

Calidad del agua de lluvia en Atlixco, Puebla

Rainfall water quality at Atlixco, Puebla

*María Maura Margarita Teutli León*¹

<http://orcid.org/0000-0002-8799-8891>

*Andrés Armando Sánchez Hernández*²

<https://orcid.org/0000-0003-3336-0152>

*Eréndira Moreno Gutiérrez*³

<https://orcid.org/0000-0003-1410-1833>

Primera versión recibida en: 28 septiembre, 2020

Última versión recibida en: 09 febrero, 2021

Resumen

En este trabajo se reporta el seguimiento de la calidad del agua de lluvia en el municipio de Atlixco, Puebla, para la temporada 2018. El objetivo fue evaluar la influencia de la altura y de la presencia de contaminantes en la calidad del agua precipitada. Las muestras fueron colectadas en los techos de una casa en el centro de Atlixco y del convento ubicado en el cerro de San Miguel, lo cual representa una diferencia de altura de 44 m; su composición química fue analizada para 19 parámetros fisicoquímicos mediante técnicas gravimétricas y espectrofotométricas. Los resultados obtenidos fueron comparados con estándares para calidad de agua potable, hallándose que estos se cumplen, excepto en Pb y Cd; asimismo, se encontró una fuerte aportación de fuentes terrestres, ya que los cocientes marinos calculados rebasan la unidad y, cuando se evalúan las concentraciones en exceso, se halló una gran dispersión, ya que los valores van de negativos a positivos. Por último, se obtuvo la correlación de Pearson para ambos sitios, encontrando que las correlaciones entre los parámetros químicos en su mayoría no coinciden, con lo cual se confirma la fuerte influencia de fuentes antropogénicas en el contenido iónico.

¹ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Departamento de Ingeniería-Profesor Investigador Titular.

² Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Arquitectura-Profesor Investigador.

³ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ingeniería Química-Estudiente de Ingeniería Ambiental.

Palabras clave: Lluvia, contenido iónico, cociente marino, concentración en exceso.

Abstract

This work reports the follow up of rainfall water quality at Atlixco, Puebla during the 2018 season. The main objective of this work was to evaluate how height and pollutants define the quality of water precipitated. Samples were collected at the roof of a house in Atlixco center, and others at the roof of a convent located at the San Miguel Hill, this represents a 44 m difference in height. Chemical composition was analyzed for 19 physicochemical parameters using gravimetric and spectrophotometric techniques. Obtained results were compared with drinking water standards finding that Pb and Cd contents are exceeded. Also, it was found a strong contribution of terrestrial sources since the marine rates are above unit, as well as excess concentrations whose values go from negative to positive. Finally, Pearson correlation was obtained finding that most of chemical parameters correlations are in disagreement for both sites, fact which confirms that ionic content is strongly influenced by anthropogenic sources.

Keywords: rainfall, ionic content, marine rates, excess concentrations.

Introducción

En la ciudad de Atlixco, Puebla, la movilidad de la población genera un alto nivel de contaminación antrópica, siendo que los contaminantes en el aire tienden a estratificarse en función de la altura a la cual se hallan suspendidos. Se considera que su presencia puede ser estimada indirectamente por la composición química del agua de lluvia colectada a diferentes alturas.

El contexto del estudio considera la descripción de las características del acuífero, la importancia de la calidad química del agua de lluvia comparando con las relaciones iónicas de los principales componentes en el agua de mar, así como su correlación con la presencia de contaminación atmosférica por actividades antrópicas.

De acuerdo con un informe de la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2015), el acuífero en el Valle de Atlixco-Izúcar de Matamoros (Clave 2013), tiene una estratigrafía compuesta por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas (pizarras verdes y gneises), así como rocas plutónicas. La recarga del acuífero ocurre en las estribaciones de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, mientras que en la descarga se contemplan procesos de evapotranspiración y extracción en afloramiento de manantiales naturales, así como el flujo subterráneo. El principal recurso hídrico superficial es el río de régimen permanente llamado Nexapa, el cual nace en la falda oriental del Popocatepetl, y cuya calidad se cataloga como apropiada para uso agrícola. De acuerdo con este informe, el balance hídrico tiene un déficit de cero, es decir, el acuífero se halla en equilibrio dinámico. Asimismo, el acuífero es de tipo libre, somero, la profundidad del nivel estático de saturación media, medida desde la superficie del terreno oscila entre 10-65 m. A partir de mediciones piezométricas se obtuvo la evolución del nivel estático en 75 pozos, observando que el mayor abatimiento tiene lugar en las inmediaciones de la ciudad de Atlixco (Segob, 2016).

Respecto a la calidad del agua, hay una publicación específica para el Valle de Atlixco, donde se analizaron pozos, ríos, manantiales y escorrentías (Silva, Muñoz, Isla de Bauer, Infante, 2002). Los autores mencionan que algunos parámetros exceden los valores umbral del agua para consumo humano; específicamente se consideran valores críticos de alerta en el contenido de coliformes fecales totales (CFT), nitritos (NO_2), cadmio (Cd), plomo (Pb) y cromo (Cr). Asimismo, en su artículo mencionan que parámetros que exceden los valores umbral exhiben variación estacional, ya que en primavera se detectaron valores anormales para demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), dureza total (Dt), y presencia de zinc (Zn); por otro lado, un muestreo de verano arrojó que los valores excedidos fueron para fierro (Fe), nitrógeno amoniacal (NH_4), pH, sólidos suspendidos (SS), sólidos sedimentables totales (SST).

En el agua de mar se ha detectado que existe una proporcionalidad entre cationes y aniones con respecto a sodio (Na). Referencia a estas relaciones se puede encontrar en diversos reportes (Guerzoni, Caboi, Le Bollocho, Manas y Rudendatt, 1995; Salve, Maurya, Wate y Devotta, 2008; Tomazini, Pereira, Andreia, Braga y Beltrán, 2013). Una síntesis de las relaciones reportadas se muestra en la Tabla 1.

En el trabajo de Tomazini *et al.* (2013) se reportó un análisis de la presencia de contaminantes en agua de lluvia, incluyendo datos de Conductividad Eléctrica (CE), pH, alcalinidad a la fenolftaleína y total (Alkf y Alkt), cloruros (Cl), sulfatos (SO_4), fosfatos (PO_4), nitratos (NO_3), sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg). Los autores hallaron una concentración mayor de cationes (209.3 meq/l) que de aniones (204.2 meq/l); asimismo, al compararlos con las razones presentes en agua de mar, se halló que los valores están excedidos, estos se muestran en la cuarta línea de la Tabla 1. También se establece que la proporción de $\frac{\text{Ca}}{\sum \text{cationes}} = 67\%$, mientras que $\frac{\text{SO}_4}{\sum \text{aniones}} = 35\%$. Los autores concluyen que los valores obtenidos para las relaciones iónicas sólo confirman que hay una fuerte aportación de fuentes terrestres y antrópicas.

