

Artículo de investigación

Caracterización fisicoquímica de las precipitaciones en el área de influencia del Parque Arqueológico de San Agustín, departamento de Huila, Colombia

Physicochemical characterization of rainfall in the area of influence of the San Agustín Archaeological Park, Huila department, Colombia

Carlos Alberto Urango Rivero

<https://orcid.org/0000-0001-8358-1610>

Universidad Surcolombiana, Neiva-Colombia

E-mail: car_urango@hotmail.com

José Joaquín Pinedo Hernández

<https://orcid.org/0000-0002-4288-1788>

Universidad de Córdoba, Córdoba-Colombia

E-mail: jjoaquinpinedo@unicordoba.edu.co

Gabriel Herrera Torres

Universidad de la Salle, Bogotá-Colombia

E-mail: gherrera1954@gmail.com

Luz Botero Roja

Universidad Surcolombiana, Neiva-Colombia

E-mail: luzmarina.botero@usco.edu.co

Angela Aparicio Lozano

Universidad de Córdoba, Córdoba-Colombia

E-mail: angelaaparicio@correo.unicordoba.edu.co

Fecha de recepción: 1 de febrero del 2022

Fecha de aprobación: 15 de abril del 2022

DOI: 10.25054/22161325.3034

Resumen

En este proyecto se evaluó la caracterización fisicoquímica de las precipitaciones, relación con fuentes antrópicas y el efecto posible sobre los monumentos históricos en el área de influencia del parque arqueológico San Agustín ubicado en el departamento del Huila, Colombia. Se determinaron los parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad, nitratos, sulfatos, acidez y temperatura, en cuatro puntos de muestreo (mesita A, B, C, D). Se realizaron análisis de correlación de Pearson, de componentes principales (ACP) y cluster (CA) para verificar relaciones significativas entre los parámetros en las muestras de agua lluvia y el origen común entre parámetros. Las variables conductividad,

acidez y sulfatos presentan diferencias estadísticamente significativas en función del tiempo. El análisis estadístico multivariado sugiere que las variaciones de los parámetros fisicoquímicos provienen generalmente de fuentes antropogénicas mixtas, industria de fabricación de ladrillos – agroindustria de la panela. La composición de la piedra volcánica de la estatuaria rico en compuestos de calcita influye en los procesos de deterioro causados por precipitaciones. Los resultados de este proyecto permiten presentar un diagnóstico comparativo en cuatro puntos de muestreo de la zona de estudio, evaluar el nivel de impacto que están soportando los monumentos por la acción de las precipitaciones, siendo útil para seguir desarrollando estrategias de mitigación ambiental; respondiendo a la necesidad en el manejo y conservación de los recursos. Asimismo, permiten obtener un mejor conocimiento de la dinámica de los parámetros fisicoquímicos y su relación con las diferentes fuentes antropogénicas aledañas.

Palabras clave: Precipitaciones; San Agustín; Parque Arqueológico; Estatuaria, Parámetros fisicoquímicos.

Abstract

In this project, the physicochemical characterization of rainfall and its effect on historical monuments in the area of influence of the San Agustín archaeological park located in the department of Huila, Colombia, was evaluated. Physicochemical parameters were determined: pH, conductivity, nitrates, sulfates, acidity and temperature, four sampling points (mesita A, B, C and D). Pearson's, principal components (PCA) and cluster (CA) correlation analysis were performed to verify significant relationships between the parameters measured in the rainwater samples and their possible common origin. The variables conductivity, acidity and sulfates show statistically significant differences as a function of time. The multivariate statistical analysis suggests that the variations of the physicochemical parameters generally come from mixed anthropogenic sources, brick manufacturing industry - panela agroindustry. The composition of the volcanic stone of statuary, rich in calcite compounds, influences the deterioration processes caused by precipitation. The results of this project allow presenting a comparative diagnosis at four sampling points in the study area, evaluating the level of impact that the monuments are bearing due to the action of precipitation, being useful to continue developing environmental mitigation strategies: responding to the need of the management and conservation of resources. Likewise, they allow obtaining a better understanding of the dynamics of the physicochemical parameters and their relationship with the different surrounding anthropogenic sources.

