgo para establecer sus posibles afectaciones e implicaciones ambientales.

1.1.2. Objetivos específicos

Determinar las propiedades físico-químicas de la precipitación pluvial (volumen, conductividad eléctrica, temperatura, pH) para correlacionar su incidencia en el fenómeno de lluvia ácida.

Determinar la concentración de potasio, sodio, calcio, magnesio, amonio, cloruros, nitratos y sulfatos de la deposición húmeda y seca, para determinar sus posibles afectaciones e implicaciones ambientales.

Correlacionar los datos climatológicos obtenidos en el periodo de muestreo con el fenómeno de contaminación atmosférica en la estación de monitoreo del Parque Nacional El Chico, Hidalgo para establecer las rutas de transporte de algunos contaminantes.

1.2. INTRODUCCIÓN

La atmósfera es la envoltura gaseosa que rodea tanto a la parte sólida como a la líquida de la Tierra, forma parte integral del planeta y se extiende a una altura de varios cientos de kilómetros (García, 1986). La atmósfera se divide en cuatro capas de acuerdo con la altitud, temperatura y composición del aire: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera. Las capas más importantes para el análisis de la contaminación atmosférica son las dos capas más cercanas a la Tierra: la troposfera y la estratosfera.

La depositación atmosférica se compone por una parte de la depositación húmeda y otra por la depositación seca. Conforme la lluvia o nieve precipitan, remueve partículas y gases del aire, incluyendo contaminantes emitidos a partir de fuentes naturales y fuentes antropogénicas. Estos contaminantes son depositados en la superficie terrestre como precipitación (depositación húmeda) o como depositación seca (Ayllón, 2003).

La meteorología y la química atmosférica interactúan afectando la química de la precipitación y la cantidad de contaminantes depositados por esta vía involucrando los siguientes factores: cantidad de precipitación, fuentes de contaminantes, composición y concentraciones, dispersión y transporte de contaminantes, remoción de gases y partículas y mecanismos de depositación (Herrera y Rodríguez, 2009).

La química de la precipitación refleja la cantidad de contaminantes y la forma en la cual fueron removidos de la atmósfera en un sitio dado. La depositación húmeda involucra los constituyentes químicos presentes en solución en la precipitación. Cuando la precipitación de la lluvia ácida se produce, puede provocar importantes deterioros en el ambiente, construcciones y monumentos históricos (Tresmondi *et al.* 2003).

El monitoreo de la depositación húmeda y seca se enfoca a la transferencia de sustancias químicas de la atmósfera a los ecosistemas terrestres y acuáticos. Por lo tanto, los datos de depositación húmeda y seca proporcionan información importante sobre los flujos de materiales químicos y constituyen información valiosa para todos aquellos investigadores que realizan estudios ambientales y evalúan la influencia de las entradas atmosféricas a la superficie terrestre (Quadri y Sánchez, 1995).

CAPÍTULO 2

2. ANTECEDENTES

En México los estudios de lluvia ácida comenzaron desde la década de los sesenta, teniendo como objetivos distintas regiones como el Golfo de México, costas del Pacífico y algunas ciudades como la del Distrito Federal.

Entre los estudios fundamentales destacan los realizados por Báez y Padilla (1986), en México D.F. y áreas circunvecinas evaluaron el pH, SO_4^{-2} y NO_3^- . Asimismo, Kanuga (1984) en Xalapa, Veracruz determinó pH, SO_4^{-2} y Cl^- ; y por Calderón (1987 y 1988) en 10 lugares de la ciudad de Toluca, Estado de México, evaluando pH, SO_4^{-2} y NO_3^- (reportados en García *et al.* 1991).

Bravo (1984) realizó un estudio en el cual determinó la presencia de las precipitaciones ácidas en el Valle de México y áreas rurales circunvecinas. Igualmente, Ortiz (1984) evaluó los ácidos nítrico y sulfúrico en el centro histórico de la Ciudad de México.

El Instituto Nacional de Ecología (INE) implementó el programa "Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México" mediante la tesis de grado realizada por Peñaranda en 1988. Los objetivos se enfocaron a evaluar el pH, CE, SO_4^{-2} y NO_3^- , Cl^- , Na^+ , Mg^{+2} , y Ca^{+2} a través de la técnica de muestreo por "depósito total".

Pereyra y García (1988) determinaron el pH de la lluvia de la ciudad de Xalapa, Veracruz para conocer si existía acidez, para lo que analizó 76 muestras de lluvia recolectadas en ocho puntos distintos de la ciudad, durante el período de mayo a octubre de 1998, habiéndose obtenido un pH promedio de 5.41, lo cual indicaba que la lluvia era ácida.

Alvarado y García (1988), realizaron un estudio a través de la corteza superficial de los árboles en el volcán El Pelado, D.F. mediante una metodología utilizada en Europa desde la década de los sesenta, la cual permitió evaluar el impacto de los precursores de las precipitaciones ácidas sobre la vegetación.

Los primeros proyectos para la evaluación de los efectos dañinos de la depositación ácida (húmeda y seca) sobre la superficie de la piedra caliza de los

monumentos iniciaron en México en las zonas arqueológicas mayas de Tulum, Quintana Roo y en Palenque en Chiapas, a principio de los noventa.

Bravo *et al.*, (1991) estudiaron las emisiones de ozono y su intervención para la lluvia ácida en la Ciudad de México, observando que como consecuencia del cambio de gasolina realizado por Petróleos Mexicanos (PEMEX) en el segundo semestre de 1986 y del transporte de contaminantes emitidos en la parte norte y centro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, por la acción de los vientos y por la radiación solar, se registraron altos niveles de ozono en la parte sur y, por ende, mala calidad del aire en esta zona originando lluvia ácida.

Bravo *et al.*, (2000) analizaron el efecto potencial de la lluvia ácida en monumentos mayas en el periodo de abril de 1994 a diciembre de 1995, concluyendo que no obstante de haberse detectado valores ácidos en la lluvia que se precipita en la costa caribeña de la península de Yucatán, el potencial de incremento al deterioro natural al que están expuestos los monumentos mayas, construidos con material pétreo calizo, no representa una condición alarmante bajo dichas circunstancias.

El Instituto Nacional de Ecología en abril del 2000, realizó un análisis comparativo de la calidad del aire en siete ciudades de México, mediante la información existentes, en estas ciudades en términos de su población, parque vehicular, planta industrial y capacidad instalada para el monitoreo atmosférico.

Saavedra *et al.*, (2003) cuantificaron el pH y la concentración de cationes básicos K^+ y Mg^{2+} , para determinar la presencia de lluvias ácidas y la lixiviación de cationes del follaje de los árboles del Parque Desierto de los Leones, en el D.F. La recolección de agua de lluvia se realizó en tres periodos (junio, agosto y octubre de 1988) con dos categorías de muestreo: a) en claros de bosque y b) de escurrimientos foliares de oyamel. Los resultados obtenidos indicaron que en los bosques Del Desierto de los Leones se presentaron lluvias ácidas, ($pH < 5.65$), especialmente en el mes con mayor precipitación promedio (agosto).

CENICA-INE (2003) llevaron a cabo mediciones de ozono y parámetros meteorológicos en áreas agrícolas de la Zona Metropolitana del Valle de México. El proyecto estuvo conformado por dos etapas: la primera, realizada en las áreas agrícolas de Parres, Tlalpan, Tláhuac y San Luis, Xochimilco durante los meses de agosto y septiembre de 2002 y la segunda, realizada en Parres y Huixquilucan, estado de México, durante los meses de junio y julio de 2003. En las áreas agrícolas de San Luis, Xochimilco, Parres, Tlalpan y Tláhuac, durante el 2002, así como en las áreas de Parres Tlalpan y Huixquilucan, estado de México, durante el 2003, se comprobó que las concentraciones de ozono, alcanzaron valores nocivos para las cosechas agrícolas.

Cerón *et al.*, (2004) en Puerto Morelos, Quintana Roo, colectaron el agua de lluvia para determinar la composición química, durante dos períodos: del 27 de agosto al 6 de septiembre de 2000 y del 7 al 27 de septiembre de 2000. Los resultados obtenidos permiten identificar a los incendios forestales ocurridos en el sitio de muestreo, como la principal fuente de nitratos.

Cerón *et al.*, (2005) determinaron la composición química de la precipitación en sitios de costa en México, (Acapulco, Cancún, Tapachula y Puerto Morelos) a partir de agosto de 1999 a octubre de 2001; las muestras se analizaron para determinar pH, Na⁺, K⁺, Ca⁺², Mg⁺², NH₄⁺, NO₃⁻ y Cl⁻. Los iones más abundantes fueron Na⁺, Cl⁻ y Mg⁺², en todos los sitios y para el pH se obtuvieron valores dentro de la normalidad para el agua de lluvia. Los aerosoles de la sal marina contribuyeron con la mayor parte de Na⁺, Cl⁻ y Mg⁺², mientras que una proporción significativa de K⁺, Ca⁺² se originó en las partículas de suelo.

García *et al.*, (2005) realizaron un estudio en Guadalajara, Jalisco, analizando la variabilidad de los índices de contaminantes precursores de lluvia ácida (SO₂-NO₂) antes, durante y después de la temporada de lluvias del 2005; además de analizar las lluvias de junio a septiembre determinando pH, SO₄⁻² y NO₃⁻. Observando mayor frecuencia de lluvia ácida por NO₂ que por SO₂, concluyendo que la causa principal son las fuentes móviles.

Pérez *et al.*, (2006) analizaron la alteración química del agua de lluvia en dos bosques templados con alto (Desierto de los Leones) y bajo depósito de contaminantes atmosféricos (Zoquiapan) en la cuenca de la Ciudad de México. Durante la temporada de lluvia (agosto-octubre, 2003) se midió la concentración de los principales iones de origen antropogénico (SO₂, NO₂, NH₄⁺ y H⁺) en la precipitación pluvial, su variabilidad y la influencia de la cantidad de lluvia en la concentración iónica. Se obtuvo una concentración iónica mayor en el Desierto de los Leones con 43.3, 33.2 y 49.0 µeq L⁻¹ de SO₂, NO₂, NH₄⁺, mientras en Zoquiapan las concentraciones fueron 28.8, 16.3 y 34.6 µeq L⁻¹ respectivamente. Con esto se evidenció la influencia de la contaminación atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México en los ecosistemas forestales del Desierto de los Leones y en la calidad del agua captada.

Mendoza y Graniel (2007), presentaron la simulación de dispersión de contaminantes emitidos por operaciones de quemadores elevados tipo antorcha, ubicados en las plataformas marinas de la Sonda de Campeche. Las simulaciones se efectuaron empleando un modelo tridimensional de calidad del aire en la atmósfera. Se analizaron seis episodios comprendidos entre noviembre de 2000 y agosto de 2001. Los resultados indicaron una importante influencia de las condiciones climatológicas en la formación y transporte de contaminantes en el Golfo de México.

Durante el 2008, el Instituto Nacional de Ecología colaboró con la Universidad Autónoma del Carmen en el proyecto denominado "Diseño de la Red Mexicana de Depositación Atmosférica", que se realizó con el objetivo de diseñar científicamente una red nacional de depositación atmosférica (húmeda y seca) para determinar el número de sitios de muestreo, las metodologías de muestreo, frecuencias de muestreo, los compuestos y elementos que se deben analizar, metodologías de análisis y criterios de calidad.

Ramírez *et al.* (2010), investigaron la composición química del depósito atmosférico húmedo en Monterrey, la ciudad más importante del noreste de México, y donde la calidad del aire presenta serios problemas debido a las partículas suspendidas. El período de muestreo fue de enero a diciembre de 2007. Los resultados muestran que el valor de pH promedio ponderado fue de 6.58 debido a la neutralización. La química de la lluvia mostró una alta concentración de Ca^{+2} y Mg^{+2} como especies catiónicas y de SO_4^{-2} y Cl^- como especies aniónicas. Dicho trabajo representa la primera contribución de la química del agua de lluvia en el noreste de México.

El gobierno del Distrito Federal desde hace varios años, como parte del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT), opera la Red de Depósito Atmosférico (REDDA), a través del cual se obtienen muestras de depositación húmeda y depositación seca en la Ciudad de México. Su análisis permite indicar el flujo de sustancias tóxicas de la atmósfera a la superficie terrestre y su intervención en la alteración de los elementos típicos del suelo y propiedades químicas del agua de lluvia.

Las investigaciones sobre precipitaciones ácidas en la Ciudad de México y en el interior del país son relativamente recientes y sin un ritmo constante de estudio.

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Atmósfera

La atmósfera rodea al planeta Tierra y nos protege impidiendo la entrada de radiaciones peligrosas del sol. El aire en la atmósfera es esencial para la vida ya que nos permite respirar.

El aire es el resultado de la mezcla de gases que componen la atmósfera terrestre. El aire puro y seco desde el nivel del mar hasta una altura de 11 km en los polos y 17 km en el Ecuador es una mezcla de cierto número de gases llamados gases permanentes (García, 1986) (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Composición del aire (modificada de García, 1986).

N (Nitrógeno)	= 78.08 % en volumen
O (Oxígeno)	= 20.95 % en volumen
Suman	= 99.03 % en volumen
A (Argón)	= 0.93 % en volumen
CO ₂ (Dióxido de carbono)	= 0.03 % en volumen
Total	= 99.99 % “
Ne (Neón)	= 1.8×10^{-3} “
He (Helio)	= 5.3×10^{-4} “
Kr (Kriptón)	= 1.0×10^{-4} “
H (Hidrógeno)	= 53.0×10^{-3} “
Xe (Xenón)	= 8.0×10^{-6} “
O ₃ (Ozono)	= 1.0×10^{-6} (aumenta con la altura)
Rn (Radón)	= 6.0×10^{-18} (disminuye con la altura)

Estos últimos siete son los gases nobles (no se combinan).

Además de los gases permanentes; se encuentra una cantidad variable de vapor de agua y numerosas partículas orgánicas e inorgánicas clasificadas como polvo atmosférico (García, 1986). El vapor de agua presente en la atmósfera permite la formación de nubes, que se forman debido al enfriamiento del aire, provocando la condensación de vapor de agua en gotitas o partículas de hielo visibles. Por ello, la lluvia consiste, básicamente, en que una masa de aire se enfríe para que admita menos vapor de agua y éste se precipite. Esto se consigue cuando la masa de aire se eleva, la elevación puede ser por un accidente

del terreno (lluvia orográfica), por el choque de dos corrientes de aire (lluvias de frente) o por un calentamiento de la masa de aire de la superficie que, al volverse más ligera por el calor, asciende y se enfría (lluvias de convección) (Ayllón, 2003).

Durante un evento de precipitación, los gases y aerosoles son incorporados por los procesos de remoción conocidos como *rain-out* y *wash-out* a las gotas de nube y de lluvia, por lo tanto, a partir de un análisis de muestras de precipitación, es posible identificar y cuantificar las especies químicas presentes en la atmósfera y obtener información relativa a sus fuentes.

2.1.2. Contaminantes del aire

La atmósfera es un sistema dinámico que se encuentra en constante movimiento; las sustancias que la componen se transforman continuamente por efecto de reacciones químicas; además, hay un intercambio continuo de materia entre la atmósfera, los océanos y el suelo. En cierto sentido, la contaminación atmosférica es precisamente la modificación de este estado de equilibrio dinámico (Caselli, 1995). En el aire se encuentra presente una amplia variedad de sustancias; entre estas, las más importantes para evaluar la calidad del aire son las siguientes:

- Partículas suspendidas totales (PST).
- Plomo (Pb).
- Monóxido de carbono (CO).
- Óxidos de azufre (SO_x).
- Óxidos de nitrógeno (NO_x).
- Hidrocarburos.
- Ozono (O₃) y otros oxidantes fotoquímicos.

En los primeros seis casos se trata de sustancias emitidas en forma directa por la combustión y otros procesos industriales, así como por la erosión, los incendios y otros fenómenos naturales; por ello se les conoce como contaminantes primarios. Por su lado, el ozono pertenece a la categoría de los contaminantes secundarios; éstos se producen en la atmósfera como resultado de reacciones fotoquímicas entre los contaminantes primarios, principalmente los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos (Quadri y Sánchez, 1995).

El comportamiento fisicoquímico de los contaminantes desempeña un papel crucial en la contaminación atmosférica. Las sustancias emitidas se dispersan en el aire, donde pueden interactuar químicamente entre sí, con los componentes naturales de la atmósfera y con los materiales de la superficie. A través de estos procesos determinados por la naturaleza química de los contaminantes y por la influencia de condiciones meteorológicas, tales como la intensidad de la radiación solar, la atmósfera puede depurarse, pero también dar origen a contaminantes secundarios (Strauss y Mainwaring, 2001).

El origen y el comportamiento fisicoquímico general de los contaminantes más significativos, las variables que los interrelacionan y su papel en los procesos fotoquímicos se describen a continuación:

2.1.2.1. Partículas suspendidas totales (PST)

Las PST pueden estar constituidas por una gran diversidad de sustancias. Las partículas de origen natural se componen principalmente de suelo y ocasionalmente por partículas de origen biológico (restos orgánicos de plantas y animales, esporas, etc.). Las PST son dispersadas y depositadas de nuevo en la superficie, de acuerdo con sus propiedades sedimentables y con los patrones meteorológicos que prevalecen en un momento determinado. Su reactividad y participación en los procesos fotoquímicos es poco significativa, pero representan el agente antropogénico más relevante en la disminución de la visibilidad (Quadri y Sánchez, 1995). Entre las partículas suspendidas que presentan un mayor interés se encuentran las siguientes:

2.1.2.1.1. Partículas menores a 10 micrómetros (PM 10)

Debido a su tamaño, éstas se sedimentan a una velocidad tan lenta que pueden ser inhaladas, lo cual incrementa el potencial tóxico y/o patógeno de sus componentes. La combustión de combustibles fósiles presenta el proceso más relevante en la emisión de este tipo de partículas, si bien una fracción importante también procede de la reacción entre contaminantes primarios (principalmente SO_2 y NO_x) y de fuentes naturales (Quadri y Sánchez, 1995).

2.1.2.2. *Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM 2.5)*

En esta categoría se incluyen las partículas inhalables de mayor penetración en el sistema respiratorio y, por tanto, las más dañinas a la salud y las que, por su tamaño, interfieren con la dispersión de la luz contribuyendo a la disminución de la visibilidad (Quadri y Sánchez, 1995).

2.1.2.3. **Plomo (Pb)**

En el aire, el plomo se encuentra en estado sólido y forma parte de las partículas suspendidas. Proviene principalmente de los aditivos plomados de la gasolina. El uso de tetraetilo de plomo (TEP) como aditivo de la gasolina tiene la afinidad de lograr una combustión controlada, regulando su calidad antidetonante. En México, la cantidad de TEP que se agrega a las gasolinas para su consumo en el país fluctúa entre 0.5 y 1.0 ml/galón. Así, su importancia como contaminante radica en el uso extensivo e indiscriminado de los vehículos a gasolina (Quadri y Sánchez, 1995).

2.1.2.4. **Monóxido de carbono (CO)**

Éste se forma en todos los procesos de la combustión en los que no se halla presente el oxígeno suficiente, o en los que los gases de la combustión no permanecen en contacto con el oxígeno el tiempo que se precisaría para completar la transformación del carbono en CO₂. Éste es el más abundante y más distribuido de todos los contaminantes del aire (Nevers, 2000).

El monóxido de carbono es menos estable que el dióxido de carbono. No obstante, la velocidad de la radiación directa entre el CO y el oxígeno molecular es baja a temperatura ambiente. El CO se transforma en CO₂ al reaccionar con el radical OH.



H representa aquí una molécula de hidrógeno; también éste es muy energético y reacciona con una molécula de oxígeno:



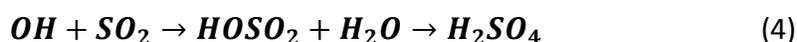
Como consecuencia de estas reacciones, continuamente se consumen y se vuelven a formar, y su concentración en el sistema permanece constante. Las sustancias que contienen carbono también se intercambian entre la atmósfera, los océanos y el suelo a consecuencia de otros procesos; por ejemplo, el dióxido de carbono es un gas muy soluble y por ello una gran cantidad se disuelve en el agua de mar; la descomposición de la materia orgánica transfiere CO_2 de la Tierra a la atmósfera. El monóxido de carbono la consumen, en partes, ciertas especies de bacterias. Por esta razón, el suelo lo sustrae parcialmente de la atmósfera, pero de manera primordial se convierte en bióxido de carbono (Wark, 2008).

2.1.2.5. Óxidos de azufre (SO_x)

Bajo condiciones ambientales, los óxidos de azufre gaseoso se presentan como dióxido de azufre (SO_2) y trióxido de azufre (SO_3). Las emisiones de estos compuestos provienen principalmente de la combustión, como resultado de la oxidación del azufre inorgánico y orgánico contenido en los combustibles. No obstante, también se emiten cantidades significativas de estas sustancias en los procesos de transformación de plomo y zinc, así como en algunos procesos de refinación del petróleo. Por otra parte, el ácido sulfhídrico (H_2S) emitido por algunos procesos de decaimiento biológico y procesos industriales se oxida en el aire produciendo SO_2 como contaminante secundario. La reacción de oxidación de H_2S más importante involucra la participación del ozono (Strauss y Mainwaring, 2001):



Los SO_x contribuyen a incrementar los problemas de partículas respirables y de visibilidad por medio de la formación de sulfatos y la aglomeración de otros gases y partículas con los que interactúan. Por otra parte, estos compuestos actúan como precursores en la formación de lluvia ácida a través de reacciones químicas en las que pueden intervenir compuestos fotoquímicos. El trióxido de azufre es un intermediario importante en la cadena de oxidación de azufre que conlleva a la producción tanto de ácido sulfúrico como de sulfatos. A continuación se resumen las reacciones de oxidación atmosférica que explican la producción del ácido sulfúrico causante de la lluvia ácida.



Donde:

OH	= Radical oxhidrilo
SO ₂	= Dióxido de azufre
HOSO ₂	= Radical HOSO ₂
H ₂ O	= Agua
H ₂ SO ₄	= Ácido sulfúrico

2.1.2.6. Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Las moléculas de nitrógeno y de oxígeno coexisten pacíficamente en el aire, sin reaccionar a las temperaturas habituales. No obstante, cuando el nitrógeno y el oxígeno se encuentran en mutua presencia y la temperatura alcanza entre 1,100°C y 1,200°C, sus moléculas se combinan para dar óxido nítrico (NO) (Caselli, 1995).

El nitrógeno forma siete diferentes óxidos, de los cuales sólo el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) se presentan como contaminantes importantes del aire. Los NO_x que se forman durante la combustión son el producto de la oxidación de nitrógeno atmosférico, o bien, de la oxidación del nitrógeno orgánico del combustible (Quadri y Sánchez, 1995).

Al igual que ocurre con los compuestos del carbono, también se intercambian continuamente entre la atmósfera, el suelo y los océanos sustancias gaseosas que contienen nitrógeno. Entre los compuestos del nitrógeno con el oxígeno, aquel que se encuentra presente en mayores cantidades en la atmósfera es el óxido nitroso (N₂O). Éste, el N₂O, se forma en el suelo gracias a la acción de ciertas bacterias. Una parte de él asciende a la estratosfera, donde sufre una descomposición en óxido nítrico (NO), nitrógeno y oxígeno; el resto es reabsorbido por la Tierra. En presencia de oxígeno molecular, se establece un equilibrio entre el óxido nítrico y el dióxido de nitrógeno (Caselli, 1995):



Existen otras sustancias capaces de transformar el NO en NO₂, como por ejemplo el ozono (O₃).



Las emisiones de NO_x pueden ser convertidas a nitratos que son respirables, o bien generar ácidos y, por lo tanto, lluvia ácida, a partir de las siguientes reacciones:



Donde:

OH	= Radical oxhídrido
NO	= Monóxido de nitrógeno
HONO	= Ácido nitroso
NO ₂	= Dióxido de nitrógeno
HNO ₃	= Ácido nítrico
HO ₂	= Radical HO ₂
HO ₂ NO ₂	= Ácido pernitrato

2.1.2.7. Hidrocarburos no metano (HC)

La existencia de hidrocarburos en la atmósfera incluye hidrocarburos no quemados y otras especies formadas durante la combustión, así como los compuestos orgánicos volátiles derivados de la fabricación, almacenamiento y aplicación de solventes y pinturas. Otros procesos donde se emiten son la manufactura química, la refinación del petróleo y la operación metalúrgica. Para fines de evaluación de la contaminación del aire, de este grupo se excluye el metano porque, a pesar de que su concentración en áreas urbanas es cinco veces mayor que la del resto de los hidrocarburos en conjunto, éste no es un contaminante importante en virtud de que no es tóxico ni reactivo bajo condiciones normales (Quadri y Sánchez, 1995). A las concentraciones comúnmente presentes en la atmósfera, incluso en las áreas contaminadas, el único hidrocarburo que ejerce un efecto tóxico sobre las plantas es el etileno (Nevers, 2000).

