

## Caracterización de cenizas volcánicas depositadas en la ciudad de Puebla

### Characterization of volcanic ashes deposited in Puebla City

M. Cruz-Sánchez<sup>a,\*</sup>, M. Cruz-Santos<sup>b</sup>, S. Ángeles-García<sup>c</sup>, P. Girón-García<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, 42184, México.

<sup>b</sup> Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Puebla, 72810, México.

<sup>c</sup> Departamento de Geoquímica, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 04510, México.

#### Resumen

La ciudad de Puebla se localiza a 40 km al este del volcán Popocatepetl, siendo el destino frecuente de cenizas volcánicas que se desplazan en dirección sureste-noreste hacia la zona metropolitana. Una serie de cenizas recolectadas en los años 2012, 2015, 2016, 2017 y 2019 han sido caracterizadas mediante la textura, mineralogía y pruebas de lixiviación en agua desionizada. Los resultados establecen que la textura de las cenizas depositadas varía de arena limosa a arena, siendo clasificadas como cenizas gruesas no porosas inalteradas. Las cenizas tienen una composición andesítica con plagioclasas (70-80%) y piroxenos (20-25%) como minerales principales, destacando que en las plagioclasas se identifica un proceso de albitización. El análisis de los componentes lixiviados ha definido dos facies Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> y Ca-Mg-Cl y/o Ca-Mg-SO<sub>4</sub>, con As, Al y Fe como principales elementos traza, cuyos orígenes se asocian a la disolución parcial de las plagioclasas y piroxenos promovida por gases magmáticos o hidroclásticos.

#### Palabras Clave:

Cenizas, textura, mineralogía, caracterización, lixiviados.

#### Abstract

Puebla City is located 40 km east of the Popocatepetl volcano, being the frequent destination of volcanic ash that travels in a southeast-northeast direction towards the metropolitan area. A series of ash collected in the years 2012, 2015, 2016, 2017, and 2019 have been characterized by texture, mineralogy, and leaching tests in deionized water. The results establish that the texture of the deposited ashes varies from silty sand to sand, being classified as unaltered non-porous coarse ashes. The ashes have an andesitic composition with plagioclase (70-80%) and pyroxenes (20-25%) as main minerals, highlighting that in plagioclase an albitization process is identified. The analysis of the leached components has defined two facies Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> and Ca-Mg-Cl and/or Ca-Mg-SO<sub>4</sub>, with As, Al, and Fe as main trace elements, whose origins are associated with partial dissolution of plagioclase and pyroxenes promoted by magmatic or hydroclastic gases.

#### Keywords:

Ashes, texture, mineralogy, characterization, leachates.

## 1. Introducción

El volcán Popocatepetl está ubicado en las coordenadas 19.02° N y 98.62° W, siendo uno de los volcanes más altos de México, después del Pico de Orizaba, con una altitud de 5452 msnm y con un área aproximada de 500 Km<sup>2</sup> (figura 1). Colinda con los Estados de México, Morelos y Puebla, encontrándose a una distancia de 71 Km de la Ciudad de México y a 40 Km de la Ciudad de Puebla. Es un volcán activo que se localiza en la zona central de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y se considera como uno de los más peligrosos del país debido a su proximidad a zonas urbanas con alta densidad de población.

El volcán Popocatepetl es producto de la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa Continental de Norteamérica, es un estratovolcán de composición andesítica-dacítica cuyo edificio actual se encuentra sobrepuesto a dos volcanes extintos: el volcán

Nexpayantla (hace más de 430 000 años) y el volcán Ventorrillo (hace más de 23 000 años). Adicionalmente se considera que el complejo volcánico se ha construido por diversos flujos de lava como El Fraile y Las Cruces, así como los productos de diversas erupciones plinianas, habiéndose identificado alrededor de diez y fechado únicamente seis, siendo una de las más importantes la ocurrida hace más de 14 000 años y que dio origen a la unidad Pomicita-Andesita (Espinasa y Del Pozzo, 2006).

A partir del año de 1994 la actividad del volcán Popocatepetl se ha intensificado, siendo regulares las exhalaciones de vapor de agua, gases, así como material incandescente (fragmentos de roca o proyectiles balísticos) y cenizas. Algunos de los episodios volcánicos más intensos y explosivos han destruido el domo de lava, mismo que se ha caracterizado por presentar un ciclo de destrucción-construcción intermitente (Del Pozzo *et al.*, 2017).

\*Autor para la correspondencia: [mcruz@uaeh.edu.mx](mailto:mcruz@uaeh.edu.mx)

Correo electrónico: [mcruz@uaeh.edu.mx](mailto:mcruz@uaeh.edu.mx) (Misael Cruz-Sánchez), [mildred.cruzss@udlap.mx](mailto:mildred.cruzss@udlap.mx) (Mildred Cruz-Santos), [ags@unam.mx](mailto:ags@unam.mx) (Sonia Ángeles-García), [pgiron@geologia.unam.mx](mailto:pgiron@geologia.unam.mx) (Patricia Girón-García)



**Figura 1:** Vista panorámica del volcán Popocatepetl (Paso de Cortés, Amecameca, Estado de México).

Los constantes episodios de emisión de cenizas hacia la atmósfera y su posterior desplazamiento hacia las zonas rurales y urbanas implican efectos nocivos para las vías de comunicación, infraestructura, zonas agrícolas y ganaderas, sí como para la salud. Las características de las cenizas se pueden agrupar de acuerdo con sus dimensiones y a su composición química. A medida que las partículas que componen las cenizas son de menores dimensiones ( $<10 \mu\text{m}$ ) sus efectos en las vías respiratorias son más severos, sin embargo, los riesgos pueden ser mayores si las cenizas contienen minerales silicatados (por lo general más duros y abrasivos) o elementos y compuestos tóxicos lixiviables a valores de pH moderados (Horwell y Baxter, 2006; Vargas, 2012).

El objetivo del presente trabajo es la caracterización textural, química y mineralógica de una serie de cenizas volcánicas depositadas en la Ciudad de Puebla bajo diferentes eventos de exhalación de gas y cenizas por el volcán Popocatepetl en los años 2012, 2015, 2016, 2017 y 2019. Destacando que, aunque en el Estado de Puebla existe un programa de gestión de la calidad del aire (Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial, 2012), este no incluye las cenizas volcánicas, siendo necesaria la adquisición de información para enfatizar en su relevancia.

### 1.1. Descripción del área de estudio

El municipio de Puebla, Ciudad de Puebla o zona metropolitana se localiza en el Estado de Puebla entre las coordenadas  $18^{\circ}58' - 19^{\circ}04' \text{ N}$  y  $98^{\circ}07' - 98^{\circ}12' \text{ W}$ , a una altura de 2135 msnm. La ciudad se encuentra en un valle rodeada de tres volcanes: al oeste por el volcán Popocatepetl e Iztaccíhuatl y al norte por la Malinche (figura 2). El clima que prevalece en la ciudad es templado-subhúmedo con temperaturas promedio de  $17^{\circ} \text{ C}$  y una pluviosidad entre 600 y 800 mm anuales. Cuenta con una superficie de  $544.65 \text{ Km}^2$  y una población de 1 692 181 habitantes, siendo una de las ciudades más pobladas del país.

## 2. Desarrollo experimental

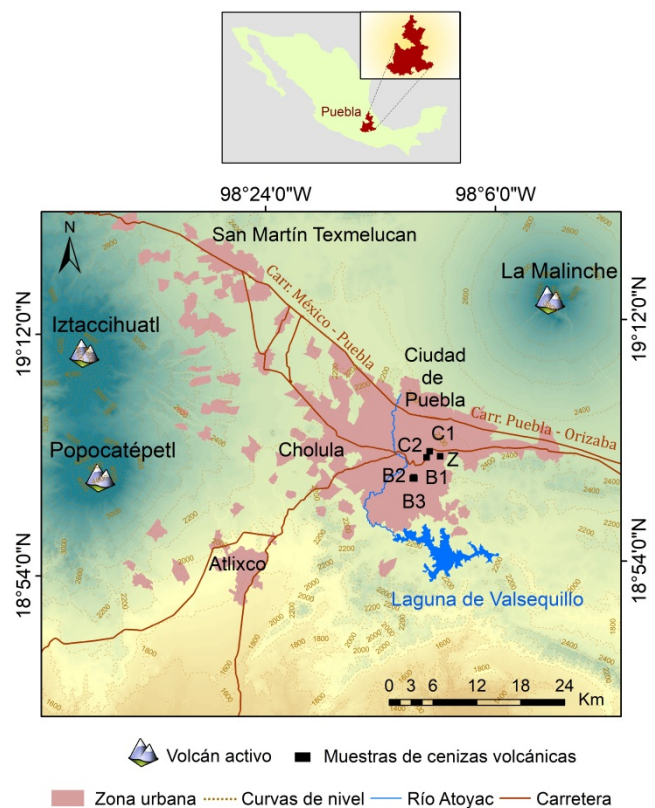
### 2.1. Descripción de las muestras

La recolección de cenizas emitidas por el volcán Popocatepetl los días 16 de abril de 2012, 15 de mayo de 2015, 18 de abril de 2016, 25 de noviembre de 2017 y 14 de junio de 2019 se realizó en la zona metropolitana de la ciudad de Puebla en los sitios denotados con las claves B1, B2, B3, C1, C2 y Z (tabla 1, figura 2), empleando contenedores de plástico (dimensiones  $33 \text{ cm} \times 30$

$\text{cm} \times 14 \text{ cm}$ ) colocados en superficies planas, procurando que las muestras se mantuvieran libres de humedad y sustancias contaminantes.