Keywords: Precipitation; San Agustín; Archaeological Park; Statuary; Physico-chemical Parameters.

1. Introducción

Monumentos y esculturas son testimonios de la historia y pertenecen a nuestro patrimonio cultural; fueron construidos para desafiar el tiempo, no obstante, la degradación progresiva asociada a la problemática ambiental por diferentes fuentes antrópicas genera pérdida irreparable (Eyssautier-Chuine, *et al.*, 2016). La decadencia no se puede evitar, pero se puede limitar. El Parque Arqueológico de San Agustín considerado uno de los sitios de gran interés a nivel nacional e internacional no es ajeno a esta problemática, más aún cuando ha sido declarado Patrimonio Nacional de la Humanidad en 1993 por el Consejo de Monumentos Nacionales. Además, testimonio único y excepcional de una civilización desaparecida en 1995 por la UNESCO; ingresando a la lista mundial de patrimonios donde el control y manejo se debe realizar acorde a las normas constituidas por la Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural (Ruiz, 2018).

En las cercanías del parque San Agustín se encuentran localizadas fuentes antrópicas de contaminación atmosférica como la industria ladrillera y panelera, rellenos sanitarios de los municipios vecinos y el parque automotor que circula por vías aledañas, que ha tenido un gran crecimiento en estos últimos años debido al gran interés turístico y de tránsito para los departamentos del centro y sur oriente del país. Estas fuentes antrópicas de contaminación con el pasar del tiempo puede llegar a generar precipitaciones de carácter ácido, las cuales pueden causar deterioro en los monumentos históricos del parque como se ha reportado en otros países (Bravo *et al.*, 2000) y a nivel nacional en la región de la

Candelaria en la capital del país (Caucalí & Ibarra, 2008), donde contaminantes atmosféricos como dióxido de carbono (CO₂), dióxido nitrógeno (NO₂) y azufre (SO₂) generan acidez en las precipitaciones húmedas. Lo anterior demuestra que se deben emplear estrategias de conservación, mantenimiento y restauración para el Parque Arqueológico San Agustín. Dentro de estas, estrategias desde un punto de vista ambiental; como, por ejemplo: caracterización fisicoquímica de las precipitaciones y su relación con fuentes antrópicas (caso estudio), evaluación sistemática de pérdida en peso con aumento de la concentración de Ca en el agua de escorrentía por efecto precipitaciones y/o predicción de la pérdida de material de acuerdo con los parámetros químicos. Así como modelos de dispersión de contaminantes desde las fuentes antropogénicas reportados en otros países para la protección de monumentos históricos (Cardell, *et al.*, 2002; Holynska, *et al.*, 2004; Bonazza, *et al.*, 2009; Thornbush & Viles, 2007; Franzoni & Sassoni, 2011, Garcia, *et al.*, 2013; Livingston, *et al.*, 2016; Comité, *et al.*, 2017). Entre otros estudios científicos que permiten tomar decisiones a priori a los entes gubernamentales encargados para establecer mecanismos de restauración, preservación y conservación de la estatuaría permitiendo así la interacción de la parte académica - científica con el entorno social, cultural e histórico. En consecuencia, el objetivo de este estudio fue la caracterización fisicoquímica de las precipitaciones en el área de influencia en el Parque Arqueológico San Agustín, su relación con las fuentes antropogénicas y sus posibles efectos en la estatuaría.

2. Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio es uno de los espacios arqueológicos más importantes de Colombia; el Parque Arqueológico San Agustín ubicado al sur departamento del Huila, exactamente en el municipio de San Agustín y en la cuenca alta del río Magdalena, coordenadas geográficas 1°55'00,0" 76°14'40,2", altura de 1.730 msnm y temperatura de 18°C (Figura 1). Conformado por cuatro mesitas (A, B, C, D), tres predios, el denominado bosque de las estatuas y un museo arqueológico (ICANH, 2011). El Parque Arqueológico San Agustín hace parte del recuento histórico de nuestra humanidad donde lo místico, la grandeza de la naturaleza y el ser humano han generado un legado ancestral de civilizaciones precolombinas que nunca se debe extinguir a pesar de las inclemencias del clima (variabilidad climática) y la influencia de fuentes antrópicas de contaminación aledañas, como por ejemplo: las ladrilleras ubicadas hacia el norte en el corregimiento de Criollo a 18 kilómetros del Parque Arqueológico de San Agustín y que generan contaminación debido a la quema de leña, llantas, madera, plásticos o textiles, entre otros para su proceso; generando gases como monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y partículas sólidas (Alarcon & Burgos, 2015), la agroindustria de la panela ubicadas hacia el sur respecto al parque arqueológico donde la combustión de productos derivados del petróleo genera problemas de contaminación (Murcia, 2012) y parque automotor de gran influencia por el turismo que puede promover agentes contaminantes como (NO_x), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) (Tovar & Orjuela, 2017).

2.2 Recolección y análisis de muestras

Se realizó un muestreo de precipitaciones (agua lluvia) en el año 2017 entre los meses de Febrero y Mayo, considerando las diferentes mesitas (A, B, C y D) dentro del parque arqueológico (Figura 1). Para la ubicación de las estaciones de muestreos previamente fue solicitado permiso ante el ICANH (Instituto Colombiano de Antropología e Historia), con sede en la ciudad de Bogotá; entidad encargada de avalar todos los proyectos de investigación concernientes al parque arqueológico de San Agustín. La recolección de las muestras de precipitación se realizó mediante pluviómetros convencionales equipado con recipientes plásticos de capacidad 500 mL; obteniendo una única muestra compuesta en cada estación y representativa en función del nivel de precipitación. Las muestras fueron transportadas al laboratorio en recipientes de polietileno previamente rotuladas, hasta su posterior análisis. La caracterización fisicoquímica de muestras de agua lluvia se realizó mediante el análisis de los parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad, Nitratos, sulfatos, Acidez), acorde a métodos normalizados (APHA, 2012).