2.1.2.8. Oxidantes fotoquímicos [ozono (O₃), peroxiacetilnitrato (PAN).]

Estos oxidantes son contaminantes secundarios; es decir, no son descargados directamente a la atmósfera, sino que se forman a través de una serie de reacciones químicas catalizadas por la radiación solar. De éstos, el ozono es el compuesto más

abundante en la atmósfera. El ciclo fotoquímico de la interacción del monóxido y dióxido de nitrógeno con moléculas disociadas de oxígeno se generan por medio de las siguientes reacciones (Quadri y Sánchez, 1995):



Donde:

NO	= Monóxido de nitrógeno
NO ₂	= Dióxido de nitrógeno
hv	= Energía radiante solar
O	= Átomo libre de oxígeno
O ₂	= Oxígeno
O ₃	= Ozono

En ausencia de HC, el NO₂ es disociado mediante fotólisis por la luz del sol para producir NO y un átomo de oxígeno. Éste se combina con el oxígeno molecular (O₂) del aire para producir ozono, que luego puede reaccionar con N ó NO para generar NO₂; en consecuencia, el proceso comienza de nuevo hasta alcanzar un equilibrio dinámico. Los HC también reaccionan con el oxígeno atómico para generar compuestos oxidantes y radicales libres que interactúan con el NO. Las reacciones típicas de los HC que explican la formación de NO₂ y la de otros compuestos precursores son:



Donde:

RHO	= Cualquier aldehído
HC	= Cualquier hidrocarburo, excepto el metano
hv	= Energía radiante solar
R	= Cualquier radical derivado de un hidrocarburo
OH	= Radical oxhídrido
RO ₂	= Peróxido derivado de un radical
HO ₂	= Radical HO ₂

Estas ecuaciones representan las formas generales de cientos de posibles reacciones. En la formación del *smog* fotoquímico que se produce principalmente en atmósferas urbanas al reaccionar entre sí los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el oxígeno en presencia de la radiación ultravioleta de los rayos del sol, se ha detectado la participación de más de cien especies de hidrocarburos.

2.1.3. Efectos de los contaminantes a la salud

El hombre, al vivir en comunidades desarrolladas y, en consecuencia contaminadas, por lo general expone sólo áreas de piel a la atmósfera; pero cada día inhala aproximadamente 7500 litros de aire, de tal manera que sus pulmones y sistema respiratorio general están en contacto con ella y tienen la potencialidad de retener cualquier sustancia nociva que pueda estar contenida en ese aire (Strauss y Mainwaring, 2001).

2.1.3.1. Partículas PM 10

La contaminación por partículas finas puede causar el deterioro de la función respiratoria en el corto plazo. En el largo plazo contribuye a enfermedades crónicas, al cáncer y a la muerte prematura. Las partículas finas conocidas como PM 10, son esencialmente nocivas porque pueden penetrar a las cavidades pulmonares sin ser captadas por la acción de limpieza natural del sistema respiratorio (Strauss y Mainwaring, 2001).

2.1.3.2. Plomo

El plomo es el metal pesado contaminante más generalizado en la atmósfera y, además de unas cuantas industrias asociadas con el plomo, este metal procede de los escapes de automóviles. El plomo que originan los automóviles se asocia exclusivamente con partículas dentro del rango de lo respirable; esto es, con un tamaño predominante de partículas de un micrómetro de diámetro o menos, las cuales pueden alcanzar más fácilmente la porción inferior del pulmón, los alveolos, donde el plomo se encuentra disponible para intercambio dentro de la corriente sanguínea. Se ha demostrado en forma experimental que al menos 20% del plomo inhalado se puede absorber (Strauss y Mainwaring, 2001).

2.1.3.3. Monóxido de carbono

Al inhalarse, el CO interfiere con el transporte del oxígeno (O_2) a los tejidos, porque la hemoglobina (que es el pigmento sanguíneo encargado del intercambio gaseoso tisular) tiene una afinidad 200 veces mayor por el CO que por el O_2 . De esta manera, el CO reacciona con la hemoglobina formando carboxihemoglobina (COHb), lo cual limita la distribución de oxígeno al cuerpo. A niveles del 5% al 10% de COHb se deteriora la percepción visual, la destreza manual y la habilidad para aprender (una concentración de 50 ppm de CO durante ocho horas ocasiona un nivel de COHb de alrededor de 7.5%). A niveles de 2.5% a 3% de COHb, las personas con enfermedades cardíacas no pueden realizar ciertos ejercicios de la misma manera como en ausencia de COHb (una exposición a 20 ppm de CO durante ocho horas produce un nivel de COHb de alrededor de 2.8 %).

Algunas poblaciones sensibles están constituidas por personas con afecciones del corazón y circulatorias, con enfermedades pulmonares crónicas, así como los ancianos, infantes y las personas jóvenes con tipos de hemoglobina anormales que afectan la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre (Wark, 2008).

2.1.3.4. Dióxido de azufre

El dióxido de azufre es un irritante respiratorio muy soluble, ello provoca que la mayor parte que se inhala se absorba por la nariz y las vías respiratorias superiores; como consecuencia, pueden existir cambios en la función pulmonar y síntomas respiratorios en individuos sanos (Quadri y Sánchez, 1995).

2.1.3.5. Óxidos de nitrógeno

Estudios de salud ocupacional han demostrado que el dióxido de nitrógeno puede ser fatal en concentraciones elevadas. A menores niveles, pero todavía mayores que los que se respiran en el aire ambiente, irrita los pulmones, es causa de bronquitis y neumonía, y provoca disminución de la resistencia a infecciones respiratorias (Quadri y Sánchez, 1995).

2.1.3.6. Ozono

Entre los efectos están los cambios transitorios medibles en la función pulmonar, síntomas respiratorios y afectación de las vías respiratorias en personas que realizan ejercicio y actividades recreativas en exteriores. Los efectos del ozono son potenciados por la presencia de otras variables ambientales y existe evidencia que son acumulativos. Los efectos del ozono están relacionados más cerca con la exposición acumulativa diaria que con las concentraciones máximas de una hora; las exposiciones a largo plazo son todavía inciertas (Ayllón, 2003).

2.1.4. Efectos de los contaminantes en la vegetación

Las plantas adquieren los contaminantes ya sea directamente, a través de intercambio de gases con la atmósfera, o a través de la humedad absorbida del suelo. El suelo puede haber estado expuesto a los contaminantes del aire, los cuales entonces se habrán disuelto en el agua y el suelo. Los contaminantes ácidos del aire en particular se disuelven fácilmente en la humedad superficial o lluvia. Aun cuando la fuente de

contaminación de aire se haya removido, los materiales pueden permanecer ahí para afectar el crecimiento de las plantas, aunque con el tiempo se diluyen y separan por lixiviación con la lluvia (Strauss, Mainwaring, 2001).

Las plantas son organismos muy sensibles a la exposición de contaminantes aéreos en virtud de que llevan a cabo un intercambio gaseoso que les resulta vital. Además, por medio de la fotosíntesis, las plantas son responsables de la liberación en la atmósfera de grandes cantidades de oxígeno, elemento indispensable para la mayor parte de los organismos del planeta.

Distintos contaminantes ocasionan diferentes efectos, como muestra la tabla 2.2. Los daños dependen del contaminante, su concentración, tiempo de exposición y de la resistencia de la planta. Cuando uno de estos organismos se expone a la acción de varios contaminantes, los resultados son más evidentes (Quadri y Sánchez, 1995).

Tabla 2.2 Efectos de los contaminantes sobre la vegetación (Modificado de Strauss y Mainwaring, 2001).

Contaminante	Efectos en la vegetación
SO₂	Oscurecimiento de las partes afectadas de la hoja. Resecación color blanco.
NO₂	Reducción de nitrato para convertirlo en amoníaco.
O₃	Destrucción de clorofila. Puntos de color oscuro, rojas, moradas o cafés.
Pb	Afecta el crecimiento.

2.1.5. Efectos de los contaminantes en el suelo

La incidencia de la lluvia acida sobre los suelos contribuye a su acidificación, donde ocurre el fenómeno de hidrólisis, esta reacción libera e incrementa las concentraciones de cationes hidrógeno aumentando el pH y la solubilización del aluminio, esto sucede cuando los valores de pH son menores a 5.5 causando toxicidad por este elemento la mayoría de las especies vegetales.

La acidificación del suelo promueve la lixiviación de las bases de cambio importantes en el proceso de nutrición de las plantas, viéndose afectada la fertilidad de los suelos y por ende la producción de los cultivos, este fenómeno se ve mayormente representado en las zonas y/o regiones de clima húmedo.

La sensibilidad a la acides es mayor en aquellos suelos donde la degradación de los minerales se produce lentamente. Además, el proceso de acidificación también libera

metales que pueden migrar hacia los mantos freáticos y dañar a los microorganismos del suelo responsables de la descomposición de materia orgánica, así como a algunas aves y mamíferos superiores de la cadena alimentaria, e incluso al hombre (Acevedo, A. O., 2007, Baquedano, 2009).

2.1.6. Efectos de los contaminantes de origen antropogénico

La creciente emisión de contaminantes de origen antropogénico a la atmósfera ha propiciado una serie de alteraciones atmosféricas cuyas consecuencias a medio o largo plazo son difíciles de prever (Espert y López, 2004). Estas alteraciones se pueden resumir de la siguiente manera:

- Efecto invernadero: corresponde al incremento de la temperatura media de la Tierra y de la atmósfera por defecto de las mayores concentraciones de CO₂ en la atmósfera.
- *Smog* fotoquímico: ocurre principalmente en áreas urbanas, por ozono originado por reacciones fotoquímicas y otros compuestos.
- Rotura de la capa de ozono: corresponde a la previsible disminución de la capa de ozono de la estratosfera como consecuencia de la descarga de determinadas sustancias a la atmósfera, tales como óxidos de nitrógeno y clorofluorocarbonos.
- Acidificación del ambiente: se origina como consecuencia del retorno a la superficie de la Tierra en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera. Esta acidificación se puede presentar como depositación seca o húmeda (lluvia ácida). Un factor importante en las características ácido-base de la lluvia es la emisión de materiales alcalinos sólidos (Na, Mg, Ca, K) provenientes del suelo, los cuales pueden tener una acción significativa en la disminución de la acidez de la lluvia

2.1.7. Efectos de los contaminantes al ambiente

La precipitación atmosférica es uno de los mecanismos naturales más efectivos de remoción de contaminantes gaseosos y partículas presentes en la atmosfera; se puede presentar como precipitación seca o húmeda. Si las partículas contaminantes al ser removidas caen acompañadas por lluvia entonces a este tipo de precipitación se la llama depósito húmedo; este incluye a las sustancias incorporadas dentro de la nube. En

contraste el depósito seco ocurre cuando las partículas al ser removidas caen a la superficie, debido a la gravedad durante un período seco. A consecuencia de este fenómeno, tanto la composición química como el pH de la precipitación total varían dependiendo de la localización geográfica y de las fuentes de emisión propias de las distintas regiones (Herrera y Rodríguez, 2009).

Los gases y aerosoles atmosféricos, desde varias fuentes naturales y antropogénicas, se incorporan en las gotas de lluvia a través de varios procesos fisicoquímicos durante los eventos de precipitación. La química de la precipitación se debe a interacciones complejas entre la dinámica de las nubes y procesos microfísicos, así como una serie de reacciones químicas atmosféricas que ocurren en el interior y por debajo de las nubes. La acidez y la concentración de iones en el agua de lluvia dependen de la intensidad de las fuentes de los constituyentes, su incorporación física en el sistema hidrológico y la transformación química durante el proceso de formación de las nubes y arrastre por debajo de las mismas (Kulshrestha *et al.* 1999).

Los contaminantes pueden incorporarse al agua de lluvia durante la formación de las nubes, o bien, puede incorporarse a estas durante la caída de las gotas; es decir, en el trayecto entre la nube y el suelo (Ayllón, 2003). A la primera forma de incorporación se le llama lavado dentro de la nube o *rainout* y a la segunda, lavado fuera de la nube o *washout*.

El lavado dentro de la nube o *rainout* es el proceso mediante el cual las partículas contaminantes sirven como núcleos de condensación. De esta manera se incorporan a la nube durante su proceso de formación.

El lavado fuera de la nube o *washout*, en este proceso los gases y las partículas se incorporan por absorción a las gotas de lluvia durante su caída desde la nube hasta el suelo.

Como consecuencia de estos dos procesos se produce la lluvia ácida entendida como un fenómeno en el que se produce la combinación de los óxidos de nitrógeno y azufre provenientes de las actividades humanas, con el vapor de agua presente en la atmósfera, los cuales se precipitan posteriormente, pero pueden ser arrastrados a grandes distancias de su lugar de origen antes de depositarse en forma de lluvia (Kulshrestha *et al.* 1999).

La transferencia de contaminantes no sólo ocurre durante la caída de las gotas de lluvia, también existe transporte de gases en las nubes debido a que el vapor condensado mantiene condiciones de equilibrio con los gases atmosféricos, de hecho es este equilibrio

con el CO₂ lo que provoca que la lluvia tenga un pH natural. El agua de lluvia es, por naturaleza, ligeramente ácida debido a la formación de ácido carbónico al alcanzar un estado de equilibrio con el dióxido de carbono presente en la atmósfera. En áreas remotas del mundo el valor promedio de pH del agua de lluvia es de 5.6. Tales mediciones asociadas al ciclo natural del azufre sugieren que, en ausencia de la actividad humana y las emisiones naturales de polvo alcalino, los ácidos orgánicos y el nitrógeno influyen en la acidez natural de lluvia (Galloway *et al.* 1984).

Cuando los contaminantes salen de sus fuentes la concentración atmosférica de los mismos disminuye al mezclarse las nubes (penachos) de aire contaminado con el aire limpio, al perderse los contaminantes cuando se depositan y al transformarse algunos de ellos. Con la formación de contaminantes secundarios tienen lugar dos transformaciones de especial importancia: la reacción a la luz del sol entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos (queroseno) para formar el ozono; con la creciente posibilidad de transformarse con el tiempo en ácido sulfúrico y nítrico. No obstante, los productos de la reacción en partículas de ácido nítrico, son relativamente más importantes a medida que cobran más importancia las emisiones de contaminantes de los vehículos. Según Albert L. (2000), este fenómeno se debe a la incorporación y formación de compuestos ácidos en la atmósfera a partir de emisiones (como partículas y gases) de vehículos de motor o de fuentes industriales, además de aquellos contaminantes que son emitidos por fuentes naturales como los procesos geológicos (erupciones volcánicas y erosión) y biológicos (emisiones biogénicas derivadas de distintos tipos de fermentación aerobia y anaerobia), incendios forestales y descargas eléctricas (Baquedano, 2009).

El conocimiento de la composición química de las precipitaciones es crítico para el entendimiento de la contaminación regional y local y sus efectos sobre los ecosistemas. Entre las sustancias ácidas o potencialmente ácidas envueltas en la formación de la lluvia ácida, se pueden señalar los compuestos de azufre, nitrógeno y cloro. Un factor importante en las características ácido-base de la lluvia es la emisión de materiales alcalinos como carbonato de calcio, magnesio y amoníaco, que se encuentran generalmente como un vapor capaz de neutralizar los ácidos sulfúrico y nítrico (Sánchez *et al.*, 2009).

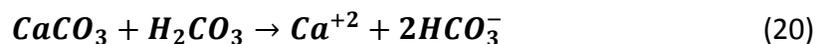
La depositación de partículas tiene relación con la meteorización que es la descomposición, desgaste, desintegración y destrucción de las rocas, como respuesta a su exposición a los agentes de la intemperie (aire, agua, variaciones de temperatura, acción de organismos). Puede ser fundamentalmente mecánico o físico (desintegración de la roca en trozos cada vez más pequeños); o bien químico (descomposición de los componentes originales de la roca a otros diferentes). Por meteorización química se entienden los

complejos procesos que descomponen los componentes de las rocas y las estructuras internas de los minerales. Dichos procesos convierten los constituyentes en minerales nuevos o los liberan al ambiente circundante (Tarbuck, E. y Lutgens F., 2005). Los principales procesos de meteorización química son: disolución, oxidación e hidrólisis.

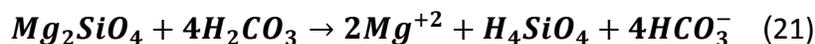
La disolución es el tipo de descomposición más fácil, exactamente igual como se disuelve el azúcar en el agua lo hacen ciertos minerales. Uno de los minerales más hidrosolubles es la halita (NaCl). El compuesto es eléctricamente neutro, pero sus átomos (Cl y Na) mantienen su carga respectiva, lo cual atrae la molécula de agua, para ubicarse de manera que la carga positiva residual quede cerca de un átomo de cloro y que la carga negativa residual quede cerca de un sodio, lo cual altera las fuerzas de atracción existentes en el cristal de halita y libera los iones a la solución acuosa.

Es de destacar, que la mayoría de los minerales son, a efectos prácticos, insolubles en agua pura; pero la presencia de pequeñas cantidades de ácido (H_2CO_3 , ácidos orgánicos) incrementa de manera notable la capacidad corrosiva del agua. Por ejemplo el ácido carbónico H_2CO_3 se crea cuando el CO_2 de la atmósfera se disuelve en las gotas de lluvia. Conforme el agua de lluvia acidificada afecta al suelo, el CO_2 de este último puede aumentar la acidez de la solución de meteorización. También se liberan varios ácidos orgánicos en el suelo cuando los organismos se descomponen, y la meteorización de la pirita y de otros sulfuros produce ácido sulfúrico.

Con independencia de la fuente de donde proceda el ácido, esta sustancia enormemente reactiva descompone con facilidad la mayoría de las rocas y origina ciertos productos que son hidrosolubles. Por ejemplo el mineral calcita, $CaCO_3$, que es el componente de rocas ornamentales comunes, el mármol y la caliza, resulta fácilmente atacado incluso por una solución débilmente ácida:



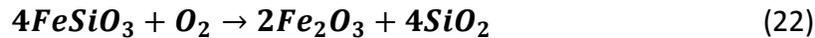
Los monumentos y los edificios construidos con caliza están sujetos a la acción corrosiva de los ácidos, en particular en áreas industriales donde el aire está contaminado y lleno de humo.



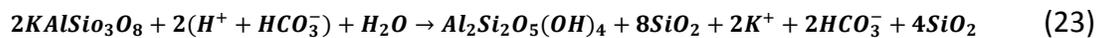
La oxidación es el proceso por el cual el oxígeno se combina con otros elementos o compuestos, o bien éstos pierden electrones. El oxígeno se combina fácilmente con el hierro en esos minerales para formar ácido férrico denominado hematita (Fe_2O_3) o en otros casos limonita [$FeO(OH)$]. Sin embargo, la oxidación sólo puede ocurrir después de

que el hierro es liberado de la estructura del silicato por otro proceso denominado hidrólisis.

Otra reacción importante se produce cuando se descomponen los sulfuros, como la pirita. En un ambiente húmedo, la meteorización química de la pirita (FeS_2) produce ácido sulfúrico (H_2SO_4) y oxi-hidróxido de hierro [$\text{FeO}(\text{OH})$].



La hidrólisis es el fenómeno por el cual una sustancia reacciona con el agua. Usualmente, el H^+ del agua disociada substituye algún catión de la red cristalina, lo cual la desestabiliza al destruir la disposición ordenada original y se va descomponiendo. En estado natural es frecuente que el agua contenga H^+ adicionales, lo cual acelera la meteorización. En el agua el H_2CO_3 se ioniza para formar iones hidrógeno (H^+) e iones bicarbonato (HCO_3^-). La meteorización del feldespato potásico componente del granito es el siguiente:



En esta reacción los iones hidrógeno (H^+) atacan y substituyen a los iones potasio (K^+) en la estructura del feldespato, alterando así la red cristalina. Una vez retirado, el potasio está disponible como nutriente para las plantas o se convierte en la sal soluble bicarbonato potásico (KHCO_3), que puede incorporarse en otros minerales o ser transportado.

La acción de los mecanismos erosivos, físicos y químicos, tienden a dar origen a fragmentos de minerales o rocas. El transporte se lleva a cabo como iones en solución, suspensiones coloidales o como clastos. Siendo las suspensiones coloidales las que participan en la depositación húmeda y seca.

Los efectos de la lluvia ácida son varios; existe una acidificación de las fuentes naturales del agua, lo que puede tener un efecto desfavorable sobre el desarrollo de la vida de los peces en cuantos a condiciones de alimentación y de reproducción. También el suelo sufre las consecuencias de la lluvia ácida; aparece una creciente lixiviación, con pérdida de las sustancias minerales que componen el suelo, lo que puede tener un efecto devastador sobre el desarrollo de las cosechas o un cambio en la vegetación natural de los bosques, la acidez penetra en la tierra y afecta las raíces de los árboles, al tiempo que sus hojas se ven afectadas también directamente por las gotas de lluvia que reciben así como efectos directos en la misma vegetación (Espert y López, 2004). Los edificios y las construcciones también se ven seriamente afectados, por lo que deben ser

continuamente restaurados. La consecuencia de lluvia ácida en el ser humano determina un incremento muy importante de las afectaciones respiratorias (asma, bronquitis etc.).

2.1.8. Panorama internacional y nacional de las emisiones a la atmósfera.

El fenómeno de la lluvia ácida es un problema a nivel mundial, el cual se presenta tanto en países desarrollados como en aquellos en vías de desarrollo, lo que ha causado una intensa preocupación por los efectos que ocasiona sobre los ecosistemas, la salud y la economía. En países como Estados Unidos, Canadá, Suecia, Alemania y Japón, entre otros, se han desarrollado intensos programas para entender los procesos que conllevan a la formación de la lluvia ácida y los efectos que está ocasionando sobre los ecosistemas, tanto terrestres como acuáticos, las áreas de cultivo y los materiales de construcción empleados por el hombre (SEMARNAT, 1999).

Los contaminantes no reconocen fronteras políticas, una vez liberados a la atmósfera, su destino final depende en parte de sus características químicas y físicas y en gran parte de las condiciones meteorológicas prevalecientes. En países como Canadá, Estados Unidos y México ocurren cambios importantes en las relaciones ambientales (CCA, 1997).

Aunque tradicionalmente se ha considerado la depositación ácida como una cuestión transfronteriza a la que se encuentra el noreste de Estados Unidos y el sureste de Canadá, es una constante en toda la región, mientras que la depositación seca suele ocurrir cerca de la fuente de las emisiones de SO_2 ó NO_x , la húmeda puede ocurrir a miles de kilómetros de distancia. En México se ha detectado depositación ácida, donde destruye tesoros nacionales como los monumentos de la cultura maya y construcciones con mármol o caliza.

Reducir los riesgos significativos que representan los contaminantes transfronterizos exige la acción colectiva. Otro motivo para la colaboración es que varios de estos contaminantes los generan, básicamente, unas cuantas categorías de fuentes comunes de los tres países, que resumen las principales fuentes de contaminantes de Canadá, Estados Unidos y México. La figura 2.1 muestra que:

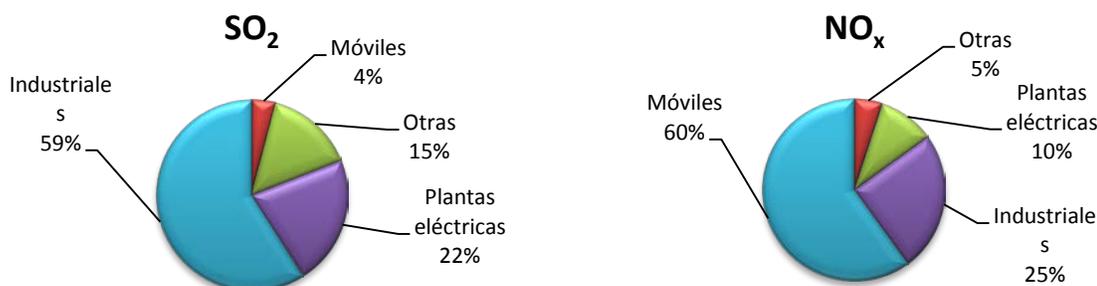
El sector industrial es fuente importante de SO_2 , NO_x en Canadá. Mientras que en Estados Unidos las plantas eléctricas son la fuente principal de SO_2 .

Las fuentes móviles que queman combustibles fósiles (automóviles, camiones de carga, autobuses, etc.) corresponden en América del Norte por cerca de un tercio de las emisiones de NO_x.

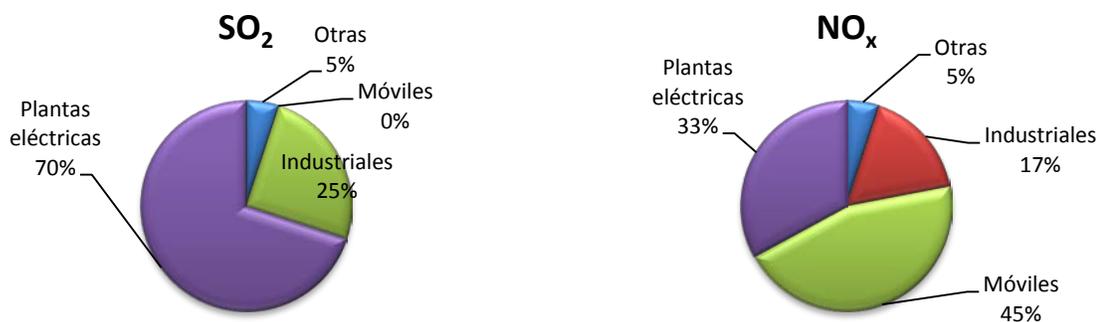
En México la fuente principal de SO₂ son las plantas eléctricas, seguido por la actividad industrial, mientras que para el NO_x son las fuentes móviles la fuente principal.

Es necesario compartir activamente las prácticas óptimas tanto respecto de la política y los métodos tecnológicos para reducir las emisiones, como en cuanto a las técnicas de monitoreo y evaluación de sus efectos contribuiría a llevar a efecto ese proceso (CCA, 1997).