**Tabla 1:** Sitios de recolección de cenizas en la zona metropolitana de la ciudad de Puebla.

Muestra	Clave	Latitud (N)	Longitud (W)
1	B1	$19^{\circ} 00' 35''$	$98^{\circ} 12' 54''$
2	B2	$19^{\circ} 00' 36''$	$98^{\circ} 13' 01''$
3	B3	$19^{\circ} 00' 40''$	$98^{\circ} 12' 57''$
4	C1	$19^{\circ} 02' 35''$	$98^{\circ} 11' 39''$
5	C2	$19^{\circ} 02' 08''$	$98^{\circ} 11' 54''$
6	Z	$19^{\circ} 02' 11''$	$98^{\circ} 10' 50''$



**Figura 2:** Localización de la ciudad de Puebla y sitios de recolección de cenizas en el área metropolitana.

Debido a la naturaleza de la emisión de las cenizas volcánicas, factores atmosféricos y distancia de recorrido de las partículas hacia la ciudad de Puebla (aproximadamente 40 km), la recolección se llevó a cabo durante un periodo de tiempo comprendido entre 4 y 8 horas, a partir del momento en que se observó la caída de cenizas en la ciudad. Para disponer de una cantidad de cenizas suficiente para el presente trabajo de investigación, se preparó una muestra compuesta con las cenizas recolectadas en cada sitio (B1, B2, B3, C1, C2 y Z), renombrándolas con el año de deposición como 2012, 2015, 2016, 2017 y 2019 (tabla 2, figura 3).

**Tabla 2:** Datos atmosféricos en las fechas de recolección de muestras: D dirección del viento, V velocidad del viento, T temperatura, P presión atmosférica y H humedad relativa (datos de la estación meteorológica Aeropuerto Hermanos Serdán, METEORED©).

Año	D	V máxima (Km/h)	T máxima (°C)	P máxima (hPa)	H máxima (%)
2012	Este	27.8	26	1028	42
2015	Sureste	16.7	24	1028	94
2016	Este- Noreste	35.2	26	1028	62.0
2017	Sur- Sureste	20.4	23	1028	69.6
2019	Este- Noreste	20.4	23	1029	82.2



**Figura 3:** Cenizas volcánicas recolectadas en el periodo 2012-2019 en la ciudad de Puebla.

## 2.2. Análisis textural y de superficie

Una vez que se realizó la recolección y preparación de muestras compuestas, las cenizas se llevaron a sequedad a 60 °C durante 12 h o hasta lograr una masa constante. Posteriormente se determinó la textura mediante el método de Bouyoucos y la clasificación de Shephard (1954).

La densidad real y aparente de las partículas, así como su porosidad macroscópica se estableció mediante el método del picnómetro. En tanto que el área superficial y la porosidad microscópica se evaluó mediante adsorción de N<sub>2</sub> a 77 K en un equipo marca Quantachrome, modelo Autosorb 1C, empleando la ecuación de BET para determinar el área superficial y la regla de Gurtvish para el volumen total de poros (Lowell *et al.*, 2012).

## 2.3. Composición química, clasificación y alteración

La composición química de las muestras se evaluó mediante fluorescencia de rayos X en un espectrómetro marca Rigaku modelo ZSX Primus II (tubo de Rh y ventana de Be), calibrado con muestras internacionales de referencia geoquímica. El análisis cuantitativo para elementos mayores se realizó en perlas de vidrio formadas por la fusión de 0.8 g de la muestra y 7.2 g de fundente (Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> y LiB<sub>2</sub> en proporción 1:1) en crisoles de aleación Pt-Au (95:5), con LiBr (250 g/L) como antiadherente, estimando las pérdidas por calcinación (PPC) a 950 °C. Para cuantificar el

contenido de elementos traza se utilizó el método de prensado con cera. La concentración de los elementos se determinó mediante curvas de calibración estándar.

La clasificación geoquímica de las cenizas volcánicas se definió utilizando el diagrama de TAS (Total Alkali-Silica) (Le Bas y Streckeisen, 1991), la relación %K<sub>2</sub>O-%SiO<sub>2</sub> (Ewart, 1982) y la relación entre elementos inmóviles Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y (Winchester y Floyd, 1977), en tanto que el grado de alteración se evaluó con el índice de alteración química, CIA (Nesbitt y Young, 1982), el índice de alteración de plagioclasas, PIA (Fedo *et al.*, 1995) y el índice de intemperismo químico, CIW (Harnois y Moore, 1988), empleando las siguientes ecuaciones:

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{(Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)} \times 100 \quad (1)$$

$$PIA = \frac{(Al_2O_3 - K_2O)}{(Al_2O_3 + CaO + Na_2O - K_2O)} \times 100 \quad (2)$$

$$CIW = \frac{[Al_2O_3]}{[Al_2O_3 + CaO + Na_2O]} \times 100 \quad (3)$$

## 2.4. Mineralogía

El análisis semicuantitativo de los minerales que conforman las cenizas volcánicas se realizó mediante la observación directa de las partículas de ceniza en un microscopio estereográfico con luz reflejada y luz transmitida marca National con ampliificaciones 10X.

Para complementar las observaciones megascópicas, las principales fases cristalinas presentes en las muestras se identificaron mediante difracción de rayos X (método de polvos), empleando un difractómetro marca Bruker, modelo D8 Advance, con radiación Cu K $\alpha$  1.5406 Å monocromada con filtro de Ni, con rendija de divergencia de 0.681 mm, rendija de antidisipación de 5 mm, rendija del detector de 0.1 mm y detector lineal Lynx Eye con apertura de tres grados. Los patrones de difracción se registraron a temperatura ambiente en el intervalo de 3° ≤ 2θ ≤ 80° empleando un tamaño de paso de 0.020° y una velocidad angular de 15 rpm. Las condiciones de operación del tubo de rayos X fueron de 40 kV y 40 mA. La identificación se realizó empleando el método Hanawalt y el programa MATCH! versión 1.11e.

El análisis micromorfológico y químico puntual de cristales seleccionados se desarrolló en un microscopio electrónico de barrido marca ZEISS, modelo MA10, acoplado a un equipo de microanálisis por energía dispersiva de rayos X marca Bruker operado a 15 kV y 25 mA. Para su análisis, las muestras se depositaron en un portamuestras metálico empleando cinta de grafito como adhesivo y posteriormente fueron recubiertas con una dispersión de grafito para mejorar su conductividad eléctrica.

## 2.5. Análisis de los elementos solubles en agua

Para establecer el tipo y cantidad de elementos solubles o lixiviables en agua desionizada, se utilizaron las cenizas volcánicas sin clasificación del tamaño de partícula y sin tratamientos previos, empleando una relación 1 g: 25 mL. Las mezclas de cenizas-agua se colocaron en botellas de polietileno y se agitaron durante 2 h en una mesa de agitación orbital marca Lab-Line. Al término del ciclo, las soluciones se filtraron al vacío empleando membranas de acetato de celulosa con poros de 0.45 μm (Witham *et al.*, 2005; Stewart *et al.*, 2013). Una vez filtradas, las soluciones lixivadas se separaron en dos fracciones para su análisis fisicoquímico. La fracción empleada para determinar los

parámetros físicos y aniones no tuvo tratamiento alguno, sin embargo, para el análisis elemental, la segunda fracción se acondicionó a pH 3 mediante la adición de HNO<sub>3</sub>.

Los parámetros físicos como pH, conductividad eléctrica (CE), potencial de óxido-reducción (ORP) y sólidos totales disueltos (STD) se establecieron mediante un medidor multiparamétrico Hanna. La dureza (como CaCO<sub>3</sub>), Cl<sup>-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> se evaluaron mediante titulación, mientras que SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> por espectrofotometría (Sadzawka, 2006). El análisis elemental se llevó a cabo mediante espectrofotometría de emisión atómica en plasma acoplado inductivamente (AES-ICP) en un espectrómetro de emisión óptica Perkin-Elmer modelo Óptima 8300, estableciendo la concentración de los elementos mediante curvas de calibración estándar en el intervalo de 0-25 mg/L para cada elemento (Na, K, Mg, Ca, Si, Al, Fe, As). La calidad de los análisis químicos se definió mediante pruebas por triplicado evaluando la precisión y la exactitud que fueron <5%. La calidad total de los análisis químicos de los lixiviados se estimó mediante el error de balance de cargas iónicas %E, siendo inferior a ±5% (APHA, 1999).

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Análisis de la textura y propiedades superficiales

Las muestras de ceniza recolectadas en el periodo 2012-2019, se destacan por su apariencia arenosa y la ligera variación del color en los diferentes años, siendo para el año 2012 gris amarillento (5Y 7/2), en el 2015 amarillo grisáceo (5Y 8/4), en 2016 amarillo oscuro (5Y 6/4), en 2017 café amarillento oscuro (10YR 4/2) y en el año 2019 gris olivo claro (5Y 5/2) (Munsell@, 2009).