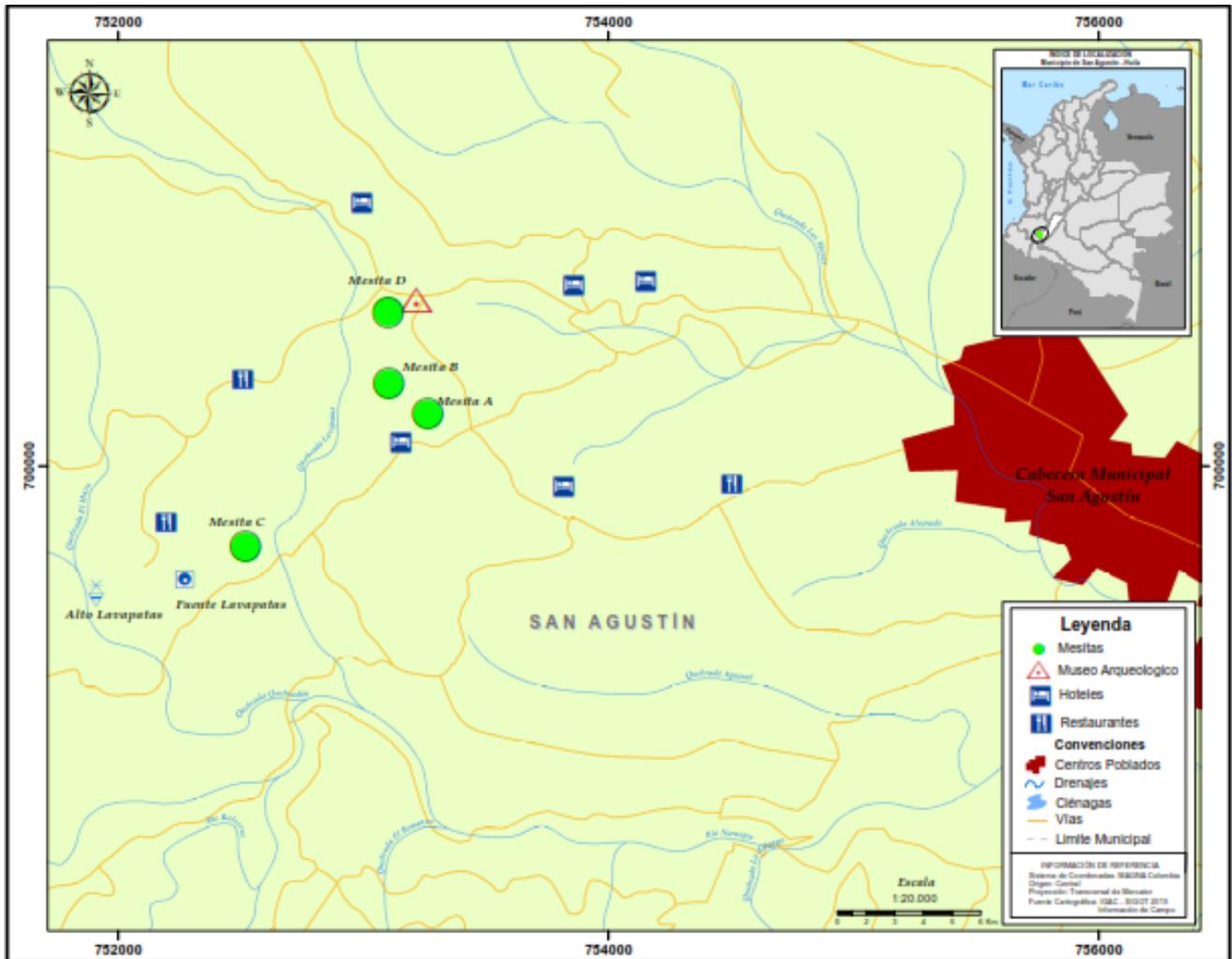


Figura 1. Ubicación de puntos de muestreo en el parque arqueológico San Agustín, Colombia.

2.3 Análisis estadístico

Los resultados se muestran como la media \pm la desviación estándar para $n=3$. Se utilizó una prueba t Student para evaluar si existían diferencias significativas entre las concentraciones promedio de parámetros fisicoquímicos y entre las estaciones de muestreo. El análisis de correlación de Pearson, componentes principales (PCA) y cluster (CA) se utilizaron para verificar las relaciones significativas entre los parámetros fisicoquímicos en las muestras de agua lluvia y el origen común entre los parámetros. El criterio de significancia fue $p<0.05$. El análisis estadístico se realizó con el software estadístico SPSS v23.0.0.0.

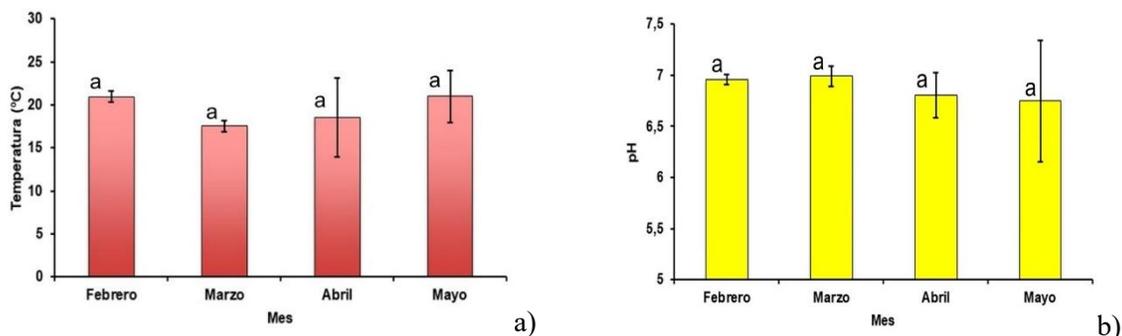
3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización fisicoquímica