Tabla 1. Relaciones iónicas con referencia al agua de mar

	$\frac{\text{Ca}}{\text{Na}}$	$\frac{\text{Mg}}{\text{Na}}$	$\frac{\text{K}}{\text{Na}}$	$\frac{\text{Cl}}{\text{Na}}$	$\frac{\text{SO}_4}{\text{Na}}$	$\frac{\text{HCO}_3}{\text{Na}}$	$\frac{\text{NO}_3}{\text{Na}}$	$\frac{\text{SO}_4}{\text{Ca}}$	$\frac{\text{Ca}}{\text{Mg}}$
Guerzoni <i>et al.</i> (1995)	0.0439	0.227	0.218	1.116	0.121	---	---	---	---
Salve <i>et al.</i> (2008)	0.1200	0.038	0.037	1.160	0.250	---	0.00002	2.44	0.19
Tomazini <i>et al.</i> (2013)	0.0400	0.230	0.020	1.160	0.120	<0.01	----	---	---
Tomazini <i>et al.</i> (2013) cocientes en muestras de lluvia	3.2600	0.260	0.280	0.720	1.640	1.39	----	---	---

Un estudio donde se considera la proximidad al mar para definir la calidad del agua de lluvia es el realizado en costas mexicanas por (Cerón, Cerón, Córdova, Zavala, & Muriel, 2005). Estos autores consideraron muestrear en puntos específicos de Acapulco, Cancún, Puerto Morelos, Tapachula y un sitio mar adentro denominado *Océano Pacífico Tropical*; la caracterización química fue sometida a un análisis de regresión interelemental donde se halló que hay un coeficiente de correlación alto entre los pares Na-Cl, Na-Mg, Na-K, K-Cl, Mg-Cl, Mg-K, Ca-K y SO_4 -Cl, lo cual es indicativo de una fuente común. En contraparte, la

buena correlación entre Na-SO_4 , K-SO_4 , Ca-SO_4 , Mg-SO_4 , $\text{NH}_4\text{-SO}_4$, Na-NO_3 , K-NO_3 , Mg-NO_3 , $\text{NH}_4\text{-NO}_3$ se considera indicativa de procesos de neutralización entre ácidos fuertes con especies alcalinas al momento de tener lugar la precipitación. Asimismo, en este trabajo los autores reportan que otra forma de establecer cuánta de la composición química proviene de fuentes marinas es realizar un análisis del contenido iónico con base en los siguientes cálculos:

$$\text{Factor de Enriquecimiento: } EF_{Cl}(X) = \frac{\left(\frac{X}{Cl}\right)_{lluvia}}{\left(\frac{X}{Cl}\right)_{agua\ de\ mar}}$$

$$\text{Exceso iónico: } (X)_{exceso} = (X)_{lluvia} - \left(\frac{X}{Cl}\right)_{agua\ de\ mar} (Cl)_{lluvia}$$

$$\text{Fracción de Sal Marina: } FSM = \frac{[Cl]_{lluvia} \left(\frac{X}{Cl}\right)_{agua\ de\ mar} * 100}{(X)_{lluvia}}$$

Una aproximación de análisis del agua de lluvia en función de su uso es la reportada por Rai (2014), donde se calculó el parámetro denominado Razón de Adsorción de Sodio (RAS), que es un indicador del material intercambiable; también se estima el parámetro Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), el cual permite establecer su idoneidad para propósitos de riego, ya que en su cálculo se consideran potasio, calcio y magnesio.

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

$$PSI = \frac{(Ca + K)}{(Ca + Mg + K + Na)} 100$$

Asimismo, este autor determina que a partir de la proporción se puede establecer la modificación de la calidad del agua de lluvia por fuentes antropogénicas; cuando la muestra se colectó en una zona industrial su estudio mostró un valor de 16.94.

Sin embargo, la valoración del origen de los iones debe hacerse con cuidado, ya que tal como lo refiere Carroll (1962), en el caso del NO_3 y NH_4 claramente su origen es terrestre; aunque en general el origen del anión SO_4 se considera que es terrestre, pero también puede originarse en ambientes marinos someros y en sedimentos; en el caso de los cationes K, Mg y Ca pueden provenir de sales oceánicas o disolución de superficies terrestres. Asimismo, la presencia de cloruros en general cumple con la relación $[Cl]_{lluvia\ terrestre} < [Cl] < [Cl]_{lluvia\ en\ costa}$, sin embargo, cuando el país tiene un clima árido es importante considerar los ciclos interactivos de formación-disolución de sales, ya que esta relación puede invertirse. Por otro lado, los autores mencionan que para realizar un diagnóstico de la calidad del agua de lluvia deben tomarse en cuenta tres factores: 1) la proximidad al océano, 2) polvo atmosférico y 3) altitud, vientos, emisiones volcánicas.

También es importante conocer si en el sitio donde se va a analizar el agua de lluvia ocurren fenómenos de niebla, ya que Neal & Kirchner (2000) en un intento de correlacionar entradas atmosféricas de Na y Cl encontraron que $[Cl]_{lluvia} < [Cl]_{niebla}$ de la misma manera se reporta $[Na]_{lluvia} < [Na]_{niebla}$ las concentraciones en la niebla llegan a ser de 13-15

veces la concentración en la lluvia; sin embargo, la correlación Na-Cl es muy fuerte, ya que en lluvia alcanza un coeficiente de correlación $r^2=0.948$ y en la niebla $r^2=0.974$. Asimismo, la razón promedio de Na/Cl es alta, ya que $\left(\frac{Na}{Cl}\right)_{lluvia} = 0.81$ mientras que $\left(\frac{Na}{Cl}\right)_{niebla} = 0.852$.

Otros autores (Khemani & Ramana Murty, 1968) hacen la observación de que es importante establecer las condiciones atmosféricas de la nube que produce la precipitación (por ejemplo, detección con el auxilio de un radar), debido a que la lluvia puede ser consecuencia de una condición convectiva caliente/fría, o puede ocurrir en una capa fría estratificada, con lo cual se modifican las concentraciones iónicas observadas. Como ejemplo se citan algunas de sus observaciones en la Tabla 2.

Tabla 2. Concentración de iones en función del tipo de nube (Khemani & Ramana Murty, 1968)

Ion	Convectiva		Fría estratificada
	Caliente	Fría	
Cl, ppm	0.75	0.35	0.27
SO ₄ , ppm	2.9	3.3	1.5
Na, ppm	--	0.63	0.11
K, ppm	--	0.36	0.07
Ca, ppm	--	1.76	0.13

Asimismo, estos autores indican que la relación de SO₄/Cl se modifica de acuerdo con el tipo de lluvia y tamaño de gota. Se citan algunos datos en la Tabla 3.

Considerando que se puede afirmar que la varianza en la composición de la calidad del agua de lluvia se origina en la complejidad de las interacciones de factores meteorológicos, físicos y químicos (Ayers & Gillet, 1984); la evaluación de la calidad del agua de lluvia debe tomar en cuenta no solo el agua colectada, sino que deberá ser correlacionada con datos de viento (velocidad, dirección), hora del día y cantidad depositada.