De acuerdo con los análisis de textura (figuras 4 y 5), las muestras correspondientes a los años 2012, 2015, 2017 y 2019 se clasificaron como arena limosa, mientras que para el año 2016 se clasificó como arena, existiendo una marcada abundancia de partículas con dimensiones comprendidas entre 50 µm a 2 mm, que también se pueden clasificar como cenizas gruesas (Le Bas y Streckeisen, 1991).



Figura 4: Variación de la textura de las cenizas volcánicas recolectadas en el periodo 2012-2019 en la ciudad de Puebla.

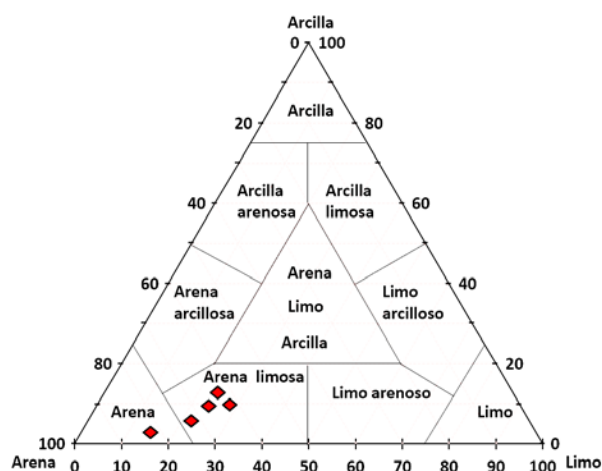


Figura 5: Clasificación textural de las cenizas volcánicas de acuerdo con Shepard (1954).

Los valores de la densidad real DR para las cenizas varían entre 2.561 y 2.670 g/cm<sup>3</sup>, en tanto que la porosidad abierta %P o intergranular (generada por los espacios entre las partículas) va desde 40.56 a 48.11%. El área superficial de las partículas S, presentó valores comprendidos entre 0.4796 y 0.5124 m<sup>2</sup>/g con un volumen total de poros VT (inter e intracristalinos) entre 1.524x10<sup>-3</sup> y 1.823x10<sup>-3</sup> cm<sup>3</sup>/g (tabla 3). Estos resultados reflejan dos condiciones aparentemente opuestas: las partículas que constituyen las cenizas volcánicas presentan una porosidad macroscópica relativamente alta (del orden del 45%) debido a la poca eficiencia de empaque entre ellas derivado de su morfología y textura, aunado a ello, las partículas son no porosas con relación a la estructura de los minerales que las conforman y a su propia génesis (porosidad microscópica).

Tabla 3: Densidad real (DR), densidad aparente (DA), porosidad (%P), área superficial (S) y volumen total de poros (VT) para las cenizas volcánicas.

Año	DR (g/cm <sup>3</sup> )	DA (g/cm <sup>3</sup> )	% P	S (m <sup>2</sup> /g)	VTx10 <sup>-3</sup> (cm <sup>3</sup> /g)
2012	2.561	1.329	48.11	0.5044	1.718
2015	2.575	1.409	45.28	0.5124	1.823
2016	2.562	1.389	45.78	0.4956	1.625
2017	2.654	1.407	46.98	0.5323	1.762
2019	2.670	1.587	40.56	0.4796	1.524

#### 3.2. Composición química y clasificación geoquímica de las cenizas

La composición química de las cenizas volcánicas presenta como óxidos mayores principales SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, MgO y CaO, siendo SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> los de mayor concentración con intervalos de variación de 58.46 a 62.51% y de 15.49 a 16.63%, respectivamente. Los óxidos de TiO<sub>2</sub>, MnO, y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> presentaron abundancias relativas inferiores al 1%, mientras que el K<sub>2</sub>O inferiores al 2%. Las pérdidas por calcinación (PPC) fueron inferiores al 1% reflejando una condición prácticamente anhidra de las cenizas (tabla 4).

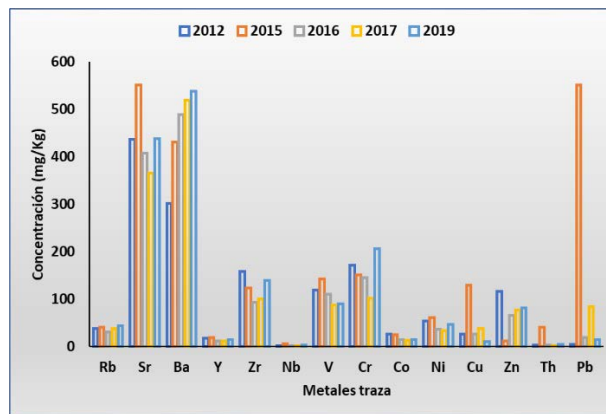
La variación de la concentración de los elementos traza en las cenizas volcánicas respecto de los diferentes años de deposición denota muy ligeros cambios en los elementos Rb, Y, Nb, Co y Ni, mientras que Sr, Ba, Zr, V, Cr, Cu, Zn y Pb manifiestan una mayor

variabilidad, siendo más significativas las concentraciones de Sr, V, Cu, Th y Pb en el año 2015, Pb en el 2017 y Cr en el 2019 (tabla 4, figura 6), sin embargo el incremento de la concentración de Pb en los años 2015 y 2017 (550 y 85 mg/Kg, respectivamente) debe ser considerado como una anomalía geoquímica que podría afectar sensiblemente el medio ambiente.

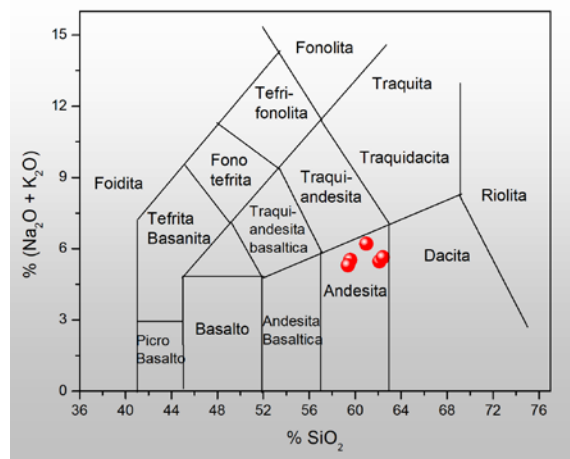
**Tabla 4:** Composición química de las cenizas volcánicas respecto del año de deposición en la ciudad de Puebla.

	2012	2015	2016	2017	2019
<b>Óxidos mayores (% peso)</b>					
SiO <sub>2</sub>	58.46	58.76	60.71	62.51	61.55
TiO <sub>2</sub>	0.79	0.85	0.83	0.75	0.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.63	15.49	16.48	16.32	15.66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.52	6.52	5.80	4.94	5.82
MnO	0.12	0.12	0.10	0.09	0.11
MgO	5.06	5.38	3.75	2.85	4.28
CaO	5.92	6.27	5.89	4.84	5.00
Na <sub>2</sub> O	3.89	4.08	4.48	4.34	3.85
K <sub>2</sub> O	1.33	1.38	1.70	1.84	1.71
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.20	0.20	0.21	0.17	0.18
PPC*	0.77	0.81	0.17	1.39	0.70
Total	99.69	99.86	100.12	100.04	99.66
<b>Elementos traza (mg/Kg)</b>					
Rb	39	41	31	38	44
Sr	436	550	408	366	437
Ba	301	430	489	518	538
Y	18	20	12	12	15
Zr	158	124	93	101	140
Nb	1	6	1	2	3
V	119	143	111	88	90
Cr	172	151	146	102	206
Co	26	25	15	13	15
Ni	54	61	37	34	47
Cu	26	129	26	39	11
Zn	116	12	66	78	82
Th	3	41	3	2	5
Pb	5	550	19	85	15

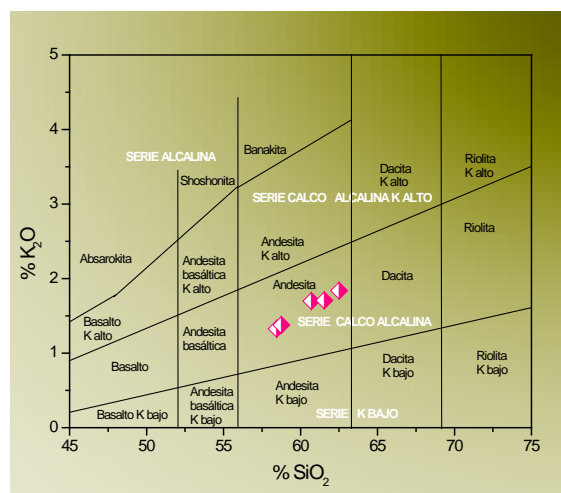
Partiendo de la composición química, las cenizas se clasificaron como andesitas de acuerdo con el diagrama de TAS donde se representa la relación entre el porcentaje de óxidos alcalinos y el de sílice (figura 7). Esta misma clasificación se manifiesta cuando se representa el %K<sub>2</sub>O en función del %SiO<sub>2</sub> (figura 8), así como la relación entre los componentes inmóviles o incompatibles Zr/TiO<sub>2</sub> - Nb/Y (figura 9).



