



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA**

**“DETECCIÓN DE METALES Y METALOIDES EN
AGUA DE LLUVIA EN EL DISTRITO MINERO DE
TAXCO, GUERRERO”**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**PRESENTA:
JESÚS EDUARDO VELÁZQUEZ OCAMPO**

**DIRECTOR:
DRA. ROCÍO GARCÍA MARTÍNEZ**
(Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM)

COMITÉ DE TITULACIÓN:
DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA *(Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM)*
DR. LUIS ANTONIO LADINO MORENO *(Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM)*
DR. ALEJANDRO H. RAMÍREZ GUZMÁN *(Escuela Superior de Ciencias de la Tierra, UAGro)*
DR. ENRIQUE GONZÁLEZ SOSA *(Facultad de Ingeniería, UAQ)*

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO GENERAL

1.1	Introducción.....	1
1.2	Antecedentes.....	3
1.3	Planteamiento del problema.....	4
1.4	Objetivos.....	5
1.4.1	Objetivo general	
1.4.2	Objetivos específicos	
1.5	Hipótesis	
1.6	Justificación	

CAPÍTULO 2 NUBES Y PROCESOS DE PRECIPITACIÓN

2.1	Nubes y procesos de precipitación.....	6
2.2	Núcleos de condensación.....	7
2.2.1	Clasificación de núcleos de condensación	
2.3	Formación de agua de lluvia.....	10
2.3.1	Proceso de colisión-coalescencia.....	11
2.3.2	Nucleación en fase hielo.....	13
2.4	Remoción de aerosoles en la atmósfera.....	14
2.5	Composición de las partículas.....	15
2.5.1	Compuestos de azufre.....	16
2.5.1.1	Azufre en la atmósfera.....	18
2.5.2	Compuestos de nitrógeno.....	19
2.5.2.1	Nitrógeno en la atmósfera.....	20
2.6	Propiedades fisicoquímicas del agua de lluvia.....	21
2.6.1	Acidez de la lluvia	
2.6.2	Iones inorgánicos.....	24

CAPÍTULO 3 METALES Y METALOIDES

3.1	Aspectos generales de los metales.....	25
3.1.1	Características fisicoquímicas de los metales	
3.1.2	Características fisicoquímicas de los metaloides.....	26
3.2	Clasificación de los metales.....	27
3.2.1	Basada en la tabla periódica	
3.2.2	Basada en su comportamiento ácido	
3.3	Fuentes de emisión.....	29
3.3.1	Naturales	
3.3.2	Antropogénicas.....	31
3.4	Toxicidad.....	32
3.5	Caracterización de los metales y metaloides en el agua de lluvia.....	34

CAPÍTULO 4 ÁREA DE ESTUDIO

4.1	Sitios de estudio.....	36
4.1.1	Iguala de la Independencia “IG”.....	
4.1.2	Taxco el Viejo “TV”.....	37
4.1.3	Taxco de Alarcón “TX”.....	
4.2	Marco geológico.....	40
4.2.1	Estratigrafía.....	
4.2.1.1	Secuencia Volcánico-Sedimentaria Taxco-Taxco el Viejo.....	42
4.2.1.2	Formación Morelos.....	
4.2.1.3	Formación Mexcala.....	
4.2.1.4	Grupo Balsas.....	43
4.2.1.5	Riolita Tilzapotla.....	
4.2.1.6	Cuerpos plutónicos y subvolcánicos.....	
4.2.1.7	Aluvión.....	44
4.2.2	Geología minera.....	
4.2.3	Jales mineros.....	45
4.2.3.1	Mineralogía.....	

CAPÍTULO 5 METOLOGÍA

5.1	Diseño de muestreo.....	47
5.2	Técnicas de muestreo: Instrumental.....	48
5.3	Preparación de muestras para el análisis químico.....	49
5.4	Método analítico.....	50
5.4.1	Cationes mayoritarios, metales, metaloides y no metales.....	
5.4.1.1	Análisis químico.....	51
5.4.2	Aniones.....	52
5.4.2.1	Análisis químico.....	
5.4.3	Validación y calidad de los datos.....	53
5.5	Modelo de retro trayectorias.....	54
5.5.1	Análisis de retro trayectorias.....	

CAPÍTULO 6 RESULTADOS

6.1	Prueba de Kruskal-Wallis.....	57
6.2	Aniones y cationes mayoritarios.....	58
6.3	Metales, metaloides y no metales.....	60
6.4	Coefficientes de correlación Rho Spearman.....	62
6.5	pH y conductividad.....	66
6.6	Análisis de componentes principales (ACP).....	
6.7	Factor de enriquecimiento.....	71
6.8	Comparación de CCPV de iones, metales, metaloides, metaloides y no metales en agua de lluvia entres los tres sitios de muestreo y otras localidades del mundo.....	75
6.9	Mapas de trayectorias de masas de aire.....	77
6.10	Rosas de viento.....	84

CAPÍTULO 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1	Análisis estadístico.....	86
6.2	Concentraciones de iones inorgánicos	
6.3	Concentraciones de metales, metaloides y no metales.....	87
6.4	Coeficientes de correlación.....	89
6.5	Parámetros fisicoquímicos: pH y CE.....	90
6.6	Componentes principales.....	91
6.7	Factor de enriquecimiento.....	92
6.8	Comparación entre otros sitios.....	93
6.9	Vientos de altura.....	94
6.10	Vientos de superficie.....	95
	CONCLUSIONES	96
	RECOMENDACIONES	98
	BIBLIOGRAFÍA	100
	ANEXOS	106

RESUMEN

El Distrito Minero de Taxco se ubica geográficamente en la zona norte del estado de Guerrero y geológicamente en el cinturón de depósitos epitermales polimetálicos relacionado a la actividad volcánico-estructural de la Sierra Madre del Sur, en el suroeste de México. El trabajo se realizó en Iguala de la Independencia, Taxco el Viejo y Taxco de Alarcón. Sus características geográficas, topográficas, geológicas, mineralógicas y su cercanía a depósitos de jales representaron las condiciones idóneas para la realización del estudio. Se colectó un total de 132 muestras de agua de lluvia durante el período 2017 (mayo-octubre). El método de muestreo se llevó a cabo por evento y en casos aislados por depósito total o *bulk precipitation* (uno a tres días) dependiendo de la frecuencia de la precipitación.

El objetivo general de este trabajo consistió en caracterizar la composición química del agua de lluvia de los tres sitios para conocer y entender si las posibles fuentes de influencia son los procesos de mineralización polimetálica y/o de presas de desechos mineros. Se determinó pH, conductividad eléctrica (CE), aniones (NO_3^- , SO_4^{2-}), cationes (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^+), metales (Al, Ba, Cu, Fe, Mn, Sr y Zn), metaloides (As y Si) y no metales (S). Los metales, metaloides y no metales se analizaron por Espectrofotometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES por sus siglas en inglés) y las especies iónicas se analizaron por Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC por sus siglas en inglés).

Se aplicaron técnicas estadísticas multivariadas y cálculos del factor de enriquecimiento (*FE*) utilizando como valor de referencia análisis químicos de rocas y suelos de la región. Los resultados muestran que no existen diferencias significativas entre las variables de Mg^+ , Na^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ba, Mn, Si, Sr, pH y CE para los tres sitios de interés, pudiendo indicar una posible misma fuente de aporte. Los *FE* calculados, mostraron que el As, Cu y Zn tienden a estar más enriquecidos en Taxco el Viejo y Taxco de Alarcón que en Iguala de la Independencia. Los *FE* altos, sugirieron que en general, los metales tienen un origen antropogénico ligado a los depósitos de jales adyacentes a los sitios de estudio.

Los 16 valores de concentración promedio ponderada por volumen (CPPV) en general, fueron mayores para S, que presentó las más altas concentraciones en los tres sitios de muestreo, seguido por Si, Al, Fe, Mn, Zn, Ba, As y Sr en Iguala de la Independencia, Al, Si, Zn, Fe, Mn, As, Ba y Sr en Taxco el Viejo, y Al, Zn, Si, Fe, Mn, As, Sr, Ba y Cu en Taxco de Alarcón. El ión Ca^{2+} presenta las concentraciones más altas en los tres sitios de interés, seguido por SO_4^{2-} , NO_3^- , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ . En general, la asociación de elementos encontrada es similar a las

paragénesis de las mineralizaciones polimetálicas del Distrito Minero de Taxco, así como a las concentraciones de rocas, suelos y jales determinadas en diferentes puntos del cuadrante de estudio. Se deduce que la erosión de los mismos y su posterior suspensión en el aire otorga una impronta particular a la química del agua de lluvia del área de estudio.

Se utilizó el modelo HYSPLIT, para el cálculo de trayectorias de retroceso a las 19 (UTC) 13:00 Hora Local, para los tres puntos de interés, con el propósito de determinar el probable origen de una parcela de aire en particular y poder tener una visión aproximada de la influencia de las emisiones a gran escala. Se seleccionaron muestras de diferentes fechas para trazar las retrotrayectorias, se tomaron en cuenta las concentraciones individuales de los iones SO_4^{2-} y NO_3^- como trazadores químicos de origen antropogénico, así como de las concentraciones individuales de azufre y pH para aquellas muestras de precipitación pluvial que presentaron altas y bajas concentraciones en estos elementos durante el período de lluvias 2017 en los tres sitios de muestreo. En los tres casos de estudio, los valores de CPPV para los aniones SO_4^{2-} y NO_3^- fueron mayores cuando las trayectorias de las masas de aire indicaban un posible origen en el Golfo de México (noroeste), infiriendo que las influencias de grandes urbes a la fracción soluble del agua de lluvia pueden estar modificando su composición química.

CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO GENERAL

1.1 Introducción

La lluvia cumple un papel importante en la limpieza de la atmósfera, ya que por medio de este proceso se remueven la mayor cantidad de contaminantes presentes en la misma (Doria-Argumedo, 2017). La composición química del agua pluvial varía de un lugar a otro y de una región a otra, debido a la influencia de fuentes locales, tanto naturales como antropogénicas (Loÿe-Pilot *et al.*, 1986; Al-Momami, 2003; Báez *et al.*, 2007).

Determinar la composición química del agua de lluvia es importante para entender la función del transporte de los componentes solubles de la atmósfera, comprender su contribución a las diferentes fuentes de contaminación atmosférica, y conocer el grado de deterioro ambiental de una región (Ramírez *et al.*, 2010; García *et al.*, 2006). Por consiguiente, la química del depósito atmosférico húmedo puede proporcionar ideas sobre el desarrollo temporal de la atmósfera y el grado de contaminación de la misma (Nriagu y Pacyna, 1988; García *et al.*, 2006). De igual modo, puede emplearse como indicador en la evaluación de los procesos naturales contra los influjos antropogénicos (Wetangula y Wamalwa, 2015). Los componentes disueltos en el agua de lluvia se dividen generalmente en tres grupos: aerosoles de sal marina, aerosoles terrestres (suelo, polvo y emisiones biológicas) y aerosoles antropogénicos (Moaref *et al.*, 2014). Este último grupo está estrechamente relacionado a procesos industriales, quema de combustibles fósiles, incineración de residuos, agricultura, fertilizantes, emisiones vehiculares, actividades mineras y otras prácticas humanas (Lantzy y Mackenzie, 1979; Nriagu y Pacyna, 1988; Nriagu, 1989; Monharaj y Azeet, 2004; Salvador, 2005).

El agua de lluvia funciona como un importante sumidero para la materia en forma de gases y partículas, las cuales incluyen metales y metaloides en la atmósfera. (Samara *et al.*, 1992). La presencia de estas especies genera gran preocupación debido a sus características tóxicas, carcinógenas; y a su permanencia y persistencia en el medio ambiente (Montero, 2014). En México, grandes cantidades de desechos se derivan de minas activas y minas abandonadas. De acuerdo con Csavina (2012), este desecho constituye la fuente potencial de contaminación atmosférica por metales más importante del mundo.

Los residuos sólidos producidos a partir del procesamiento de minerales dan como resultado residuos finos denominados jales, que se confinan a los embalses de los relaves. La estabilidad de estos embalses es limitada, y sus equilibrios estructurales y geoquímicos se

modifican constantemente por cambios hidrológicos (Ritcey, 1989). Los jales se ven alterados y transformados rutinariamente por procesos tales como la erosión, el lavado y la escorrentía, que dan como resultado la liberación y una mayor dispersión de los sólidos y líquidos que los constituyen (Arcega-Cabrera *et al.*, 2009).

El Distrito Minero de Taxco, se ubica al sur de la República Mexicana en la ciudad de Taxco de Alarcón, estado de Guerrero, México. Este sitio tiene una tradición minera que data desde la época colonial, tiempo durante el cual se generaron materiales de desecho que han ido constituyendo lo que actualmente denominamos depósitos de jales, mismos que con el paso de los años han sido circundados por asentamientos humanos (Talavera-Mendoza *et al.*, 2005).

En este sitio, existe una problemática de introducción de metales hacia cuerpos de agua, suelos de cultivo, aire y posiblemente hacia los seres humanos, debido en parte, a su cercanía a los depósitos jales, y a factores como la erosión y dispersión de los mismos (Armienta *et al.*, 2003; Talavera-Mendoza *et al.*, 2005), representando de esta manera, un riesgo potencial de daños a la salud humana y al medio ambiente.

Teniendo en cuenta que los metales y metaloides son considerados como uno de los contaminantes más importantes en la atmósfera (Csavina, 2012); que la minería, así como sus desechos son una de las fuentes que más contribuyen a su incorporación al ambiente, y que actualmente no existen aportes a la literatura de la química elemental del agua de lluvia en esta región del país, el presente estudio tiene como objetivo principal la determinación y caracterización de los componentes solubles presentes en el agua de lluvia para identificar las posibles fuentes que determinan su composición química, permitiendo así, conocer las fuentes locales de aporte a la atmósfera y a la hidrogeología local.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten vincular la composición química de las rocas que afloran en el lugar con la señal geoquímica detectada en el agua de lluvia colectada en el Distrito Minero de Taxco, estado de Guerrero, México.

1.2 Antecedentes

En la región minera de Taxco no existe ningún estudio relacionado con la determinación y caracterización de las concentraciones de metales, metaloides e iones inorgánicos en la fracción soluble del agua de lluvia. Sin embargo, existen diversos trabajos en torno a la problemática de los residuos mineros o jales de la zona, ya que en los últimos años ha aumentado el interés sobre el conocimiento del impacto ambiental que ejercen los mismos dentro del Distrito Minero de Taxco.

Entre las publicaciones sobre esta problemática pueden señalarse: Armienta *et al.*, (2003); Armienta *et al.*, (2004); Talavera-Mendoza *et al.*, (2005); Talavera-Mendoza *et al.*, (2006); Romero *et al.*, (2007); Talavera-Mendoza *et al.*, (2007); Romero *et al.*, (2008); Romero y Gutiérrez-Ruíz, (2010); Romero *et al.*, (2011); Corrales-Pérez y Romero, (2013); y Talavera-Mendoza *et al.*, (2016), quienes han realizado diversos estudios sobre las concentraciones totales y solubles de los elementos metálicos que se encuentran en los depósitos de jales “San Antonio”, “El Fraile”, “La Concha”, “El Solar”, “Guerrero I”, “Guerrero II”, “Los Jales” y zonas aledañas a la región.

Con relación a la mineralización del Distrito Minero de Taxco, los estudios más representativos son los reportados por Damon *et al.*, (1981); Camprurí *et al.*, (2003); Camprurí *et al.*, (2006); Camprurí y Albinson, (2007); Farfán Panamá y González-Partida, (2010); y Farfán-Panamá *et al.*, (2013).

Así mismo, se han efectuado trabajos referentes al impacto de esta actividad sobre los recursos hídricos (Arcega-Cabrera *et al.*, 2005; Armienta *et al.*, 2007; Arcega-Cabrera *et al.*, 2009; Méndez-Ramírez y Armienta, 2012; y Dótor *et al.*, 2014).

1.3 Planteamiento del problema

La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México, la cual contribuye al desarrollo económico del país a través del suministro de insumos a las industrias (Gaytán y Benita, 2014). Sin embargo, la explotación y beneficio de los metales han producido grandes cantidades de residuos que constituyen una fuente potencial de contaminación (Armienta *et al.*, 2003; Csavina, 2012).

Los diversos tipos de residuos producidos son fuentes potenciales de contaminación por metales y metaloides; así mismo, sus efectos tóxicos y su movilidad en el medio ambiente dependen de diversos factores físicoquímicos que varían según el sitio, el metal que se trate y la forma química y/o mineralógica en que se encuentre el residuo (Sánchez y Jara, 2017). Es por ello importante realizar estudios en lugares donde se haya desarrollado esta actividad (Armienta, 2000).

Los metales y metaloides representan una seria amenaza para los ecosistemas naturales porque pueden ser tóxicos a bajas concentraciones y bioacumularse, no son biodegradables y circulan por el ecosistema (Howard, 2008). La contaminación por metales y metaloides es producida por muchas actividades humanas, incluyendo la minería, práctica agrícola y disposición del suelo.

El estudio de elementos traza, en cuanto a su concentración, características químicas, físicas y sus probables mecanismos de incorporación a la lluvia, permite crear un marco de referencia para prevenir, controlar y reducir la contaminación atmosférica provocada por estos elementos que afectan directamente la salud del ser humano y el medio ambiente (García *et al.*, 2006).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Caracterización de la concentración total de metales, metaloides y no metales en la composición química del agua de lluvia en tres sitios pertenecientes a la zona norte del estado de Guerrero, México, durante la campaña de muestreo mayo-octubre (2017).

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar la composición total de metales (Al, Ba, Cu, Fe, Mn, Sr, Zn), metaloides (As, Si), no metales (S) e iones inorgánicos (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , NO_3^-) en la fracción soluble del agua de lluvia.
- Correlacionar la variación en la concentración en lluvia de elementos metálicos entre los tres sitios de estudio.
- Determinar los factores de enriquecimiento, para estimar el probable origen de los elementos determinados en cada uno de los sitios.

1.5 Hipótesis

Sí la composición química del agua de lluvia está determinada por sus características geológicas, geográficas y climáticas, entonces el aporte antropogénico de la región también contribuye alterando su composición.

1.6 Justificación

En la actualidad, se piensa, cada vez con mayor frecuencia, que el deterioro de los ecosistemas terrestres y acuáticos en zonas contaminadas se debe a una combinación de los altos niveles de contaminación en el aire y en la precipitación pluvial (Nriagu y Pacyna, 1988).

La importancia de estudiar la composición química elemental en la precipitación pluvial del Distrito Minero de Taxco, Guerrero, contribuirá a evaluar el grado de deterioro de los sitios considerados, correlacionar la química elemental de las rocas, suelos y jales de la región con los resultados obtenidos y explicar cómo es el transporte atmosférico de los metales, metaloides, no metales e iones inorgánicos en la zona. Además de que, con este trabajo, se asentarán las bases para la planeación de futuros proyectos de investigación.

CAPÍTULO 2 PRECIPITACIÓN PLUVIAL

2.1 Nubes y procesos de precipitación

Las nubes son las primeras expresiones visibles del vapor de agua sin que ocurra la precipitación, mismas que están constituidas por gotas de agua muy finas y cristales de hielo (diámetros inferiores a 0,1 mm) formadas por la condensación del vapor de agua (Strangeways, 2007). Las nubes forman parte del ciclo hidrológico al igual que la precipitación, estos procesos están representados por distintos cambios de fase, los cuales juegan un rol esencial en la microfísica de las nubes (Figura 2.1) (Rogers y Yau, 1996; Ahrens, 2009).

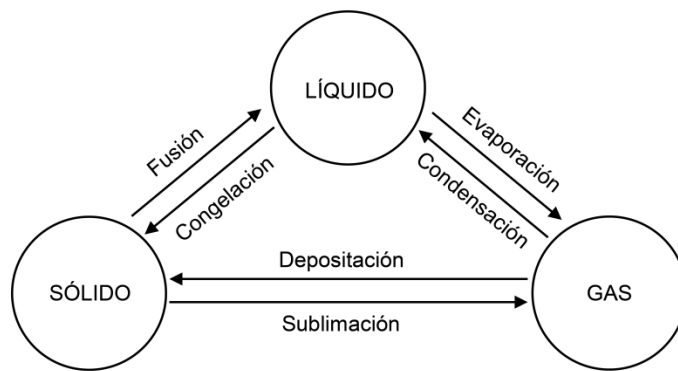


Figura 2.1 Cambios de fase del agua.

Estos cambios de fase tienen lugar en orden molecular creciente y son procesos que llevan a la formación de nubes. Hablando de orden creciente, estos cambios deben superar una fuerte barrera de energía libre. Las gotitas de agua tienen intensas fuerzas de tensión superficial, de modo que para que pueda aumentar de tamaño, por condensación, a partir de vapor, la tensión superficial tiene que ser contrarrestada por un fuerte gradiente de presión de vapor (Mason, 1972; Rogers y Yau, 1996).

En estas condiciones las gotitas de nube necesitan humedades relativas de varios cientos por cien para formarse. Así, el problema de la microfísica de nubes es explicar por qué se forman las gotas de nubes en la atmósfera incluso a humedades inferiores al 100%. La respuesta está basada en la existencia en la atmósfera de micropartículas que actúan como núcleos de condensación de nubes (Rogers y Yau, 1996; Ahrens, 2009; Lohmann *et al.*, 2016).

2.2 Núcleos de condensación

La atmósfera contiene importantes concentraciones de partículas (aerosoles), de tamaño micrométrico y submicrométrico, que tienen una gran afinidad por el agua (higroscópicos) y actúan de centros de condensación; tales partículas se denominan núcleos de condensación de nube (CCN por sus siglas en inglés) (Twomey, 1977; Albrecht, 1989; Rogers y Yau, 1996; Lohmann *et al.*, 2016).

Los cambios de fase del agua son de primordial importancia en la física de nubes. Una característica de los cambios de fase es que no ocurren de manera continua, sino que lo hacen mediante el proceso de nucleación (Mason, 1972). El proceso en virtud del cual las gotitas de agua se forman sobre los núcleos, a partir de la fase de vapor (saturación), se denomina *nucleación heterogénea*. (Mason, 1972; Rogers y Yau, 1996). La condensación de vapor en forma de gotitas en un medio puro, gracias a la existencia de una elevada sobresaturación (exceso de humedad relativa sobre el 100%), no es importante en la atmósfera y se denomina *homogénea* (Fletcher, 1962; Rogers y Yau, 1996).

En la atmósfera existen muchos tipos de CCN, los núcleos que alcanzan tamaños relativamente grandes son los que pueden dar lugar a gotas de nube. El aire húmedo al enfriarse por ascenso adiabático llega a alcanzar una humedad relativa cercana al 100%; en estas condiciones los núcleos más higroscópicos empiezan a actuar de CCN. Si el ascenso continúa, el enfriamiento produce sobresaturación y ésta se agota por condensación sobre los núcleos. En las nubes suelen existir núcleos suficientes para que la sobresaturación no sobrepase el 1%. Si la nube sigue su ascenso, su cima puede alcanzar temperaturas inferiores a los 0° C, las gotitas de agua subfundidas (enfriamiento de partículas líquidas sin congelarse) pueden o no congelar, dependiendo de la existencia de partículas de núcleos de hielo (INP por sus siglas en inglés) (Rogers y Yau, 1996).

2.1.1 Clasificación de núcleos de condensación

Los CCN, que constituyen parte de la población de aerosoles, se clasifican de acuerdo con su tamaño. Generalmente se identifican diferentes rangos de tamaños denominados “modas”, que están relacionados en su mayoría con el mecanismo de formación de las partículas. Los aerosoles atmosféricos se originan a partir de la condensación de gases y por la acción del viento en la superficie de la Tierra. De manera general se clasifican en: ultrafinos (moda de nucleación y Aitken), finos (moda de acumulación) y gruesos (moda grande y partículas gigantes) (Jacob, 1999; Seinfeld y Pandis, 2006; Lohmann *et al.*, 2016) (Figuras 2.2 y 2.3). Las partículas

finas de aerosol (<0.5 μm de radio) se originan casi exclusivamente de la condensación de gases precursores (por ejemplo H_2SO_4 y HNO_3); mientras que, las partículas gruesas (>0.5 μm) se originan por procesos mecánicos (erosión de suelos, emisión de sal marina y partículas biológicas) (Jacob, 1999; Lohmann *et al.*, 2016).

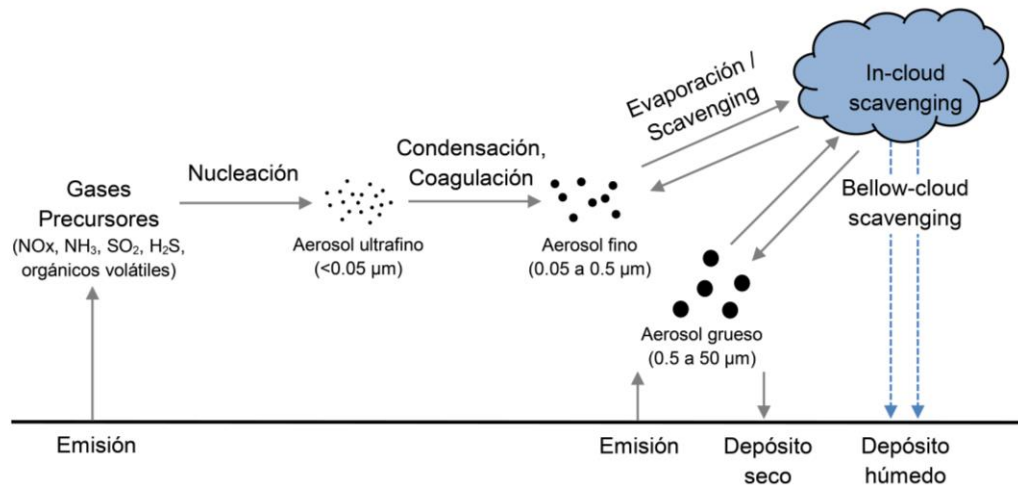


Figura 2.2 Esquema de los procesos de formación, crecimiento y eliminación del aerosol atmosférico (modificado de Jacob, 1999).

La nucleación (cambios de fase) de moléculas de gas es favorecida por descensos en la temperatura y/o incrementos en la humedad relativa (Kulmala *et al.*, 2001), produciendo aerosoles ultrafinos en el rango de tamaño de 5×10^{-4} -0.005 μm (*moda de nucleación*). Estos aerosoles ultrafinos crecen rápidamente hasta el rango de tamaño de aerosol fino de 0.005-0.05 μm (*moda de Aitken*) por condensación de gases y por coagulación (colisiones entre partículas durante sus movimientos aleatorios). El crecimiento más allá de 0.05 μm es mucho más lento porque las partículas son demasiado grandes para crecer rápidamente por la condensación de los gases, y porque el movimiento aleatorio más lento de las partículas grandes reduce la velocidad de coagulación (Jacob, 1999; Mészáros, 1999; Ahrens, 2009). Las partículas de aerosol que se originan a partir de la condensación de gases tienden a acumularse en el rango de tamaño de 0.05-0.5 μm , a menudo llamada *moda de acumulación* (en oposición al modo ultrafino o el modo grueso). Estas partículas son demasiado pequeñas para ser sedimentadas a una tasa significativa, y se eliminan de la atmósfera principalmente mediante la captación de gotas de nubes y la subsiguiente lluvia (o la captación directa de gotas de lluvia, *in-cloud scavenging*) (Jacob, 1999). Las partículas gruesas (>0.5 μm) emitidas por la acción del viento son eliminadas de manera similar por la lluvia (*moda grande y gigante*). Además, se sedimentan a una tasa

significativa, lo que proporciona otra vía para la eliminación (*depósito seco*, Lohmann *et al.*, 2016; Jacob, 1999). La velocidad de sedimentación de una partícula de 50 μm a nivel del mar es de 1.2 cm/s, en comparación con 0.014 cm/s para una partícula de 0.05 μm (Jacob, 1999).

Las distribuciones de los aerosoles por tamaños, lo mismo que las gotitas de nube, de lluvia o de partículas, en general, suele expresarse en términos de una función de distribución (Figura 2.3). La distribución de los aerosoles presenta un límite inferior, alrededor de 5×10^{-4} μm de radio, debido a que las partículas más pequeñas coagulan entre sí, o con otras de mayor tamaño, como resultado del movimiento browniano. Por otra parte, existe un límite superior, alrededor de 50 μm de radio, impuesto por el hecho de que las partículas mayores se depositan rápidamente bajo la influencia de la gravedad (Rogers y Yau, 1996; Mészáros, 1999; Lohmann *et al.*, 2016).

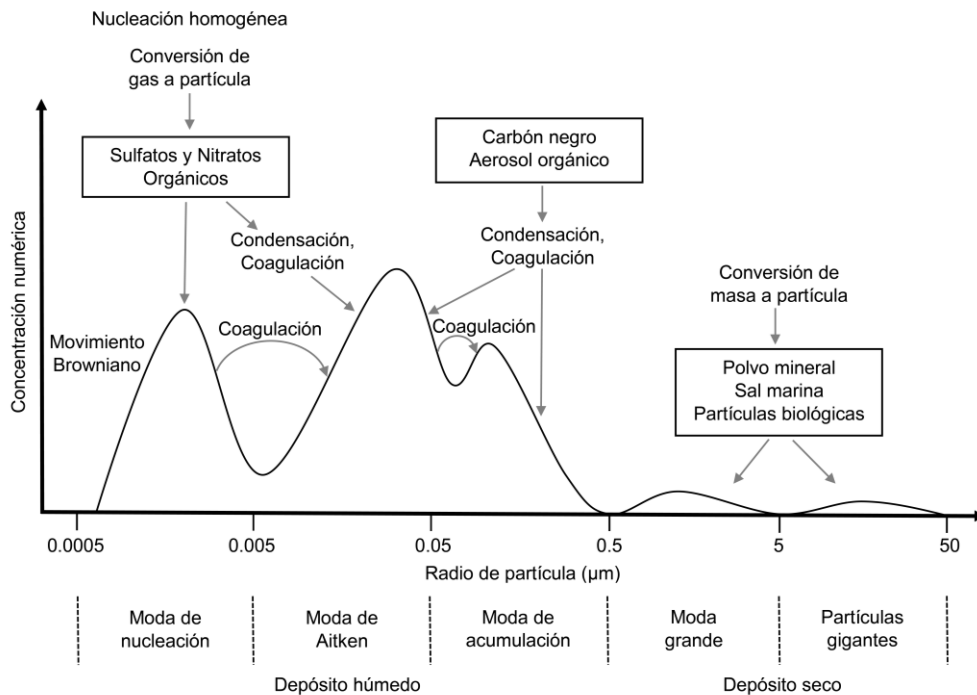


Figura 2.3 Esquema de los principales procesos del aerosol en función de su tamaño (modificado de Lohmann *et al.*, 2016).

El tiempo de residencia atmosférica posee una relación inversa con el tamaño de las partículas (para partículas de radio aproximadamente >0.05 μm). La vida media de las partículas de la moda de nucleación es muy reducida (horas), debido a su rápida transformación a la moda Aitken. El tiempo de residencia en suspensión de las partículas de la moda gruesa incrementa al disminuir el radio: varias horas para las partículas de radio >5 μm , y de 2-4 días para partículas

de 0.5 a 5 μm . Finalmente, las partículas en las modas de acumulación y en el límite superior de la moda Aitken presentan el mayor tiempo de residencia en la atmósfera (Mészáros, 1999).

Las partículas de aerosol grueso (moda grande y partículas gigantes) pueden actuar más fácilmente como CCN porque requieren valores de sobresaturación más pequeños para alcanzar el régimen inestable en el que teóricamente es posible un crecimiento condensado ilimitado (Lohmann *et al.*, 2016). Sin embargo, estas partículas de aerosol no se activan tan fácilmente como gotas de nube debido a que necesitan una gran cantidad de agua para condensarse sobre ellas, y su pequeña escala de residencia en la atmósfera resulta no ser relevante en la formación de nubes (Schwartz y Slingo, 1996). Es principalmente la moda de acumulación y algunas partículas de aerosol de moda Aitken que actúan como CCN y se activan para formar gotas de nubes (Rogers y Yau, 1996; Schwartz y Slingo, 1996; Pósfai y Molnár, 2000; Lohmann *et al.*, 2016).

El estado de la materia, es decir, si las partículas de aerosol son sólidas o líquidas, determinan su capacidad para actuar como CCN o como INP. Las partículas acuosas pueden activarse para convertirse en gotitas de nube en nubes cálidas, mientras que, las partículas de aerosol cristalino promueven la formación de cristales de hielo para la formación de hielo y nubes de fase mixta (Lohmann *et al.*, 2016).

2.3 Formación de agua de lluvia

Una nube es un agregado de pequeñísimas gotitas, en número aproximado de unas 100 por centímetro cúbico, cuyos radios son del orden de 5 μm . En general esta estructura es muy estable y las gotitas manifiestan muy poca tendencia a juntarse o a cambiar de tamaño. La precipitación se origina cuando el conglomerado se hace inestable y unas gotas crecen a expensas de las otras. Dos son los mecanismos que producen este efecto; la colisión (choque directo) y coalescencia (o reunión) de las gotitas de agua en nubes cálidas ($>0^{\circ}\text{C}$), y la interacción entre gotitas de agua y cristales de hielo (en nubes que superan el nivel de los 0°C) (Rogers y Yau, 1996). Es importante mencionar que solo una de cada diez nubes forma precipitación. Nueve de diez veces, la nube se evapora (Lohmann *et al.*, 2016).

Las gotitas de lluvia son estables siempre y cuando su tamaño supere cierto valor crítico ($>0.1\text{ mm}$); en promedio tales gotitas crecerán, mientras que las de tamaño inferior desaparecerán. El tamaño crítico viene determinado por el equilibrio entre dos tendencias opuestas: la de crecimiento y la de desaparición; tales tendencias, a su vez, dependen de que la gota se forme en espacio libre (*nucleación homogénea*) o en contacto con otro cuerpo (*nucleación heterogénea*) (Rogers y Yau, 1996).

Para que una pequeña gotita de disolución pueda crecer hasta convertirse en una gotita nubosa, es preciso que sean superados el radio y la razón de saturación críticos. Tanto antes como después de que una gota alcance su tamaño crítico, crece por difusión de moléculas de agua, procedentes el vapor, sobre su superficie (*crecimiento difusional o de condensación*) (Rogers y Yau, 1996; Lohmann *et al.*, 2016). Se requieren de procesos adicionales que involucren colisiones con otras gotas para que las gotas alcancen el tamaño de la precipitación, ya que la difusión de vapor de agua es demasiado lenta para producir gotas del tamaño de la precipitación en escalas de tiempo atmosférico (Lohmann *et al.*, 2016).

Para una discriminación entre las gotitas de nube y las de lluvia; estas últimas son las de tamaño suficientemente grande para alcanzar el suelo antes de evaporarse, mientras que las primeras son aquellas que, por su pequeño tamaño, se evaporan poco después de abandonar la nube (Rogers y Yau, 1996). Por convenio, la línea divisoria se traza en $r=0.1\text{mm}$; las de tamaño superior tienen una gran probabilidad de llegar al suelo y se denominan gotas de lluvia; a las gotas cuyo tamaño es muy próximo a 0.1 mm , se les denomina gotas de llovizna (Rogers y Yau, 1996; Lohmann *et al.*, 2016). La Figura 2.4 muestra los tamaños típicos para un CCN, una gota de nube, una gota de llovizna y una gota de lluvia, junto con sus concentraciones típicas. Esto muestra que para las sobresaturaciones típicas ($0.1\% - 1.6\%$) en la atmósfera, no todas las CCN se activan para convertirse en gotas de nubes, es decir, el número de gotas de nubes es menor que el número de CCN (Lohmann *et al.*, 2016).

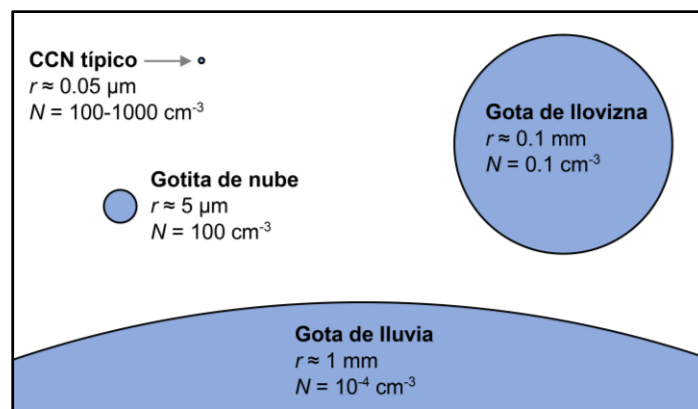


Figura 2.4 Comparativo de tamaños y concentraciones de las partículas involucradas en los procesos de nubes y precipitación (modificado de Lohmann *et al.*, 2016). r = radio y N = concentración.

2.3.1 Proceso de colisión-coalescencia

Este mecanismo consiste en un proceso dinámico de colisión y el subsiguiente crecimiento de partículas líquidas (coalescencia) (Figura 2.4). Este proceso acelera el crecimiento de las

gotitas de tal manera que se producen gotas con tamaño suficiente (>0.1 mm) para que ya no puedan estar suspendidas por las corrientes de aire y comiencen a caer a la superficie sin evaporarse (Lutgens y Tarbuck, 1992; Pruppacher y Klett, 1997; Rogers y Yau, 1996; Lohmann *et al.*, 2016).

Las colisiones pueden ocurrir por una respuesta distinta de las gotitas ante las fuerzas gravitatorias, eléctricas o aerodinámicas. En las nubes predominan los efectos gravitatorios, las gotas mayores caen más rápidamente que las pequeñas, y al alcanzarlas, capturan a una fracción de las gotitas que se encuentran en su camino, acrecentando su volumen. Cuando la gota cae, chocará tan sólo con una fracción de las gotas que encuentra en su trayectoria, ya que algunas serán barridas lateralmente por la corriente de aire existente alrededor de la gota (Rogers y Yau, 1996). La tasa a la cual las gotitas crecen en el interior de la nube depende de la eficiencia con la cual las gotitas chocan y de la eficiencia de coalescencia de aquellas gotitas que chocaron y permanecen unidas (Pruppacher, 1981). La eficiencia de colisión es un parámetro que depende fuertemente del tamaño de las gotitas, tanto colectora como la que se pretende coleccionar, y de sus velocidades relativas, entre otros factores como la densidad y viscosidad del aire. Las interacciones observadas pueden clasificarse en tres categorías (Montgomery, 1971; Rogers y Yau, 1996):

- 1) Las gotitas chocan, se deforman y se unen de forma permanente.
- 2) Las gotitas chocan y se separan inmediatamente, sin que pueda apreciarse una coalescencia momentánea.
- 3) Las gotitas chocan, permanecen unidas durante un momento y vuelven a separarse.

A partir del análisis de las fuerzas aerodinámicas involucradas se llega a la conclusión de que las gotitas muy pequeñas no pueden entrar en colisión; una pequeña gota que desciende dentro de una nube formada por gotitas aún menores, a lo largo de su trayectoria chocará tan sólo con una pequeña fracción de las gotas que se encuentran en su camino, siempre que su radio sea inferior a $10\ \mu\text{m}$ (Lohmann *et al.*, 2016). En consecuencia, es de esperar que las nubes que contengan un número muy pequeño de gotas mayores de $10\ \mu\text{m}$ (formadas a partir de partículas gigantes) serán relativamente estables, respecto a su posible crecimiento por coalescencia; en cambio las nubes con un contenido considerable de gotas de tamaño superior a las $10\ \mu\text{m}$, pueden dar lugar a la precipitación (Rogers y Yau, 1996; Lohmann *et al.*, 2016).

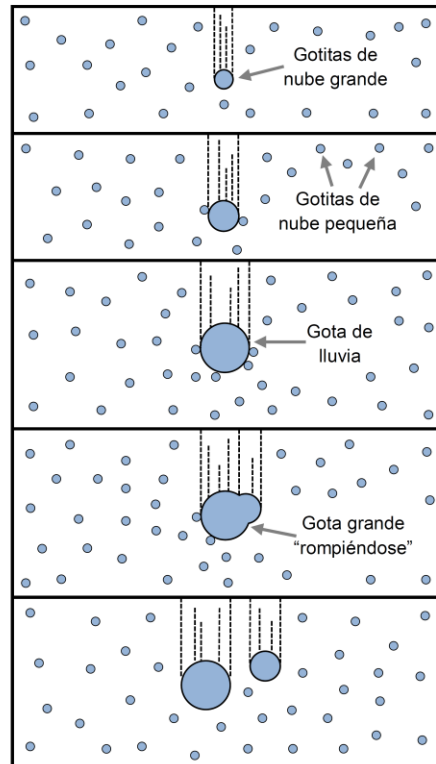


Figura 2.4 Mecanismo de Colisión-Coalescencia (modificado de Lutgens y Tarbuck, 1992).

2.3.2 Nucleación en fase hielo

La formación de lluvia en nubes cálidas no es suficiente para explicar la mayoría de las precipitaciones globales. A nivel mundial, el 50% de todos los eventos de precipitación de más de 1 mm implica la formación y el crecimiento de cristales de hielo en algún lugar de la nube (Field y Heymsfield, 2015). En los trópicos, la precipitación a través de la fase de hielo representa el 69% de la precipitación total (Lau y Wu, 2003). En las latitudes medias, la lluvia cálida es aún menos frecuente, especialmente en tierra. Aquí representa menos del 10% de la precipitación total (Mülmenstädt *et al.*, 2015).

Cuando una nube se extiende hasta alturas situadas por encima del nivel de los 0°C, existe la probabilidad de que se formen cristales de hielo. Dos transiciones de fase pueden conducir a la formación de hielo: el congelamiento de una gotita líquida o el paso directo del vapor, por sublimación, a la fase sólida. Ambos son procesos de nucleación, y en principio son posibles tanto la nucleación homogénea, como la heterogénea (Rogers y Yau, 1996).

Cuando existe un cristal de hielo, en presencia de un gran número de gotas de agua en subfusión, la situación es inmediatamente inestable; la presión de vapor en equilibrio sobre el

hielo es inferior a la correspondiente al agua, a la misma temperatura, y en consecuencia el cristal de hielo crece por difusión de vapor, al mismo tiempo que las gotas se evaporan para compensar la pérdida de vapor. La transferencia de vapor depende de la diferencia entre la presión de vapor en equilibrio sobre el hielo y agua, y es máxima para una temperatura de -15°C (Rogers y Yau, 1996). Para la congelación de agua pura la congelación homogénea no tiene lugar hasta que se alcanzan los -38°C (Rogers y Yau, 1996; Lohmann *et al.*, 2016).

La necesidad de INPs para iniciar el proceso de congelamiento mediante nucleación heterogénea es similar a la necesidad de CCN en el proceso de condensación (Rogers y Yau, 1996). Las partículas de INP son partículas de aerosol que proporcionan una superficie sobre la cual es probable que las moléculas de agua se adsorban, se unan y formen agregados con una estructura similar al hielo (Rogers y Yau, 1996; Lohmann *et al.*, 2016). En contraste con un CCN, sólo una pequeña fracción (una en 10^5 a 10^6) de todas las partículas de aerosol pueden servir como INP a temperaturas superiores a -38°C . En la atmósfera existen tres categorías de INP: de inmersión, de condensación y de contacto (Lohmann *et al.*, 2016). En el primero de ellos se requiere la existencia previa de gotas de nubes y, por lo tanto, humedades relativas cerca de la saturación del agua, al enfriar la nube o la gota de solución, se inicia la congelación. En el segundo caso, el enfriamiento comienza en condiciones subsaturadas, cuando se acerca la saturación del agua, se forman embriones de agua condensada sobre la superficie del INP pudiendo crecer hasta tamaños lo suficientemente grandes como para contener un germen de hielo. Por último, en el tercer caso, el enfriamiento depende de las colisiones de un INP con una gota de nube sobreenfriada, con congelación posterior (Lohmann *et al.*, 2016).

Una vez que el cristal de hielo ha crecido hasta alcanzar un tamaño apreciablemente superior al de las gotas de agua, empieza a descender y las colisiones resultan posibles. Cuando los choques tienen lugar preferentemente con otros cristales de hielo se originan los copos de nieve, pero si también se unen con gotas de agua se origina el granizo blando o nieve granulada. Una vez que las partículas en su caída se encuentran por debajo del nivel de los 0°C puede iniciarse su fusión y con ello emerger, por debajo de la base de la nube, en forma de gota de lluvia (Rogers y Yau, 1996).

2.4 Remoción de aerosoles en la atmósfera

La eliminación de aerosoles en la atmósfera es llamada depositación o barrido (scavenging). En términos generales, podemos distinguir entre dos categorías de barrido: depósito seco y depósito húmedo (Figura 2.2). El depósito seco, constituye la eliminación de aerosoles de la atmósfera por sedimentación debido a la gravedad y el posterior impacto en la

superficie terrestre (partículas de moda grande y gigantes; Figura 2.3). En contraste, la remoción de aerosoles por depositación húmeda, involucra la presencia de hidrometeoros.