Canadá

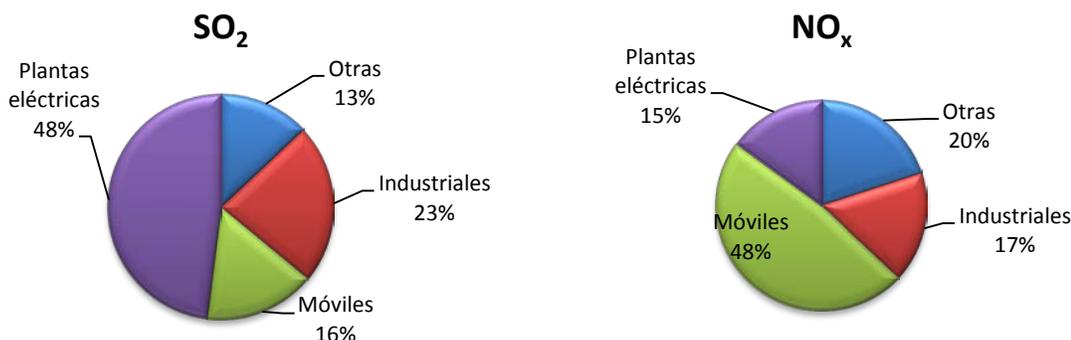


Estados Unidos



a) Modificado de *Canada-United States Air Quality Agreement Progress Report, 1996*

México



b) Modificado de J. Quintarilla y M. Bauer. *Protections of Energy Demand and Emissions*. PUE-UNAM. Datos de 1995.

Figura 2.1 Principales alteraciones atmosféricas producidas por los contaminantes de origen antropogénico.

Canadá, Estados Unidos y México participan actualmente en diversos esfuerzos internacionales para controlar el transporte transfronterizo de la contaminación atmosférica (SMA, 2002). Entre ellos están:

- El Programa de Canadá y Estados Unidos para Desarrollar un Plan de Acción Conjunto para Tratar la Contaminación Atmosférica Transfronteriza (1981).
- El Acuerdo de La Paz de 1983.
- El Acuerdo de Canadá y Estados Unidos sobre la Calidad del Aire del 13 de marzo de 1991.
- Programa Integral Ambiental Fronterizo 1992-1994.
- Programa Frontera XXI (1996).

Paralelamente, la Unión Europea ha desarrollado políticas que limitan las emisiones totales de cada Estado miembro, con el objetivo de alcanzar niveles de calidad del aire que no sean perjudiciales para la salud de las personas. A partir de lo anterior se han generado diferentes programas, como son:

- La Convención sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Largas Distancias de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (1979).
- Revisión del Programa nacional de reducción de emisiones (2001).
- Programa Aire puro para Europa (CAFE) (2001).
- El Plan de Acción 2005-2007 de la E4.
- Desarrollo del Plan Nacional Español de Reducción de Emisiones de las Grandes Instalaciones de Combustión (PNRE-GIC) (2007).

- Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia. Horizonte 2012.

Asimismo, en México los programas para mejorar la calidad del aire constituyen uno de los principales instrumentos desarrollados para revertir las tendencias de deterioro de la calidad del aire en las principales ciudades, por lo que se han desarrollado diferentes programas, como son:

- Instalación de la Red de Monitoreo Atmosférico (1986).
- Programa de Verificación Vehicular y el Programa Hoy No Circula (1990).
- Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica 1990-1994 (PICCA).
- Reglamento en materia de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica (1998).
- Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) (2000).
- Programa de Calidad del Aire 1995-2000 (PROAIRE).

Los estudios académicos sobre efectos de la contaminación sugieren, en general, que las políticas gubernamentales de control de la calidad del aire pueden mejorar las condiciones ambientales (evitando daños a áreas verdes, y la presencia de lluvia ácida o de cambios climáticos locales) restringiendo los impactos negativos de la contaminación sobre la salud de las personas (Quadri, 1995; Rojas y Garibay, 2003; Turk *et al.*, 2004). En México, sin embargo, contamos con escasas evaluaciones sobre el desempeño de estas políticas y, en consecuencia, con información limitada sobre cómo mejorar su gestión y resultados, cuestionando la efectividad de estas políticas (Camacho y Flamand, 2008).

2.1.9. Políticas y normativas sobre calidad del aire

Se considera que el aire limpio es un requisito básico de la salud y el bienestar humano. Según una evaluación de la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre la carga de enfermedad debida a la contaminación del aire, son más de dos millones las muertes prematuras que se pueden atribuir cada año a los efectos de la contaminación del aire en espacios cerrados (producida por la quema de combustibles sólidos). Más de la mitad de esta carga de enfermedad recae en las poblaciones de los países en desarrollo (OMS, 2005).

2.1.10. Normativas internacionales y nacionales

Para proteger la salud humana, los gobiernos en muchos países del mundo controlan los niveles de contaminantes atmosféricos utilizando diversas herramientas normativas. Entre éstas se encuentran las normas de calidad del aire, que establecen concentraciones aceptables para la población en términos de los riesgos que los contaminantes representan para la salud humana. Así, dichas normas definen las concentraciones aceptables durante diferentes periodos de exposición, ya que en algunos casos se considera que una concentración menor, pero durante un tiempo de exposición mayor, también representa un riesgo para la población (WHO, 2000).

En México la Secretaría de Salud es el órgano responsable de evaluar la evidencia de los impactos de la contaminación atmosférica en la salud y establecer los límites permisibles de concentración de los contaminantes en la atmósfera (INE, 2007). Algunos de estos valores son comparables con las normas de Estados Unidos o de la Unión Europea; así los valores de la norma de PM_{2.5} y la norma anual de SO₂ son iguales que los normados en los Estados Unidos. Sin embargo, para otros contaminantes las normas mexicanas tienen establecidos límites por arriba de otras normas internacionales, como sucede con la norma horaria de NO₂, cuyo valor se encuentra establecido en casi dos veces el valor especificado en la Unión Europea.

La tabla 2.3 compara las normas de calidad del aire para EE.UU., Europa y México; incluye el periodo de tiempo a lo largo del cual se promedian las concentraciones del contaminante (tipo de exposición) y el valor numérico de cada norma.

Tabla 2.3 Comparación de límites permisibles en México, Estados Unidos y la Unión Europea (SSA, 2009; WHO, 2005; EPA, 2009)

Contaminante	México (NOM)	Estados Unidos (EPA)	Unión Europea (CE)
O₃	NOM-020-SSA1-1993	40 CFR 50.10 40 CFR 50.9	Directiva 2002/3/CE
	Promedio para 8 horas	0.08 ppm	120 µg/m ³ (0.06 ppm)
	Promedio para 1 hora	0.11 ppm	0.12 ppm
CO	NOM 021 SSA1-1993	40 CFR 50.9	Directiva 2000/69/CE
	Promedio para 8 horas	11 ppm	10 mg/m ³ (9 ppm)
	Promedio para 1 hora		35 ppm
SO₂	NOM-022-SSA1-1993	40 CFR 50.5	Directiva 1999/30/CE
	Promedio anual	0.03 ppm	0.03 ppm
	Promedio para 24 horas	0.13 ppm	0.14 ppm
	Promedio para 1 hora		125 µg/m ³ (0.047 ppm) 350 µg/m ³

NO₂	NOM-023-SSA1-1993	40 CFR 50.12	Directiva 1999/30/CE
Promedio anual		0.053 ppm (100 µg/m ³)	40 µg/m ³ (0.021ppm)
Promedio para 1 hora	0.21 ppm		200 µg/m ³ (0.1ppm)
PM 2.5	NOM-025-SSA-1993	40 CFR 50.7	Directiva 1999/30/CE
Promedio anual	15 µg/m ³	15 µg/m ³	25 µg/m ³
Promedio para 24 horas	65 µg/m ³	65 µg/m ³	
PM10	NOM-025-SSA-1993	40 CFR 50.6	Directiva 1999/30/CE
Promedio anual	50 µg/m ³	50 µg/m ³	20 µg/m ³
Promedio para 24 horas	120 µg/m ³	150 µg/m ³	50 µg/m ³
Pb	NOM-026-SSA1-1993	40 CFR 50.12	Directiva 1999/30/CE
Promedio trimestral	1.5 µg/m ³	1.5 µg/m ³	0.5 µg/m ³ para 1 año

2.2. GEOLOGÍA REGIONAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

La geología del estado de Hidalgo está constituida por un basamento de rocas metamórficas de edad precámbrica que soporta en discordancia a una potente secuencia de rocas sedimentarias paleozoicas, rocas sedimentarias mesozoicas del Triásico-Jurásico y Cretácico, sobreyaciendo en discordancia angular a las rocas anteriores, estando éstas a su vez cubiertas por rocas del Cenozoico que en su base es marino, para cambiar hacia su cima a rocas volcánicas de composición andesítica y basáltica (Córdoba y Camargo, 1992).

Fisiográficamente, el estado de Hidalgo incluye la provincia del Eje Neovolcánico Transversal en la porción sur y al norte la provincia Sierra Madre Oriental. La provincia del Eje Neovolcánico de edad Pliocuaternaria, está constituida por rocas volcánicas de composición básica-intermedia, con escasos horizontes intercalados de rocas volcánicas ácidas. Dentro de las depresiones existentes se depositaron sedimentos lacustres en ocasiones intercaladas con lavas. La provincia de la Sierra Madre Oriental se caracteriza por un paquete sedimentario que incluye rocas mesozoicas y algunas paleozoicas (COREMI, 1992).

De manera general, en el estado de Hidalgo afloran rocas volcánicas ácidas e intermedias de edad Paleoceno-Plioceno que corresponden al vulcanismo tipo Sierra Madre Occidental, sin embargo, su afloramiento no tiene gran distribución, por lo que no se puede establecer la presencia de la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental, sino que queda incluida en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico.

2.2.1. Geología local

Por estar enclavado en la porción elevada de la Sierra de Pachuca, estructura orográfica a su vez integrante del Eje Neovolcánico Transversal, el relieve actual del Parque constituye un alineamiento Este-Oeste, edificado por actividad volcánica del terciario, con afloramiento de material rocoso de las Formaciones Vizcaína, Cerezo y Zumate pertenecientes al Grupo Pachuca; son de carácter lenticular, conformadas por derrames lávicos, brecha y conglomerados volcánicos, toba (foto 2.1) y arenisca tobácea, interestratificadas en proporciones variables tanto vertical como lateralmente (Córdoba y Camargo, 1992). También afloran materiales sedimentarios del reciente (figura 2.2).



Foto 2.1 Toba riolítica intemperizada.

Las emisiones que dieron lugar al macizo montañoso se iniciaron, durante el Mioceno tardío, con derrames de lavas andesíticas y dacíticas de textura porfídica, así como por brechas integradas con bloques subredondeados con una matriz tobácea. Estas rocas, pertenecientes a la Formación Vizcaína, afloran en el Parque a lo largo del extremo Norte y ocupan 532 ha equivalentes a 19.4% del área (Melo y López, 1994).

La Formación Vizcaína comprende rocas de derrame y brechas de derrame de composición andesítica y dacítica; hacia la parte posterior de la formación se observan capas de toba y conglomerado volcánico.

Eventos volcánicos ocurridos en el Plioceno temprano dieron origen a la Formación Cerezo, constituida por derrames lávicos de composición riolítica que en algunas áreas establecen contacto con capas de clásticos volcánicos de aspecto tobáceo y fácilmente separables debido a su escasa compactación. Estos derrames poseen estructura fluidal con intercalaciones de rayas que varían de color gris a claro. En el Parque, dicha formación aflora en un reducido sector Centro-Sur, próximo a El Chico, y cubre 63 ha. (2.3% del área).

Más tarde, con edad del Plioceno medio, la actividad volcánica arrojó rocas andesíticas y dacíticas, originando, por interestratificación de derrames lávicos, estratos de lava y depósitos lávicos correspondientes a la Formación Zumate; esta formación es representativa del área y cubre 2,073 ha la cual es el 75.7% en relación a la misma.

Formación Zumate: esta unidad suprayace en discordancia angular al Grupo Pachuca (Fries, 1963). Corresponde a dacitas relativamente inalteradas, poco falladas y sin mineralización cuarcífera, pero afectadas por diques. Esta formación es notable por su textura porfídica y por las formas erosionales de pináculos (Cerro de los Frailes, Cerro de las Monjas y Peña de las Ventanas) (Segerstrom, 1961). Está constituida por una sucesión de derrames de lavas dacíticas, aglomerados de composición dácitica y lahares o derrames de lodo volcánico.

Los materiales más recientes de origen acumulativo son producto del intemperismo y erosión de rocas que afloran en sectores elevados. Este material, constituido por suelos aluviales abarca 71 ha., representando sólo 2.6% del área.

La orientación Este-Oeste del macizo montañoso y la morfología de su relieve condicionan la existencia de una amplia vertiente Norte, con un declive general de 18°, en el cual afloran las formaciones Zumate, Cerezo y Vizcaína.

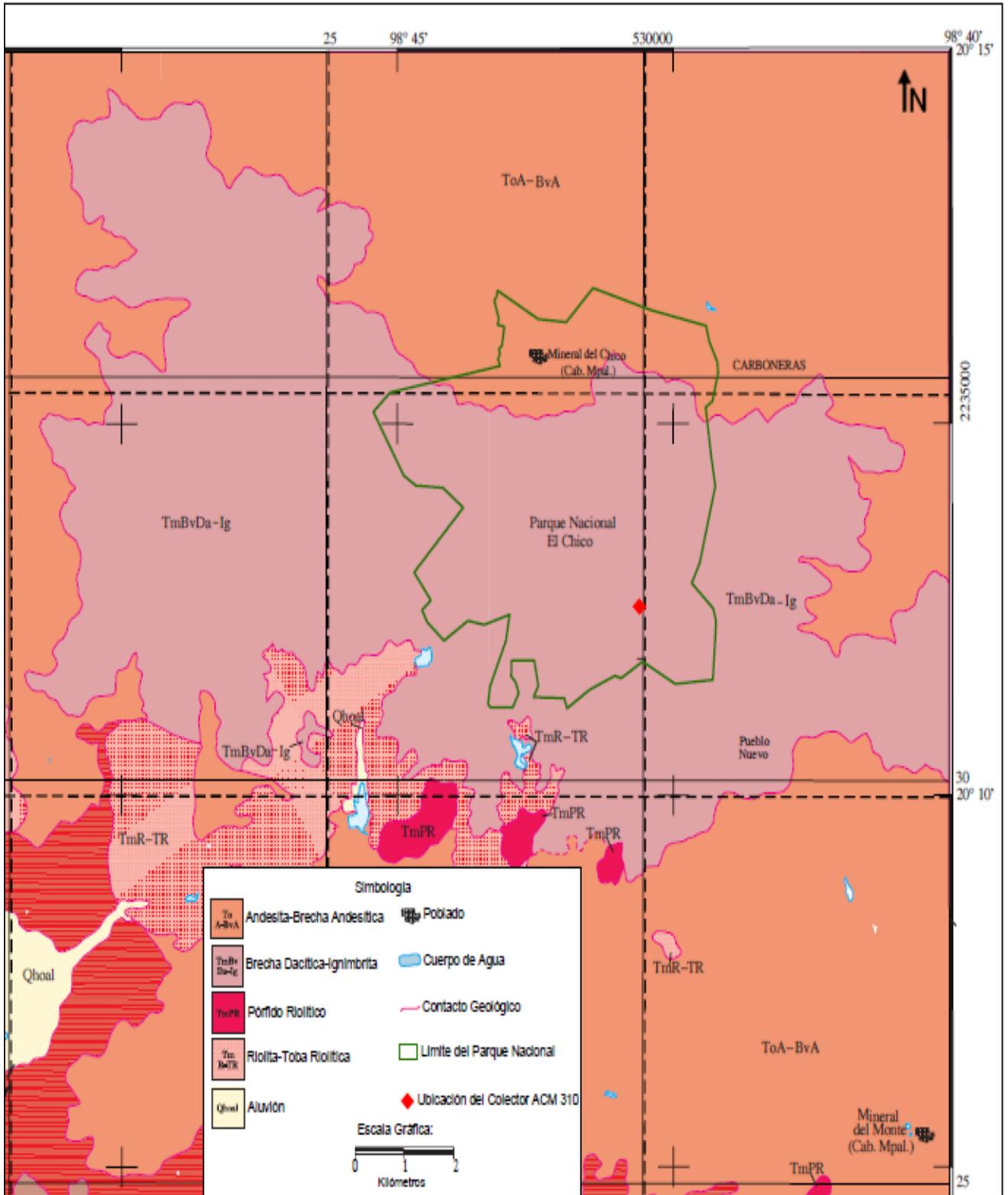


Figura 2.2 Geología del área de estudio (modificado de Carta Geológico-Minera Pachuca F14-D81).

2.3. CLIMA

Según García (1988), reporta localmente por factores de relieve y altitud determinan un clima Cb (m) (w) (i') gw", templado húmedo con temperatura media del mes más frío entre -3 y 18°C. Con lluvias en verano, precipitación del mes más seco <40 mm, con porcentaje de lluvia invernal <5 mm de la anual, con poca oscilación térmica; marcha de la temperatura Ganges y presencia de canícula (Melo y López, 1994).

La temperatura promedio anual reportada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es de 15°C. En la figura 2.3 se pueden observar los valores que corresponden al periodo de 1990-2009 (CONAGUA, 2010). Se observa que la mayor temperatura corresponde al año 1998 con 15.6°C y la mínima corresponde a 1992 con un valor de 13.6°C.

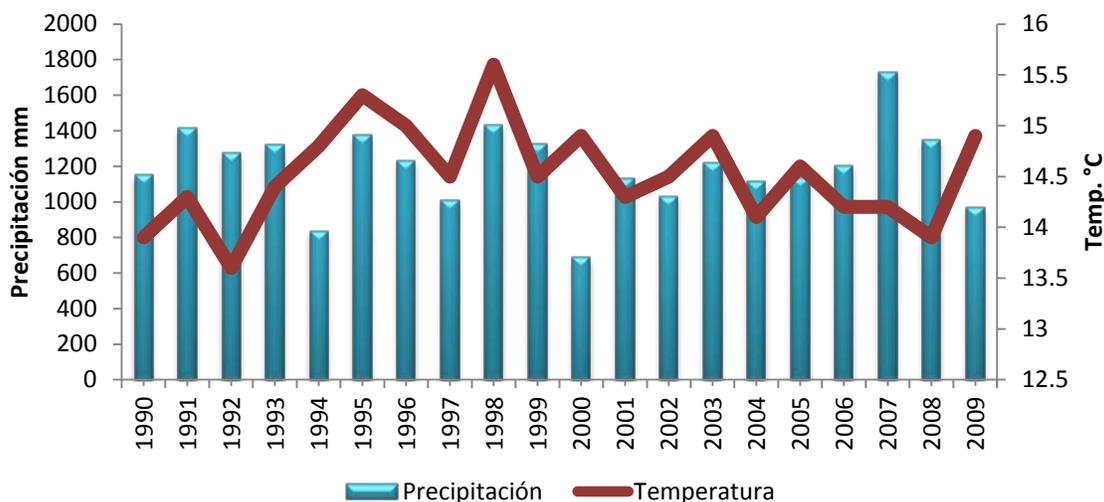


Figura 2.3 Precipitación y temperatura registrada desde 1990 al 2009 (CONAGUA, 2010).

La mayor precipitación se registró en 2007 con un valor de 1731.5 mm y la menor precipitación registrada es en el año 2000 de 688.5 mm, mientras que para el 2009 se tiene registrada una precipitación de 969.4 mm anual.

En el mes de septiembre presentó mayor precipitación a lo largo del 2009, mientras que el de menor precipitación fue para el mes de marzo (figura 2.4).

Los datos fueron obtenidos de la estación meteorológica El Chico, ubicada en las coordenadas geográficas latitud norte 20°14'00" y longitud oeste 98°44'24" que monitorea la CONAGUA.

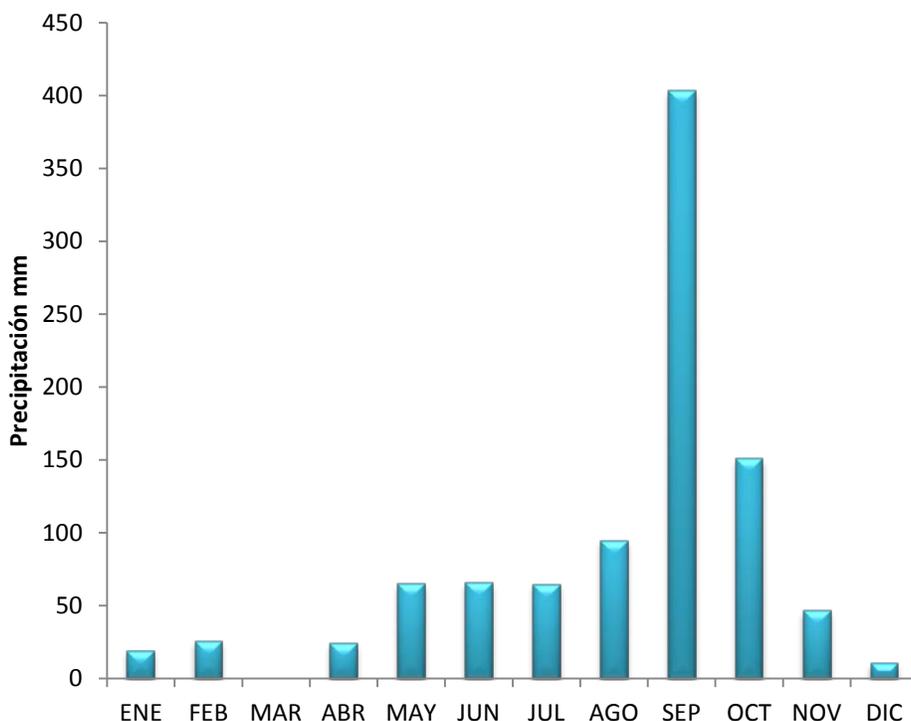


Figura 2.4 Precipitación para el año de muestreo 2009.

2.4. HIDROLOGÍA

Aunque la vertiente posee exuberante y denso cubrimiento vegetal, el agrietamiento del sustrato litológico, aunado a la existencia de suelos delgados, son factores que introducen elevado coeficiente de infiltración, por lo cual el escurrimiento superficial es irrelevante, limitándose al suministro acuífero de algunos manantiales que, aun cuando aporta escaso flujo, éste es constante y resulta suficiente para mantener activa la incipiente dinámica fluvial expresada por corrientes de escaso caudal pero activas durante todo el año (Melo y López, 1994).

Existen arroyos de poco escurrimiento que surgen en las estructuras más elevadas y confluyen en el sector bajo de la vertiente alimentando al río Milagro, colector principal de régimen permanente. En el resto de la vertiente es notorio el predominio de cauces que durante la temporada húmeda funcionan esporádicamente. En esta vertiente la morfología accidentada del relieve subordina el nacimiento de cinco pequeñas subcuencas: los Arroyos, Los Cedros, Los Otates, Las Piletas, Agua fría y el río El Milagro (figura 2.5).

PARQUE NACIONAL EL CHICO

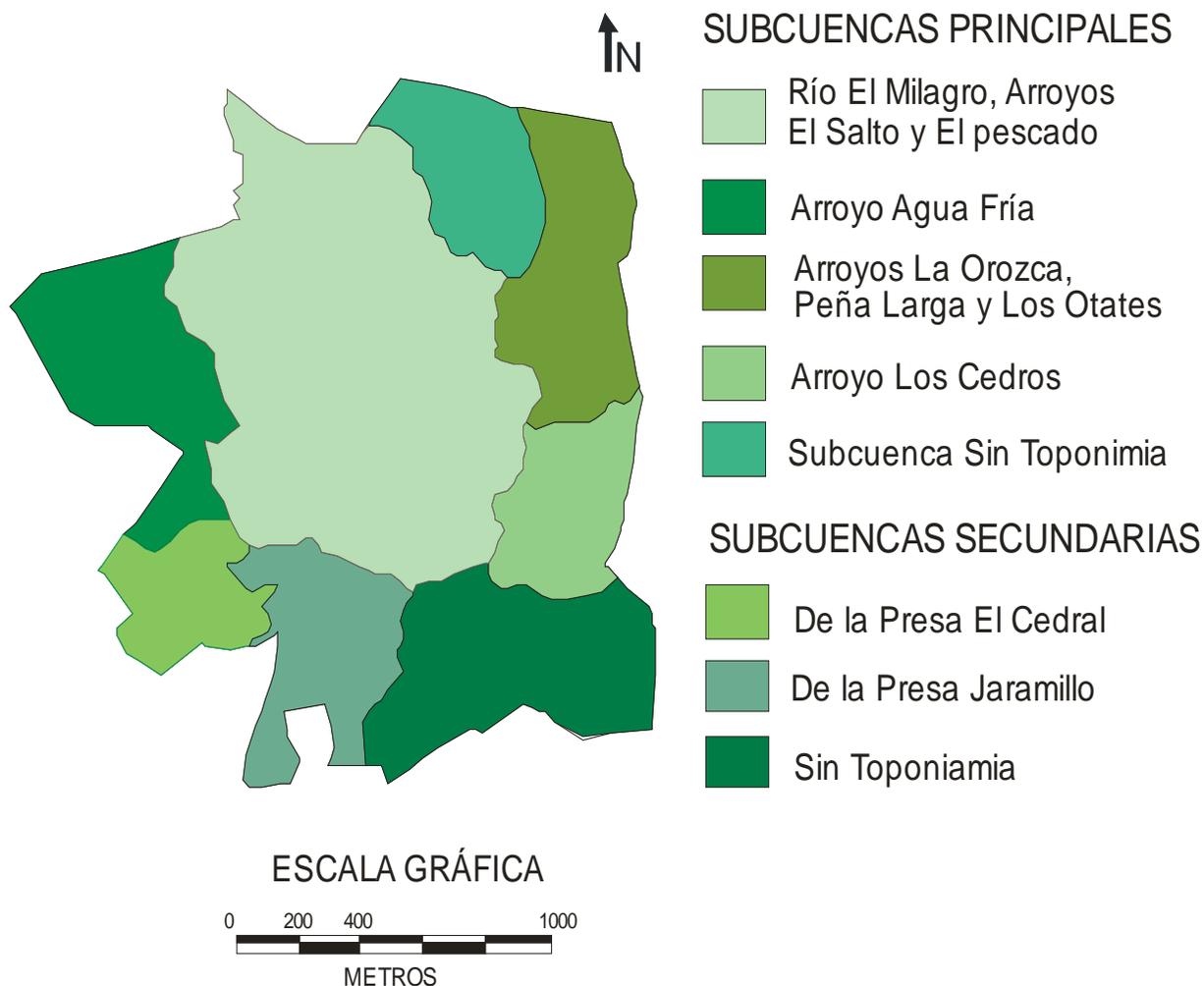


Figura 2.5 Principales cuencas hidrológicas del Parque Nacional El Chico (Modificado de Melo y López, 1994).