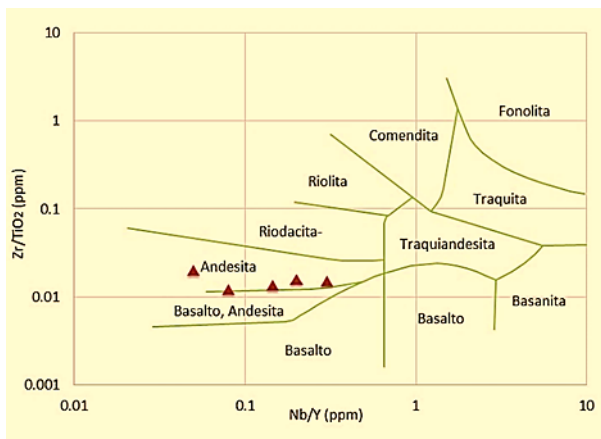
**Figura 6:** Comparación de los elementos traza presentes en las cenizas volcánicas respecto del año de deposición.



**Figura 7:** Clasificación de las cenizas volcánicas en función del contenido de óxidos alcalinos y sílice total (diagrama de TAS).



**Figura 8:** Clasificación de las cenizas volcánicas en función del contenido de óxido de potasio y sílice total.



**Figura 9:** Clasificación de las cenizas volcánicas en función de los elementos inmóviles.

La evaluación de los índices de alteración química (CIA), de alteración de plagioclasas (PIA) y de intemperismo (CIW) indica que las cenizas volcánicas se pueden considerar como inalteradas o recientes, con valores que en la mayoría de los casos son inferiores al 50%, característicos de rocas “frescas” (tabla 5).

**Tabla 5:** Índices de alteración para las cenizas volcánicas en función del año de deposición.

Año	CIA	PIA	CIW
2012	47.9	47.7	49.21
2015	44.8	44.3	46.11
2016	45.9	45.5	47.7
2017	48.7	48.5	51.07
2019	48.2	47.9	50.37

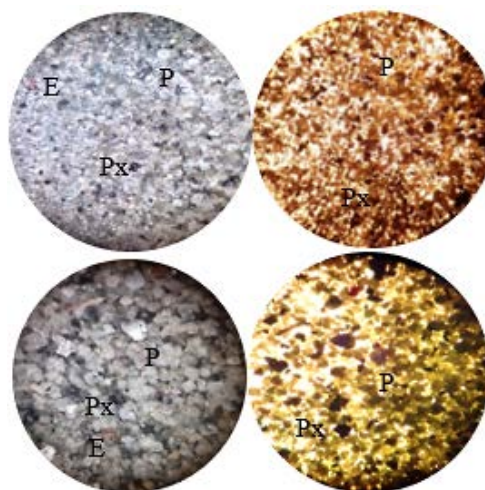
### 3.3. Mineralogía

La observación de las cenizas volcánicas bajo el microscopio estereográfico permitió diferenciar algunos fenocristales por sus características macroscópicas, siendo minerales como plagioclasas y piroxenos los de mayor abundancia relativa. Las plagioclasas se distinguen por presentar colores que varían desde el color blanco al gris azulado con un brillo aperlado, sus cristales tabulares o laminares subhedrales permiten la transmisión de luz apreciándose de color ámbar o amarillo claro (figura 10). Los piroxenos se distinguen por un color negro o marrón oscuro con brillo metálico, cuyos cristales anhedrales o subhedrales son opacos al paso de la luz.

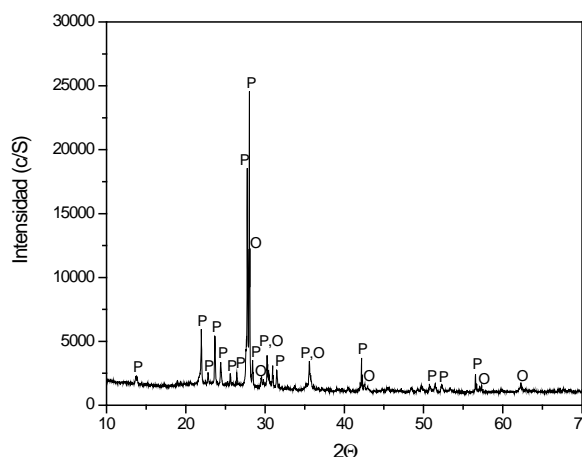
El análisis semicuantitativo realizado mediante observaciones megascópicas de las muestras permitió establecer una abundancia relativa de plagioclasas de 70 a 80%, piroxenos 20 a 25%, feldespatos alcalinos <1%, cuarzo <1%, escoria <2% y vidrio <2%, existiendo una ligera variación mineralógica en los diferentes periodos de deposición de cenizas.

Para complementar las evaluaciones ópticas se realizaron análisis por difracción de rayos X, apreciando una regularidad en los patrones de difracción que manifiesta una composición mineralógica constante para los diferentes eventos de deposición de cenizas en la ciudad de Puebla. La figura 11 representa el patrón de difracción de rayos X característico para las muestras de ceniza volcánica, destacan las reflexiones asociadas a minerales como plagioclasas (P) y ortopiroxeno (O), siendo indetectables las reflexiones para otros minerales como cuarzo o feldespatos alcalinos.

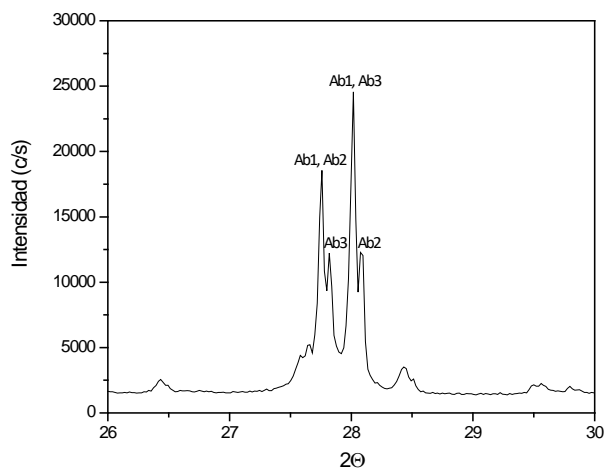
Los principales minerales identificados por difracción de rayos X son plagioclasas del tipo: albita ordenada ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), con número de archivo JCPDS-ICCD 20-0554, albita desordenada ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), con número de archivo JCPDS-ICCD 20-0572, andesina ( $\text{Na}_{0.499}\text{Ca}_{0.491}\text{Al}_{1.488}\text{Si}_{2.506}\text{O}_8$ ), con número de archivo JCPDS-ICCD 79-1148 (en la figura 12 se ha realizado la ampliación del intervalo angular  $26^\circ < 2\theta < 30^\circ$  para hacer más explícita la identificación de las plagioclasas) y ortopiroxeno ( $\text{Fe}_{0.104}\text{Mg}_{0.896}$ )( $\text{Fe}_{0.703}\text{Mg}_{0.254}\text{Ca}_{0.043}$ ) $\text{Si}_2\text{O}_6$  con número de archivo JCPDS-ICDD 86-0162.



**Figura 10:** Imágenes estereográficas de las cenizas (10X) con luz reflejada y luz transmitida. Se indican los principales minerales como plagioclasas (P) y piroxenos (Px), así como escoria (E).

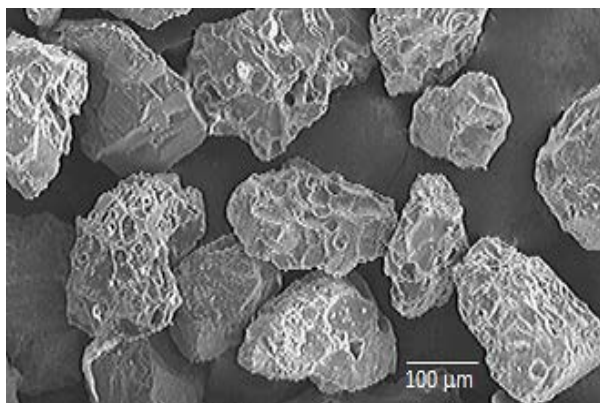


**Figura 11:** Patrón de difracción de rayos X característico de las cenizas volcánicas: P representa a plagioclasa y O a ortopiroxeno.



**Figura 12:** Detalle de las principales reflexiones asociadas a plagioclasas siendo Ab1 albita ordenada, Ab2 albita desordenada y Ab3 andesina.

De acuerdo con los análisis realizados en el microscopio electrónico de barrido, las partículas de ceniza presentan dimensiones comprendidas entre 50 y 200  $\mu\text{m}$  de diámetro con morfologías que van desde angulosas a esponjiformes caracterizadas por la presencia de depresiones y cavidades superficiales no interconectadas (figura 13).

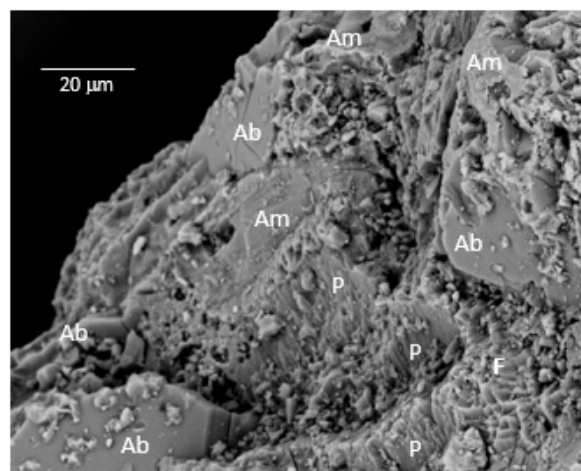


**Figura 13:** Aspecto de las partículas de ceniza depositadas en la ciudad de Puebla en el año 2016 (amplificación 100X).