Tabla 3. Concentración media de SO₄ y Cl en agua de lluvia categorizada (Khemani & Ramana Murty, 1968)

Lluvia	SO ₄ , ppm	Cl, ppm	SO ₄ /Cl	# de eventos
Ligera o de paso (Total <20 mm)	6.2	0.7	8.9	13
Intensa o intermitente (Total >20 mm)	2.4	0.4	6	14
Ligera o de paso (d _{gota} <2 mm)	5.9	0.64	9.2	5
Intensa o intermitente (d _{gota} >2 mm)	1.5	0.26	5.8	5

La contaminación atmosférica por fuentes antropogénicas en el municipio de Atlixco fue reconocida por el presidente del Consejo Municipal de Medio Ambiente, quien mencionó que “el municipio exhibe una contaminación equivalente a una mancha urbana de 300 000 habitantes, cuando la población censada era de 130 000. En resultados obtenidos con una estación de monitoreo se detectaron contaminantes primarios, los cuales se generan de procesos de combustión; entre los hallazgos se tiene bióxido de azufre (SO₂),

monóxido de carbono (CO), vapores de hidrocarburos (HC), plomo (Pb) y partículas (PM₁₀), todos ellos en exceso” (Domínguez, 2012).

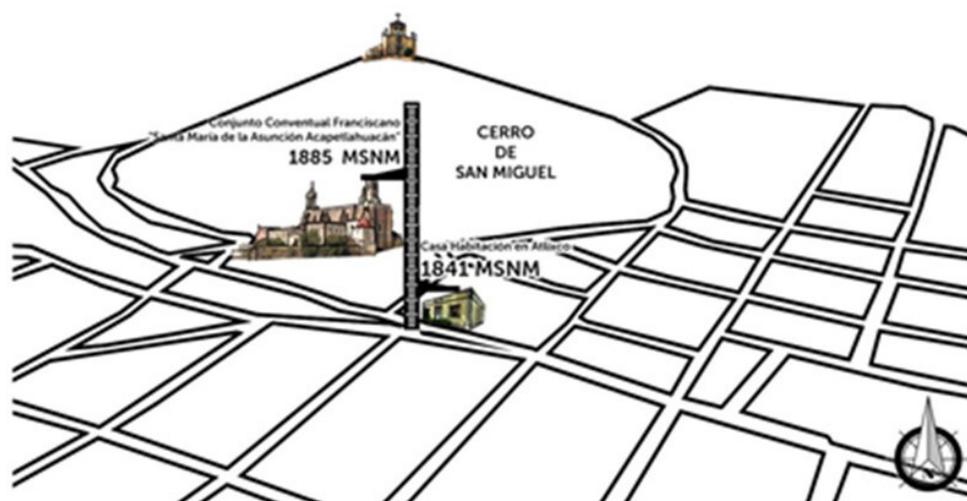
El objetivo de este trabajo fue la evaluación de la calidad del agua de lluvia en el centro histórico de la ciudad de Atlixco, Puebla, durante la temporada de 2018 (marzo-octubre). Una estimación indirecta de la estratificación de los contaminantes atmosféricos se obtuvo al coleccionar las muestras a dos altitudes en sitios dentro de un radio de 1 km.

Metodología

En reporte publicado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, 2015) el municipio de Atlixco está ubicado en las coordenadas de Latitud Norte (18° 54' 31”), Longitud Este (98° 26' 03”), a una altitud de 1834 msnm, corresponde a la región hidrológica 18 del río Balsas; tiene un clima templado subhúmedo, con lluvia en verano, sus promedios anuales indican un rango de temperatura de 16.1-21.8°C y una precipitación anual de 719.9- 1061.2 mm, así como un potencial de evapotranspiración de 1926.4 mm. El entorno del municipio incluye la cercanía al volcán activo Popocatepetl (20 km) y se halla a 302 km del mar.

Para establecer un referente de afectación por fuentes antropogénicas, se decidió coleccionar las muestras a dos altitudes: la zona centro (1841 m.s.n.m) y en el techo del convento franciscano de Santa María de la Asunción Acapetlahuacan (1885 m.s.n.m.). En la Figura 1 se muestra un esquema de los sitios con las altitudes correspondientes.

Figura 1. Comparativo de altitudes de los dos sitios de muestreo



El agua de lluvia se coleccionó en recipientes limpios y las muestras debidamente etiquetadas se trasladaron al laboratorio de Ingeniería Ambiental en la Facultad de Ingeniería, BUAP. Los parámetros determinados comprenden:

El pH y la conductividad eléctrica (CE, $\frac{\mu S}{cm}$) que se registraron con un potenciómetro Conductronic. Los aniones NO₃, SO₄, PO₄, NO₂ (ppm) se determinaron por espectrofotometría

de luz visible utilizando el espectrofotómetro HACH DR 2500 y reactivos HACH. Los metales Na, Fe, Pb, Ca, Mg, Mn, Zn y Cd (ppm) se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica, con el espectrofotómetro GBC 932. Por último, los cloruros (Cl), alcalinidad a la fenolftaleína (Alkf), alcalinidad total (Alkt), Dureza cálcica (DCa) Dureza Total (Dt) se determinaron por técnicas gravimétricas de acuerdo con los métodos establecidos en la NOM- 121 SSA1-1994 para agua potable (SSA1, 2000).

La información obtenida se procesó estadísticamente con el software Minitab v. 17, y se aplicó la correlación de Pearson para obtener la dependencia interelemental de los parámetros analizados.

Resultados y discusión

Para fines de nomenclatura las muestras colectadas en la zona centro se etiquetaron con el número 1, mientras que las colectadas en el techo del convento se etiquetaron como número 2. En la Tabla 4 se muestra un resumen de las condiciones observadas para los parámetros físico-químicos, indicando los valores mínimo, máximo y promedio. Asimismo, como referente se incluyen los valores umbral para agua de consumo humano especificados en la NOM-121 SSA1-1994 (SSA1, 2000), resaltando en negritas aquellos valores del agua de lluvia que exceden los valores normados para agua potable.