2.5. CARACTERÍSTICAS EDAFOLÓGICAS

El paisaje montañoso de origen volcánico terciario, su nivel altitudinal, la morfología del relieve y los procesos actuales, han formado gran homogeneidad de suelos, recientes y poco evolucionados, bajo condiciones templado-húmedas. Los suelos heredados de material parental volcánico presentan propiedades físicas y químicas bien definidas, separables según sus condiciones de depósito; las formas asociadas del relieve e influencia climática local, cuya inducción de procesos morfogenéticos y pedogenéticos han

permitido la diferenciación de unidades edáficas propias de esta región, distinguiéndose seis asociaciones (figura 2.6) (Melo y López, 1994).

El área de estudio se encuentra en un suelo Andosol húmico-Cámbisol húmico, son suelos típicamente forestales, en general de color oscuro, estructura suelta y esponjosa, ricos en materia orgánica aportada por la vegetación; estos residuos forman una especie de esponja sobre el suelo, lo cual permite tener buena cantidad de agua (Melo y López, 1994).

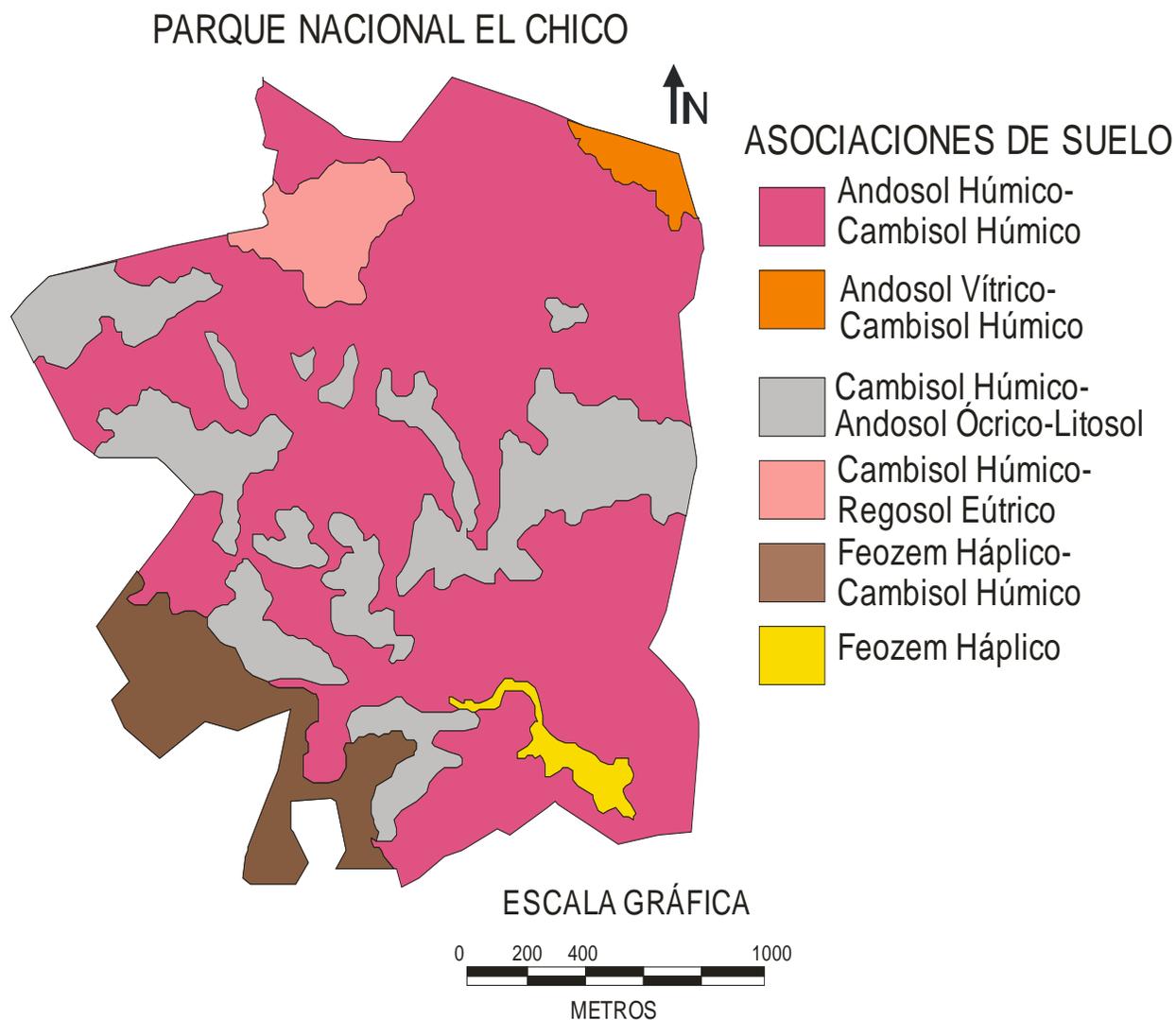


Figura 2.6 Asociación de Suelos del Parque Nacional El Chico (Modificado de Melo y López, 1994).

2.6. VEGETACIÓN

La vegetación del Parque es rica y variada, debido a las características ambientales que presenta; su flora está compuesta aproximadamente por 545 especies de las cuales ocho se encuentran en riesgo de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2001 (Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestre-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo). Además de su importancia en el área se distribuyen seis géneros de coníferas de los nueve representados en México, tales como *Abies*, *Pinus*, *Cupressus*, *Juniperus*, *Taxus* y *Pseudotsuga* (CONANP, 2005).

Atendiendo a su fisonomía y a la proporción de su cubrimiento, se distinguen los siguientes ocho grupos vegetales:

- Bosque de oyamel o abeto (*Abies religiosa*)
- Bosque de encino (*Quercus spp.*)
- Bosque de encino-oyamel (*Quercus-Abies*)
- Bosque de oyamel-encino (*Abies-Quercus*)
- Bosque de pino (*Pinus spp.*)
- Bosque de encino-pino (*Quercus-Pinus*)
- Bosque de pino-encino (*Pinus-Quercus*)
- Bosque de cedro (*Cupressus spp.*)
- Bosque de tascate o tlaxcal (*Juniperus monticola*)
- Pastizal

Producto de la interacción física de los factores altimétrico (altura absoluta 850 msnm), geomorfológicos (relieve accidentado con declives predominantes de 15 a 25°), climático y edáfico, la respuesta biótica se traduce en la presencia de un ecosistema forestal compuesto casi absolutamente por coníferas de *Abies religiosa* (oyamel) (foto 2.2).

Acorde con la variabilidad de tales condiciones, el bosque puede adquirir pureza y densidad homogénea, apariencia raquílica o cobertura abierta, y ser invadido por elementos arbóreos de otras especies (Melo y López, 1994).



Foto 2.2 Bosque de Oyamel.

2.7. FAUNA

Actualmente en el Parque se distribuyen aproximadamente 97 especies de fauna, de las cuales, 16 se encuentran en riesgo de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2001 siendo en su mayoría anfibios y reptiles con siete especies en cada grupo (CONANP, 2005).

Por su ubicación, el Parque Nacional recibe la influencia de dos grandes provincias bióticas, la Neovolcánica y Sierra Madre Oriental, característica que se conjunta con la variedad de tipos de vegetación existentes en la zona para propiciar la gran diversidad de especies faunísticas (foto 2.3).

En el Parque Nacional se distribuyen mamíferos pequeños como ratones, murciélagos, tuzas, ratas, conejos y ardillas, y con respecto a mamíferos medianos está el armadillo, tlacuache, zorrillo, zorra gris, coyote y cacomixtle.

Los mamíferos de menor tamaño son los más abundantes, sobresaliendo el ratón (*Peromyscus difficilis*), rata de campo (*Neotoma mexicana*) y el conejo (*Sylvilagus cunicularius*). Dentro de este grupo se ubican 23 especies, distribuido en 11 familias y 19

géneros. La zorra gris (*Urocyon cinereoargenteus*) es uno de los mamíferos más abundantes, el cual se distribuye en todo el parque.

Acerca de las aves se puede decir que son más numerosas; se han registrado 48 especies hasta el momento distribuidas en 17 familias y 38 géneros. En este Parque dominan por su abundancia el chipre rey cejidorado (*Basileuterus bellí*), pipilo (*Pipilo erythrophthalmus*), ojos de lumbre (*Junco phaenotus*) y chipec negriamarillo (*Dendroica occidentales* y *D. virens*).

Entre las especies de anfibios se encuentran las ranas (*Hyla plicata*, *H. robertsorum*), el ajolote (*Ambystoma velasci*) y las salamandras (*Hiropterotriton dimidiatus*). Mientras que entre reptiles se encuentran los escorpiones (*Abronio taeniata* y *Barisia imbricata*) (CONANP, 2005).



Foto 2.3 Fauna del Parque Nacional El Chico.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

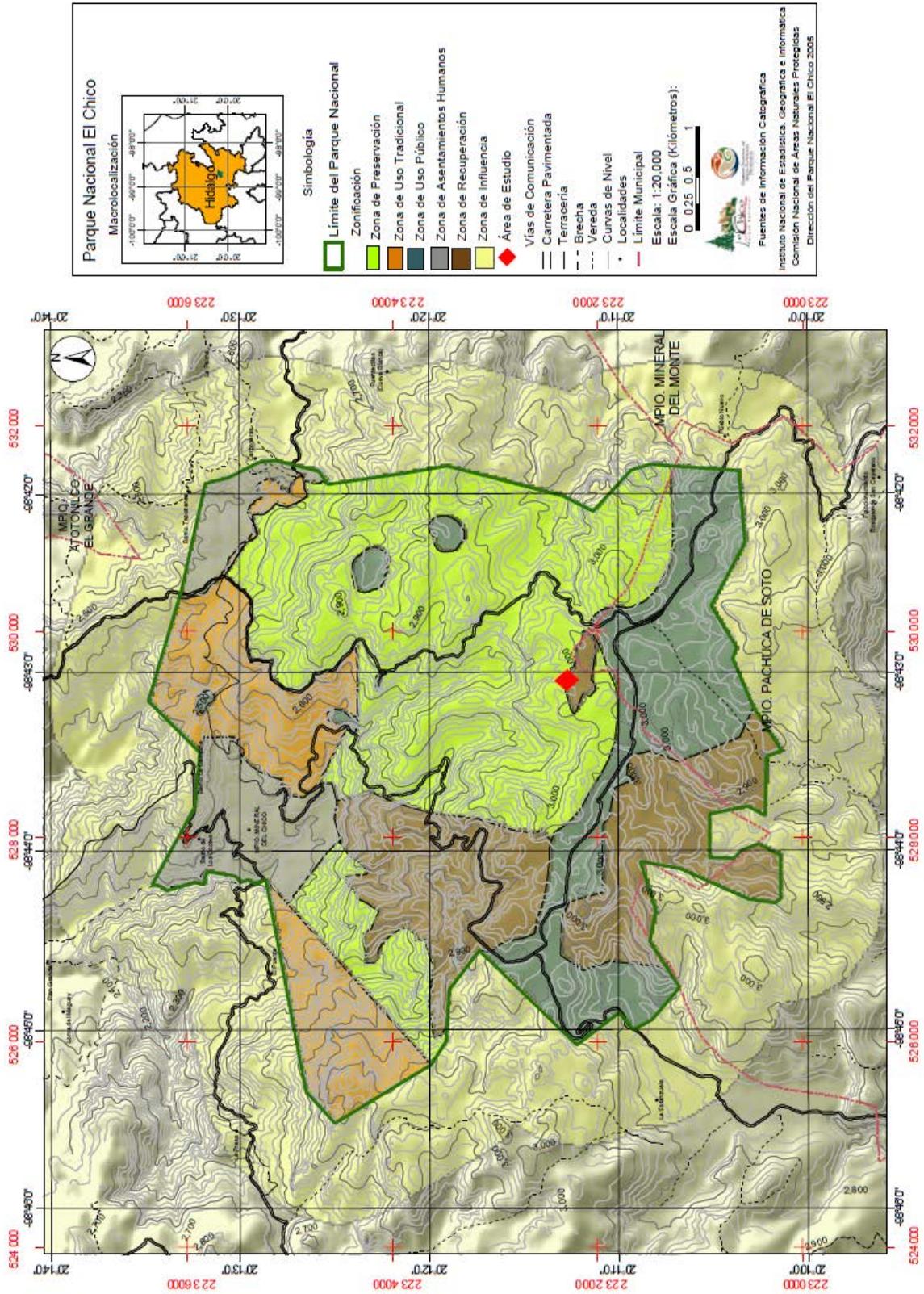
El Parque Nacional El Chico se ubica geográficamente entre las coordenadas extremas de los 20° 10' 10" a 20°13'25" latitud Norte y los 98°41'50" a 98°46'02" de longitud Oeste, cuya extensión territorial es de 27,390,263 ha. Política y administrativamente el Parque Nacional pertenece a la entidad federativa de Hidalgo, ubicándose al norte de la Ciudad de Pachuca, capital del estado.

El Parque Nacional El Chico es un área cuya importancia biológica trasciende y alberga uno de los bosques relictos de oyamel, que existe en la cuenca del Valle de México: se le considera como un área rica y diversa, a pesar de su pequeña extensión.

El área donde se situó el colector se encuentra ubicado a latitud norte 20°11'9.6" y longitud oeste 98°42'59.9", con una altitud de 3009 msnm. Se encuentra dentro del Parque Nacional El Chico, en la subzona La Chamusquina (figura 3.1).

3.1.1. Vías de acceso

Se puede llegar siguiendo la carretera federal México 105 Pachuca-Tampico con desviación por carretera estatal hacia Mineral del Chico ó por la zona centro de Pachuca tomando la calle San Juan Pachuca para salir por el barrio El Cerezo, cuya calle principal se convierte en la carretera estatal hacia La Estanzuela y El Cedral.



3.2. SELECCIÓN DE SITIO

Para la selección del sitio se tomaron en consideraron los criterio de representatividad regional, formas prevalecientes de depositación y frecuencia de eventos de precipitación, representatividad de ecosistemas, probabilidad de daños en regiones ecológicas protegidas, representatividad de niveles de fondo, accesibilidad y seguridad, incluyendo sitios impactados como sitios que se encuentren dentro de áreas naturales protegidas.

La selección del sitio proporcionará datos representativos regionalmente para la caracterización de los patrones geográficos y tendencias temporales en la depositación química atmosférica. El sitio representativo regionalmente tipifica un área o región, la cual es distinguida de otras regiones por su vegetación, tipo de suelo, clima u otras propiedades. Para evitar la falta de representatividad influenciada por la cercanía de fuentes, el sitio fue seleccionado predominantemente lejos de áreas urbanas y fuentes de contaminación (figura 3.2).

Se seleccionó el Parque Nacional El Chico en Hidalgo como área de estudio por ser un sitio no impactado y por contar con acceso por vía carretera y zonas abiertas para las instalaciones del sistema de monitoreo.

El Parque representa un área forestada, dentro del estado de Hidalgo; la consideración adicional se da en base al conocimiento disponible de fuentes de emisión, formas frecuentes de depositación, frecuencia de eventos de la precipitación y otros procesos meteorológicos y atmosféricos que influyen sobre la depositación de sustancias en cada área. Esta información de fondo permite interpretaciones significativas de variaciones espaciales, estacionales y temporales en la química de la depositación húmeda y seca de forma regional y nacional.

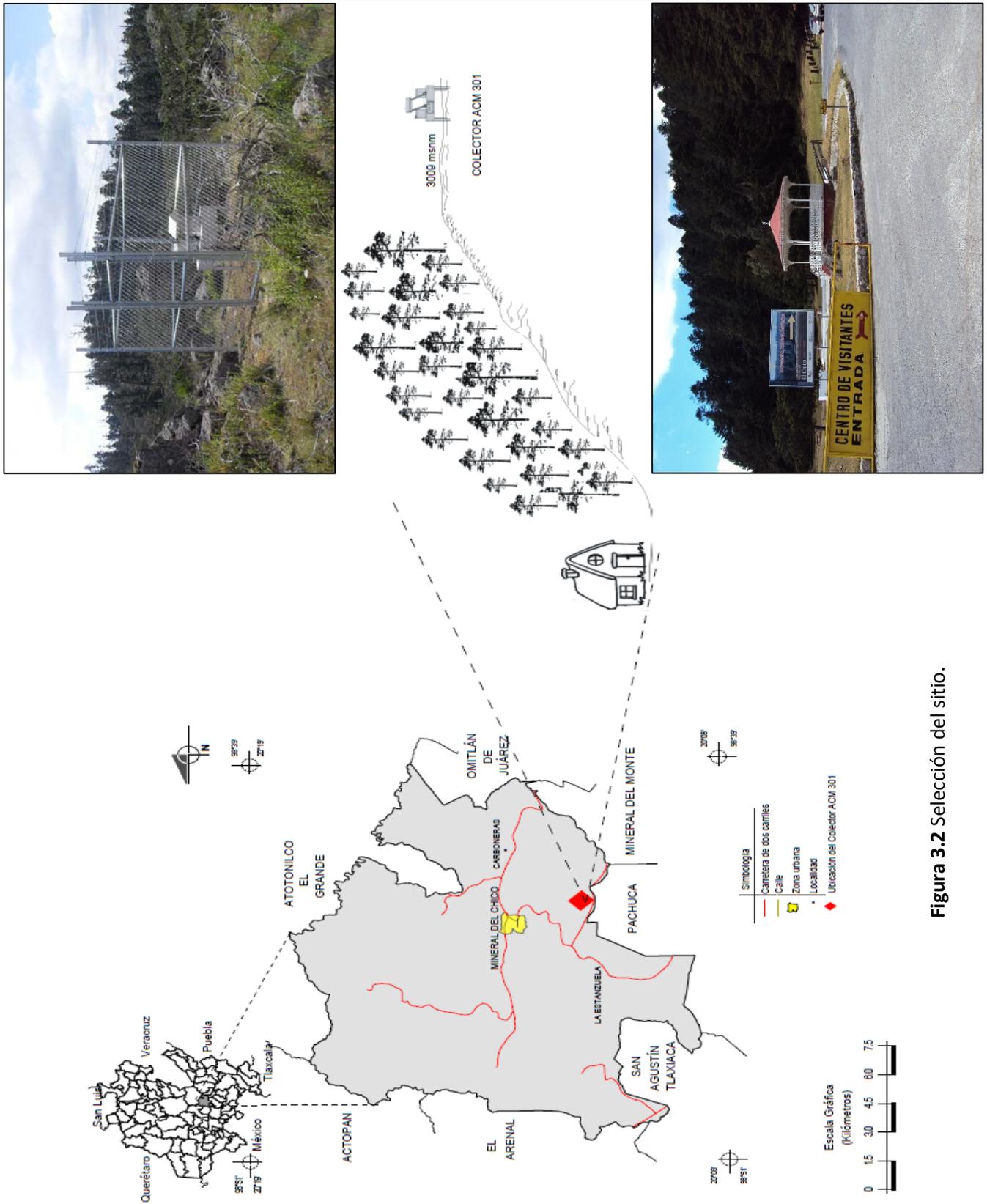


Figura 3.2 Selección del sitio.

El área donde se colocó el equipo para el muestreo fue la subzona La Chamusquina ubicada a latitud norte 20°11'9.6" y longitud oeste 98°42'59.9" tiene una extensión de 13.699 hectáreas; se localiza al norte del centro de atención a visitantes, próxima al pueblo Carboneras. En la subzona la Chamusquinase distribuye bosque de tlaxcal (foto 3.1); anteriormente, la vegetación que dominaba en el sitio era el bosque de oyamel pero debido a incendios anteriores, provocó que disminuyeran las áreas de oyamel.



Foto 3.1 Bosque de tlaxcal.

3.3. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

La colecta de muestras se llevó a cabo durante la temporada de lluvias agosto-diciembre 2009. La frecuencia de muestreo fue semanal para la depositación seca y cada tercer día para la depositación húmeda. Después de la colección, las muestras de precipitación fueron trasladadas al laboratorio de Geología Ambiental del Área Académica de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, donde se determinó el volumen colectado. De cada muestra se tomaron dos alícuotas de 500 ml. La primera se utilizó para la determinación del pH y la conductividad y la segunda se conservó bajo refrigeración para posterior análisis en el laboratorio de Química Ambiental

de la Universidad del Carmen, Campeche. Se analizó un total de 27 muestras de depositación húmeda y 16 muestras de depositación seca.

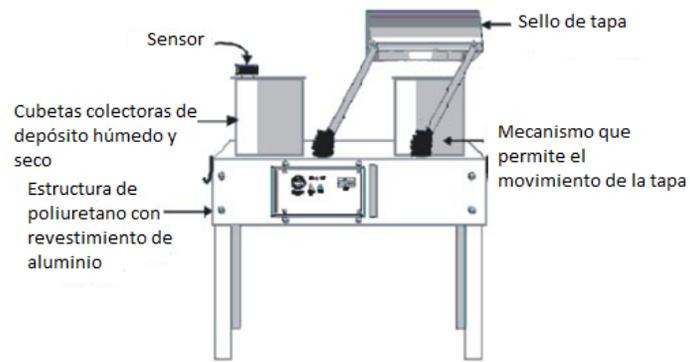
El sitio es accesible y está resguardado contra posible vandalismo. El colector se instaló sobre un lugar plano donde asentó cómodamente en su base de aluminio de 1 m, tratando que ningún objeto sobre 1 m de alto con la suficiente masa pudiera desviar el viento alrededor de 5 metros o más de distancia del colector.

Para el procedimiento de colecta de muestra se elabora una hoja de trabajo para el sitio (ver anexo 1), la cual nos ayudara a tener registro de la ubicación del colector, información del camino, instrumentación del sitio y conocimiento de obstáculos para la toma de muestras por medio de fotos (ver anexo 1a) así como posibles fuentes de contaminación. También se utilizó un formulario de observaciones de campo (FOC) para registrar información esencial acerca de las operaciones del colector (ver anexo 2) por parte del observador de campo.

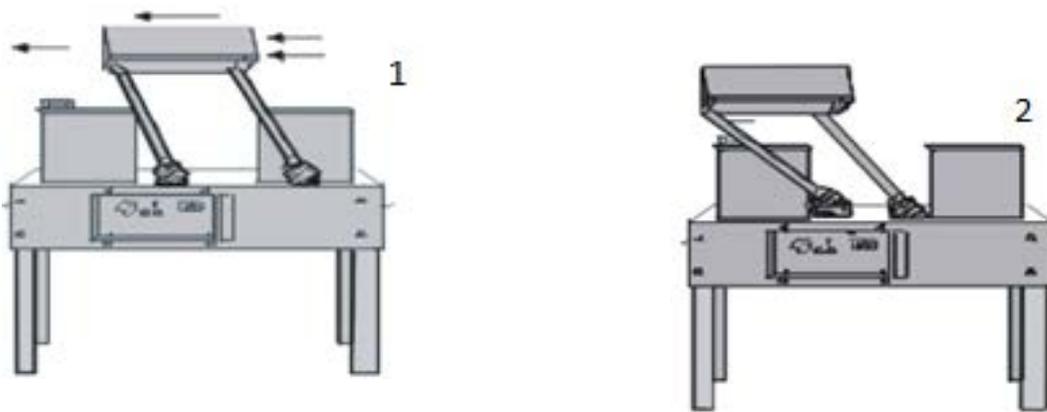
3.3.1. Colector airmetrics aerochmen 301

Para la colección de muestras se requirió un colector automático modelo Airmetrics Aerochmen 301 (ACM). El colector ACM opera eléctricamente y colecta automáticamente muestras de precipitación para análisis químico. El equipo ACM 301 tiene dos cubetas de polietileno de 3.5 galones, una colecta la depositación húmeda y la otra depositación seca.