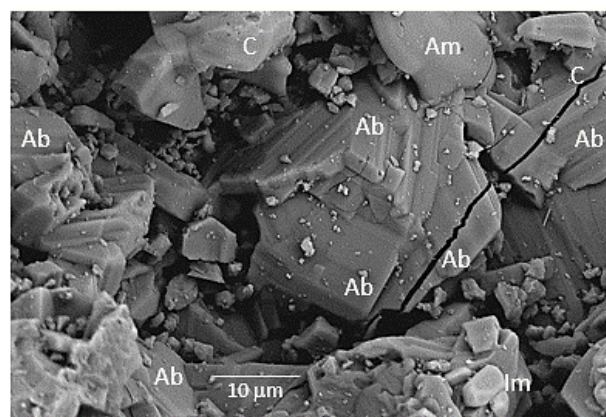
La observación al interior de las cavidades de las partículas ha permitido identificar cristales triclinicos de albita con hábitos laminares que varían desde anhedrales hasta subhedrales con dimensiones entre 10 y 20  $\mu\text{m}$  de diámetro, los cuales son relativamente abundantes. Ocasionalmente se observa la incipiente cristalización de feldespatos alcalinos con hábitos laminares y dimensiones inferiores a 10  $\mu\text{m}$ , así como cristales prismáticos de cuarzo (de 5 a 10  $\mu\text{m}$  de diámetro) y cristales romboédricos de ilmenita con dimensiones del orden de 5  $\mu\text{m}$  (figuras 14 y 15).

Los análisis micromorfológicos reflejan una albitización de anortita (figura 16), cuyos cristales se aprecian parcialmente destruidos por la recrystalización de minerales más estables, donde la secuencia de cristalización puede ser anortita-albita-sanidina-cuarzo, siendo dominante la secuencia anortita-albita, debido a la incipiente cristalización de sanidina y cuarzo, que se encuentran

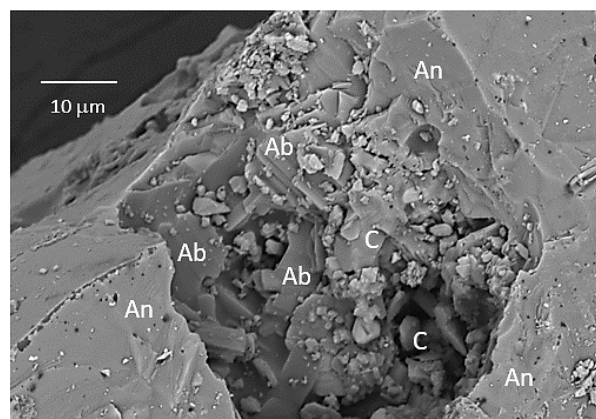
en concentraciones no cuantificables, siendo congruente con las observaciones megascópicas y los análisis por difracción de rayos X.



**Figura 14:** Cristales laminares de albita (Ab) en una matriz de cristales columnares o “flamas” de plagioclasa (P) del tipo andesina coexistiendo con cristales laminares de feldespatos alcalinos (F), así como material amorfo (Am) que cubre la superficie de algunos cristales (amplificación 1000X).



**Figura 15:** Agregados de cristales laminares de albita (Ab) que coexisten con cristales de cuarzo (C), cristales de ilmenita (Im) y material amorfo (Am) (amplificación 1500X).

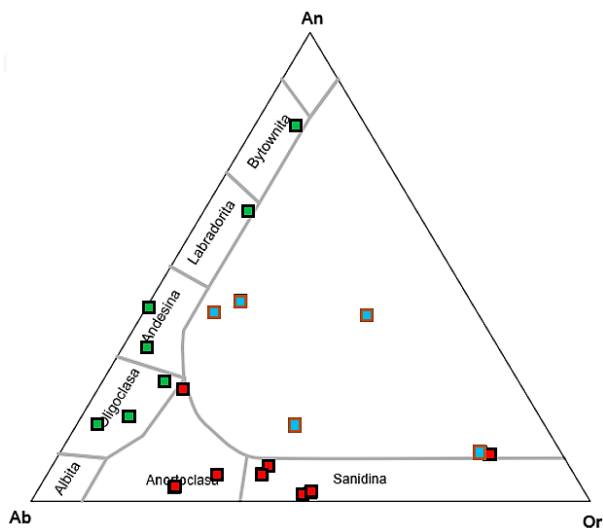


**Figura 16:** Exsolución de un cristal de anortita (An) y desarrollo de cristales de plagioclasa del tipo albita (Ab) y cuarzo (C) (amplificación 1500X).

La complejidad mineralógica de las plagioclasas en las cenizas volcánicas se puede comprender considerando la formación de soluciones sólidas del tipo  $Na_xCa_{1-x}Al_{2-x}Si_{2+x}O_8$  que también pueden ser representadas en términos de los porcentajes de anortita ( $CaAl_2Si_2O_8$ ), albita ( $NaAlSi_3O_8$ ) y ortoclasa ( $KAlSi_3O_8$ ) como % An, % Ab y % Or, respectivamente (Gill, 2010; Marshall, 1996). En el caso de los feldespatos alcalinos la formación de soluciones sólidas se puede representar como  $K_{1-x}Na_xAlSi_3O_8$  siendo también factible su representación en términos de % An, % Ab y % Or.

Los microanálisis de cristales seleccionados en las muestras de cenizas volcánicas han permitido definir las fórmulas empíricas de diferentes soluciones sólidas correspondientes a plagioclasas y feldespatos alcalinos, mismas que han sido representadas en el diagrama ternario de la figura 17. La composición característica de las plagioclasas varía desde bytownita hasta oligoclasa, en tanto que los feldespatos alcalinos se encuentran en la serie de sanidina con bajo contenido de potasio hasta anortoclasa. Las composiciones empíricas representativas son las siguientes:

- Bytownita,  $Na_{0.150}K_{0.092}Ca_{0.999}Mg_{0.006}Fe_{0.083}Al_{1.214}Si_{2.455}O_8$  (An 80.49%, Ab 12.12%, Or 7.39%).
- Labradorita,  $Na_{0.269}K_{0.078}Ca_{0.504}Mg_{0.001}Al_{1.363}Si_{2.757}O_8$  (An 59.24%, Ab 31.56%, Or 9.20%).
- Andesina,  $Na_{0.580}Ca_{0.404}Al_{1.382}Si_{2.634}O_8$  (An 41.06%, Ab 58.94%, Or 0%).
- Oligoclasa,  $Na_{0.985}K_{0.127}Ca_{0.237}Al_{0.697}Si_{2.953}O_8$  (An 17.54%, Ab 73.03%, Or 9.43%).
- Sanidina,  $K_{0.407}Na_{0.413}Al_{0.99}Si_{3.19}O_8$  (An 0%, Ab 50.35%, Or 49.65%).
- Anortoclasa,  $Na_{0.392}K_{0.190}Ca_{0.037}Mg_{0.038}Al_{0.810}Si_{3.534}O_8$  (An 5.94%, Ab 63.36%, Or 30.69%).

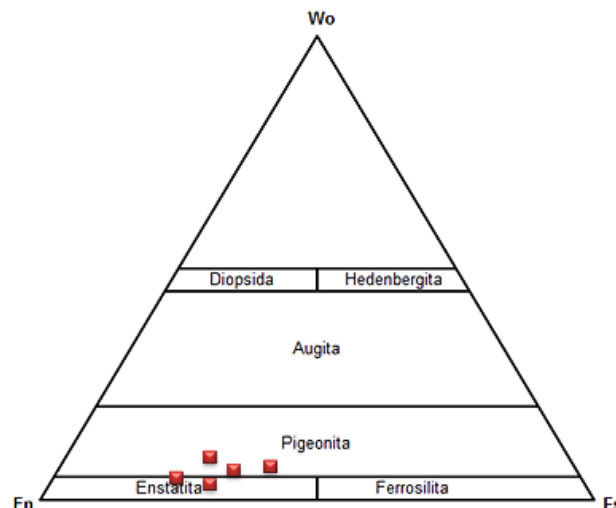


**Figura 17.** Diagrama ternario de composición de plagioclasas y feldespatos alcalinos en términos de % Anortita (An), % Albita (Ab) y % Ortoclasa (Or) para los cristales seleccionados.

Los microanálisis realizados en algunos cristales de piroxenos también reflejan una composición química compleja que puede ser representada en términos de tres componentes: wollastonita ( $Ca_2Si_2O_6$ ), enstatita ( $Mg_2Si_2O_6$ ) y ferrosilita ( $Fe_2Si_2O_6$ ), representados como % Wo, % En y % Fs, respectivamente (Morimoto et al., 1988; Marshall, 1996). En este caso se distinguen composiciones químicas empíricas representativas

para pigeonita y enstatita (figura 18), con fórmulas características del tipo:

- Pigeonita,  $(Fe_{0.311}Mg_{0.451}Ca_{0.122}Na_{0.117}) (Fe_{0.324}Mg_{0.470}Al_{0.206}) Si_{1.98} Al_{0.052}O_6$  (Wo: 7.27%, En: 54.89% y Fs: 37.84%).
- Enstatita,  $(Fe_{0.262}Mg_{0.606}Ca_{0.049}Na_{0.082}) (Fe_{0.198}Mg_{0.457}Al_{0.338}Ti_{0.006}) Si_{1.988} Al_{0.012}O_6$  (Wo: 3.11%, En: 67.63% y Fs: 29.26%).