El depósito húmedo, es el sumidero dominante de partículas de moda Aitken y de acumulación (Figura 2.3). Se divide en remoción por nucleación (*in-cloud scavenging*), que solo tiene lugar en la nube, y en remoción por impacto, que tiene lugar dentro y debajo de la nube (*below-cloud scavenging*) (Lohmann *et al.*, 2016). Ambos procesos son descritos a continuación:

- 1) ***In-cloud scavenging***: Proceso de incorporación y remoción de partículas como núcleos de condensación durante la formación de nubes (Hutchinson y Havas, 1978; IUPAC, 2014; Lohmann *et al.*, 2016). Este mecanismo es responsable de la remoción de entre el 75% y el 90% de la masa total de los aerosoles (Flossmann y Pruppacher, 1988).
- 2) ***Below-cloud scavenging***: Mecanismo de difusión y gravedad, mediante el cual el material atmosférico se incorpora por absorción por debajo de la nube a medida que la precipitación cae a través de ella (IUPAC, 2014; Lohmann *et al.*, 2016), determinando la concentración química del agua de lluvia (Hutchinson y Havas, 1978).

La precipitación tiene propiedades únicas debido al lavado o barrido atmosférico, el cual puede entenderse como la capacidad del agua de la nube y de lluvia para captar (*in-cloud scavenging*) y arrastrar la materia particulada de la atmósfera (*below-cloud scavenging*) (Figura 2.2); En otras palabras, es la suma del *in-cloud scavenging* más *below-cloud scavenging*. Es importante señalar que, en la mayoría de los procesos de remoción de partículas, probablemente se produzca una simultaneidad de ambos procesos (Flossmann y Pruppacher, 1988; Báez *et al.*, 2007).

2.5 Composición de las partículas

La composición química de las partículas atmosféricas es diversa. Entre los constituyentes de la materia particulada inorgánica encontrados en atmósferas contaminadas están las sales, los óxidos, los compuestos de nitrógeno, los compuestos de azufre, diferentes metales y los radionúclidos (Derwent, 1999; Reid *et al.*, 2002). En las áreas costeras, el sodio y el cloro entran en las partículas atmosféricas como cloruro de sodio del aerosol marino (Manahan, 2007).

Los principales elementos traza que existen típicamente a niveles superiores de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de materia particulada son aluminio (Al), calcio (Ca), carbono (C), hierro (Fe), magnesio (Mg), potasio (K), silicio (Si), sodio (Na) y titanio (Ti); debe notarse que la mayoría de estos elementos

tiende a originarse de fuentes terrestres (Lide, 2007; Manahan, 2007). Normalmente, se observan menores cantidades de cloro (Cl), cobre (Cu), cromo (Cr), manganeso (Mn), níquel (Ni), plomo (Pb), vanadio (V) y zinc (Zn); y aún más bajos niveles de antimonio (Sb), arsénico (As), azufre (S), bario (Ba), cadmio (Cd), estroncio (Sr), mercurio (Hg), molibdeno (Mo) y selenio (Se) (Lantzy y Mackenzie, 1979; Nriagu y Pacyna, 1988; Nriagu, 1989; Warneck, 2000).

La Figura 2.5 ilustra los factores básicos responsables de la composición de la materia inorgánica particulada. En general, las proporciones de los elementos en la materia particulada atmosférica reflejan las abundancias relativas en el material progenitor. La fuente de materia particulada se refleja en su composición elemental, teniendo en cuenta las reacciones químicas que pueden cambiar su composición (Manahan, 2007).

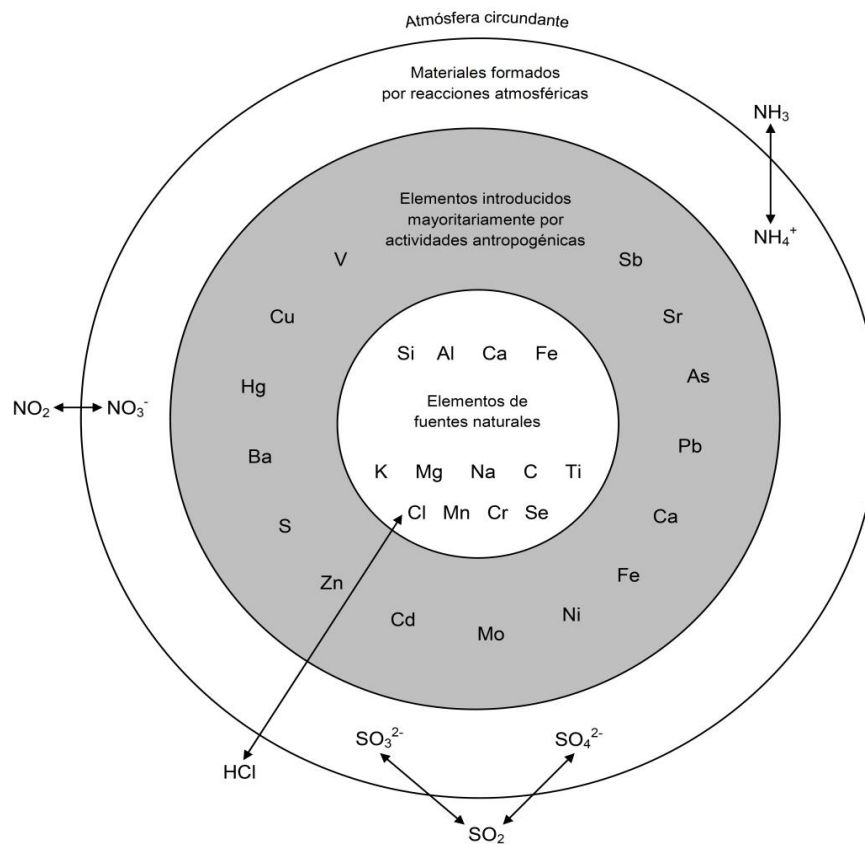


Figura 2.5 Componentes de las partículas inorgánicas y sus posibles orígenes (modificado de Manahan, 2007).

2.5.1 Compuestos de azufre

El azufre está presente en la corteza terrestre a una proporción de mezcla de 350 partes por millón en masa (Lide, 2007) y en la atmósfera a una proporción de mezcla de volumen total de

menos de 1 parte por millón (Sheehy *et al.*, 1968). El azufre, es el catorceavo elemento más abundante en la corteza terrestre, y juega un papel importante en las funciones químicas de la atmósfera y el clima terrestre. Los compuestos de azufre representan aproximadamente del 7 al 10% de las emisiones globales a nivel terrestre (IPCC, 1996).

El azufre existe naturalmente en varios estados de oxidación (Tabla 2.1), y su participación en reacciones de óxido-reducción tiene importantes consecuencias geoquímicas. El azufre (-I y -II) se encuentra en una gran gama de minerales, notablemente en sulfuros metálicos y metaloides (Jacobson *et al.*, 2000). Así mismo, el azufre se puede liberar biológica o volcánicamente como gases de ácido sulfhídrico (H₂S) o dióxido de azufre (SO₂).

Tabla 2.1 Especies moleculares naturales más importantes del azufre, divididas por estado de oxidación y reservorio (Charlson *et al.*, 2000).

Estado de Oxidación	Gas	Aerosol	Aguas	Suelos	Mineral	Biológico
-II	H ₂ S		H ₂		S ²⁻	
	RSR		HS ⁻	S ²⁻	ZnS	Metionina
	OCS		S ²⁻	HS ⁻	FeAsS	Cisteína
	CS ₂		RS ⁻	MS	CuFeS ₂	Cistina
					CuS ₂ , etc.	
-I	RSSR		RSSR	SS ²⁻	FeS ₂	
0	CH ₃ SCH ₃ ⁺			S ₈		
II			S ₂ O ₃ ²⁻			
IV	SO ₂	SO ₂ ·H ₂ O	SO ₂ ·H ₂ O	SO ₃ ²⁻		
		HSO ₃ ⁻	HSO ₃ ⁻			
			SO ₃ ²⁻			
			HCHO·SO ₂			
VI	SO ₃	H ₂ SO ₄			BaSO ₄	
		HSO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻		CaSO ₄	
		SO ₄ ²⁻	HSO ₄ ⁻	CaSO ₄	CaSO ₄	
		(NH ₄) ₂ SO ₄	SO ₄ ²⁻	ROSO ₃	CaSO ₄ ·H ₂ O	
		Na ₂ SO ₄	CH ₃ SO ₃		MgSO ₄	
	CH ₃ SO ₃ H					

Existen tres principales depósitos de azufre en la superficie de la Tierra: como S (-II) en las lutitas sedimentarias y minerales sulfurados, como S (VI) en depósitos sedimentarios evaporíticos, y como S (VI) en agua de mar (Bates *et al.*, 1992). La forma más oxidada de azufre, S (VI) es predominantemente sulfato (SO₄²⁻). Las partículas de sulfato que varían en composición desde ácido sulfúrico puro (H₂SO₄) a sulfato de amonio completamente neutralizado [(NH₄)₂SO₄] son componentes ubicuos de la atmósfera. En el océano, el sulfato existe como un ion libre. En

rocas sedimentarias, el sulfato se encuentra en minerales evaporíticos (es decir, yeso $[\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ y anhidrita $[\text{CaSO}_4]$). Por el contrario, el estado intermedio de oxidación, S (IV) tiene solo una existencia transitoria en la atmósfera y en algunas emisiones volcánicas e industriales a la atmósfera (por ejemplo, el dióxido de azufre (SO_2), producto de la refinación de ciertos metales que son sulfuros (Dickson, 2003). El SO_2 gaseoso es soluble en agua, lo que conduce a la presencia de iones HSO_3^- y SO_3^{2-} que son inestables en condiciones aeróbicas, produciendo SO_4^{2-} como producto final estable. La oxidación de SO_2 a sulfato ocurre también en una fase gaseosa debido a la presencia del agente oxidante fuerte, OH (Charlson *et al.*, 2000).

En su estado completamente oxidado, el azufre existe como SO_4^{2-} , el segundo anión más abundante en los ríos (después del bicarbonato) y en las aguas del mar (después del cloruro $[\text{Cl}^-]$), y representa la causa principal de acidez en el agua de lluvia (Jorgensen, 1990). Este vínculo con la acidez hace que el azufre sea un actor clave en la meteorización natural de las rocas y en problemas ambientales como la *lluvia ácida*. El sulfato en la atmósfera ha sido identificado como el componente dominante de los núcleos de condensación de nubes tanto en entornos remotos como contaminados (Bigg *et al.*, 1984). Por lo tanto, tiene importantes interacciones con las nubes y con el ciclo hidrológico (IPCC, 2001). El azufre elemental, se forma mediante procesos biológicos o inorgánicos.

2.5.1.1 Azufre en la atmósfera

Los principales compuestos de azufre en la atmósfera son el ácido sulfhídrico (H_2S), dimetilsulfuro (CH_3SCH_3 o DMS), sulfuro de carbono (CS_2), sulfuro de carbonilo (OCS) y dióxido de azufre (SO_2) (Seinfeld y Pandis, 2006; Adams *et al.*, 1981).

La mayoría de las transformaciones químicas implican la oxidación del azufre. Se cree que los agentes oxidantes clave son el radical OH, para la fase gaseosa; y H_2O_2 , O_3 y OH en la fase acuosa (Charlson *et al.*, 2000). La vía más importante de azufre a través de la atmósfera implica su inyección como un gas de estado de oxidación baja (SO_2); y su posterior eliminación como iones sulfato (SO_4^{2-}) y/o ácido sulfúrico (H_2SO_4), depositados mediante la precipitación pluvial (depósito húmedo) o en forma de partículas por sedimentación gravitacional (depósito seco).

Los gases de origen natural precursores de los sulfatos son esencialmente emitidos a través de emisiones biogénicas (sulfuros, quema de biomasa) y durante las emisiones volcánicas (Andreae, 1985). Sobre la superficie de los mares y océanos es posible encontrar una amplia variedad de compuestos orgánicos y microorganismos que emiten gases sulfurados, entre los cuales se encuentran el dimetilsulfuro (DMS) y el sulfuro de carbonilo (OCS) (Sieburth, 1982). El

DMS emitido es considerado uno de los principales precursores de los sulfatos atmosféricos en regiones remotas de los océanos, ya que se oxida a SO_2 a través de diferentes reacciones para formar finalmente SO_4^{2-} (Harrison y Grieken, 1998).

Dado que la vía de conversión del azufre en la atmósfera implica un cambio en su estado de oxidación y en su fase física, la vida útil del azufre en la atmósfera se rige por la cinética de las reacciones de oxidación y la frecuencia de las nubes y la lluvia (Charlson *et al.*, 2000). Su vida media en la atmósfera es corta, del orden de 1.5 días para sulfatos y de 5.6 días para sulfuros (Andreae, 1985), lo que significa que el ciclo atmosférico del azufre es un fenómeno regional y que la distribución de casi todas las especies de azufre en la atmósfera tiene un comportamiento irregular en todas las regiones del planeta (Charlson *et al.*, 2000).

2.5.2 Compuestos de nitrógeno

El nitrógeno está presente en la corteza terrestre a una proporción de mezcla de menos de 0.5 partes por millón en masa (Lide, 2007) y en la atmósfera a una proporción de mezcla de volumen total de menos de 800,000 ppm (Sheehy, 1968). La Tabla 2.2, enumera los compuestos de nitrógeno más comunes que existen en nuestro planeta, por estado de oxidación.

Los principales gases emitidos por fuentes naturales y antropogénicas son el monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2), óxido nitroso (N_2O) y amoníaco (NH_3), cuya oxidación en la atmósfera tiene como resultado más frecuente la formación de ácido nítrico (HNO_3), amonio (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-) (Warneck, 1988).

Los principales compuestos nitrogenados que contaminan la atmósfera son el NO y el NO_2 , que juntos conforman la denominación NO_x . Dichos óxidos son derivados de procesos de combustión y por tormentas eléctricas (Jaffe, 2000). Los compuestos de nitrógeno en la atmósfera, principalmente nitratos, al igual que los sulfatos, son de origen mayoritariamente secundario, y provienen de precursores gaseosos naturales y antropogénicos. Estos compuestos representan aproximadamente del 2 al 5% de las emisiones globales a nivel terrestre (IPCC, 1996).

Las actividades humanas resultan en la fijación diaria de grandes cantidades de nitrógeno. Esto ocurre como resultado de tres procesos: 1) producción directa de NH_3 y HNO_3 (principalmente por fertilizantes); 2) emisión de NO durante la combustión (combustibles fósiles y biomasa); y 3) fijación biológica de nitrógeno como resultado de prácticas agrícolas (Jaffe, 2000).

Los compuestos nitrados de origen natural se suelen originar a partir de las emisiones de los suelos (nitrificación, N_2O), los incendios forestales (NO_2 , NO), y las emisiones biogénicas

(NH₃). Los minerales nitrogenados son relativamente escasos, debido a que la molécula de nitrógeno es muy inerte (Seinfeld y Pandis, 2006).

Tabla 2.2 Especies moleculares naturales más importantes del nitrógeno, divididas por estado de oxidación y reservorio (Jaffe, 2000).

Estado de Oxidación	Gas	Aerosol	Aguas
-III	NH ₃ CH ₃ NH ₂	NH ₄ Cl	NH ₄ ⁺
0	N ₂		
I	N ₂ O		
II	NO		
III	HNO ₂		HNO ₂
IV	NO ₂ N ₂ O ₄		
VI	N ₂ O ₅ HNO ₃	Ca(NO ₃) ₂	HNO ₃

2.5.2.1 Nitrógeno en la atmósfera

La química atmosférica del nitrógeno es bastante compleja e implica literalmente cientos o miles de reacciones químicas. Aunque los flujos son mucho más pequeños que los flujos biológicos, estos procesos son importantes por una variedad de razones, incluidos los impactos sobre el clima, el ozono estratosférico y el smog fotoquímico (Atkinson, 1999). Las especies de trazas que contienen nitrógeno de manera significativa en la atmósfera son el N₂O, NO, NO₂, HNO₃ y NH₃.

La fotoquímica juega un papel importante en la química atmosférica del nitrógeno al producir especies reactivas (como el radical OH). Estos radicales son los principales responsables de todas las oxidaciones atmosféricas (Logan *et al.*, 1981). En la mayoría de los casos, la reacción directa de N₂ con el oxígeno molecular (O₂) es lenta en condiciones ambientales. La presencia de numerosas especies de electrones impares (por ejemplo, radicales OH, HO₂ y RO₂) producto de la fotoquímica atmosférica, son responsables de la mayoría de las reacciones oxidantes de las especies de nitrógeno en la atmósfera (Crutzen y Gidel, 1983; Crutzen 1988).

La fuente principal de óxidos de nitrógeno a la atmósfera es resultado de la reacción entre el N₂ y el O₂ empleado en procesos de combustión a altas temperaturas (Ecuación 2.1). El NO

es oxidado rápidamente en la atmósfera a NO_2 , principalmente en presencia de iones hidroperoxil (HO_2) (Ecuación 2.2) (Arellano *et al.*, 1990).



Esta última reacción no solo regenera el radical hidroxilo a partir del HO_2 , sino que, en presencia de luz solar (398 nm), el NO_2 se disocia en NO y O (Ecuación 2.3), donde el oxígeno reacciona con el oxígeno molecular para generar ozono troposférico (O_3) (Ecuación 2.4).



La reacción de los óxidos de nitrógeno con radicales HO_x (OH y HO_2) permite la generación de HNO_3 (Ecuación 2.5), ácido peroxinitrico (HO_2NO_2) (Ecuación 2.6), y ácido nitroso (HONO) (Ecuación 2.7). El ácido nítrico formado es altamente soluble y se elimina fácilmente con la lluvia (Spicer *et al.*, 1993).



La reacción entre el NO y NO_2 con el radical orgánico peroxilo (RO_2), permite la formación de nitratos orgánicos (Ecuaciones 2.8 y 2.9) (Cantrell *et al.*, 1996).



En la atmósfera, la precipitación es el medio más importante para eliminar NH_4^+ y NO_3^- . Estas especies son muy solubles en agua de lluvia o en gotas de nube, representando así, una fuente importante de aerosoles atmosféricos. Para el amoniaco y el amonio, las fases condensadas (líquida y sólida) representan aproximadamente dos tercios de la carga atmosférica total, mientras que, para el ácido nítrico y los nitratos, aproximadamente dos tercios se encuentran en fase gaseosa (Söderlund y Svensson, 1976).

La pérdida de compuestos de nitrógeno de los suelos es también una vía principal hacia la atmósfera para algunos compuestos (por ejemplo, N₂O, NO y NH₃). En los sistemas acuáticos, los parámetros que juegan un papel importante en este proceso incluyen: la naturaleza del compuesto, temperatura del suelo, contenido de agua, pH, aireación del suelo, y un gradiente de concentración del gas en cuestión (Jaffe, 2000).

2.6 Propiedades fisicoquímicas del agua de lluvia

La química del agua presente en la atmósfera es el resultado de una compleja interacción entre la dinámica de las nubes y los procesos microfísicos, así como a una serie de reacciones químicas atmosféricas que ocurren en el interior y por debajo de las nubes (Herrera-Murrillo y Rodríguez-Román, 2009). La lluvia juega un papel importante en la remoción de componentes solubles de la atmósfera, por lo que su composición ayuda a entender la contribución de los contaminantes emitidos por fuentes naturales y antropogénicas (Rahn, 1976).

La composición química del agua de lluvia depende de los compuestos que la conforman, como los aniones: ion sulfato (SO₄²⁻), ion cloruro (Cl⁻), y ion nitrato (NO₃⁻); y los cationes, ion sodio (Na⁺), ion potasio (K⁺), ion magnesio (Mg²⁺), ion calcio (Ca²⁺) y amonio (NH₄⁺) (Warneck, 1988).

2.6.1 Acidez de la lluvia

El término pH se refiere al potencial de iones de hidrógeno (H⁺) contenidos en una solución. Esta concentración se indica en una escala de 0 a 14, que determina el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia, menos de 7 es ácido, más de 7 alcalino, y 7 es neutro (Myers, 2010).

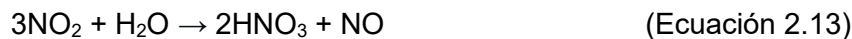
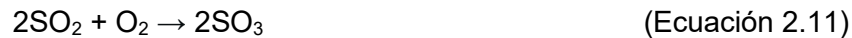
En regiones con aire limpio el agua pluvial alcanza valores de pH de 5.6 unidades (Galloway *et al.*, 1984; Löye-Pilot *et al.*, 1986; Lee *et al.*, 2000; Marquardt *et al.*, 2001; García, 2006; Herrera-Murrillo y Rodríguez-Román, 2009), es decir, ligeramente ácida. Este fenómeno se debe a la formación de ácido carbónico (Ecuación 2.10) en el ambiente, un compuesto que resulta de la reacción del dióxido de carbono con la humedad (H₂O). En estas condiciones, la acidez del agua de lluvia se considera natural, e incluso se considera indispensable para la conservación del equilibrio ecológico (Galloway *et al.*, 1982).



El fenómeno de la lluvia ácida (depósito húmedo), se presenta cuando el dióxido de azufre (SO₂) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) reaccionan con la humedad de la atmósfera y propician la

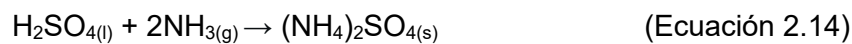
formación del ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3), respectivamente (Hidy, 1994). Estos ácidos fuertes que dan el carácter ácido a la lluvia se miden en las muestras de agua recolectadas en forma de iones sulfato (SO_4^{2-}) y nitratos (NO_3^-), respectivamente (Galloway *et al.*, 1996). Sin embargo, se ha encontrado que el ión SO_4^{2-} contribuye en mayor proporción a la acidez en comparación con el ión NO_3^- , lo cual está de acuerdo con los patrones regionales de formación de H_2SO_4 y HNO_3 , con las velocidades relativas de su oxidación en la atmósfera a productos secundarios, y con las eficiencias de remoción atmosférica de compuestos de nitrógeno y azufre por precipitación (Galloway *et al.*, 1982; Jacobson, 2002).

De manera natural, el dióxido de carbono al disolverse en el agua de la atmósfera produce una solución ligeramente ácida que disuelve con facilidad algunos minerales (García, 2016). Sin embargo, esta acidez natural de la lluvia es muy baja en relación con la que le imparten actualmente los ácidos fuertes como el sulfúrico y el nítrico, sobre todo a la lluvia que se origina cerca de zonas industrializadas (Hidy, 1994). Se cree que estos ácidos se forman a partir de contaminantes primarios como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno por las siguientes reacciones:

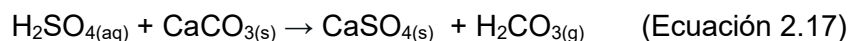
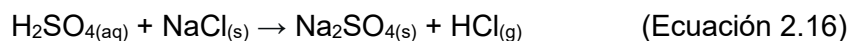


La oxidación adicional de los óxidos de azufre (Ecuación 2.11) y de nitrógeno (Ecuación 2.1), puede ser catalizada por los contaminantes atmosféricos, incluyendo los aerosoles y la luz solar (Hidy, 1994). Una vez formados los óxidos SO_3 y NO_2 , reaccionan con facilidad con la humedad atmosférica para formar ácido sulfúrico (H_2SO_4) (Ecuación 2.12) y ácido nítrico (HNO_3) (Ecuación 2.13), respectivamente. Estos permanecen disociados en la atmósfera, Impartiéndole características ácidas, mismos que, eventualmente precipitarán como lluvia, la cual, por lo tanto, tendrá mayor acidez en áreas que reciben continuamente dichos óxidos.

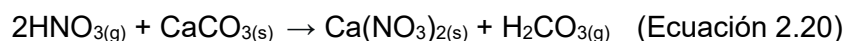
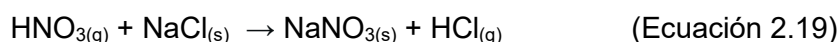
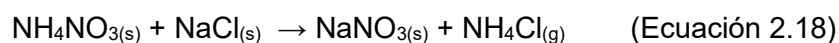
En condiciones normales, el H_2SO_4 y HNO_3 reacciona con el amoníaco (NH_3) presente en la atmósfera (originado a partir de fuentes naturales y antropogénicas), para dar lugar a la formación de sulfato de amonio (Ecuación 2.14) y nitrato de amonio particulado (Ecuación 2.15) (Junge, 1963; EPA, 1996).



En ambientes con concentraciones elevadas de sodio y/o calcio es posible obtener la neutralización de sulfatos según las siguientes reacciones, apoyando la formación de sulfato de sodio (Ecuación 2.16) y de calcio particulado en suspensión (Ecuación 2.17) (Querol *et al.*, 1996 y 1998):



Para el caso de los nitratos, en medios ácidos y en ambientes con elevadas concentraciones de sodio y calcio es posible registrar la presencia de nitrato de sodio (Ecuaciones 2.18 y 2.19) y de calcio particulado (Ecuación 2.20) de origen secundario, formados a partir de las siguientes reacciones (Harrison y Pio, 1983; Wakamatsu *et al.*, 1996):



En general, los episodios de lluvia ácida corresponden a situaciones de transporte con altas concentraciones de sulfatos, nitratos y amoníaco. En cambio, las lluvias alcalinas se relacionan a fenómenos de transporte en los que se incorpora en disolución una cantidad importante de polvo calcáreo en la lluvia (Ávila *et al.*, 1999). Debido a su alta solubilidad y reactividad, la lluvia ácida favorece la incorporación de metales a la misma (Galloway, 1996; Jacobson, 2002).

2.6.2 Iones inorgánicos

Las concentraciones de los iones contenidos en el agua pluvial varían según el lugar de formación; por ejemplo, las concentraciones de Na^+ y Cl^- son mayores en costas y océanos en la fracción de iones totales. El aumento de K^+ y Ca^{2+} son producto de los núcleos de condensación de tipo continental (Woodcock, 1972; Alfaro *et al.*, 1998). Una fracción importante de K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} en agua de lluvia, son producto de aerosoles atmosféricos derivados del mineral del suelo transportados por acción del viento (Alfaro *et al.*, 1998). Los nitratos y amonio entran en el agua de nube como contribuyentes de núcleos de condensación como barrido gas-líquido de HNO_3 y NH_4^+ . La precipitación continental tiene mayor cantidad de nitrato y amonio que la precipitación en regiones marinas (Warneck, 1988).

CAPÍTULO 3 METALES Y METALOIDES

3.1 Aspectos generales de los metales

Los metales son componentes del entorno y varían en concentraciones en todas las regiones geográficas, presentando diversas mezclas y compuestos. La química atmosférica y ambiental influye en su destino, así como en los efectos sobre los receptores humanos y ecológicos (Duffus, 2002). La toxicocinética y la toxicodinámica dependen de la naturaleza del elemento, la forma en que forma compuestos, su concentración, el grado de exposición, y la capacidad del organismo para regular y/o almacenarlo. La medición de iones metálicos brinda herramientas para evaluar el impacto del hombre sobre los ecosistemas mundiales (Alloway y Jackson, 1991).

3.1.1 Características fisicoquímicas de los metales

Los metales se caracterizan por ser compuestos inorgánicos no biodegradables con alta habilidad para conducir calor y electricidad. Factores como su peso atómico, sus propiedades químicas y toxicidad, son importantes en su clasificación. Sin embargo, un factor generalmente determinante es la densidad del elemento (Järup, 2003, Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Clasificación de elementos metálicos en base a su densidad específica (Järup, 2003).

Clasificación	Densidad (g/cm ³)
Ultraligeros	< 2
Ligeros	2 a 4.5
Pesados	> 5

Los metales están agrupados a la izquierda y centro de la tabla periódica de los elementos en base a sus electrones de valencia (1 a 3 electrones), siendo sus átomos poco electronegativos con una baja energía de ionización, por lo que es más fácil que los metales cedan electrones y más difícil que los ganen (Figura 3.1). Los metales tienen ciertas propiedades físicas: forman enlaces iónicos, pueden ser opacos o brillantes, tienen alta densidad, son dúctiles y maleables, poseen un punto de fusión alto, y son duros (Phipps, 1981; Duffus, 2002).

La mayoría de los metales forman la porción catiónica de las sales que contienen aniones portadores de oxígeno, tales como NO_3^- y SO_4^{2-} , formando al menos un óxido con características básicas moderadamente fuertes. Esta última, no es una norma general, debido a la solubilidad limitada de algunos óxidos e hidróxidos (Manahan, 2007).

La solubilidad de los iones metálicos aumenta por la presencia de agentes quelantes o secuestradores. La molécula quelante forma un anillo, en el que el ión metálico se sostiene por su fuerza de atracción entre átomos, de modo que el ión no se separa para formar una sal insoluble. La fuerza de atracción de la molécula está formada por átomos, que generalmente son átomos de nitrógeno, oxígeno y azufre, cada uno de los cuales dona dos electrones para formar un enlace coordinado con el ión (Tucker, 1991). La quelatación permite que el ión metálico central se pueda unir a más de un sitio, dando como resultado compuestos con propiedades químicas diferentes a las del metal original (Facchinelli, 2010).

1																	18	
H	2											13	14	15	16	17	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	#	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	110									
* Lantánidos		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
# Actínidos		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

Figura 3.1 Tabla periódica de los elementos separada en: metales, no metales y metaloides (Vernon, 2013).

3.1.2 Características fisicoquímicas de los metaloides

Los semimetales, también conocidos como metaloides, tienen el aspecto físico y las propiedades de un metal, pero se comportan químicamente como un no metal. Se caracterizan por presentar un comportamiento intermedio entre los metales y los no metales (Vernon, 2013). Pueden ser tanto brillantes como opacos y su forma puede cambiar fácilmente. Generalmente,

los metaloides son mejores conductores de calor y de electricidad que los no metales, pero no tanto como los metales. (Duffus, 2002).

No hay una forma unívoca de distinguir los metaloides de los metales verdaderos, pero generalmente se diferencian en que los metaloides son semiconductores antes que conductores. Son considerados metaloides los siguientes elementos: boro (B), silicio, germanio (Ge), arsénico, antimonio, telurio (Te) y polonio (Po). Son elementos que poseen, generalmente, cuatro electrones en su última órbita (Figura 3.1).

3.2 Clasificación de los metales

3.2.1 Basada en la tabla periódica

Usando la tabla periódica de los elementos, uno puede dividir los elementos metálicos en cuatro categorías amplias: bloque-s, bloque-p, bloque-d (transición) y bloque-f (lantánidos y actínidos) (Figura 3.2). Las propiedades de cada categoría se especifican en la Tabla 3.2 (Phipps, 1981).

Tabla 3.2 Clasificación de los elementos dependiendo del último orbital de su configuración electrónica (Phipps, 1981).

Grupo	Propiedades
Bloque-s	Los iones de metal alcalino son altamente móviles, normalmente forman complejos débiles. Las tierras alcalinas forman complejos más estables.
Bloque-p	Química redox limitada. Por lo general forman complejos más estables que el bloque-s. Los elementos de mayor número atómico tienden a unirse fuertemente al azufre; esta es una de las principales causas de su toxicidad (Clase B).
Bloque-d	Muestran una gama extremadamente amplia de comportamiento redox y formación compleja.
Bloque-f	Los elementos lantánidos y actínidos muestran una gama extremadamente amplia de comportamiento redox y formación compleja.

3.2.2 Basada en su comportamiento ácido

De acuerdo con Lewis (1923), la interacción de los elementos metálicos con los sistemas vivos está dominada por las propiedades de los iones metálicos como ácidos. De esta forma, la

clasificación práctica de metales debe incluir la evaluación del comportamiento de los iones metálicos como aceptores de electrones, ya que esto determina las posibilidades de formación de complejos (Ahrland, 1958). Basándose en lo anterior, Duffus (2002), clasifica a los iones metálicos en tres categorías: Clase A, Clase B y Frontera (Figura 3.2).

Bloque-s		Bloque-d										Bloque-p					
1																	18
H	2																He
Li	Be																Ne
Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12						Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe(III) Fe(II)	Co	Ni	Cu(II) Cu(I)	Zn						Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd						Xe
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl					Rn
Fr	Ra	#	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	110								
Bloque-f																	
* Lantánidos		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
# Actínidos		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Figura 3.2 Clasificación de la Tabla Periódica de los Elementos según: a) el orbital que están ocupando los electrones más externos (Bloque s, d, p, f); b) su dureza (Clase A, B y Frontera) (Duffus, 2002).

Los metales de Clase A o no polarizables, son altamente móviles, y preferentemente forman enlaces iónicos con ligandos duros donadores de oxígeno. Los iones de metal Clase B, muestran gran afinidad a ligandos blandos polarizables como donantes de sulfuro o azufre, forman enlaces covalentes, son inmóviles en el medio ambiente y tienden a acumularse en los organismos representando riesgos tóxicos. Los iones metálicos de Frontera son mucho más difíciles de evaluar, generalmente forman complejos relativamente estables con ligandos donantes tanto duros como blandos, pero el orden de estabilidad no se determina fácilmente (Pearson, 1968; Duffus, 2002).

Debe reconocerse que esta clasificación se refiere en cada caso a un ión específico, de modo que en los casos donde el metal puede existir en más de un estado de oxidación, cada

forma iónica debe tratarse por separado (por ejemplo, Cu, Fe y Pb). En tales casos, el ión con las cargas más altas, que es por lo tanto más pequeño y menos polarizable, normalmente tiene un considerable carácter de clase A (o al menos, falta de propiedades de clase B), mientras que en el estado de oxidación inferior ocurre lo contrario.

Debe notarse que esta clasificación es empírica, basada en el comportamiento químico observado. Sin embargo, una base teórica sugerida por Klopman (1974), basándose en la electronegatividad orbital calculada para cationes o aniones, concluyó que, los metales con electronegatividades orbitales calculadas por encima de 1.45 pertenecen a la Clase A, mientras que aquellos con electronegatividades orbitales calculadas por debajo de -1.88 corresponden a la Clase B.

3.3 Fuentes de emisión

Los metales y metaloides son elementos químicos que generalmente se hallan presentes en la atmósfera en muy bajas concentraciones, ya sea en su estado elemental o combinados con otros elementos. Por lo general, los metales están presentes en forma de partículas sólidas, y en algunos casos, en forma de vapor (Pacyna *et al.*, 1993). Los metales y metaloides son emitidos a la atmósfera desde fuentes naturales y antropogénicas; mismos que, al ser liberados, son transportados a través de corrientes de aire, ríos y corrientes oceánicas.

3.3.1 Naturales

En general, se presume que las principales fuentes naturales de metales y metaloides a la atmósfera provienen principalmente de la erosión de cuerpos geológicos y suelos (fundamentalmente en forma de óxidos), de volcanes, aerosoles marinos, incendios forestales, y de procesos biogénicos (Nriagu, 1989). Sin embargo, diferentes estudios han demostrado que la materia orgánica particulada es el componente dominante de los aerosoles atmosféricos en zonas rurales (Talbot *et al.*, 1988; Artaxo *et al.*, 1988), y que más del 60% de los metales transportados por el aire en regiones boscosas pueden atribuirse a aerosoles de origen biogénico (Zoller, 1983).

Nriagu (1989), realizó una evaluación global de las fuentes naturales de los metales y metaloides atmosféricos. Un resumen de estas estimaciones se presenta en la Tabla 3.3, y se grafican en la Figura 3.3 en base al tipo de fuente (en porcentaje). Los porcentajes mostrados se calculan utilizando el valor máximo del rango de las estimaciones de categorías de fuentes totales e individuales mostrados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Rango estimado de emisiones naturales y antropogénicas de metales y metaloides a la atmósfera en 10² Toneladas/año (¹ Lantzy y Mackenzie, 1979; ² Nriagu, 1989; ³ Nriagu y Pacyna, 1988).

Elemento	Tasa natural (10² Toneladas/año)	Tasa antropogénica (10² Toneladas/año)
Aluminio	¹ 48,900	¹ 7,200
Antimonio	² 0.1 a 5.8	³ 1.48 a 10.8
Arsénico	² 1.1 a 23.5	³ 12 a 25.6
Cadmio	² 0.1 a 3.9	³ 3.1 a 12
Cobalto	² 0.6 a 11.4	¹ 4.4
Cobre	² 2.2 a 53.8	³ 19.9 a 50.9
Cromo	² 4.5 a 82.8	³ 7.34 a 53.6
Estaño	¹ 5.2	¹ 43
Hierro	¹ 27,800	¹ 10,700
Plata	¹ 0.06	¹ 5
Plomo	² 0.9 a 23.5	³ 289 a 376
Manganeso	² 51.5 a 582	³ 10.6 a 66
Mercurio	² 0 a 4.9	³ 0.91 a 6.19
Molibdeno	² 0.1 a 5.8	³ 0.79 a 5.74
Níquel	² 2.9 a 56.8	³ 24.2 a 87.2
Selenio	² 0.7 a 18.1	³ 1.81 a 5.78
Titanio	¹ 3,500	¹ 520
Vanadio	² 1.6 a 54.2	³ 30.2 a 142
Zinc	² 4 a 85.9	³ 70.2 a 193

Las fuentes naturales de metales y metaloides que influyen en el medio ambiente terrestre, de agua dulce y marino son más difíciles de evaluar que las fuentes atmosféricas. En general, los suelos y sedimentos tienen a reflejar la composición de su material original. Los suelos y sedimentos en áreas mineralizadas, por lo tanto, generalmente tienen concentraciones más altas de los metales correspondientes (AMAP, 2005).

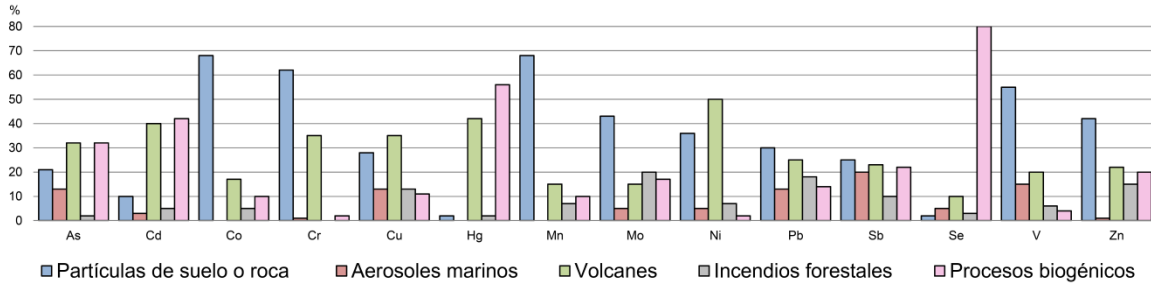


Figura 3.3 Emisiones globales de metales y metaloides a la atmósfera por fuentes naturales (Nriagu, 1989).

3.3.2 Antropogénicas

Las emisiones de metales y metaloides por fuentes antropogénicas involucran procesos de alta temperatura, como la combustión del carbón y petróleo en centrales eléctricas, plantas de calefacción e industriales, combustión de gasolina, industria de calcinación y síntesis de minerales metálicos (fundición de metales ferrosos y no ferrosos, acerías, mineras y otras instalaciones metalúrgicas), incineración de residuos y operación de hornos en plantas cementeras (Lantzy y Mackenzie, 1979). Las emisiones de metales de origen antropogénico son de gran importancia, pues se ha estimado que, cada año, se vierten a la atmósfera cerca de 800 mil toneladas de metales, generados en diversos procesos, o formando parte de determinados productos (Flamarique, 2007).

Nriagu y Pacyna (1988), estimaron cuantitativamente las emisiones mundiales de metales y metaloides atmosféricos producto de actividades humanas. El resumen de la estimación de las emisiones atmosféricas se presenta en la Tabla 3.3, y se grafican en la Figura 3.4 en base al tipo de fuente (en %). Los porcentajes mostrados se calculan utilizando el valor máximo del rango de las estimaciones de categorías de fuentes totales e individuales mostrados en la Tabla 3.3.

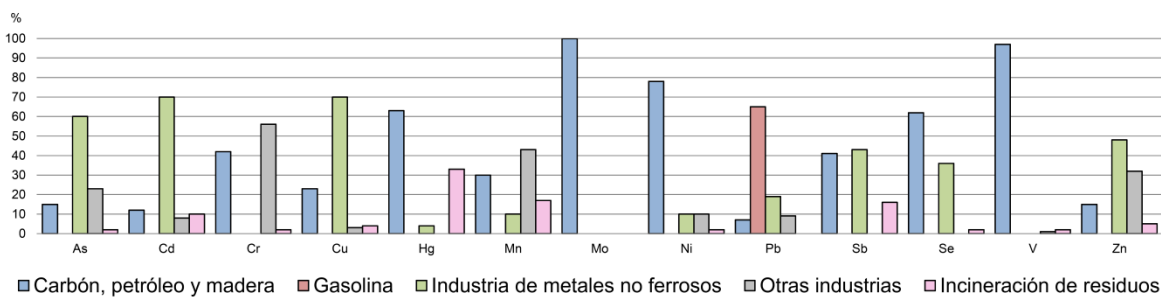


Figura 3.4 Emisiones globales de metales y metaloides a la atmósfera por fuentes antropogénicas (Nriagu y Pacyna, 1988).

Una comparación de los valores medios de las emisiones mundiales de metales y metaloides procedentes de fuentes naturales y antropogénicas (Figura 3.5), sugiere que las actividades humanas generan emisiones de metales y metaloides que superan en su mayoría a las procedentes de fuentes naturales. Por lo tanto, las emisiones antropogénicas resultan en alteraciones significativas del ciclo biogeoquímico natural de muchos metales y metaloides en el ambiente global (Lantzy y Mackenzie, 1979; Nriagu, 1989; Nriagu y Pacyna, 1988).

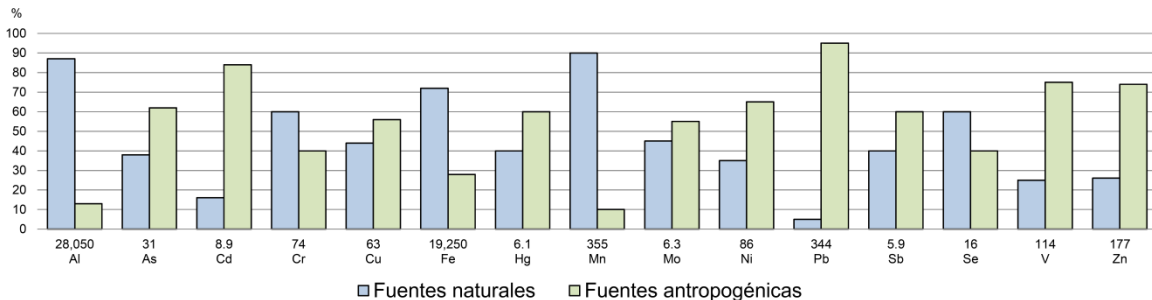


Figura 3.5 Comparación de las emisiones globales de metales y metaloides a la atmósfera por fuentes naturales y antropogénicas (Lantzy y Mackenzie, 1979; Nriagu, 1989; Nriagu y Pacyna, 1988). Los números debajo de las columnas son los valores medios de las estimaciones de emisiones totales en 10² Toneladas/año (Tabla 3.3).

3.4 Toxicidad

Los metales y metaloides pueden crear efectos adversos en la salud ambiental y humana debido a su toxicidad y su bioacumulación en diversos compartimientos ambientales. En la Tabla 3.4 se presenta el comportamiento de estos contaminantes en el medio ambiente (Nriagu, 1989; Pacyna y Winchester, 1990).

Los metales se someten a ciclos biogeoquímicos (no se destruyen, solo cambian de forma), y sus cargas ambientales o concentraciones, afectan procesos naturales en mayor medida que los contaminantes orgánicos. El efecto de un ion metálico dependerá no sólo del tipo de organismo diana (sobre el que ejerce un efecto), también de las condiciones de administración, disponibilidad, concentración y modo de absorción (Kabatas-Pendias, 1992). Podemos considerar que, los iones de Clase B son más tóxicos que los tipo Frontera y los iones Clase A (Duffus, 2002).

La norma mexicana NMX-AA-91-1987 define como “agente tóxico” a: *Toda substancia o mezcla de substancias que ejercen acción química, fisicoquímica o químico-biológica nociva a los organismos vivos, que por contacto o por ingestión pueden causar hasta su muerte.* Es por lo anterior, que algunos de los elementos metálicos se consideran como agentes tóxicos.

Tabla 3.4 Perturbación de los ciclos geoquímicos de metales y metaloides por la sociedad (modificado de Nriegu, 1984; Pacyna y Winchester, 1990).

Elemento	¹ Escala de Perturbación			² Ambiente de diagnóstico	³ Movilidad	⁴ Peligro a la salud	⁵ Camino crítico
	Global	Regional	Local				
Antimonio	+	+	+	A, Sd	v, a	+	C, A
Arsénico	+	+	+	A, Sd, S, AS	v, s, a	+	A, Ag
Berilio	?	?	+	A, S, Em	-	(+)	A
Bismuto	?	?	+	A, S, Em	v	(+)	?
Boro	-	(+)	+	A, Sd, AP	v, s	E	Ag
Cadmio	+	+	+	A, Sd, S, AS	v, s	+	C
Cobre	+	+	+	A, Sd, S, AS	v, s	E	C
Cromo	-	+	+	A, Sd, AS	v, s	E	C, Ag
Estaño	+	+	+	A, Sd, AS	v, s	+	C
Galio	?	?	+	Em	v	(+)	?
Germanio	?	+	+	A, S, AS	v, s, a	(+)	?
Indio	?	?	+	A, S, Em	v	(+)	?
Mercurio	+	+	+	A, Sd, P, S	v, a	+	C, A
Molibdeno	?	?	+	A, AS, S, Sd	s	E	C, Ag
Níquel	(+)	+	+	A, Sd	-	E	C, Ag, A
Paladio	?	?	+	Sd	s	(+)	?
Plata	+	+	+	A, Sd, AS	v	(+)	?
Platino	?	?	+	A, Sd	s	(+)	?
Plomo	+	+	+	A, Sd, NH, AS, H, S	v, a	+	C, A
Potasio	-	(+)	+	A	s	E	C
Selenio	+	(+)	+	A	v, s, a	E	C
Vanadio	+	+	+	A	p	(+)	F, A
Zinc	+	+	+	A, Sd, S, AS	v, s	E	C

1. +: significa perturbación; (+): posible perturbación; -: sin perturbación; ?: sin información.