Tabla 4. Valores de parámetros determinados en el agua de lluvia

Parámetro ↓	Centro (1)			Convento (2)			NOM 127-SSA1
	min	prom	max	min	prom	max	
pH	6.230	6.870	7.300	6.300	6.870	7.540	6.5-8.5
C.E., uS/cm	33.000	149.00	404.000	60.800	166.300	683.000	
NO3, ppm	0.700	6.450	20.000	2.000	5.760	10.000	10
SO4, ppm	0.000	7.310	70.000	0.000	7.600	30.000	400
PO4, ppm	0.200	1.040	10.200	0.100	0.720	2.100	
NO2, ppm	0.000	16.900	40.000	0.000	15.600	40.000	0.05
Cl, ppm	0.000	32.600	150.000	2.500	37.300	274.900	250
Alkf, ppm	0.000	0.190	5.000	0.000	0.000	0.000	
AlkT, ppm	20.000	37.800	70.000	25.000	42.800	65.000	
DCa, ppm	18.000	103.300	660.000	27.000	146.800	880.000	
Dt, ppm	22.000	170.000	990.000	36.000	213.900	990.000	500
Na, ppm	1.240	3.940	10.6000	0.900	3.920	14.800	200
Fe, ppm	0.000	0.100	0.200	0.000	0.050	0.170	0.3
Pb, ppm	0.020	0.160	0.370	0.000	0.165	0.360	0.025
Ca, ppm	0.040	2.900	11.2000	0.120	3.580	17.500	

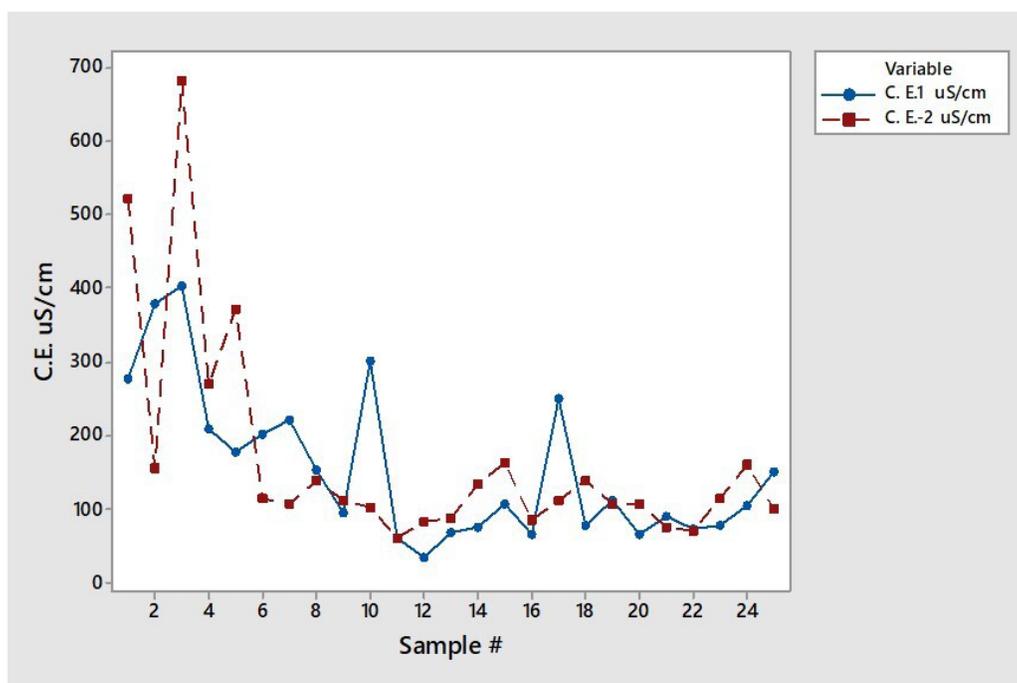
Continúa...

Parámetro ↓	Centro (1)			Convento (2)			NOM 127-SSA1
	min	prom	max	min	prom	max	
Mg, ppm	1.390	2.400	4.770	1.500	2.750	9.750	
Mn, ppm	0.000	0.003	0.034	0.000	0.003	0.027	0.15
Zn, ppm	0.000	0.010	0.08	0.000	0.075	0.625	5
Cd, ppm	0.022	0.056	0.089	0.020	0.06	0.090	0.005

En los valores analíticos se observa que el pH exhibe una tendencia próxima a la neutralidad y todas las muestras están en un rango de valores entre 6.2 y 7.5, lo cual permite afirmar que el agua de lluvia no exhibe condiciones ácidas.

En cuanto a la conductividad eléctrica (CE, uS/cm) se tiene que los valores de las muestras exhiben la tendencia esperada, es decir, valores muy altos al inicio de la temporada, los cuales decrecen conforme las lluvias ocurren con mayor regularidad, aunque sí llama la atención que al inicio de la temporada los valores obtenidos en el convento (2) son casi el doble de los obtenidos en el centro (1). Estos datos se presentan en la Figura 2.

Figura 2. Valores de Conductividad Eléctrica



Considerando el orden de abundancia de mayor a menor se tiene que la dureza total (Dt) se encuentra en el rango de 0-1000 ppm, ocurriendo la mayor la concentración en el convento (2). Un fenómeno importante de resaltar es que exhibe una tendencia ascendente en las muestras iniciales y que después de la octava muestra las concentraciones se vuelven similares para los dos sitios con una concentración inferior a 100 ppm. Una respuesta similar se tiene para la dureza cálcica (DCa), ya que al inicio de la temporada

fue mayor en el convento y exhibiendo valores similares después de la muestra 8. Los resultados se muestran en la Figura 3.

Los cloruros (Cl) registran concentraciones de 0-300 ppm, los máximos ocurren al inicio de la temporada, los picos en concentración más alta en general corresponden al convento, excepto dos puntos donde la concentración del centro alcanza valores más altos. En este parámetro, al igual que para Dt y DCa, se tiene que los valores tienden a ser similares para ambos sitios a partir de la muestra 10, ubicándose su concentración en un rango inferior a 50 ppm. Los resultados se muestran en la Figura 4.

Figura 3. Comparativo de la Dureza Cálctica (Dca) y Dureza Total (Dt)