Cuando no llueve, la cubeta encargada de captar el agua de lluvia se encuentra cubierta y sellada por la tapa, mientras que la cubeta encargada de captar la depositación seca se encuentra descubierta. La parte de debajo de esta tapa tiene una almohadilla compresible (sello de tapa) que sella la cubeta del lado de depositación húmeda a partir de la exposición a la atmósfera (figura 3.3). El propósito del sello de la tapa es proteger a muestras de depositación húmeda de evaporación o de contaminación por depositación seca.

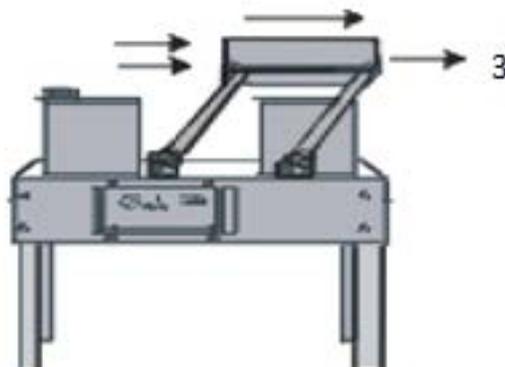


Colector Airmetrics Aerochmen 301 (ACM).



Cuando la precipitación ocurre, un sensor activa el motor, el cual mueve la tapa del lado de depositación húmeda al lado de depositación seca.

Mientras la precipitación se acumula, la cubeta de depositación húmeda queda protegida por el sello de la tapa de la contaminación por salpicadura.



El sensor es calentado de modo que cuando la precipitación termina, éste se seca y activa el motor para una vez más cubrir la cubeta de depositación húmeda.

Figura 3.3 Operación del Colector ACM 301.

3.3.2. Preparación del material para la deposición húmeda y seca

Para la limpieza de botellas de extracción de muestras de deposición húmeda se usaron botellas tipo Nalgene de boca ancha de polietileno de alta densidad (HDPE) de 500 ml de capacidad; se enjuagaron con su tapa por lo menos tres veces con agua desionizada, se dejaron secar y posteriormente se taparon las botellas y se guardaron en bolsas de aluminio (foto 3.2).



Foto 3.2 Botellas de polietileno de alta densidad (HDPE).

Mientras que las cubetas del colector de deposición húmeda y seca se lavaron con esponja para remover impurezas además de capas de suciedad, así mismo se agregó una solución de HCl 6N y se dejó reposar por una hora, después de lo cual son lavadas las cubetas con agua desionizada. Se eliminó el exceso con papel absorbente y se guardaron en bolsas de plástico.

3.4. MUESTREO DE DEPOSITACIÓN HÚMEDA

La colecta de muestras se realizó en horario matutino aproximadamente de 9:00 a 11:00 am. Se procedía a llenar el formato FOC registrando cualquier cambio, se colectó la muestra de depositación húmeda del colector ACM 301; para recoger la muestra el sensor se mojaba con unas cuantas gotas de agua desionizada para accionar la tapa deslizable del colector. Inmediatamente después de esto, la cubeta de depositación húmeda quedaba al descubierto, y se transvasaba su contenido a una botella de 500 ml para ser guardadas y transportadas en una hielera para su posterior refrigeración a -3°C . Posteriormente se hacía el cambio de cubeta de colección por otra perfectamente limpia y lista para usarse (foto 3.3). Para accionar la tapa del sensor, se utilizó aire comprimido para secarlo y accionar la tapa del contenedor de depositación húmeda.



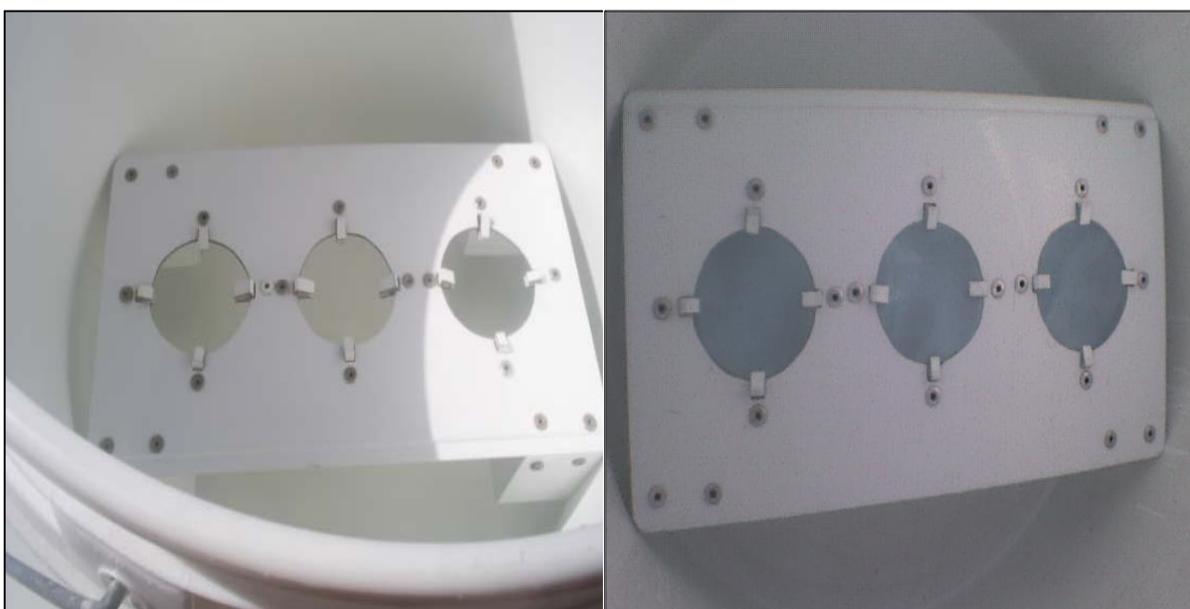
Foto 3.3 Colector ACM 301.

Sobre las muestras colectadas se registró la lectura de pH, temperatura y conductividad eléctrica usando un potenciómetro Hanna multiparametros modelo HI 98129. La cubeta del lado de depositación húmeda fue reemplazada cada tercer día aún cuando no se colectara precipitación. Las cubetas que no contenían precipitación fueron usadas como “blancos de campo” las cuales fueron verificadas para los mismos iones que para precipitación, esto para evaluar una posible contaminación. El contenido de la botella

de muestreo en campo de depositación húmeda se dividió en 2 alícuotas de 500 ml una para análisis de aniones y otra para el análisis de cationes (a las cuales se adiciono HNO_3 hasta alcanzar un pH de 2) para su respectiva refrigeración a -3°C .

3.5. MUESTREO DE DEPOSITACIÓN SECA

Para la depositación seca se utilizaron 3 filtros de nylon de 47 mm de diámetro y tamaño de poro de $1\ \mu\text{m}$, contenidos en un soporte de aluminio se colocaron a una altura de 5 cm por encima del fondo de la cubeta (foto 3.4), quedando expuestos en un periodo de una semana, después del cual fueron retirados cuidadosamente con pinzas y guantes, para ser guardados dentro de cajas petri por separado. Estos filtros fueron utilizados para la determinación de aniones, cationes y amonio respectivamente. Simultáneamente a la exposición se tuvieron blancos de campo y blancos para cada uno de los tres grupos de análisis de muestras (aniones, cationes y amonio). Después de ser retirados y guardados en cajas de petri fueron almacenados en congelación hasta su análisis. Posteriormente se instaló la cubeta limpia para su uso en el lado de depositación seca. Se limpió la superficie del soporte de aluminio con agua desionizada y se secó con papel absorbente para volver a ser colocado en el fondo de la cubeta con los 3 filtros nuevos con la ayuda de pinzas.



a) Soporte de aluminio

b) Soporte con filtros

Foto 3.4 Filtros contenidos en el soporte de aluminio.

Para la depositación húmeda y seca se consideraron “blancos de transporte” cada 15 días, es decir, se tuvieron 2 blancos de transporte cada mes. Estos blancos recibieron el mismo tratamiento para las muestras colectadas y fueron llevadas al sitio de muestreo el día de la colecta y regresados el mismo día al laboratorio después de haber hecho la colecta.

3.6. EQUIPO DE LABORATORIO PARA ANÁLISIS DE DEPOSITACIÓN HÚMEDA Y SECA

Los análisis hechos a las muestras de depositación húmeda y seca fueron realizados en el Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Universidad Autónoma del Carmen, Campeche. Los niveles de NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , fueron analizados por Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución (HPLC) (Agilent 1100 con detector de conductividad), (foto 3.5) utilizando el Método EPA 300.



Foto 3.5 Cromatograma de Líquidos de Alta Resolución (HPLC).

Para la concentración de cationes como Na^+ (Método 7770 EPA), K^+ (Método 7610 EPA), Ca^{+2} (Método 7140 EPA), y Mg^{+2} (Método 7450 EPA), se utilizó espectrometría de absorción atómica (Thermo scientific ice 3000) (foto 3.6).

Esta técnica tiene como fundamento la absorción de radiación de una longitud de onda determinada. Esta radiación es absorbida selectivamente por átomos que tengan niveles energéticos cuya diferencia en energía corresponda en valor a la energía de los fotones incidentes. La cantidad de fotones absorbidos está determinada por la ley de Beer, que relaciona ésta pérdida de poder radiante, con la concentración de la especie absorbente y con el espesor de la celda o recipiente que contiene los átomos absorbentes.

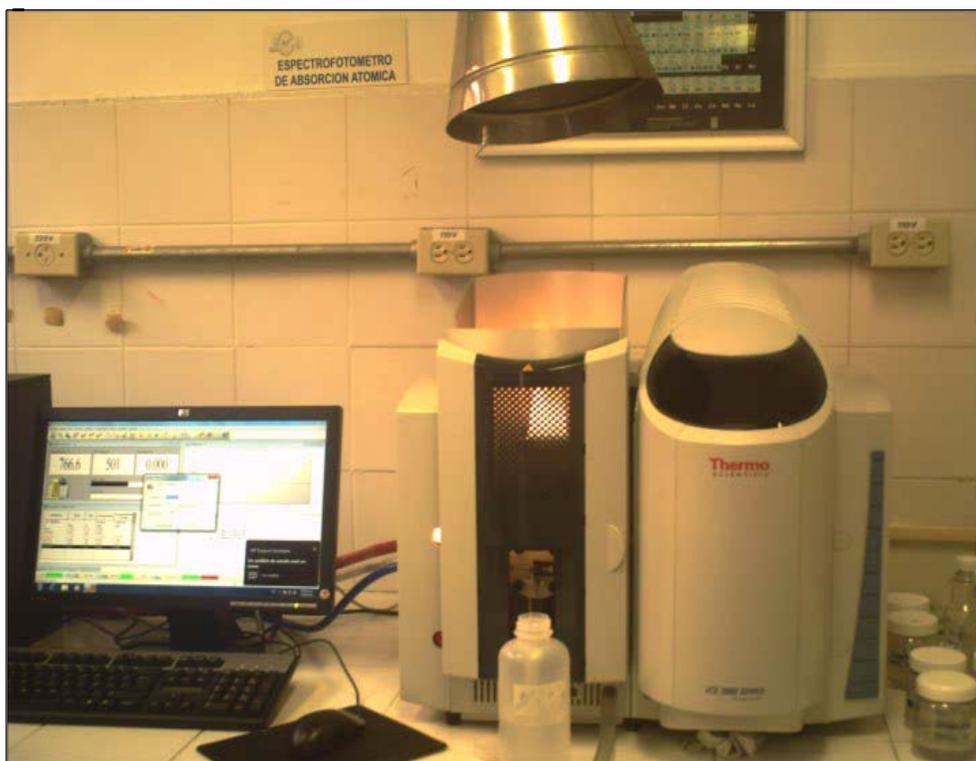


Foto 3.6 Espectrofotómetro, Thermo Scientific ICE 3000.

Y para el HN_4^+ se determinó mediante colorimetría con detección UV usando un espectrofotómetro UV modelo HACH DR.2800 (foto 3.7).



Foto 3.7 Espectrofotómetro UV modelo HACH DR. 2800

3.7. TÉCNICAS DE ANÁLISIS PARA LA DEPOSITACIÓN HÚMEDA Y ACONDICIONAMIENTO DE LAS MUESTRAS

Una vez realizada la colecta de la lluvia (deposición húmeda), en el laboratorio de Geología Ambiental de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo con la utilización de probetas se midió el volumen colectado registrando el valor obtenido. De manera posterior se registró la conductividad eléctrica, pH y se acondicionaron las muestras que serian para enviadas para el análisis de cationes, dichas muestras se acidularon con acido nítrico (J.T. Baker 65.4 %), hasta alcanzar un pH de 2.

Posterior a la acidulación de las muestras fueron etiquetadas y envasadas en frascos de boca ancha de polietileno de alta densidad (HDPE) Nalgene de distintas capacidades y refrigeradas hasta su posterior envío a la Universidad Autónoma de Campeche.

3.7.1. Determinación de pH

Para el registro de pH se utilizó el método referido por la EPA 150.1 con un potenciómetro Hanna multiparametros modelo HI 98129; se procedió primeramente a ajustar y calibrar el potenciómetro, colocando primero los electrodos dentro de la solución buffer pH de 7 previamente acondicionada a temperatura ambiente, calibrando con el botón una vez registrada y estabilizada la lectura de 7. Se enjuagó los electrodos con agua destilada, para colocarlos dentro de la solución buffer 4 para nuevamente calibrar y posteriormente limpiar los electrodos con agua destilada.

Una vez calibrado el equipo se procedió al análisis de muestras a temperatura ambiente, registrando el valor de cada una.

3.7.2. Determinación de conductividad específica

Se utilizó el método referido por la EPA 120.1 con un potenciómetro Hanna multiparametros modelo HI 98129; primeramente se ajustó y calibró el equipo, colocando primero los electrodos dentro de la solución estándar de 0-500 $\mu\text{mhos/cm}$ previamente acondicionada a temperatura ambiente, hasta que la lectura se estabilizó y por último se enjuagó los electrodos con agua destilada.

Una vez calibrado el equipo se procedió al análisis de muestras a temperatura ambiente, registrando el valor de cada una.

3.8. TÉCNICAS DE ANÁLISIS PARA LA DEPOSITACIÓN SECA

Una vez en el laboratorio, para la depositación seca las membranas de nylon fueron extraídas con 80 ml de agua desionizada durante 15 minutos en un baño ultrasónico (foto 3.8). El pH y la conductividad específica de las muestras de depositación seca se analizaron mediante el uso de un potenciómetro y un conductímetro respectivamente (método EPA 150.1 y EPA 120.1).

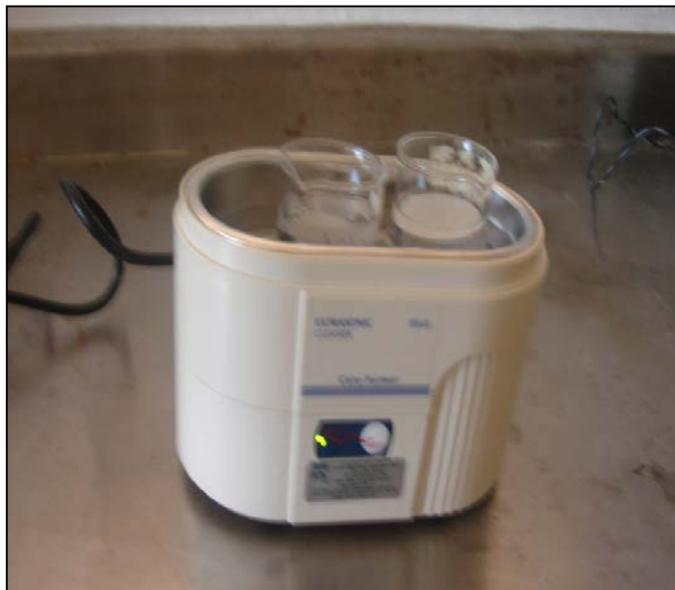


Foto 3.8 Baño ultrasónico.

Los niveles de aniones NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , fueron analizados por Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución (HPLC) (Método EPA 300.0 modificado), de igual manera se determinó la concentración de cationes como Na^+ (Método 7770 EPA), K^+ (Método 7610 EPA), Ca^{+2} (Método 7140 EPA) y Mg^{+2} (Método 7450 EPA) tomando como referencia general el Método EPA 3010 A, mediante espectrofotometría de absorción atómica con aspiración directa. NH_4^+ fue determinado por Colorimetría con detección UV, siguiendo el método del fenato.

3.9. AJUSTE Y PONDERACIÓN DE RESULTADOS

El procedimiento utilizado para la ponderación de resultados propuesto por Fornaro y Gutz (2006), para el cálculo de la concentración promedio ponderada en volumen (CPPV) permite homogenizar los eventos de lluvia, equivale a mezclar todas las lluvias en un mismo recipiente y luego medir la concentración iónica, la cual sería equivalente a la CPPV expresada en $\mu\text{Eq/L}$:

$$CPPV = \frac{\sum(C_n * P_n)}{\sum P_{\text{período}}} \quad (24)$$

Donde C_n es la concentración del ión en cada evento de lluvia ($\mu\text{Eq/L}$), P_n los mm de precipitación de cada evento y $P_{\text{período}}$ es la sumatoria de los mm correspondientes al periodo de muestreo (Mphpeya *et al.*, 2004, Fornaro y Gutz, 2006).

La tasa de depositación húmeda (TDH, mg/m² x período) representa el flujo iónico de masa hacia el ecosistema mediante la depositación por lluvia. La TDH depende directamente de dos factores: la concentración iónica en la lluvia y la cantidad de lluvia que precipita. Para el cálculo de TDH se utilizó la siguiente ecuación:

$$TDH = (CPPV_{período})(P_{período})(PE/1000) \quad (25)$$

Donde PE es el peso equivalente del ión del cual se calcula la TDH (Mphepya *et al.* 2004).

Las TDH permiten conocer la cantidad de mg/m² x año que se depositan de cada especie en el ecosistema de la región estudiada.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. RESULTADOS DE LA DEPOSITACIÓN HÚMEDA

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.1, indicando la fecha en que inició y terminó la colecta de depositación húmeda, así como los parámetros obtenidos: volumen, pH, temperatura, conductividad, aniones (Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^-), cationes (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) y amonio (NH_4^+).

El volumen total de precipitación húmeda recolectado en el periodo de muestreo fue de 30,256 mm, teniendo la mayor precipitación en el mes de septiembre. La temperatura oscilo entre los 20 y 25°C para las muestras de depositación húmeda (tabla 4.1).

Los resultados del cálculo de la CPPV se muestran en la tabla 4.2. Las concentraciones promedio ponderadas por volumen se muestran en la tabla 4.3, K^+ , Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , NH_4^+ , Cl^- , NO_3^- y SO_4^{-2} de las 27 muestras analizadas.

Tabla 4.1 Resultados de la depositación húmeda.

Muestra #	Fecha de identificación	Volumen Total (ml)	pH	(°C) T	(µS) CE	(°C) T	(µEq / L)							
							K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²
MC01	26/08/09-28/08/09	276	5.5	21.6	26.0	23.6	5.5	62.5	48.0	16.6	20.6	117.9	15.6	0.3
MC02	28/08/09-30/08/09	182	4.0	22.0	218.0	24.0	18.8	157.7	173.8	79.4	177.6	836.1	41.3	14.4
MC03	30/08/09-01/09/09	1043	5.6	20.5	16.0	23.5	6.7	22.0	20.1	5.6	44.2	65.8	16.1	5.1
MC05	03/09/09-05/09/09	560	4.4	20.6	71.0	23.6	5.5	199.5	145.5	33.1	59.4	ND	ND	ND
MC06	05/09/09-07/09/09	680	4.2	21.4	119.0	23.6	4.5	15.4	21.4	9.0	208.8	364.9	566.8	20.1
MC07	07/09/09-09/09/09	750	5.3	21.4	9.0	23.7	4.0	0.2	25.7	0.4	38.1	38.2	494.1	11.3
MC08	09/09/09-11/09/09	2136	4.7	21.4	31.0	23.8	4.1	0.1	21.3	1.6	182.9	81.5	6.7	503.8
MC09	11/09/09-13/09/09	2088	5.0	21.3	10.0	23.6	3.9		10.1	0.5	38.1	13.9	ND	299.1
MC10	13/09/09-15/09/09	2046	4.3	21.6	88.0	23.7	5.0	247.7	55.0	36.8	89.2	321.5	ND	156.0
MC12	17/09/09-19/09/09	1630	4.9	21.9	16.0	23.7	4.0	8.3	77.7	8.6	64.8	28.8	ND	1170.8
MC14	21/09/09-23/09/09	390	4.7	22.5	36.0	23.6	5.2	18.7	36.2	11.0	25.1	25.9	ND	80.1
MC15	23/09/09-25/09/09	2700	3.7	24.4	182.0	24.4	4.8	293.0	32.0	71.8	14.5	156.6	ND	188.8
MC16	25/09/09-27/09/09	6110	5.5	24.9	134.0	24.9	4.7	140.8	6.7	22.8	3.8	5.6	ND	180.7
MC17	27/09/09-29/09/09	565	5.8	25.9	49.0	25.9	6.4	287.9	26.0	103.6	99.8	74.1	367.4	2.2
MC18	29/09/09-01/10/09	62	3.7	25.5	79.0	25.5	9.9	202.5	42.2	167.3	3.0	352.2	645.0	ND
MC20	03/10/09-05/10/09	26	5.3	25.9	71.0	25.9	13.6	362.3	71.2	165.4	91.4	ND	ND	ND
MC22	07/10/09-09/10/09	330	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	105.2	37.2	389.3	11.6
MC23	09/10/09-11/10/09	380	5.6	25.1	63.0	25.1	5.8	143.7	19.8	113.0	104.4	106.6	86.1	9.9
MC26	16/10/09-19/10/09	2780	3.0	24.8	77.0	24.8	4.0	62.8	1.5	90.4	14.5	2.9	179.7	ND
MC29	23/10/09-25/10/09	2160	4.3	23.9	64.0	24.0	4.1	10.9	17.1	7.3	152.4	ND	172.6	ND
MC30	25/10/09-27/10/09	900	4.5	23.7	42.0	23.9	5.0	146.8	35.8	13.1	119.6	47.8	272.9	ND
MC31	27/10/09-29/10/09	26	5.2	23.8	73.0	23.9	26.6	363.2	120.1	66.6	ND	58.4	214.3	35.2
MC32	29/10/09-31/11/09	930	4.9	23.9	21.0	23.9	5.3	238.3	64.7	33.7	3.8	27.1	151.1	48.8
MC35	04/11/09-06/11/09	490	5.1	23.9	10.0	23.9	4.9	176.3	26.5	20.3	48.8	53.5	250.0	ND
MC38	10/11/09-12/11/09	490	6.3	23.7	7.0	24.1	4.1	54.8	18.3	8.0	29.0	ND	13.8	ND

MC56 16/12/09-18/12/09 410 2.8 28.7 49.0 26.6 23.0 213.2 38.6 288.5 22.9 282.1 919.4 ND

ND= No determinado.

4.1.1. Cálculos para la concentración promedio ponderado por volumen y tasa de depositación húmeda

Tabla 4.2 Cálculo de CPPV.

Muestra #	P _n Volumen (ml)	C _n *P _n							
		K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²
MC01	276	1517.4	17263.6	13235.3	4571.8	5679.0	32549.2	4292.7	92.7
MC02	182	3430.4	28704.8	31623.7	14459.2	32316.7	152173.6	7519.4	2612.9
MC03	1043	6950.1	22915.8	20944.2	5840.2	46101.2	68677.3	16787.7	5301.0
MC05	560	3065.5	111721.9	81466.5	18542.9	33287.6	-	-	-
MC06	680	3063.6	10491.3	14579.8	6115.0	141990.5	248131.8	385404.3	13646.6
MC07	750	2983.2	139.2	19308.4	325.9	28577.9	28684.8	370593.9	8502.1
MC08	2136	8849.6	148.6	45469.6	3427.5	390672.1	173999.3	14291.1	1076180.0
MC09	2088	8157.4	-	21020.4	977.2	79561.0	29080.1	-	624601.0
MC10	2046	10249.5	506824.3	112579.5	75305.8	182427.9	657799.8	-	319253.2
MC12	1630	6496.4	13538.5	126642.5	14085.8	105586.0	47011.6	-	278401.2
MC14	390	2009.0	7274.8	14116.4	4302.4	9807.9	10106.4	-	31257.6
MC15	2700	13036.6	791232.4	86524.8	193925.4	39094.6	422740.1	-	509757.2
MC16	6110	28972.0	860321.7	40850.8	139098.9	23281.5	34186.5	-	1103905.1
MC17	565	3595.8	162649.5	14675.9	58561.9	56405.2	41886.0	207603.7	1266.4
MC18	62	616.7	12556.2	2615.8	10369.5	188.9	21838.7	39992.0	-
MC20	26	353.8	9420.4	1850.2	4299.3	2377.6	-	-	-
MC22	330	-	-	-	-	34705.0	12278.5	128460.1	3837.4
MC23	380	2199.9	54590.5	7505.1	42950.1	39673.8	40498.5	32710.0	3757.0
MC26	2780	11189.3	174661.0	4272.8	251203.9	40253.0	8017.3	499567.3	-

MC29	2160	8847.0	23553.4	37016.8	15741.4	329218.1	-	372890.8	-
MC30	900	4487.3	132085.0	32230.6	11748.9	107681.756	43020.9	245604.3	-
MC31	26	692.8	9444.0	3123.0	1730.9	-	1518.5	5571.1	914.5
MC32	930	4907.9	221636.1	60177.7	31369.6	3543.6	25248.7	140548.1	45381.1
MC35	490	2408.3	86411.0	12991.4	9943.0	23898.7	26192.6	122514.5	-
MC38	490	1991.5	26829.3	8962.1	3923.1	14189.9	-	6760.3	-
MC56	410	9426.6	87399.1	15817.1	118298.8	9373.5	115649.7	376950.4	-
ΣP_{periodo}	30256	149498.9	3371813.5	829601.6	1041119.7	1779894.0	2241290.9	2978062.6	4028667.9
	CPPV	4.9	111.4	27.4	34.4	58.8	74.0	98.4	133.1
	TDH	23321.8	310206.8	66368.1	49973.7	128152.3	318263.3	738559.5	773504.2

Tabla 4.3 Concentración Promedio Ponderada (CPPV) y Tasa de depositación Húmeda (TDH).