2. **A:** aire; **Sd:** sedimentos (costa, lago); **S:** suelo; **NH:** núcleos de hielo; **AS:** agua superficial; **AP:** agua subterránea; **H:** humanos; **Em:** emisiones estudiadas.

3. **v:** volátil; **s:** soluble; **a:** móvil como especie organometálica alcalina; **p:** porfirinas.

4. +: tóxico en exceso; (+): tóxico; **E:** esencial, pero tóxico en exceso.

5. **C:** comida; **Ag:** agua; **A:** aire.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (U.S.EPA, 2007), considera de interés primordial a un total de 23 elementos por suponer un peligro tóxico: aluminio, antimonio, arsénico, bario, berilio, boro, cadmio, cromo, cobalto, cobre, hierro, plomo, manganeso, mercurio, molibdeno, níquel, selenio, plata, estroncio, estaño, telurio, vanadio y zinc.

La especie metálica es influenciada por propiedades como su movilidad (vías críticas), pH, tamaño de partícula, humedad, potencial redox, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y sulfuros ácidos volátiles (AMAP, 2005). Los intoxicantes a menudo se administran por inhalación, ingestión, inyección o absorción a través de la piel, de modo que los efectos pueden estar directamente relacionados con la dosis, formando la base de las relaciones dosis-efecto y dosis-respuesta (Pfizer y Vouk, 1986).

Los valores de referencia de toxicidad por metales se basan en el efecto toxicológico significativo más sensible conocido, que considera la variabilidad en el consumo, temporalidad y variabilidad geográfica o cultural; las relaciones entre fuentes, tiempo de exposición y efectos en receptores humanos y ecológicos; pueden ser complejos y a menudo específicos de un sitio en particular (Elinder, 1984; Pacyna *et al.*, 1993).

3.5 Caracterización de los metales y metaloides en el agua de lluvia

La contaminación por metales a la atmósfera es determinada por la diferencia que existe entre los metales y metaloides presentes en la naturaleza y aquellos que se eliminan a través de los procesos de remoción atmosférica (Lee *et al.*, 2000). Estos procesos de incorporación a la atmósfera causan acumulación excesiva de metales traza en otros medios (vegetación, suelos, lagos, etc.), incluso lejos del punto de emisión del contaminante, esto como consecuencia del arrastre atmosférico producido por el viento. Es decir, la concentración de contaminantes depende de la relación de fuerzas entre las fuentes contaminantes y las condiciones de autodepuración atmosférica (Lee *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2015).

En las áreas en que se da una alta concentración de fuentes de emisión de metales, pueden producirse episodios de fuerte contaminación local como consecuencia de la persistencia de situaciones meteorológicas adversas para la difusión de los contaminantes. En otros casos, los metales se incorporan a las masas de aire que forman las corrientes generales de vientos sobre la tierra, siendo arrastrados a muchos kilómetros de las fuentes de emisión (García *et al.*, 2006).

Así mismo, la mayor concentración de metales y metaloides se observa al comienzo de la temporada de lluvias o después de periodos de sequía, debido a que grandes cantidades de

polvo acumulado en la atmósfera son atrapadas por la lluvia (Khemani *et al.*, 1989; Luo, 2001). En contraste, los valores de metales pesados son bajos cuando la lluvia ocurre continuamente durante varios días (Al-Khashman y Shawabkeh, 2009).

CAPÍTULO 4 **ÁREA DE ESTUDIO**

4.1 Sitios de estudio

El área de estudio se enmarca en la región minera de Taxco, localizada al norte del estado de Guerrero, a 109 km al suroeste de la ciudad de México, dentro de las coordenadas 18° 24' a 18° 34' de latitud norte, y 99° 40' a 99° 28' de longitud oeste. El estudio aquí presentado, consideró tres sitios de interés: Iguala de la Independencia (IG), Taxco de Alarcón (TX) y Taxco el Viejo (TV), tres zonas con características orográficas, geológico-geográficas, climáticas y de urbanización distintas.

Los sitios de estudio pertenecen a la subregión Medio Balsas de la Región Hidrológica No. 18 y a la región administrativa IV Balsas, cuenca Río Medio Balsas (CONAGUA-OCB, 2010). El área presenta tres estaciones hidrológicas importantes, una estación seca de diciembre a finales de abril (precipitación mensual promedio de 37.2 mm), una estación lluviosa de mayo a septiembre (precipitación promedio 862.7 mm), y una estación post-lluviosa de octubre a diciembre (precipitación promedio 91.1 mm), (INEGI, 1999; CONAGUA-OCB, 2010; SMN, 2010). Los principales ríos del área son el Cacalotenango (longitud de 11.5 km) y el Taxco (longitud de 29.3 km), cuyos flujos se unen al sur de la ciudad de Taxco en el poblado de Taxco el Viejo para conformar el río Iguala y/o Cocula, cuya longitud es de 75 km (CONAGUA-OCB, 2010) (Figura 4.1).

El clima varía de cálido subhúmedo para las zonas bajas a templado subhúmedo para las zonas altas (INEGI, 2009), con temperatura promedio anual de 28 °C (SMN, 2010). El registro histórico de precipitaciones indica una oscilación promedio anual del orden de los 700 mm a 1500 mm de lluvia y valores de evaporación potencial anual de 1806 mm (SMN, 2010).

La época húmeda en la región se inicia debido al desplazamiento de la zona intertropical de convergencia hacia el Norte del ecuador geográfico. La gran insolación que recibe el trópico mexicano, y por tanto la superficie de estudio, determina la formación de áreas de baja presión que atraen los vientos alisios húmedos, lo que se traduce en lluvias orográficas muy importantes (Oswald, 2003). Esto sucede comúnmente en el mes de junio, sin embargo, las primeras lluvias de esta época se presentan desde mayo y en algunas ocasiones desde abril (Oswald, 2003; CONAGUA-OCB, 2010). Dichas precipitaciones se intensifican durante los meses de julio, agosto y septiembre y se prolongan hasta octubre por la influencia de las ondas del este y de los ciclones tropicales, hidrometeoros que afectan la zona costera tanto del Golfo de México como del Océano

Pacífico a fines de verano y principios de otoño (García Amaro de Miranda, 2003; Oswald, 2003). En este período es cuando se recibe el 70% de la precipitación anual total (CONAGUA-OCB, 2010). En invierno, al retraerse la zona intertropical de convergencia hacia el hemisferio Sur, los alisios se debilitan, se hacen descendentes y secos, por lo que en la época fría se deja de llover, aún cuando es ocasional la invasión de “Nortes” (Oswald, 2003; CONAGUA-OCB, 2010).

4.1.1 Iguala de la Independencia “IG”

La ciudad de Iguala de la Independencia ocupa el tercer lugar en densidad poblacional de la entidad con 118,468 habitantes, y una densidad demográfica de 218.6 habitantes por kilómetro cuadrado (INEGI, 2010). La zona de estudio se sitúa fisiográficamente en la provincia Sierra Madre del Sur, y en la subprovincia de Sierras y Valles Guerrerenses (INEGI, 2009a).

Su relieve presenta variaciones importantes que, de manera general, se clasifica en zonas planas, semiplanas, valles de laderas tendidas con lomerío, sierras de cumbres tendidas y sierras bajas con llanuras, con altitud variable de 500 a 1,900 metros sobre el nivel del mar. Predomina el clima cálido subhúmedo, con temperatura promedio anual de 26 °C, y rangos de precipitación de 700 a 1100 mm (INEGI, 2009a).

El sitio de muestreo de Iguala de la Independencia (IG), se encuentra ubicado entre los paralelos 18° 21' 46" de latitud norte, y los meridianos 99° 31' 17" de longitud oeste, a una altitud de 782 metros sobre el nivel del mar (Tabla 4.1). El muestreo se realizó en la azotea de una casa habitación.

4.1.2 Taxco el Viejo “TV”

El Poblado de Taxco el Viejo cuenta con 2,932 habitantes (INEGI, 2010), se localiza fisiográficamente en la provincia Sierra Madre del Sur, y en las subprovincias de Sierras y Valles Guerrerenses, y Depresión del Balsas. Prevalecen los climas de tipo cálido subhúmedo, semicálido subhúmedo y templado subhúmedo, con temperatura promedio anual de 24 °C, y precipitación media de 1278 mm (INEGI, 2009b).

El sitio de muestreo de Taxco el Viejo (TV), se emplaza entre los paralelos 18° 28' 31" de latitud norte, y los meridianos 99° 34' 49" de longitud oeste, a una altitud de 1,223 metros sobre el nivel del mar (Tabla 4.1). El muestreo se llevó a cabo en la azotea de la Escuela Superior de Ciencias de la Tierra, adscrita a la Universidad Autónoma del Estado de Guerrero (UAGro).

4.1.3 Taxco de Alarcón “TX”

La ciudad de Taxco de Alarcón cuenta con 52,217 habitantes, ocupando así, el quinto lugar en concentración de población de la entidad, con una densidad demográfica de 146.3 habitantes por kilómetro cuadrado (INEGI, 2010). La zona de estudio se ubica fisiográficamente en la provincia Sierra Madre del Sur, y en las subprovincias de Sierras y Valles Guerrerenses, y Depresión del Balsas (INEGI, 2009b).

La orografía del sitio está dominada por elevaciones de origen volcánico (Sierras altas complejas con cañadas y Sierras de cumbres tendidas), mesetas de aluvión antiguo con lomerío y valles de laderas tendidas con lomerío, con altitud variable de 700 a 2,600 metros sobre el nivel del mar. Prevalcen los climas de tipo cálido subhúmedo, semicálido subhúmedo y templado subhúmedo, con temperatura promedio anual de 19 °C, y rangos de precipitación de 800 a 1,500 mm (INEGI, 2009b).

El sitio de muestreo de Taxco de Alarcón (TX), se localiza a una altitud de 1,715 metros sobre el nivel del mar (msnm), entre los paralelos 18° 32' 40" de latitud norte, y los meridianos 99° 37' 12" de longitud oeste (Tabla 4.1). El muestreo se llevó a cabo en la azotea de una casa habitación.

Tabla 4.1 Coordenadas geográficas de los tres sitios de muestreo (longitud, latitud y altitud).

Sitio	Zona	Coordenadas		Altitud (msnm)
		Latitud Norte	Longitud Oeste	
IG	Urbana	18° 21' 46"	99° 31' 17"	782
TV	Rural	18° 28' 31"	99° 34' 49"	1,223
TX	Urbana	18° 32' 40"	99° 37' 12"	1,715

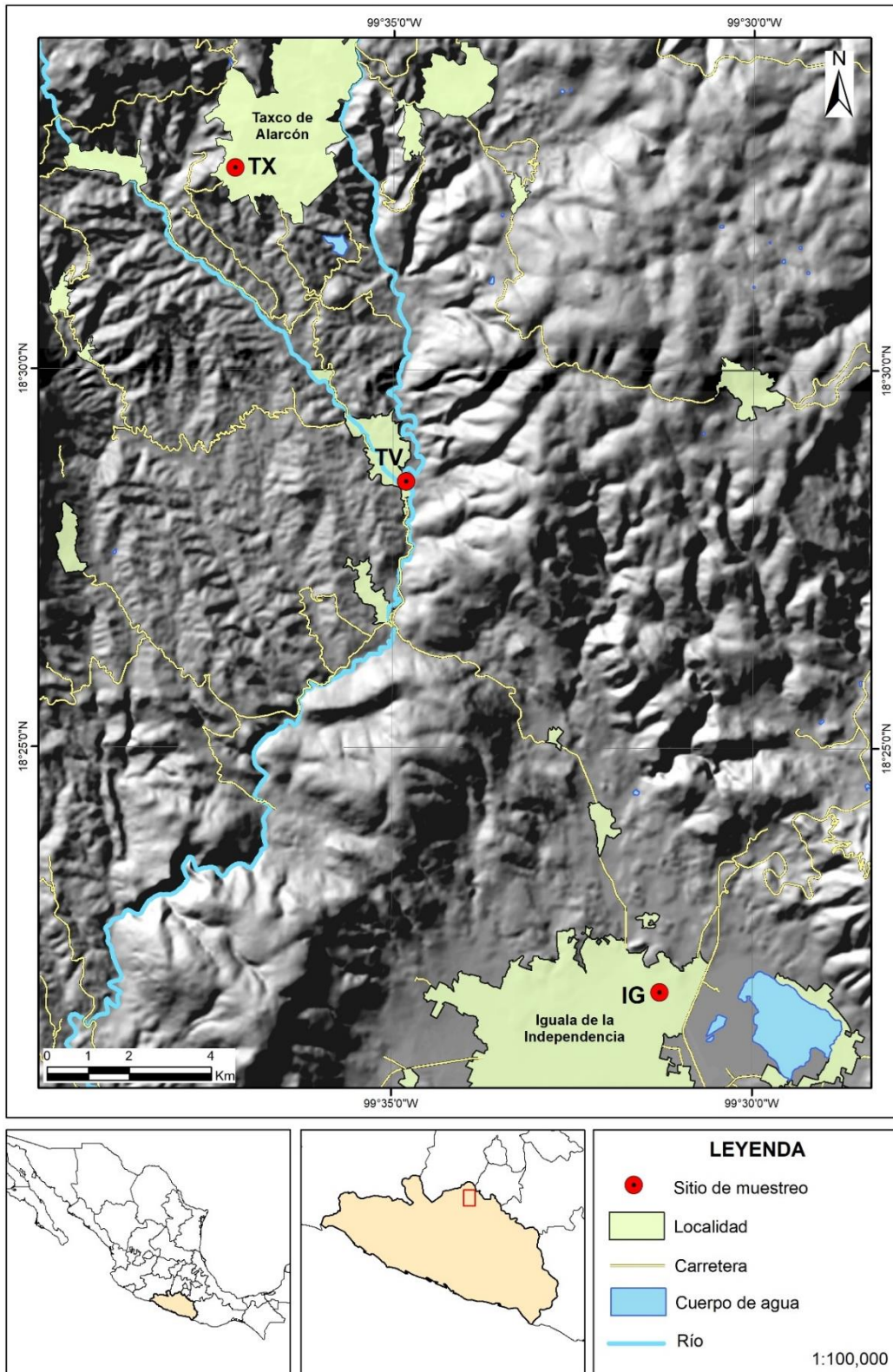


Figura 4.1 Mapa de localización de sitios.

4.2 Marco geológico

4.2.1 Estratigrafía

Los cuerpos litológicos en donde se hospeda la mineralización del Distrito Minero de Taxco presentan edades variables que van desde el Cretácico temprano hasta el Terciario (Fries, 1960; De Cserna, 1965). Las rocas más antiguas pertenecen a la Secuencia Volcánico-Sedimentaria de Taxco-Taxco el Viejo, cubiertas discordantemente por rocas cretácicas de las formaciones Morelos y Mexcala. Estas mismas rocas son cubiertas en discordancia angular por rocas terciarias conglomeráticas con algunas intercalaciones de flujos de lava del Grupo Balsas. Finalmente, la Riolita Tilzapotla cubre discordantemente a los paquetes litológicos anteriores; y estos a su vez, son cubiertos por depósitos cuaternarios de aluvión (Campa e Iriondo, 2004) (Figura 4.2).

Era	Período	Edad	Columna	Formación
CENOZOICO	Cuaternario	Plioceno - Pleistoceno		Aluvión
	Terciario	Oligoceno		Tilzapotla
MESOZOICO	Cretácico Superior	Eoceno		Grupo Balsas
		Maastrichtiano - Turoniano		Mexcala
	Cretácico Inferior	Albiano - Cenomaniano		Morelos
		Hauteriviano - Valanginiano		Secuencia Volcánico Sedimentaria

Figura 4.2 Columna estratigráfica esquemática del área de estudio (Modificado de la Carta Geológico-Minera, IGUALA E14-A78, SGM).

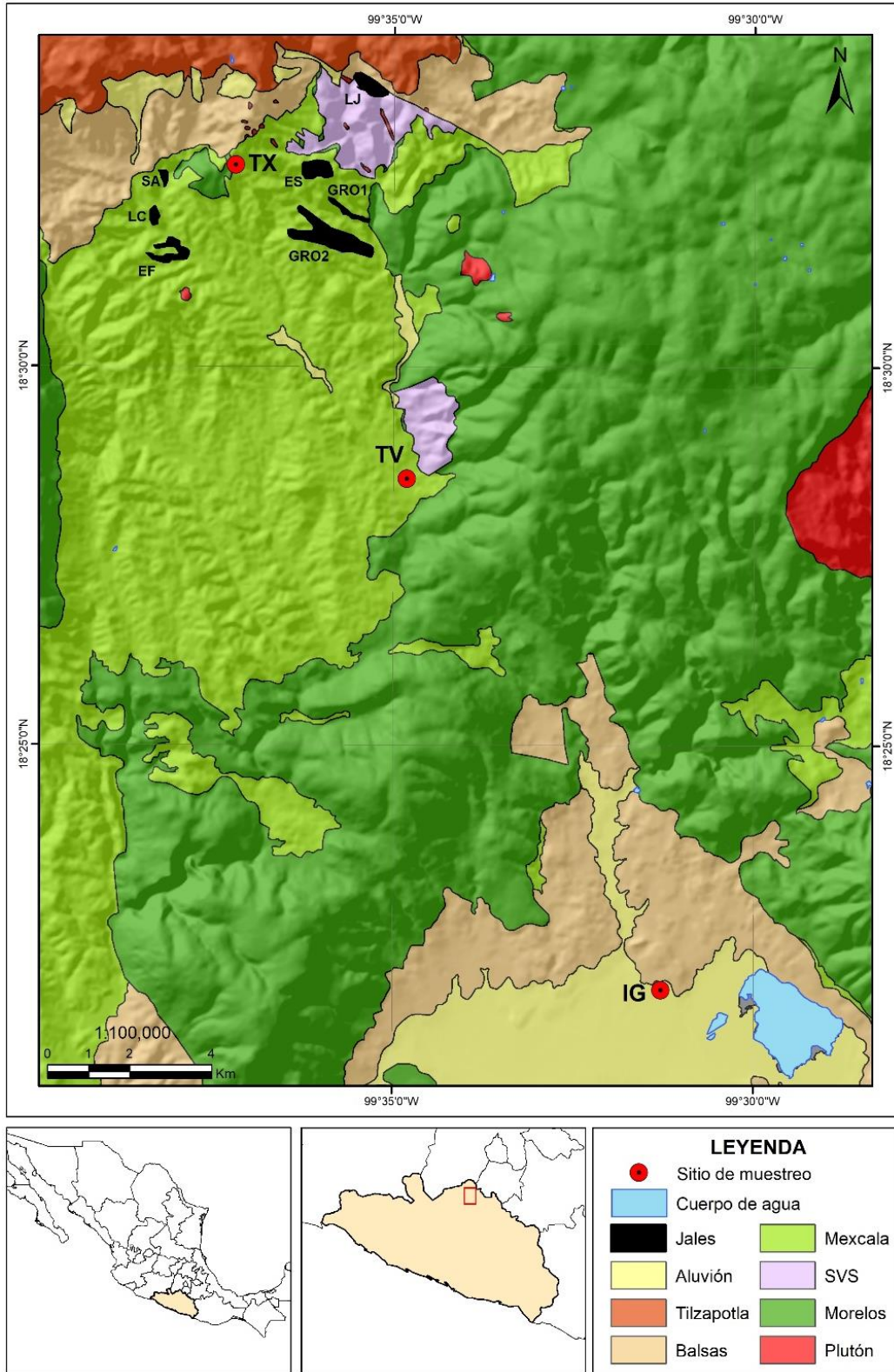


Figura 4.3 Mapa litológico del área de estudio. (SVS= Secuencia Volcánico-Sedimentaria; SA = San Antonio; LC = La Concha; EF = El Fraile; LJ = Los Jales; ES = El Solar; GRO1 = Guerrero 1; GRO2 = Guerrero 2).

4.2.1.1 Secuencia Volcánico-Sedimentaria Taxco-Taxco el Viejo

En las regiones de Taxco de Alarcón y Taxco el Viejo (Figura 4.3), afloran rocas volcánicas y sedimentarias deformadas y metamorizadas conocidas en la literatura como Esquisto Taxco y Roca Verde Taxco el Viejo (Fries, 1960) o Secuencia Volcánico-Sedimentaria de Taxco-Taxco el Viejo (Campa e Iriondo, 2004).

El paquete litológico del Esquisto Taxco está compuesto por distintas unidades litoestratigráficas, las cuales consisten en esquistos pelíticos de grano fino de mica y/o clorita, metariolitas, metaandesitas y filitas (Campa e Iriondo, 2004). La Roca Verde Taxco el Viejo, corresponde a un paquete de rocas tobáceas andesíticas, brechas, lavas y areniscas que muestran en conjunto foliación y metamorfismo de bajo grado. Todas estas rocas presentan metamorfismo de facies de esquistos verdes con cloritización en la matriz. Esta secuencia ha sido datada por Campa e Iriondo (2004) a través de U-Pb en zircones en 130-136 Ma (Barremiano-Valanginiano).

4.2.1.2 Formación Morelos

Fries (1960), propone el nombre de Formación Morelos a una sucesión de calizas y dolomitas. En el área de estudio, esta unidad aflora en la parte oriental de los sitios de Taxco el Viejo y Taxco de Alarcón; mientras que, en Iguala de la Independencia, aflora hacia el noreste y noroeste de la ciudad (Figura 4.3).

Esta unidad La Formación Morelos consiste esencialmente de gruesos bancos de caliza de facies arrecifales y dolomías con una cantidad considerable de miliólidos, bioclastos e intraclastos, bancos de rudistas y ocasionalmente chert. Asimismo, se reconocen algunos lentes evaporíticos de yeso hacia la base. A las calizas de esta formación tradicionalmente se les ha asignado una edad de Albiano-Cenomaniano (Fries, 1960; Bonet, 1971) determinada por la presencia de fósiles de *Acteonella*, *Toucasia* y *Nerinea*.

4.2.1.3 Formación Mexcala

El nombre de la Formación Mexcala fue propuesto por Fries (1960), para describir a una secuencia rítmica de lutitas y areniscas. Esta unidad aflora en el poblado de Taxco el Viejo y al sureste de la ciudad de Taxco de Alarcón (Figura 4.3).

Esta formación está formada a la base por un miembro calcáreo-pelítico seguido por una sucesión rítmica de areniscas y lutita tipo flysch con lentes ocasionales de areniscas gruesas y lentes de calizas (Campa *et al*, 1976; de Cserna y Fries, 1981). La edad se ha estimado en un

rango del Maastrichtiano al Turoniano (Fries, 1960; De Cserna y Fries, 1981). Estas edades se obtuvieron a partir de amonites y microfauna fósil (*Barroisicerassp.*, *Otoscaphtes sp.*, *Peroniceras sp.*, *Globigerina sp.*, *Globotruncana sigali* y *Globotruncana lapparentitricarinata*).

4.2.1.4 Grupo Balsas

El nombre de Grupo Balsas (Fries, 1960), es planteado para describir un conjunto de capas rojas continentales formada por una gran variedad de rocas. En el área de estudio, los afloramientos de esta unidad se encuentran hacia la parte norte, en el área de Taxco de Alarcón donde forman un cinturón irregular que cruza el área en dirección este-oeste, y en la parte norte del sitio de Iguala de la Independencia (Figura 4.3).

Su litología corresponde a un conjunto de rocas conglomeráticas, tobáceas y algunos flujos de lava de composición ácida a intermedia, ocasionalmente intercaladas ente sí. En el área de Taxco este conjunto de rocas consiste de guijarros, calizas, areniscas finas y lutitas, cantidades menores de andesitas, cuarzo policristalino y calcita. La edad de este paquete litológico se ha obtenido por correlación estratigráfica con capas rojas similares en el estado de Guanajuato (Eoceno-Oligoceno). Los estudios radiométricos realizados en las rocas volcánicas que sobreyacen a esta formación restringen su edad a Eoceno Superior - Oligoceno Temprano (Alaniz, *et al*, 2002).

4.2.1.5 Riolita Tilzapotla

El nombre de Formación Riolita Tilzapotla fue propuesto por Fries (1960) para describir un conjunto de rocas volcánicas de composición riolítica. Esta unidad aflora en la parte noroccidental y norte del área de estudio y corona los cerros de mayor altitud (Figura 4.3).

En el área de Taxco, las rocas que componen al campo volcánico corresponden a una secuencia de brechas ignimbríticas riolíticas, vitrófiros, riolitas y algunos flujos de tobas. Las dataciones K-Ar realizadas por Alba-Aldave *et al.*, (1996) presentan edades de 31 a 32 Ma (Oligoceno).

4.2.1.6 Cuerpos plutónicos y subvolcánicos

Se reconocen tres cuerpos plutónicos y subvolcánicos, los cuales juegan un papel muy importante para la evolución geológica del área de estudio. Los cuerpos plutónicos y subvolcánicos corresponden a desarrollos dómicos, diques básicos de composición andesítica,

graníticos con variaciones a granodiorita, y pórfidos riolíticos (Farfán-Panamá *et al.*, 2010). Con base en trabajos radiométricos que se han realizado en estas rocas se ha llegado a pensar que se trata de un evento plutónico-volcánico cogenético responsable de la mineralización presente en el área (Meza-Figueroa *et al.*, 2003).

4.2.1.7 Aluvión

Se pueden definir a estos depósitos como una secuencia estratificada de material terrígeno no consolidado, constituido principalmente por fragmentos de guijarros, gravas, arenas, limos, y arcillas provenientes de las unidades existentes y aportados por las corrientes que drenan hacia los valles. Los medios principales de transporte de este material son los ríos y arroyos, por lo que se encuentran distribuidos principalmente en todo el sistema fluvial del área y las partes más bajas del sitio de Iguala de la Independencia (Figura 4.3). El aluvión está constituido principalmente de material poco consolidado, esencialmente conglomerados y brechas con matriz arenosa, arenarcillosa, limolítica y arenas gruesas (Bautista, 2001). La edad de estos depósitos se determinó por métodos paleontológicos, a partir de restos fósiles de un *Equus conversides* y la vértebra de un *Proboscídeo*, los cuales datan del Plioceno Tardío-Pleistoceno Temprano (Armenta *et al.*, 1998).

4.2.2 Geología minera

El Distrito Minero de Taxco se localiza en el límite de los terrenos tectonoestratigráficos Mixteca y Guerrero (Campa y Coney, 1983), dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur y del Cinturón de Depósitos Epitermales Polimetálicos (Damon *et al.*, 1981; Camprurí *et al.*, 2003; Camprurí y Albinson, 2007). Este cinturón está relacionado con la subducción de la margen continental pacífica de México e incluye una gran cantidad de depósitos polimetálicos de Pb/Zn con cantidades variables de Ag y Au (Farfán-Panamá *et al.*, 2013).

Los depósitos minerales en el área de estudio son de baja temperatura (220-260 °C), de tipo hidrotermal (Armenta *et al.*, 2004; Talavera-Mendoza *et al.*, 2005; Farfán-Panamá *et al.*, 2013), asociados a un vulcanismo en contexto de cordillera (Talavera-Mendoza *et al.*, 2007). Los yacimientos minerales se clasifican como epitermales de sulfuración intermedia correspondientes a un sistema complejo de mantos y stockworks con mineralización de sulfuros de Zn-Pb-Cu asociada a Ag y Au (Camprurí y Albinson, 2007; Farfán-Panamá *et al.*, 2013) emplazados en rocas sedimentarias de la Formación Morelos y Mexcala, y raramente en rocas metamórficas de la Secuencia Volcánico-Sedimentaria de Taxco-Taxco el Viejo (IMMSA, 1978; Romero *et al.*,

2007). La mineralogía reportada en Taxco incluye minerales de hierro, plata, cobre, plomo y zinc.

Los principales minerales de mena son pirita (FeS_2), esfalerita (ZnS), galena (PbS), arsenopirita (FeAsS), argentita (Ag_2S), plata nativa, calcopirita (CuFeS_2), proustita (Ag_3AsS_3), pirargirita (Ag_3SbS_3) y polibasita [$(\text{Ag,Cu})_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$]. La ganga está conformada por una variedad de minerales que incluyen cuarzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), barita (BaSO_4), magnetita (Fe_3O_4), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), epidota [$\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3(\text{SiO}_4)_3$], anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], hematita (Fe_2O_3), rodocrosita (MnCO_3), feldespatos y ferromagnesianos (IMMSA, 1978; Armienta *et al.*, 2003; Talavera-Mendoza *et al.*, 2005).

4.2.3 Jales mineros

Talavera-Mendoza *et al.* (2005), clasificó siete depósitos de jales en la zona: San Antonio, El Fraile, La Concha, El Solar, Guerrero I, Guerrero II y Los Jales (Figura. 4.3). Todos ellos han sido estudiados por diversos investigadores por sus potenciales efectos tóxicos a la biota y ecosistema del lugar. Todos los relaves, excepto los niveles superiores de los depósitos Guerrero II y La Concha, se generaron antes de 1976 y corresponden a la explotación de minas individuales de comienzo del período moderno.

Hasta la fecha se ha calculado un total de más de 25 millones de toneladas de jales y roca estéril en el área de estudio, siendo el relave Guerrero II la acumulación más grande con aproximadamente 20 millones de toneladas (Talavera-Mendoza *et al.*, 2005). Todos los embalses muestran estructuras típicas (bancos casi horizontales, gradación, laminación paralela y cruzada) de acumulaciones depositadas como lodos sobresaturados y se encuentran depositados sobre rocas impermeables de la Formación Mexcala y de la Secuencia Volcánico-Sedimentaria de Taxco-Taxco el Viejo (Talavera-Mendoza *et al.*, 2005).

4.2.3.1 Mineralogía

La mineralogía en los jales y depósitos de roca estéril está controlada principalmente por procesos de oxidación-neutralización. Las fases primarias no metálicas están ampliamente dominadas por cuarzo y fragmentos de roca (principalmente esquistos y volcánicos) con cantidades menores de feldespato, barita y ferromagnesianos (anfíboles y piroxenos). Las fases metálicas primarias (sulfuros y óxidos) consisten en cantidades variables de pirita, calcopirita, esfalerita, galena y óxidos de hierro cristalinos.

Las fases secundarias incluyen calcocita (Cu_2S), yeso, bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), eponita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), hexahidrita ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), starkeyita ($\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), pickeringita

[$\text{MgAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$], boyleita [$(\text{Zn,Mg})\text{SO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$], jarosita [$\text{KFe}^{3+}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$], rozenita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), nimita [$(\text{Ni,Mg,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})$], hetaerolita ($\text{ZnMn}^{3+}\text{O}_4$), smithsonita (ZnCO_3), hematita (Fe_2O_3), bernalita [$\text{Fe}(\text{OH})_3$] así como precipitados criptocristalinos o amorfos y Fe-oxihidróxidos poco cristalizados. Los oxihidróxidos de hierro secundarios, ya sea alrededor de la pirita o como precipitados libres, contienen cantidades significativas de S, As, Pb, Mn y Zn, probablemente como elementos adsorbidos. Por otro lado, los óxidos de Zn y Pb producidos por la alteración de la esfalerita y la galena, respectivamente, contienen Mn, Fe y As como elementos menores (Talavera-Mendoza *et al.*, 2005).

CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA

5.1 Diseño del muestreo

Se colectaron un total de 131 muestras de agua de lluvia durante el período húmedo de mayo a noviembre del año 2017. Para ello, se ubicaron tres sitios de muestreo en la zona de estudio: Iguala de la Independencia "IG" (37 muestras), Taxco el Viejo "TV" (28 muestras) y Taxco de Alarcón "TX" (66 muestras).

La colecta de muestras de lluvia se realizó bajo un método de *acumulación por evento* y en casos aislados por *depósito total (bulk precipitation)*. La muestra fue colectada mediante un colector convencional simple en forma manual (colector pasivo), por duplicado, tanto para la colección de especies iónicas, como para la determinación de metales y metaloides, esto con el objetivo de hacer una posible mejoría en la predicción de los eventos de lluvia y lograr una comparación aproximada entre la composición química de la precipitación pluvial para cada sitio.

Durante cada evento de muestreo se consideraron los siguientes puntos:

1. Utilización de guantes esterilizados y cubrebocas durante la recolección de la muestra.
2. Medición de la totalidad del agua de lluvia almacenada en el pluviómetro.
3. Se descartaron aquellas muestras con un volumen menor a 2 mm o cuando la limpieza del colector no era la adecuada.
4. En cada evento se recolectaron dos alícuotas, una destinada para la determinación de aniones (NO_3^- y SO_4^{2-}), y otra para la determinación de cationes mayoritarios (Ca, K, Mg y Na), metales, metaloides y no metales (Al, As, Ba, Cu, Fe, Mn, S, Si, Sr y Zn).
5. Toma de parámetros fisicoquímicos *in situ* y en laboratorio (pH, conductividad y temperatura), a partir del equipo Waterproof Multiparameter PC Testr 35, marca Oakton.
6. Lavado de embudos y botellas captadoras con agua destilada y desionizada una vez finalizada la colecta de la muestra, asegurando perfectamente su limpieza.

5.2 Técnicas de muestreo: Instrumental

El muestreo en los sitios IG, TV y TX, se realizó utilizando un colector convencional simple (pasivo) el cual consiste en un embudo de polietileno de 20 cm de diámetro, acoplado a una botella de polietileno de alta densidad (HDPE Nalgene) de 2 litros (material inerte a la composición química de la muestra, evitando su retención a las paredes del recipiente durante el almacenamiento), misma que se encuentra sostenida por un tripié de metal (Figura 5.1, 5.2 A).

El sistema de muestreo se instaló a una altura mínima de 1 metro del piso, para prevenir la contaminación del sistema por salpicaduras. El sistema de colección utilizado cumple con las especificaciones recomendadas por Galloway *et al.* (1982). El procedimiento de limpieza de las botellas y embudos para la determinación de metales, metaloides e iones inorgánicos se llevó acabo de acuerdo con el método descrito por Keller *et al.* (1988). Estas se trataron previamente con HNO_3 3.2 M y se lavaron perfectamente con agua desionizada caliente ASTM grado Tipo II (agua destilada con una conductividad eléctrica menor a $1.15 \mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C).

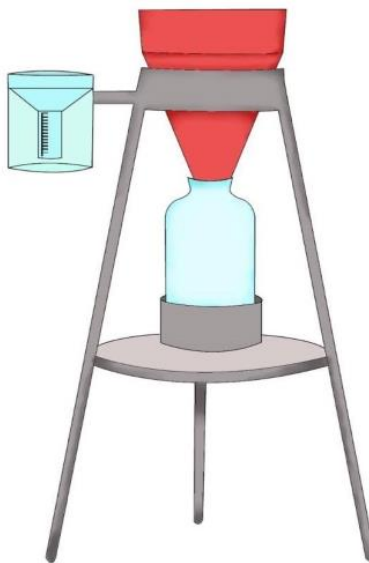


Figura 5.1 Colector de lluvia convencional simple (Pasivo).

En cada uno de los tres sitios se instaló una estación climatológica automática Davis, modelo Vantage Vue, con el objetivo de registrar parámetros y condiciones climatológicas en lapsos promedio de 30 minutos (Figura 5.2B). Así mismo, se colocó un pluviómetro con la finalidad de determinar y medir la cantidad en milímetros de agua precipitada (Figura 5.2A).

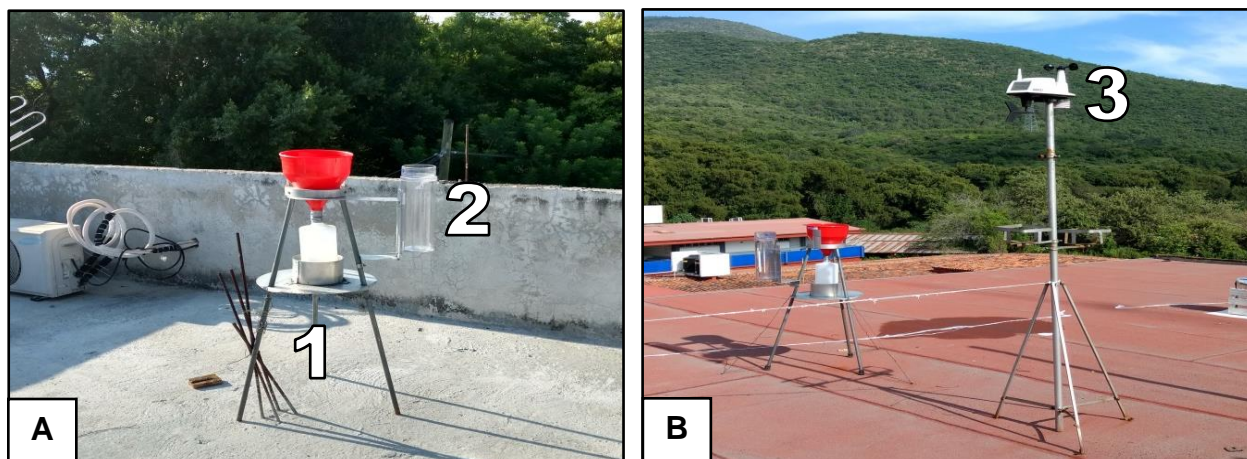


Figura 5.2 A) 1 Colector de lluvia convencional simple (Pasivo), **2** Pluviómetro; **B) 3** Estación climatológica automática Davis, modelo Vantage Vue.

5.3 Preparación de muestras para el análisis químico

Posterior a su colección, las muestras de lluvia se filtraron a través de una membrana de fluoruro de polivinilideno (PVDF) de 0.22 μm y 47 mm de diámetro, la cual previamente se enjuagó con 50 mL de agua desionizada, usando un sistema de filtración al vacío STERIFIL, de Merck Millipore (Figura 5.3 A y B). Las muestras filtradas, por separado, se transfirieron a botellas de polietileno de alta densidad (HDPE Nalgene) de 60 mL y se mantuvieron en refrigeración (4 °C) hasta su análisis. Para la alícuota de cationes mayoritarios, metales, metaloides y no metales, el agua filtrada se acidificó a un pH igual o menor a 2 con HNO_3 3.2M, con el objeto de evitar el intercambio de iones y precipitación de hidróxidos (APHA-AWWA-WPCF, 2012).

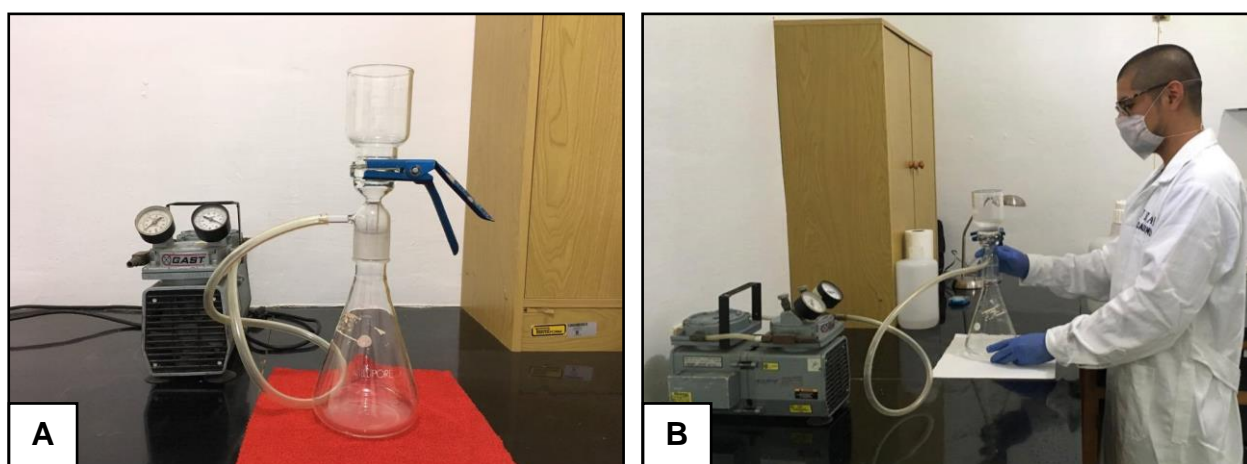


Figura 5.3 A) Sistema de filtración al vacío STERIFIL, de Merck Millipore; **B)** filtrado de muestras de agua de lluvia.

5.4 Método analítico

5.4.1 Cationes mayoritarios, metales, metaloides y no metales

La técnica utilizada para la determinación de cationes mayoritarios, metales, metaloides y no metales en las muestras de agua de lluvia correspondió a la Espectrofotometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES por sus siglas en inglés). Esta técnica, funciona utilizando un plasma de argón en el que se inyecta una muestra líquida atomizada. La muestra se ioniza en el plasma y los iones emiten luz a diferentes longitudes de onda que posteriormente se miden (Boumans, 1987).

En esta técnica, el analito es introducido continuamente mediante una bomba peristáltica a través de un sistema de nebulización. El aerosol producido es transportado por el gas argón y conducido a la antorcha del plasma. En el plasma, debido a las altas temperaturas generadas ($\sim 10,000$ °K), los átomos del analito en su estado fundamental son excitados a estados energéticos superiores denominados estados excitados (Montaser y Golightly, 1992). Dichos átomos o iones excitados son inestables y tienden a volver a su estado fundamental, devolviendo la energía absorbida en forma de radiaciones electromagnéticas de longitudes de onda características (liberado como luz, en forma de fotones). Cada elemento, por tanto, produce un conjunto de radiaciones a longitudes de onda fijas (líneas) que constituyen su espectro atómico característico. La intensidad de la radiación (luz), que es proporcional a la concentración del elemento en la muestra, se recalcula internamente mediante un sistema almacenado de curvas de calibración, obteniendo así la concentración para cada elemento (Boumans, 1987).

Para generar plasma, primero, se suministra gas argón a la bobina de la antorcha, y se aplica corriente eléctrica de alta frecuencia a la bobina de trabajo en la punta del tubo de la misma. Utilizando el campo electromagnético creado en el tubo de la antorcha por la corriente de alta frecuencia, el gas de argón se ioniza y se genera plasma (Thompson y Walsh, 1983). Este plasma tiene alta densidad de electrones y temperatura, y esta energía se utiliza en la emisión de excitación de la muestra. Las muestras de solución se introducen en el plasma en un estado atomizado a través del tubo estrecho en el centro del tubo de la antorcha (Thompson y Walsh, 1983).

El análisis de metales y no metales aplicando la técnica de ICP-OES, presenta mayor sensibilidad (partes por billón), no tiene limitaciones en el tamaño de muestra, es multielemental (incluye prácticamente todos los elementos de la tabla periódica) y es altamente estable, siendo así, una técnica adecuada para el análisis de elementos metálicos o trazas en las muestras de agua de lluvia colectadas.

5.4.1.1 Análisis químico

El análisis químico de cationes mayoritarios, metales, metaloides y no metales en las muestras de lluvia se realizó de acuerdo con el método EPA 200.7 empleando un Espectrofotómetro de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) marca Thermo Fisher Scientific, modelo iCAP 7000 (Figura 5.4A). El análisis se realizó en el laboratorio de Geoquímica de Aguas, perteneciente al Centro de Geociencias-UNAM, campus Juriquilla, Querétaro.

Los elementos detectados en más del 70% de las muestras, por sitio, fueron: Ca, K, Mg, Na, Al, As, Ba, Cu, Fe, Mn, S, Si, Sr y Zn. La calibración se realizó empleando estándares certificados, que se prepararon dentro del intervalo de concentración esperado de las muestras trazables a NIST (National Institute of Standard and Technology). Los estándares de calibración fueron elaborados a partir de soluciones Inorganic Ventures de 1000 ppm en 7 diferentes concentraciones, los coeficientes de correlación para las curvas de calibración fueron mayores a 0.999, los porcentajes de recuperación fueron superiores al 90% y fueron evaluados mediante un material de referencia estándar de High-Purity Standards. El límite de detección (LD) del equipo ICP-OES fue: 0.1 µg/L (Ca), 0.4 µg/L (K), 5 µg/L (Mg), µg/L 0.2 (Na), 5 µg/L (Al), 5 µg/L (As), 0.1 µg/L (Ba), 0.4 µg/L (Cu), 5 µg/L (Fe), 0.2 µg/L (Mn), 60.3 µg/L (S), 4.6 µg/L (Si), 0.1 µg/L (Sr) y 0.7 µg/L (Zn).