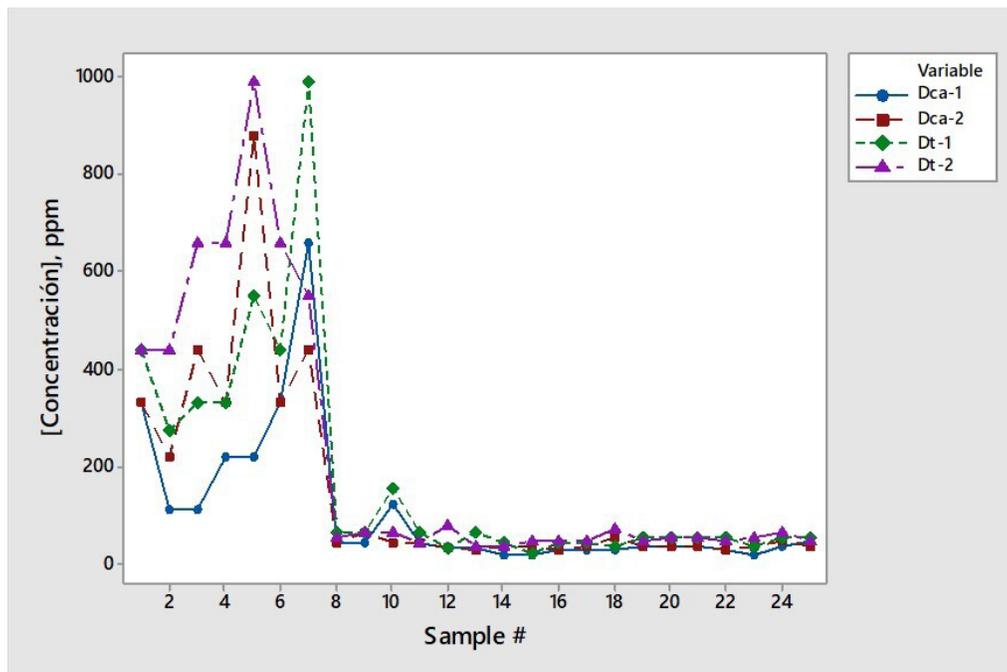
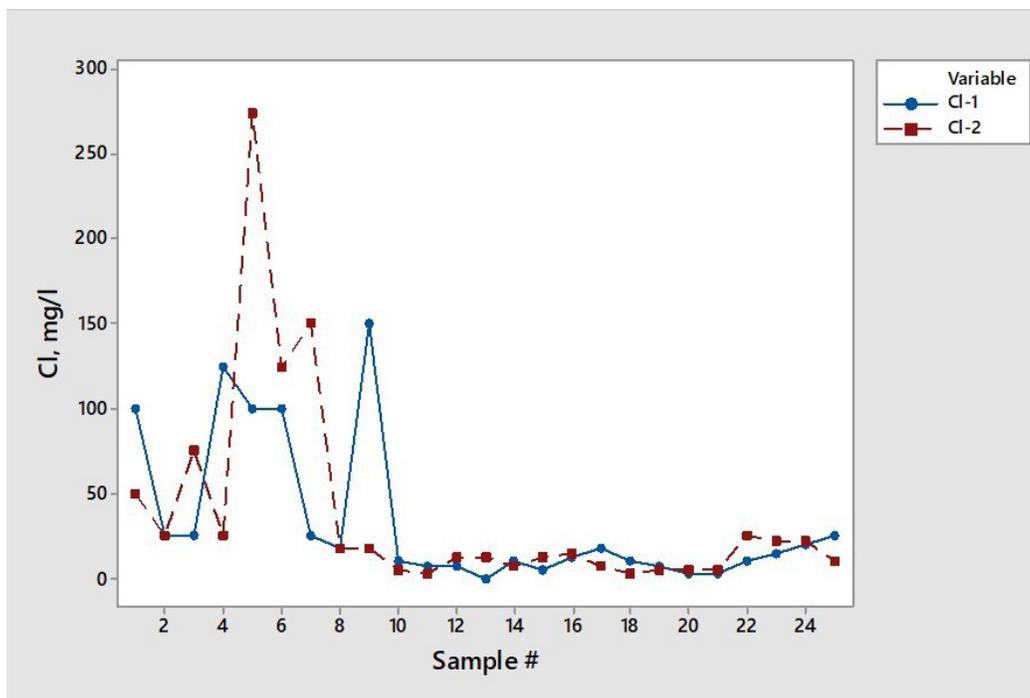
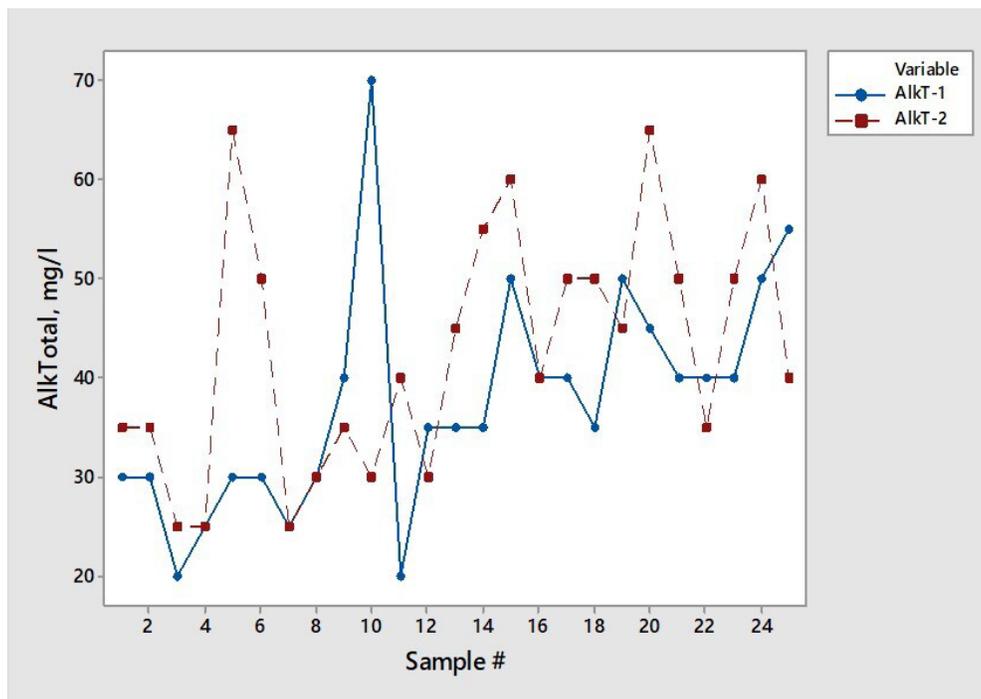


Figura 4. Comparativo de Cloruros



En el caso de la alcalinidad a la fenolftaleína (Alkf) solo se detectaron algunos datos en el centro y ninguno en el convento, por lo que no se considera para el análisis. Por el contrario, la alcalinidad total (Alkt) exhibe tendencias similares en ambos sitios, con un comportamiento ascendente/descendente en las concentraciones, las cuales se ubican en un rango 20-70 ppm; sin embargo, resulta importante resaltar que la tendencia global es ascendente, es decir, la concentración tiende a incrementarse y así ocurre que al final de la temporada cuando es hasta 1.5 veces más alta que al inicio. Los resultados se muestran en la Figura 5.

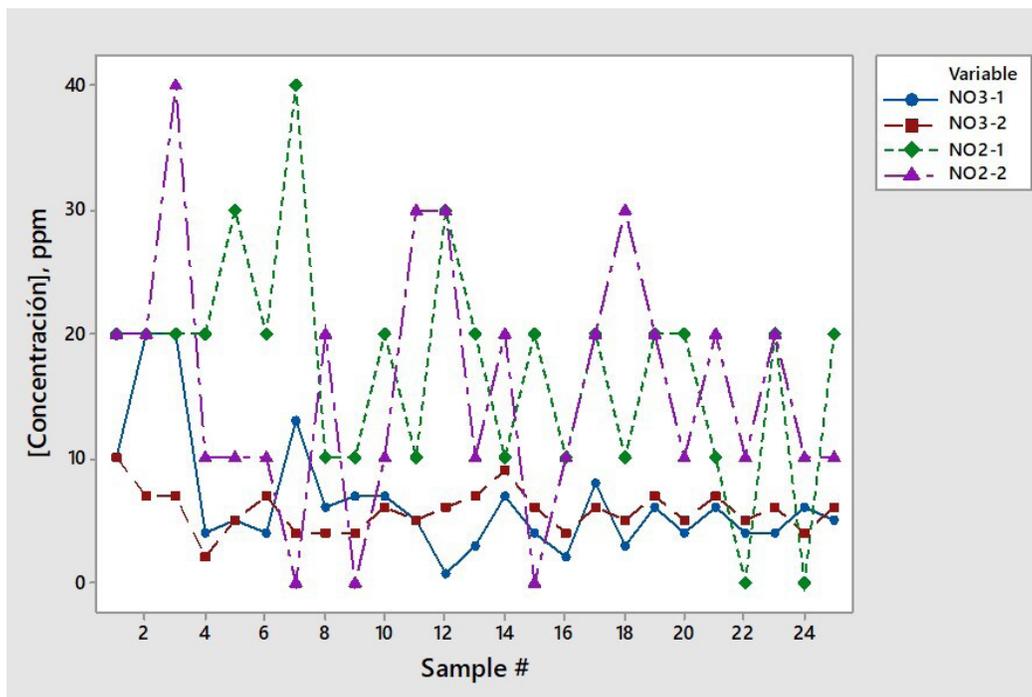
Figura 5. Comparativo de la alcalinidad total (Alkt)



