



Carlos Doria Argumedo^{1,*}

¹Facultad de Ingeniería. Universidad de La Guajira

*Autor para correspondencia: cdoria@uniguajira.edu.co

Recibido: 13 de Octubre de 2016. Aceptado: 8 de Febrero de 2017.

Metales pesados (Cd, Cu, V, Pb) en agua lluvia de la zona de mayor influencia de la mina de carbón en La Guajira, Colombia

Resumen

Con el objetivo de medir la influencia que ejercen las actividades mineras de la explotación del carbón sobre la calidad del aire en las comunidades ubicadas en el área de influencia al norte de Colombia, se realizó una medición de los niveles de los metales pesados Cu, Cd, V y Pb en 21 muestras de agua lluvia. Este estudio se realizó por periodo de un año, mediante espectrometría de absorción atómica electrométrica. El promedio de las concentraciones de los metales fueron: Cu $23,47 \pm 13,97 \mu\text{g/L}$, Cd $4,72 \pm 3,29 \mu\text{g/L}$ y V $11,25 \pm 6,75 \mu\text{g/L}$. Los resultados sugieren que la atmósfera no se encuentra contaminada por Pb, pero las actividades mineras (las excavaciones y voladuras, la combustión de combustibles fósiles, de crudos de petróleo y gasoil, las fuentes de tráfico vehicular, etc.) afectan significativamente la presencia y los niveles de los demás metales incluidos en el estudio. La contaminación en la zona influye en que el agua lluvia no cumpla con las normas de calidad, tanto a nivel nacional como internacional, ya que los parámetros de pH y Cd superan los límites permisibles y por tanto no es apta para el consumo humano.

Palabras clave: actividades mineras, agua de lluvia, espectrometría de absorción atómica electrométrica, metales pesados.

Heavy metals (Cd, Cu, V, Pb) in rainwater in the most influence area of the coal mine in La Guajira, Colombia

Abstract

To measure the influence of coal mining activities on air quality in northern Colombia, a first approach was made to assess pollution by measuring the levels of the heavy metals Cu, Cd, V, and Pb in 21 samples of rainfall over a one year period, by the electrothermal atomic absorption spectrometry technique. The average concentrations of metals in the study area in wet precipitation were: Cu $23.47 \pm 13.97 \mu\text{g/L}$, Cd $4.72 \pm 3.29 \mu\text{g/L}$ and V $11.25 \pm 6.75 \mu\text{g/L}$. The results suggest that the atmosphere is not polluted by Pb, but mining activities (excavation and blasting, combustion of fossil fuels, crude oil and gas oil, and vehicular traffic sources) may significantly affect the presence and the levels of the other studied metals. Contamination in the area makes rain water infringe the quality standards, both nationally and internationally, since the parameters of pH and Cd exceed the permissible limits, therefore it is not suitable for human consumption.

Keywords: mining activities, rainwater, electrothermal atomic absorption spectrometry, heavy metals.

Metais pesados Cd, Cu, V, Pb) na água de chuva na área de influência da mina de carvão em La Guajira, Colômbia

Resumo

A fim de medir a influência que exercem as atividades de mineração de carvão sobre a qualidade do ar nas comunidades localizadas na área de influência ao norte da Colômbia, foram medidos os níveis de metais pesados Cu, Cd, V e Pb em 21 amostras de água da chuva. Este estudo foi feito ao longo de um ano, mediante espectrometria de absorção atômica eletrométrica. As concentrações médias dos metais foram: Cu $23,47 \pm 13,97 \mu\text{g/L}$, Cd $4,72 \pm 3,29 \mu\text{g/L}$ e V $11,25 \pm 6,75 \mu\text{g/L}$. Os resultados sugerem que a atmosfera não está contaminada por Pb, mas as atividades de mineração (escavação e detonação, a queima de combustíveis fósseis, petróleo bruto e diesel, e o tráfego de veículos) afetam significativamente a presença e os níveis dos outros metais incluídos no estudo. A poluição faz que a água da chuva não atenda aos padrões de qualidade, tanto a nível nacional como internacional, posto que os parâmetros de pH e Cd excedem os limites admissíveis e, portanto, fazem que a água seja imprópria para consumo humano.

Palavras-Chave: mineração, águas pluviais, espectrometria de absorção atômica eletrométrica, metais pesados.

Introducción

La lluvia cumple un papel importante en la limpieza de la atmósfera, ya que a través de este proceso se remueven la mayor cantidad de iones presentes en la misma. La composición química del agua de lluvia varía de un lugar a otro y de una región a otra, debido a la influencia de fuentes locales (1), tanto naturales como antropogénicas (2). Conocer su composición es importante para entender el papel del transporte de los componentes solubles de la atmósfera y su contribución a las diferentes fuentes de contaminantes atmosféricos (3). Adicionalmente, el agua de lluvia funciona como un sumidero importante para la materia en forma de gases y partículas, incluyendo metales traza en la atmósfera y, por tanto, desempeña un papel importante en el control de las concentraciones de estas especies (4).

Por su parte, la composición química de las deposiciones atmosféricas depende de numerosos mecanismos físicos y químicos de los aerosoles y precursores de las emisiones, las reacciones químicas, y procesos de eliminación. Por lo tanto, la química de las deposiciones húmedas puede proporcionar ideas sobre la evolución temporal de la atmósfera y su contaminación, y ser utilizada como un indicador pertinente para evaluar los procesos naturales frente a influencias antropogénicas (5). De modo que, en áreas remotas, estos estudios ofrecen un gran potencial para aclarar los efectos de centros urbanos, complejos industriales y emisiones de la agricultura. Del mismo modo, para comprender los procesos que controlan la composición química de la atmósfera en las regiones remotas y los ciclos biogeoquímicos naturales (6).