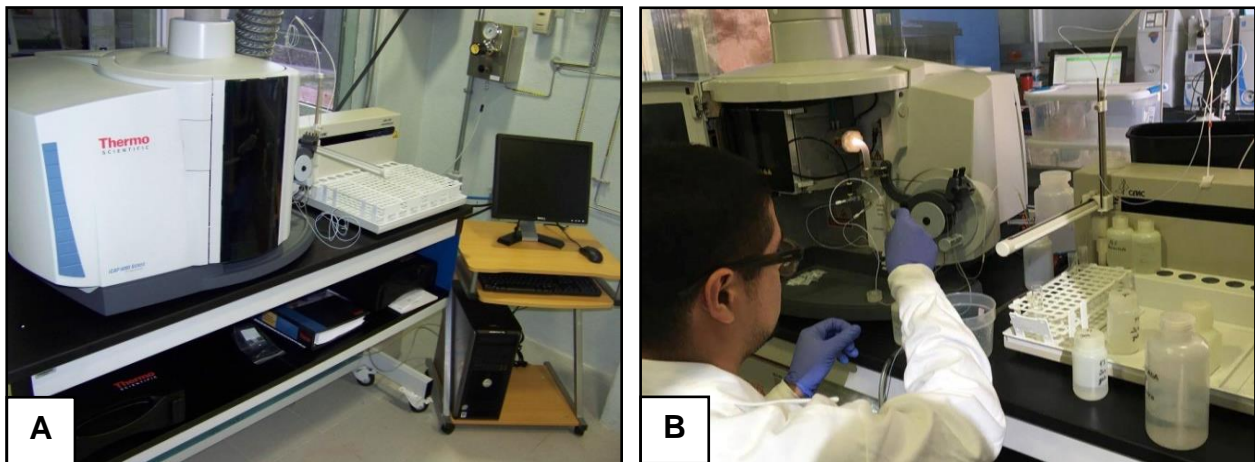


Figura 5.4 A) Espectrofotómetro de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES); **B)** Análisis de muestras de agua de lluvia por ICP-OES.

5.4.2 Aniones

La técnica utilizada para la determinación de iones inorgánicos en las muestras de agua de lluvia correspondió a la Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución (HPLC por sus siglas en inglés). La cromatografía es una técnica para separar mezclas en sus componentes individuales para que puedan ser identificados y cuantificados (Jönsson, 1987).

En cromatografía líquida (LC por sus siglas en inglés), el analito pasa por la columna cromatográfica a través de la fase estacionaria no polar (normalmente, un cilindro con pequeñas partículas redondeadas con ciertas características químicas en su superficie "columna") mediante el bombeo de líquido a alta presión. La fase móvil actúa como portador del analito. El analito en solución es inyectado en la fase móvil. Los componentes de la solución emigran de acuerdo con las interacciones no-covalentes de los compuestos con la columna. Estas interacciones químicas, determinan la separación de los contenidos en la muestra a distintas velocidades (Meyer, 1994). La utilización de los diferentes detectores dependerá de la naturaleza de los compuestos a determinar. La separación cromatográfica en HPLC es el resultado de las interacciones específicas entre las moléculas de la muestra en ambas fases, móvil y estacionaria (Bidlingmeyer, 1992).

Después de haber pasado los componentes por la fase estacionaria y haberse separado, pasan por un detector que genera una señal que puede depender de la concentración y del tipo del compuesto. Al comparar los datos obtenidos de una muestra con la obtenida a partir del estándar conocido, los iones de la muestra se pueden identificar y cuantificar (Meyer, 1994). El sistema de recopilación de datos, generalmente una computadora que ejecuta un software de cromatografía produce un cromatograma. El software de cromatografía convierte cada pico en el cromatograma en una concentración de muestra y produce una impresión de los resultados (Scott, 1995).

5.4.2.1 Análisis químico

El análisis químico de aniones en las muestras de lluvia se desarrolló de acuerdo con el método EPA 300.1 empleando un Cromatógrafo de Líquidos de Alta Resolución (HPLC) marca Thermo Fisher Scientific, modelo Dionex ICS-1100 (Figura 5.5A). El análisis se realizó en el laboratorio de Geoquímica de Aguas, perteneciente al Centro de Geociencias-UNAM, campus Juriquilla, Querétaro.

Antes de ejecutar la muestra, el sistema de cromatografía de iones se calibró utilizando una solución estándar validada por NIST. Los aniones detectados en más del 70% de las

muestras, por sitio, fueron: NO_3^- y SO_4^{2-} . Esta técnica utilizó una columna de intercambio aniónico marca Thermo Fisher Scientific Dionex IonPac AS14A, la fase móvil fue una solución 8 mM de Na_2CO_3 /1.0 mM de NaHCO_3 , a una temperatura de operación de 30 °C, y un flujo de 1.0 mL/min. La detección de estos iones se realizó mediante conductividad suprimida a 10 μSFS . El límite de detección (LD) del equipo HPLC fue de 60.3 $\mu\text{g/L}$ para ambos aniones (NO_3^- y SO_4^{2-}).

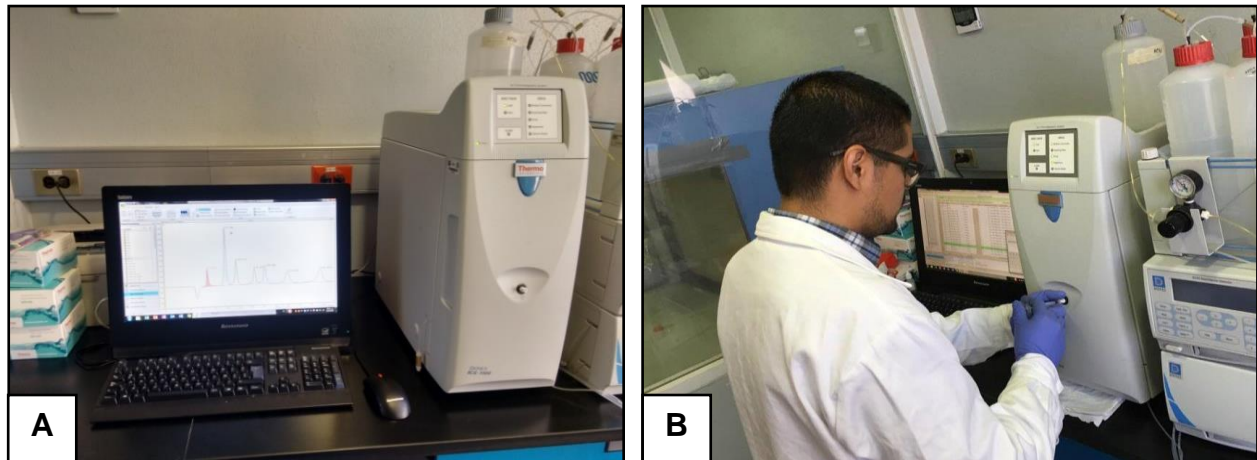


Figura 5.5 A) Cromatógrafo de Líquidos de Alta Resolución (HPLC); **B)** Análisis de muestras agua de lluvia por HPLC.

5.4.3 Validación y calidad de los datos

A fin de evaluar la exactitud del método de análisis empleado para determinar la concentración de los iones presentes en las muestras de precipitación total, se realizó: a) un análisis comparativo entre los datos obtenidos en campo y los medidos en laboratorio; b) comparación entre las conductividades medidas en las muestras, contra las conductividades obtenidas de forma teórica; c) determinación del balance iónico, para asegurar la cuantificación completa de los iones.

De manera general, se observó que existe un mayor sesgo en el balance iónico determinado para los sitios IG y TV, esto como consecuencia de una sobresaturación catiónica originada principalmente por el calcio y la falta de detección de aniones (Cl^- , F^- , PO_4^{3-} , HCO_3^- , Br^-). Es importante mencionar que, la metodología aplicada en el muestreo, de tipo abierto (colectores pasivos), y la geología del lugar rica en carbonatos de calcio, pudieron afectar la química total del agua de lluvia en estos dos lugares.

5.5 Modelo de retrotrayectorias

Se define como trayectoria, al conjunto de posiciones que ha asumido una partícula por efecto del movimiento de parcelas de aire individuales, la cual describe el camino recorrido por dicha partícula, para desplazarse de un punto a otro.

Las trayectorias de retroceso (*Backward trajectories*) son herramientas que permiten estimar el transporte de los contaminantes y los cambios en las concentraciones ambientales de los diferentes contaminantes a través del tiempo, relacionando las regiones donde se localizan las fuentes de emisión y las zonas receptoras de interés (NAPAP, 1990).

A través del seguimiento de las parcelas de aire que dieron origen a los eventos de lluvia registrados en las estaciones de muestreo, se elaboraron algunas trayectorias de retrocesos con el modelo HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), con el objetivo de indentificar las posibles fuentes de emisión de los contaminantes antropogénicos (SO_4^{2-} y NO_3^-).

El modelo de transporte y dispersión HYSPLIT está diseñado para soportar un amplio rango de simulaciones relacionadas con el transporte de partículas atmosféricas y la dispersión de contaminantes, así como la deposición de esos materiales sobre la superficie terrestre. HYSPLIT es una herramienta que ayuda a explicar cómo, dónde y cuándo sustancias químicas y materiales son transportados, dispersados y depositados. Los cálculos se realizan a partir de una partícula simple o *puff*, o siguiendo el movimiento dispersivo de un gran número de partículas (González Cairós *et al.*, 2009).

En cuanto al método de cálculo que usa HYSPLIT se basa en un modelo híbrido entre el euleriano y el lagrangiano (González Cairós *et al.*, 2009). El cálculo de la advección y difusión lo realiza en un marco lagrangiano, mientras que para la concentración utiliza un marco euleriano. El método euleriano describe la concentración estadística en términos de las velocidades eulerianas del fluido, es decir, velocidades medidas en puntos fijos. La aproximación lagrangiana describe la concentración de un contaminante en términos de las propiedades estadísticas de los desplazamientos de las partículas del fluido. Cuando se utiliza la metodología lagrangiana, las concentraciones se computan sumando la contribución de cada *puff* de contaminantes que se transporta a través de la malla siguiendo su trayectoria.

5.5.1 Análisis de las trayectorias

Metodológicamente se utilizó información proporcionada por el modelo de mesoescala HYSPLIT versión 4.0 utilizando datos archivados en el sistema GDAS (Global Data Assimilation

System), con el cual se midieron retrotrayectorias para un período de análisis de seis meses (mayo a octubre de 2017) para los tres sitios de muestreo. El cálculo de retrotrayectorias es de gran utilidad para determinar la zona de partida de las masas de aire que llegan en un momento determinado, a un lugar concreto y a una altura definida. De esta forma se obtuvieron retrotrayectorias diarias registradas a las 19:00 UTC (Tiempo Universal Coordinado), con cálculos a intervalos de seis horas, representando el transporte realizado por la masa de aire a las 72 horas anteriores al evento de la precipitación, ya que es el tiempo comúnmente aceptado como necesario para la incorporación de las partículas antropogénicas a las nubes (Celle-Jeanton *et al.*, 2008). Las alturas isentrópicas consideradas fueron de 500, 1000 y 2000 metros, medidas sobre el nivel del mar.

Se seleccionaron muestras de diferentes fechas para trazar las retrotrayectorias. Se tomaron en cuenta las concentraciones individuales de los iones SO_4^{2-} y NO_3^- como trazadores químicos de origen antropogénico, así como de las concentraciones individuales de azufre y pH para aquellas muestras de precipitación pluvial que presentaron altas y bajas concentraciones en estos elementos durante el período de lluvias 2017 en los tres sitios de muestreo. Como resultado se obtuvo un mapa por cada trayectoria, las cuales muestran el recorrido de la parcela de aire antes de incidir sobre la región de estudio.

CAPÍTULO 6 RESULTADOS

En el presente capítulo, se presentan los resultados del análisis químico de los aniones, cationes mayoritarios, metales, metaloides y no metales en la fracción soluble de las muestras de lluvia colectadas; posteriormente en el capítulo 7 se presenta la evaluación de los resultados.

El universo de estudio estuvo constituido por un total de 37 muestras para IG (zona urbana), 28 para TV (zona rural) y 66 para TX (zona urbana), que corresponde al número de muestras colectadas, en el período de muestreo 2017 (mayo a octubre).

Previo al análisis estadístico, se llevó a cabo la prueba de normalidad de Kolmogórov-Smirnov con corrección de significación propuesta por Lilliefors, esta prueba se realizó utilizando el paquete estadístico IBM-SPSS Statistics, en ella se observó que no existe normalidad en los datos de las concentraciones de cada elemento para los tres sitios de muestreo.

Asumiendo la no normalidad, a los resultados obtenidos se les realizó un análisis estadístico no paramétrico de varianza (prueba de Kruskal Wallis) para constatar que no existieran diferencias estadísticamente significativas entre las tres estaciones de muestreo. Este análisis se aplica para contrastar la hipótesis nula de que las medias de distintas poblaciones coinciden. Se adoptó como referencia un *p-valor* <0.05 para rechazar la hipótesis nula (Tablas 6.1 y 6.2).

Las concentraciones obtenidas por medio de los análisis químicos fueron procesadas para obtener concentraciones promedio ponderadas por volumen (CPPV) o su sigla en inglés VVMC (*Volume Weighted Mean Concentration*), que resulta en una ponderación de la concentración de cada elemento determinado en el agua de lluvia (x) respecto de la cantidad de precipitación medida en el pluviómetro (w) (Galloway *et al.*, 1984). Las CPPV se obtienen multiplicando cada una de las concentraciones de cada elemento por su ponderación (mm de lluvia) para luego sumarlos, obteniendo así una suma ponderada; misma que, después se divide entre la suma de los mm de lluvia:

$$CPPV = \frac{\sum_{i=1}^n x_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} = \frac{x_1 w_1 + x_2 w_2 + x_3 w_3 + \dots + x_n w_n}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n} \quad (\text{Ecuación 6.1})$$

Dado que no existe normalidad en los datos, se aplicó el análisis de correlación de Rho Spearman para establecer si existe asociación entre los metales, metaloides, elementos traza, iones inorgánicos y los parámetros fisicoquímicos determinados en cada sitio de muestreo. Este

análisis se realizó empleando el paquete estadístico IBM-SPSS Statistics. Así mismo, se realizaron análisis de componentes principales (ACP), con el fin de identificar posibles influencias de fuentes de aporte a la atmósfera de la zona, sean estas naturales o antropogénicas.

Previo a la aplicación del análisis multivariado, se procedió a la estandarización de los datos, para lo cual se utilizó la fórmula de tipificación de la Ley Normal. El ACP se realizó utilizando el programa StatSoft-STATISTICA, se adoptó como criterio de selección de componentes aquellas variables que tuvieran autovalores mayores a 1, varianza representada mayor al 10% y/o el total de componentes consideradas que contabilice una varianza total acumulada superior al 50%.

Se calculó el factor de enriquecimiento (*FE*) para evaluar el origen natural o antropogénico de los elementos analizados en el agua de lluvia, con respecto a la composición de una corteza promedio y una local (roca y suelo de la región).

Se utilizó el modelo híbrido HYSPLIT, para el cálculo de las trayectorias de retroceso, con el fin propósito de determinar el probable origen de una parcela de aire y poder tener una visión aproximada de la influencia de las emisiones 72 horas atrás.

En el Anexo (Tablas A1.1 a A1.6) se observan las fechas, cantidad de lluvia, valor de pH, conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$, concentración de elementos mayoritarios disueltos en $\mu\text{Eq}/\text{L}$ y metales, metaloides y elementos traza en $\mu\text{g}/\text{L}$, determinados en las muestras de agua de lluvia colectadas en los tres sitios de muestreo para el año 2017.

6.1 Prueba Kruskal-Wallis

Tabla 6.1 Análisis no paramétrico de varianza Kruskal-Wallis aplicado a iones inorgánicos entre sitios de muestreo. Números en negro indican un nivel de significancia *p*-valor >0.05.

Elemento	Todos los sitios	IG-TV	TV-TX	TX-IG
Ca ²⁺	0.000	0.008	0.008	0.000
K ⁺	0.007	0.331	0.083	0.003
Mg ⁺	0.912	0.858	0.954	0.640
Na ²⁺	0.248	0.106	0.583	0.207
NO ₃ ⁻	0.247	0.446	0.109	0.362
SO ₄ ²⁻	0.912	0.853	0.682	0.810

Tabla 6.2 Análisis no paramétrico de varianza Kruskal-Wallis aplicado a elementos traza entre sitios de muestreo. Números en negro indican un nivel de significancia *p-valor* >0.05.

Elemento	Todos los sitios	IG-TV	TV-TX	TX-IG
Al	0.000	0.005	0.000	0.167
As	0.000	0.000	0.001	0.000
Ba	0.102	0.059	0.059	0.500
Fe	0.000	0.001	0.875	0.000
Mn	0.854	0.735	0.931	0.571
S	0.000	0.000	0.000	0.100
Si	0.051	0.052	0.735	0.025
Sr	0.946	0.791	0.563	0.973
Zn	0.000	0.000	0.006	0.000

6.2 Aniones y cationes mayoritarios

Se detectó en más del 70% de las 131 muestras de agua de lluvia un total de 2 aniones (NO_3^- y SO_4^{2-}) y 4 cationes (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y Na^+) para los sitios de muestreo IG, TV y TX. Las tres estaciones presentaron diferente desviación estándar entre iones, es decir, la distancia promedio de sus valores hacia la media resultó ser diferente.

En la Tabla 6.3 se presentan las concentraciones promedio ponderadas por volumen (CPPV), media, mediana, desviación estándar (DS), coeficiente de variación en porcentaje (CV) máximo y mínimo en $\mu\text{Eq/L}$ de los iones inorgánicos, pH y conductividad determinados en el agua de lluvia de los tres sitios de muestreo.

En la Figura 6.1 se representan en forma de histograma las CPPV de iones inorgánicos en el agua de lluvia en microequivalentes sobre litro ($\mu\text{Eq/L}$) y su comparación entre los tres sitios de muestreo. De manera general se observó el siguiente orden de concentración en todos los sitios de estudio: $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$.

Tabla 6.3 pH, conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (CE), y concentración de elementos mayoritarios disueltos ($\mu\text{Eq}/\text{L}$) en aguas de lluvia colectadas en los tres sitios de interés (Período 2017).

Elemento LD	pH	CE	Ca ²⁺ 0.1	K ⁺ 0.4	Mg ²⁺ 5	Na ⁺ 0.2	NO ₃ ⁻ 60.3	SO ₄ ²⁻ 60.3
IGUALA DE LA INDEPENDENCIA <i>n = 37</i>								
Media	6.05	21.31	112.75	2.38	20.38	13.33	33.49	41.91
Mediana	0.85	13.87	106.97	1.59	7.31	7.94	33.87	38.33
DS	0.55	8.72	29.19	2.13	26.7	13.14	12.3	19.36
CV	9.03	40.93	0.26	0.89	1.31	0.99	0.37	0.46
Máximo	7.78	39.4	170	12.79	123.77	42.04	62.74	95.42
Mínimo	4.78	5.5	64.54	1.28	0.07	0.88	6.77	13.13
CPPV	5.92	18.15	110.69	0.67	18.84	11.34	32.97	39.94
TAXCO EL VIEJO <i>n = 28</i>								
Media	5.8	17.19	93.31	3.35	17.22	7.56	30.77	41.61
Mediana	5.8	15.8	88.25	1.91	10.66	4.17	32.98	41.56
DS	0.54	7.7	28	3.97	18.29	8.12	11.04	18.01
CV	9.3	44.77	0.3	1.19	1.06	1.07	0.36	0.43
Máximo	7	38.2	148	20.69	58.2	31.74	50	69.58
Mínimo	4.9	7.1	56.62	1.28	0.32	0.88	11.45	7.71
CPPV	5.73	14.94	85.7	2.67	15.04	5.23	34.41	36.73
TAXCO DE ALARCÓN <i>n = 66</i>								
Media	5.71	17.77	77.45	6.63	15.62	10.97	35.77	39.81
Mediana	5.68	16.2	69.64	2.72	9.63	4.78	37.5	43.33
DS	0.74	8.43	25.78	13.11	18.4	12.64	14.87	15.61
CV	13.03	47.44	0.33	1.98	1.18	1.15	0.42	0.39
Máximo	7.5	49.5	151.5	97.95	78.69	55.83	67.26	75.83
Mínimo	4.3	4.2	40.75	0.77	0.33	0.88	7.74	3.13
CPPV	5.68	16.66	76.14	5.22	14.33	11.84	34.09	41.25

LD = Límite de detección en $\mu\text{g}/\text{L}$.

DS = Desviación estándar.

CV = Coeficiente de variación en por ciento.

CPPV = Concentración promedio ponderada por volumen.

n = Número de muestras.

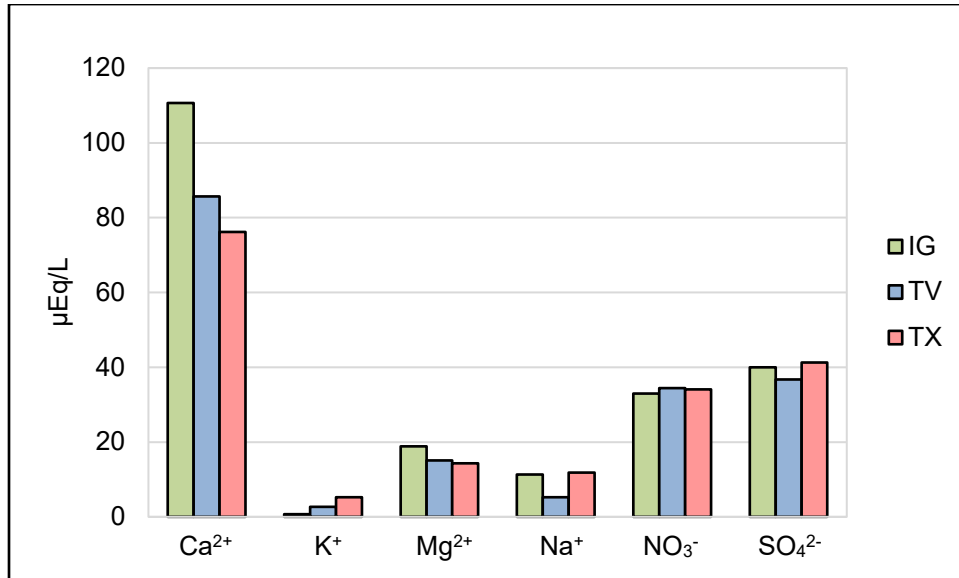


Figura 6.1 Histograma de las concentraciones promedio ponderadas por volumen (CPPV) de cationes y aniones ($\mu\text{Eq/L}$) en muestras de lluvia de los tres sitios de muestreo durante el período 2017.

6.3 Metales, metaloides y no metales

Se detectó en más del 70% de las 131 muestras de agua de lluvia un total de 6 metales (Al, Ba, Fe, Mn, Sr y Zn), 2 metaloides (As y Si) y 1 no metal (S) para los sitios de muestreo IG y TV, mientras que, en el sitio TX, se detectaron 7 metales (Al, Ba, Cu, Fe, Mn, Sr y Zn), 2 metaloides (As y Si) y 1 no metal (S). Las tres estaciones presentaron diferente desviación estándar entre iones, es decir, la distancia promedio de sus valores hacia la media resultó ser diferente.

En la Tabla 6.4 se presentan las concentraciones promedio ponderadas por volumen (CPPV), media, mediana, desviación estándar (DS), coeficiente de variación en porcentaje (CV) máximo y mínimo en $\mu\text{g/L}$ de los metales, metaloides y no metales determinados en el agua de lluvia de los tres puntos de interés.

En la Figura 6.2 se representan en forma de histograma las CPPV de elementos metálicos y no metálicos en el agua de lluvia en microgramo sobre litro ($\mu\text{g/L}$) y su comparación entre los tres sitios de muestreo. De manera general se observó el siguiente orden de concentración: [1] Iguala de la Independencia: S > Si > Al > Fe > Mn > Zn > Ba > As > Sr; [2] Taxco el Viejo: S > Al > Si > Zn > Fe > Mn > As > Ba > Sr; [3] Taxco de Alarcón: S > Al > Zn > Si > Fe > Mn > As > Sr > Ba > Cu.

Tabla 6.4 Concentración de metales, metaloides y no metales disueltos ($\mu\text{g/L}$) en aguas de lluvia colectadas en los tres sitios de interés (Período 2017).

Elemento LD	Al	As	Ba	Cu	Fe	Mn	S	Si	Sr	Zn
	5	0.1	0.1	0.4	5	0.2	60.3	4.6	0.1	0.7
IGUALA DE LA INDEPENDENCIA										
<i>n = 37</i>										
Media	44.65	4.06	4.98	<LD	19.3	14.57	457.61	57.99	3.62	7.03
Mediana	42	4.18	4.5	<LD	12	7	459.1	49.9	3	6.3
DS	24.7	0.92	2.9	<LD	22.2	14.09	40.6	35.36	2.83	3.94
CV	55.32	22.77	58.31	<LD	115.03	96.69	8.87	60.98	78.23	56.03
Máximo	96	6.09	12.6	<LD	85	44.2	535.4	127.3	11.5	15
Mínimo	8	2.29	1.2	<LD	5	0.2	392.6	16.4	0.1	1.1
CPPV	41.09	4	5.13	<LD	19.24	12.82	457.62	56.96	3.35	6.3
TAXCO EL VIEJO										
<i>n = 28</i>										
Media	38.18	8.75	6.51	<LD	28.29	22.05	640.88	39.55	4.95	28.35
Mediana	36.5	8.74	5.45	<LD	25.5	10.5	645.25	35.95	3.8	25.95
DS	18.37	1.65	3.72	<LD	15.7	32.6	40.23	26.93	4.88	12
CV	48.11	18.8	57.16	<LD	55.5	147.85	6.28	68.09	98.66	42.32
Máximo	87	13.93	18.1	<LD	68	120	731	137	15.3	62.7
Mínimo	5	6.35	0.8	<LD	5	0.2	570.3	4.6	0.1	13.7
CPPV	33.66	9.03	5.86	<LD	26.45	16.56	633.39	33.46	3.43	28.27
TAXCO DE ALARCÓN										
<i>n = 66</i>										
Media	51.89	10.53	6.32	3.74	30.79	15.78	473.36	39.08	8.07	42.21
Mediana	46.5	10.03	3.7	1.52	26	7.9	470.95	36.1	2.2	48.25
DS	25.97	2.69	6.67	3.38	19.75	22.36	40.97	20.36	11.12	23.25
CV	50.04	25.58	105.5	80.36	64.14	141.66	8.66	52.09	137.79	55.09
Máximo	96	18.74	30.2	15.5	78	99	583	87.2	44	99
Mínimo	5	4.52	0.1	0.4	5	0.2	390	4.6	0.1	0.7
CPPV	50.32	10.74	5.95	4	32.85	17.53	476.86	39.50	8.39	43.09

LD = Límite de detección en $\mu\text{g/L}$.

DS = Desviación estándar.

CV = Coeficiente de variación en porcentaje.

CPPV = Concentración promedio ponderada por volumen.

n = Número de muestras.

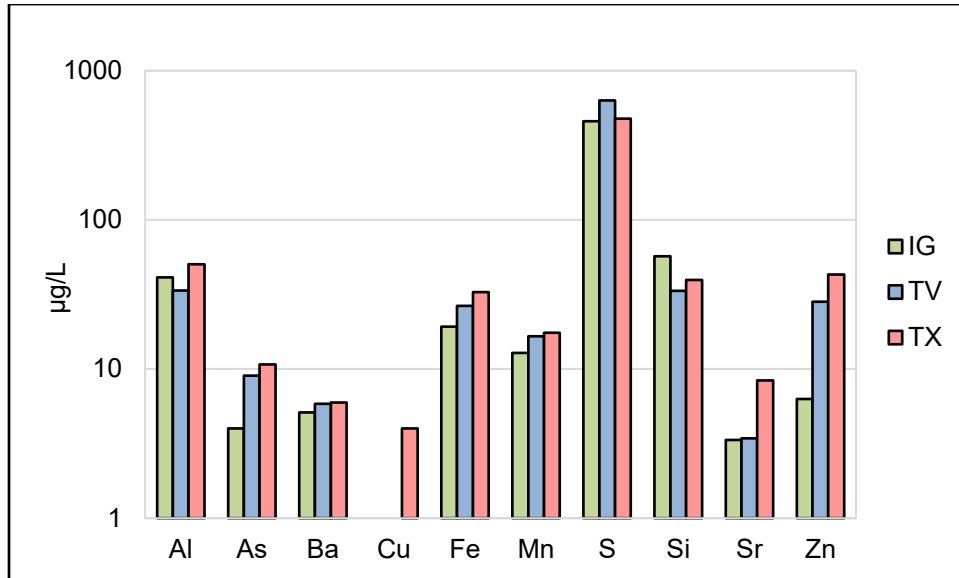


Figura 6.2 Histograma de las concentraciones promedio ponderadas por volumen (CPPV) de metales, metaloides y no metales (µg/L) en muestras de lluvia de los tres sitios de muestreo durante el período 2017.

6.4 Coeficientes de correlación Rho Spearman

Dado que los datos obtenidos en los tres sitios de muestreo no cumplen el supuesto de normalidad, se optó por la realización de tres diagramas de correlación Rho Spearman entre metales, metaloides, no metales, elementos mayoritarios y parámetros fisicoquímicos determinados en agua de lluvia para cada uno de los sitios de estudio, para establecer si existe asociación entre los metales e iones inorgánicos considerados en el estudio.

Las Tablas 6.5, 6.6 y 6.7, muestran las correlaciones entre metales, metaloides, elementos traza, iones inorgánicos y los parámetros fisicoquímicos determinados en cada sitio de muestreo. En ellas se encontró relación directa entre los metales Ba, Mn y Sr, y entre los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} ya que el $p\text{-valor} \geq 0.05$ (Números en negro).

Tabla 6.5 Análisis de correlación de Rho Spearman entre metales, metaloides, no metales, elementos mayoritarios y parámetros fisicoquímicos determinados en lluvia en Iguala de la Independencia (IG). Números en negro indican correlación significativa ≥ 0.05 , $n = 37$.

	Al	As	Ba	Fe	Mn	S	Si	Sr	Zn	Ca ₂ ⁺	K ⁺	Mg ₂ ⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	pH	EC
Al	1.000	.029	-.253	.177	-.108	.352	.030	.296	.259	.118	.059	.082	.053	.209	-.024	-.005	-.058
As		1.000	-.215	-.027	.066	-.151	-.174	.090	.089	-.041	.161	.166	.039	.177	.097	.111	-.234
Ba			1.000	.135	.514	.030	-.196	.589	.194	.190	-.166	.413	.255	.203	.272	.102	.061
Fe				1.000	.229	.230	.172	.158	.235	.075	.490	.292	.112	-.032	.537	-.081	.134
Mn					1.000	.158	.092	.693	-.148	.134	.183	.284	.240	-.124	.204	-.026	.053
S						1.000	.123	.189	.177	.048	-.075	.101	.111	.068	.083	.005	-.032
Si							1.000	.083	.069	.163	.236	.015	-.073	-.044	-.098	.063	.025
Sr								1.000	.279	.454	.259	.629	.628	.509	.178	.266	.477
Zn									1.000	.236	-.133	.346	.341	.206	.286	.311	-.029
Ca ₂ ⁺										1.000	-.031	.513	.504	.528	.117	.403	.282
K ⁺											1.000	.057	.127	-.058	.297	.126	.154
Mg ₂ ⁺												1.000	.612	.425	.424	.384	.275
Na ⁺													1.000	.583	.329	.325	.124
NO ₃ ⁻														1.000	.163	.244	.170
SO ₄ ²⁻															1.000	.318	.287
pH																1.000	.291
CE																	1.000

Tabla 6.6 Análisis de correlación de Rho Spearman entre metales, metaloides, no metales, elementos mayoritarios y parámetros fisicoquímicos determinados en lluvia en Taxco el Viejo (TV). Números en negro indican correlación significativa ≥ 0.05 , $n = 28$.

	Al	As	Ba	Fe	Mn	S	Si	Sr	Zn	Ca ₂ ⁺	K ⁺	Mg ₂ ⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	pH	EC	
Al	1.000	-0.582	-.131	.185	-.012	.046	.113	-.227	-.491	.363	.497	.029	.065	-.364	.434	.172	.134	
As		1.000	.197	.034	.340	-.043	.013	.415	.245	-.027	-.068	.252	.133	.349	-.154	.074	-.099	
Ba			1.000	.100	.551	.008	.220	.682	.106	.168	-.006	.333	.451	-.227	-.091	.170	.121	
Fe				1.000	.043	-.007	.385	.262	-.079	.037	.125	.121	.128	-.274	.299	-.049	-.317	
Mn					1.000	.381	-.027	.793	.274	.496	.305	.852	.642	-.179	.218	.285	.113	
S						1.000	-.213	.153	-.235	.190	.151	.401	.470	-.135	.201	-.100	-.172	
Si							1.000	.214	.227	.221	.209	-.079	.155	-.261	.111	.091	-.124	
Sr								1.000	.313	.313	.282	.729	.702	-.141	.032	.151	.185	
Zn									1.000	-.101	-.179	.183	.094	.207	-.207	.035	-.057	
Ca ₂ ⁺										1.000	.357	.381	.525	-.214	.482	.547	-.189	
K ⁺											1.000	.358	.409	-.195	.270	-.024	-.169	
Mg ₂ ⁺												1.000	.668	-.055	.042	.259	.351	
Na ⁺													1.000	-.162	.154	.206	-.057	
NO ₃ ⁻														1.000	-.639	-.181	-.223	
SO ₄ ²⁻															1.000	.279	.006	
pH																1.000	.140	
CE																		-.108

Tabla 6.7 Análisis de correlación de Rho Spearman entre metales, metaloides, no metales, elementos mayoritarios y parámetros fisicoquímicos determinados en lluvia en Taxco de Alarcón (TX). Números en negro indican correlación significativa ≥ 0.05 , $n = 66$.

	Al	As	Ba	Cu	Fe	Mn	S	Si	Sr	Zn	Ca ₂ ⁺	K ⁺	Mg ₂ ⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	pH	EC	
Al	1.000	.071	.032	.012	.470	-.110	-.207	.291	-.073	.145	-.240	.074	-.146	-.094	-.029	.039	-.162	.134	
As		1.000	-.005	.113	.088	.119	.000	.257	.027	.106	.040	-.052	.142	.079	-.096	.112	-.218	-.099	
Ba			1.000	.259	.019	.595	.101	.335	.528	-.036	.457	.208	.623	.483	.500	.361	.257	.121	
Cu				1.000	.186	.314	-.160	.223	.459	.304	.051	.130	.363	.456	.295	.317	.079	-.123	
Fe					1.000	.055	-.280	.375	.070	-.016	-.348	.189	-.107	.101	.122	.221	-.105	.113	
Mn						1.000	-.012	.284	.792	.287	.485	.017	.763	.736	.309	.328	.147	-.172	
S							1.000	-.115	-.073	.060	.231	-.329	-.009	-.154	-.103	-.123	-.153	-.124	
Si								1.000	.318	.196	-.047	.121	.316	.351	.281	.353	-.169	.185	
Sr									1.000	.336	.359	-.055	.732	.802	.251	.445	.123	-.057	
Zn										1.000	.128	-.296	.251	.379	.001	.103	-.179	-.189	
Ca₂⁺											1.000	-.009	.573	.368	.313	.039	.087	-.169	
K⁺												1.000	.130	-.060	.182	.317	.208	.351	
Mg₂⁺													1.000	.671	.451	.247	.121	-.057	
Na⁺														1.000	.317	.424	.166	-.223	
NO₃⁻															1.000	.126	.157	.006	
SO₄²⁻																1.000	.123	.140	
pH																	1.000	-.108	
CE																			1.000

6.5 pH y conductividad

En la Figura 6.3 se observan las concentraciones promedio ponderadas por volumen (CPPV) de pH y conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) obtenidas en los tres sitios de muestreo.

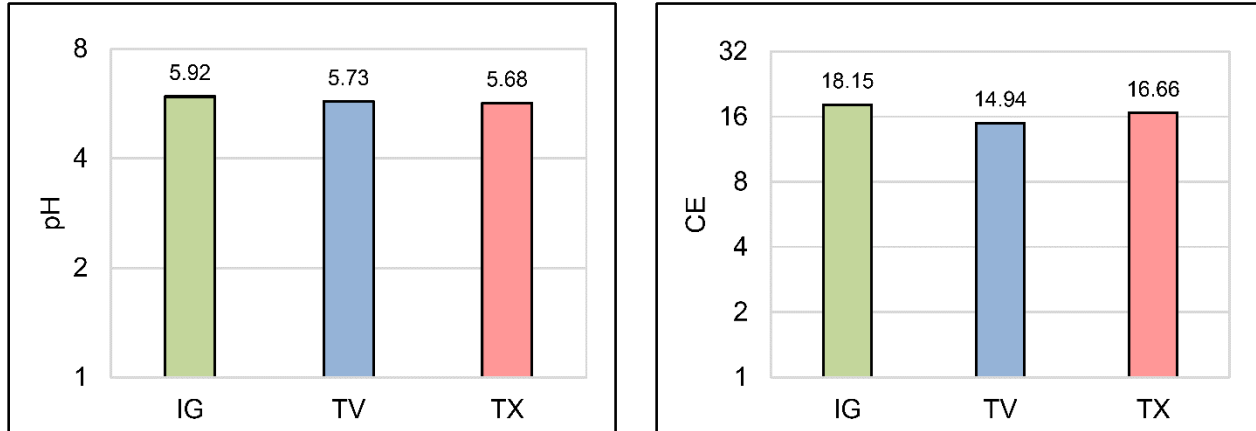


Figura 6.3 Concentraciones promedio ponderadas por volumen (CPPV) de pH y CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de los tres sitios de muestreo.

6.6 Análisis de componentes principales (ACP)

Las Tablas 6.8, 6.9 y 6.10 muestran el análisis de los tres componentes principales y porcentaje de varianza, originados a partir de las concentraciones de iones inorgánicos, metales, metaloides y elementos traza determinados en agua de lluvia para los tres sitios de muestreo.

Las Figuras 6.4, 6.5 y 6.6 muestran el gráfico ACP, presentando la posible asociación entre los iones inorgánicos, metales, metaloides y elementos traza en la fracción soluble del agua de lluvia para cada uno de los tres sitios de muestreo durante el período de muestreo 2017. Así mismo, se muestra un plano factorial en dos dimensiones el cual permite visualizar relaciones de correlación entre las variables originales con los componentes principales.

Con el objetivo de demostrar asociaciones entre los valores de cobre obtenidos en la fracción soluble del agua de lluvia del sitio TX, con respecto a las concentraciones del mismo elemento determinadas en depósitos jales de la región (Talavera-Mendoza *et al.*, 2005) (Figura 4.3), se optó por realizar un ACP. La Tabla 6.11 muestra el análisis de los tres componentes principales originados a partir de las concentraciones de cobre obtenidas en el sitio TX y las concentraciones de cobre determinadas en los siete depósitos de jales de la zona. La Figura 6.7 muestra el gráfico de componentes principales (*score plot*), el cual permite visualizar relaciones de correlación entre las variables originales con los ejes factoriales de la Tabla 6.11.

Tabla 6.8 Análisis de Componentes Principales, desarrollado sobre los datos químicos estandarizados de componentes disueltos en el agua de lluvia del sitio IG durante el período de muestreo 2017. Números en negro indican mejor correlación (Nivel de significancia >0.5), $n = 37$.

	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Al	-0.04	0.40	0.69
As	-0.03	-0.25	0.46
Ba	0.60	-0.35	-0.13
Fe	-0.08	0.63	0.05
Mn	0.05	0.63	-0.49
S	0.05	0.53	0.35
Si	0.07	0.50	-0.07
Sr	0.54	0.37	0.29
Zn	0.37	0.04	0.68
Ca ²⁺	0.70	0.22	-0.08
K ⁺	-0.05	0.24	-0.01
Mg ²⁺	0.78	-0.05	0.13
Na ⁺	0.77	-0.09	0.14
NO ₃ ⁻	0.69	-0.14	0.15
SO ₄ ²⁻	0.47	0.03	-0.04
% Varianza	22.37	13.26	9.9

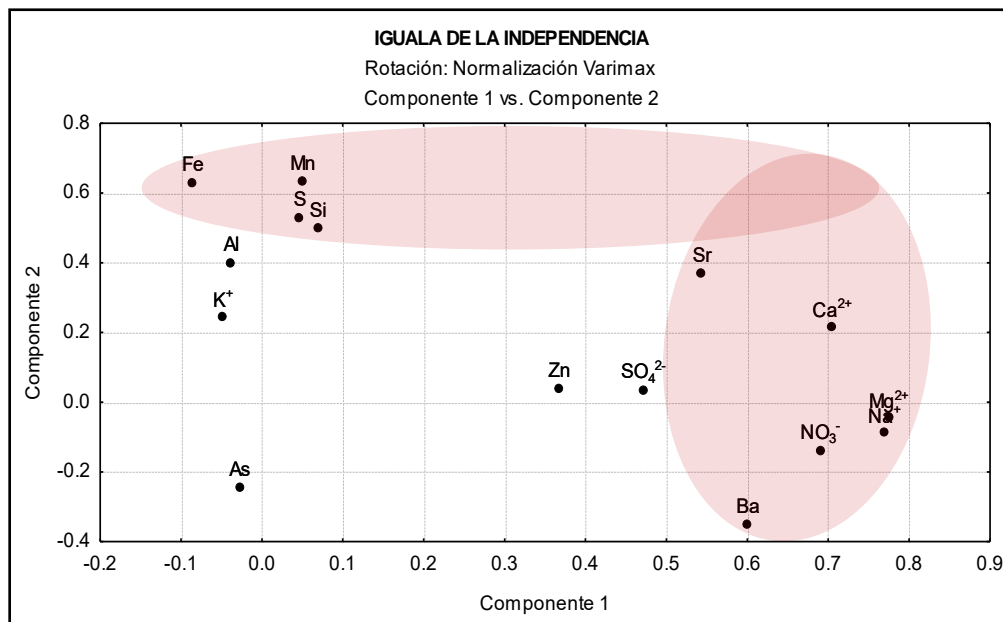


Figura 6.4 Gráfico de componentes principales (*score plot*) en dos dimensiones de la Componente Principal 1 vs. Componente Principal 2 del sitio IG. Datos encerrados en rojo explican el 35.63% de la varianza total.

Tabla 6.9 Análisis de Componentes Principales, desarrollado sobre los datos químicos estandarizados de componentes disueltos en el agua de lluvia del sitio TV durante el período de muestreo 2017. Números en negro indican mejor correlación (Nivel de significancia >0.5), $n = 28$.

	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Al	-0.41	0.79	0.07
As	0.71	-0.19	0.05
Ba	0.73	0.06	0.07
Fe	0.14	0.73	-0.13
Mn	0.54	-0.06	0.52
S	-0.18	-0.04	0.81
Si	0.33	0.71	-0.26
Sr	0.86	0.19	0.24
Zn	0.54	-0.29	-0.01
Ca ²⁺	0.04	0.40	0.52
K ⁺	-0.22	0.53	0.23
Mg ²⁺	0.26	-0.04	0.68
Na ⁺	0.36	0.14	0.66
NO ₃ ⁻	0.02	-0.65	-0.08
SO ₄ ²⁻	-0.24	0.60	0.31
% Varianza	22.63	21.68	12.18

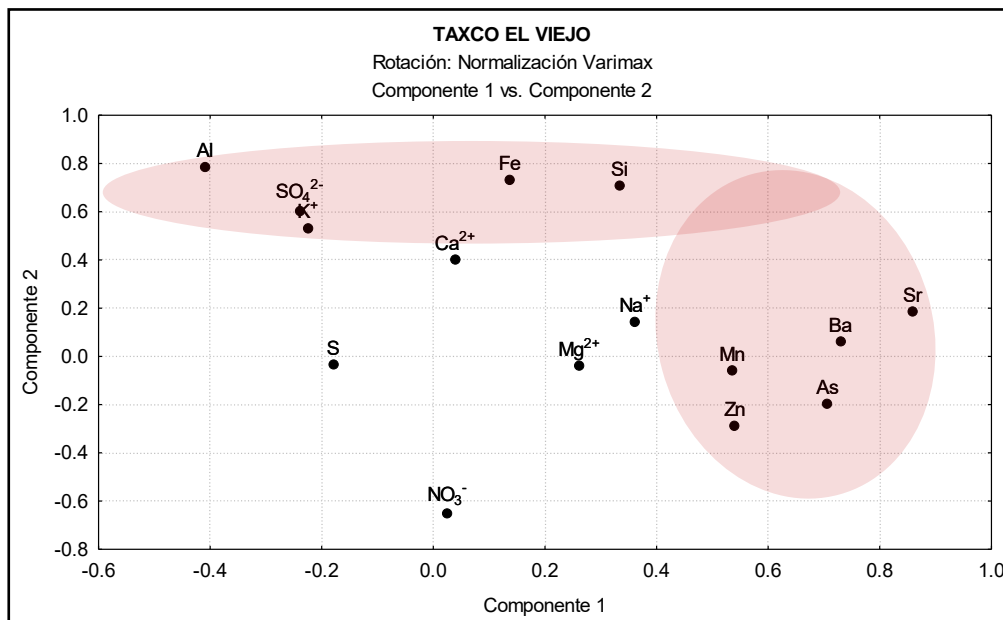


Figura 6.5 Gráfico de componentes principales (*score plot*) en dos dimensiones de la Componente Principal 1 vs. Componente Principal 2 del sitio TV. Datos encerrados en rojo explican el 44.31% de la varianza total.

Tabla 6.10 Análisis de Componentes Principales, desarrollado sobre los datos químicos estandarizados de componentes disueltos en el agua de lluvia del sitio TX durante el período de muestreo 2017. Números en negro indican mejor correlación (Nivel de significancia >0.5), $n = 66$.