En el caso de los sulfatos (SO_4) la 1ª muestra del centro registró una concentración de 70 ppm, y durante toda la temporada se mantuvo con valores oscilatorios entre 0-10 ppm para ambos sitios, por esta razón no se presentan gráficamente.

El siguiente anión en importancia son los nitritos (NO_2), los cuales al inicio de la temporada registran valores muy altos (40 ppm), disminuyendo oscilatoriamente, y al final de la temporada alcanzando valores menores, aunque la mayoría de las muestras se hallan en el rango 10-20 ppm. Correlacionado con los nitritos se hallan los nitratos (NO_3), los cuales exhiben un máximo de 20 ppm en la zona centro al principio de la temporada, la concentración decrece de forma oscilatoria a valores menores a 10 ppm, siendo ligeramente mayores en el convento a partir de la muestra 12. Los resultados para ambos aniones se muestran en la Figura 6.

Figura 6. Comparativo de nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3) para los dos sitios



Los fosfatos (PO_4) en general se mantienen en valores muy bajos (0-2 ppm) exceptuando un punto extraordinario en la muestra 8, donde el centro registró una concentración de 10 ppm.

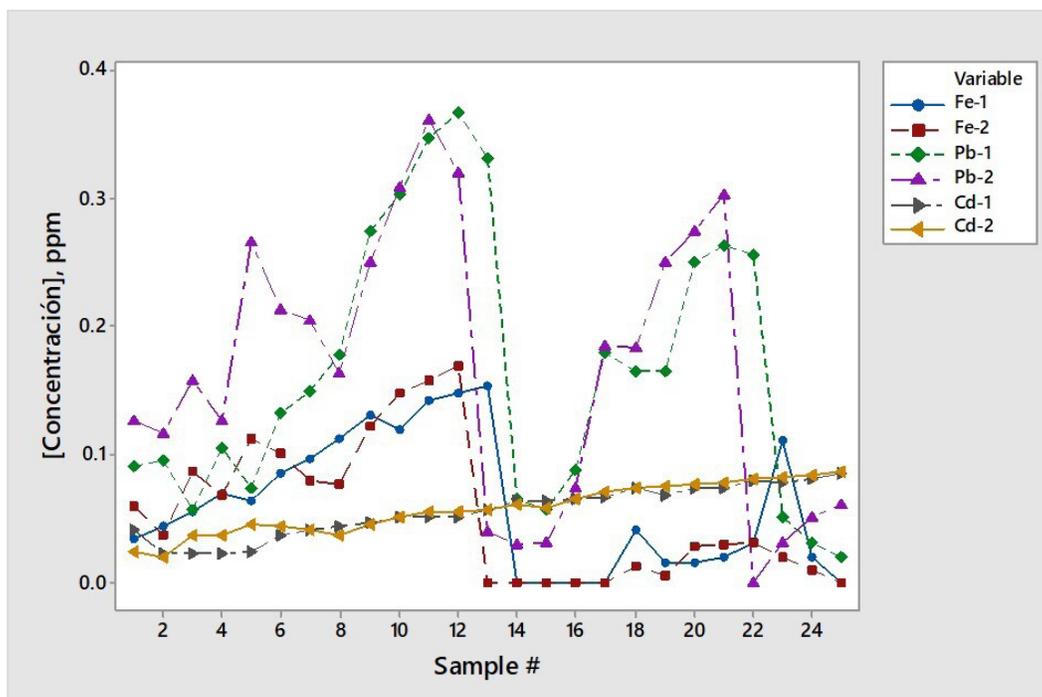
En cuanto a la presencia de metales, es de resaltar que el Ca al inicio de la temporada presenta valores más altos en el convento, alcanzando 17 ppm, pero la tendencia es decreciente para los dos sitios manteniendo una concentración inferior a 5 ppm, excepto por un punto extraordinario del convento en el cual se alcanza 8 ppm en la última etapa de la temporada de lluvia. En general, su comportamiento es acorde con lo observado para la Dt y la DCa.

En orden de importancia sigue el sodio (Na), el cual tiene un comportamiento variable, ya que al inicio de la temporada alcanza un pico de 15 ppm en el convento, pero en el 2º cuarto de la temporada se registran valores más altos en el centro con un pico extraordinario de 10 ppm; sin embargo, en el último 4º de la temporada se observa que las muestras vuelven a tener mayor concentración en el convento, y que tanto en el centro como en el convento exhiben una tendencia creciente, para decaer en las últimas 3 a valores menores a 2 ppm en ambos sitios.

Un comportamiento interesante es el de los metales Fe, Pb y Cd, ya que el Fe y Pb exhiben una tendencia ascendente que a mediados de la temporada exhibe valores muy pequeños, para luego volver a incrementarse, aunque el Fe en ningún momento excede el valor de referencia para el agua potable; no ocurre lo mismo con el Pb, el cual se halla en una concentración muy elevada respecto al Fe, y se excede el valor de referencia para el agua potable. Por último, el Cd excede los valores de referencia del agua potable y exhibe

una tendencia ascendente todo el tiempo. Los resultados para los 3 metales se muestran en la Figura 7.

Figura 7. Concentraciones de Fe, Pb y Cd para los dos sitios



Un elemento muy importante es el cálculo del Factor de Enriquecimiento (EF), el cual en el agua de lluvia es un cociente de concentraciones del ion a analizar respecto al sodio, y se divide por el cociente de valores reportados para agua de mar, se utilizan las relaciones $Cl/Na = 1.16$, $SO_4/Na = 0.121$, $Ca/Na = 0.044$, $Mg/Na = 0.227$, $SO_4/Ca = 2.44$, $Ca/Mg = 0.19$ y $NO_3/Na = 0.00002$. El valor ideal sería 1, es decir, la concentración registrada corresponde totalmente al agua de mar; por el contrario, los valores positivos indican que la lluvia contiene un exceso, el cual corresponde a contaminantes atmosféricos, los cuales son lavados por contacto con el agua de lluvia. Los resultados para el factor de enriquecimiento (medida indirecta de cuanto se excede la relación presente en el agua de mar) se muestran en la Tabla 5. Como puede observarse, los valores mínimo y promedio son similares en magnitud para ambos sitios, sin embargo, existe una disparidad en los máximos, ya que el sitio 2 registra los más elevados en los pares Cl/Na , Ca/Na , Mg/Na ; mientras que el sitio 1 tiene valores más altos en los pares SO_4/Na , SO_4/Ca , en la relación de NO_3/Na los valores para el convento exceden entre 20-200% los registrados en el centro.