La variación de los parámetros fisicoquímicos en función del tiempo se indica en la figura 2. Las variables conductividad, acidez y sulfatos presentan diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes meses donde se evaluó las precipitaciones ($P<0.05$); debido posiblemente a las diferentes actividades antropogénicas aledañas al parque arqueológico de San Agustín que pueden generar problemáticas de contaminación atmosférica y llegar afectar

las características fisicoquímicas de las precipitaciones. El mes de febrero presentó el valor más alto de acidez con diferencia estadísticamente significativa con respecto a los otros meses. Cabe resaltar, en este mes se presenta época seca donde la precipitación no es frecuente y acorde a Sanchez *et al.* (2001) en esta época el contenido de sulfatos y nitratos son precursores de los incrementos de la acidez. Sin embargo, el pH, la concentración de sulfatos y nitratos para este mes no fueron superiores a otros meses, asociado posiblemente al carácter básico de material particulado (polvo atmosférico) que se puede presentar (Mphepya, *et al.*, 2004). Razón por lo cual la acidez se debe posiblemente a concentraciones de iones carbonatos y bicarbonatos de calcio, atribuido posiblemente al aporte de emisiones CO₂ a partir del parque automotor. Lo anterior corroborado con la no correlación de la acidez con las concentraciones de iones SO₄²⁻ y NO₃⁻ (Tabla 2). Los valores de pH oscilaron entre 6.58 a 7.16 indicando que las precipitaciones se clasifican como lluvia no ácida (pH>5.6). La concentración de iones SO₄²⁻ presentó un comportamiento similar al NO₃⁻, donde las mayores concentraciones se registraron en el periodo húmedo (Abril), debido posiblemente a las condiciones climatológicas del periodo seco, tales como bajos niveles de precipitación, vientos ligeros y atmósferas secas favorecieron la concentración de contaminantes, que fueron depositados por precipitaciones a partir del mes de abril, considerado por las estadísticas regionales como el segundo mes del año con mayor precipitación en el área de estudio (Tovar y Orjuela, 2017). Sin embargo, la concentración de iones SO₄²⁻ en el mes de Mayo disminuye, asociado posiblemente a la disminución de la fotodisociación coligado a la humedad e intensidad de las precipitaciones que generan un lavado de contaminantes en la atmósfera (Comité, *et al.*, 2017). Lo anterior indica, bajas temperaturas y pocas horas de insolación en la época húmeda pueden influir en que los contaminantes presentan mayor acumulación en la atmósfera y por lo tanto las mayores concentraciones de los contaminantes citados (Livingston, 2016). Además, el análisis integrado de la rosa, dirección y velocidad de los vientos (Figura 3), indica que el 80% del tiempo las velocidades fueron bajas (0.1-1.5 m/s), favoreciendo que los contaminantes que se emiten a partir de las fuentes antrópicas (industrial, agroindustrial, transporte automotriz) no se dispersen a grandes longitudes desde su lugar de origen.

La concentración promedio de los parámetros fisicoquímicos se muestra en la tabla 3. Las estaciones C y D presentaron resultados superiores de sulfatos, nitratos, acidez y conductividad con diferencia estadísticamente significativa respecto a las otras estaciones de muestreo. Al comparar los resultados respecto a los valores de referencia del IDEAM, se encuentra que las precipitaciones se pueden clasificar como lluvia no ácida en función del parámetro conductividad (<20 µs/cm) y pH (>5.6), zona de contaminación alta por sulfatos (SO₄²⁻; 3 – 8 mg/L) y baja por nitratos (NO₃⁻; 0.4 – 1.3 mg/L). Resultados similares fueron obtenidos por Angel y Aparicio (2015) en el parque natural Chicaque donde el pH y la conductividad se encontraron por debajo de los límites permisibles por IDEAM, Caucaí & Ibarra (2008) en el sector histórico de la candelaria-Bogotá donde los parámetros como pH, nitratos y sulfatos superó los valores de referencia IDEAM; sin embargo, no generan un efecto negativo mediante acción química en los monumentos sino que se encuentran expuestos en mayor medida a procesos mecánicos, lo cual se podría llegar a presentar en el Parque San Agustín.