	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Al	-0.13	0.64	-0.14
As	0.16	0.34	-0.04
Ba	0.75	0.08	0.07
Cu	0.35	0.33	0.40
Fe	-0.16	0.73	0.05
Mn	0.21	-0.10	0.75
S	0.12	-0.52	-0.08
Si	0.18	0.66	0.23
Sr	0.33	-0.02	0.81
Zn	-0.16	0.01	0.68
Ca ²⁺	0.73	-0.30	0.11
K ⁺	0.40	0.62	-0.02
Mg ²⁺	0.77	-0.01	0.26
Na ⁺	0.29	0.16	0.77
NO ₃ ⁻	0.64	0.15	0.15
SO ₄ ²⁻	0.08	0.48	0.43
% Varianza	25.83	15.38	9.95

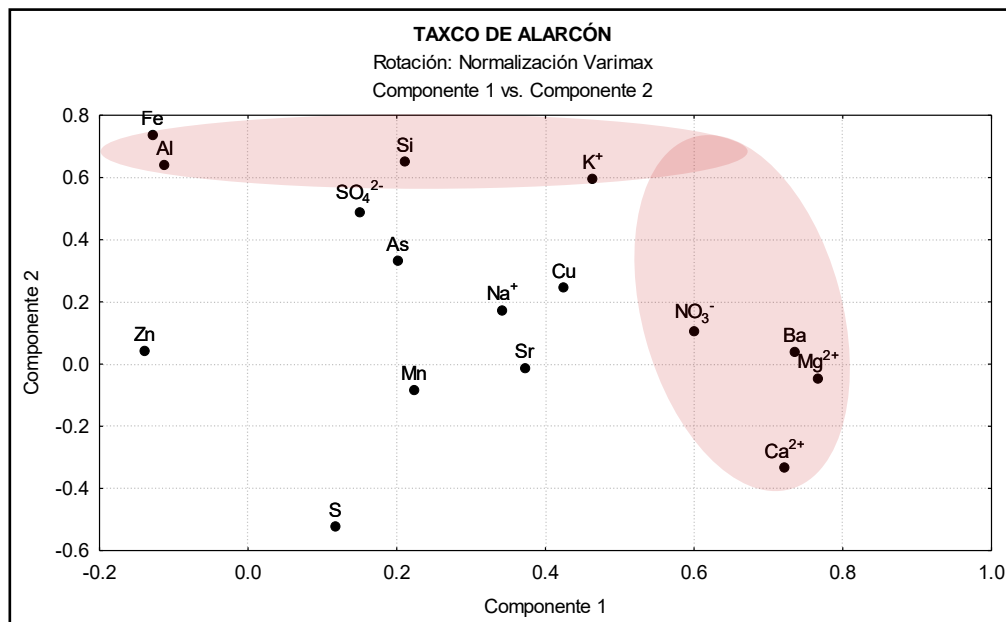


Figura 6.6 Gráfico de componentes principales (*score plot*) en dos dimensiones de la Componente Principal 1 vs. Componente Principal 2 del sitio TX. Datos encerrados en rojo explican el 40.38 % de la varianza total.

Tabla 6.11 Análisis de Componentes Principales, desarrollado sobre los datos químicos estandarizados del cobre disuelto en el agua de lluvia del sitio TX durante el período de muestreo 2017, y concentraciones de cobre de siete depósitos de jales de la región (Talavera-Mendoza *et al.*, 2005). Números en negro indican mejor correlación (Nivel de significancia >0.5).

	Componente 1	Componente 2	Componente 3
TX-Cu	0.88	0.02	0.47
EF-Cu	0.14	0.92	-0.36
LC-Cu	0.12	-0.01	0.99
ES-Cu	0.84	-0.07	0.53
GRO1-Cu	-0.29	0.94	0.19
GRO2-Cu	0.93	0.22	-0.19
LJ-Cu	0.55	0.73	-0.19
SA-Cu	0.39	0.78	0.44
% Varianza	47.53	32.09	17.49

Depósitos de jales: EF= El Fraile; LC= La Concha; ES= El Solar; GRO1= Guerrero1; GRO2= Guerrero 2; LJ= Los Jales; SA= San Antonio.

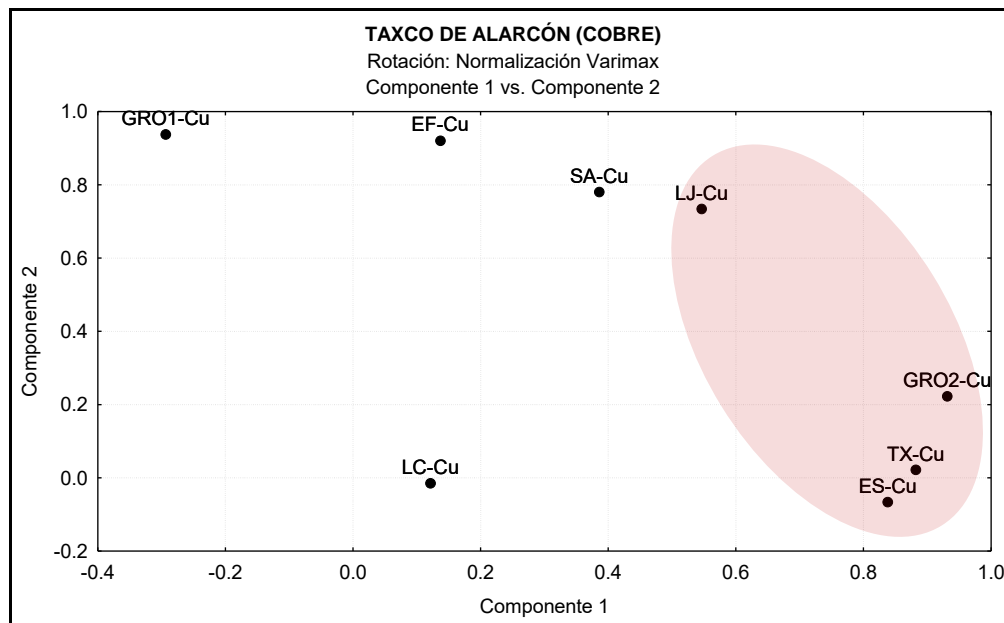


Figura 6.7 Gráfico de componentes principales (*score plot*) en dos dimensiones de la Componente Principal 1 vs. Componente Principal 2 de las concentraciones de cobre en agua de lluvia del sitio TX, y concentraciones de cobre de siete depósitos de jales de la región (Talavera-Mendoza *et al.*, 2005). Datos encerrados en rojo explican el 47.53 % de la varianza total.

6.7 Factor de enriquecimiento

El factor de enriquecimiento (FE), es utilizado en estudios de química ambiental como marco de referencia para la determinación de enriquecimientos anormales por metales e iones mayoritarios en la atmósfera (Rahn, 1976; Báez *et al.*, 2007; Romero, 2017). Este factor considera los elementos más abundantes de la corteza terrestre, tales como Al, Fe, Si, permitiendo la evaluación del enriquecimiento antropogénico de un sitio a partir de trazadores litogénicos (Rahn, 1976; Mason y Moore, 1982; Báez *et al.*, 2007; Romero, 2017). Sin embargo, dado que ni la corteza terrestre ni las rocas promedio se encuentran en la superficie en la mayoría de las partes del mundo, pero sí lo hacen los suelos orgánicos y las plantas, uno podría cuestionar la validez general del uso de elementos litogénicos como referencia. En realidad, podría ser más realista usar un elemento biogénico. Uno de estos elementos, que también se usa a veces como elemento conservativo de referencia, es el Mn (Loska *et al.*, 1997; Reimann y De Caritat, 2005). El modelo del factor de enriquecimiento se representa de la siguiente manera:

$$FE = \frac{\left(\frac{X}{X_i}\right)_{lluvia}}{\left(\frac{X}{X_i}\right)_{corteza}} \quad (\text{Ecuación 6.2})$$

Donde los términos $\left(\frac{X}{X_i}\right)_{lluvia}$ y $\left(\frac{X}{X_i}\right)_{corteza}$ denotan una relación normalizada entre la concentración del elemento X con respecto a un elemento conservativo X_i . $(X)_{lluvia}$, es la concentración media ponderada del elemento en la muestra de agua de lluvia, mientras que, $(X)_{corteza}$, es la concentración media del mismo elemento en la corteza terrestre. Finalmente, X_i , es la concentración media del elemento de referencia en la muestra de lluvia y en la corteza (Schütz y Rahn, 1982).

Los elementos para los cuales la corteza terrestre es la única fuente de aporte tendrán un factor de enriquecimiento menor a la unidad. Para elementos que tienen otra fuente, además del material de la corteza, se espera que tengan un factor de enriquecimiento mayor a 1 (Rahn, 1976; Schütz y Rahn, 1982; Loska *et al.*, 1997; Báez *et al.*, 2007; García, *et al.*, 2017; Romero, 2017).

El análisis del factor de enriquecimiento permite identificar los elementos que se encuentran más concentrados con respecto a la composición geoquímica de una corteza media, para lo cual se utilizaron los valores promedio de la corteza continental superior propuestos por Lide (2007). Se utilizó como al manganeso con un valor base promedio de 950 ppm para la determinación del FE de los metales, metaloides y elementos traza. La Tabla 6.12 muestra los FE calculados para cada uno de los elementos determinados en los tres sitios.

Tabla 6.12 Cálculo del factor de enriquecimiento (*FE*) por área de muestreo, utilizando como referencia los valores elementales de la corteza continental superior (Lide, 2007). Números en negro indican enriquecimiento antropogénico.

Elemento	CC ¹	CPPV ²			FE ³		
		IG <i>n</i> = 37	TV <i>n</i> = 28	TX <i>n</i> = 66	IG	TV	TX
Al	82,300	0.041	0.034	0.050	0.03	0.02	0.03
As	1.8	0.004	0.009	0.011	148.70	287.63	323.40
Ba	425	0.005	0.006	0.006	0.81	0.79	0.75
Cu	60	<LD	<LD	0.004	---	---	3.61
Fe	56,300	0.019	0.026	0.033	0.02	0.03	0.03
S	350	0.458	0.633	0.477	87.38	103.79	73.83
Si	282,000	0.057	0.033	0.039	0.01	0.01	0.01
Sr	370	0.003	0.003	0.008	0.60	0.53	1.23
Zn	70	0.006	0.028	0.043	6.02	23.16	33.36

¹Concentración promedio en la Corteza Terrestre en ppm (Lide, 2007).

²Concentración promedio ponderada por volumen del elemento en muestras de lluvia en ppm.

³Factor de enriquecimiento.

LD = Límite de detección.

n= Cantidad de muestras de lluvia colectadas.

Considerando que podrían existir diferencias en la composición química de la corteza local y la corteza promedio propuesta por Lide (2007), se utilizaron los valores promedio de concentraciones elementales de rocas y suelos del cuadrante de estudio (Ramírez-Guzmán, 2010). En este caso se asume que las rocas y el suelo caracterizan y representan la corteza terrestre local, por lo cual, valores iguales o menores a la unidad indicarían que la única fuente de aporte para estos elementos es la corteza del sitio. Se utilizó como al Mn, con un valor base promedio de 209.61 ppm en rocas y 155.12 ppm en suelos.

La Tabla 6.13 muestra los *FE* calculados para el Al, As, Ba, Cu, Fe, Mn Sr y Zn tomando como base los valores promedio de roca determinados en el área de estudio. La Tabla 6.14 muestra los *FE* calculados para el Al, As, Ba, Cu, Fe, Mn y Zn tomando como base los valores promedio de suelos definidos en el cuadrante de estudio.

Tabla 6.13 Cálculo del factor de enriquecimiento (*FE*) por área de muestreo, utilizando como referencia valores elementales promedio de rocas del cuadrante de estudio (Ramírez-Guzmán, 2010). Números en negro indican enriquecimiento antropogénico.

Elemento	CR ¹	CPPV ²			FE ³		
		IG <i>n</i> = 37	TV <i>n</i> = 28	TX <i>n</i> = 66	IG	TV	TX
Al	19,100	0.041	0.034	0.050	0.03	0.02	0.03
As	70.98	0.004	0.009	0.011	0.89	1.61	1.81
Ba	84.29	0.005	0.006	0.006	0.97	0.88	0.84
Cu	40.14	<LD	<LD	0.004	---	---	1.19
Fe	36,000	0.019	0.026	0.033	0.01	0.01	0.01
Sr	287.9	0.003	0.003	0.008	0.18	0.15	0.35
Zn	100.33	0.006	0.028	0.043	0.99	3.57	5.14

¹Concentración elemental en rocas de la zona de estudio en ppm (Ramírez-Guzmán, 2010).

²Concentración promedio ponderada por volumen del elemento en muestras de lluvia en ppm.

³Factor de enriquecimiento.

LD = Límite de detección.

n = Número total de muestras de lluvia colectadas.

Tabla 6.14 Cálculo del factor de enriquecimiento (*FE*) por área de muestreo, utilizando como referencia valores elementales promedio de suelos del cuadrante de estudio (Ramírez-Guzmán, 2010). Números en negro indican enriquecimiento antropogénico.

Elemento	CS ¹	CPPV ²			FE ³		
		IG <i>n</i> = 37	TV <i>n</i> = 28	TX <i>n</i> = 66	IG	TV	TX
Al	27,900	0.041	0.034	0.050	0.02	0.01	0.02
As	75.1	0.004	0.009	0.011	0.58	1.13	1.27
Ba	116.06	0.005	0.006	0.006	0.48	0.47	0.45
Cu	16.36	<LD	<LD	0.004	---	---	2.16
Fe	30,700	0.019	0.026	0.033	0.01	0.01	0.01
Zn	69.12	0.006	0.028	0.043	0.99	3.83	5.52

¹Concentración elemental en suelos de la zona de estudio en ppm (Ramírez-Guzmán, 2010).

²Concentración promedio ponderada por volumen del elemento en muestras de lluvia en ppm.

³Factor de enriquecimiento.

LD = Límite de detección.

n = Número total de muestras de lluvia colectadas.

En la Figura 6.8, se presentan los resultados de la Tabla 6.12, a manera de gráficos, de los *FE* calculados para metales e iones tomando como base concentraciones promedio de la corteza continental superior. Así mismo, en las Figuras 6.9 y 6.10, se presentan los resultados de la Tabla 6.13 y 6.14 para *FE* calculados a partir de valores elementales de rocas y suelos de la región. Estos gráficos permiten comparar de forma clara el enriquecimiento de cada sitio, permitiendo la diferenciación del posible origen de cada elemento.

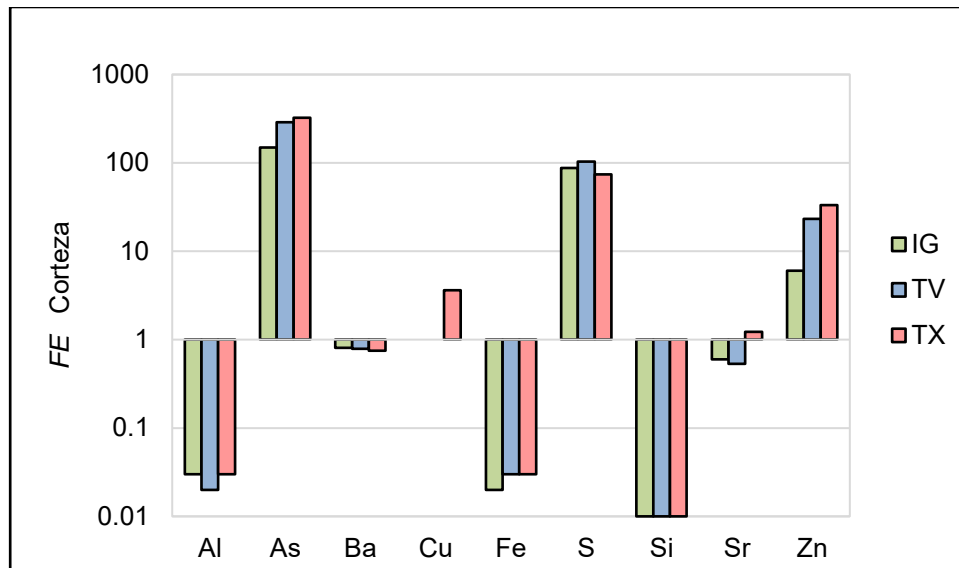


Figura 6.8 Cálculo del factor de enriquecimiento (*FE*) por área de muestreo, utilizando como referencia los valores elementales de la corteza continental superior (Lide, 2007).

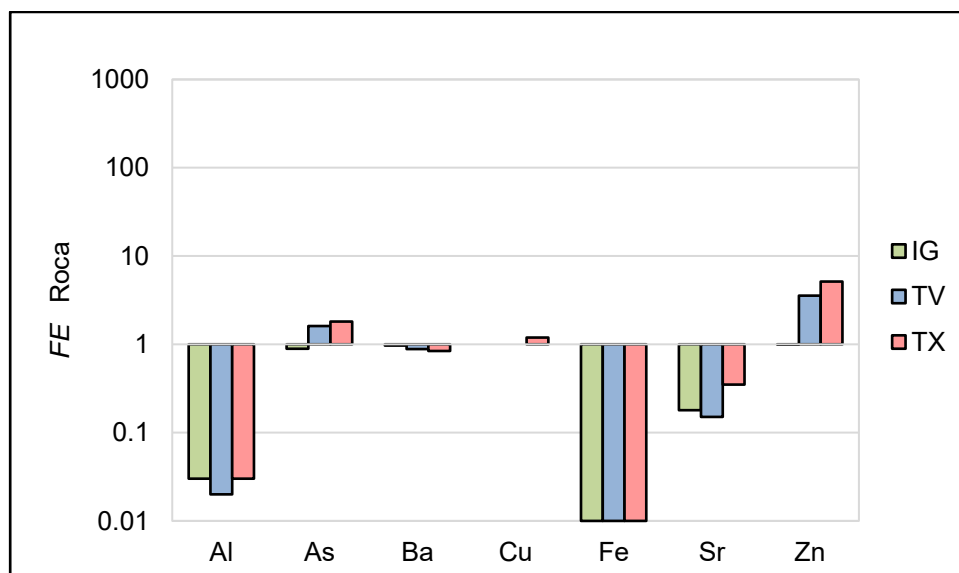


Figura 6.9 Cálculo del factor de enriquecimiento (*FE*) por área de muestreo, utilizando como referencia valores elementales promedio de rocas del cuadrante de estudio (Ramírez-Guzmán, 2010).

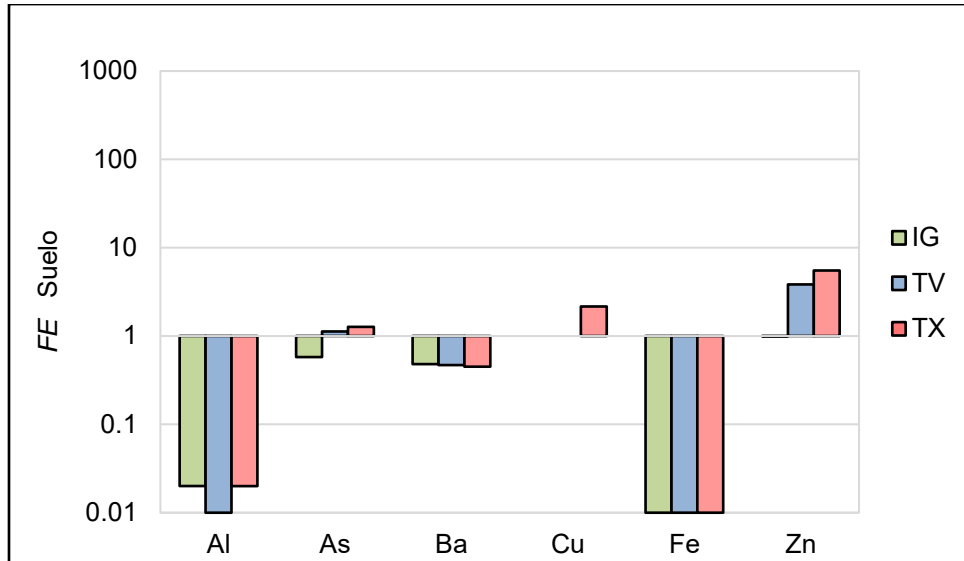


Figura 6.10 Cálculo del factor de enriquecimiento (*FE*) por área de muestreo, utilizando como referencia valores elementales promedio de suelos del cuadrante de estudio (Ramírez-Guzmán, 2010).

6.8 Comparación de CPPV de iones, metales, metaloides y no metales en agua de lluvia entre los tres sitios de estudio y otras localidades.

La Tabla 6.15 muestra un comparativo entre las concentraciones promedio ponderadas por volumen (CPPV) obtenidas en la fracción soluble del agua de lluvia de los tres sitios estudiados, con respecto a otras localidades del planeta (nacionales y extranjeras).

Tabla 6.15 Comparación de la concentración promedio ponderada por volumen (CPPV) determinada en agua de lluvia en los tres sitios de muestreo con valores publicados para otras regiones del mundo (pH, conductividad en $\mu\text{S/cm}$, elementos mayoritarios en $\mu\text{Eq/L}$, y metales, metaloides y no metales en $\mu\text{g/L}$).

Elemento	Este estudio			Rancho Viejo, México ¹	CDMX, México ²	Salta, Argentina ³	Norte de Jordania ⁴	Guiba, Brasil ⁵	Nam Co, China ⁶	Puerto Morelos, México ⁷
	IG	TV	TX							
Zona	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Urbana	Rural	Urbana	Remota	Semiurbana
pH	5.92	5.73	5.68	4.54	5.08	5.76	---	6.06	7.85	---
CE	18.15	14.94	16.66	23.81	---	10.57	---	12.6	---	---
Ca ²⁺	110.69	85.7	76.14	7.67	5.3	44.66	108.1	28.6	---	18
K ⁺	0.67	2.67	5.22	5.27	2.16	4.45	11.1	6.23	---	5.88
Mg ²⁺	18.84	15.04	14.33	3.53	2.46	1.85	30.7	11.2	---	28.7
Na ⁺	11.34	5.23	11.84	1.84	7	4.55	50	16	---	128.7
Al	41.09	33.66	50.32	24.3	15.3	6.69	382	25.03	12.6	---
As	4	9.03	10.74	---	---	0.63	---	---	---	---
Ba	5.13	5.86	5.95	---	---	---	---	---	---	---
Cu	<LD	<LD	4	---	---	2.35	3.1	2.67	0.54	---
Fe	19.24	26.45	32.85	---	---	---	92	---	11.5	---
Mn	12.82	16.56	17.53	6.05	8.34	1.99	2.11	3.48	0.57	---
S	457.62	633.39	476.86	---	---	---	---	---	---	---
Si	56.96	33.46	39.53	---	---	---	---	---	---	---
Sr	3.35	3.43	8.39	---	---	---	---	---	---	---
Zn	6.3	28.27	43.09	---	---	10.77	6.5	33.5	6.09	---
Cl ⁻	<LD	<LD	<LD	10.2	9.56	19.26	37	13.3	---	150.63
NO ₃ ⁻	32.97	34.41	34.09	26.8	41.62	23.65	75.5	4.65	---	11.45
SO ₄ ²⁻	39.94	36.73	41.25	56.1	61.94	21.03	62.1	26.4	---	25.56

¹García *et al.*, 2006; ²Báez *et al.*, 2007; ³Romero *et al.*, 2017; ⁴Al-Momami *et al.*, 2003; ⁵Migliavacca *et al.*, 2005; ⁶Cong *et al.*, 2010; ⁷Bravo *et al.*, 2000.

6.9 Mapas de trayectorias de masas de aire (Modelo HYSPLIT).

A través del seguimiento de las parcelas de aire que dieron origen a los eventos de lluvia registrados en las estaciones de muestreo, se elaboraron algunas trayectorias de retroceso con el modelo HYSPLIT 4.0, con el objeto de identificar las posibles fuentes de emisión de los contaminantes antropogénicos (SO_4^{2-} y NO_3^-). Los mapas muestran una vista aérea de la ruta que tomó una parcela de aire 72 horas atrás. De igual manera, se puede apreciar una vista vertical de su movimiento a diferentes altitudes (500, 1000 y 2000 msnm).

Se seleccionaron muestras de diferentes fechas para trazar las trayectorias de retroceso. Se tomó en cuenta la concentración individual de SO_4^{2-} , NO_3^- , azufre y pH para aquellas muestras de precipitación pluvial que presentaron las concentraciones más altas y bajas (eventos extremos) durante el período de muestreo 2017 en los tres sitios de estudio (Tabla 6.16; ver números en negro en Tablas del Anexo A1.1 a A1.6). Las Figuras 6.11, 6.13 y 6.15, muestran los mapas de trayectorias de retroceso para las concentraciones más bajas de SO_4^{2-} , NO_3^- , azufre y pH en cada uno de los sitios de muestreo. Las Figuras 6.12, 6.14 y 6.16 presentan los mapas de trayectorias de retroceso para las concentraciones más altas de SO_4^{2-} , NO_3^- , azufre y pH en cada uno de los sitios de estudio.

Tabla 6.16 Eventos extremos (mínimos y máximos), por día y por sitio, para las concentraciones individuales de SO_4^{2-} , NO_3^- , azufre y pH, período 2017.

Sitio	Evento	Día y Concentración			
		SO_4^{2-}	NO_3^-	S	pH
IG	Mínimo	2 de julio 13.13 $\mu\text{Eq/L}$	1 de septiembre 6.77 $\mu\text{Eq/L}$	29 de agosto 392.6 $\mu\text{g/L}$	20 de junio 4.8
	Máximo	1 de octubre 95.42 $\mu\text{Eq/L}$	30 de septiembre 62.74 $\mu\text{Eq/L}$	9 de septiembre 535.4 $\mu\text{g/L}$	14 de agosto 7.8
TV	Mínimo	25 de septiembre 7.71 $\mu\text{Eq/L}$	13 de mayo 11.45 $\mu\text{Eq/L}$	17 de julio 570.3 $\mu\text{g/L}$	7 de junio 4.9
	Máximo	7 de octubre 69.58 $\mu\text{Eq/L}$	13 de septiembre 50 $\mu\text{Eq/L}$	27 de mayo 731 $\mu\text{g/L}$	28 de septiembre 7
IG	Mínimo	3 de julio 3.13 $\mu\text{Eq/L}$	30 de agosto 7.74 $\mu\text{Eq/L}$	2 de agosto 390 $\mu\text{g/L}$	13 de octubre 4.3
	Máximo	18 de mayo 75.83 $\mu\text{Eq/L}$	23 de agosto 67.26 $\mu\text{Eq/L}$	10 de junio 583 $\mu\text{g/L}$	25 de septiembre 7.5

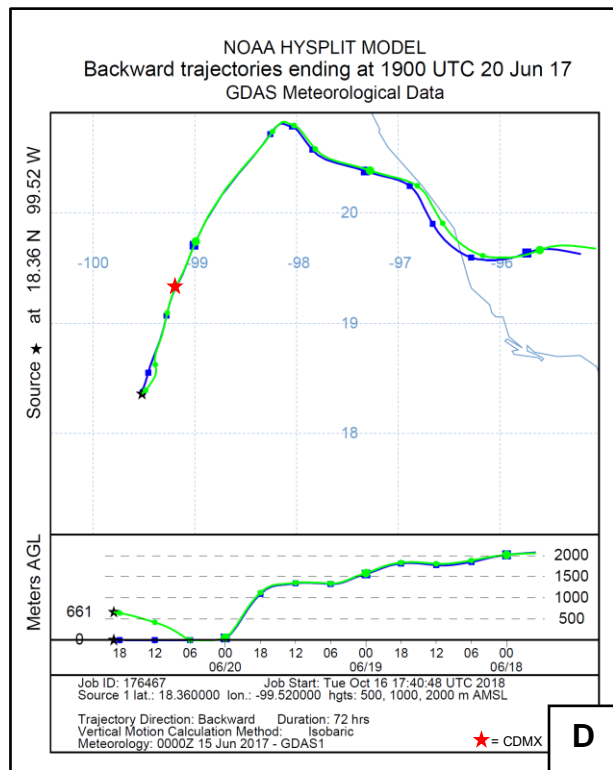
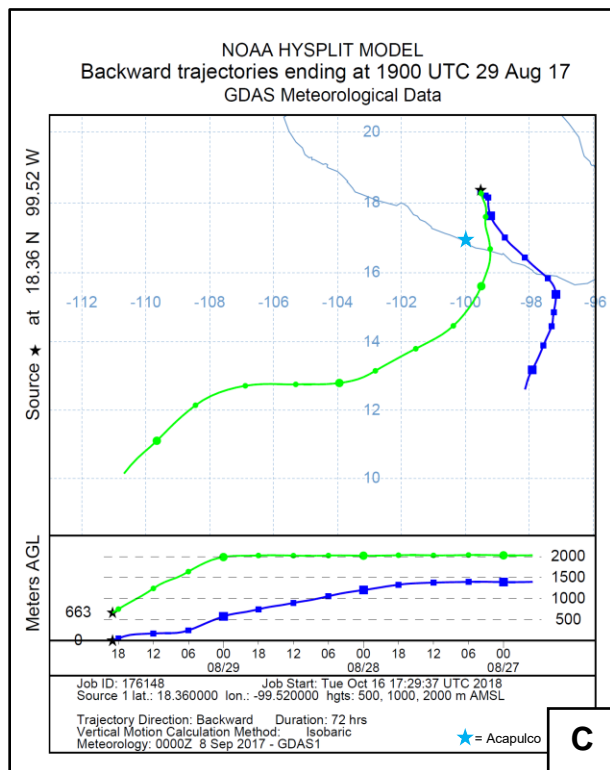
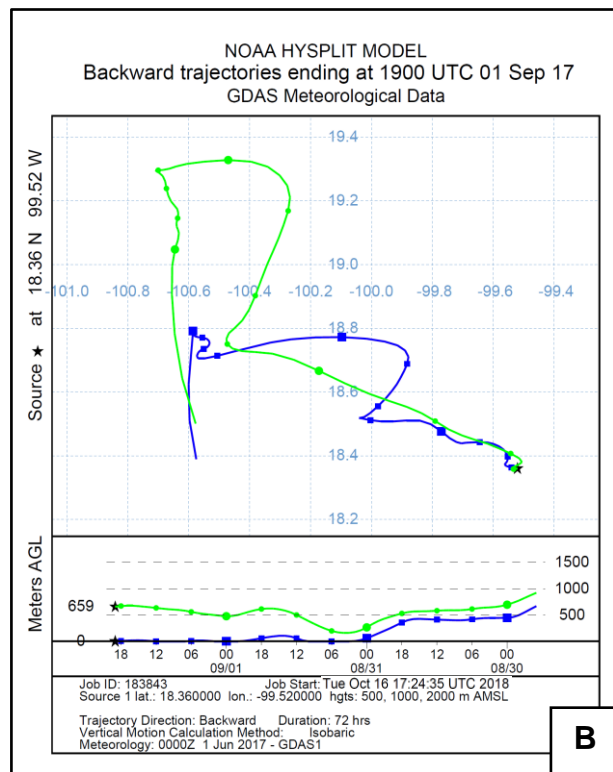
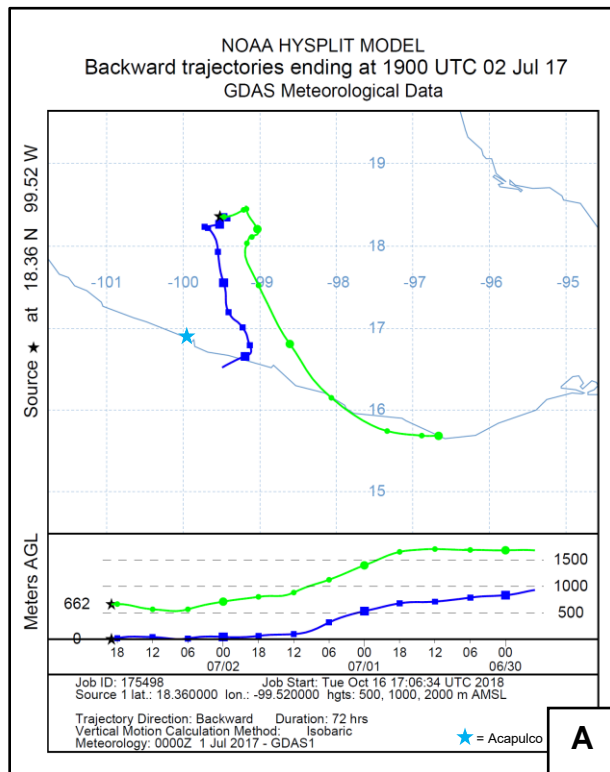


Figura 6.11 Mapas de trayectorias de masas de aire en Iguala de la Independencia (IG), para las concentraciones más bajas de: **A)** SO_4^{2-} ; **B)** NO_3 ; **C)** Azufre; **D)** pH, en agua de lluvia durante el período de muestreo 2017.

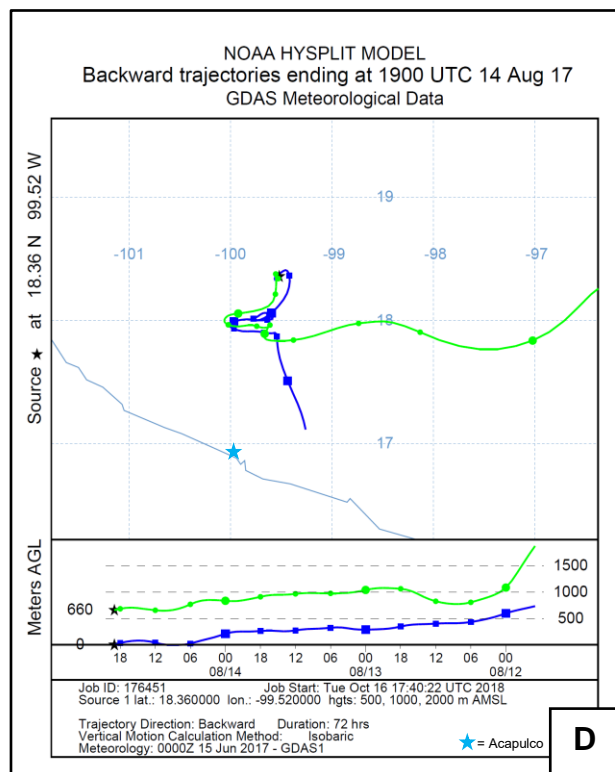
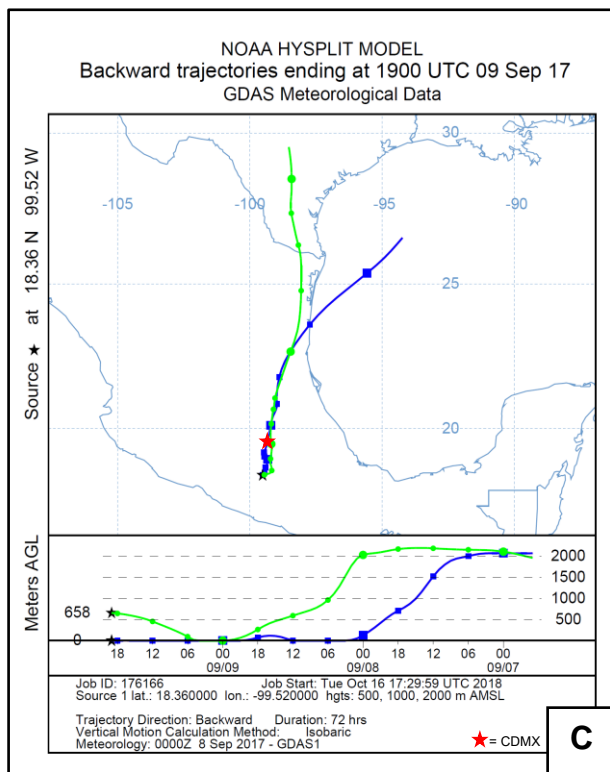
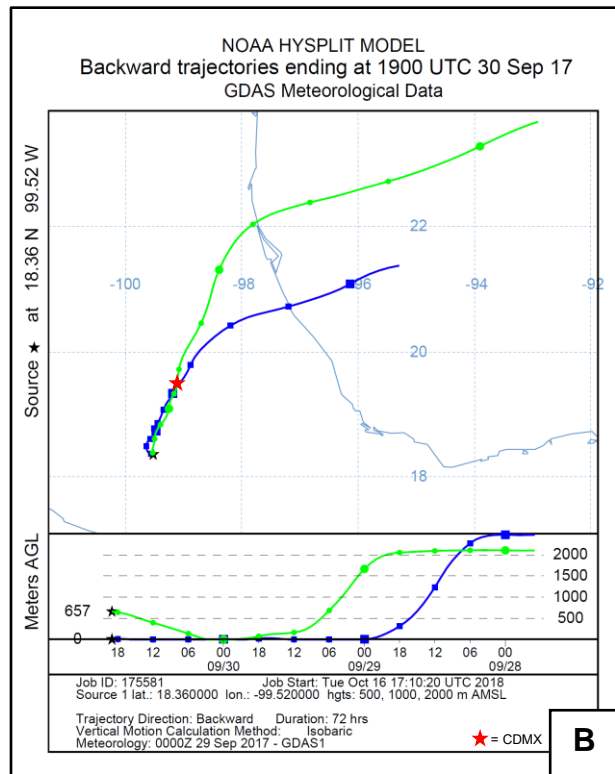
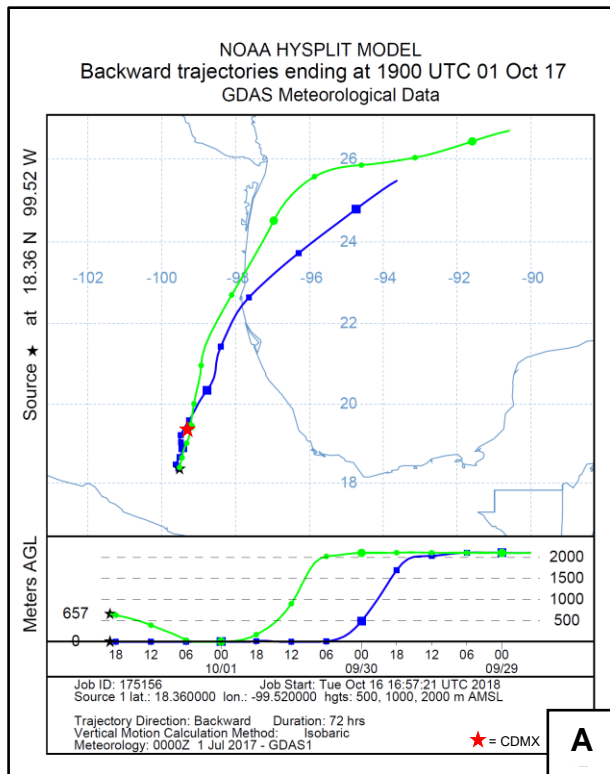


Figura 6.12 Mapas de trayectorias de masas de aire en Iguala de la Independencia (IG), para las concentraciones más altas de: **A)** SO_4^{2-} ; **B)** NO_3 ; **C)** Azufre; **D)** pH, en agua de lluvia durante el período de muestreo 2017.

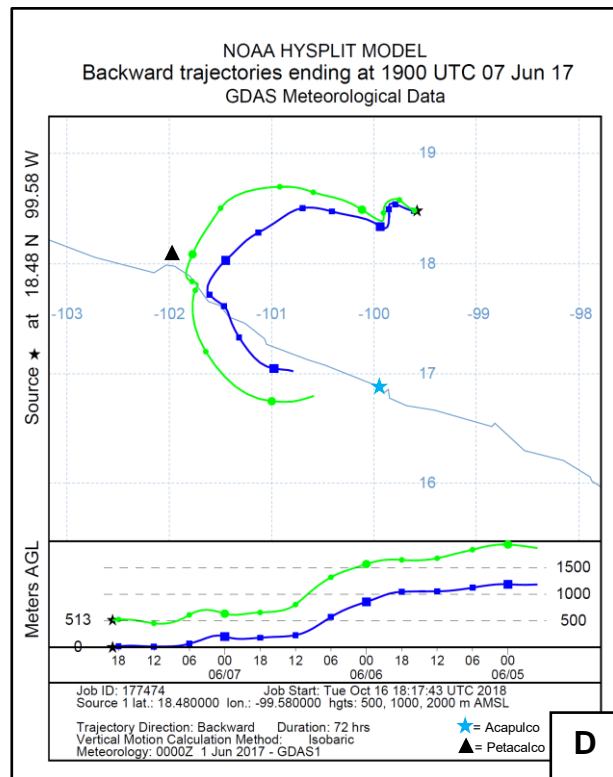
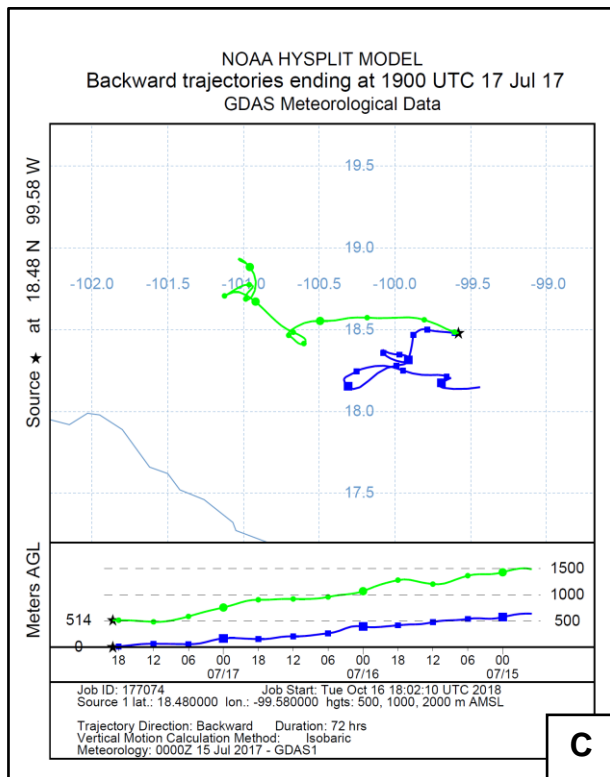
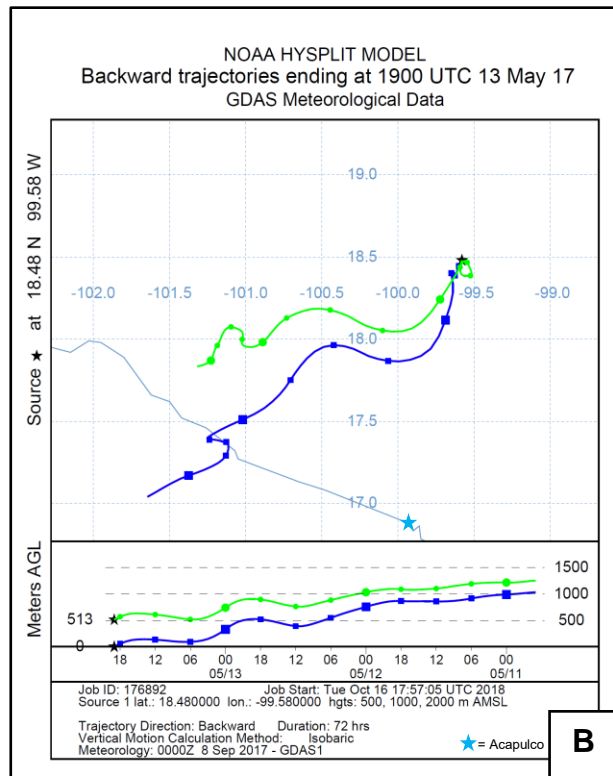
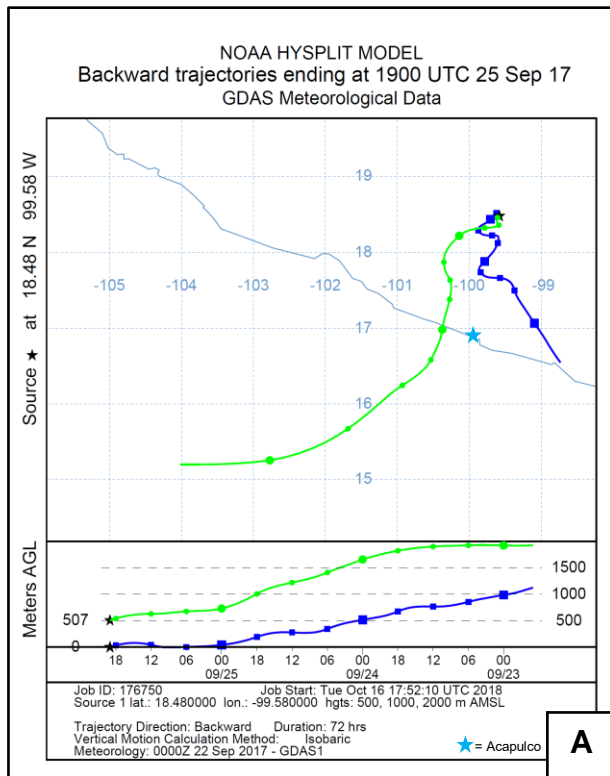


Figura 6.13 Mapas de trayectorias de masas de aire en Taxco el Viejo (TV), para las concentraciones más bajas de: **A)** SO_4^{2-} ; **B)** NO_3^- ; **C)** Azufre; **D)** pH, en agua de lluvia durante el período de muestreo 2017.