	Valor Máximo	Valor Mínimo	Promedio	CPPV ($\mu\text{Eq} / \text{L}$)	TDH ($\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{año}$)
pH	6.2	2.8	4.7		
K⁺	26.6	3.9		4.9	23321.8
Na⁺	363.2	0.07		111.4	310206.8
Ca²⁺	173.7	1.5		27.4	66368.1
Mg²⁺	288.5	0.4		34.4	49973.7
NH₄⁺	208.8	3.04		58.8	128152.3
Cl⁻	836.1	2.8		74.0	318263.3
NO₃⁻	919.3	6.6		98.4	738559.5
SO₄⁻²	503.8	0.3		133.1	773504.2

Los iones que poseen mayor TDH son $\text{SO}_4^{-2} > \text{NO}_3^{-} > \text{Cl}^{-} > \text{Na}^{+} > \text{NH}_4^{+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+}$ (tabla 4.3), los cuales influyen mayoritariamente en la química de las precipitaciones registradas.

4.1.2. pH

El pH presentó valores comprendidos entre 2.8 y 6.2, con un valor promedio de 4.7 (tabla 4.3). Por lo que se considera ligeramente ácida, según Lance (1984) a partir de un pH menor de 4.8 ya causa daños a los seres vivos y en superficie terrestre puede ir degradando los suelos agrícolas, los bosques, ríos, lagunas y construcciones realizadas por el hombre. El pH para la muestra MC 56 registró el valor mínimo de 2.8 en diciembre, pero con un valor máximo de 6.2 para la anterior del periodo del 10-12 de noviembre MC38 siendo el valor más alto registrado. La figura 4.1 muestra un histograma de frecuencias de pH para las muestras de precipitación colectadas, registrando el 42% de las muestras un pH de 4.

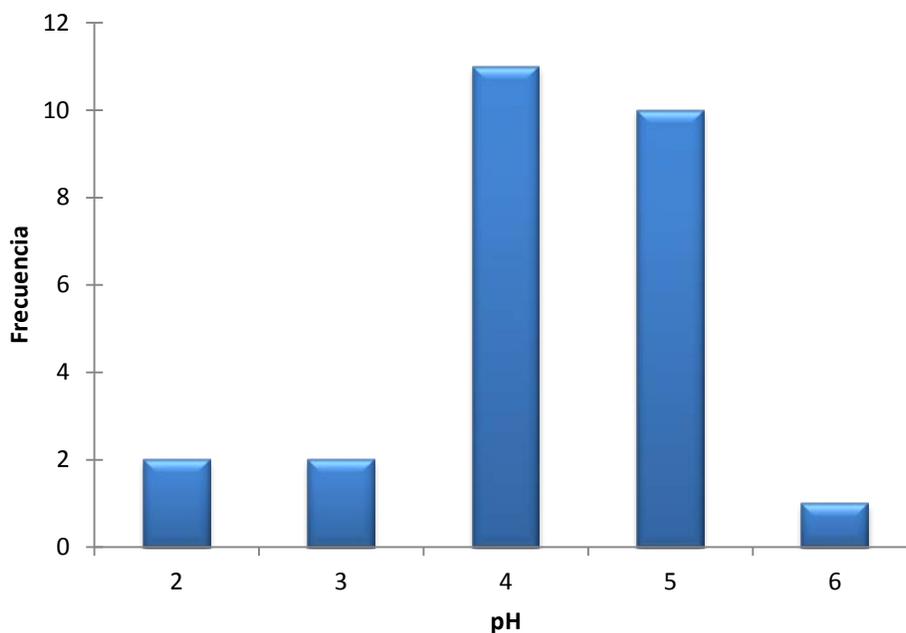


Figura 4.1 Histograma de frecuencias del pH en las muestras de precipitación.

La acidez promedio del Parque Nacional el Chico fue de 4.7, similares a los registrados en la región central de Colorado, EE.UU; o Shepard *et al.* (1989) en bosques de *Fagus grandifolia* Ehrh., y *Hacer saccharum* Marsch. (pH<5) de la zona forestal Huntington, N. Y., Arthur y Fahey (1993) en bosques de *Picea engelmannii* Parry y *Abies lasiocarpa* (Hook) Nutt. (pH<5), Saavedra *et al.* 2003, en el Desierto de los Leones (pH<5.65), y mayor a los reportados por Likens *et al.* (1997), en bosques de New Hampshire (pH 3.8).

Como consecuencia de la lluvia ácida se pueden presentar diferentes daños principalmente a la vegetación, como oscurecimiento de las partes afectadas de las hojas, o las lesiones pueden aparecer rojas, moradas, cafés o algo más tenue en color, seguido por flacidez (lo que indica degradación interna de la estructura celular) y una reseca color blanco, es decir tejido muerto y también se pueden presentar daños en el suelo, lo que reduce la fertilidad de la tierra.

4.1.3. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica en las muestras MC-11, MC-21, MC-24 (tabla 4.1), se observó un incremento inversamente proporcional con respecto del volumen de la muestra, esto obedece al efecto de disolución, ya que al disminuir la cantidad y frecuencia de precipitación pluvial existe mayor acumulación de iones en suspensión en la atmósfera, los cuales son lavados por la lluvia.

4.1.4. Aniones

La abundancia relativa de aniones obtenida fue: $\text{SO}_4^{-2} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$.

4.1.4.1. SO_4^{-2}

La concentración de SO_4^{-2} presenta valores comprendidos entre 0.33 y 503.8 $\mu\text{Eq/L}$, teniendo un valor promedio ponderado por volumen de 133.1 $\mu\text{Eq/L}$. La muestra que registró mayor concentración la MC08 correspondiente al mes de septiembre. Una posible causa de altas concentraciones las muestras de SO_4^{-2} tal vez se debe a las presas de jales ubicadas en el municipio de Omitlán, las cuales se encuentran expuestas a las condiciones meteorológicas como corriente de vientos provenientes de noreste dispersando en dirección suroeste partículas de estos depósitos junto con algunos contaminantes por estos medios físicos (transporte eólico, erosión y pluvial), Moreno *et al.*, 2009 menciona que la mineralización de estos jales están constituidos principalmente por sulfatos: pirita (FeS_2), esfalerita (ZnS), galena (PbS), calcopirita (CuFeS_2), calcocita y covalita (Cu_2S , CuS), argentita y acantita (Ag_2S) y sulfosales, estas concentraciones en comparación con valores registrados en 2010 en la ciudad de Monterrey, considerada la zona industrial más importante del noreste de México (Ramírez *et al.*, 2010) (tabla 4.4).

4.1.4.2. NO_3^-

El NO_3^- registró un mínimo de 6.6 y un máximo de 919.3 $\mu\text{Eq/L}$ con un valor CPPV de 98.4 $\mu\text{Eq/L}$. La muestra MC56 del mes de diciembre registró el valor más alto, el incremento probablemente se debió a un efecto de dilución ya que al final de la temporada de lluvias la cantidad de agua disminuye y los periodos sin lluvia son más largos, y se modifica la intensidad del lavado (Pérez *et al.*, 2006)., la fuente de nitratos tal vez corresponda a la quema de maderables, de las localidades cercanas además de que dentro del Parque existen áreas para acampar y hacer fogatas provocando la emisión de nitratos. Los valores de NO_2^- fueron menores a los SO_2^{-2} , esto tal vez porque las reacciones del SO_2^{-2} hacia la formación de H_2SO_4 son más rápidas, lo cual provoca mayor formación de SO_4^{-2} .

4.1.4.3. Cl^-

Mientras que el Cl registró un mínimo de 2.8 y máximo de 836.1, con un CPPV de 74.0 $\mu\text{Eq/L}$. Para el Cl se registró su mayor concentración en la muestra MC02 el 28 de agosto y se mantuvo con niveles bajos para el resto de las muestras. Se puede observar que aunque fue el anión que presento menor concentración los valores fueron altos por lo que la presencia del Cl, se podría atribuir al arrastre por el viento proveniente del Golfo de México, ya que en época de lluvia se tiene afectación por la corriente de vientos alisios, como condición que tiene influencia sobre la zona de estudio. Algunos valores reportados por García *et al.*, 2006 para el estado de México, son altos en comparación con los registrados en este trabajo, de igual manera las concentraciones presentadas por Cerón *et al.*, 2002 (tabla 4.4) muestran una alta concentración de cloruros atribuidas a la cercanía de la costa y a la fuerte influencia de los vientos en Puerto Morelos, Campeche.

Tabla 4.4 Composición de la depositación húmeda en varios lugares ($\mu\text{Eq/L}$).

Sitio	pH	SO_4^{-2}	NO_3^-	Cl^-	Na^+	Mg^{+2}	Ca^{+2}	K^+	NH_4^+
Parque Nacional El Chico Puerto Morelos,	4.59	133.15	98.42	74.07	11.44	34.41	27.41	4.94	58.82
Yucatan, Cerón R. <i>et al.</i> 2002	5.35	1.06	3.31	3.97	2.4	0.26	0.26	0.11	0.10
Estado de México García <i>et al.</i> 2006	4.54	56	26.8	10.2	1.84	3.53	7.67	5.27	46.36
El Tajín, Veracruz, Bravo <i>et al.</i> , 2006	4.58	6.87	11.61	13.82	12.17	0.039	5.98	3.08	16.6

Maracaibo, Venezuela Sánchez <i>et al.</i> 2009	4.8	28.4	29.2	36.8	20.1	41.4	30.0	5.4	47.2
Monterrey, N.L., México Ramírez <i>et al.</i> 2010	6.58	44.73	19.36	17.61	98.46	60.58	243.26	28.67	44.11

4.1.5. Cationes

Las sustancias alcalinas afectan significativamente la acidez de las precipitaciones, ya que neutralizan una porción de las especies ácidas presentes en la lluvia. Para los cationes analizados la abundancia obtenida fue: $\text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2} > \text{K}^+$.

El Na^+ presentó un valor mínimo de 0.07 y un máximo de 363.2 $\mu\text{Eq/L}$ en la muestra MC31 en el mes de octubre y un CPPV de 11.4 $\mu\text{Eq/L}$. Este valor fue mayor a los reportados para Puerto Morelos (Cerón *et al.*, 2002) y en el Estado de México (García *et al.*, 2006), pero inferior a las encontradas por Ramírez *et al.* (2010) para Monterrey (tabla 5.4). Mientras que el NH_4^+ presentó un valor mínimo de 3.048 y un valor máximo de 208.810 $\mu\text{Eq/L}$ en septiembre MC06 y un CPPV de 58.828 $\mu\text{Eq/L}$. El valor obtenido de CPPV es comparable con los obtenidos por Sánchez *et al.* (2009) para Maracaibo, Venezuela y por García (2006) en el Estado de México.

El Mg^+ registró un mínimo de 0.4 y máximo de 228.5 $\mu\text{Eq/L}$ en el mes de diciembre con la muestra MC56 y obtuvo un valor CPPV de 34.4 $\mu\text{Eq/L}$. Los valores son comparables con los registrados en Puerto Morelos, México y para el Golfo de México (Parungo *et al.* 1990; Bravo *et al.* 2006). Los valores encontrados para el Ca^{+2} fueron variados para los cuatro meses de muestreo. Teniendo un valor mínimo de 1.5, como máximo 173.7 $\mu\text{Eq/L}$ en la muestra MC02 en el mes de agosto y una CPPV de 27.4 $\mu\text{Eq/L}$. La concentración del potasio registró un valor mínimo de 3.9 y un máximo de 26.6 $\mu\text{Eq/L}$ en la muestra MC31 con un CPPV de 4.9 $\mu\text{Eq/L}$. El CPPV es menor a los reportados por Ramírez *et al.* (2010) para Monterrey. La concentración de potasio se mantuvo con valores bajos durante el periodo de muestreo principalmente en los primeros dos meses (septiembre-octubre).

Las concentraciones de cationes se pueden atribuir a la erosión de las rocas expuestas en la zona, dando origen a partículas que contribuyen con la presencia de cationes en el agua de lluvia, siendo el sodio el mayor contribuyente para neutralizar la acidez; ya que la geología del lugar predominan roca dacíticas de la Formación Zumate compuestas principalmente de feldespatos.

El NH_4^+ es potencialmente ácido, puede participar en la acidez del suelo y por lo tanto en la disponibilidad de nutrientes para los árboles. Así una secuela de la acidez es

el desbalance nutrimental de los ecosistemas forestales. El amonio posiblemente sea por el uso de fertilizantes en la agricultura, ya que aunque la topografía de Mineral del Chico hace que no existan grandes extensiones para la siembra, sin embargo en la localidad de Carboneras que se ubica cerca de la zona de estudio se lleva a cabo dicha actividad.

4.2. RESULTADOS DE LA DEPOSITACIÓN SECA

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla 4.5, indicando la fecha en que inició y terminó la colecta de depositación seca, así como los parámetros obtenidos; pH, conductividad, aniones (Cl^- , SO_4^{-2} y NO_3^-), cationes (K^+ , Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2}) y amonio (NH_4^+).

Tabla 4.5 Resultados de la depositación seca.

Muestra #	Fecha de Identificación	pH	CE (μs)	$\mu\text{Eq/l}$							
				K^+	Na^+	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{-2}	NH_4^+
M-01	31/08/09-07/09/09	6.4	5.6	5.9	48.3	149.9	19.6	12.6	59.8	8.6	74.7
M-02	07/09/09-14/09/09	5.9	6.2	6.2	30.1	111.5	22.8	86.0	174.1	ND	25.9
M-03	14/09/09-21/09/09	5.9	6.9	8.0	125.8	246.8	54.5	55.2	6.6	7.5	25.9
M-04	21/09/09-28/09/09	6.2	8.1	4.6	36.8	30.4	8.5	103.8	170.7	9.5	31.2
M-05	28/09/09-05/10/09	4.8	64.3	5.1	147.0	287.5	39.3	42.0	54.8	6.9	37.3
M-06	05/10/09-12/10/09	5.0	47.5	5.4	68.2	75.1	17.0	17.4	138.5	4.4	ND
M-07	12/10/09-19/10/09	6.2	39.5	3.9	20.0	51.9	6.0	36.0	274.7	2.5	25.9
M-08	19/10/09-26/10/09	7.5	45.0	4.9	47.0	137.9	22.6	39.2	1185.6	4.2	48.0
M-09	26/10/09-02/11/09	6.2	16.0	4.8	19.1	91.2	9.9	62.7	267.8	128.6	111.3
M-10	02/11/09-09/11/09	6.9	13.0	4.5	26.6	227.6	19.1	13.8	828.8	17.8	42.7
M-11	09/11/09-16/11/09	6.7	8.0	4.8	24.8	132.1	15.2	28.7	40.2	4.0	40.4
M-12	16/11/09-23/11/09	6.9	32.5	5.3	50.8	188.9	22.8	4.0	54.8	3.9	36.6
M-13	23/11/09-30/11/09	4.4	23.9	4.0	63.2	48.8	104.3	37.9	140.3	4.7	20.6
M-14	30/11/09-07/12/09	4.9	14.0	3.4	116.8	53.8	159.4	ND	ND	ND	ND
M-15	07/12/09-14/12/09	7.3	10.5	3.5	40.3	44.1	141.1	75.2	127.8	ND	10.7
M-16	14/12/09-21/12/09	5.9	6.3	3.4	12.6	31.0	131.0	57.9	151.6	3.8	23.6

ND= No determinado

4.2.1. pH y conductividad eléctrica

El valor máximo y mínimo obtenido para el pH fue 7.4 y 4.4 respectivamente, con un promedio de 6.0, en comparación con la depositación húmeda este valor no representa acides en el ambiente. A pesar del valor promedio de pH está por encima de 5.6, el Parque puede ser potencialmente afectado por la alta tasa de depositación de nitrato. Que puede ser un grave problema ambiental, teniendo en cuenta que debido a su naturaleza son considerados ecosistemas frágiles.

El 43.75% de las muestras presentó un pH de 6, como se observa en el histograma de frecuencias (figura 4.2). El 43.75% registró un pH menor y el 12.5% un pH de 7.

La conductividad eléctrica presento valores entre 5.6 y 64.3 μS el valor mínimo fue para la primera semana mientras que el valor más alto fue para la de la quinta semana en el mes de septiembre.

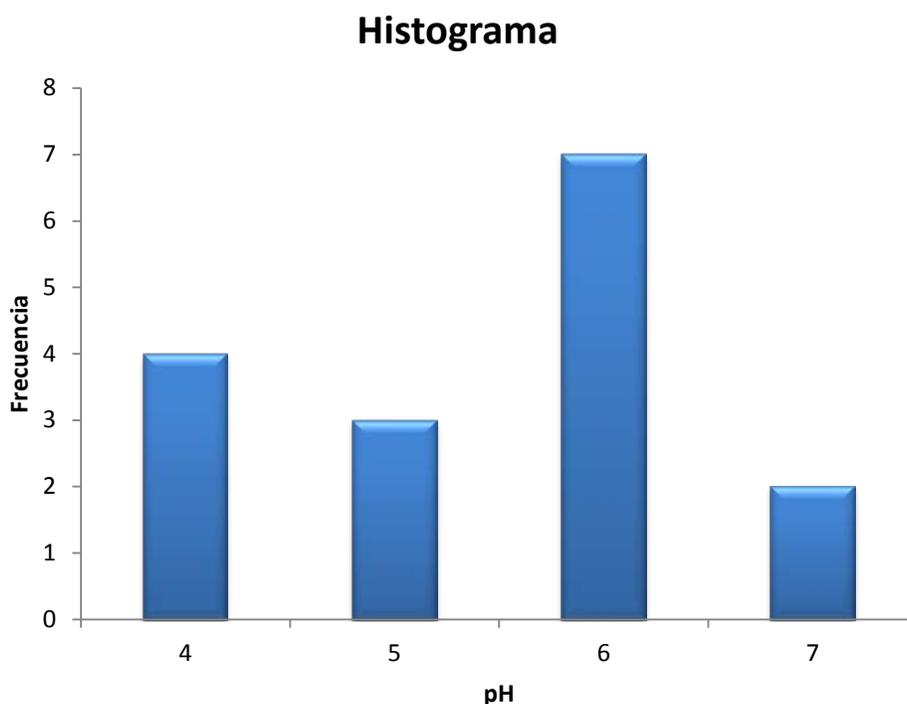


Figura 4.2 Histograma de frecuencia para el pH.

4.2.2. Aniones y cationes

Para el depósito seco se observó mayor concentración de $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ (figura 4.3). Observando la mayor concentración en la semana del 19-26 de octubre M-08 con $1185.5 \mu\text{Eq/l}$ y para la menor en el mes de septiembre (M-03) teniendo $6.6 \mu\text{Eq/l}$ para el NO_3^- . Mientras que el Cl^- registró un valor máximo de $103.8 \mu\text{Eq/l}$ y un mínimo de $4.0 \mu\text{Eq/l}$, siendo el SO_4^{2-} el que registró menor concentración durante el muestreo con un valor máximo de $128.6 \mu\text{Eq/l}$ y un mínimo de $2.4 \mu\text{Eq/l}$. Estos valores son altos lo que significa que hay una fuente antropogénica que contribuye a esta acidez, teniendo en cuenta los tiempos de residencia de SO_2^{2-} (13 días) y NO_2^- (1 día) se puede suponer que la fuente es local lo que genera el enriquecimiento de nitratos en el Parque.

De los cationes, el Ca^{+2} fue el de mayor concentración seguido por $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+$ (figura 4.4). La muestra M-05 presentó el valor máximo $287.5 \mu\text{Eq/l}$ de Ca^+ mientras que el valor mínimo fue de $30.3 \mu\text{Eq/l}$. Para el Na^+ el valor máximo fue de $147.0 \mu\text{Eq/l}$ registrado igualmente para la muestra M-05 y un mínimo de $12.6 \mu\text{Eq/l}$. La muestra M-09 del mes de octubre registró el valor máximo para el NH_4^+ de $111.2 \mu\text{Eq/l}$ y un mínimo de $10.6 \mu\text{Eq/l}$. El catión de menor concentración fue el K registrando un valor máximo de $7.9 \mu\text{Eq/l}$ para M-03 y un mínimo de $3.3 \mu\text{Eq/l}$ para M-14. En México no existe registro de la depositación seca que permita comparar los registros obtenidos en este estudio.

Aniones

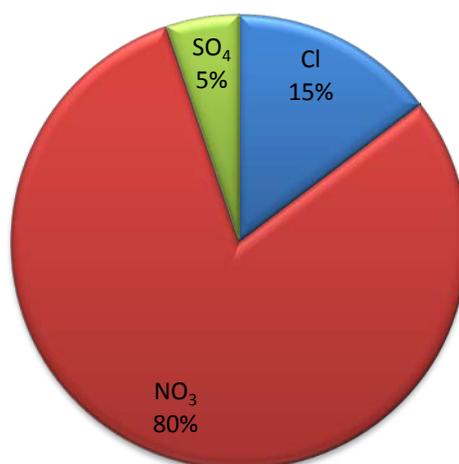


Figura 4.3 Concentración de aniones para la depositación seca.

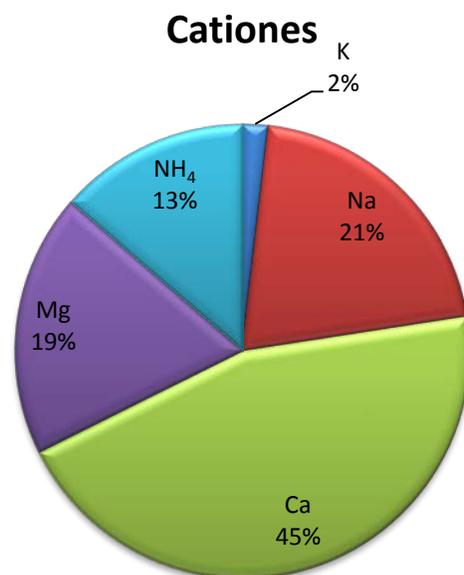


Figura 4.4 Concentración de cationes para la depositación seca.

4.3. FLUJOS DE DEPOSITACIÓN SECA

Tomando en cuenta la superficie de la membrana de 47 mm de diámetro y el tiempo de muestreo (1 semana) se estimaron los flujos de depositación seca siguiendo el mismo procedimiento reportado por Alonso *et al* (2005). A continuación se presentan los flujos de depositación seca obtenidos para cada uno de los elementos presentes (tabla 4.6).

Tabla 4.6 Flujos de depositación seca para cada elemento analizado.

	$\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$	$\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$	$\text{kg}/\text{ha} \cdot \text{año}$
Ca²⁺	15.7	0.65	0.058
K⁺	1.2	0.05	0.005
Mg⁺²	3.9	0.16	0.015
Na⁺	8.3	0.34	0.030
NH₄⁺	4.2	0.17	0.016
NO₃⁻	52.3	2.18	0.191
Cl⁻	10.5	0.43	0.038
SO₄⁻²	4.3	0.18	0.016

4.4. ANÁLISIS METEOROLÓGICO

La distribución de los contaminantes en la atmósfera requiere del conocimiento de la frecuencia y distribución de la dirección y de la velocidad del viento. El viento que prevalece en un rango de tiempo puede ser representado por medio de una rosa de los vientos, la cual indica el porcentaje de tiempo en el que el viento sopla de diferentes direcciones (Ahrens, 1998).

Se analizó la dirección y la velocidad del viento predominante durante los eventos de lluvia presentados en los meses de muestreo. Para esto, se instaló a unos metros del colector ACM 301 una estación meteorológica METONE (foto 4.1), obteniendo datos de dirección y velocidad del viento generado por la estación, se creó un archivo en Excel; posteriormente se importó el archivo a WRPLOT View y se corrió para generar las rosas de los vientos y analizar el comportamiento del aire.



Foto 4.1 Estación meteorológica METONE.