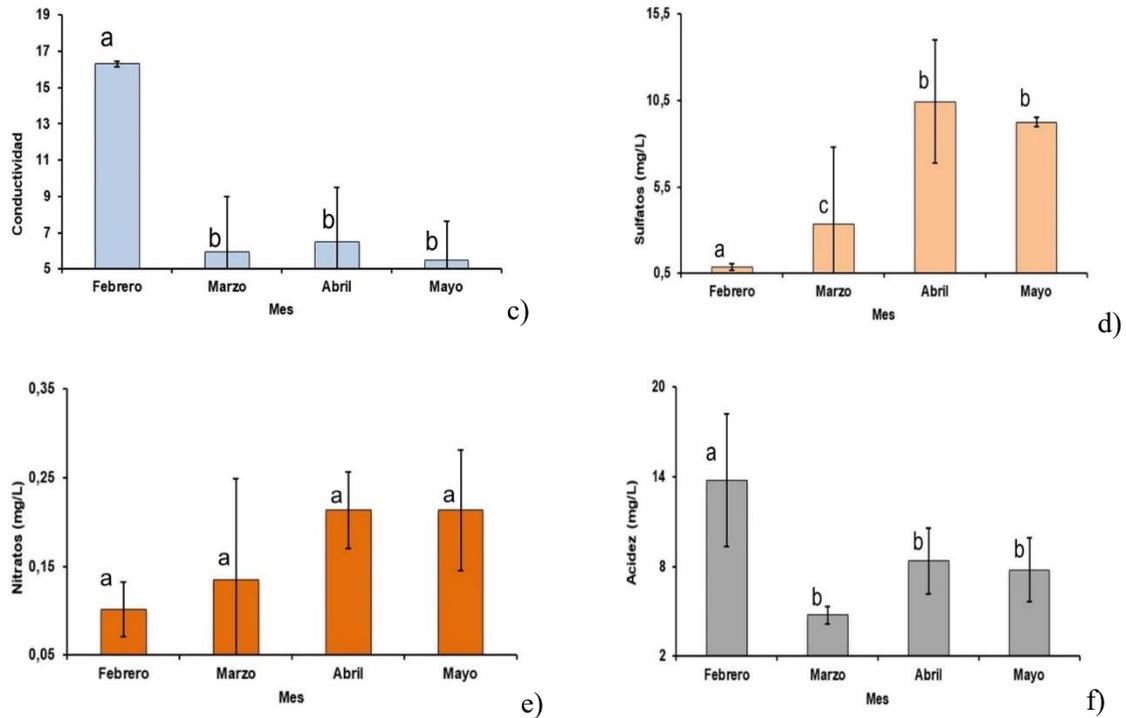


Figura 2. Parámetros fisicoquímicos en función del tiempo. a) Temperatura, b) pH, c) Conductividad, d) sulfatos (SO_4^{2-}), e) nitratos (NO_3^-), f) Acidez.