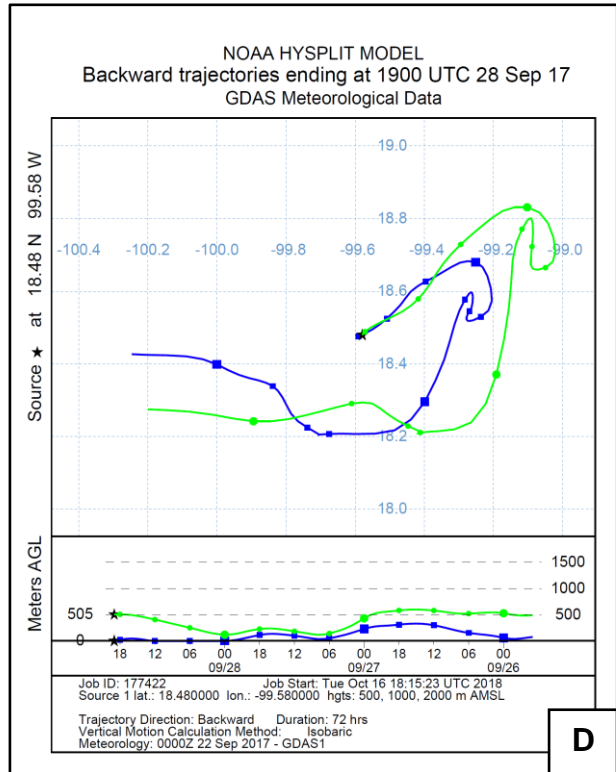
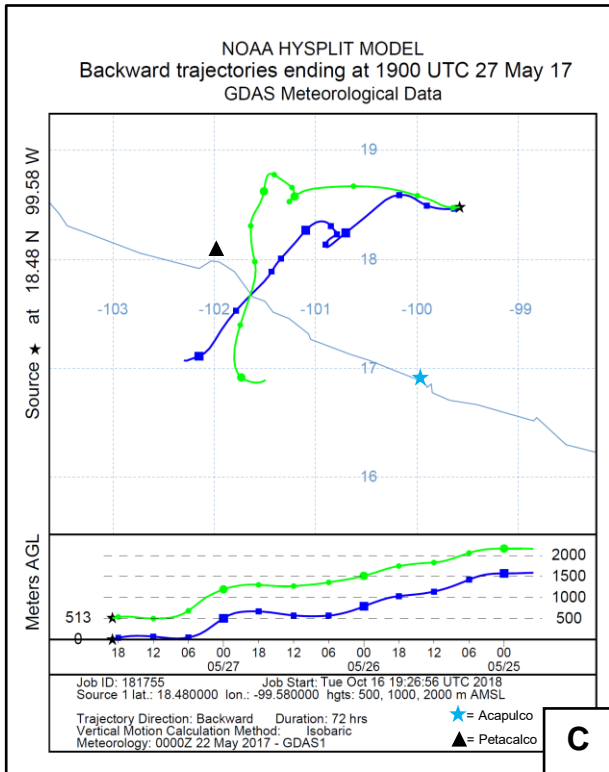
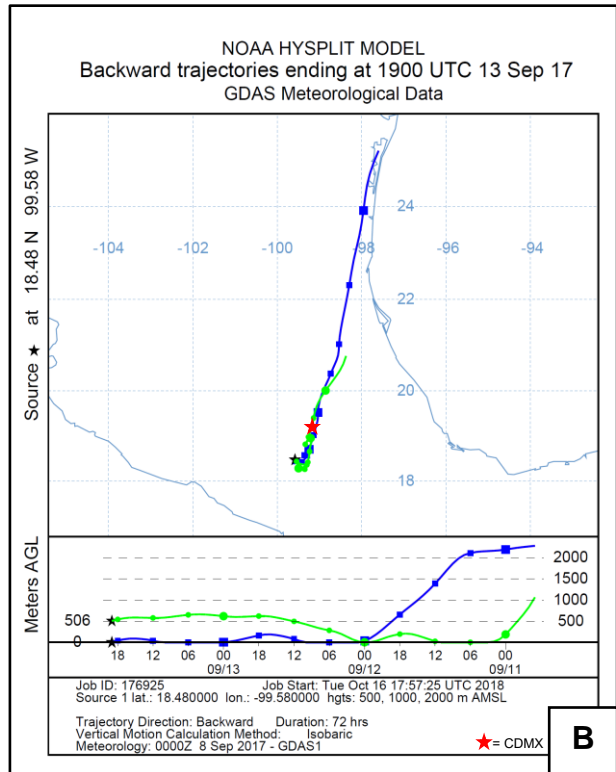
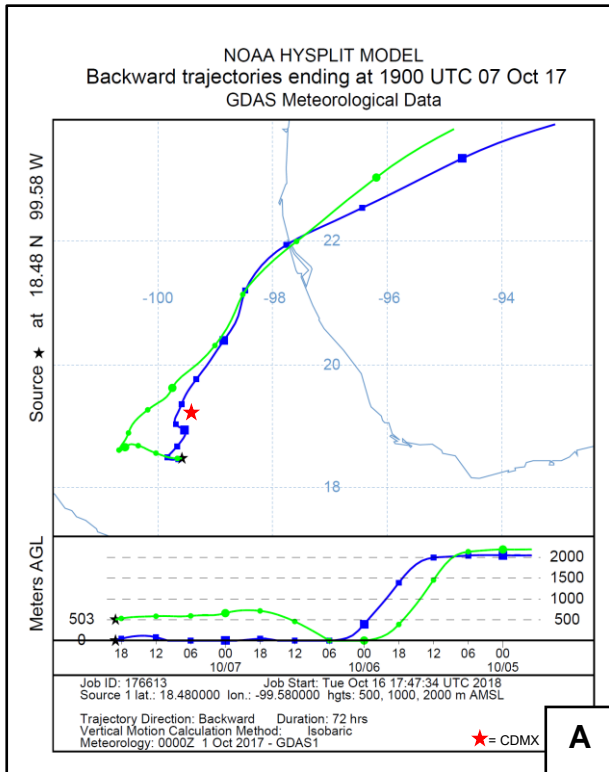


Figura 6.14 Mapas de trayectorias de masas de aire en Taxco el Viejo (TV), para las concentraciones más altas de: A) SO_4^{2-} ; B) NO_3^- ; C) Azufre; D) pH, en agua de lluvia durante el periodo de muestreo 2017.

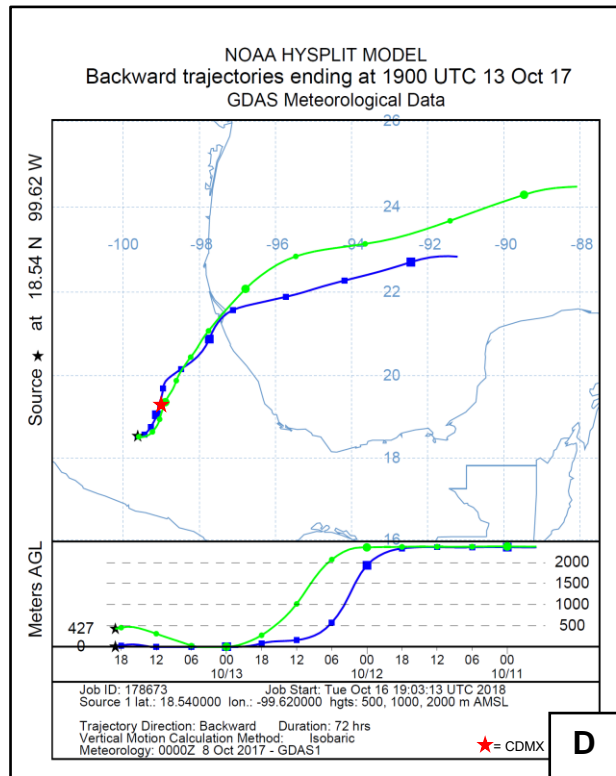
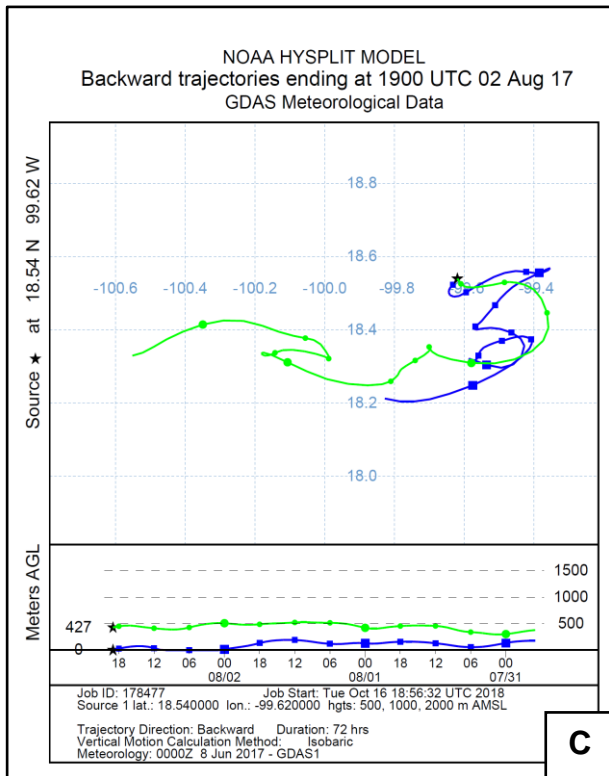
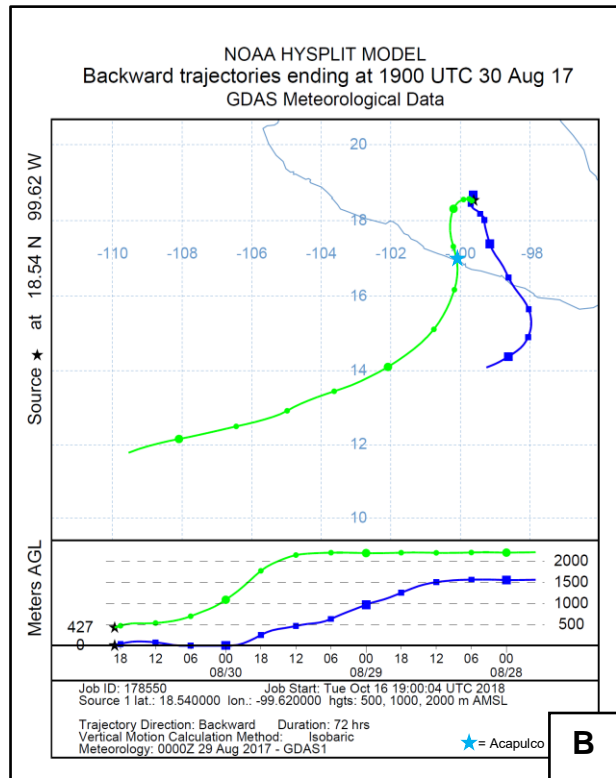
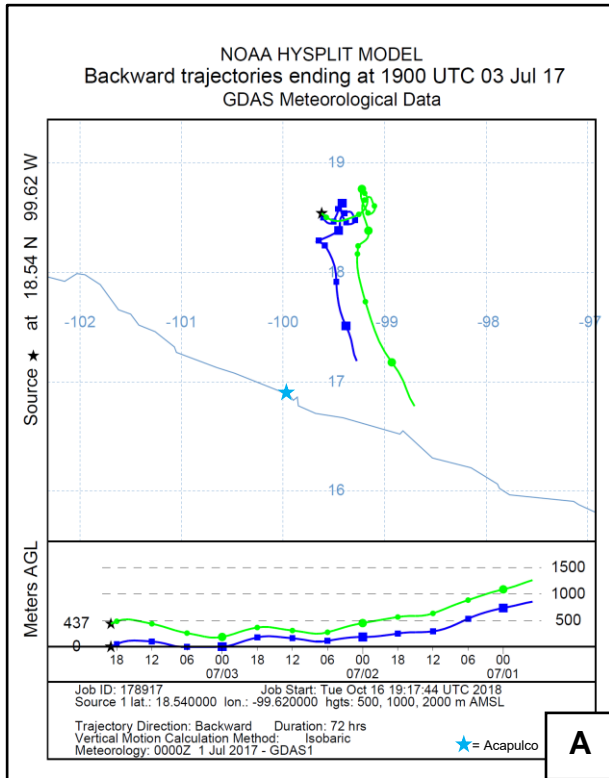


Figura 6.15 Mapas de trayectorias de masas de aire en Taxco de Alarcón (TX), para las concentraciones más bajas de: **A)** SO_4^{2-} ; **B)** NO_3^- ; **C)** Azufre; **D)** pH, en agua de lluvia durante el período de muestreo 2017.

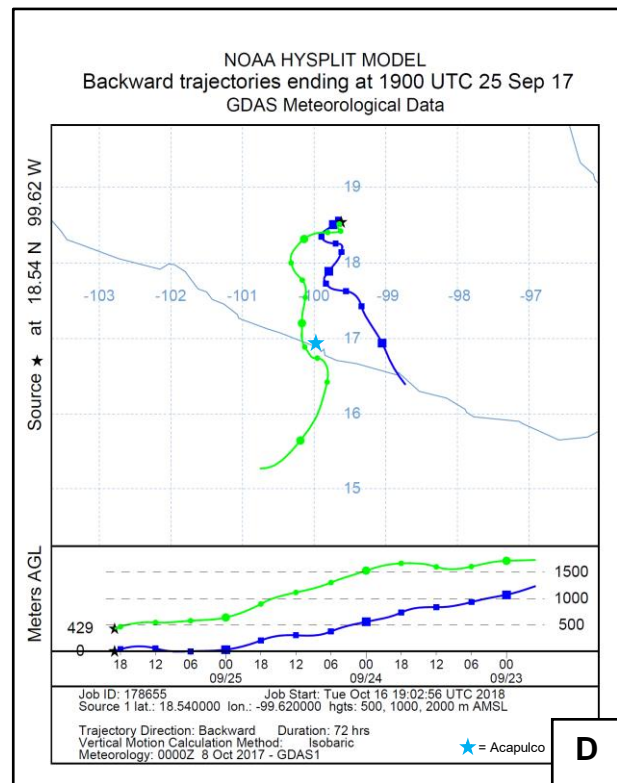
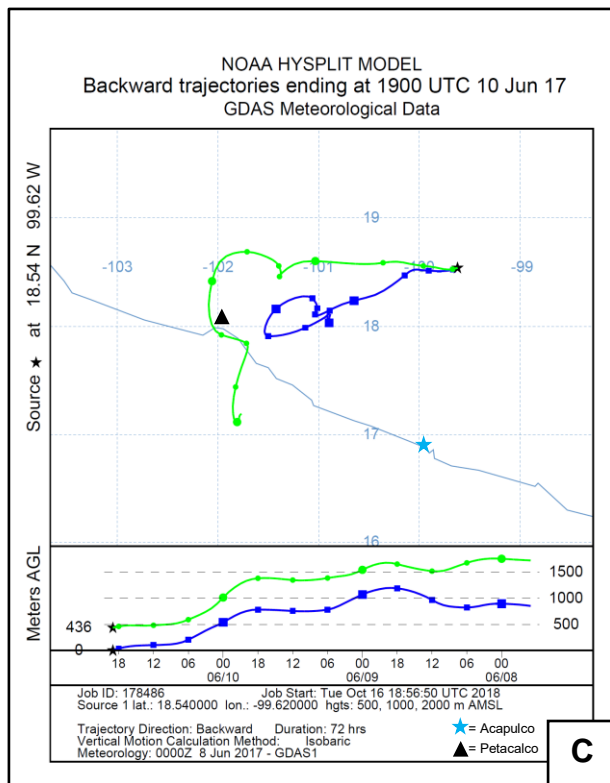
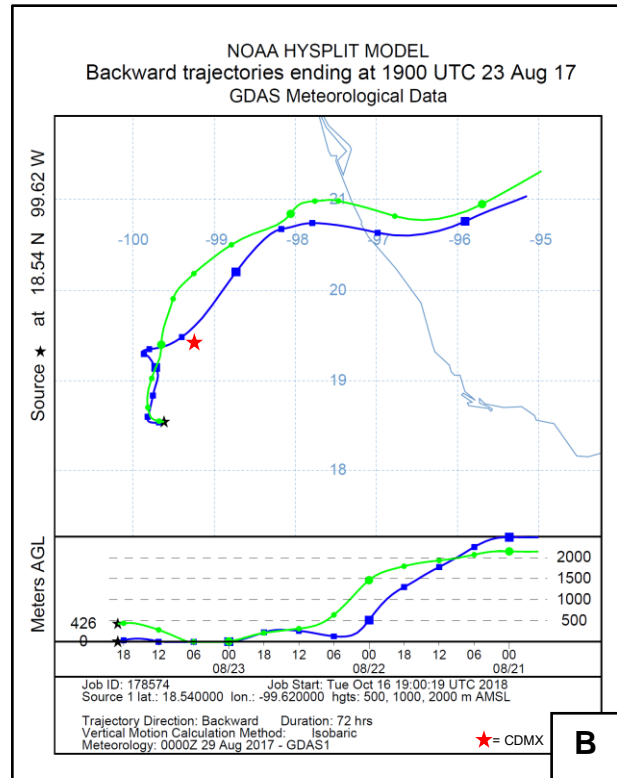
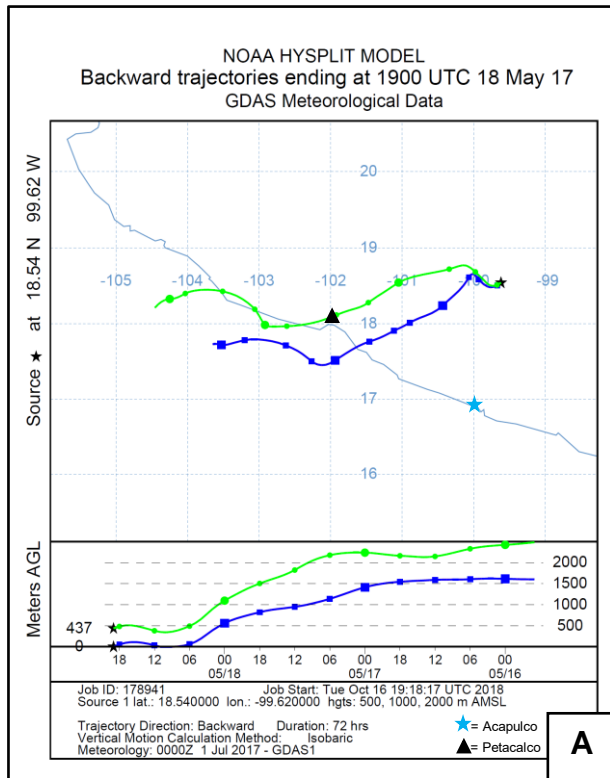


Figura 6.16 Mapas de trayectorias de masas de aire en Taxco de Alarcón (TX), para las concentraciones más altas de: **A)** SO_4^{2-} ; **B)** NO_3 ; **C)** Azufre; **D)** pH, en agua de lluvia durante el período de muestreo 2017.

6.10 Rosas de viento

EL modelo HYSPLIT trabaja con una resolución de aproximadamente 110 Km, por lo cual no se distinguió con precisión el transporte local en esta región, por esta razón se realizaron tres rosas de viento mediante el programa WRPLOT View (Windrose Plotting Software) 7.0.0, a partir de los datos de velocidad y dirección del viento obtenidos de las tres estaciones meteorológicas automáticas de cada uno de los tres sitios de muestreo para el período comprendido de mayo a agosto de 2017. La Figura 6.17 muestra las tres rosas de viento sobrepuestas al mapa litológico del cuadrante de estudio.

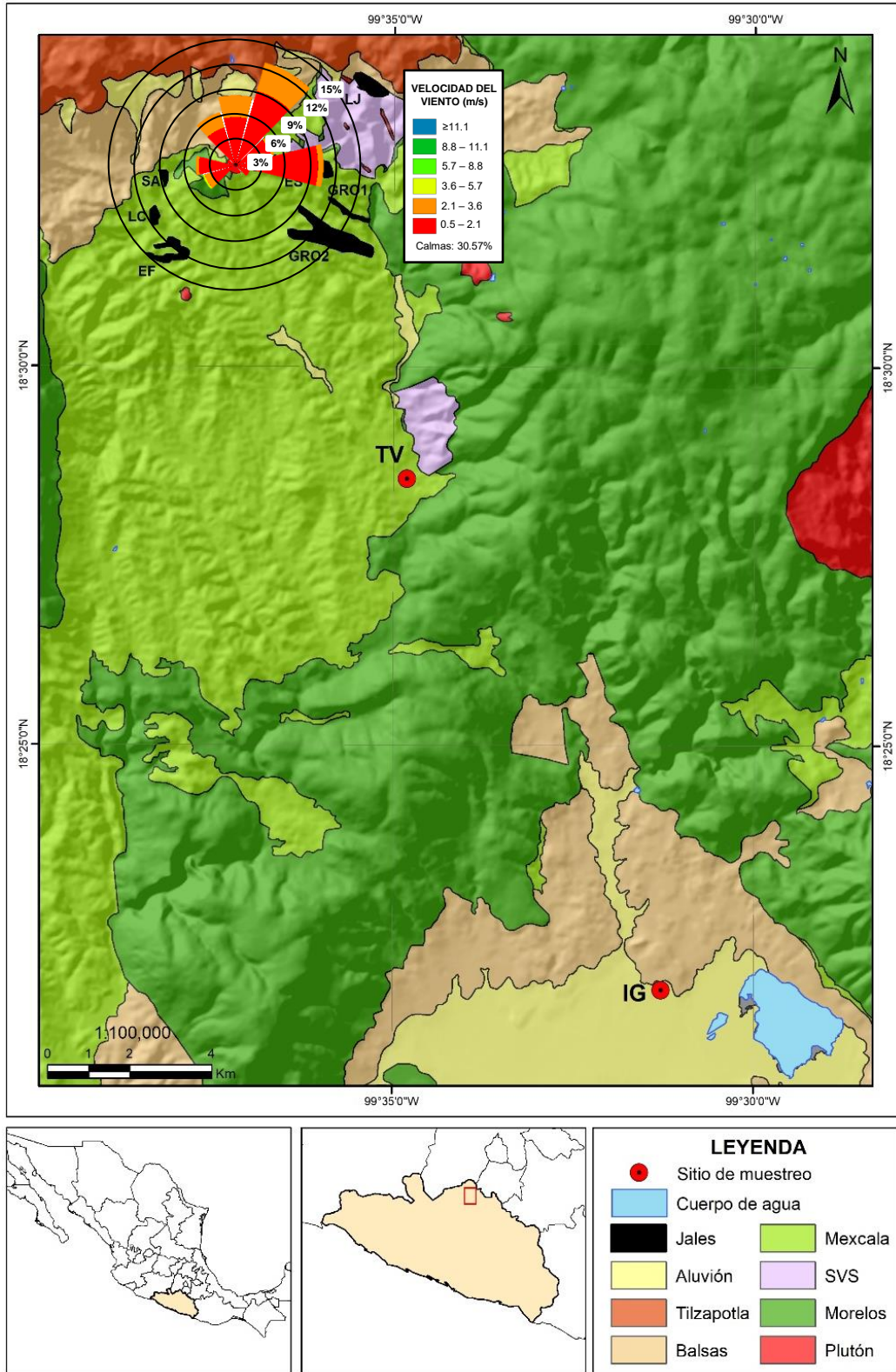


Figura 6.17 Rosas de viento sobrepuestas al mapa litológico del área de estudio. (SA = San Antonio; LC = La Concha; EF = El Fraile; LJ = Los Jales; ES = El Solar; GRO1 = Guerrero 1; GRO2 = Guerrero 2).

CAPÍTULO 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 Análisis estadístico

A partir del análisis no paramétrico de varianza Kruskal-Wallis (Tablas 6.1 y 6.2), se demostró que no existen diferencias significativas entre las variables de Mg^+ , Na^{2+} , NO^3- , SO_4^{2-} , Ba, Mn, Si, Sr, pH y CE para los tres sitios de interés, pudiendo indicar una posible misma fuente de aporte. Para esta investigación, su origen podría estar relacionado a la litología, mineralogía y suelo del cuadrante de estudio.

7.2 Concentraciones de iones inorgánicos

La Tabla 6.3 muestra las concentraciones promedio ponderadas por volumen, así como los valores mínimos, máximos, media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación en porcentaje de iones y cationes mayoritarios de las 131 muestras recolectadas en los tres sitios de interés durante el período de muestreo 2017.

El catión más abundante en las muestras de depósito húmedo fue el ión calcio, el cual representó el 78% de la concentración relativa de los cationes determinados en las muestras colectadas en la región Sur y Centro del área de estudio (IG y TV), y del 71% en la región Norte (TX), seguido por el ión magnesio (14% en TV y 13% en IG y TX), ión sodio (11% en TX, 8% en IG y 5% en TV), y por último el ión potasio (5% en TX, 2% en TV y 1% en IG).

La Tabla 6.15 muestra una comparación de los datos de este trabajo con los publicados en otros lugares del mundo. A excepción del calcio (IG= 110.69 $\mu Eq/L$; TV= 85.7 $\mu Eq/L$; TX= 76.14 $\mu Eq/L$), los elementos asociados a la corteza terrestre (sodio, magnesio y potasio) son, en general, parecidos a los reportados en otros trabajos (García *et al.*, 2006; Báez *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2017; Migliavacca *et al.*, 2005; Bravo *et al.*, 2000). El valor de calcio en el sitio IG supera a cualquier valor publicado con anterioridad, mientras que los valores de calcio en TV y TX sólo son superados por lo registrado en aguas de lluvia de Jordania, donde su origen se asocia a las frecuentes incursiones de polvo atmosférico proveniente del desierto de Sahara y a la extracción de carbonato de calcio para la fabricación de cal y cemento (Al-Momami, 2003). Es importante mencionar que, en zonas circundantes a la ciudad de Iguala de la Independencia, existen quebradoras de piedra caliza, las cuales dan origen a grava, gravilla y arena para construcción; de esta forma, se puede relacionar cierta inferencia antropogénica entre la producción de dichos materiales con la concentración de calcio registrada en el agua de lluvia de

esta localidad. Es claro que, la litología de la región rica en carbonatos (Figura 4.3) tiene un aporte significativo a la fracción soluble del agua de lluvia de los tres sitios de muestreo, todo esto, vinculado a procesos de erosión y posterior resuspensión de partículas.

Los valores obtenidos de sodio y magnesio (IG= 18.84 $\mu\text{Eq/L}$; TV= 15.04 $\mu\text{Eq/L}$; TX= 14.33 $\mu\text{Eq/L}$; e IG= 11.33 $\mu\text{Eq/L}$; TV= 5.23 $\mu\text{Eq/L}$; TX= 11.84 $\mu\text{Eq/L}$, respectivamente) tienen un comportamiento similar entre localidades. La concentración del potasio (IG= 0.67 $\mu\text{Eq/L}$; TV= 2.67 $\mu\text{Eq/L}$; TX= 5.22 $\mu\text{Eq/L}$) es más alta en el sitio TX comparada con los otros dos puntos. No es raro asumir que la concentración de este elemento está asociada a la litología local, la cual presenta rocas volcánicas de la Formación Tilzapotla enriquecidas en feldespatos potásicos (Morán-Zenteno *et al.*, 1998; Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Farfán-Panamá *et al.*, 2013) (Figura 4.3).

El anión más abundante en las muestras de depósito húmedo fue el ión sulfato, el cual representó el 55% de la concentración relativa de los aniones determinados en las muestras colectadas en la región Norte y Sur del área de estudio (IG y TX), y del 52% en la región centro (TV). Se graficó la media ponderada de la concentración de sulfatos y nitratos, determinados en las muestras de agua de lluvia (Figuras A2.1 a A2.3), y se observó que, durante los meses de agosto, septiembre y octubre, las concentraciones son más altas que en los meses precedentes.

En general, las concentraciones de sulfatos (IG= 32.97 $\mu\text{Eq/L}$; TV= 34.41 $\mu\text{Eq/L}$; TX= 34.09 $\mu\text{Eq/L}$) son mayores que las concentraciones de nitratos (IG= 39.94 $\mu\text{Eq/L}$; TV= 36.73 $\mu\text{Eq/L}$; TX= 41.25 $\mu\text{Eq/L}$) en los tres puntos de estudio. Estos niveles podrían estar asociados al tránsito de vehículos; considerando que las ciudades de Iguala de la Independencia y Taxco de Alarcón están rankeadas como una de las principales urbes de la entidad, no es raro suponer cierta influencia de aniones ácidos a la fracción soluble del agua de lluvia. A pesar de ello, considerando que la zona es rica en mineralización de sulfuros y pilas de jales abundantes en los mismos (Figura 4.3) (Talavera-Mendoza *et al.*, 2005; Romero *et al.*, 2008; Romero y Gutiérrez, 2010; Corrales-Pérez y Romero, 2013), es probable que las concentraciones de sulfatos estén siendo afectadas por procesos de oxido-reducción de sulfuros (Dold, 2010), esto, asumiendo que la vida media de los sulfatos no es mayor a 1.5 días (Andreae, 1985).

7.3 Concentraciones de metales, metaloides y no metales

La Tabla 6.4 muestra las concentraciones promedio ponderadas por volumen, así como los valores mínimos, máximos, media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación en porcentaje de metales, metaloides y elementos traza de las 131 muestras recolectadas en los tres sitios de interés durante el período de muestreo 2017.

Las concentraciones más altas en los tres sitios de estudio las presenta el azufre (IG=

457.62 µg/L; TV= 633.39 µg/L; TX= 476.86 µg/L). Estas concentraciones se encuentran en el rango del nivel de fondo de azufre calculado en el depósito húmedo para zonas continentales y costeras (0.1-1.0 mg/L), por encima del nivel de fondo calculado para áreas remotas (<0.4 mg/L) y por debajo del nivel de fondo calculado para áreas de alta emisión o industriales (1.0-2.0 mg/L) (Vet et al., 2014). La zona minera de Taxco es rica en minerales sulfurados, es así como, probablemente la mineralización de la región esté afectando la concentración total del agua de lluvia de la región. Es importante mencionar que, la mayor concentración de azufre entre sitios se presenta en TX, lugar asentado sobre lutitas de la Formación Mexcala, mismas que, Talavera-Mendoza *et al.* (2016) reporta como el principal miembro de generación de azufre en el área de estudio.

En general las altas concentraciones de manganeso y zinc en agua de lluvia (IG= 12.82 µg/L; TV= 16.56 µg/L; TX= 17.53 µg/L; e IG= 6.3 µg/L; TV= 28.27 µg/L; TX= 43.09 µg/L, respectivamente) pueden estar asociadas a la quema de combustibles fósiles y procesos industriales, como la fundición de metales (Al-Momami, 2003; Báez *et al.*, 2006). Se esperaría una baja concentración de estos metales en el agua de lluvia en los tres sitios de muestreo, de acuerdo con la escasa industrialización y el tamaño de la urbe local. Sin embargo, los análisis químicos muestran que las concentraciones de Mn sobrepasan cualquier valor reportado con anterioridad. Las concentraciones de Zn en los sitios IG y TV presentan valores inferiores a los reportados en Guíba, Brasil (Migliavacca *et al.*, 2005), mientras que, en TX se reportan valores superiores. Es probable que estos elementos tengan como fuente de aporte la quema de combustibles fósiles, ya que ambos son utilizados como aditivos en gasolinas y aceites de motores, no obstante, los valores de zinc obtenidos en IG respecto a TX contrastan bastante, lo que hace suponer que la cercanía de los jales mineros con los sitios TX y TV, así como la mineralización de la región (esfalerita) estarían enriqueciendo la fracción soluble del agua de lluvia en este elemento a partir de su erosión (Figura 4.3).

En lo que respecta al cobre, solamente se detectó en el punto TX (4 µg/L), haciendo suponer que su origen proviene de la mineralización de la zona (calcopirita), o como producto de la erosión de los jales cercanos al sitio de estudio (calcopirita y calcocita) (Figura 4.3). El valor presentado, es mayor que cualquiera reportado con anterioridad en otra región del mundo.

Las concentraciones de aluminio y hierro (IG= 41.09 µg/L; TV= 33.66 µg/L; TX = 50.32 µg/L; e IG= 19.24 µg/L; TV= 26.45 µg/L; TX= 32.85 µg/L, respectivamente) se encuentran en niveles inferiores a los reportados en Jordania, y en niveles superiores respecto a otras localidades del mundo. Entre sitios se observa que las concentraciones de aluminio son más altas en TX, esto está relacionado a la mineralogía del sitio, particularmente a las rocas volcánicas de

la Formación Tilzapotla (Figura. 4.3), las cuales son ricas en aluminosilicatos (Vargas-Estrada, 2010); las concentraciones de hierro son más altas en los puntos TV y TX, lo cual puede ser reflejo de enriquecimiento antropogénico por parte de depósitos de jales cercanos a ellos.

Dado que no existen valores de silicio reportados en otras áreas del mundo, no es posible hacer una comparación. Las concentraciones de silicio determinadas para los tres puntos de muestreo (IG= 56.96 µg/L; TV= 33.46 µg/L; TX= 39.5 µg/L) reflejan una mayor concentración en el sitio IG, lo cual puede ser indicativo del beneficio aportado por minerales de silicatos por parte de rocas clásticas de la Formación Balsas (Guzmán-García, 2010) (Figura 4.3). Estos metales (Fe, Al y Si), son muy comunes en rocas, polvo y suelos de la región (Ramírez-Guzmán, 2010; Guzmán-García, 2010; Vargas-Estrada, 2010), por lo que, altas concentraciones de los mismos denotan asociaciones parentales de fuentes crustales locales.

Para el arsénico, Smedley y Kinniburgh (2002) y *Bowell et al.* (2014) definen como línea base concentraciones que varían entre 0.013 a 0.032 µg/L para aguas de lluvia de zonas continentales. Valores de arsénico que indican contaminación antrópica se ubican por encima de los 0.5 µg/L. Con este valor de referencia se puede afirmar que el arsénico determinado en los tres sitios de la región minera de Taxco (IG= 4 µg/L; TV= 9.03 µg/L; IG= 10.74 µg/L) se encuentran inusualmente enriquecidos. Puede observarse que, las concentraciones más altas se presentan en los sitios TV y TX, zonas cercanas a presas de jales (Figura 4.3). Talavera-Mendoza *et al.* (2016) indica que la oxidación abiótica de los jales es el principal proceso de liberación de arsénico y otros metales tóxicos como el hierro, manganeso y zinc, de esta manera hay que tomar a consideración las posibles implicaciones de este proceso y su posible contribución a la fracción soluble del agua de lluvia.

Las concentraciones de bario y estroncio son las siguientes: IG= 5.13 µg/L; TV= 5.86 µg/L; TX= 5.94 µg/L; e IG= 3.35 µg/L; TV= 3.43 µg/L; TX= 8.39 µg/L, respectivamente. Su origen puede estar determinado a fuentes geológicas del área, ya sea relacionado a sulfuros como la barita o a la señal geoquímica de las rocas de la región. Las concentraciones más altas de estroncio en el sitio TX puede ligarse a su proximidad con rocas volcánicas de la Formación Tilzapotla (Figura. 4.3), las cuales son abundantes en este elemento (Morán-Zenteno *et al.*, 1998).

7.4 Coeficientes de correlación

En las Tablas 6.5 a 6.7 se presentan los pares de metales, metaloides, no metales e iones inorgánicos que correlacionaron de un modo significativo (en negro), y que fueron obtenidos a partir del cálculo de la matriz de correlación interelemental o matriz de Rho Spearman ($p\text{-valor} \geq 0.05$). En este caso se consideraron coeficientes de correlación significativos aquellos con $r \geq 0.5$.

En las Tablas 6.5 y 6.7 se muestran los resultados del análisis de correlación de Rho Spearman, para establecer si existe asociación entre los iones y metales considerados en el estudio de la fracción soluble de los sitios IG y TX. En ellas se demuestra que existe una buena correlación entre las concentraciones de estroncio con el bario, manganeso, sodio y magnesio. Para el caso de los iones inorgánicos se observa una buena correlación entre las concentraciones de magnesio, sodio y calcio.

En la Tabla 6.6 se presentan los resultados del análisis de correlación de Rho Spearman entre metales e iones inorgánicos de la fracción soluble del agua de lluvia determinados en el sitio TV. Se encontró que existe una buena correlación entre las concentraciones de estroncio con el bario, manganeso, sodio y magnesio. Así mismo, muestra una buena correlación entre las concentraciones de calcio con el sodio y el pH, el magnesio con el sodio, y una correlación negativa entre las concentraciones de sulfatos y nitratos.

De manera general, se puede observar que existe una buena correlación entre elementos abundantes en rocas y suelos de la región (Ba, Mn y Sr) (Morán-Zenteno *et al.*, 1998; Ramírez-Guzmán, 2010) con elementos comunes en la corteza terrestre (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) (Lide, 2007). La razón de esto es que las concentraciones de metales son producto de la difusión y suspensión de especies en fase sólida (aerosoles), los cuales quedan atrapados en la cuenca y, al momento de la precipitación, son arrastrados hacia la superficie (fenómeno de Below-Cloud Scavenging) (Lohmann *et al.*, 2016).

7.5 Parámetros fisicoquímicos: pH y EC

El pH en las lluvias de la región estudiada (Figura 6.3A) tiene un valor medio de 6.05, con un mínimo de 4.78 y un máximo de 7.78 para el punto IG; en el sitio TV se reporta un valor medio de 5.8, con un mínimo de 4.9 y un máximo de 7; finalmente, en la zona TX se obtuvo un valor medio de 5.71, con un mínimo de 4.3 y un máximo de 7.5. Todos estos valores se encuentran dentro del rango aceptado ($\text{pH} \sim 5.6$), el cual denomina a las lluvias como naturales no contaminadas. Esto en parte, puede estar favorecido por polvo rico en carbonatos de calcio originado por la roca caliza encontrada en el área de estudio, el cual puede estar influenciando un sutil aumento en el pH como resultado de la contribución de partículas de suelo suspendido, particularmente en los sitios IG y TV. El valor de pH y las bajas concentraciones en los iones ácidos (SO_4^{2-} y NO_3^-) se consideran coherentes con una zona que no presenta modificadores antrópicos significativos (industrias, intenso tránsito vehicular, etc.). Las estaciones presentaron la misma desviación estándar (Tabla 6.3), es decir, la distancia promedio de sus valores hacia la media resultó no ser diferente.

La conductividad es una medida indirecta de la cantidad de iones en disolución; en la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor resulta su conductividad. La conductividad eléctrica en el agua de lluvia (Figura 6.3B) presentó un valor medio de 21.31 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con valores extremos de 5.5 y 39.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el área de IG; el sitio TV, registró un valor medio de 17.19 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un mínimo de 7.1 y un máximo de 38.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$; y en el área TX se midió un valor medio de 17.77 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con valores límite de 4.2 y 49.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este parámetro, extremadamente bajo, es similar a la conductividad en aguas de lluvia medidas en otras localidades del mundo, cuando no están influenciadas por el aerosol marino (Gaiero, 1998; García *et al.*, 2006; Herrera-Murillo y Rodríguez-Román, 2009; Romero *et al.*, 2017). Las estaciones presentaron la misma desviación estándar (Tabla 6.3), es decir, la distancia promedio de sus valores hacia la media resultó no ser diferente.

7.6 Componentes principales

En el sitio IG (Figura 6.4), la unión de la Componente 1 y Componente 2 explican el 35.63% de la varianza total (Tabla 6.8). Se asume que estas variables reflejan los niveles base o background regional, ya que incluye elementos como calcio, magnesio, sodio, hierro y silicio, muy comunes en la corteza terrestre y por lo tanto en suelos (Galloway y Likensm, 1978; Al-Momami *et al.*, 1995). Otros elementos encontrados en estos Componentes Principales son el ión ácido nitrato, los metales bario, estroncio, manganeso y el no metal azufre; el primero en general se asocia a emisiones vehiculares, mientras que los segundos podrían estar asociados a la mineralización de la región, donde existen de manera considerable en rocas y suelos (Morán-Zenteno *et al.*, 1998; Ramírez-Guzmán, 2010).

Para el sitio TV (Figura 6.5), la unión de la Componente 1 y Componente 2 explica el 44.31% de la varianza total (Tabla 6.9). Los elementos aglomerados en la Componente 1 (22.63% de la varianza total) representan en general a elementos asociados con la mineralización de la zona, ya sea conformando sulfuros, roca, suelo o jales (arsénico, bario, estroncio, manganeso y zinc). Considerando que el sitio está asentado sobre rocas sedimentarias de las Formaciones Mexcala y Morelos (Figura 4.3), principales paquetes litológicos donde se encuentra emplazada la mineralización del Distrito Minero de Taxco (IMMSA, 1978; Camprurí y Albinson, 2006; Farfán-Panamá *et al.*, 2013); así como su cercanía a depósitos de jales, no es raro suponer que cierta influencia de estos afectó a la fracción soluble del agua de lluvia en este punto. La unión de elementos de la Componente 2 (21.68% de la varianza total), representa en general a elementos comunes en la corteza terrestre (aluminio, hierro, silicio y potasio); por otra parte, el ión ácido sulfato, podría asociarse a procesos de óxido-reducción ocurridos en los jales circundantes (Dold,

2010).

En el sitio de TX (Figura 6.6), la unión de la Componente 1 y Componente 2 explican el 40.38% de la varianza total (Tabla 6.10). Al igual que en el sitio IG, se considera que estas variables evidencian los niveles base o background regional, ya que incluye elementos como calcio, magnesio, potasio, aluminio, hierro y silicio. Otros elementos encontrados en estos CP son el ión ácido NO_3^- y el metal Ba; el primero en general se asocia a emisiones vehiculares, mientras que el segundo podría estar asociado a la mineralización de la zona, donde existe como mineral de ganga en forma de Barita.

Dado que el cobre solo pudo ser identificado en el sitio TX ($>LD$), fue conveniente realizar un ACP con el objetivo de demostrar asociaciones entre los valores de cobre obtenidos en la fracción soluble del agua de lluvia del sitio TX, con respecto a las concentraciones del mismo elemento determinadas en depósitos jales de la región (Talavera-Mendoza *et al.*, 2005). La CP1 explica el 47.53% de la varianza total (Tabla 6.11), en ella se agrupan los valores de cobre provenientes de los depósitos de jales El Solar, Guerrero 2 y Los Jales, así como los valores de cobre obtenidos en el agua de lluvia del sitio TX (Figura 6.7). Es importante señalar que estos depósitos de jales se encuentran al noreste del sitio de estudio, lo cual, indicaría un mayor aporte de este elemento a partir de estos puntos y dirección preferencial.

7.7 Factores de enriquecimiento

En la Figura 6.8 se muestra el gráfico de barras correspondiente a los valores de *FE* calculados para metales, metaloides y elementos traza de los tres sitios de muestreo, tomando con referencia valores promedio de la corteza superior continental (Lide, 2006). En él, se observa que los elementos con un *FE* mayor a 1 (indicativo de enriquecimientos antropogénicos) son el arsénico, cobre, azufre y zinc; debajo de este nivel se encuentran los elementos aluminio, bario, hierro y silicio. El estroncio presenta un *FE* mayor a 1 en el sitio TX, mientras que, en los sitios IG y TV se encuentra por debajo de este valor.

Los elementos con un *FE* mayor a la unidad cumplen con una misma característica, todos ellos conforman la parte mineralizada de la región, mientras que, los elementos con un *FE* menor a 1, son propios en la conformación de las rocas del área. El *FE* del estroncio en el sitio TX, puede relacionarse a su cercanía con rocas volcánicas de la Formación Tilzapotla (Figura. 4.3).

Las Figuras 6.9 y 6.10 muestran el *FE* computado para metales, metaloides y elementos traza de los tres sitios de muestreo, respecto a valores elementales promedio de rocas y suelos locales como valor de referencia (Ramírez-Guzmán, 2010). En ambos histogramas se observa una marcada reducción de los valores de *FE* respecto al cálculo anterior. Los sitios TV y TX

muestran enriquecimientos en arsénico y zinc; mientras que, el sitio TX evidencia un enriquecimiento mayor a la unidad en cobre. El aluminio, arsénico, bario, hierro, estroncio y zinc se mantienen por debajo de la unidad en el sitio IG. Los metales aluminio, bario, hierro y estroncio no muestran enriquecimientos (>1) en los sitios TV y TX.

Los elementos con un *FE* mayor a la unidad en los sitios TV y TX tienen una misma particularidad, todos ellos se encuentran en grandes concentraciones en presas inactivas de jales de la región (Talavera-Mendoza *et al.*, 2005; Romero *et al.*, 2008; Romero y Gutiérrez, 2010; Corrales-Pérez y Romero, 2013). Por consiguiente, la cercanía de los sitios TV y TX con los depósitos de jales (Figura 4.3) parece estar influenciando las concentraciones de arsénico, cobre y zinc en la fracción soluble del agua de lluvia de ambos sitios. Esto se apoya en que, los niveles del *FE* de los mismos elementos en el sitio IG se encuentran por debajo de la unidad, y esto a su vez, se ve favorecido por la lejanía que existe entre la ubicación del sitio con respecto a los embalses. El *FE* calculado para aluminio, bario y hierro no presentan enriquecimiento (<1) en los tres sitios de estudio, lo cual indica que las concentraciones obtenidas para estos elementos tienen como fuente de aporte el material parental de las rocas y suelos de la región.