Acerca de la composición, los componentes disueltos en el agua de lluvia se pueden dividir generalmente en tres grupos: (a) los aerosoles de sal marina, (b) los aerosoles terrestres (suelo polvo, las emisiones biológicas) y (c) los aportes antropogénicos (7). Estos últimos se relacionan con procesos industriales, combustibles fósiles, actividades mineras, incineración de residuos, emisiones del motor de vehículos, agricultura y fertilizantes, además de otras actividades humanas que emiten grandes cantidades de contaminantes atmosféricos (8).

Uno de los grupos de contaminantes atmosféricos que genera gran preocupación es el de los metales pesados debido a sus características tóxicas, potencialmente cancerígenas, y su persistencia en el medio ambiente (8). Los metales pesados son tóxicos para los organismos vivos, aunque algunos de ellos como el Pb y el Cd se encuentren en niveles bajos (9). Elementos traza como Cd, Pb y V pueden provocar alteraciones en la salud, dependiendo de sus concentraciones en la atmósfera y de la forma química bajo la que se presenten. Tales alteraciones pueden abarcar desde afecciones pulmonares y cáncer, hasta hemorragias cerebrales (10).

Tal como se mencionó, las principales fuentes de metales son la industria, la minería, la fundición de metales y las fuentes móviles (11). En particular, la minería de carbón a cielo abierto genera mayores impactos en el ambiente que la minería subterránea, dado que genera material particulado y contaminantes gaseosos que permanecen en el aire, es decir, no solo afecta el interior de las minas, sino también las áreas de influencia externas (12).

En la Guajira colombiana, la minería del carbón es la actividad más representativa en cuanto a extensión (69000 hectáreas) y explotación del recurso (30,2 millones de toneladas/año). La explotación es a cielo abierto y la compañía minera responsable es la más grande del país; la mina de carbón es una de las minas a cielo abierto más grandes del mundo (13). Lo anterior trae como consecuencia el aumento de los niveles de contaminación y deterioro de la calidad del aire en dicha zona (14).

Teniendo en cuenta que los metales Cu, Cd, V y Pb son considerados como unos de los contaminantes más significativos en la atmósfera, que la minería es una de las actividades humanas que más contribuyen a su incorporación al ambiente y que actualmente no existen contribuciones a la literatura de la química elemental del agua de lluvia en esta región de Colombia, el presente estudio ha tenido como objetivo principal la determinación de los niveles de estos metales en la precipitación húmeda en una de las zonas de mayor influencia de la mina de carbón. Lo anterior con el fin de identificar los efectos de esta fuente de emisión en el aumento y la acumulación de elementos traza en la atmósfera de esta región del país.

Materiales y métodos

Aspectos generales del régimen de vientos y lluvias de la zona de estudio

En La Guajira predominan vientos alisios, su régimen es estacional coincidiendo con los períodos de invierno y verano de diciembre a mayo con velocidades de 13 a 15 nudos y dirección preferencial del Norte, y de junio a noviembre con velocidades bajas. El régimen de lluvia es de tipo binomial caracterizado por los períodos de mayor precipitación (abril-junio, septiembre-noviembre) alternados con dos de menores lluvias (diciembre-marzo, julio-agosto). En términos de aportes, el segundo período de mayores lluvias es el que tiene más peso relativo frente al total anual con promedios hasta del 55% frente a un 20% del primer período. Las épocas de menores lluvias aportan un 25%. El patrón de distribución de las lluvias es simple, éstas se dan desde el noreste al sureste entre valores que van desde los 500 mm al año en la Alta Guajira, hasta valores que sobrepasan los 2000 mm en las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta (15). Las zonas climáticas en el área de Cerrejón corresponden a las categorías cálido seco y cálido muy seco. Se presentan dos períodos lluviosos, en abril - mayo el primero, y entre octubre y noviembre, el segundo; con una precipitación promedio anual de 912 mm (16).

Muestreos

El diseño del monitoreo, el montaje y la operación de los colectores de deposición húmeda está basado en las recomendaciones de la literatura (17, 18). Se colectaron muestras de agua de lluvia en tres de los sitios de mayor asentamiento humano del municipio de Barrancas (La Guajira, Colombia), cuyos territorios están conformados por planicies y pequeñas ondulaciones. Por la conformación de su topografía, solamente se presenta el piso térmico cálido; los suelos son bañados por las aguas de los ríos Palomino y Ranchería (19).

Desde el punto de vista socioeconómico Barrancas constituye el área carbonífera denominada El Cerrejón que se extiende a lo largo de 50 km en el valle del río Ranchería, entre la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía de Perijá, cubriendo una extensión de 69364 hectáreas (20).

En la Figura 1 se muestra un mapa de la península de La Guajira y en la Figura 2 se detalla la ubicación de los lugares de toma de muestras: el punto 1 localizado en Barrancas (zona urbana), el punto 2 en la zona rural entre las comunidades de Barrancas y Los Magueyes y el punto 3 en Papayal; la recolección se hizo en el período de junio a diciembre de 2014 y enero a junio del 2015.