Tabla 5. Factor de Enriquecimiento (EF) (mínimo, promedio, máximo) para ambos sitios

Sitio		EF _(Cl/Na)	EF _(SO₄/Na)	EF _(Ca/Na)	EF _(Mg/Na)	EF _(SO₄/Ca)	EF _(Ca/Mg)	EF _(NO₃/Na)
1	min	0	0	0.32	2.34	0	0.1	3729
	prom	6.3	10.1	23.3	6.6	2	3.4	36973
	max	25.54	115.76	64.96	16.75	40.66	8.5	77459
2	min	0.26	0	1.98	2.09	0	0.15	8781
	prom	6,72	11.54	24.71	8.47	1.47	3.48	45708
	max	31.03	40.83	70.73	20.83	14.23	9.45	161123

Las concentraciones de exceso iónico (X_{Ex}) se reportan en la Tabla 6. Considerando que esta concentración se obtiene al sustraer la concentración que se tendría si la lluvia proviniera totalmente del agua de mar. Ambos sitios exhiben valores negativos similares en los mínimos para Cl y SO₄; en cuanto a los valores promedio son similares para ambos sitios; sin embargo, los valores máximos sí exhiben una disparidad importante ya exceptuando el ion SO₄, se tiene que en el sitio 2 los valores son mayores, lo cual es inherente a una mayor disolución de componentes presentes en el aire.

Tabla 6. Concentraciones en exceso (mínimo, promedio, máxima) para ambos sitios

Sitio		Cl exc	SO ₄ exc	Ca exc	Mg exc
1	min	-287	-38.97	-4.56	81.47
	prom	732.3	131.5	137.5	161.6
	max	4080.61	1445.74	549.95	330.53
2	min	-286.69	-44.80	2.97	82.21
	prom	867.73	137.72	171.94	190.76
	max	7601.56	598.59	846.78	666.58

Por último, se presentan los resultados de análisis interelemental, para lo cual se aplicó una correlación estadística de Pearson a las concentraciones iónicas determinadas en los dos sitios. Así, en la Figura 8 se reportan los datos del sitio 1 y en la Figura 9 los datos para el sitio 2. Como puede observarse, hay coincidencia de una correlación positiva de fuerte a muy fuerte, en ambos sitios, para los pares CE-Ca, CE-Mg y DCa-Dt; de moderada a fuerte para Fe-Pb, Ca-Mg; hay pares adicionales que correlacionan fuerte pero ya ocurren en cada uno de los sitios. Una correlación moderada positiva se halla en los pares Fe-Pb. Asimismo, correlaciones negativas de moderadas a fuertes ocurren para los pares CE-Cd, DCa-Cd, Fe-Cd, Dt-Cd, Ca-Cd.

La no-concordancia de correlaciones positivas o negativas para los mismos pares de parámetros evaluados en ambos sitios indica que los contaminantes dispersos en el aire juegan un papel importante para secuestrar las concentraciones de los otros iones, con lo cual en la parte alta (sitio 2) se tiene un mayor número de correlaciones positivas de moderadas a muy fuertes (>0.4), ya que para el sitio 2 suman 47, mientras que en el sitio 1

suman 28. Lógicamente las correlaciones débiles (<0.39) ocurren mayormente en el sitio 1 donde suman 77, en tanto que en el sitio 2 son 54. Asimismo, en la correlación negativa de moderada a fuerte (<-0.4), ocurren 12 pares en el sitio 1, y 9 en el sitio 2; mientras que las correlaciones débiles a muy débiles (>-0.39) se registran 54 en el sitio 1 y en el sitio 2 solo 42. En general, se puede afirmar que en el sitio 2 hay un mayor número de correlaciones positivas, lo cual implica que los contaminantes gaseosos suspendidos juegan un papel importante en el secuestro de los componentes marinos del agua de lluvia.

Figura 8. Análisis interelemental del sitio 1

	pH1	C. E.1	NO3	SO4-1	PO4-1	NO2-	Cl-1	Alkf-1	AlkT-1	Dca-1	Dt-1	Na-1	Fe-1	Pb-1	Ca-1	Mg-1	Mn-1	Zn-1
C. E.1 uS/cm	0.145																	
NO3	0.116	0.829										(+)	Rango de valores		(-)			
SO4-1	-0.17	0.318	0.187										0.8-1.0	muy fuerte				
PO4-1	-0.41	0.228	0.34	0.035									0.6-0.79	fuerte				
NO2-	-0.32	0.359	0.224	0.193	0.561								0.4-0.59	moderada				
Cl-1	-0.01	0.255	0.059	0.372	0.005	0.139							0.2-0.39	debil				
Alkf-1	0.011	0.303	0.024	-0.11	0.017	0.071	-0.11						0.0-0.19	muy debil				
AlkT-1	0.184	-0.19	-0.33	-0.24	-0.21	-0.19	-0.3	0.578										
Dca-1	-0.39	0.443	0.345	0.423	0.776	0.62	0.412	0.025	-0.39									
Dt-1	-0.37	0.526	0.458	0.364	0.734	0.652	0.418	-0.01	-0.46	0.964								
Na-1	0.094	0.339	0.266	-0.08	0.001	0.005	-0.14	0.259	0.034	-0.11	-0.06							
Fe-1	-0.52	-0.02	-0.07	-0.04	0.201	0.274	0.188	0.236	-0.29	0.182	0.165	-0.02						
Pb-1	-0.31	-0.28	-0.27	-0.17	0.009	0.008	-0.15	0.273	-0	-0.14	-0.2	0.465	0.617					
Ca-1	0.157	0.903	0.836	0.139	0.238	0.238	0.22	0.235	-0.23	0.419	0.488	0.177	0.021	-0.27				
Mg-1	0.299	0.905	0.692	0.138	0.14	0.202	0.06	0.55	0.119	0.242	0.301	0.489	-0.1	-0.17	0.784			
Mn-1	-0.07	0.399	0.253	0.84	-0.08	0.213	0.391	0.03	-0.17	0.338	0.352	-0.04	-0.06	-0.15	0.218	0.263		
Zn-1	-0.14	0.217	0.141	0.072	0.273	0.056	-0.04	-0.07	-0.14	0.083	0.066	0.449	-0.05	0.005	0	0.273	-0.01	
Cd-1	0.146	-0.66	-0.52	-0.26	-0.23	-0.48	-0.54	-0.06	0.607	-0.53	-0.63	-0.11	-0.42	-0.03	-0.62	-0.41	-0.38	0.013