7.8 Comparación entre otros sitios

La comparación realizada entre la composición química del agua de lluvia de este estudio con otros lugares del mundo (Tabla 6.15), permitió establecer que la región minera de Taxco tiene, en general parámetros típicos asociados a una atmósfera poco afectada por procesos antrópicos urbanos. Estos parámetros se ubican de manera coherente con el desarrollo urbano e industrial de la zona, aunque con valores de algunos metales traza inusualmente enriquecidos, como arsénico, azufre, bario, cobre, manganeso y zinc, los cuales presentan valores superiores a los registrados en otras partes del planeta. Esta situación, permite sugerir como posible fuente a su geología y a la mineralización del Distrito Minero de Taxco, ya que las asociaciones de elementos encontradas en la composición química del agua de lluvia guardan una estrecha relación con la geoquímica de las rocas, suelos y la mineralogía de los depósitos minerales que caracterizan esta provincia geológica (Ramírez-Guzmán, 2010). En la actualidad la región no tiene yacimientos en explotación, sin embargo, presenta pilas de desechos o jales, los cuales han quedado expuestos a los efectos climáticos, provocando un impacto negativo en la dispersión de los metales. La presencia de jales abandonados con concentraciones de metales pesados, sumado a su poca cobertura vegetal, generan las condiciones propicias para que durante fuertes vientos provoquen la dispersión de los mismos.

7.9 Vientos de altura

En las Figuras 6.11 a 6.16 se observan las trayectorias de retroceso, a partir del modelo híbrido HYSPLIT 4.0. Las trayectorias fueron calculadas a 19 (UTC) 13:00 Hora Local, a nivel superficial y a una altitud de 500, 1000 y 2000 metros sobre el nivel del mar, priorizando aquellos eventos de lluvia en los cuales se detectaron las concentraciones más altas y más bajas de los iones SO_4^{2-} y NO_3^- , con el objetivo de identificar las posibles fuentes de emisión de contaminantes antropogénicos.

De manera general, se observa que en la mayoría de las trayectorias las parcelas de aire provienen del Pacífico (42%), otras provienen del Golfo (33%), y algunas tienen un origen local (25%). En aquellas trayectorias que provienen del Golfo, éstas atraviesan los Estados de Veracruz, Puebla, México, Hidalgo, Ciudad de México y Morelos, mientras que, aquellas que provienen del Pacífico, sólo atraviesan el estado de Guerrero.

Las masas de aire con origen del Pacífico (Sureste de México) tienden a cruzar ciudades del estado de Guerrero como Acapulco (ver símbolo ) , Chilpancingo, Ciudad Altamirano y Zihuatanejo. Así mismo, se observó que algunas parcelas de aire atravesaron la Central Termoeléctrica "Presidente Plutarco Elías Calles", localizada en el poblado de Petacalco (ver símbolo ). Las masas de aire con origen del Golfo (Noreste de México) atraviesan ciudades como Ciudad de México (ver símbolo ), Cuernavaca, Ecatepec, Pachuca, Poza Rica, Puebla, Toluca y Tula.

En las Figuras 6.11, 6.13 y 6.15 se muestran los mapas de trayectorias de retroceso para los eventos de lluvia que registraron las concentraciones más bajas de SO_4^{2-} , NO_3^- y azufre. En ellos se observa que, en un 56% de los casos, las masas de aire provienen del Pacífico, y en un 44% se tiene un origen local; lo anterior hace suponer que las concentraciones de estos elementos no se ven afectadas cuando se tiene un origen en estos puntos, y que la influencia de las ciudades cercanas con escasa industrialización y un discreto parque automotor no influyen en gran medida a su concentración. Con relación al pH (valores ácidos), se observó que en el 67% de los casos se tiene un origen en el Pacífico, y en un 33% en el Golfo; las trayectorias que provienen del Pacífico atraviesan la Central Termoeléctrica de Petacalco, mientras que, la trayectoria con origen del Golfo cruza ciudades como Ciudad de México, Cuernavaca, Pachuca y Poza Rica; a partir de esto, se infiere que la influencia de la Central Termoeléctrica y de grandes urbes, pueden estar favoreciendo la acidez de la lluvia.

En las Figuras 6.12, 6.14 y 6.16 se muestran los mapas de trayectorias de retroceso para los eventos de lluvia que registraron las concentraciones más altas de SO_4^{2-} , NO_3^- y azufre. En ellos se observa que, en un 67% de los casos, las masas de aire provienen del Golfo, y en un

33% se tiene un origen en el Pacífico (específicamente, a las cercanías de Petacalco); lo anterior hace suponer que la influencia de la Central Termoeléctrica de Petacalco y de grandes ciudades ubicadas al noreste del cuadrante de estudio (Ciudad de México, Cuernavaca, Ecatepec, Pachuca, Puebla, Toluca y Tula), pueden estar modificando la composición química de la precipitación pluvial. En lo que respecta al pH (valores alcalinos), se observa que en el 67% de los casos se tiene un origen a escala local, y en un 33% en el Pacífico; a partir de esto, se puede inferir que la influencia de la litología local (carbonato de calcio), así como del Océano Pacífico, pueden estar favoreciendo la alcalinidad de la lluvia.

El modelo HYSPLIT no considera la topografía del lugar y la reacción química en la atmósfera. En este modelo sólo se pudo apreciar el origen de la humedad que genera propiamente la lluvia. Por lo anterior es complicado o poco probable que estas trayectorias demuestren que, durante el recorrido se hayan incorporado los precursores (SO_4^{2-} y NO_3^-). Para poder establecer mediante trayectorias cual es el origen de los precursores para los tres sitios de estudio, se requiere de un modelo más fino y trayectorias a diferentes niveles de altitud que muestren tanto el viento en superficie (correspondiente al transporte de precursores) y en niveles más altos (correspondientes al origen de la humedad).

Dentro de los fenómenos meteorológicos que fueron considerados, se detectó que los impactos climáticos asociados con los frentes fríos (ciclones tropicales) se localizaron principalmente sobre la vertiente Pacífico (Pacífica) de Guerrero, mientras que aquellos asociados con las ondas del este tuvieron una distribución espacial más homogénea a lo largo del país.

7.8 Vientos de superficie

La Figura 6.17 muestra las rosas de vientos realizadas con el programa WRPLOT View 7.0.0, sobrepuestas al mapa litológico del área de estudio. En el sitio TX, se observa una dirección preferencial del noreste con velocidades entre 0.5 a 3.6 m/s. Esta dirección coincide con lo reportado en la Figura 6.7, en donde existe una buena correlación entre los depósitos de jales El Solar, Guerrero 2 y Los Jales con respecto a las concentraciones de cobre obtenidas en el agua de lluvia. Lo anterior permite establecer que existe cierto aporte de elementos vinculados a depósitos de jales de esta área con relación a la fracción soluble del agua pluvial de este sitio en particular.

CONCLUSIONES

- La concentración más alta en los tres sitios de estudio (Iguala de la Independencia, Taxco el Viejo y Taxco de Alarcón), la registró el no metal S. Esto está en relación con la mineralización de la región, rica en minerales sulfurados, la cual puede estar afectado a la concentración total del agua de lluvia de la región, ya sea a partir de la erosión de rocas y suelos, o liberado mediante procesos de óxido-reducción de los jales circundantes.
- Las concentraciones de metales y metaloides (Al, As, Ba, Cu, Fe, Mn, Si, Sr y Zn) determinados en la fracción soluble varían significativamente en un mismo sitio y a su vez de un sitio a otro, esto en función de la mineralogía de su litología, suelos y jales, así como de la cercanía existente entre cada uno de ellos.
- Se deduce que la concentración de metales y metaloides son producto de la erosión de rocas, suelos y jales de la región enriquecidos en estos elementos. Su difusión y suspensión ocurre en fase sólida (aerosoles), los cuales quedan atrapados en la cuenca y, al momento de la precipitación, son arrastrados hacia la superficie (fenómeno de Bellow-Cloud Scavenging), otorgando una impronta particular a la química del agua de lluvia del área de estudio.
- Con base en los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, se puede observar que las concentraciones iónicas (SO_4^{2-} , NO_3^- , K^+ , Na^+ y Mg^{2+}) determinadas en la fracción soluble, están de acuerdo con lo reportado para sitios urbanos. En lo que respecta a Taxco el Viejo (zona rural), la abundancia iónica obtenida, está de acuerdo con lo reportado para zonas rurales, con influencia antropogénica mínima.
- El ión más abundante en la fracción soluble de los tres sitios de muestreo corresponde al Ca^{2+} , esto está en relación con la geología del lugar, la cual es rica en carbonatos de calcio (Formación Morelos). El alto contenido de Ca^{2+} puede explicar la neutralización del pH de la región. La concentración del ión Ca^{2+} en Iguala de la Independencia, fue mayor, lo cual puede estar asociado a la constante extracción de piedra caliza.

- De manera general, se puede observar que existe una buena correlación entre elementos abundantes en rocas y suelos de la región (Ba, Mn y Sr) con elementos comunes en la corteza terrestre (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+).
- De acuerdo con los cálculos realizados mediante la ecuación del Factor de Enriquecimiento (*FE*), se demostró que existe enriquecimiento en As y Zn en Taxco el Viejo, y en As, Cu y Zn en Taxco de Alarcón. Se infiere que los depósitos de jales, cercanos a ambos sitios, influyen en su concentración.
- Las trayectorias para los tres sitios de estudio muestran que, durante el período de muestreo 2017, las trayectorias de las masas de aire indicaron un posible origen del sureste (Océano Pacífico) y noreste (Golfo) de la República Mexicana.
- Las concentraciones de SO_4^{2-} y NO_3^- fueron mayores cuando las trayectorias de masas de aire tienen un origen en el noroeste de la República Mexicana.

RECOMENDACIONES

- Es importante continuar con este estudio tomando en cuenta no sólo la concentración total de metal, sino su distribución química (especiación), sus variaciones estacionales (períodos secos y húmedos), variaciones espaciales, su cinética y toxicidad.
- Se recomienda mejorar el diseño de colección de muestras de agua de lluvia, implementando colectores automáticos que permitan el muestreo del depósito húmedo y seco recomendado por la NADP (Programa Nacional de Depósito Atmosférico de Estados Unidos de América). A partir de la especiación del depósito seco, éste contribuirá en la explicación de la alcalinización de la lluvia.
- Dado que en la actualidad se están realizando técnicas de biorremediación (cubiertas vegetales) a las pilas de jales de la región de estudio, se recomienda continuar el estudio de la química elemental del agua de lluvia del Distrito Minero de Taxco, con el objeto de identificar y verificar la efectividad de las técnicas de biorremediación aplicadas a las mismas.
- Se recomienda ampliar el número de sitios de muestreo, con el objeto de identificar variaciones espaciotemporales en las concentraciones del agua de lluvia.
- Se recomienda realizar estudios de geoquímica elemental a cada una de las litologías y suelos de las diferentes Formaciones Geológicas presentes en la región de estudio, esto con el objeto de fortalecer el análisis de Factores de Enriquecimiento.
- Se recomienda aplicar isótopos de azufre y estroncio a las muestras de agua de lluvia, con el objeto de corroborar si el *run-off* proviene de los jales mineros y/o rocas del área de estudio.
- Se recomienda que en estudios futuros se realice el análisis de la fracción insoluble del agua de lluvia, la cual incluye partículas de polvo atmosférico, sal marina, partículas de carbono elemental, lo que sugiere que este tipo de partícula probablemente se incorporan en las nubes durante el transporte a larga distancia.

- Se recomienda la aplicación de otros modelos de trayectoria más sensibles, que involucren: modelos numéricos globales, sinópticos de mesoescala y de microescala, que simulen los procesos de transformación química, desarrollo de nubes, transporte, deposición y dispersión de contaminantes.
- Es importante tomar en cuenta para investigaciones futuras, los procesos microfísicos, químicos y dinámicos que determinan la composición química de la precipitación pluvial.

BIBLIOGRAFÍA

- A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus
- Schwartz, S.E., y Slingo, A. (1996). Enhanced shortwave cloud radiative forcing due to anthropogenic aerosols. En *Clouds, Chemistry and Climate* (Crutzen P., y Ramanathan V.). Heidelberg, Alemania: Springer.
- Adams, D.F., Farwell, S.O., Robinson, E., Park, M.R., y Bamsberger, W.L. (1981). Biogenic sulfur source strengths. *Environmental Science and Technology*, 15, 1493-1498.
- Ahrens, C.D. (2009). *Meteorology Today: An introduction to Weather, Climate, and the Environment* (Novena Edición). Brooks/Cole Cengage Learning.
- Ahrens, C.D., y Henson, R. (2016). *Essentials of meteorology: An invitation to the atmosphere* (Octava Edición). Estados Unidos de América: Engage Learning.
- Ahrland, S., Chatt, J., y Davies, N.R. (1958). The relative affinities of ligand atoms for acceptor molecules and ions. *Quarterly Reviews Chemical Society*, 12, 265-276.
- Alaniz, S.A., Nieto, A.F., Orozco, M.T., Vasallo, L.F., y Xu, S.S. (2002). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende: Implicaciones en la deformación post-Eocénica del centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 55, 12-29.
- Alba, L.A., Reyes, M., Morán, D.J., Ángeles, B.S., y Corona, R. (1996). Geoquímica de las rocas volcánicas terciarias de la región de Taxco-Huautla. En Memoria del VII Congreso Nacional de Geoquímica, San Luis Potosí. Actas INAGEQ 2, 39-44.
- Albrecht, B.A. (1989). Aerosols, Cloud Microphysics, and Fractional Cloudiness. *Science*, 245(4923), 1227-1230.
- Alfaro, S.C., Gaudichet, A., Gomes, L., y Maillé, M. (1998). Mineral aerosol production by wind erosion: Aerosol particle sizes and binding energies. *Geophysical Research Letters*, 25, 991-994.
- Al-Khashman O. A., y Shawabkeh R. A. (2009). Metal distribution in urban soil around steel industry beside Queen Alta Airport, Jordan. *Environmental Geochemistry Health*, 31(6), 717-726.
- Alloway, B.J., y Jackson A.P. (1991). The behavior of heavy metals in sewage sludge amended soils. *The Science of the Total Environment*, 100, 151-176.
- Al-Momani, I. F. (2003). Trace elements in atmospheric precipitation at Northern Jordan measured by ICP-MS: acidity and possible sources. *Atmospheric Environment*, 37, 4507-4515.
- Al-Momani, I.F., Ataman, O.Y., Anwari, M. A., Tuncel, S., Köse, C., y Tuncel, G. (1995). Chemical Composition of precipitation near an industrial area at Izmir, Turkey. *Atmospheric Environment*, 29(10), 1131-1143.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation (APHA-AWWA-WEF). (2012). *Standard Methods for the Examination of Waste and Wastewater* (Decimoctava Edición). Washington, Estados Unidos de América: American Public Health Association.
- Andreae, M.O. (1985). The emission of sulfur to the remote atmosphere. En *The biogeochemical cycling of sulfur and nitrogen in the remote atmosphere* (Galloway, J.N., Charlson, R.J., Andreae, M.O., y Rodhe, H.). Dordrecht, Holanda: Reidel.
- Arcega-Cabrera, F., Armienta, M.A., Daesslé, L.W., Castillo-Blum, S.E., Talavera, O., y Dótor, A. (2009). Variations of Pb in a mine-impacted tropical river, Taxco, Mexico: Use of geochemical, isotopic and statistical tools. *Applied Geochemistry*, 24, 162-171.
- Arcega-Cabrera, F., Castillo-Blum, S.E., y Armienta, M.A. (2005). Kinetic study of the release of lead in a mine-impacted tropical river. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 75, 523-529.
- Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). (2005). *AMAP Assessment 2002: Heavy Metals in the Arctic*. Oslo, Noruega: AMAP.
- Arellano, J., Talmon, A.M., y Buities, P.J.H. (1990). A chemically reactive plume model for the NO-NO₂-O₃ system. *Atmospheric Environmental*, 24, 237-246.
- Armienta, M. A., Talavera, O., Morton, O., y Barrera, M. (2003). Geochemistry of Metals from Mine Tailings in Taxco, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 71, 387-393.
- Armienta, M.A., Dótor, A., Arcega-Cabrera, F.E., Talavera, O., Aguayo, A., Cenicerros, N., y Cruz, O. (julio de 2007). Assessing water-sediment processes for metals in rivers polluted by mining to predict environmental impacts in developing countries. Presentado en la Asamblea General XXIV de The International Union of Geodesy and Geophysics. Asamblea llevada a cabo en Perugia, Italia.
- Armienta, M.A., Talavera, O., Cenicerros, N., Aguayo, A., y Cruz, O. (2000). Caracterización geoquímica de cuerpos de agua en la zona Taxco-Taxco el Viejo, Guerrero. Actas INAGEQ.
- Armienta, M.A., Talavera, O., Villaseñor, G., Espinosa, I., Pérez, O., Cenicerros, N., y Aguayo, A. (2004). Environmental behavior of metals from tailings in shallow rivers: Taxco, central México. *Applied Earth Science*, 113, 76-82.
- Artaxo, P., Storms, H., Bruynseels, F., y Van Grieken, R.J. (1988). Composition and sources of aerosols from the Amazon basin. *Journal of Geophysical Research*. 93, 1605-1615.
- Atkinson, R. (1999). Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds: A review. *Atmospheric Environmental*, 24, 1-41.
- Avila, A., y Alarcón, M. (1999). Relationship between precipitation chemistry and meteorological situations at a rural site in NE Spain. *Atmospheric Environment*, 33, 1663-1677.
- Báez, P.A., Belmont, D.R., García, R., Torres, M., y Padilla, H.G. (2007). Rainwater chemical composition at two sites in Central Mexico. *Atmospheric Research*, 80, 67-85.
- Barry, R.G. y Chorley, J.C. (1999). *Atmósfera, tiempo y clima* (Séptima Edición). Barcelona, España: Omega.
- Bates, T.S., Lamb, B.K., Guenter, A., Dignon, J., y Stoiber, R.E. (1992). Sulfur emissions to the atmosphere from natural sources. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 14, 315-337.
- Bidlingmeyer, B.A. (1992). *Practical HPLC Methodology and Applications*. Estados Unidos de América: Wiley Interscience.

- Bigg, E.K., Gras, J.L., y Evans, C. (1984). Origin of Aitken particles in remote regions of the Southern Hemisphere. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1, 203-214.
- Bonet, F. (1971). *Espeleología de la Región de Cacahuamilpa, Guerrero*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Boletín* 90, 98.
- Boumans, J.M. (1987). Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy. En *Chemical Analysis* (Elving, P.J., y Winefordner, J.D.). Nueva York, Estados Unidos de América: John Wiley & Sons.
- Howell, R.J., Alpers, C.N., Jamieson, H.E., Nordstrom, D.K., y Majzlan, J. (2014). The environmental geochemistry of Arsenic, an overview. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 79(1), 1-16.
- Campa, M. F. y Coney, P. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distribution in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 1040-1051.
- Campa, M.F., e Iriando A. (2004). Significado de dataciones Cretácicas de los arcos volcánicos de Taxco, Taxco Viejo y Chapolapa, en la evolución de la plataforma Guerrero-Morelos: Unión Geofísica Mexicana, En IV Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra: Juriquilla, Querétaro, Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 24, Número 2, 173.
- Campa, M.F., Oviedo, R., y Tardy, M. (1976). La cabalgadura laramídica del dominio volcano-sedimentario (Arco de Alisitos-Teloloapan) sobre el miogeosinclinal mexicano en los límites de los estados de Guerrero y México. En III Congreso Latino-Americano de Geología, México, Resúmenes, 23.
- Campa-Uranga, M. F. y Coney, P. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distribution in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 1040-1051.
- Camprubí, A., Ferrari, L., Cosca, M.A., Cardellach, E., y Canals, A. (2003). Age of epithermal deposits in Mexico: Regional significance and links with the evolution of tertiary volcanism. *Economic Geology*, 98, 1029-1037.
- Camprubí, A., González-Partida, E., y Torres-Tafolla, 2006. Fluid inclusión and stable isotope study of the Cobre-Babilonia polymetallic epithermal vein system, Taxco district, Guerrero, Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, 89, 33-38.
- Camprubí, A., y Albinson, T. (2007). Epithermal deposits in Mexico-an update of current knowledge, and an empirical reclassification. *Geological Society of America Special Paper*, 422, 377-415.
- Cantrell, C.A., Shetter, R.E., y Calvert, J. (1996). Peroxy radical chemistry during field VOCs 1993 in Brittany, France. *Atmospheric Environmental*, 30(23), 947-957.
- Caquineau, S., Gaudichet, A., Gomes, L., Magonthier, M.C., y Chatenet, B. (1998). Saharan dust: Clay ratio as a relevant tracer to assess the origin of soil delivered aerosols. *Geophysical Research Letters*, 25, 983-986.
- Charlson, R.J., Anderson, T.L., y McDuff, R.E. (2000). The sulfur cycle. En *Earth system science: From biogeochemical cycles to global change* (Jacobson, M.C., Charlson, R.J., Rodhe, H., y Orians, G.H.). Gran Bretaña: International Geophysics Series, Vol. 72.
- Comisión Nacional del Agua-Organismo de Cuenca Balsas (CONAGUA-OCB). (2010). Estadísticas del agua en la cuenca del río Balsas. Recuperado de: http://centro.paot.org.mx/documentos/conagua/RIO_BALSAS_.pdf
- Cong, Z., Kang, S., Zhang, Y., y Li, X. (2010). Atmospheric wet deposition of trace elements to central Tibetan Plateau. *Applied Geochemistry*, 25, 1415-1421.
- Corrales-Pérez, D., y Romero, F.M. (2013). Evaluación de la peligrosidad de jales de zonas mineras de Nicaragua y México y alternativas de solución. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(3), 427-446.
- Crutzen, P.J., y Gidel, L.T. (1983). A two dimensional photochemical model of the atmosphere. The tropospheric budgets of the anthropogenic chlorocarbons, CO, CH₄, CH₃Cl and the effect of various NO_x sources on tropospheric ozone. *Journal of Geophysical Research*, 88, 6641-6661.
- Csavina, J. (2012). Metal and Metalloid Contaminants in Atmospheric Aerosols from Mining Operations (Tesis Doctoral). The University of Arizona, Department of Chemical and Environmental Engineering, Arizona, Estados Unidos de América.
- Damon, P.E., Shaffiquillah, M., y Clark, K.F. (1981). Age trends of igneous activity in relation to metallogenesis in the Southern Cordillera. *Arizona Geology Society*, 13, 137-154.
- De Cerna, Z., 1965. Reconocimiento Geológico en la Sierra Madre del Sur, entre Chilpancingo y Acapulco, Estado de Guerrero. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Boletín* 62, 76.
- De Cerna, Z., y Fries, C.J. (1981). Hoja Taxco 14Q-h(7), con Resumen de la geología de la Hoja Taxco, Estados de Guerrero, México y Morelos: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, Serie 1:100,000, 47.
- Derwent, R.G. (1999). Atmospheric chemistry. En *Air pollution and health* (Stephen T. Holgate). Londres, Inglaterra: Academic Press.
- Dold, B. (2010). Basic concepts in environmental geochemistry of sulfide mine-waste management. En *Waste Management* (Ed. Suni Kumar), ISBN 978-953-7619-84-8. INTECH open access publications, 173-198.
- Doria-Argumedo, C. (2017). Metales pesados (Cd, Cu, V, Pb) en agua lluvia de la zona de mayor influencia de la mina de carbón en La Guajira, Colombia. *Revista Colombiana de Química*, 46(2), 37-44.
- Dótor, A.A., Armienta, M.A., Arcega-Cabrera, F., y Talavera-Mendoza, O. (2014). Procesos de transporte de arsénico y metales en aguas superficiales del distrito minero de Taxco, México: Aplicación de isótopos estables (Transport processes of arsenic and metals in surface waters in the mining district of Taxco, Mexico). *Hidrobiológica*, 24, 245-256.
- Duce, R.A. (1995) Sources and distributions and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate. En *Aerosol forcing of climate* (Charlson R.J. y Heintzenberg J.), Estados Unidos de América: John Wiley & Sons.
- Duffus, J.H. (2002). "Heavy Metals"- A meaningless term? *Pure and Applied Chemistry*, 74(5), 793-807.
- Elinder, C.G. (1984). Metabolism and toxicity of metals. En *Changing metals cycles and human health* (Nriagu J.O.). Berlín, Alemania: Springer-Verlag.
- Facchinelli, A., Pastoro, L., Sacchi, E., y Costa, E. (2010). Chemical behaviour and mobility of copper in contaminated vineyard soils. En *Contaminated Soil 2000: Proceedings of the Seventh International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil* (Volumen 2). Leipzig, Alemania: Thomas Telford Publishing. 803-806.
- Farfán-Panamá, J.L., González-Partida, E., y Camprubí, A. (octubre de 2013). Geología y mineralización del depósito epitermal polimetálico del Distrito Minero de Taxco, Guerrero, México. Presentado en XXX convención internacional de Minería. Convención llevada a cabo en Acapulco, México.
- Farfán-Panamá, J.L., y González-Partida, E. (2010). Edad de la mineralización del Distrito Minero de Taxco, estado de Guerrero, México, por medio del método Ar/Ar. *Actas INAGEQ Vol. 16, No.1, Número especial dedicado al XX Congreso Nacional de Geoquímica*.

- Field, P.R., y Heymsfield, A.J. (2015). Importance of snow to global precipitation. *Geophysical Research Letters*, 42, 9512-9520.
- Flamarique, J. (2007-2008). Contaminación atmosférica: Focos emisores. Madrid, España: Escuela de Organización Industrial. Recuperado de <http://www.eoi.es/es/file/18221>
- Fletcher, N.H. (1962). *The physics of rainclouds*. Reino Unido: Cambridge University Press.
- Flossmann, A.L., y Pruppacher, H.R. (1988). A theoretical study of the wet removal of atmospheric pollutants. Part II: The uptake, redistribution, and deposition of (NH₄)₂SO₄ particles by convective cloud using a two dimensional cloud dynamical model. *Journal Atmospheric Science*, 45, 1857-1871.
- Fries, C.J. (1960). Geología del Estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, Región Central Meridional de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Boletín* 60, 236.
- Gaiero, D.M. (1998). Hidrogeoquímica de un sistema de la Región Semiárida: el Río Suquía, Córdoba, Argentina, y fuentes de solutos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 53(2), 167-186.
- Galloway, J.N. y Likens, G.E. 1978. The Collection of precipitation for chemical analysis. *Tellus*, 30, 71-82.
- Galloway, J.N., Keene, W.C., y Likens, G.E. (1996). Processes controlling the composition of precipitation at a remote southern hemisphere location: Torres de Paine National Park, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 101, 6383-6897.
- Galloway, J.N., Likens, G.E., Keene, W.C., y Miller, J.M. (1982). The composition of precipitation in remote áreas of the world. *Journal of Geophysical Research*, 87(11), 8771-8786.
- Galloway, J.N., Likens, G.E., y Hawley, M.E. (1984). Acid precipitation: natural versus anthropogenic components. *Science*, 226, 829-831.
- García, J.A. (2016). *Protección ambiental del aire*. Ciudad de México, México: Comité Editorial de la Facultad de Química, UNAM.
- García, R., Torres, M.C., Padilla, H., Belmont, R., Azpra, E., Arcega-Cabrera, F., y Báez, A. (2006). Measurement of chemical elements in rain from Rancho Viejo, a rural wooded area in the State of México, México. *Atmospheric Environment*, 40, 6088-6100.
- Gaytán, E., y Benita, F. (2014). La industria minera en México: Patrones de desempeño y determinantes de eficiencia. *Lecturas de economía*, 80, 103-131.
- Glaccum, R.A., y Prospero, J.M. (1980). Saharan aerosols over the tropical North-Atlantic mineralogy. *Marine Geology*, 37, 295-321.
- Guzmán-García, E.I. (2010). Caracterización químico-mineralógica de partículas sedimentables en Iguala de la Independencia, Gro (Tesis de Licenciatura). Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero, Taxco el Viejo, Guerrero, México.
- Harrison, R.M., y Grieken, R.E. (1998). Atmospheric Particles. En *IUPAC: Series on Analytical and Physical Chemistry of Environmental Systems* (Buffle, J., y Van Leeuwen, H.P). Estados Unidos de América: John Wiley & Sons.
- Harrison, R.M., y Pio, C. (1983). Size differentiated composition of inorganic aerosol of both marine and continental polluted origin. *Atmospheric Environment*, 17, 1733-1738.
- Herrera-Murrillo, J., y Rodríguez-Román, S. (2009). Determinación de la concentración de aniones en muestras de precipitación total colectadas en San José, Costa Rica: primera parte. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(2), 65-72.
- Hidy, G.M. (1994). *Atmospheric Sulfur and Nitrogen Oxides*. San Diego, California: Academic Press.
- Howard, H. (2008). Intoxicación por Metales Pesados, En *Harrison Medicina Interna* (Kasper, D., Fauci, A., Hauser, S., Longo, D., Jameson, J.L., y Loscalzo, J.). México: McGraw Hill Companies.
- Hutchinson, T.C., y Havas, M. (1978). *Effects of acid precipitation of terrestrial ecosystems*. New York, Estados Unidos de América: Plenum Press.
- Industrial Minera México S.A. de C.V. (IMMSA). (1978). Yacimientos minerales metálicos del Distrito Minero de Taxco (Reporte interno). Taxco, Guerrero, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2009b). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Taxco de Alarcón, Guerrero. Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México. Clave geoestadística 12055.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2009a). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Iguala de la Independencia, Guerrero. Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México. Clave geoestadística 12035.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), (1999). Síntesis geográfica del estado de Guerrero. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2010). Censo de Población y Vivienda. Principales resultados por localidad (ITER). Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (1996). *Climate change: The science of climate change*. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press.
- International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). (2014). Compendium of Chemical Terminology "Gold Book" (Versión 2.3.3). Oxford, Gran Bretaña: Blackwell Scientific Publications.
- Jacob, D.J. (1999). *Introduction to Atmospheric Chemistry*. Estados Unidos de América: Princeton University Press.
- Jacobson, M.C. (2002). *Atmospheric pollution: History, science, and regulation*. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press.
- Jacobson, M.C., Charlson, R.J., Rodhe, H., y Orians, G.H. (2000). *Earth system science: From biogeochemical cycles to global change* (Volumen 72). Gran Bretaña: International Geophysics Series.
- Jaffe, D.A. (2000). The nitrogen cycle. En *Earth system science: From biogeochemical cycles to global change* (Jacobson, M.C., Charlson, R.J., Rodhe, H., y Orians, G.H.). Gran Bretaña: International Geophysics Series, Vol. 72.
- Järup, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, 68, 167-182.
- Jönsson, J.A. (1987). *Chromatographic Theory and Basic Principles* (Vol. 38). Estados Unidos de América: Marcel Dekker.
- Jorgensen, B.B. (1990). A thiosulfate shunt in the sulfur cycle of marine sediments. *Science*, 249, 152-154.
- Junge, C.E. (1963). *Air Chemistry and Radioactivity*. New York, Estados Unidos de América: International Geophysics Series, Vol. 4.
- Kabatas-Pendias, A., y Pendias, H. (2001). Trace elements in soils and plants (Tercera Edición). Florida, Estados Unidos de América: CCR Press.
- Keller, B.J., Peden, M.E., y Skowron, L.M. (1988). *Methods for collection and analysis of precipitation: trace metals*. Estados Unidos de América: U.S.EPA.

- Khemani, L.T., Momin, G.A., Prakasa Rao, P.S., Safai, P.D., Sing, G., y Kappor, R.K. (1989). Spread of acid rain over India. *Atmospheric Environment*, 18,1701-1709.
- Klopman, G. (1974). Generalized perturbation theory of chemical reactivity. En *Chemical Reactivity and Reaction Paths* (Klopman, G.). Nueva York, Estados Unidos de América: Wiley.
- Kulmala, M., Dal Maso, M., Mäkelä, J. M., Pirjola, L., Väkevä, M., Aalto, P., Miikkulainen, P., Hameri, K., y O'Dowd, C. D. (2001). On the formation, growth and composition of nucleation mode particles. *Tellus B*, 53, 479–490.
- Lantzy, R.J., y Mackenzie, F.T. (1979). Atmospheric trace metals: global cycles and assessment of man's impact. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43(4), 511-525.
- Lau, K.M., y Wu, H.T. (2003). Warm rain processes over tropical oceans and climate implications. *Geophysical Research Letters*, 30, doi: 10.1029/2003GL018567
- Lee, B.K., Hong, S.H., y Lee, D.S. (2000). Chemical composition of precipitation and wet deposition of major ions on the Korea Peninsula. *Atmospheric Environmental*, 34, 563-575.
- Lewis, G.N. (1923). *Valence and the Structure of Molecules*. Nueva York, Estados Unidos de América: The Chemical Catalogue Company.
- Lide, D.R. (2007). *CRC Handbook of chemistry and physics* (Octogésima segunda). Florida, Estados Unidos de América: Taylor & Francis Group.
- Logan, J., Prather, M.J., Wofsy, S.C., y McElroy, M.B. (1981). Tropospheric chemistry: a global perspective. *Journal of Geophysical Research*, 86, 7210-7254.
- Lohmann, U., Lüönd, F., y Mahrt, F. (2016). *An introduction to clouds from the microscale to climate*. Reino Unido, Inglaterra: Cambridge University Press.
- Loska, K., Cebula, J., Pelczar, J., Wiechula, D., y Kwapiński, J. (1997). Use of enrichment and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik water reservoir in Poland. *Water, Air, and Soil Pollution*, 93, 347-365.
- Löye-Pilot, M.D., Martin, J.M., y Morelli, J. (1986). Influence of Saharan dust on the rain acidity and atmospheric input to the Mediterranean. *Nature*, 321, 427-428.
- Ludgens, F.K. (1992). *The atmosphere: An introduction to meteorology* (Quinta Edición). Nueva Jersey, Estados Unidos de América: Prentice-Hall.
- Luo, W. (2001). Wet deposition fluxes of soluble chemical species and the elements in insoluble materials. *Atmospheric Environment*, 35, 2963-2967.
- Manahan, S.E. (2007). *Introducción a la química ambiental*. Ciudad de México, México: Reverté UNAM.
- Marquardt W., Brüggemann E., Auel R., Herrmann H. y Möller D. (2001). Trends of pollution in rain over East Germany caused by changing emissions. *Tellus B*, 53, 529-545.
- Marticorena, B., Bergametti, G., y Aumont, B. (1997). Modeling the atmospheric dust cycle 2. Simulation of Saharan dust sources. *Journal of Geophysical Research*, 102, 4387-4404.
- Mason, B., y Moore, C. (1982). *Principles of Geochemistry* (Cuarta Edición). Nueva York, Estados Unidos de América: Wiley Publishing.
- Mason, B.J. (1972). Nubes, lluvia y "lluvia artificial". Buenos Aires, Argentina: Editorial Universitaria de Buenos Aires.
- Mason, B.J. (1972). *Nubes, lluvia y lluvia artificial*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Universitaria de Buenos Aires.
- Méndez-Ramírez, M., y Armienta, M.A. (2012). Distribución de Fe, Zn, Pb, Cu, Cd y As originada por residuos mineros y aguas residuales en un transecto del Río Taxco en Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(2), 450-462.
- Mészáros E. (1999). *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*. Estados Unidos de América: Akadémiai Kiadó.
- Mészáros, A., y Vissy, K. (1974). Concentration, size distribution and chemical nature of atmospheric aerosol particles in remote oceanic areas. *Journal of Aerosol Science*, 5, 101-109.
- Meyer, V. (1994). *Practical High-Performance Liquid Chromatography* (Segunda Edición). Estados Unidos de América: John Wiley & Sons.
- Meza-Figueroa, D., Valencia-Moreno, M., Valencia, V.A., Ochoa-Landín, L., Pérez-Segura, E., Díaz-Salgado, C. (2003). Major and trace element geochemistry and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of Laramide plutonic Rocks associated with gold-bearing Fe skarn deposits in Guerrero state, southern Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 205-217.
- Migliavacca, D., Teixeira, E.C., Wiegand, F., Machado, A.C.M., y Sánchez, J. (2005). Atmospheric precipitation and chemical composition of an urban site, Guaíba hydrographic basin, Brazil. *Atmospheric Environment*, 39(10), 1829-1844.
- Moaref, S., Sekhavaţou, M., y Hosseini, A. (2014). Determination of trace elements concentration in wet and dry atmospheric deposition and surface soil in the largest industrial city, Southwest of Iran. *International Journal of Environmental Research*, 8(2), 335-346.
- Monhanraj, R., y Azeet, T. (2004). Heavy metals in airborne particulate matter of Urban Coimbatore. *Environmental Contamination and Toxicology*, 47.
- Montaser, A., y Golightly, D.W. (1992). *Inductively Coupled Plasmas in Analytical Atomic Spectrometry* (Segunda Edición). Nueva York, Estados Unidos de América: VCH Publishers.
- Montero, A. (2014). Evaluación de los métodos de biomonitorio con líquenes para estudiar el grado de contaminación atmosférica por elementos traza en La Habana (Tesis Doctoral). Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, La Habana, Cuba.
- Montgomery, D.N. (1971). Collision and coalescence of water drops. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28, 284-286.
- Montgomery, D.N. (1971). Collision and coalescence of water drops. *Journal of the Atmospheric Science*, 28, 284-286.
- Morán-Zenteno, D.J., Alba-Aldave, L.A., Martínez-Serrano, R.G., Reyes-Salas, M.A., Corona Esquivel, R., y Ángeles-García, S. (1998). Stratigraphy, geochemistry and tectonic significance of the tertiary volcanic sequences of the Taxco-Quetzalapa Regio, Southern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 15(2), 167-180.
- Mülmenstädt, J., Sourdeval, O., Delanoë, J., y Quaas, J. (2015). Frequency of occurrence of rain from liquid, mixed and ice-phase clouds derived from A-Train satellite retrievals. *Geophysical Research Letters*, 42.
- Myers, R.J. (2010). One-hundred years of pH. *Journal of Chemical Education*, 87, 30-32.
- Norma Mexicana NMX-AA-91-1987: Calidad del suelo terminología. Diario Oficial de la Federación, 6 de noviembre de 1992.
- Nriagu, J.O. (1989). A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals. *Nature*, 338, 47-49.
- Nriagu, J.O. y Pacyna, J.M. (1988). Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils with trace metals. *Nature*, 333, 134-139.

- Pacyna, J.M., Voldner, E., Keeler, G.J., y Evans, G. (1993). Proceedings of the First Workshop on Emissions and Modelling of Atmospheric Transport of Persistent Organic Pollutants and Heavy Metals. Durham, Estados Unidos de América: U.S.EPA.
- Pacyna, J.M., y Winchester, J.W. (1990). Contamination of the global environment as observed in the Arctic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 82, 149-157.
- Park, S.M., Seo, B.K., Lee, G., Kahng, S.H., y Jang, Y.W. (2015). Chemical composition of water soluble inorganic species in precipitation at Shihwa Basin, Korea. *Atmosphere*, 6, 732-750.
- Pearson, R.G. (1968). Hard and soft acids and bases, HSAB, part 1: Fundamental principles. *Journal of Chemical Education*, 45, 581-587.
- Pflitzer, E.A. y Vouk, V. (1986). General considerations of dose-effect and dose-response relationships. En *Handbook on the toxicology of metals* (Friberg L., Nordberg G.F., y Vouk V.B). Amsterdam, Países Bajos: Elsevier Science.
- Phipps, D.A. (1981). Chemistry and biochemistry of trace metals in biological systems. En *Effect of Heavy Metal Pollution on Plants* (Lepp, N.W.). Estados Unidos de América: Applied Science Publishers.
- Pósfai, M., y Molnár, A. (2000). Aerosol particles in the troposphere: A mineralogical introduction. En *Environmental Mineralogy* (Vaughan, D.J. y Wogelius, R.A) Budapest, Hungría: University Press.
- Pruppacher, H.R. (1981). The microstructure of atmospheric clouds and precipitation. En *Clouds: Their formation, optical properties and effects* (Hobbs, P.V., y Deepak, A.). Academic Press.
- Pruppacher, H.R. (1981). The microstructure of atmospheric clouds and precipitation. En *Clouds: Their formation, optical properties and effects* (Hobbs, P.V., y Deepak, A.). Academic Press.
- Pruppacher, H.R., y Klett J.D. (1997). Microphysics of clouds and precipitation (Segunda Edición). Kluwe Academic Press.
- Pruppacher, H.R., y Klett, J.D. (1997). Microphysics of clouds and precipitation (Segunda Edición). Academic Publishers.
- Querol, X., Alastuey, A., López, A., Mantilla, E., y Plana, F. (1996). Mineralogy of atmospheric particulates around a large coal-fired power station. *Atmospheric Environment*, 30(21), 3557-3572.
- Querol, X., Alastuey, A., Puigercus, J.A., Mantilla, E., Miró, J.V., López, A., Plana, F., y Artiñano, B. (1998). Seasonal Evolution of Suspended Particles Around a Large Coal-Fired Power Station: Particle Levels and Sources. *Atmospheric Environment*, 32(11), 1963-1978.
- Raes, F., Dingenen, R., Vignati, E., Wilson, J., Putaud, J., Seinfeld, J., y Adams, P. (2000). Formation and cycling of aerosols in the global troposphere. *Atmospheric Environment*, 34, 4215-4240.
- Rahn, K.A. (1976) *The Chemical Composition of the Atmospheric Aerosol* (Reporte Técnico). University of Rhode Island.
- Rahn, K.A. (1976). *The chemical composition of the atmospheric aerosol* (Reporte Técnico). University of Rhode Island, Graduate School of Oceanography, Kingston, Estados Unidos de América.
- Ramírez, E., Miranda, R., Gracia, Y., y Balderas, I. (2010). Chemical composition of rainwater in northeastern México. *Atmósfera*, 23(3), 213-224.
- Ramírez-Guzmán, A.H. (2010). Caracterización química de agua, suelo y roca de las inmediaciones de los poblados de Coxcatlán y San Juan de Dios en el Norte del estado de Guerrero (Reporte Interno). Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero.
- Reid, J., Sayer, P., y Robert, M. (2002). Chemistry in the clouds: The role of aerosols in atmospheric chemistry. *Science Progress*, 85, 263-296.
- Reinmann, C., y De Caritat, P. (2005). Distinguishing between natural and antropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Science of the Total Environment*, 337, 91-107.
- Ritcey, G.M. (1989). *Tailings management: Problems and solutions in the mining industry*. Amsterdam, Países Bajos: Elsevier Science Publishers.
- Rogers, R.R., y Yau, M.K. (1996). *A Short Course in Cloud Physics* (Tercera Edición). Massachusetts, Estados Unidos de América: Butterworth-Heinemann.
- Romero, F.M., Armienta, M.A., Gutiérrez, M.E., y Villaseñor, G. (2008). Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 24(2), 43-54.
- Romero, F.M., Armienta, M.A., y González-Hernández, G. (2007). Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico. *Applied Geochemistry*, 22, 109-127.
- Romero, F.M., Nuñez, L., Gutiérrez, M.E., Armienta, M.A., y Cenicerros-Gómez, A.E. (2011). Evaluation of the Potential of Indigenous Calcareous Shale for Neutralization and Removal of Arsenic and Heavy Metals From Acid Mine Drainage in the Taxco Mining Area, Mexico. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 60, 191-203.
- Romero, F.M., y Gutiérrez-Ruiz, M. (2010). Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62, 43-53.
- Romero, M., Gaiero, D., París, M., Fórmica, S., Murray, J., De la Hoz, M., López, E., y Kirschbaum, A. (2017). Precipitaciones húmedas en el norte de Argentina: caracterización química de los componentes solubles en el Valle de Lerma, Salta. *Andean Geology*, 44, 59-78.
- Salvador, P. (2005). Caracterización de la Contaminación Atmosférica producidas por Partículas en Suspensión en Madrid (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Madrid, España.
- Samara, C., Tsitouridou, R., y Balafoutis, C. (1992). Chemical composition of rain in Thessaloniki, Greece, in relation to meteorological conditions. *Atmospheric Environmental*, 26(3), 359-367.
- Sánchez, N.E., y Jara, M.E. (2017). Evaluación de impacto ambiental por metales y metaloides. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 19, 10-16.
- Schütz, L., y Rahn, K.A. (1982). Trace-element concentrations in erodible soils. *Atmospheric Environment*, 16, 171-176.
- Scott, R.P.W. (1995). *Techniques and Practice of Chromatography* (Vol.70). Estados Unidos de América: Marcel Dekker.
- Seinfeld, J.H., y Pandis, S.N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollutions to Climate Change* (Segunda Edición). Estados Unidos de América: Wiley Interscience.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2010). Climatología, El clima en México. Recuperado de: <https://www.smn.cna.gob.mx>
- Shaw, R.A. (2003). Particle-turbulence interactions in atmospheric clouds. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35, 183-227.
- Sheehy, J.P., Achinger, W.C., y Simon, R.A. (1968). *Handbook of air pollution*. New York, Estados Unidos de América: Academic Press.
- Sieburth, J.M. (1982). Microbiological and organic-chemical processes in the surface and mixed layers. En *Air-sea exchange of gases and particles* (Liss, P.S., y Slinny, W.G.). Dordrecht, Holanda: Reidel.