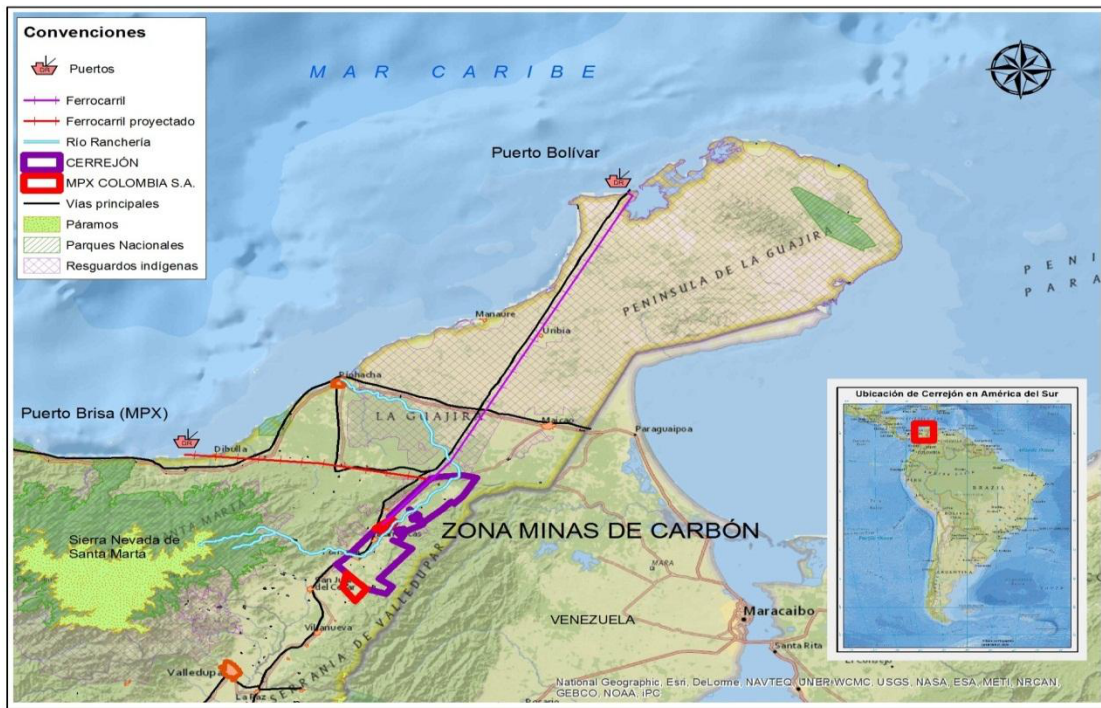


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona minera de carbón El Cerrejón. La Guajira, Colombia

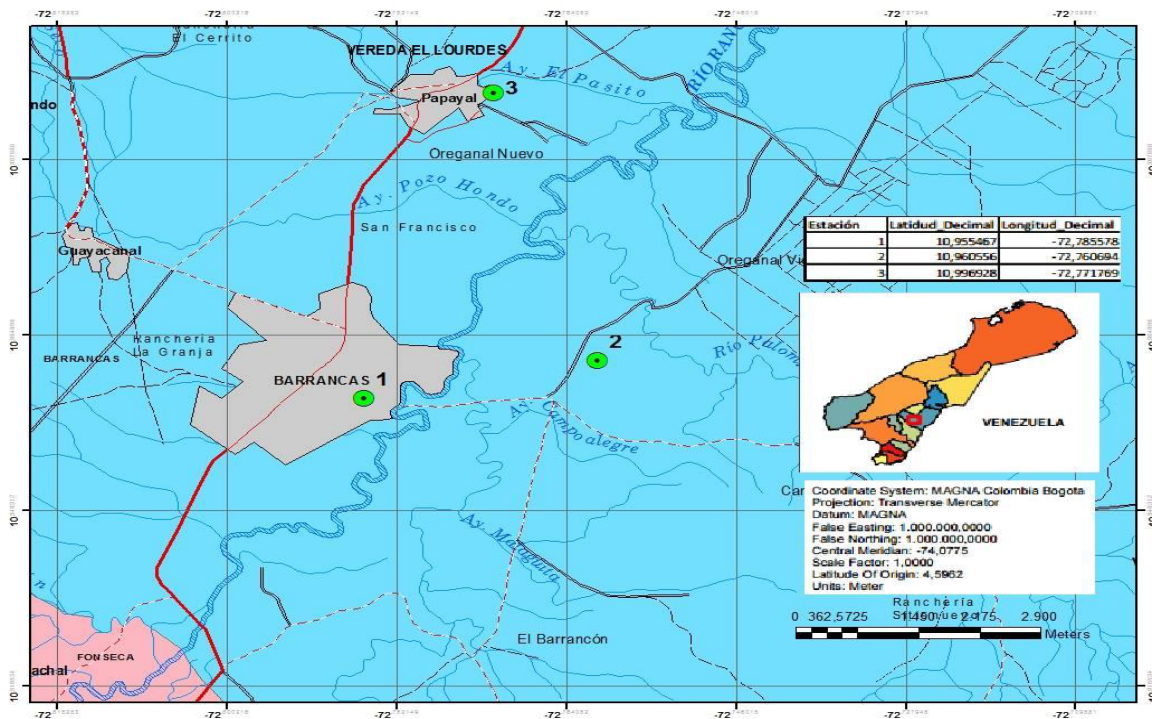


Figura 2. Puntos de monitoreo de agua de lluvia. Zona minera de carbón de La Guajira

Las muestras de agua de lluvia fueron recolectadas estrictamente por evento, utilizando un colector de tolva cuadrado, cuyo esqueleto metálico liviano (de ~ 2 m de altura) sostenía un embudo de polietileno de área 0,25 m² en su boca redonda. Éste se unió a un pequeño tubo, también de polietileno, de 2 cm de diámetro y 5 cm de largo, incrustado a través de un tapón de caucho por medio de una manguera de polietileno de 8 cm de longitud aproximadamente, en un envase de polietileno con capacidad de 4 L.