Figura 9. Análisis interelemental del sitio 2

	pH-2	C. E.-2	NO3-2	SO4-2	PO4-2	NO2-2	Cl-2	Alkf-2	AlkT-2	Dca-2	Dt-2	Na-2	Fe-2	Pb-2	Ca-2	Mg-2	Mn-2	Zn-2
C. E.-2 uS/cm	0.132																	
NO3-2	0.217	0.277										(+)	Rango de valores		(-)			
SO4-2	-0.02	0.69	0.075										0.8-1.0	muy fuerte				
PO4-2	-0.28	0.019	-0.29	0.438									0.6-0.79	fuerte				
NO2-2	0.158	0.35	0.348	0.118	-0.4								0.4-0.59	moderada				
Cl-2	-0.2	0.4	-0.06	0.673	0.719	-0.2							0.2-0.39	debil				
Alkf-2	*	*	*	*	*	*	*						0.0-0.19	muy debil				
AlkT-2	0.269	-0.18	0.15	-0.2	-0.09	-0.18	0.121	*										
Dca-2	-0.08	0.642	-0.02	0.763	0.543	-0.05	0.925	*	-0.04									
Dt-2	-0.12	0.642	-0.03	0.725	0.502	-0.02	0.837	*	-0.14	0.959								
Na-2	0.067	0.646	0.19	0.34	-0.17	0.559	0.143	*	-0.12	0.332	0.336							
Fe-2	0.011	0.136	-0.16	0.283	0.395	0.155	0.314	*	-0.43	0.338	0.34	0.219						
Pb-2	0.085	-0.07	-0.09	-0.02	0.165	0.234	0.157	*	-0.1	0.165	0.129	0.473	0.701					
Ca-2	0.105	0.928	0.285	0.562	-0.03	0.365	0.306	*	-0.31	0.573	0.591	0.683	0.136	0.048				
Mg-2	0.145	0.956	0.264	0.65	-0.06	0.402	0.312	*	-0.16	0.529	0.519	0.727	0.052	-0.09	0.875			
Mn-2	-0.16	0.682	0.075	0.744	0.379	0.263	0.608	*	-0.23	0.693	0.724	0.607	0.288	0.099	0.572	0.743		
Zn-2	-0.06	0.581	-0.18	0.792	0.516	-0	0.842	*	0.014	0.852	0.718	0.391	0.361	0.209	0.465	0.559	0.688	
Cd-2	0.061	-0.51	-0.11	-0.44	-0.33	-0.06	-0.36	*	0.51	-0.55	-0.63	-0.16	-0.49	-0.17	-0.48	-0.34	-0.44	-0.33

Conclusiones

De los resultados obtenidos en este seguimiento de la calidad del agua de lluvia se puede afirmar que, efectivamente, hay una suspensión de contaminantes muy alta como consecuencia de la actividad antropogénica, y que se revela con la disparidad en los valores de los parámetros fisicoquímicos observados cuando la colecta de lluvia se realiza con una diferencia de 44 m de altura. Se asume que la alta presencia de NO_2 y NO_3 en ambos sitios es consecuencia de emisiones gaseosas, ya que sus valores tienden a ser mayores en las muestras colectadas en el convento.

La aportación química local se evidencia con el cálculo de los factores de enriquecimiento, los cuales a pesar de ser cercanos en magnitud para los valores mínimo y promedio, exhiben una disparidad fuerte en los máximos, ya que en su mayoría ocurren en el sitio 2, excepto los cocientes cociente de SO_4/Na , y SO_4/Ca donde el sitio 1 tiene valores más altos. Por otro lado, en la estimación de las concentraciones en exceso se registra la presencia de valores negativos de similar magnitud para ambos sitios, igualmente los valores promedio son cercanos en valor, pero en los valores máximos el sitio 2 exhibe valores más altos, exceptuando el ión SO_4 .

Por otro lado, la correlación interelemental indica que las interacciones más fuertes se establecen en el sitio 2 mientras que el sitio 1 tiene predominio de interacciones débiles.

Considerando todos estos aspectos se nota que es relevante la presencia de contaminación suspendida que prevalece en la atmósfera del centro histórico de la ciudad de Atlixco, Puebla.

Referencias

- Ayers, G. P., Gillet, R. (1984). Some observations on the acidity and composition of rainwater in Sidney, Australia during summer of 1980-1981. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 25-46.
- Carroll, D. (1962). Rainwater as a chemical agent of geologic processes. A review. *Geological Survey Water-Supply*, paper 1535-G.
- Cerón, R. M., Cerón, J., Córdova, A. V., Zavala, J., & Muriel, M. (2005). Chemical composition at coastal and marine sampling sites in México. *Global NEST Journal*, 212-221.
- CONAGUA. (20 de Abril de 2015). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103301/DR_2103.pdf
- Domínguez Ríos, M. A. (2012). *www.lajornadadeoriente*. Obtenido de https://www.lajornadadeoriente.com.mx/noticia/puebla/registra-atlixco-contaminacion-ambiental-equivalente-a-una-ciudad-de-300-mil-habitantes_id_13771.html
- Guerzoni, S. C., Caboi, R., Le Bollocho, O., Manas, I., Rudendatt, L. (1995). Ionic composition of rainwater and atmospheric aerosol in Sardinia, Southern Mediterranean. *Water, Air and Soil Pollution*, 2077-2085.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Inegi (2015). *Anuario Estadístico y Geográfico de Puebla 2015*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Obtenido de www.inegi.org.mx: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/

- contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2015/702825077129.pdf
- Khemani, L., Ramana Murty, B. V. (1968). Chemical composition of water and rain characteristics at Delhi. *Tellus*, 284-292.
- Neal, C., Kirchner, J. (2000). Sodium and chloride levels in rainfall, mist, stream water and groundwater at the Plynlimon catchments mid -Wales: inferences on hydrological and chemical controls. *Hydrology and Earth System Sciences*, 295-310.
- Rai, P. (2014). Water deposition of gaseous pollutants in Dhanbad, India, for rain water quality. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 673-679.
- Salve, P., Maurya, A., Wate, S., Devotta, S. (2008). Chemical Composition of major ions in rainwater. *Bull. Environ. Contam. Toxicol*, 242-248.
- Silva Gómez, S. E., Muñoz Orozco, A., Isla de Bauer, M. D., Infante Gil, S. (2002). *Contaminación ambiental en la región de Atlixco: 1. Agua*. Obtenido de redalyc.org: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57320303>
- SSA1, C. C. (2000). www.gob.mx. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110520/MODIFICACION_A_LA_NORMA_NOM_127_SSA1_1994_22_NOVIEMBRE_2000.pdf
- Tomazini da Conceicao, F., Pereira Antúnez, M. L., Andreia Anndellucci, V., Braga Moruzzi, R., Beltrán Navarro, C. R. (2013). Rainwater chemical Composition and annual atmospheric deposition in Sorocata (Sao Paulo State), Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 5-15.