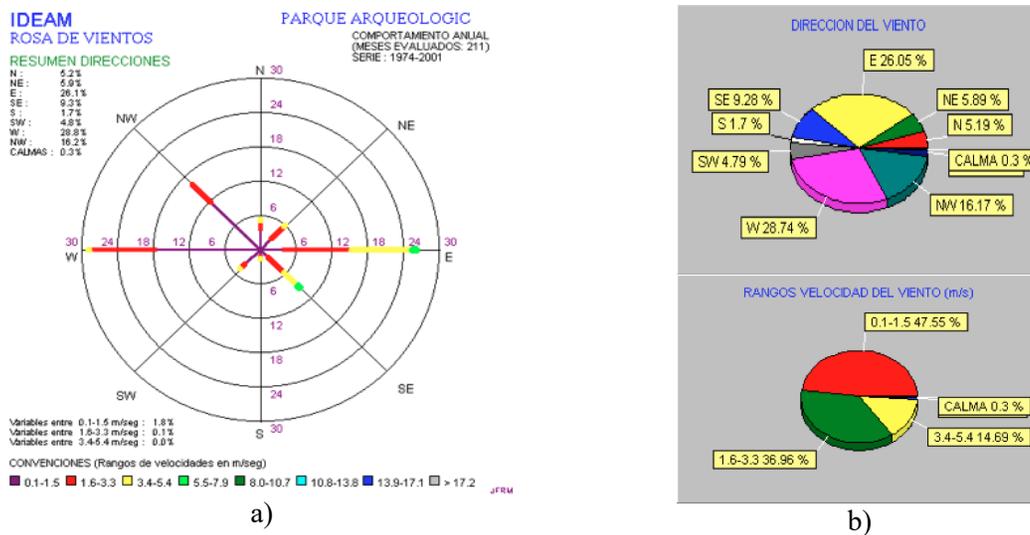


Figura 3. a) Rosa de vientos (1974-2001; IDEAM, 2017), b) Dirección y velocidad del viento. Comportamiento climatológico acorde al análisis de información de las estaciones meteorológicas Betania TV - 21010230 y 21015030 ubicadas dentro del parque San Agustín. Tomada de Tovar y Orjuela, 2017.

Tabla 2. Análisis de correlación de pearson – Parámetros fisicoquímicos.

	Acidez	Conductividad	NO ₃ ⁻	pH	SO ₄ ²⁻	Temperatura
Acidez	1	0.693*	0.061	-0.295	-0.282	0.157
Conductividad		1	-0.258	0.294	-0.406	0.416
NO ₃ ⁻			1	-0.315	0.187	-0.259
pH				1	-0.203	0.355
SO ₄ ²⁻					1	0.214
Temperatura						1

*Correlación estadísticamente significativa

Tabla 3. Promedio de parámetros fisicoquímicos por estación de muestreo.

Estación	Temperatura	pH	Conductividad	Sulfatos	Nitratos	Acidez
A	19.1 ^{a*}	7.2 ^a	7.6 ^a	5.83 ^a	0.144 ^a	7.25 ^a
B	19.2 ^a	6.8 ^a	7.3 ^a	6.00 ^a	0.136 ^a	6.50 ^a
C	19.4 ^a	6.6 ^a	11.3 ^b	8.50 ^b	0.188 ^b	9.79 ^b
D	19.6 ^a	6.5 ^a	11.2 ^b	8.10 ^b	0.193 ^b	9.18 ^b