El diseño de la tolva consistía en cuatro triángulos isósceles con un ángulo central (opuesto a la base) de 90°, para una altura de 2 m (Figura 3). El colector que fue ubicado lejos de cualquier fuente de contaminación específica, se abría manualmente al comenzar el evento de lluvia y al terminar se cerraba, para evitar contaminación por deposición seca. Finalizado el evento de lluvia, se midió el volumen colectado e inmediatamente se separó una fracción de entre 100 y 150 mL, la cual fue envasada en un recipiente de polietileno y posteriormente refrigerada (aprox. 5 °C) hasta el momento de su análisis.

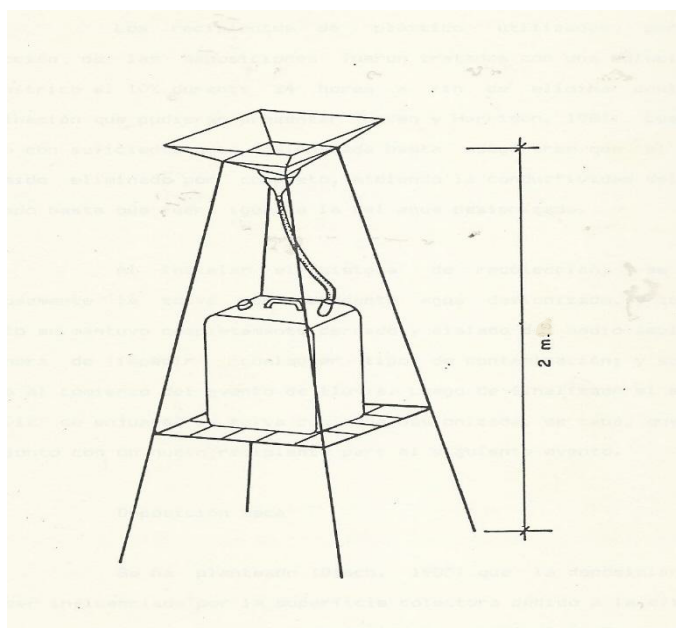


Figura 3. Esquema del montaje de colector para deposición húmeda

Análisis químico

Después de recoger el agua de lluvia, se utilizó una alícuota de cada muestra para medir el pH. El medidor de pH se calibró antes de cada medición utilizando soluciones tampón estándar de pH 4,00 y 7,00 (21). Una segunda alícuota de cada muestra fue almacenada en un frasco de polietileno de 100 mL, preservada con HNO₃ 1:250 v/v (permitiendo un pH suficientemente bajo para preservar los metales) y refrigerada a 4 °C (22).

Los metales (Cu, Cd, V y Pb) fueron determinados utilizando la técnica de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito (22), usando el equipo Perkin Elmer 3110. Las condiciones de operación se encuentran indicadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de operación de la determinación de metales (Cu, Cd, V y Pb) por espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito

| Elemento | λ (nm) | Slit | Pirolisis (°C) | Atomización (°C) |
|----------|----------------|------|----------------|------------------|
| Cu | 324,8 | 0,7 | 1200 | 2300 |
| Cd | 228,8 | 0,7 | 700 | 1600 |
| V | 318,4 | 0,7 | 1450 | 2650 |
| Pb | 283,3 | 0,7 | 850 | 1800 |

Resultados y discusión

Cantidad de lluvia

Se recogieron 21 muestras de agua de lluvia. El mayor número de eventos mensuales se produjo en septiembre, seguido de junio y octubre (8, 5 y 4, respectivamente); no se observaron eventos de lluvia en diciembre, enero, febrero y marzo. La precipitación mensual durante el período de estudio se presenta en la Figura 4. La precipitación más alta fue durante septiembre (246,4 mm), seguido de junio (125,2 mm) y octubre (91,4 mm). Los meses de diciembre, enero, febrero, marzo, diciembre son considerados los de temporada seca, coincidiendo esta situación con el comportamiento histórico del sitio.

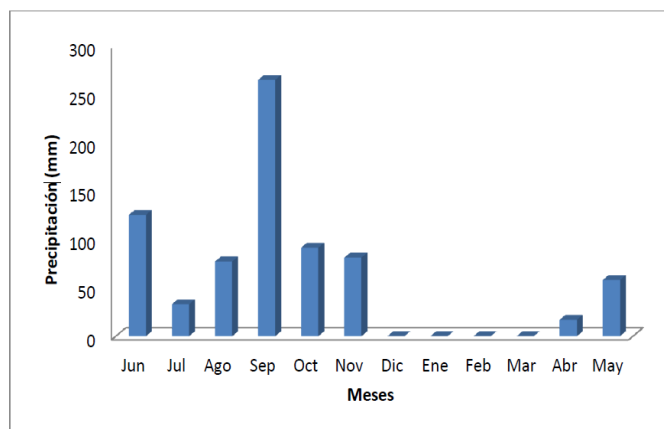


Figura 4. Variación mensual de ocurrencia de lluvia durante el período de estudio. Junio-diciembre (2014), enero-mayo (2015)

Variación del pH de la lluvia

El pH de las precipitaciones individuales varió desde 4,40 hasta 7,80, tanto valores ácidos como alcalinos. En este estudio la media de pH valor por volumen ponderado (VWM, por su sigla en inglés) fue de 5,89, valor que supera al de la lluvia natural, de 5,6 controlada por el CO₂ disuelto (23). El pH de la lluvia durante el período de muestreo se indica en la Figura 5.