**Figura 18.** Diagrama ternario de composición química de piroxenos en términos de % Wollastonita (Wo), % Enstatita (En) y % Ferrosilita (Fs) para los cristales seleccionados, de acuerdo con Morimoto et al. (1988).

### 3.4. Composición química de lixiviados

Las soluciones lixiviadas presentan valores de pH próximos a la neutralidad (entre 5.98 y 7.30). Las conductividades eléctricas (CE) se encuentran entre 115 y 226  $\mu S/cm^2$  y los sólidos totales disueltos (STD) entre 78 y 207 mg/L, denotando una baja salinidad. Los valores del potencial de óxido-reducción (ORP) comprendidos entre 131-162 mV se ubican en la región de transición oxidación-reducción (tabla 6).

Los principales iones metálicos lixiviados corresponden a Na (8.371-13.52 mg/L) y Ca (12.12-15.61 mg/L), siendo  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$  y  $Cl^-$  los aniones de mayor concentración en las soluciones, particularmente  $HCO_3^-$  con valores de concentración entre 28.74 y 57.80 mg/L (tabla 6, figura 19). Entre los elementos traza lixiviados destacan Al, Fe y As (tabla 6, figura 20) cuyas concentraciones son superiores a los valores recomendados para aguas de consumo humano, siendo los límites permisibles para Al 0.2 mg/L, Fe 0.03 mg/L y As 0.01 mg/L (World Health Organization, 2011).

Los componentes químicos en las soluciones lixiviadas son similares a los determinados por D'Addabo et al. (2015), existiendo diferencias significativas en las concentraciones debido a las metodologías empleadas, aclarando que en el presente trabajo no se determinó flúor, cuyo comportamiento y concentraciones en lixiviados de cenizas depositadas en las proximidades del volcán (5- 513 mg/Kg de fluoruros) han sido reportados por Armienta et al. (2011). Es importante mencionar que las concentraciones de As (0.147 – 0.206 mg/L) son comparables con las estimaciones realizadas por López et al. (2012) para el arsénico total en el lago del cráter del volcán



Popocatepetl (0.53 a 1.20 mg/L) y en los manantiales de la región (0.3 a 0.5 mg/L).

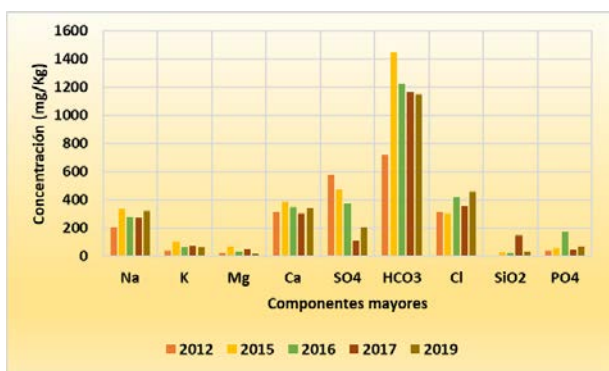
De acuerdo con los valores del potencial de óxido-reducción (ORP) y el pH de las soluciones lixiviadas, se considera que las especies de aluminio, hierro y arsénico se encuentran como  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$  y  $As^{3+}$  en estado hidratado (Takeno, 2005). En el caso del arsénico, es probable que se establezca un equilibrio entre el ácido arsenioso ( $H_3AsO_3$ ) y la primera forma disociada ( $H_2AsO_3^-$ ), siendo estas moléculas más lábiles y móviles en sistemas acuáticos, en consecuencia, de mayor toxicidad.

**Tabla 6:** Análisis fisicoquímico de los lixiviados de las cenizas volcánicas en agua desionizada.

	2012	2015	2016	2017	2019
<b>Parámetros Físicos</b>					
pH	6.28	5.98	6.03	6.55	7.30
CE ( $\mu S/cm$ )	127.0	226.0	160.0	115.0	160.0
ORP (mV)	162.0	137.0	131.0	143.0	139.0
STD (mg/L)	78.0	207.0	152.0	84.0	113.0
Dureza (mg/L)	40.56	47.89	40.12	30.0	37.72

9

Componentes (mg/L)	2012	2015	2016	2017	2019
Na	8.371	13.52	11.33	10.99	12.77
K	1.592	4.229	2.586	2.900	2.545
Mg	1.061	2.771	1.331	2.17	0.803
Ca	12.684	15.61	13.870	12.12	13.78
Al	0.975	1.261	2.807	0.387	1.581
Fe	2.311	2.957	2.240	1.251	1.396
As	0.147	0.162	0.168	0.158	0.206
SiO <sub>2</sub>	0.280	1.230	0.890	5.890	1.520
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	1.589	2.431	6.923	1.769	2.873
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	23.034	18.97	14.907	4.321	8.328
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	28.74	57.80	48.94	46.68	46.02
Cl <sup>-</sup>	12.54	12.19	16.82	14.20	18.29



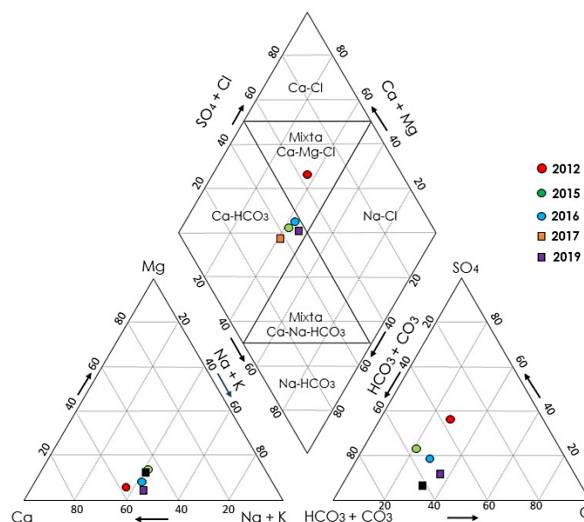
**Figura 19:** Comparación de los principales componentes lixiviados en las cenizas en relación con el año de deposición (concentración en unidades mg/Kg, para normalizar respecto de la cantidad de ceniza empleada en los experimentos de lixiviación).

La clasificación hidroquímica de las soluciones lixiviadas permite diferenciar dos facies: la facie Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> para las muestras 2015, 2016, 2017 y 2019, además de la facie mixta Ca-Mg-Cl y/o Ca-Mg-SO<sub>4</sub> para la muestra 2012 (figura 21). Por otra parte, la evaluación del índice de saturación para las posibles fases

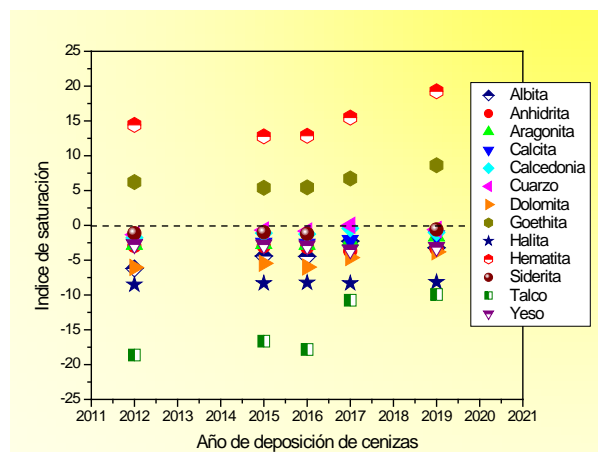
minerales disueltas (Appelo y Postma, 2005) indica que las soluciones están sobresaturadas con hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y goethita (FeOOH) e insaturadas con albita (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), anhidrita (CaSO<sub>4</sub>), aragonita (CaCO<sub>3</sub>), calcita (CaCO<sub>3</sub>), calcedonia (SiO<sub>2</sub>), cuarzo (SiO<sub>2</sub>), dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), halita (NaCl), siderita (FeCO<sub>3</sub>), talco (Mg<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>) y yeso (CaSO<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O), como se aprecia en la figura 22, destacando que esta evaluación corresponde a un modelo de ingeniería inversa para elucidar las posibles fases minerales que dieron origen a los componentes químicos lixiviados.