- Smedley, P.L., y Kinniburgh, D.G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17, 517-568.
- Söderlund, R., y Svensson, B.H. (1976). The global nitrogen cycle. En *Nitrogen, Phosphorus and Sulfur – Global Cycles* (Svensson, B.H., y Söderlund, R.). Estocolmo, Suecia: Ecological bulletins, No. 22.
- Spicer, C.W., Keny, D.V., Ward, G.F., y Billick, I.H. (1993). Transformations, lifetimes, and sources of NO₂, HONO, and HNO₃ in indoor environments. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 43, 1479-1485.
- Strangeways, I. (2007). *Precipitation: Theory, Measurement and distribution*. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press.
- Talavera-Mendoza, O., Armienta, A., García, J., y Flores, N. (2006). Geochemistry of leachates from the El Fraile sulfide tailings piles in Taxco, Guerrero, southern Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 28, 243-255.
- Talavera-Mendoza, O., Ruiz, J., Díaz, E., Ramírez-Guzmán, A., Cortés, A., Salgado, S., Dótor, A., y Rivera, R. (2016). Water-rock-tailings interactions and sources of sulfur and metals in the subtropical mining region of Taxco, Guerrero (southern Mexico): A multi-isotopic approach. *Applied Geochemistry*, 66, 73-81.
- Talavera-Mendoza, O., Ruiz, J., Gehrels, G., Valencia, V., y Centeno, E. (2007). Detrital zircon U/Pb geochronology of southern Guerrero and western Mixteca arc successions (southern Mexico): New insights for the tectonic evolution of southwestern North America during the late Mesozoic. *Geological Society of America Bulletin*, 119, 1052-1065.
- Talavera-Mendoza, O., Yta, M., Moreno, R., Dótor, A., Flores, N., y Duarte, C. (2005). Mineralogy and geochemistry of sulfide-bearing tailings from silver mines in the Taxco, Mexico area to evaluate their potential environmental impact. *Geofísica Internacional*, 44, 49-64.
- Talbot, R.W., Andreae, M.O., Andreae T.W., y Harriss, R.C. (1988). Regional aerosol chemistry of the Amazon basin during the dry season. *Journal of Geophysical Research*, 93, 1499-1508.
- Thompson, M., y Ewing, G.W. (1983). *A Handbook of Inductively Coupled Plasma Spectrometry*. Glasgow, Reino Unido: Blackie.
- Tucker, M.E. (1991). *Sedimentary petrology. An introduction to the origin of sedimentary rocks* (Segunda Edición). Londres, Inglaterra: Blackwell Scientific Publishing.
- Twomey, S. (1977). The Influence of Pollution on the Shortwave Albedo of Clouds. *Journal of the Atmospheric Science*, 34, 1149-1152.
- United States Environmental Protection Agency (U.S.EPA). (1996). *Air Quality Criteria for Particulate Matter* (Reporte Interno).
- United States Environmental Protection Agency (U.S.EPA). (2007). Framework for metals risk assessment. Washington D.C., Estados Unidos de América: Office of the Science Advisor.
- Vargas-Estrada, L. (2010). Caracterización química-mineralógica de partículas sedimentables en las localidades de Cacalotenguano-Ejido (La Cañada), Taxco, Guerrero (Tesis de Licenciatura). Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero, Taxco el Viejo, Guerrero, México.
- Vernom, R.E. (2013). Which elements are metalloids? *Journal of Chemical Education*, 90(12), 1703-1707.
- Vet, R., Artz, R.S., Carou, S., Shaw, M., Ro, C., Aas, W., Baker, A., Bowersox, V.C., Dentener, F., Galy-Lacaux, C., Hou, A., Pienaar, J.J., Gilletti, R., Forti, M.C., Gromov, S., Hara, H., Khodzher, T., Mahowald, N.M., Nickovic, S., Rao, P.S.P., y Neville W. Reid, N.W. (2014). A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment*, 93, 3-100.
- Wakamatsu, S., Utsunomiya, A., Han, J.S., Mori A., Uno, I., y Uehara, K. (1996). Seasonal variation in atmospheric aerosol concentration covering Northern Kyushu, Japan and Seoul, Korea. *Atmospheric Environment*, 30, 2343-2354.
- Warneck, P. (1988). *Chemistry of the natural atmosphere*. Gran Bretaña: International Geophysics Series, Vol. 41.
- Wetangula, G., y Wamalwa, H. (2015). Trace Elements in Rainfall Collected around Menengai Area Kenya. *Proceedings World Geothermal Congress: Melbourne Australia*, 19-25.
- Woodcock, A.H. (1972). Smaller salt particles in oceanic air and bubble behavior in the sea. *Journal of Geophysical Research*, 77(27), 5316-5321.
- Zoller, W.H. (1983). Anthropogenic perturbation of metal fluxes into the atmosphere. En *Changing metals cycles and human health* (Nriagu J.O.). Berlín, Alemania: Springer-Verlag.

ANEXOS

En las Tablas A1.1 a A1.3 se presentan las fechas de las muestras de lluvia colectadas, las mediciones de parámetros fisicoquímicos (pH y conductividad eléctrica) y los datos de las concentraciones de iones inorgánicos en $\mu\text{Eq/L}$ determinados en los tres sitios de muestreo durante el período 2017. En las Tablas A1.4 a A1.6 se presentan los datos de las concentraciones de metales, metaloides y no metales en $\mu\text{g/L}$.

En las Tablas A2.1 a A2.3 y Figuras A2.1 a A2.3 se muestra un comparativo entre las concentraciones de iones inorgánicos versus el mes de su colección (mayo a octubre), para cada uno de los tres sitios durante el período de muestreo 2017.

Tabla A1.1 Resultados obtenidos de parámetros fisicoquímicos e iones inorgánicos ($\mu\text{Eq/L}$) en muestras de lluvia colectadas en Iguala de la Independencia en el 2017.

Muestra	Día	Mes	Lluvia (mm)	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	Ca ²⁺ ($\mu\text{Eq/L}$)	K ⁺ ($\mu\text{Eq/L}$)	Mg ²⁺ ($\mu\text{Eq/L}$)	Na ⁺ ($\mu\text{Eq/L}$)	NO ₃ ⁻ ($\mu\text{Eq/L}$)	SO ₄ ²⁻ ($\mu\text{Eq/L}$)
IG-01	25 y 26	5	44	6.2	39.4	80.82	12.79	13.42	10.57	33.87	50.42
IG-02	29	5	32.5	5.3	20.9	64.54	2.63	2.7	5.23	32.26	51.04
IG-03	30 y 31	5	24.3	6.5	16.5	64.54	1.64	1.8	0.88	24.52	25.83
IG-04	1	6	75	5.4	24.5	75.05	1.28	1.3	0.88	19.35	39.79
IG-05	4 y 5	6	31	6	22.7	94.71	5.68	9.35	5.86	38.06	56.25
IG-06	9 y 8	6	32.4	6.3	14.2	87.23	1.28	2.74	0.88	28.39	60.21
IG-07	13 y 14	6	10	6.4	36.4	98.17	6.55	17.43	2.59	35.32	21.88
IG-08	15	6	2.6	6.1	15.2	145.92	2.76	4.54	1.06	28.55	60.83
IG-09	17 y 18	6	24.4	5.5	19.6	106.97	1.28	3.03	0.88	32.42	36.46
IG-10	20	6	9.6	4.8	11.2	86.56	3.17	5.83	7.23	10.97	53.75
IG-11	23 y 24	6	25	6.3	23	127.47	1.28	4.14	3.43	26.61	29.17
IG-12	25	6	8.4	5.5	10.4	68.82	1.28	3.07	7.59	36.45	33.54
IG-13	27	6	33.7	5.4	11.4	92.04	1.28	1.39	0.88	25	22.71
IG-14	28	6	31.4	6.2	7.8	94.01	1.28	0.07	0.88	34.68	20.63
IG-15	1 y 2	7	33	6.4	10.7	96.65	3.58	2.17	4.49	8.39	13.13
IG-16	6	7	6.2	6.4	29	141.71	2.07	7.31	3.2	36.29	23.54
IG-17	8 y 9	7	25.4	5.9	10	99.89	1.28	1.54	3.81	14.52	29.79
IG-18	10 al 17	7	34.2	5.8	8.7	99.03	1.28	0.56	0.88	31.94	21.04
IG-19	22 al 30	7	62.6	5.3	21.8	137.56	2.84	7.24	7.94	35.48	37.08
IG-20	8 al 9	8	30.6	5.5	7.3	88.24	1.28	2.02	0.88	33.71	31.88
IG-21	10 y 11	8	29	5.5	8.3	120.5	1.99	32.79	16.83	31.13	41.46
IG-22	12 al 14	8	16	7.8	19	120	2.66	31.15	32.35	19.52	34.17
IG-23	18 al 25	8	56	6.7	30	148.5	1.59	123.77	22.04	44.84	43.75
IG-24	25 y 26	8	13.2	6.4	20.9	161.5	1.28	84.43	28.26	39.19	49.79
IG-25	27 y 28	8	13.6	6.7	20.5	143.5	1.28	23.77	42.04	41.45	61.88
IG-26	29	8	15	6.5	5.5	110.5	1.92	49.18	9.74	33.39	37.5
IG-27	30	8	16	6.3	10.8	103.5	2.61	27.87	27.13	47.26	62.29
IG-28	1	9	36.2	5.8	10.4	157	2.23	40.16	15.3	6.77	47.71
IG-29	3	9	9	5.9	12.1	86.5	1.28	50.82	28.48	40.32	38.33
IG-30	8 y 9	9	20.2	5.9	13.3	115.02	1.33	0.07	35	47.26	49.58
IG-31	10 al 15	9	21.2	6.1	30	158	1.28	56.56	8.65	47.26	70.21
IG-32	18 al 23	9	75	6	14.3	134.3	3.38	0.07	12.74	46.13	21.25
IG-33	24 al 28	9	23.4	6.5	21.9	148.5	2.38	13.93	35.57	28.87	15.63
IG-34	30	9	25.4	5.8	11.9	105.5	1.28	17.21	35.91	62.74	81.25
IG-35	1	10	14	6.3	11	107	2.61	40.16	31.52	57.58	95.42
IG-36	7	10	5	5.9	24.6	132	1.28	33.61	9.91	37.26	15.42
IG-37	13	10	9.8	6.8	33.3	170	1.28	36.89	31.65	41.45	66.04

Tabla A1.2 Resultados obtenidos de parámetros fisicoquímicos e iones inorgánicos ($\mu\text{Eq/L}$) en muestras de lluvia colectadas en Taxco el Viejo en el 2017.

Muestra	Día	Mes	Lluvia (mm)	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	Ca ²⁺ ($\mu\text{Eq/L}$)	K ⁺ ($\mu\text{Eq/L}$)	Mg ²⁺ ($\mu\text{Eq/L}$)	Na ⁺ ($\mu\text{Eq/L}$)	NO ₃ ⁻ ($\mu\text{Eq/L}$)	SO ₄ ²⁻ ($\mu\text{Eq/L}$)
TV-01	13	5	11	5.9	38.2	85.61	5.5	38.36	16.04	11.45	46.67
TV-02	26 y 27	5	40.6	5.3	21.1	79.17	5.98	5.6	4.6	14.84	48.96
TV-03	30 y 31	5	32.2	5	13.3	64.49	1.87	2.01	0.88	20.48	14.58
TV-04	1	6	12.2	6.1	20.4	118.07	2.4	1.98	3.73	21.45	61.46
TV-05	4 y 5	6	2.4	5.6	30.9	99.87	20.69	19.25	8.73	31.29	65.83
TV-06	6 y 7	6	15	4.9	20.6	76.41	2.23	2.93	3.59	41.94	43.96
TV-07	8 y 9	6	39.8	5	12.6	57.7	1.28	0.81	0.88	33.55	38.54
TV-08	10 al 12	6	7.4	6.3	15.9	90.9	4.02	4.91	5.37	32.58	39.17
TV-09	13 al 16	6	30	5.8	11.6	63.89	1.43	1.3	0.88	20	34.79
TV-10	19 y 20	6	6.6	6.1	27	133.99	7.47	13.11	7.6	15.48	51.88
TV-11	21 al 28	6	98	5	8.3	58.33	1.28	0.89	0.88	37.1	12.29
TV-12	1 y 2	7	58	6.2	9.8	75.03	1.28	0.32	0.88	23.55	29.17
TV-13	15 al 17	7	88.6	6.3	7.1	107.59	1.28	0.34	0.88	22.74	55.83
TV-14	18 al 3	7 y 8	90	5.6	18.7	56.62	1.28	0.83	0.88	30	18.75
TV-15	3 al 15	8	57	5.8	8.1	112.51	1.76	1.02	0.88	12.42	38.54
TV-16	16 al 29	8	77	5.7	29.1	92.5	8.87	56.56	3.44	38.06	16.88
TV-17	30	8	43.4	6.5	7.5	81	1.28	58.2	20	34.35	34.58
TV-18	1 al 5	9	69	6.1	16.5	148	5.4	32.79	20.35	40.32	45.83
TV-19	6 al 8	9	9	6.1	18.9	145.5	1.28	54.1	4.74	33.39	44.79
TV-20	9	9	7.6	5.4	10.3	63.5	1.94	30.33	9.43	36.29	36.46
TV-21	13	9	27.8	5.9	15.7	83.5	2.12	39.34	2.2	50	29.58
TV-22	14	9	4.2	5.7	13.6	123	3.04	10.66	31.74	34.52	26.04
TV-23	21 y 22	9	38	5	18	79	1.66	18.03	18.65	40.32	68.75
TV-24	23 al 25	9	75	5.7	13.2	61	1.36	10.66	2.12	43.87	7.71
TV-25	26	9	8.2	5.6	14.5	123	1.28	10.66	14.43	17.26	68.54
TV-26	28	9	14.2	7	27.7	137.5	2.61	18.85	18.48	32.26	61.04
TV-27	7	10	30.6	6.2	18.5	100	1.97	23.77	2.35	47.26	69.58
TV-28	13	10	7.6	6.7	14.2	95	1.28	24.59	7.09	44.68	54.79

Tabla A1.3 Resultados obtenidos de parámetros fisicoquímicos e iones inorgánicos ($\mu\text{Eq/L}$) en muestras de lluvia colectadas en Taxco de Alarcón en el 2017.

Muestra	Día	Mes	Lluvia (mm)	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	Ca ²⁺ ($\mu\text{Eq/L}$)	K ⁺ ($\mu\text{Eq/L}$)	Mg ²⁺ ($\mu\text{Eq/L}$)	Na ⁺ ($\mu\text{Eq/L}$)	NO ₃ ⁻ ($\mu\text{Eq/L}$)	SO ₄ ²⁻ ($\mu\text{Eq/L}$)
TX-01	3 al 5	5	6.8	5	49.5	75.27	97.95	39.34	29.65	53.23	46.67
TX-02	13	5	20.2	4.6	28.3	66.55	11	13.47	17.02	43.87	22.08
TX-03	12	5	15.8	4.9	39.8	69.64	24.71	15	20.45	36.77	18.13
TX-04	16 al 18	5	3.6	6.1	19.5	143.66	42.61	68.13	26.94	47.1	75.83
TX-05	22 al 25	5	21	4.7	27.5	49.52	6.21	8.58	8.34	40.81	73.33
TX-08	27	5	13.2	4.9	35.1	59.31	4.14	7.91	0.88	31.29	26.25
TX-09	28	5	23.2	6.4	12	80.51	1.46	2.7	3.57	38.87	45.83
TX-10	29	5	31.2	5.3	16.3	65.23	2.94	2.5	0.88	13.71	57.29
TX-11	31	5	15.8	6.5	16.2	70.92	2.2	3.82	0.88	19.84	29.17
TX-12	1	6	17.2	5	29.9	71.68	1.43	2.54	0.88	19.19	12.71
TX-13	4	6	3.2	5.7	10.2	107.31	1.28	14.03	9.16	40	22.71
TX-14	6	6	49	5.3	15	68.77	1.92	2.41	0.88	11.13	31.46
TX-15	7	6	23.4	6.3	21.8	44.38	4.71	5.78	3.04	22.58	48.54
TX-16	10	6	10	5.7	22.5	79.68	3.17	8.33	4.55	15.32	47.92
TX-17	14	6	18.2	4.8	15.4	74.74	1.28	2.13	0.88	10.81	34.38
TX-18	15	6	15.8	5	12.1	76.64	1.28	2.29	8.8	15.81	33.13
TX-19	16	6	12.8	5.3	18	76	1.28	1.89	0.88	9.03	34.79
TX-20	19	6	5	6.5	31.5	85	3.17	18.85	14.57	40.32	57.5
TX-21	22	6	8.2	6.4	19.6	82.5	2.94	13.11	21.52	33.39	45.42
TX-22	23	6	15.6	7.5	24.4	55	1.28	7.38	16.74	19.68	5.21
TX-23	24	6	21.4	6.2	19.9	53	7.11	4	3.78	21.13	34.17
TX-24	26	6	12.6	5.7	16.7	40.75	5.86	16.68	12.57	26.29	43.33
TX-25	30	6	13.2	4.7	10.2	63.12	1.28	1.25	0.88	29.68	21.46
TX-26	2	7	15.4	4.9	8.5	60.91	1.28	1.09	0.88	33.87	20.42
TX-27	3	7	11	5.8	11.7	65.89	2.33	1.65	4.79	25.32	3.13
TX-28	5	7	18.4	4.7	19.5	63.77	1.59	1.65	0.88	30.16	20.21
TX-29	6	7	13.6	4.8	11.8	62.97	1.28	1.25	0.88	19.35	22.08
TX-30	22	7	63.4	5.8	15.9	65.5	1.33	10.66	26.35	25.32	56.25
TX-31	30 y 31	7	34.2	4.9	10.5	103.5	1.36	16.39	21.43	38.06	57.29
TX-32	1 y 2	8	48.6	4.9	5.8	117	2.2	18.85	25.7	41.45	61.88
TX-33	9	8	26.4	5.6	13.4	71	5.68	21.31	22.65	56.45	55.83
TX-34	10	8	26.4	5.4	15.7	54.5	1.66	15.57	55.83	34.52	47.29
TX-35	11	8	18.6	7.2	6	127	1.36	22.13	24.78	31.13	43.54
TX-36	13	8	13	5.9	8.1	99.5	1.28	27.05	35.83	58.71	48.54
TX-37	16	8	8	5.3	19.3	104.5	1.74	27.87	18.43	45	40.63
TX-38	18	8	15.4	6.1	11	83.5	2.07	19.67	36.48	36.94	35.63
TX-39	19	8	7	5.7	12	59	1.15	24.59	5.17	46.13	30.42

Tabla A1.3 (Continuación).

Muestra	Día	Mes	Lluvia (mm)	pH	CE (μS/cm)	Ca ²⁺ (μEq/L)	K ⁺ (μEq/L)	Mg ²⁺ (μEq/L)	Na ⁺ (μEq/L)	NO ₃ ⁻ (μEq/L)	SO ₄ ²⁻ (μEq/L)
TX-40	20	8	16	5.3	17.5	71.5	0.87	31.97	13.13	45	23.96
TX-41	21	8	9.2	5.7	33.7	102	1.71	10.66	10.17	54.19	26.46
TX-42	22	8	17.8	5.8	15.3	42	1.79	7.38	6.74	25.32	44.79
TX-43	23	8	18.4	6.4	13.8	58.33	1.46	0.9	0.88	67.26	43.33
TX-44	24	8	9.2	5.3	15.9	57.52	2.3	0.33	0.88	33.39	12.92
TX-45	26	8	20.4	5.2	14.2	57.59	14.42	0.33	0.88	19.52	15.42
TX-46	29	8	14	5.9	11.9	56.61	3.48	0.82	0.88	45	39.38
TX-47	30	8	12.8	5.5	16.2	62.51	5.22	1.07	0.88	7.74	45.42
TX-48	31	8	14.4	5.9	10.2	75.27	4.19	20.33	29.65	46.29	48.33
TX-49	1	9	11.8	6.5	10.7	66.55	2.1	13.44	17	55.16	45.63
TX-50	2	9	12.4	7	9.8	69.64	1.53	15	20.43	21.29	38.75
TX-51	3	9	8.6	5.8	28.3	83.65	2.51	68.11	44.35	47.74	52.08
TX-52	4	9	17.8	6.1	13.4	49.52	13.04	8.61	8.35	10.97	58.13
TX-53	6	9	19	5.4	22.8	59.31	9.44	78.69	0.88	48.23	55.42
TX-54	9	9	12.6	6.3	4.2	80.51	0.77	27.05	3.57	42.74	31.25
TX-55	13	9	29.4	5.5	12.5	65.23	11.84	2.54	0.88	22.74	56.25
TX-56	14	9	27.4	5.5	9.1	81	3.02	36.07	35.91	51.77	37.5
TX-57	17	9	18.2	6.4	12.3	126	5.98	22.95	4.57	41.45	53.96
TX-58	22	9	9.6	5.4	18.8	148.5	9.39	20.49	0.88	46.13	48.96
TX-59	25	9	15.2	7.5	17.5	100.5	9.08	64.75	8.78	61.29	32.71
TX-60	27	9	17.8	6.7	19.3	126.5	10.18	28.69	0.88	34.52	50.42
TX-61	28	9	13.8	5.6	8.4	151.5	10.74	26.23	3.78	42.74	52.5
TX-62	29	9	22.4	7.1	18.6	129	8.8	63.93	12.57	56.61	36.67
TX-63	1	10	20.6	6.7	20.8	63.12	7.06	1.23	0.88	57.74	27.92
TX-64	3	10	16	4.8	21	60.91	1.41	1.07	0.88	43.39	29.17
TX-65	7	10	12.6	5.7	19.4	65.89	5.91	1.64	4.78	54.03	62.08
TX-66	8	10	10.2	6.8	21.4	63.77	9.67	1.64	0.88	53.06	54.58
TX-67	11	10	13.8	5.3	26.2	64.54	12.33	1.8	0.88	20.32	49.38
TX-68	13	10	8.4	4.3	28.9	75.05	9.92	1.31	0.88	43.06	43.96

Tabla A1.4 Resultados obtenidos de metales, metaloides y no metales ($\mu\text{g/L}$) en muestras de lluvia colectadas en Iguala de la Independencia en el 2017.

Muestra	Día	Mes	Al ($\mu\text{g/L}$)	As ($\mu\text{g/L}$)	Ba ($\mu\text{g/L}$)	Fe ($\mu\text{g/L}$)	Mn ($\mu\text{g/L}$)	S ($\mu\text{g/L}$)	Si ($\mu\text{g/L}$)	Sr ($\mu\text{g/L}$)	Zn ($\mu\text{g/L}$)
IG-01	25 y 26	5	54	3.7	8.1	12	7	514.1	20.7	10.1	5
IG-02	29	5	20	4.5	1.4	10	13	405.4	24.4	1.3	1.1
IG-03	30 y 31	5	62	3.6	2.1	15	21.8	502.7	21.5	1.2	7.9
IG-04	1	6	14	2.3	8.2	14	1.3	420.2	49.9	0.7	5.1
IG-05	4 y 5	6	53	3.4	3.5	43	5.2	427.3	116.5	3.6	11.7
IG-06	9 y 8	6	16	5	5.4	6	30.1	513.9	35.5	1.6	5.1
IG-07	13 y 14	6	20	4	3.5	13	2.8	458.1	127.3	4.7	1.7
IG-08	15	6	64	3.4	2.1	52	55.5	412	121.7	2.4	9.5
IG-09	17 y 18	6	70	4.3	3.5	82	3.6	519.2	40.7	1.9	13
IG-10	20	6	67	4.4	2.1	85	44.2	473.1	84.4	3	4.5
IG-11	23 y 24	6	34	3.6	1.8	5	21.8	453.8	83.9	2.6	1.9
IG-12	25	6	57	6.1	1.2	11	11.9	440.7	29.3	1.3	7.6
IG-13	27	6	29	3.2	5.6	5	1.1	401.2	78	0.7	5.1
IG-14	28	6	42	4	2.1	5	0.2	465.2	87.4	0.1	3.9
IG-15	1 y 2	7	9	4.7	2.5	5	31.2	399.5	83.9	0.8	4
IG-16	6	7	75	5.7	3.5	8	0.6	520.6	20.9	5.5	9.8
IG-17	8 y 9	7	35	3.5	7.8	5	14	450.5	24.2	0.9	1.6
IG-18	10 al 17	7	8	3.8	8.2	5	0.9	442.4	28	0.2	6.3
IG-19	22 al 30	7	33	4.2	2.8	81	50.5	509.9	51.4	4	1.4
IG-20	8 al 9	8	67	4.3	2.7	5	1.7	460.3	24.8	0.8	4
IG-21	10 y 11	8	8	4.3	8.1	16	17.3	502.3	56.1	3.5	13.2
IG-22	12 al 14	8	38	3.9	5.5	15	3	457.2	35.9	4.5	6
IG-23	18 al 25	8	42	5.8	6.5	8	6.7	455	102	7.2	12.4
IG-24	25 y 26	8	19	3.7	12.6	21	13.7	467.8	103	5.7	8.6
IG-25	27 y 28	8	56	4.3	4.9	5	1.8	470.2	27.1	2.7	11.5
IG-26	29	8	80	4.2	4	13	4.8	392.6	116	2.4	15
IG-27	30	8	87	6.1	7.9	42	4.1	460	32.5	6.1	12.1
IG-28	1	9	68	5	3.8	11	38.1	459.1	40.4	4.9	1.6
IG-29	3	9	35	4.2	7.3	8	23.9	410.7	60	6.9	8.3
IG-30	8 y 9	9	75	3.3	1.7	5	2.2	535.4	111	11.5	13.6
IG-31	10 al 17	9	96	2.4	9.7	15	1.5	474.6	31.6	4.3	7.1
IG-32	18 al 23	9	59	4.2	4.5	12	2.1	413	69	3.9	3.9
IG-33	24 al 28	9	25	3	5.1	32	36.1	468	87	1.5	6.1
IG-34	30	9	43	2.9	5.1	12	32	467.9	17.4	3.1	9.5
IG-35	1	10	20	4.2	11.7	22	3.1	406.2	16.4	2.9	8
IG-36	7	10	63	2.5	4.9	5	62.8	505.1	68.4	10	4
IG-37	13	10	9	4.5	2.9	5	24.4	396.5	17.6	5.3	9

Tabla A1.5 Resultados obtenidos de metales, metaloides y no metales ($\mu\text{g/L}$) en muestras de lluvia colectadas en Taxco el Viejo en el 2017.

Muestra	Día	Mes	Al ($\mu\text{g/L}$)	As ($\mu\text{g/L}$)	Ba ($\mu\text{g/L}$)	Fe ($\mu\text{g/L}$)	Mn ($\mu\text{g/L}$)	S ($\mu\text{g/L}$)	Si ($\mu\text{g/L}$)	Sr ($\mu\text{g/L}$)	Zn ($\mu\text{g/L}$)
TV-01	13	5	82	7.5	8.6	63	19	677.9	37.5	11	22.1
TV-02	26 y 27	5	48	8.7	5.1	47	4.7	731	21.6	1.5	18
TV-03	30 y 31	5	39	6.6	4.7	36	1.3	657	46	0.6	17.1
TV-04	1	6	34	7	5.4	15	1.8	683.1	16.5	0.8	13.7
TV-05	4 y 5	6	74	8.7	4.1	33	12.2	670	72.7	4.1	15.1
TV-06	6 y 7	6	44	6.4	1.9	22	3.7	635.9	19	1.4	27.1
TV-07	8 y 9	6	5	8.8	3.4	5	0.8	621.9	37	0.3	44.4
TV-08	10 al 12	6	38	9.1	8.5	18	2.6	610.6	48.1	1.6	26.8
TV-09	13 al 16	6	21	6.4	5.7	5	1.4	604.2	4.6	0.5	14.7
TV-10	19 y 20	6	87	6.5	6.5	68	14.2	599.7	137	5.1	40.1
TV-11	21 al 28	6	5	9	4.7	33	1.3	693.9	26.7	0.4	26.9
TV-12	1 y 2	7	49	8.4	5.1	21	0.2	600.3	38	0.2	15
TV-13	15 al 17	7	24	7.3	0.8	25	0.2	570.3	45	0.1	32.5
TV-14	18 al 3	7 y 8	6	10	4.3	47	0.8	632.3	25.6	0.4	23.5
TV-15	3 al 15	8	20	8.1	5.5	19	1.1	582.6	44.6	0.5	33.1
TV-16	16 al 29	8	24	9.1	5.2	5	28	647.6	15.8	3.5	20.5
TV-17	30	8	17	8.1	8.2	14	76	646.4	18.7	4.3	51
TV-18	1 al 5	9	32	10	3.5	27	12	681.9	34.9	2.5	15.5
TV-19	6 al 8	9	47	8	7	40	20	653	27.2	4.9	20.7
TV-20	9	9	5	8.7	5.9	33	5	650.8	82.9	8.9	39
TV-21	13	9	8	10.6	2.5	16	81	649.9	10.4	6.6	62.7
TV-22	14	9	10	8.9	13.7	25	18	694.9	51.7	13.3	23.8
TV-23	21 y 22	9	5	9.5	18.1	24	9	598.6	28	15.3	35.3
TV-24	23 al 25	9	6	11.6	12.2	34	12	573.8	43	9.7	33.4
TV-25	26	9	15	9.5	9.2	18	90	682.6	28.6	5.5	25.1
TV-26	28	9	13	9	5	26	68	644.1	43	8.8	36.3
TV-27	7	10	12	13.9	10.9	28	120	609	77.4	14.5	38.1
TV-28	13	10	5	9.8	6.5	45	13	641.3	25.9	12.2	22.2

Tabla A1.6 Resultados obtenidos de metales, metaloides y no metales ($\mu\text{g/L}$) en muestras de lluvia colectadas en Taxco de Alarcón en el 2017.

Muestra	Día	Mes	Al ($\mu\text{g/L}$)	As ($\mu\text{g/L}$)	Ba ($\mu\text{g/L}$)	Cu ($\mu\text{g/L}$)	Fe ($\mu\text{g/L}$)	Mn ($\mu\text{g/L}$)	S ($\mu\text{g/L}$)	Si ($\mu\text{g/L}$)	Sr ($\mu\text{g/L}$)	Zn ($\mu\text{g/L}$)
TX-01	3 al 5	5	87	14.3	8.1	15.5	66	6.7	421.4	87.2	17.4	58.6
TX-02	13	5	75	14.7	2.9	2.1	46	8.2	390.1	75.7	3.9	51.5
TX-03	12	5	66	11.6	3.6	2.5	67	9.2	413.2	72	4.3	47
TX-04	16 al 18	5	58	14.2	21.9	7.7	32	56.4	484.9	67.1	28.4	56.1
TX-05	22 al 25	5	90	13.7	3.7	2.3	77	8.8	452.6	53.4	3.1	50.8
TX-08	27	5	95	10.5	4.4	1.7	48	7.9	469.9	61.7	3.5	54.6
TX-09	28	5	24	12.1	1.1	0.4	6	2.7	493.9	53.9	1.3	54.5
TX-10	29	5	19	12.1	3.3	5.2	19	2.1	476.3	35.7	1.1	51.7
TX-11	31	5	27	10.5	1	1.4	19	2.3	460.3	23.9	1.1	56.9
TX-12	1	6	34	11.3	2.9	1.4	9	1.8	506.8	22.6	1.1	51.6
TX-13	4	6	24	10.4	3.9	3	13	9.9	531.9	13.1	5.2	52.6
TX-14	6	6	28	13.1	2.2	0.4	5	3.1	551.7	22.6	1.2	45.7
TX-15	7	6	49	8	2.3	0.4	16	5.2	444.7	29.9	2.2	47.4
TX-16	10	6	42	8.5	1.9	0.4	26	4.7	583	48.9	2	50.6
TX-17	14	6	49	9.9	1.2	0.4	26	1.9	508.6	24.6	1.2	52.8
TX-18	15	6	48	13.1	2.1	1.9	8	1.9	513.1	26.2	1.2	54.3
TX-19	16	6	44	8.6	1.1	0.4	9	1.8	567.8	18.4	1.1	49.1
TX-20	19	6	29	9.8	18.4	1.5	14	16	457.7	59.7	20	33.5
TX-21	22	6	85	9.9	30.2	0.4	23	21	466	36	5.5	14.8
TX-22	23	6	63	10.8	11.3	0.4	38	13.8	499	42	12.8	32
TX-23	24	6	89	8.7	1.5	0.4	14	1.2	446	47.5	2.4	55.6
TX-24	26	6	74	9.7	1.2	1.6	50	5	442.5	69.9	2.1	54.9
TX-25	30	6	66	13	0.6	1.2	21	1.3	504.9	16.8	0.7	51.4
TX-26	2	7	86	9.4	0.4	0.4	28	1.2	449.8	24.1	0.6	52.6
TX-27	3	7	93	9.7	1	1.7	42	1.9	475.2	35.9	0.8	64.9
TX-28	5	7	78	13	1.1	1.6	26	1.5	396.7	36.2	0.8	65.8
TX-29	6	7	83	14.5	0.6	0.4	28	1.3	510.3	32.5	0.7	52.3
TX-30	22	7	42	14.7	15	0.4	65	60	472	41.8	11.4	22
TX-31	30 y 31	7	96	10.7	4.2	0.4	77	33	480	73.4	10.3	79
TX-32	1 y 2	8	25	9.4	5	15.5	38	21.6	390	39.2	44	52
TX-33	9	8	5	9.8	11.9	2.1	44	65	481	71.6	39	63
TX-34	10	8	18	9.1	4.8	2.5	31	8	408.6	49.1	11.3	72
TX-35	11	8	44	9.1	11.1	7.7	12	54	473	39.9	38	84
TX-36	13	8	67	9.5	3.7	2.3	20	82	392.5	67.4	27	99
TX-37	16	8	24	8.7	4.8	1.7	5	29	458.7	8.2	30	38.3
TX-38	18	8	5	9	2	0.4	19	99	495	23.5	24	22.5
TX-39	19	8	40	12.7	6.4	5.2	32	13	471.9	84.2	20	24.4
TX-40	20	8	85	11.6	7.5	1.4	26	22	466	60.6	19	41.7

Tabla A1.6 (Continuación).

Muestra	Día	Mes	Al (µg/L)	As (µg/L)	Ba (µg/L)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	Mn (µg/L)	S (µg/L)	Si (µg/L)	Sr (µg/L)	Zn (µg/L)
TX-41	21	8	34	6.7	9.8	1.4	24	41	465	24.8	28	86
TX-42	22	8	78	8.5	2.1	3	55	90	463	22	12.4	84
TX-43	23	8	45	12	0.7	1.5	75	1.3	494	38.9	0.4	27
TX-44	24	8	21	9.4	0.1	0.4	62	0.2	440	4.6	0.2	0.7
TX-45	26	8	56	13.6	0.1	0.4	50	12.2	552.7	45	0.1	2
TX-46	29	8	34	10.7	0.2	0.4	10	0.8	472	15.6	0.3	54
TX-47	30	8	26	7.9	0.5	0.4	8	1.1	456	4.6	0.5	3
TX-48	31	8	44	9.6	8.1	15.5	15	6.7	421.4	27.2	17.4	15
TX-49	1	9	44	12.6	2.8	2.1	25	8.2	440	35.7	3.9	20
TX-50	2	9	48	6.7	3.6	2.5	32	9.2	463	17.2	4.3	46
TX-51	3	9	76	16.1	21.9	7.7	38	26.3	484.9	27.1	28.4	75
TX-52	4	9	16	15.3	3.7	2.3	20	8.8	483	53.4	3.1	20
TX-53	6	9	40	7.3	4.4	1.7	18	7.9	570	31.7	3.5	19
TX-54	9	9	17	12.6	1.1	0.4	20	2.6	494	53.9	1.3	39
TX-55	13	9	87	9.4	1.3	5.2	50	2.1	446	35.7	1.1	12
TX-56	14	9	44	7.1	10.4	0.4	21	29	497.9	42	2.2	70
TX-57	17	9	23	11.4	10.3	0.4	37	6	453	27	2.0	10.7
TX-58	22	9	52	10.8	12.8	0.4	12	9	509	57	1.2	11.6
TX-59	25	9	43	8.9	21.1	1.9	20	33	513	45	1.2	56
TX-60	27	9	74	18.7	15.1	0.4	20	16	468	15	1.1	32
TX-61	28	9	40	10.4	17.2	0.4	15	18	457	37	2.4	21.9
TX-62	29	9	27	10.1	5.1	1.6	11	18	442	7	2.1	40.4
TX-63	1	10	69	6.1	15.4	1.2	58	1.3	465	47	0.7	7.
TX-64	3	10	92	7	13.5	0.4	26	1.2	490	60	0.6	17
TX-65	7	10	72	6.8	8.3	1.7	34	1.9	475	53	0.8	10
TX-66	8	10	64	8.6	15	1.6	28	1.5	497	25	0.8	10
TX-67	11	10	90	6.7	1.1	0.4	78	1.8	453	21.5	12	18
TX-68	13	10	13	4.5	1.2	1.2	25	1.3	470	9.2	0.7	17

Tabla A2.1 Concentraciones promedio ponderadas por volumen (CPPV) de iones inorgánicos en muestras de agua de lluvia, por mes de colecta, para el sitio de Iguala de la Independencia, período 2017.

Mes	Ca ²⁺ (μEq/L)	K ⁺ (μEq/L)	Mg ²⁺ (μEq/L)	Na ⁺ (μEq/L)	NO ₃ ⁻ (μEq/L)	SO ₄ ²⁻ (μEq/L)
Mayo	69.97	5.69	5.97	5.56	24.84	42.43
Junio	97.9	2.47	4.81	2.92	25.86	39.57
Julio	114.97	2.21	3.76	4.06	28.55	28.67
Agosto	124.53	1.83	46.87	22.41	36.31	43
Septiembre	129.26	1.88	25.55	24.52	44.38	46.28
Octubre	136.33	1.72	36.89	24.36	45.43	58.96

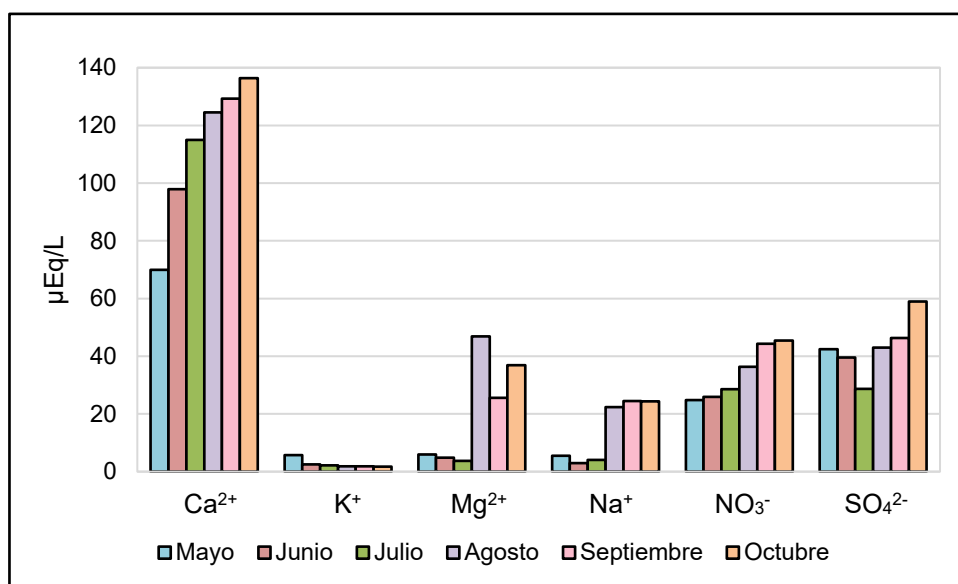


Figura A2.1 CPPV de iones inorgánicos en muestras de agua de lluvia, por mes de colecta, para el sitio de Iguala de la Independencia, período 2017.

Tabla A2.2 Concentraciones promedio ponderadas por volumen (CPPV) de iones inorgánicos en muestras de agua de lluvia, por mes de colecta, para el sitio de Taxco el Viejo, período 2017.

Mes	Ca ²⁺ (μEq/L)	K ⁺ (μEq/L)	Mg ²⁺ (μEq/L)	Na ⁺ (μEq/L)	NO ₃ ⁻ (μEq/L)	SO ₄ ²⁻ (μEq/L)
Mayo	76.42	4.45	15.32	7.17	15.59	34.45
Junio	87.4	5.1	5.65	3.96	29.17	43.49
Julio	79.75	1.28	0.5	0.88	25.43	34.58
Agosto	85.66	3.3	29.15	6.3	28.71	27.19
Septiembre	107.11	2.3	25.05	13.57	36.47	44.05
Octubre	97.5	1.63	24.18	4.72	45.97	61.77

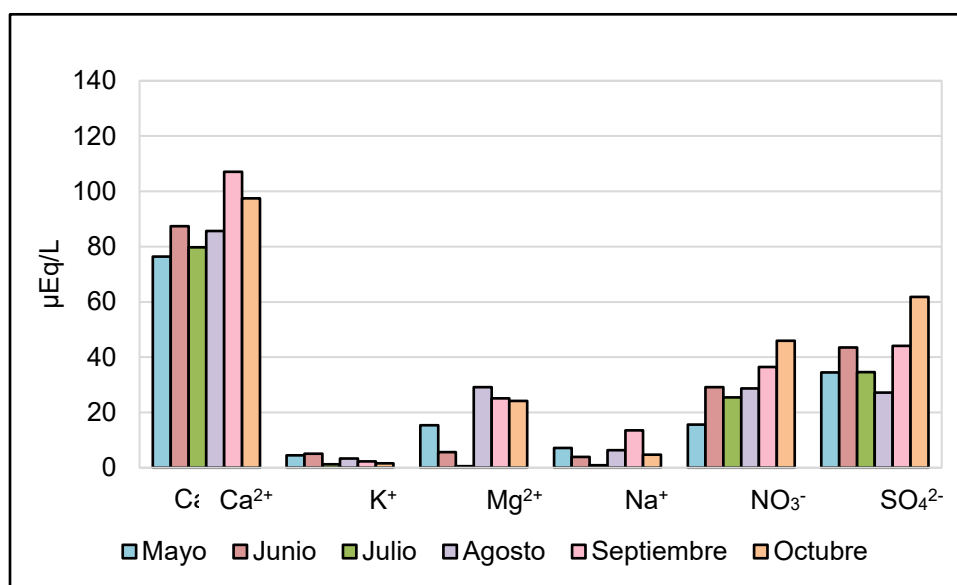


Figura A2.2 CPPV de iones inorgánicos en muestras de agua de lluvia, por mes de colecta, para el sitio de Taxco el Viejo, período 2017.

Tabla A2.3 Concentraciones promedio ponderadas por volumen (CPPV) de iones inorgánicos en muestras de agua de lluvia, por mes de colecta, para el sitio de Taxco de Alarcón, período 2017.

Mes	Ca ²⁺ (μEq/L)	K ⁺ (μEq/L)	Mg ²⁺ (μEq/L)	Na ⁺ (μEq/L)	NO ₃ ⁻ (μEq/L)	SO ₄ ²⁻ (μEq/L)
Mayo	75.62	21.47	17.94	12.07	36.17	37.57
Junio	69.9	2.71	7.19	7.08	22.45	36.73
Julio	70.42	1.53	5.45	9.2	28.68	32.4
Agosto	76.43	3.09	14.75	17	40.47	39.05
Septiembre	95.53	7.03	34.04	11.63	42.1	46.45
Octubre	65.55	7.72	1.45	1.53	45.27	44.52

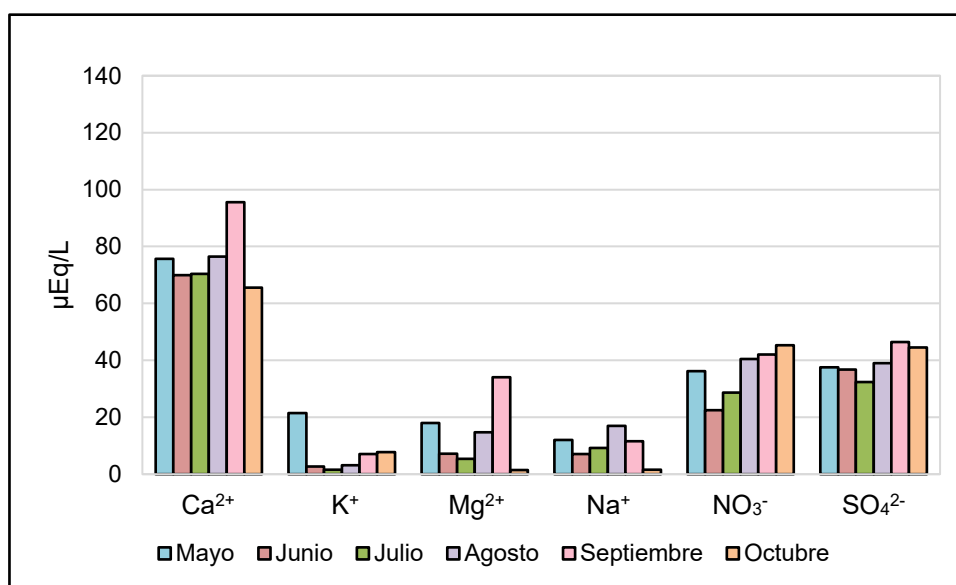


Figura A2.3 CPPV de iones inorgánicos en muestras de agua de lluvia, por mes de colecta, para el sitio de Taxco de Alarcón, período 2017.