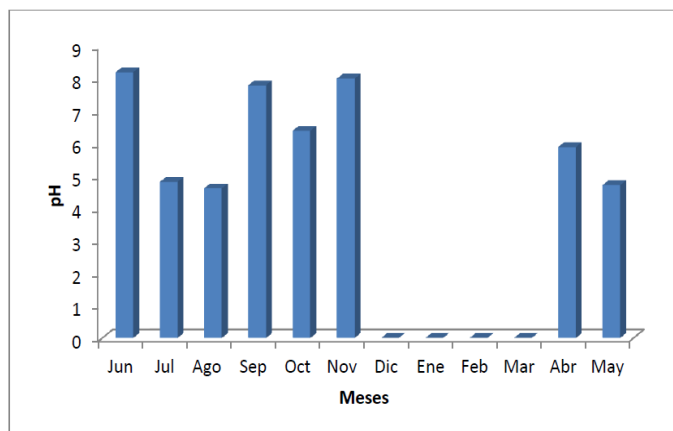


Figura 5. Media potencial mensual de pH valor por volumen ponderado en el agua de lluvia

El 38% de las muestras presentaron un pH por encima de 5,89 lo que indica la presencia de lluvias ácidas en la zona, esto se puede explicar teniendo en cuenta que el pH de la precipitación se modifica por la adición de componentes tanto ácidos como alcalinos (24). Por tanto, el carácter ácido de la lluvia sugiere la influencia de las actividades mineras del carbón que involucran procesos de combustión en los vehículos automotores (gasolina, petróleo crudo, aceite), combustión espontánea durante la excavación o voladuras que utilizan material explosivo. Estas actividades son fuentes potenciales de NO₂ y SO₂, gases responsables de la formación de sustancias ácidas como HNO₃ y H₂SO₄ en la atmósfera (25, 26).

Se ha registrado una situación similar en zonas cercanas de Venezuela como Paraguaipoa (27) que presenta lluvias con un pH de 6,0, atribuido a la influencia de la mina de carbón. Del mismo modo, en Maracaibo se ha reportado un pH de 5,9, valor que es determinado por la presencia de la industria petroquímica y petrolera (Complejo Petroquímico El Tablazo, ubicado en el estado Miranda), la fábrica de cemento (Planta Mara), el tránsito automotor y las emisiones del suelo (28).

Concentración de elementos traza en la precipitación

En la Tabla 2 se presenta el resumen estadístico de las concentraciones de los metales Cu, V y Cd medidos en las muestras de agua de lluvia que presentaron valores por encima del límite de detección (0,02 µg/L para cada elemento).

Las concentraciones de Pb estuvieron por debajo del límite de detección (0,01 µg/L). No hubo una variación significativa en la concentración de elementos traza en la precipitación en los tres sitios de muestreo ($p > 0,01$). Los valores mayores de concentración de metales se presentaron en las lluvias ocurridas después de periodos de sequía en junio de 2014 y abril del 2015, mientras que los valores menores se presentaron cuando la lluvia tuvo continuidad durante varios días (Figura 6).

Figura 6. Variación mensual de las concentraciones de metales (µg/L) en la lluvia

Tabla 2. Niveles de concentración (µg/L) de metales traza en la lluvia

| Sitio | Elemento | Media (µg/L) | DS | CV | Máximo | Mínimo |
|-------|----------|--------------|-------|------|--------|--------|
| 1 | Cu | 25,21 | 14,38 | 0,57 | 41,3 | 3,8 |
| | Cd | 4,57 | 3,92 | 0,85 | 32,6 | 0,1 |
| | V | 12,17 | 7,31 | 0,60 | 26,7 | 4,8 |
| 2 | Cu | 24,13 | 15,10 | 0,62 | 39,5 | 3,3 |
| | Cd | 3,98 | 3,08 | 0,77 | 30,2 | 0,6 |
| | V | 11,23 | 6,73 | 0,60 | 24,2 | 3,9 |
| 3 | Cu | 21,07 | 12,45 | 0,60 | 38,7 | 2,9 |
| | Cd | 5,60 | 2,88 | 0,51 | 35,1 | 1,2 |
| | V | 10,34 | 6,21 | 0,60 | 20,9 | 4,1 |

DS =Desviación estándar, CV =Coeficiente de variación
En todos los casos el número de muestras fue 21

Gratz y Miller (29) y Wetang'ula y Wamalwa (5) en sus estudios también observaron que las concentraciones altas se presentan típicamente en las primeras precipitaciones seguidas después de épocas de sequía prolongadas, lo que sugiere que la mayoría de los elementos traza se eliminan durante el inicio del periodo de las precipitaciones, y se van diluyendo a medida que van transcurriendo el resto de los eventos. Se observa una correlación significativa entre el Cd y V ($R^2 = 0,73$; $p < 0,01$) y Cu y V ($R^2 = 0,63$; $p < 0,01$), pero sin significancia entre el Cd y Cu ($R^2 = 0,42$; $p < 0,01$), lo que sugiere la existencia de más de una fuente de origen de estos metales.