**Figura 20:** Metales traza lixiviados en las cenizas (en partes por millón mg/Kg) respecto del año de deposición.



**Figura 21:** Clasificación hidroquímica de las soluciones lixiviadas en el diagrama de Piper (1944).

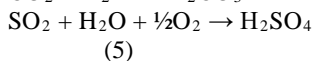
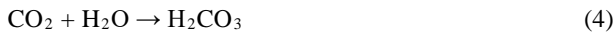


**Figura 22:** Variación del índice de saturación en los lixiviados respecto del año de deposición de cenizas.

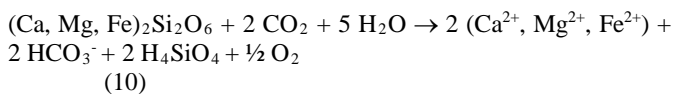
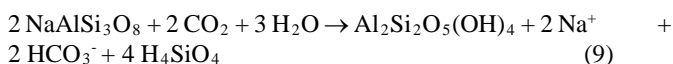
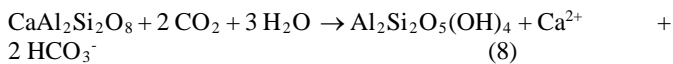
Para complementar las observaciones previas, es importante mencionar que el tiempo de vida media teórica de disolución en agua de un cubo de 5 mm de arista a pH 5 y 25 °C es para anortita 112 años, para albita 575 000 años, sanidina 921 000 años, cuarzo 34 000 000 años y piroxeno (augita, diopsida) 6800 años (Langmuir, 1997), lo cual está relacionado con la constante del producto de solubilidad (Kps) y con la serie de reacción de Bowen, donde los minerales que cristalizan a mayor temperatura son más inestables a temperatura ambiente. Tomando en cuenta esta premisa y contrastando con la evaluación del índice de saturación para las diferentes fases minerales propuestas, no habría explicación sencilla si se considera que bajo los experimentos de lixiviación de las cenizas con agua desionizada fuese posible disolver en dos horas de manera parcial o total los componentes de minerales como plagioclasas o cuarzo (en su defecto piroxenos o feldespatos alcalinos).

Las reacciones químicas que conducen a la disolución congruente o incongruente de los minerales en la naturaleza bajo condiciones hidrotermales son bastante comunes y por lo general son la fuente de minerales secundarios o autigénicos, donde el agua y los gases (con ciertas condiciones de temperatura, presión, volumen y concentración) actúan bajo mecanismos de reacción definidos, en éste caso, las reacciones ácido-base constituyen una de las interacciones más comunes en las etapas iniciales de alteración química (Drever, 1997). Esta condición no es ajena a las posibles reacciones químicas desarrolladas entre los gases emitidos durante una emisión magmática o hidroclástica y las fases minerales lábiles en contacto con estos flujos de gases y vapores (Olsson *et al.*, 2013; Delmelle *et al.*, 2018) como se explica a través de las siguientes reacciones químicas:

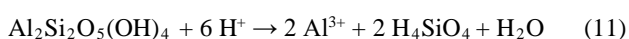
(a) Reacciones entre los principales gases liberados a la atmósfera, cuyos productos son sustancias con propiedades esencialmente ácidas:



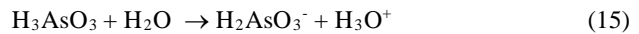
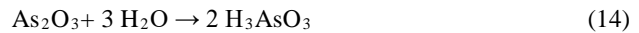
(b) Reacciones de disolución incongruente de plagioclasas (anortita y albita) y piroxenos (tipo augita) con  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  (las cuales pueden ser extendidas a las reacciones con  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$  y  $\text{HF}$ , modificando los productos con los aniones correspondientes):



(c) Adicionalmente, caolinita puede disolverse generando especies más solubles (disolución congruente) bajo la acción de un medio ácido:



(d) En el caso del arsénico, un elemento semivolátil en las emisiones volcánicas, se puede considerar su reacción en forma elemental o como arsenolita en agua para formar ácido arsenioso:



La emisión de gases por el volcán Popocatepetl es un evento que se manifiesta de manera regular (figura 23), estimándose la emisión promedio en el mes de julio de 1996 de 12 900 ton/día de  $\text{SO}_2$ , 52 000 ton/día de  $\text{CO}_2$ , 2700 ton/día de  $\text{HCl}$  y 270 ton/día de  $\text{HF}$ , mientras que en el mes de febrero de 1998 las emisiones promedio de  $\text{SO}_2$  fueron de 1670 ton/día y 38 000 ton/día de  $\text{CO}_2$  (Goff *et al.*, 2001). Otros estudios estiman la emisión promedio en el mes de noviembre de 2008 de 2450 ton/día de  $\text{SO}_2$ , 204 ton/día de  $\text{HCl}$ , 27.7 ton/día de  $\text{HF}$ , 9.8 ton/día de  $\text{SiF}_4$  y 32 ton/día de  $\text{F}_2$  (Stremme *et al.*, 2011), así como la emisión de 2702 ton/día de  $\text{SO}_2$  y 167 ton/día de  $\text{HCl}$  en el periodo 2014-2016 (Taquet *et al.*, 2019), emisiones que son promovidas en parte por la desgasificación del magma que también incorpora vapor de  $\text{H}_2\text{O}$  a la atmósfera (Witter *et al.*, 2005).



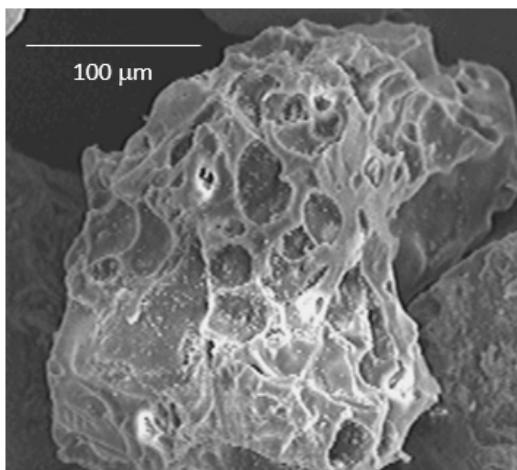
**Figura 23:** Expulsión de una columna de gases y vapor de agua en el volcán Popocatepetl, “la montaña que humea”.

Los gases que se desplazan hacia la atmósfera constituyen una mezcla ácida de alta temperatura (entre 150 y 185 °C, Stremme *et al.*, 2011) que es sumamente corrosiva y con un elevado potencial de disolver algunos minerales con los que entra en contacto. La extensión de la disolución deberá estar asociada al tiempo de reacción entre los gases y las fases sólidas, que en la mayoría de los casos deberá ser discontinua, debido a la intermitencia de las emisiones y al desplazamiento continuo de los gases. Por ello, es factible que mediante la interacción de los gases con los minerales se disuelvan únicamente secciones superficiales generando la deposición de sales y compuestos más solubles que

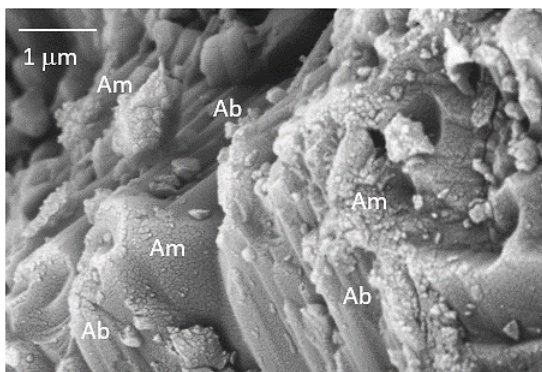
posteriormente podrían lixivarse al contacto con agua (figuras 24 y 25).

En esta condición, la disolución parcial de plagioclasas como anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) y albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), podrían favorecer la deposición en la superficie de las partículas de ceniza volcánica especies como sílice amorfa ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) acompañada de iones  $\text{Al}^{3+}$  hidratados, posiblemente formando especies como  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , iones  $\text{Ca}^{2+}$  que al interactuar con  $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_2$  darían origen a minúsculas cantidades de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) y yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), además de iones  $\text{Na}^+$  que en contacto con  $\text{HCl}$  producirían halita ( $\text{NaCl}$ ). Por otra parte, la disolución de piroxenos ( $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ ) permitirían la deposición de iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$ , así como sílice amorfa ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), estos iones actuarían en conjunción con  $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_2$  como precursores de calcita, dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), yeso y siderita ( $\text{FeCO}_3$ ). El arsénico podría depositarse directamente en las partículas mediante adsorción en su forma elemental y/o como arsenolita ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ).

La disolución posterior de los minerales secundarios en agua liberarían iones como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , así como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{SiO}_2$  acuoso (ácido orto silícico,  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), complementando este grupo el ácido arsenioso ( $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ). Explicando de manera congruente la presencia de las facies hidroquímicas Ca-Mg- $\text{HCO}_3$  y la facie mixta Ca-Mg-Cl y/o Ca-Mg- $\text{SO}_4$ , así como la presencia de los elementos traza  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{As}^{3+}$  en las soluciones lixiviadas.



**Figura 24:** Superficie de una partícula de ceniza con apariencia esponjiforme mostrando la posible disolución por fluidos hidrotermales ácidos (amplificación 100X).



**Figura 25:** Disolución superficial en cristales de albita (Ab) y deposición de material amorfo (Am), es posible observar

patrones irregulares de grietas denotando ataque químico (amplificación 9000X).

#### 4. Conclusiones

La caracterización de cenizas volcánicas depositadas en la ciudad de Puebla en los años 2012, 2015, 2016, 2017 y 2019 ha permitido establecer que las cenizas presentan una textura de arena limosa a arena, predominando las partículas con dimensiones entre 50  $\mu\text{m}$  y 2 mm, clasificándose como cenizas gruesas no porosas con un área superficial del orden de 0.5  $\text{m}^2/\text{g}$ .