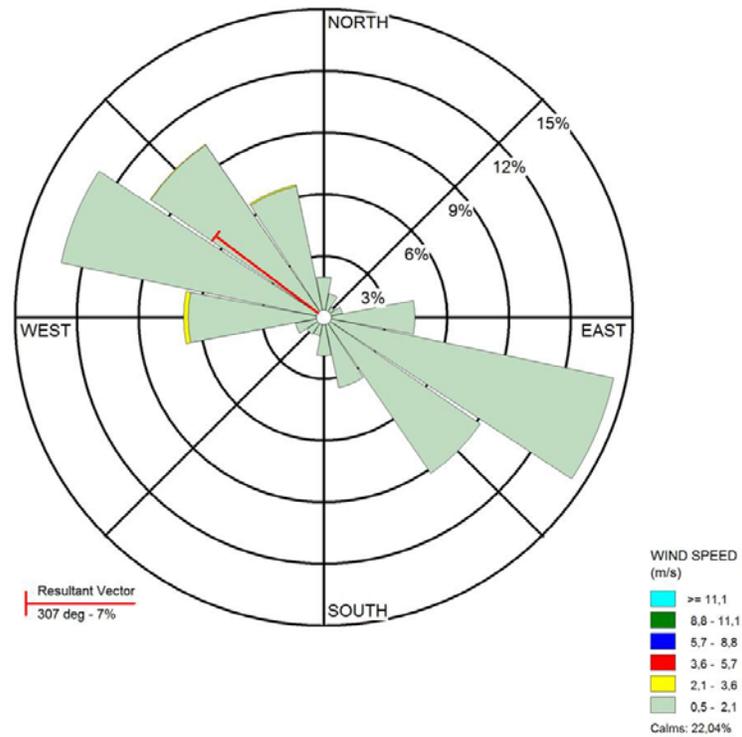


Figura 4.6 Rosa de los vientos del mes de noviembre.

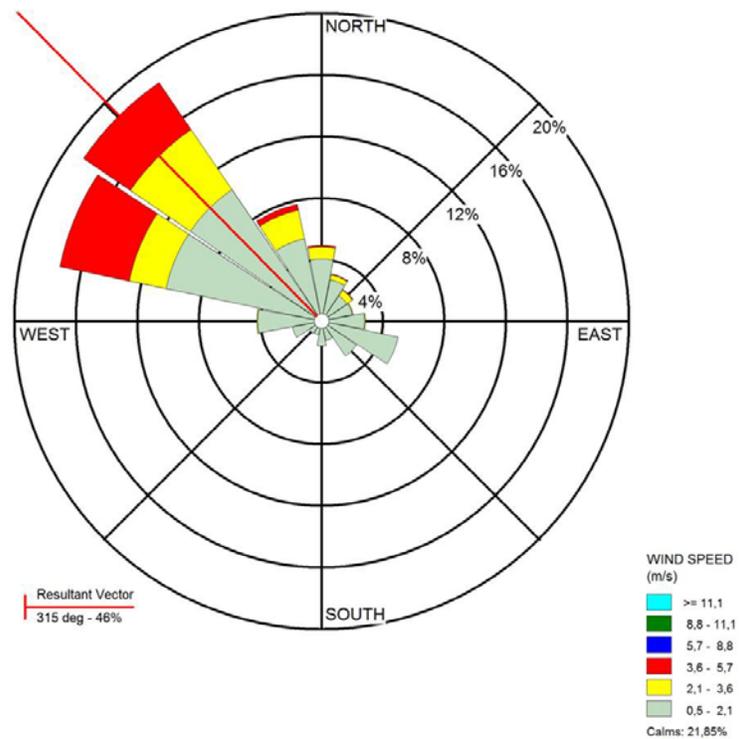


Figura 4.7 Rosa de los vientos del mes de diciembre.

La frecuencia de la distribución de los vientos en los 3 meses de monitoreo se muestra en la figura 4.8, observando que la mayoría presentó velocidades entre 0.5 a 2.1 m/s, que de acuerdo con la escala Beaufort se considera aire ligero a brisa ligera.

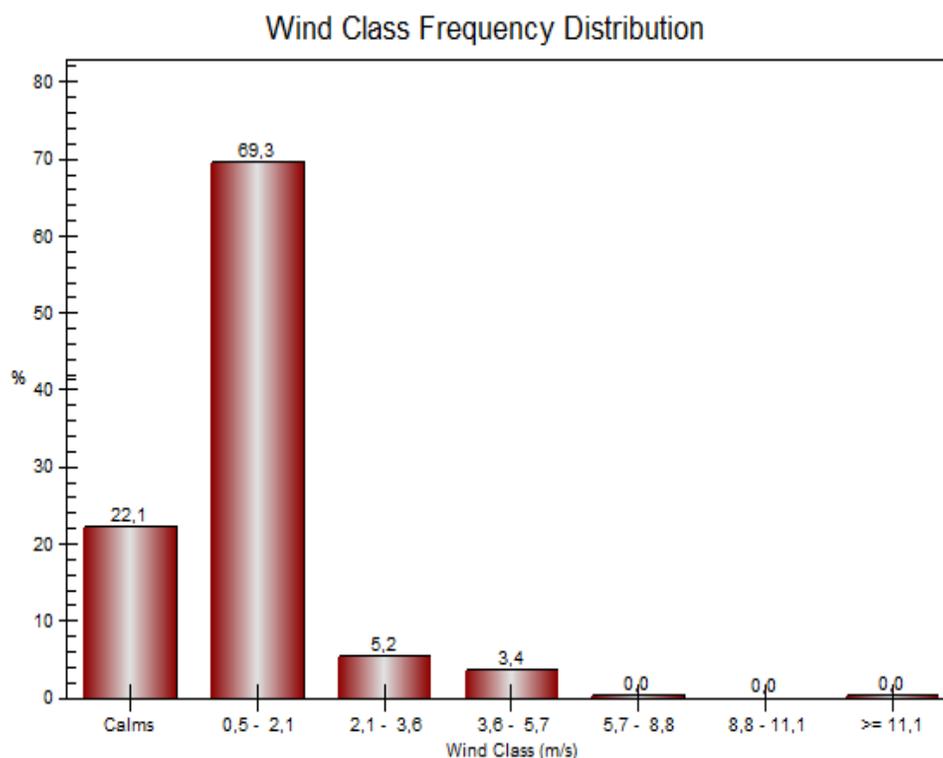


Figura 4.8 Frecuencia de distribución de los vientos.

4.5. MODELO DE TRAYECTORIA

El modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory-HISPLIT*) para modelar el transporte de masa de aire. Es un servicio del Laboratorio de Recursos Atmosféricos (*Air Resources Laboratory-ARL*) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (*National Atmospheric and Oceanic Administration-NOAA*) de Estados Unidos. Este modelo es útil para interpretar un evento que afecta la calidad del aire.

A partir del análisis de las trayectorias hacia atrás calculadas con el modelo *Hysplit* de la NOAA (figura 4.9), se pudo observar que los vientos dominantes durante el periodo de estudio fueron del NE, por lo que una fuente ubicada en esta dirección que aún no ha sido identificada probablemente aportó cantidades considerables de nitrato.

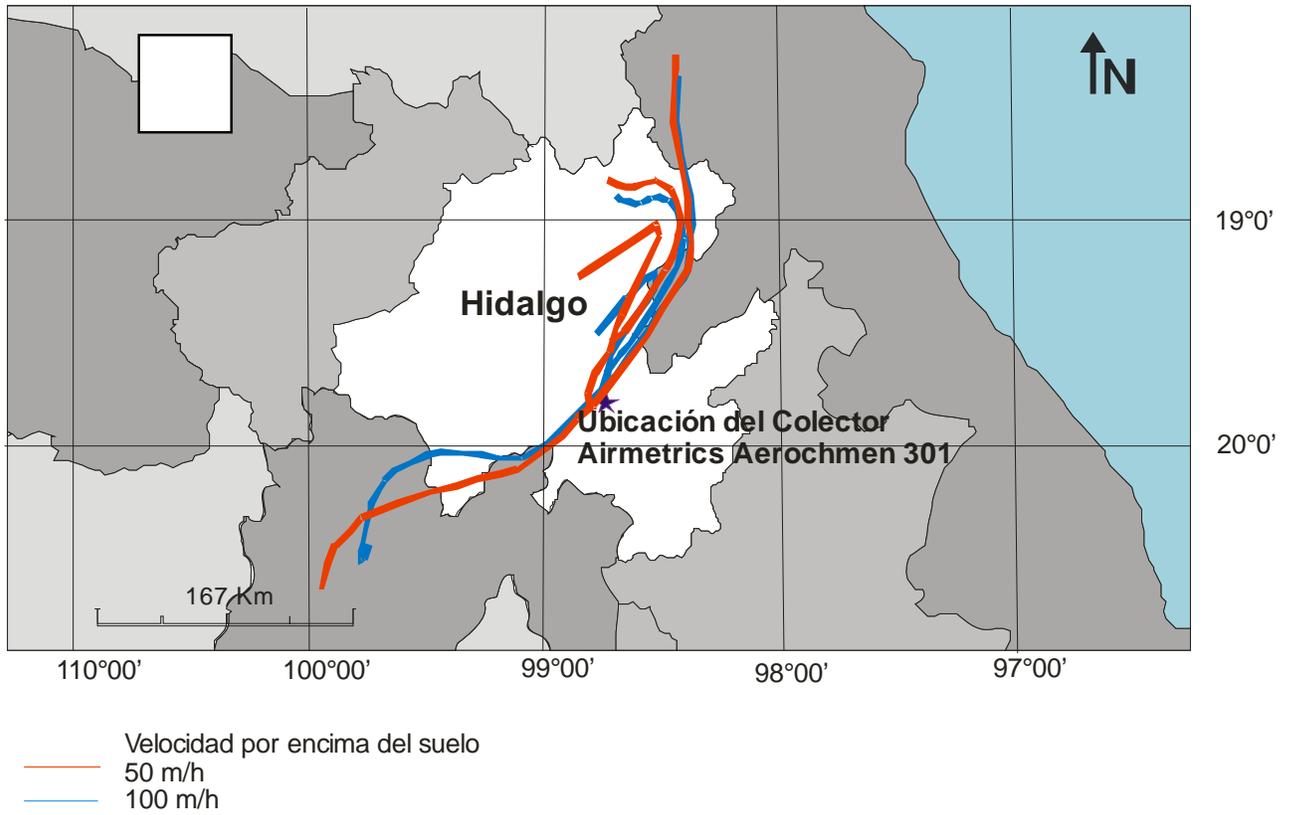


Figura 4.9 Trayectoria del viento para El Parque Nacional El Chico, Hidalgo durante el periodo de estudio.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES

5.1. DEPOSITACIÓN HÚMEDA

El promedio de precipitación colectado para el periodo de muestreo fue 844.3 ml, siendo este menor en comparación con el volumen registrado para el año 2008 de 1164.6 ml.

El valor promedio de la conductividad eléctrica fue de 64.0 μS para la depositación húmeda indicando que al aumentar la precipitación disminuye el valor de la conductividad eléctrica lo que evidencia el efecto de disolución durante el periodo de muestreo.

La temperatura mínima registrada fue de 20.5 y como máxima de 28.7°C, no mostrando diferencia considerable para el periodo de muestreo, por lo cual no muestra alguna influencia en cada evento de precipitación.

El pH promedio obtenido de las 27 muestras para la depositación húmeda durante el periodo de muestreo fue de 4.7, siendo este un valor ácido, el valor mínimo encontrado fue de 2.8 y correspondió al mes de diciembre esto debido a la escasa precipitación y el efecto de disolución; el valor máximo fue de 6.2 que correspondió al mes de noviembre por efecto del lavado del mes anterior que mostro el segundo registro más alto de precipitación en el periodo, se considera que ya pudiesen existir afectaciones al ecosistema por la presencia de lluvia ácida.

La depositación húmeda obtuvo como valor mínimo 0.3 $\mu\text{E/L}$ de SO_4^{-2} , registrado en la muestra MC01 en el mes de agosto. El valor máximo para los SO_4^{-2} fue de 503.8 $\mu\text{E/L}$, correspondiente a la muestra MC08 del mes de septiembre con una variación de pH de 5.4 (MC01) a 4.6 (MC08). La disminución de pH se ve favorecida conforme la concentración de SO_4^{-2} se incrementa, atribuyendo a este ion el efecto de la acidez.

El valor mínimo fue de 6.6 $\mu\text{E/L}$ para NO_3^- registrado en la muestra MC08 correspondiente al mes de septiembre, el valor máximo corresponde a la muestra MC56 del mes de diciembre, presentó una concentración de 919.3 $\mu\text{E/L}$, siendo el ion predominante en cuanto a concentración atribuyéndole el principal precursor de la

acidificación para este evento con un valor de pH 2.8 (MC56) en comparación con el pH de 4.6 para la muestra MC08.

El valor mínimo para el Cl^- fue de 2.8 $\mu\text{E/L}$ en la muestra MC26 del mes de octubre, el valor máximo fue de 836.1 $\mu\text{E/L}$ para la muestra MC02 en el mes de agosto debido a la escasa precipitación, para este ion el pH registro el valor de 2.9 para la muestra MC26 y de 4.0 para la muestra MC02 observando que al aumentar la concentración de este ion aumento el pH.

Las concentraciones mínimas y máximas para el ion NH_4^+ fueron de 3.0 $\mu\text{E/L}$ para la muestra MC18 y 208.8 $\mu\text{E/L}$ de la muestra MC06 respectivamente ambas se presentaron en el mes de septiembre donde se registro un pH de 4.1 y 3.7 respectivamente con un lapso de tiempo de 4 semanas donde se observa el efecto de lavado de este ion a lo largo del periodo.

El K^+ registro un valor mínimo de 3.09 $\mu\text{E/L}$ para la muestra MC09 del mes de septiembre y el valor máximo de 26.6 $\mu\text{E/L}$ se registró en MC31 en el mes de octubre donde el valor de pH fue de 5.0 y 5.2 respectivamente atribuyendo a este ion el efecto de neutralización.

El Na^+ registro un valor mínimo de 0.07 $\mu\text{E/L}$ para MC08 en el mes de septiembre así mismo el valor máximo se presento en la muestra MC31 del mes de octubre con un valor de 363.2 $\mu\text{E/L}$, el valor de pH para estas dos muestra fue de 4.6 y 5.2, atribuyendo a este el efecto de neutralización de la acidez en la depositación húmeda.

El Ca^{+2} registró un mínimo de 1.5 $\mu\text{E/L}$ en la muestra MC26 en el mes de octubre y un valor máximo de 173.7 $\mu\text{E/L}$ para MC02 del mes de agosto, el valor de pH para la muestra MC26 fue de 2.9 mientras que para la muestra MC02 fue 4.0 estos valores presentan un comportamiento similar al Cl^- pero en el caso de este catión su efecto es el de neutralización.

El Mg^{+2} registró un mínimo de 0.4 $\mu\text{E/L}$ en la muestra MC07 en el mes de septiembre, el valor máximo fue de 288.5 $\mu\text{E/L}$ en la muestra MC56 del mes de diciembre esto corresponde a la disminución de precipitaciones en el periodo de muestreo por lo que el incremento de Mg se ve favorecido sin embargo no se ve reflejado en el valor de pH de las muestras que registraron un valor de 5.2 y 2.8 respectivamente.

5.2. DEPOSITACIÓN SECA

Se establece el valor promedio de pH para la depositación seca de 6.0, se considera medianamente ácido, el valor mínimo de pH fue de 4.40 para la muestra M-13 en el mes de noviembre, encontrándose el valor máximo registrado de 7.48 para M-08 en el mes de octubre, concluyendo que este valor se ve afectado por la depositación de especies nítricas y favorecido por la baja velocidad de los vientos predominantes para el periodo de muestreo.

Se obtuvo para SO_4^{-2} un valor mínimo de 2.4 $\mu\text{E/L}$, registrado en la muestra M-07 del mes de octubre y un valor máximo de 128.6 $\mu\text{E/L}$, en la muestra M-09 del mes de octubre.

El valor mínimo registrado para el NO_3^- fue de 6.6 $\mu\text{E/L}$ en la muestra M-03 del mes de septiembre, máximo 1185.5 $\mu\text{E/L}$ para la muestra M-08 del mes de octubre.

El valor mínimo para el Cl^- fue de 4.0 $\mu\text{E/L}$ para la muestra M-12 del mes de noviembre y máximo 103.8 $\mu\text{E/L}$ en la muestra M-04 de septiembre.

Los NO_3^- y SO_4^{-2} contribuyeron a la acidez en la depositación seca, siendo el ión nitrato diez veces mayor que el ion sulfato, sin embargo no existe correlación entre estos iones, se sugiere que la fuente de nitrato es local debido al tiempo de residencia que tiene.

El NH_4^+ registro un mínimo de 10.6 $\mu\text{E/L}$ en M-15 del mes de diciembre y máximo 111.2 $\mu\text{E/L}$ para M09 del mes de octubre.

El Na^+ registro un valor mínimo de 12.6 $\mu\text{E/L}$ para la muestra M-16 del mes de diciembre y máximo 147.0 $\mu\text{E/L}$ de la muestra M-05 perteneciente al mes de septiembre. Este catión se encuentra como el principal agente de neutralización para la depositación seca.

El K^+ registro un valor mínimo de 3.3 $\mu\text{E/L}$ en la muestra M-14 del mes de noviembre, y un máximo de 7.9 $\mu\text{E/L}$ para la muestra M-03 del mes de septiembre.

El Ca^{+2} registro un mínimo de 30.3 $\mu\text{E/L}$ para la muestra M-04 del mes de septiembre y un máximo de 287.5 $\mu\text{E/L}$ en la muestra M-05 del mes de septiembre.

El Mg^{+2} presento un valor mínimo de 6.0 $\mu\text{E/L}$ en la muestra M-07 del mes de octubre y máximo de 159.4 $\mu\text{E/L}$ para M-14 del mes de noviembre.

Los valores obtenidos en este estudio sugieren la procedencia de estos cationes al proceso de intemperismo de rocas locales. Sin embargo no se pueden comparar los resultados obtenidos debido a que no existen registros de este fenómeno.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la estación meteorológica se puede concluir que no existe mucha variación en la dirección como en la velocidad del viento, ya que no se modificaron significativamente para el periodo de muestreo y que la dirección predominante es NO.

La incidencia en la dirección de los vientos indica una fuerte influencia de dispersión de partículas de residuos mineros que se encuentran en el municipio de Omitlán hacia la estación de monitoreo del Parque Nacional El Chico, por lo que se recomienda realizar estudios por periodos más largos.

Se obtuvieron los primeros registros del fenómeno de depositación húmeda y seca para el Parque Nacional El Chico como referencia para zonas no impactadas en el estado de Hidalgo. Por lo que se recomienda seguir con el muestreo para identificar las afectaciones que se presentan en el Parque Nacional El Chico.

Se considera establecer estudios sobre los tiempos de residencia de aniones y cationes para determinar su origen y cargas críticas.

BIBLIOGRAFÍA

Acevedo Sandoval, O.A, 2007, Aluminio, un indicador de calidad ambiental es suelos de carga variable. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Química. Tesis doctoral, 32.

Ahrens, C. D., 1998, Air Pollution, *in* Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere. 2^o ed. Wadsworth Publishing Company. United States, 237-382.

Albert L., 2000, Contaminantes atmosféricos secundarios y efectos macroecológicos, 71-95.

Alonso, R., Bytnerowicz, A., Yee, J.L., and Boarman, W.I. 2005, Atmospheric dry deposition in the vicinity of the Salton Sea, California-II: Measurement and effects of an enhanced evaporation system. *Atmospheric Environmental*, Vol. 39, 4681-4689.

Alvarado, F., y García, L., 1988, Estudio de la lluvia ácida en corteza de árbol como indicador de contaminantes en el Volcán El Pelado, DF: Universidad Autónoma Metropolitana/Xochimilco.

Arthur, M. A., and Fahey, T., 1993, Throughfall chemistry in an Engelmann spruce-subalpine fir forest in north central Colorado. *Can. J. Forest Res.* 23, 728-742.

Ayllón, T, 2003, La Atmósfera, *en* Elementos de meteorología y Climatología, 2^o ed. Trillas, México, 30-23.

Báez Q. P. and Padilla H., 1986, Acid Rain Over Mexico City Valley and Surrounding Rural Areas: *Geofísica Internacional*, Vol. 25 (2), 315-326.

Baquedano B. A., 2009, Lluvia ácida, Argentina, 2-17 pp.

Bravo, H., and Aguilar A.S., 1984, Acid Precipitation in the Mexico Basin, Conferencia Técnica Sobre Climatología Urbana y sus Aplicaciones con Especial Referencia a las Zonas Tropicales, México, D.F, Noviembre, 1984, 3-4.

Bravo, H., Sosa E. R., Torres J. R., 1991, Ozono y lluvia ácida en la Ciudad de México. *Ciencias* (22), 33-40.

Bravo, H., Saavedra, M., Torres, R., Sánchez, P., Granada M., Soto, R., y Harris, J., 2000, Efecto potencial de la lluvia ácida en monumentos mayas, *Ciencia y desarrollo* Vol. 26 (153), 49-57.

Bravo, H., Soto, R., Sánchez, P., Alarcón, A., and Kahl, J., 2006, Effect of acid rain on building material of the El Tajín, archeological zone in Veracruz, México. *Environmental Pollution* (144), 655-660.

Calderón, C. M., Evaluación de las precipitaciones ácidas en la ciudad de Toluca 1987-1988. Toluca, Edo. De México; 1990, Universidad Autónoma del Estado de México; 134.

Camacho, O. y Flamand L., 2008, Políticas intergubernamentales para controlar la contaminación del aire en ciudades mexicanas. Una evaluación: Gestión y Política Pública, vol. XVII, (2), sin mes, 261-313.

Caselli, M., 1995, Composición de la atmósfera, Formas en que el Hombre modifica la atmósfera, *en* La contaminación atmosférica. Causas y fuentes, efectos sobre el clima, la vegetación y los animales 3ª ed., México, 13-37 y 38-79.

Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA) - Instituto Nacional de Ecología (INE), 2003, Variaciones de las concentraciones de ozono en zonas agrícolas del Valle de México y su vinculación con algunos fenómenos meteorológicos de escala sinóptica. Proyecto de colaboración entre la Dirección de Investigación en Contaminación Atmosférica del CENICA-INE con el Instituto de Meteorología de Cuba, 2-7 pp.

Cerón, B., R., Padilla, H., Belmont, R., Torres, M., García, R., and Baéz. A., 2002, Rainwater chemical composition at the end of the mid-summer drought in Caribbean shore of the Yucatan Peninsula. *Atmospheric Environmental* Vol.36, 2367-2374.

Cerón, B. R., Baéz P. A., Padilla, G. H., Cerón, B. J. G. y Muriel G. M., 2004, Contribución de incendios forestales a los niveles de nitrato y a la acidez del agua de lluvia durante la época de secas: Puerto Morelos, Quintana Roo: Un caso de estudio. *Tecnología, Ciencia y Educación*, Julio-diciembre Vol. 19 (2), 55-64.

Cerón, B. R., Cerón, B. J. G., Córdova, A.V., Zavala, J. and Muriel M., 2005, Chemical composition of precipitation at coastal and marine sampling sites in México. *The Global Network for Environmental Science and Technology*, Vol. 7 (2), 212-221.

Cerón, J., Cerón, R. M., Cardenas, B., Ortinez, A., Cruz, E., Díaz, B., Carballo, G., Pérez, Tezozomoc., Reyes, J., Muriel., M., and Guerra J, 2011, On the dry deposition of ionic species at two National Parks located in the vicinity of power plants in Mexico, *Proceeding of the 9th IASME/WSEAS International conference on heat transfer, thermal engineering and environmental (HTE'2011)*, Florencia Italia.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), 2005, Programa de Conservación y Manejo, Parque Nacional El Chico, México, 21-43 pp.

Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), 1997, Ruta de los contaminantes, Canadá, 20-44 pp.

Consejo Nacional del agua (CONAGUA), 2010, datos de la estación meteorológica el Chico, 1-6.

Consejo de Recursos Minerales (COREMI), 1992, Monografía Geológico-Minera del Estado de Hidalgo: México, 109.

Córdoba, D., y Camargo, T., 1992, Estudio geológico preliminar, Parque Nacional El Chico, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Hidalgo, 127-128.

Environmental Protection Agency (EPA), 2009, National Ambient Air Quality Standards (NAAQS), <http://www.epa.gov/air/criteria.html>, acceso directo.

EPA 150.1 Method. Determination of pH in water. USA Environmental Protection Agency, 1982.

EPA 120.1 Method. Determination of specific conductivity for deposition samples. USA Environmental Protection Agency, 1982.

EPA 300.0 Method. Determination of inorganic anions by Ion Chromatography. USA Environmental Protection Agency, 1993.

EPA 7770 Method. Determination of sodium by atomic absorption spectroscopy. USA Environmental Protection Agency, 1986.

EPA 7610 Method. Determination of potassium by atomic absorption spectroscopy. USA Environmental Protection Agency, 1986.

EPA 7140 Method. Determination of calcium by atomic absorption spectroscopy. USA Environmental Protection Agency, 1986.

EPA 7450 Method. Determination of magnesium by atomic absorption spectroscopy. USA Environmental Protection Agency, 1986.

Espert, V., y López, A., 2004, Aspectos que comportan el problema de la contaminación del medio ambiente atmosférico, *en* *Dispersión de Contaminantes en la Atmósfera*, 1ª. ed. México, Alfa Omega, 21-25.

Fornaro A. and Gutz I. G. R., 2006, Wet deposition and related atmospheric chemistry in the Sao Paulo metropolis, Brazil. Part 3: Trends in precipitation chemistry during 1983-2003. *Atmospheric Environmental* 40, 5893-5901.

Fries, C., 1963, Geología y yacimientos minerales del Distrito de Pachuca-Real del Monte, estado de Hidalgo, México: Consejo de Recursos Naturales no renovables, publicación 5E, 222.

Galloway J. N., Likens G. E. y Hawley M. E., 1984, Acid precipitation: natural versus anthropogenic components. *Science* 226, 829-831.