El Vanadio y el Cadmio se encuentran en la corteza terrestre a bajas concentraciones (30), por lo que se considera que las principales fuentes de estos elementos deben estar relacionadas con actividades antrópicas, principalmente a través de la zona minera de carbón: los escapes de vehículos automotores (tractocamión, pala hidráulica, tractor, bus) que utilizan combustible pesado y la combustión de crudos de petróleo y gasoil. Adicionalmente, en la minería a cielo abierto se remueve una gran cantidad de material estéril para destapar los depósitos minerales, lo que genera aguas ácidas. Las aguas ácidas, a su vez, atacan otros minerales produciendo soluciones que acarrean elementos tóxicos al ambiente como el Cd o As (31).

En relación con lo anterior, en la cuenca del Witwatersrand de Sudáfrica existe una contaminación mayor de las aguas superficiales con Co, Mn, Ni, Pb y Zn como resultado del proceso de cianuración y oxidación de aguas ácidas de mina (32). El contenido de V en el petróleo crudo es de 5-1300 ppm (32) y las cenizas de la combustión del petróleo contienen más de 80% de V_2O_5 (33). El V y en menor medida Ni y S han sido utilizados como indicadores de combustión de crudos de petróleo y gasoil en la totalidad de los estudios de composición química de partículas aerotransportadas (34).

Algunos autores han atribuido a la resuspensión de partículas de suelos margosos hasta un 40% del total del V encontrado en partículas aerotransportadas en una zona árido-desértica (10). Se puede considerar, en este sentido, que la presencia del V en la atmósfera está influenciada por la resuspensión de partículas del suelo aerotransportadas por acción de los vientos provenientes de contribuciones antropogénicas, generadas en zonas cercanas a La Guajira, como es el caso del complejo petroquímico de El Tablazo, Venezuela.

Por otro lado, la combustión del carbón es también una de las fuentes principales de Cu, Cr, Co, As, Se, así como de elementos litófilos en general (35). Se consideran, además, otras posibles fuentes como el desgaste de neumáticos y las quemaduras forestales en las zonas destinadas para cultivos. También se sugiere que los procesos de remoción de capas del suelo a través de voladuras y excavaciones realizadas en la mina, pueden contribuir a la emisión de Cu en la atmósfera (36).

Al comparar la concentración de Cd y V medidos en la lluvia en la zona minera de La Guajira (Tabla 3), se observa que son más altas que las reportadas en otras regiones del mundo, lo cual podría ser consecuencia de la ubicación de la zona de estudio en la región de calma ecuatorial que separa los movimientos de las masas de aire en los dos hemisferios. Esto dificulta el intercambio de contaminantes entre hemisferios, causando cierta asimetría en la distribución de dichos contaminantes (37).

También es de considerar que la presencia y concentración de metales en la atmósfera de La Guajira se ve influenciada por el movimiento de las corrientes marinas cálidas en la costa norte de Colombia, la intensidad de los vientos alisios del noreste y la presencia de cadenas montañosas en la zona sur que detienen los vientos.

Idoneidad química para la recolección de agua lluvia para el uso por parte de la comunidad en la zona

La Guajira es uno de los territorios con mayor índice de escasez de agua (38), lo que obliga a la población que habita en las zonas rurales a la práctica del aprovechamiento de las aguas lluvias. Esta suele almacenarse para uso doméstico, para beber y preparar alimentos, y para uso agrícola.

Para la recolección del agua lluvia, que fue realizada a través de la escorrentía, algunos parámetros como pH, Cu o Cd (que fueron tenidos en cuenta en este estudio) se convierten en un problema importante (39). Los resultados indican que el agua de lluvia de la zona no se ajusta a las directrices de calidad de agua para consumo humano de la normativa nacional (40), pues el pH se encuentra por debajo del límite permisible (6,5-9,0) y el Cd supera el límite de 0,003 mg/L, valor que también es fijado por la Organización Mundial de la Salud (41). Por lo anterior, no se puede considerar como una fuente óptima de agua para uso doméstico.

Conclusiones

En promedio, el agua de lluvia es ligeramente ácida (pH = 5,89) lo que sugiere la presencia de especies ácidas o ligeramente ácidas. No se evidencia la presencia de Pb, pero las concentraciones de los metales traza Cu ($23,47 \pm 13,97 \mu\text{g/L}$), Cd ($4,72 \pm 3,29 \mu\text{g/L}$) y V ($11,25 \pm 6,75 \mu\text{g/L}$) son elevadas y se encuentran por encima del rango de concentración reportado para otros sitios de todo el mundo (42-47). Lo anterior indica que la actividad antropogénica es una de las principales fuentes responsables de la presencia de estos metales. Las concentraciones de Cd ($4,72 \pm 3,29 \mu\text{g/L}$) que se determinaron en las muestras de agua de lluvia fueron relativamente altas en comparación con las directrices de calidad del agua potable establecidas por los Ministerios de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, y de Salud de Colombia (40) y por la Organización Mundial de la Salud (41), por lo tanto se puede decir que el agua lluvia de la región no es óptima para consumo ni uso doméstico.