De acuerdo con la composición química, las cenizas se clasifican como andesitas no alteradas, con una composición mineralógica dominada por abundante plagioclasa (70-80%) y piroxenos (20-25%), además de cantidades mínimas de feldespatos alcalinos, cuarzo, vidrio y escoria. Las plagioclasas se encuentran en la región de soluciones sólidas desde bytownita hasta oligoclasa, mientras que los feldespatos alcalinos presentaron composiciones de soluciones sólidas entre sanidina-bajo K y anortoclasa. Las evidencias mineralógicas establecen que en las plagioclasas se presenta una albitización de anortita.

El análisis de los lixiviados de las cenizas en agua desionizada permitió definir dos facies hidroquímicas: Ca-Mg- $\text{HCO}_3$  (para los años 2015, 2016, 2017 y 2019) y la facie mixta Ca-Mg-Cl y/o Ca-Mg- $\text{SO}_4$  (para el año 2012), así como la presencia de los elementos traza  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{As}^{3+}$  (que se encuentran en concentraciones superiores a las recomendadas para aguas de consumo). Se establece como posible origen de los componentes lixiviados la formación de fases secundarias solubles en la superficie de las partículas de ceniza debido a la disolución parcial de minerales primarios por una mezcla de gases de naturaleza magmática o hidroclástica.

Para prevenir futuras afectaciones ambientales, se sugiere la evaluación regular de las cenizas volcánicas que se depositan en la ciudad de Puebla, atendiendo no solo las posibles implicaciones por las dimensiones de las partículas, sino también por la variación en su composición química que denota anomalías con elementos tóxicos como plomo y arsénico, principalmente.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Q. Cecilia Salcedo Luna del laboratorio de Difracción de rayos X de la USAI Facultad de Química, UNAM y a la Q. Verónica García Hernández del Laboratorio de Absorción atómica e ICP AACTyM, UAEH por su valioso apoyo en el trabajo analítico.

#### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

#### Referencias

- APHA, (1999). Standard methods for the examination of water and wastewater, 20<sup>th</sup> Ed., APHA, AWWA, WEF, pp. 1-45.
- Appelo, C. A. J., Postma, D., (2005). Geochemistry, groundwater, and pollution, 2<sup>nd</sup> Ed. A.A. Balkema Publishers, Amsterdam, The Netherlands. pp. 119-174.

- Armienta, M. A., Cruz-Reyna, S., Cruz, O., Cenicerros, N., Aguayo, A., Marin, M., (2011). Fluoride in ash leachates: environmental implications at Popocatepetl volcano, central Mexico. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11(7), 1949-1956.
- D'Addabbo, M., Sulpizio, R., Guidi, M., Capitani, G., Mantecca, P., Zanchetta, G., (2015). Ash leachates from some recent eruptions of Mount Etna (Italy) and Popocatepetl (Mexico) volcanoes and their impact on amphibian living freshwater organisms. *Biogeosciences* 12(23), 7087-7106.
- Del Pozzo, A. L.M., Alatorre, I.M., Arana, S.L., Bonasia, R., Capra, P.L., Cassata, W., Córdoba, G., Cortes, R.J, Delgado, G.H., Ferrés, L.M., Fonseca, A.R., García, R.J.A., Gisbert, G., Guerrero, L.D.A., Jaimes, V.M.C., Macías, V.J.L., Nieto, O.J., Paredes, R.P.A., Portocarrero, M.J., Renee, P., Rodríguez, E.D.M., Salinas, S.S., Siebe, G.C., Tellez, E., (2017). Estudios geológicos y actualización del mapa de peligros del volcán Popocatepetl. Memoria técnica del mapa de peligros del volcán Popocatepetl: Monografías del Instituto de Geofísica, (22). UNAM.
- Delmelle, P., Wadsworth, F. B., Maters, E. C., Ayris, P. M., (2018). High temperature reactions between gases and ash particles in volcanic eruption plumes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 84(1), 285-308.
- Drever, J. I., (1997). *The Geochemistry of natural waters: surface and groundwater environments*. 3<sup>rd</sup> Ed. Prentice-Hall, New Jersey, USA. pp. 197-213, 413-422.
- Espinasa, P. R., Del Pozzo, A. L. M., (2006). Morphostratigraphic evolution of Popocatepetl volcano, México. *Special Papers, Geological Society of America* 402, 101-123.  
DOI: 10.1130/2006.2402(05)
- Ewart, A., (1982). The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic-basaltic compositional range. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks* 7, 25-98.
- Fedo, C. M., Nesbitt, W. H., Young, G. M., (1995). Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23(10), 921-924.
- Gill, R., (2010). *Igneous rocks and processes: a practical guide*. Wiley-Blackwell, United Kingdom, pp. 164-165.
- Goff, F., Love, S. P., Warren, R. G., Counce, D., Obenholzner, J., Siebe, C., Schmidt, S. C., (2001). Passive infrared remote sensing evidence for large, intermittent CO<sub>2</sub> emissions at Popocatepetl volcano, Mexico. *Chemical Geology* 177(1-2), 133-156.
- Harnois, L., Moore, J. M., (1988). Geochemistry and origin of the Ore Chimney Formation, a transported paleoregolith in the Grenville Province of southeastern Ontario, Canada. *Chemical Geology* 69(3-4), 267-289.
- Horwell, C. J., Baxter, P. J., (2006). The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bulletin of volcanology* 69(1), 1-24.
- Langmuir, D., (1997). *Aqueous environmental geochemistry*. Prentice-Hall, USA, pp. 231-265.
- Le Bas, M.J., Streckeisen, A. L., (1991). The IUGS systematics of igneous rocks. *Journal of the Geological Society* 148(5), 825-833.
- López, D. L., Bundschuh, J., Birkle, P., Armienta, M. A., Cumbal, L., Sracek, O., Cornejo, L., Ormachea, M., (2012). Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latin America. *Science of the Total Environment* 429, 57-75.
- Lowell, S., Shields, J. E., Thomas, M. A., Thommes, M., (2012). *Characterization of porous solids and powders: surface area, pore size and density* (Vol. 16). Springer, The Netherlands.
- Marshall, D., (1996). Ternplot: An excel spreadsheet for ternary diagrams. *Computers and Geosciences* 22 (6), 697-699.
- MATCH! ®, (2011). *Phase identification from powder diffraction. Crystal Impact V1.11e*
- METEORED©. (s.f.). *Meteorología en red*. <https://www.meteored.mx/puebla/historico>.
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A. K., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., Zussman, J., Aoki, K., Gottardi, G., (1988). Nomenclature of piroxenes. *American Mineralogist* 73, 1123-1133.
- Munsell®, (2009). *Geological rock color chart with genuine Munsell color chips*. Geological Society of America.
- Nesbitt, H., Young, G. M., (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299(5885), 715-717.
- Olsson, J., Stipp, S. L. S., Dalby, K. N., Gislason, S. R., (2013). Rapid release of metal salts and nutrients from the 2011 Grímsvötn, Iceland volcanic ash. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 123, 134-149.
- Piper, A.M., (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Am. Geophys. Union Trans.* 25, 914-923.
- Sadsawka, R.A., (2006). *Métodos de análisis de aguas para riego*. Serie Actas INIA No. 37. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Secretaría de Sustentabilidad Ambiental y Ordenamiento Territorial, (2012). *Programa de Gestión de la Calidad del Aire del Estado de Puebla 2012-2020*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Shephard, F. P., (1954). Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *J. Sed. Pet.* 24, 151-158.
- Stewart, C., Horwell, C., Plumlee, G., Cronin, S., Delmelle, P., Baxter, P., Calkins, J., Damby, D., Morman, S., Oppenheimer, C., (2013). Protocol for analysis of volcanic ash samples for assessment of hazards from leachable elements. IAVCEI Commissions joint report: International Volcanic Health Hazard Network and Cities and Volcanoes.
- Stremme, W., Ortega, I., Siebe, C., Grutter, M., (2011). Gas composition of Popocatepetl Volcano between 2007 and 2008: FTIR spectroscopic measurements of an explosive event and during quiescent degassing. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(3-4), 502-510.
- Takeno, N., (2005). *Atlas of Eh-pH diagrams: intercomparison of thermodynamic data bases*. Geological Survey of Japan Open file report 419, 21-23, 29-31, 101-103.
- Taquet, N., Stremme, W., Grutter, M., Baylón, J., Bezanilla, A., Schiavo, B., Rivera, C., Campion, R., Boulesteix, T., Nieto-Torres, A., Espinasa-Pereña, R., Blumenstock, T., Hase, F., (2019). Variability in the gas composition of the Popocatepetl volcanic plume. *Frontiers in Earth Science* 7(114), 1-14.  
DOI: 10.3389/feart.2019.00114
- Vargas, M. P. S., (2012). Las cenizas, gases volcánicos y la salud respiratoria. *NCT Neumología y Cirugía de Tórax* 71(2), 132-138.
- Winchester, J. A., Floyd, P.A., (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20, 325-343.
- Witham, C. S., Oppenheimer, C., Horwell, C. J., (2005). Volcanic ash-leachates: a review and recommendations for sampling methods. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 141(3-4), 299-326.
- Witter, J. B., Kress, V. C., Newhall, C. G., (2005). Volcán Popocatepetl, Mexico. Petrology, magma mixing, and immediate sources of volatiles for the 1994-present eruption. *Journal of Petrology* 46(11), 2337-2366.
- World Health Organization, (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. 4th Ed. WHO-Press, Geneva, pp. 307-442.