García de Miranda, E., 1986, Apuntes de Climatología: México, UNAM, 156.

García de Miranda, E., 1988, Climas, (Clasificación de Köppen, modificado por García), escala 1: 1 000 000, México.

García, G., Páramo V., y Casanova del Ángel F., 1991, Precipitaciones ácidas en el periodo 1987-1991 en el área metropolitana de Ciudad de México, *Ciencia y desarrollo*, 113, 31-39.

García G., Ramírez S. H., López G. M., Espinosa M. M., Meulenert P. A., García C. F., y Alcalá G. J., 2005, Índices de contaminación de SO₂ y NO₂, y su correlación con los iones H⁺, SO₄²⁻ y NO₃⁻ en las precipitaciones en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, en XVI Congreso Mexicano de Meteorología, Veracruz 2007: Veracruz, México, 11.

García, R., Padilla, H., Belmont, H., Azpra, E., Arcega C., and Báez, A., 2006. Measurement of chemical elements in rain from Rancho Viejo, a rural wooded area in the State of México, México. *Atmospheric Environmental* 40, 6088-6100.

Government of Canada, 1996, Canada-United States Air Quality Agreement: 1996 Progress Report, pp 3-12.

Herrera, M. J. y Rodríguez R. S., 2009, Determinación de la concentración de aniones en muestras de precipitación total colectadas en San José, Costa Rica. Primera Parte. *Rev. Int. Contaminación Ambiental* 25 (2), 65-72.

Instituto Nacional de Ecología (INE), 2000, Calidad del aire en las principales ciudades de México, 6-13.

Instituto Nacional de Ecología (INE), 2007, Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas, México, 13-21.

Instituto Nacional de Ecología (INE), 2008, Diseño de la red nacional de depositación atmosférica. Convenio INE-UNACAR No. INE/A1-047/2008, 131.

Kanuga, K., 1984, Acid rain and its chemical composition at Xalapa, Veracruz, Technical conference on urban climatology: México, DF, 2-14.

Kulshrestha U. C., Jain M., Mandal T. K., Gupta P. K., Sarkar A. K., y Parashar D.C., 1999, Measurements of acid rain over Indian Ocean and surface measurements of atmospheric aerosols at New Delhi during INDOEX Pre-Campaigns. *Current Science* 76, 968-972.

Lance, S., 1984, Botanical aspects of acidic precipitation. *The Botanical Review*, Vol.50 (4), 450-479.

Likens, G. E., Bormann, H.F., Pierce, S.R., Eaton, S. J., and Johnson, M.N., 1997. Biogeochemistry of a Forested Ecosystem. Springer-Verlag. Springer-Verlag, Vol. 63 (6), 772-1978.

Melo, G., y López, G., 1994, Parque Nacional El Chico, marco Geográfico-Natural y propuesta de zonificación para su manejo operativo: Boletín del Instituto de Geografía, 28, 65-128.

Mendoza A., y Graniel M., 2007, Evaluación exploratoria de la dispersión de contaminantes emitidos por operaciones de quema de gas amargo en la Sonda de Campeche. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 23 (3), 99-11.

Moreno, R., Monroy, M., y Castañeda, P., 2009, Evaluación Geoquímica de residuos mineros (jales o colas) de mineralización de tipo epitelial, Hidalgo, México, *Revista Geológica de América Central*, 41, 79-98.

Mphey J. N., Piennar J.J., Galy-Lacaux C., Held G. and Turner C.R., 2004, Precipitation chemistry in semiarid areas of Southern Africa: a case study of a rural and an industrial site. *Atmospheric Chemistry*. 47, 1-24.

Nervers, N., 2000, Contaminantes de aire, *en* Ingeniería de control de la contaminación del aire. McGraw Hill, México, 300-326 pp.

Organización Mundial de la Salud (OMS), 2005, Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005, 7-21 pp.

Ortíz, M. F., 1984, La Precipitación Ácida y el Deterioro en el Centro Histórico de la Ciudad de México. SEDUE. México, D.F, 5-22.

Parungo, F., Nagamoto, C., Hoyt, S., and Bravo, H., 1990, The investigation of air quality and acid rain over the Gulf of Mexico, *Atmospheric Environment* Vol.24 (1), 109-123.

Pereyra D. D., y García A. J., 1988, Acidez de la lluvia de la Ciudad de Xalapa, Veracruz, pp. *Revista Universitaria Veracruzana*, 49-57.

Pérez, S., Cetina, A., Aldrete, A., Fenn, A., y Landois, L., 2006, Química de la precipitación en dos bosques de la cuenca de la Ciudad de México, *Agrociencia* 40 (02), 239-248.

Peñaranda, L., 1988, *Precipitaciones ácidas: Metodología para su caracterización y estudio en la Ciudad de México*: México, Instituto Politécnico Nacional.

Quadri, G., 1995, Políticas ambientales para una ciudad sustentable, *Revista Comercio Exterior: Economía Urbana*, 10 (45), 756-765.

Quadri, G., y Sánchez, L., 1995, La Contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, *en La ciudad de México y la contaminación atmosférica*: México, Limusa, 27-125.

Quintarilla, J., y Bauer, M., 1995, Protections of Energy Demand and Related Emissions. PUE-UNAM, pp 4-17.

Ramírez L. E., Guardiola R.M., Vásquez G., y Balderas R. I., 2010, Chemical composition of rainwater in northeastern México, *Atmósfera* 23 (3), 213-224.

Rojas, L., y Garibay, V., 2003, Las partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles: ¿Hacen daño a la salud? ¿Podemos hacer algo?, *Gaceta Ecológica* 69, 29-44.

Saavedra R. L., Alvarado R. D., Vargas H. J., y Hernández T. T., 2003, Análisis de la precipitación pluvial en bosques de *Abies religiosa* (HBK.) Schtdl. et cham., en el sur de la Ciudad de México, *Agrociencia*, Vol. 37, (01), 57-64.

Sánchez, L., Morales, J., Velásquez, H., Portillo, D., Cano, Y., Montilla, B., Iriarte, N. y Mesa J., 2009, Composición iónica y niveles de acidez de las lluvias en Maracaibo, Venezuela, entre 1989 y 2001, *Contaminación Ambiental* 25 (3), 169-179.

Sánchez, R., L., Arredondo, M., J., y Cardoso, V., E., 2007, Carta Geológico-Minera Pachuca F14-D81, Escala 1: 50 000, Pachuca, Hidalgo, México, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 1999, Lluvia ácida, Dirección de Prevención y Control de la Contaminación, Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), 3-14 pp.

Secretaria del Medio Ambiente (SMA), 2002, Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010: Distrito Federal, 381 pp.

Secretaria de Salud (SSA), 2009, Salud ambiental, criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población, <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nomssa.html>, acceso libre.

Segerstrom, K. 1961, Geología del suroeste del estado de Hidalgo y del noreste del estado de México: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 13 (3-4), 147-1668.

Shepard, J. P., Mitchel, J. M., Scott, J. T., Zhang, M. J., and Raynal, J. J., 1989, Measurements of wet and dry deposition in a northern hardwood forest. *Water, Air and Soil Pollution* 48, 225-238.

Strauss, W., y Mainwaring, S., 2001, ¿Que es la Contaminación del aire?, Los Efectos de la contaminación del aire, *en* Contaminación del Aire: México, Trillas, 9-17,47-83.

Tarbutck, E. J. y Lugtgens, F. K., 2005, Meteorización y suelo, *en* Ciencias de la Tierra, España, Ed. Prentice Hall, 175-197.

Turk, A., Turk, J. y Wittes J., 2004, Ecología, contaminación, medio ambiente: México, Mcgraw Hill, 227.

Tresmondi A. C.C. L., Tomaz, E. y Krusche A. V., 2003, Deposicao úmida em Palínia en Anais do III Congreso Interamericano da Qualidade do Ar, Canoas, RS, Brasil.

Wark, Kenneth, 2008, Efectos y fuentes de los contaminantes del aire, *en* Contaminación del aire, origen y control. Limusa, México, 17-63.

World Health Organization (WHO), 2000, Use of the Guidelines for Europe. Regional Publications, Copenhagen, 41-55.

ANEXO 1

HOJA DE TRABAJO DEL SITIO

Si usted tiene preguntas mientras que llena este impreso, por favor refiera a la sección 3 de este documento. Rellene por favor el impreso totalmente y devuélvalo a la Coordinación responsable correspondiente a cada sitio de muestreo de la Red. Las distancias y elevaciones de registro se dan en unidades métricas (ej., metros como m, centímetros como cm, milímetros como mm, megavatios como MW y kilómetros como km). Si no se especifica lo contrario, reportar distancias de la localización actual o planeada. Donde el espacio es inadecuado para sus observaciones, ponga páginas adicionales, y etiquete las observaciones para el artículo de la hoja de trabajo que es descrito.

Identificación del sitio

Nombre del sitio: Parque Nacional El Chico

Ciudad: Pachuca

Estado: Hidalgo ID del sitio: MC

Nombre del Operador del Sitio: Xochitl Patiño Hernández

Nombre del Supervisor del Sitio: Biol. Enrique Cruz Chávez

Dueño del Sitio:

Coordenadas

Registrar latitud y longitud en grados y minutos decimales (ej. 40 Grados, 30.201 minutos)

Latitud: Grados: Minutos:

Longitud: Grados: Minutos:

O grados, minutos y segundos (ej. 40 grados, 30 minutos, 15 segundos)

Latitud: 20 Grados 11 Minutos 9.60 Segundos

Longitud: 98 Grados 42 Minutos 59.90 Segundos

Elevación: 3009 m sobre el nivel del mar

Nombre de mapa (1:24,000)

Año de revisión

Nombre de mapa (1:250,000)

Año de revisión

Acceso al Sitio

¿Como el operador tendrá acceso al sitio?

Verano (X) A Pie () Auto Invierno (X) A Pie () Auto

Información de Camino

¿Hay una vía de acceso del sitio que permita que los vehículos estacionen a 30 m del colector? Si ()
No (X)

Si es si, checar la superficie del material: Asfalto Concreto Sucio Grava Arena Mixta

¿Cuántos vehículos usan este camino cada semana? Verano: invierno:

Si es no, ¿Que tan cerca está el camino del colector? (indicar m o km) 0.36 Km (anexo 1a, figura 1)

Si es si, checar la superficie del material: Asfalto Concreto Sucio Grava Arena Mixta

Dirección del colector ¿Es éste camino de acceso público o privado?

Información de estacionamiento

¿Hay una vía de acceso del sitio que permita que los vehículos estacionen a 30 m del colector? Si ()
No (X)

Si es si, checar la superficie del material: Asfalto Concreto Sucio Grava Arena Mixta

¿Cuántos vehículos usan este camino cada semana? Verano: invierno:

Si es no, ¿Que tan cerca está el camino del colector? (indicar m o km) 0.36 Km (ver Anexo 1a, figura 1)

Si es si, checar la superficie del material: Asfalto Concreto Sucio Grava Arena Mixta

Dirección del colector ¿Es éste camino de acceso público o privado?

Logística

¿Cómo el sitio se asegura contra vandalismo, etc.?

El área se encuentra cercada con malla ciclónica de 3x3 por 2 m de altura con alambres de púas y cerrado con candado (figura 3).

HOJA DE DATOS DEL PERSONAL DEL SITIO:

Operador de Sitio: Xochitl Patiño Hernández Tel. (044)771 228 3618

Dirección: Cubitos #351, Pachuca, Hidalgo, código postal 42090

(Nombre y número de la calle, ciudad, estado y código postal)

Fax () E-mail chitlphox@hotmail.com

Supervisor de Sitio: Biol. Enrique Cruz Chávez Tel. ()

Dirección:

Fax () E-mail:

HOJA DE DATOS SOBRE INSTRUMENTACIÓN DEL SITIO:**Fuente de alimentación:**

Fuente primaria (marque una X) (X) CA () CD

Si es CA, voltaje 110 volts ___ Amperaje de servicio

Si es CD, Capacidad de la batería ___ ampere-hora. Panel solar _____ amperes

Área del panel _____ metros cuadrados

Colector de Precipitación:

Modelo: Airmetrics Aerochmen 301 (ACM)

Estación de medición más cercana (Servicio Meteorológico Nacional, expediente de 30 años)

Localización La estación "El Chico" se localiza en el municipio de Pachuca, Hidalgo, teniendo como coordenadas:

Latitud 20° 14'0"

Longitud 98°44'24"

Distancia del colector (indicar en m o km) 5.71 km dirección del colector

Precipitación Anual / / Años de registro 20

(mm) total lluvia nieve

**HOJA DE DATOS SOBRE OBSTÁCULOS PARA LA TOMA DE MUESTRAS Y
POSIBLES FUENTES DE CONTAMINACIÓN**

Cubierta de tierra a 0.5 kilómetros del sitio:

Describa la cubierta de tierra en un área circular de radio de 0.5 kilómetros (~0.3 millas) alrededor del sitio. Indique la fracción de la superficie cubierta por el bosque, desierto, prado inculto, las cosechas cultivadas, pasto pastado, pantano o humedal, agua abierta, las residencias, las industrias, las actividades comerciales, los edificios agrícolas, etc.

Por ejemplo cosechas cultivadas/ 80% residencias / 20 %

Superficie 1 Bosque de pinus quercus/ 10%

Superficie 2 Bosque de abies / 90%

Superficie 3 / % otro % Total debe ser 100%.

En el sitio (de 0 a 5 m del colector de precipitación):

Comience en el norte, muévase a la derecha, e identifique todos los objetos (vegetación, postes, instrumentos, etc.) que sean mayores de 1 m de alto y su descripción, dirección y distancia de la posición del colector.

Tabla 1 Descripción de objetos alrededor del colector.

Descripción de objeto	Dimensión objeto (m)		Dirección del Colector (grados)	Distancia del colector (m)
	altura	tamaño		
Arbustos (figura 4)	1.40	1.30		2
Ramas (figura 5)	1.00	0.60		2.80
Arbustos	1.30	1.00		0.90
Rocas (figura 6)	1.90	4.60		1.50

¿Existe madera tratada o material galvanizado cerca? SI NO X

Describir:

En sitio (de 0 a 30 m del colector de precipitación):

Cubierta de suelo

Describa la cubierta de suelo a 30 m del colector de precipitación. Indique la fracción de la superficie cubierta por la tierra, roca, hierba, vegetación densa, arbustos, árboles, agua, etc.

Cubierta 1 roca/ 20%

Cubierta 2 pasto/ 15%

Cubierta 2 arbustos/ 45%

Cubierta 4 arboles/ 20%

Equipos, los edificios, las vertientes, las residencias, u otras estructuras (el comienzo en el norte, movimiento a la derecha e identifica todos) NINGUNO X

Tabla 2 Descripción de edificios o estructuras.

Descripción del objeto	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Dirección del colector (grados)	Distancia del colector (m)
------------------------	-----------	-----------	----------	---------------------------------	----------------------------

Alambres, torres, y mástiles de arriba (el comienzo en el norte, movimiento a la derecha e identifica todos). NINGUNO X

Tabla 3 Descripción de torres.

Descripción de objeto (tipo)	Altura estimada (m)	Dirección del colector (grados)	Distancia del colector (m)
------------------------------	---------------------	---------------------------------	----------------------------

Actividad Animal NINGUNA X

¿Qué tan cerca pueden estar los animales del colector? m No. de animales

Tipo de Animal: Salvaje Caballo Ganado Cerdos Otro

Árboles, arbustos y cactus NINGUNO

Proporcione la información en todos los árboles, arbustos, y cactus que sean más altos que su colector así como descripción, dirección y distancia de la posición del colector. Árboles más cortos, etc. pueden también ser descritos.

Tabla 4 Descripción de objetos más altos que el colector.

Descripción del objeto	Altura estimada (m)	Dirección del colector (grados)	Distancia del colector (m)
Roca (figura 7)	0.45		0.53
Cactus (figura 8)	0.13		0.70

Área local (de 0 a 100 m del colector de precipitación):

Almacenaje superficial (productos químicos agrícolas, productos, combustibles, y otros materiales)
Ninguno X

Tabla 5 Descripción de almacenes.

Descripción	Cantidad	Dirección del colector	Distancia del colector
-------------	----------	------------------------	------------------------

Estacionamiento o áreas de mantenimiento NINGUNO X

Medida (metros cuadrados) Distancia del colector m Dirección del colector

Material de la superficie: Asfalto Concreto Sucio Grava Arena Mixta

¿Cuántos vehículos usan este camino cada semana? (estimados están bien) Verano: Invierno:

Otras fuentes de transportación de aire, agua y suelo. NINGUNO

Tabla 6 Descripción de fuentes de transportación.

Descripción de transporte	Dirección del colector	Distancia del colector
---------------------------	------------------------	------------------------

Caminos

Incluya todos los caminos, incluso unos descritos previamente en la sección del acceso del sitio arriba y su descripción, la dirección y la distancia del colector.

Tabla 7 Descripción de caminos

Nombre camino	Material de la superficie	# de personas por Vehículo		Dirección del colector	Distancia del colector
		verano	invierno		
Carretera Pachuca-Tampico desviación rumbo al poblado Mineral del Chico.					5.71 km

Área local (de 100 a 500 m del colector de precipitación):

Identifique las concentraciones grandes de animales (los forrajes o lechería, aves de corral, granjas de cerdos, etc.) NINGUNO X

Tabla 8 Tipos de concentraciones de animales

Tipo	No. Animales	Dirección del colector	Distancia del Colector

Identifique fuentes de combustión NINGUNO X

Tabla 9 Fuentes de combustión

Tipo	Estación del año	Dirección del colector	Distancia del Colector

ANEXO 1a

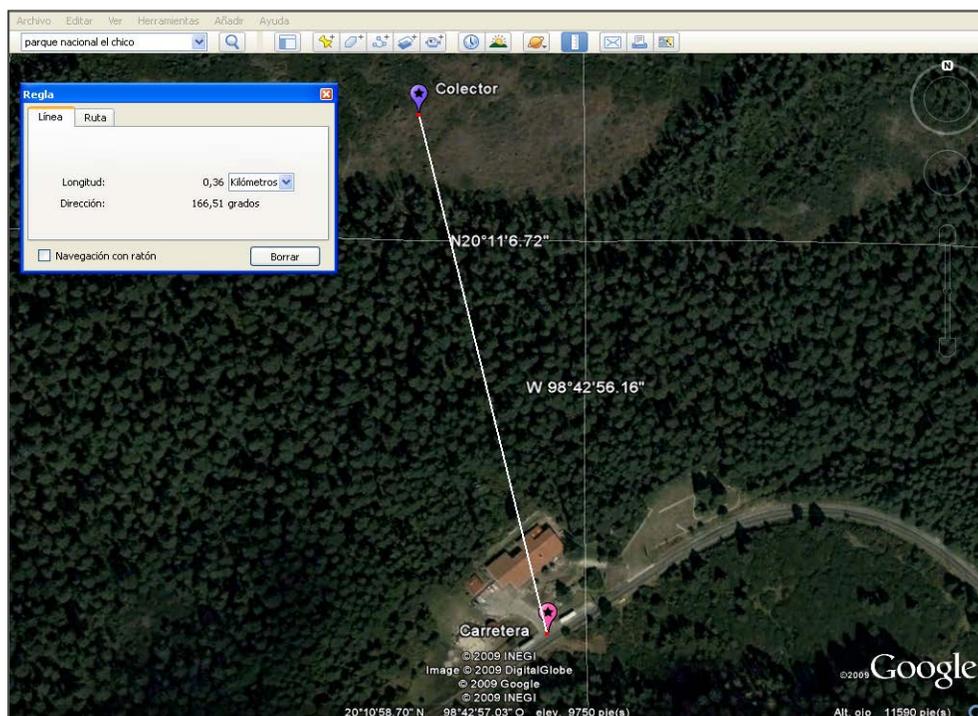


Imagen 1 Distancia entre el colector y la carretera.

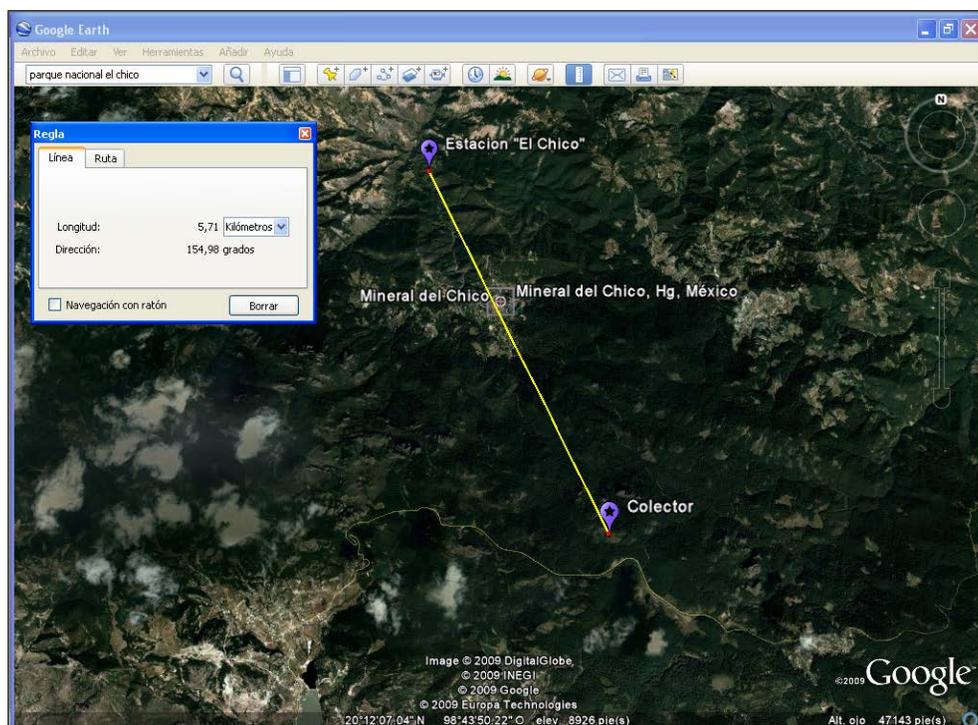


Imagen 2 Distancia del colector a la estación "El Chico".



Foto 1 Seguridad del colector.



Foto 2 Arbustos de 1.40 m.



Foto 3 Ramas con 1m de altura.



Foto 4 Roca de 1.90 m de altura.



Foto 5 Roca de 45 cm de altura.



Foto 6 Cactus de 15 cm de altura.

ANEXO 2

FORMA DE REPORTE DEL OBSERVADOR DE CAMPO (FOC)

1.- Sitio Nombre _____		ID		2.- Observador Nombre _____		Iniciales																																	
3.- Cubeta	Fecha			Tiempo																																			
		Mes	DIA	Año	0001 - 2400																																		
	Encendido																																						
	Apagado																																						
4.- Operaciones de Sitio		<p>Marque si o no para todos los ejemplos, si no hay para el punto 1 o 2, describa en el bloque 8.</p> <p>1.- La caja del motor, el calentador del sensor y el registrador de eventos funcionan correctamente, indique si la tapa del colector abre y cierra normalmente para cada evento de precipitación.</p> <p>2. El colector se abrió y se cerró por lo menos una vez durante la semana, con excepción de la prueba.</p>																																					
<table border="1"> <tr> <td>S</td> <td>N</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2</td> </tr> </table>		S	N	1	1	2	2																																
S	N																																						
1	1																																						
2	2																																						
5.- Condición de la muestra Marque sí o no para todas las Muestras. (Describa la contaminación en el bloque 8. Incluyendo los no listados aquí.)																																							
<table border="1"> <tr> <td>S</td> <td>N</td> <td></td> <td>S</td> <td>N</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1.- Desechos de aves</td> <td>4</td> <td>4</td> <td>4.-Materia de insectos y animales</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2</td> <td>2.-Nublado o despejado</td> <td>5</td> <td>5</td> <td>5.-Materia de plantas/polen</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>3</td> <td>3.- Hollín/cenizas/partículas</td> <td>6</td> <td>6</td> <td>6.-Contaminación directa</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		S	N		S	N				1	1	1.- Desechos de aves	4	4	4.-Materia de insectos y animales			2	2	2.-Nublado o despejado	5	5	5.-Materia de plantas/polen			3	3	3.- Hollín/cenizas/partículas	6	6	6.-Contaminación directa								
S	N		S	N																																			
1	1	1.- Desechos de aves	4	4	4.-Materia de insectos y animales																																		
2	2	2.-Nublado o despejado	5	5	5.-Materia de plantas/polen																																		
3	3	3.- Hollín/cenizas/partículas	6	6	6.-Contaminación directa																																		
6.- Uso de botellas				7.-Requerimientos																																			
<table border="1"> <tr> <td rowspan="2">¿Vertió la muestra en la botella?</td> <td>SI</td> <td></td> </tr> <tr> <td>NO</td> <td></td> </tr> </table>				¿Vertió la muestra en la botella?	SI		NO		<table border="1"> <tr> <td colspan="2"><i>Marque con circulo si lo necesita</i></td> </tr> <tr> <td>Etiquetas</td> <td>Guantes</td> </tr> <tr> <td>Formas de Campo</td> <td>Marcador</td> </tr> </table>				<i>Marque con circulo si lo necesita</i>		Etiquetas	Guantes	Formas de Campo	Marcador																					
¿Vertió la muestra en la botella?	SI																																						
	NO																																						
<i>Marque con circulo si lo necesita</i>																																							
Etiquetas	Guantes																																						
Formas de Campo	Marcador																																						
8.- Observaciones																																							