Tabla 3. Concentración media de elementos traza en precipitaciones en diferentes sitios del mundo

| Sitio | Cu ($\mu\text{g/L}$) | Cd ($\mu\text{g/L}$) | V ($\mu\text{g/L}$) | Referencia |
|-------------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|--------------|
| Zona minera de La Guajira, Colombia | 2,9-41,3 | 0,1-35,1 | 36,9-26,7 | Este estudio |
| Ahvaz, Irán | * | 0-1,97 | * | (42) |
| Washington, USA | * | 0,06-5,1 | * | (43) |
| Atenas, Grecia | * | 0,02-0,54 | * | (44) |
| Maracaibo, Venezuela | 59,9 | 17,2 | 3,0 | (45) |
| Paris, Francia | 7,2 | 0,26 | * | (46) |
| Lulea, Suecia | 255 | * | * | (47) |

*No hay reporte

Referencias

- Seinfeld, J.; Pandis, S. *Atmospheric Chemistry and Physics. From air pollution to climate change*. 2^{da} ed. Wiley – Interscience: USA, 2006.
- Ramírez, E.; R, Miranda.; Gracia, Y., Balderas, I. Chemical composition of rainwater in northeastern México. *Atmósfera*, **2010**, *23* (3), 213-224.
- Khemani, L.; Momin, T.; Naik, M.; Prakasa, R.; Kumar.; R, Ramana. Impact of alkaline particulates on pH of rainwater in India. *Water Air Soil Poll.* **1985**, *24*, 365-376. DOI: <http://doi.org/10.1007/BF00283789>.
- Samara, C.; Tsitouridou, R.; Balafoutis, Ch. Chemical composition of rain in Thessaloniki, Greece, in relation to meteorological conditions. *Atmos. Environ.* **1992**, *26* (3), 359-367. DOI: [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(92\)90011-g](https://doi.org/10.1016/0957-1272(92)90011-g).
- Wetang'ula, G.; Wamalwa, H. *Trace Elements in Rainfall Collected around Menengai Area Kenya*. Proceedings World Geothermal Congress: Melbourne, Australia, 2015: pp 19-25.
- Xu, Z. and Han, G.: Chemical and strontium isotope characterization of rainwater in Beijing, China. *Atmos. Environ.*, **2009**, *43*, 1954-1961. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.010>.
- Moaref, S.; Sekhavatjou, M.; Hosseini, A. Determination of Trace Elements Concentration in wet and dry Atmospheric Deposition and Surface soil in the Largest Industrial city, Southwest of Iran. *Int. J. Environ. Res.*, **2014**, *8* (2), 335-346.
- Montero, A. Evaluación de los métodos de biomonitorio con líquenes para estudiar el grado de contaminación atmosférica por elementos traza en La Habana. Tesis doctoral, Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, La Habana, 2014.
- Taghinia, A.; Basavarajappa, H.; Qaid Saeed, A. Heavy Metal Pollution in Kabini River Sediments. *Int. J. Environ. Res.*, **2010**, *4* (4), 629-636.
- De Miguel, E. Geoquímica urbana de elementos traza. Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 1995.
- Monhanraj, R.; Azeet, T. Heavy Metals in Airborne Particulate matter of Urban Coimbatore. *Arch Environ. Contam. Toxicol.* **2004**, *47*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-004-3054-9>.
- Ghose, M. Opencast coal mining in India: Assessing air pollutant emission rates Opencast coal mining in India. *Environ. Qual. Managem.* **2007**, *17*, 35-51. DOI: <https://doi.org/10.1002/tqem.20150>.
- Corpoguajira-Corporación Autónoma Regional de La Guajira. *Atlas Ambiental del Departamento de La Guajira*. Riohacha, 2012.
- Angulo, L.; Huertas, J.; Restrepo, G. Caracterización de Partículas Suspendidas (PST) y Partículas Respirables (PM10) producidas en Áreas de Explotación Carbonífera a Cielo Abierto. *Inf. Tecnol.* **2011**, *22*, 23-34. DOI: <https://doi.org/10.4067/s0718-07642011000400004>.
- Corpoguajira-Corporación Autónoma Regional de La Guajira. *Condiciones climáticas de La Guajira año 2013*. División de Control y Monitoreo Ambiental. Reporte Anual. Riohacha. 2014.
- Gualdrón, R. *Cerrejón: Hacia la rehabilitación de las tierras intervenidas por la minería a cielo abierto*. Panamericana Formas e Impresos. 2009. Bogotá
- Galloway, J.; Likens, G. Calibration of collection procedures for the determination of precipitation chemistry. *Water, Air Soil Poll.* **1976**, *6*, 241-258. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00182868>.
- Galloway, J.; Likens, G. The collection of precipitation for chemical analysis. *Tellus*. **1978**, *30*, 71-82. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1978.tb00819>.
- ADEGUA-Asociación para el Desarrollo Educativo Cultural del Pueblo Guajiro. Mi Guajira. *Revista ADEGUA*. **2000**, *1*, 7-12.
- AMBIENTEC. *Diseño de una red de monitoreo de recurso aire para los municipios y el corredor de transporte del carbón*. Riohacha. 1999.
- Dupre B.; Negrel, P.; Seimbille, F.; Allegre, C. Sr ratios variation during a rain event. *Atmos. Environ.* **1994**, *28*, 617-620. DOI: [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)90038-8](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)90038-8).
- American Public Health Association, *American Water Works Association Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22 ed. 2011. New York.
- Tuncel, S.; Ungor, S. Rainwater chemistry in Ankara, Turkey. *Atmos. Environ.* **1996**, *30*, 2721-2722. DOI: [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00434-3](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00434-3).
- Charlson, R.; Rodhe, H. Factors controlling the acidity of natural rain water. *Nature*. **1982**, *295*, 683-685. DOI: <https://doi.org/10.1038/295683a0>.
- Singh, A.; Mondal, G. Chemical characterization of wet precipitation events and deposition of pollutants in coal mining region, India. *J. Atmos. Chem.* **2008**, *59*, 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10874-007-9092-8>.
- Doménech, X. *Química Atmosférica. Origen y efectos de la contaminación*. Miraguano Ediciones: Madrid, 1995.
- Morales, J. Estudio sobre la composición química de las deposiciones atmosféricas en la cuenca del Lago de Maracaibo. Tesis doctoral. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Caracas, Caracas, 1992.
- Sánchez, L. Estudio sobre la remoción de contaminantes atmosféricos en el aire de la ciudad de Maracaibo. Tesis de Maestría. Posgrado en Química, Facultad Experimental de Ciencias, Universidad del Zulia, Maracaibo, 1998.
- Gratz, L.; Keeler, G.; Miller, E. Long-term relationships between mercury wet deposition and meteorology. *Atmos. Environ.*, **2009**, *43*, 6218-6229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.040>.
- Snoeyink, V.; Jenkins, D. *Química del agua*. Ed. Limusa: México, 2004.
- Orozco, C.; Pérez, A.; González, N., Rodríguez, F.; Alfayate, J. *Contaminación ambiental: una visión desde la química*. Ed. Thomson: España, 2003.
- Pirela, D. Composición elemental de las partículas suspendidas en la atmósfera de la región central de la Cuenca del Lago de Maracaibo. Tesis de Maestría. Facultad Experimental de Ciencias, Universidad del Zulia, Maracaibo, 1994.
- García, G. El Vanadio, un elemento ambiguo. *Acta Toxicol. Argent.* **2006**, *14* (2): 32-36.

34. Cornille, P.; Maenhaut, W.; Pacyna, J. Sources and characteristics of the atmospheric aerosol near Damascus, Syria. *Atmos. Environ.*, **1978**, *24A*, (5): 1083-1093. DOI: [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(90\)90075-x](https://doi.org/10.1016/0960-1686(90)90075-x).
35. Kowalczyk, G.; Choquette, C.; Gordon, G. Chemical element balances and identification of air pollution sources in Washington. D.C. *Atmos. Environ.*, **1978**, *12*, 1143-1153. DOI: [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(78\)90361-x](https://doi.org/10.1016/0004-6981(78)90361-x).
36. Saavedra, J. Desmetalización (DM) de crudo pesado por el proceso de flotación. Tesis de Maestría, Facultad Experimental de Ciencias, Universidad del Zulia, Maracaibo, 1998.
37. Mehlmann, Y.; Warneck, P.; Atmospheric gaseous HNO_3 Particulate nitrate and aerosol size distribution of major ionic species at a rural site in Western Germany. *Atmos. Environ.*, **1995**, *29*, 2359-2373. DOI: [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00056-5](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00056-5).
38. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. *Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia. Estudio Nacional del Agua Relaciones de demanda de agua y oferta hídrica*. Imprenta Nacional de Colombia: Bogotá, 2008.
39. World Health Organization. *Guidelines for drinking water quality*. Vol. 1. 3rd ed. Geneva, 2008.
40. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de la protección Social. *Resolución 2115: Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano*. Bogotá, 2007.
41. Organización Mundial de la Salud. *Guías para la calidad del agua potable*. Vol. 1. 3^{ra} ed. Suiza, 2008.
42. Moaref, S.; Sekhavatjou, M.; Hosseini, A. Determination of Trace Elements Concentration in wet and dry Atmospheric Deposition and Surface soil in the Largest Industrial city, Southwest of Iran. *Int. J. Environ. Res.*, **2014**, *8* (2):335-346.
43. Melaku, S.; Morris, V.; Raghavan, D.; Hosten, C. Seasonal variation of heavy metals in ambient air and precipitation at a single site in Washington, DC. *Environ. Pollut.*, **2008**, *155*, 88-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.10.038>.
44. Kanellopoulou, E. Determination of heavy metal in wet deposition of Athens. *Global NEST Journal*. **2001**. *3* (1), 45-50.
45. Medina, B. Evaluación físico-química del agua lluvia como indicador de contaminación atmosférica en algunas zonas de la ciudad de Maracaibo. Tesis de Maestría, Facultad Experimental de Ciencias, Universidad del Zulia, Maracaibo, 1990.
46. Garnaud, S.; Mouchel, J.; Chebbo, G.; Thévenot, D. Heavy metal concentrations in dry and wet atmospheric deposits in Paris district: Comparison with urban runoff. *Sci. Total Environ.* **1999**, *235* (1-5): 235-245. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00199-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00199-0).
47. Viklander, M. Substances in Urban Snow. A comparison of the contamination of snow in different parts of the city of Lulea, Sweden. *Water Air Soil Poll.* **1999**, *114* (3): 377-394. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1005121116829>.

Article citation:

Doria-Argumedo, C. Metales pesados (Cd, Cu, V, Pb) en agua lluvia de la zona de mayor influencia de la mina de carbón en La Guajira, Colombia *Rev. Colomb. Quim.* **2017**, *46* (2), 37-44. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v46n2.60533>