^{a*} letras diferentes indican diferencia estadísticamente significativa

Para identificar y analizar las fuentes de origen posibles de los contaminantes asociados, se aplicó PCA. El cual reduce el tamaño de los datos al extraer un pequeño número de factores (Componentes principales, PC) para explorar la similitud del comportamiento de distribución entre parámetros y analizar las relaciones entre las variables observadas (Ma, *et al.*, 2015). Los resultados de PCA se muestran en la tabla 4. El método PCA conduce a una reducción de la dimensión inicial del conjunto de datos a tres componentes que explica el 83.34 % de la variación de datos. El primer componente principal (PC₁), con altas cargas de conductividad y acidez; explicó 38.45% de la varianza total. PC₁ podría explicarse como una fuente antropogénica compuesta (industria de fabricación del ladrillo – agroindustria de la panela) ya que estas generan gases contaminantes como óxidos de nitrógeno y azufre que podrían influir en forma significativa en la conductividad y acidez (Murcia, 2012; Alarcon & Burgos, 2015; Tovar & Orjuela, 2017). Sin embargo, la correlación altamente significativa entre las variables conductividad y acidez (Tabla 2) y la no correlación con SO₄²⁻ y NO₃⁻, indican posiblemente otras fuente de contaminación, coligado posiblemente a las emisiones de CO₂ por parte del parque automotor o quema de biomasa que podrían llegar a influir en la zona del parque San Agustín por precipitaciones húmedas originando la formación iones carbonatos y bicarbonatos que influyen en las características de acidez producto de la reacción CO₂ + H₂O = H₂CO₃; además, material particulado cargado con iones carbonatos o alta concentración de carbonatos (principalmente de Ca y Mg) que contribuyen a neutralizar la acidez del agua lluvia e incrementan la conductividad (Herut, *et al.*, 2000). Sin embargo, para corroborar esta hipótesis se debe realizar estudios de concentración de iones carbonatos y bicarbonatos y correlacionar con los parámetros de acidez y conductividad. PC₂ representa 25.83 % de la variabilidad total de los datos, atribuido a pH como variable representativa; mientras que PC₃ representa el 19.06%, atribuido a iones SO₄²⁻ y temperatura. Aunque los valores de pH no indican características de lluvia ácida que podrían ser atribuibles a concentraciones de agentes secundarios en función de las reacciones de agentes primarios como óxidos de nitrógeno y azufre; el pH puede estar asociado posiblemente a la influencia de los iones carbonatos y bicarbonatos por emisiones de CO₂ con lo cual los valores de pH se mantienen superiores a pH > 5.6 unidades. Cabe resaltar que el SO₄ es moderadamente compartido por PC₂ y PC₃, lo que sugiere que su fuente probable puede ser de naturaleza diversa (agroindustria de la panela y fabricación de ladrillos) en las cuales se puede presentar emisión de SO₂ con posterior transformación a iones sulfatos (Murcia, 2012; Alarcon y Burgos, 2015).

Se realizó un análisis de cluster jerárquico en función de la información evaluada de PCA (Figura 4a). Se distingue un grupo I compuesto por conductividad y acidez, correlacionado con PC₁. Por lo tanto, el grupo I se encuentra asociado con fuentes antropogénicas con emisiones de CO₂. El segundo grupo está compuesto por pH acorde a PC₂.

pH no presentan correlación estadísticamente significativa con otro parámetro por lo que no se generan a partir de fuentes similares. Sin embargo, pH probablemente esté asociado a las emisiones de gases de óxidos de azufre y CO₂ a partir de la quema de biomasa desarrolladas en la fabricación de ladrillos y agroindustria de panela; así como para el grupo III y IV donde posiblemente este coligada a la emisión, transporte y dispersión de SO_x y NO_x producto de emisión de las dos fuentes antrópicas anteriormente mencionadas ubicadas al noreste y sureste del área estudiada, correlacionado por información de la dirección y velocidad del viento que muestran la influencia de esta fuentes hacia el área de estudio. Finalmente, los puntos de muestreo se analizaron mediante métodos de agrupación (Figura 4b). Los sitios de muestreo podrían agruparse en dos grupos, grupo 1 con 2 estaciones, que representan 50%; ubicadas hacia interior del parque (A y B). Grupo 2 con 2 estaciones, ubicadas hacia las afueras del parque (D y C) curiosamente ubicada frente al sector de las ladrilleras (norte) y la agroindustria de la panela (sur), donde se presentaron la mayor concentración de SO₄, NO₃ y acidez.

Tabla 4. Carga de los factores rotados del modelo de tres componentes

Párametro	PC ₁	PC ₂	PC ₃
Acidez	0.385	-0.552	0.316
Conductividad	0.630	-0.155	0.074
NO ₃	-0.312	-0.389	0.193
pH	0.290	0.584	-0.194
SO ₄	-0.420	0.220	0.617
T	0.312	0.360	0.662
Valores propios	2.30	1.55	1.14
% varianza	38.45	25.83	19.06
% acumulativo	38.45	64.28	83.34

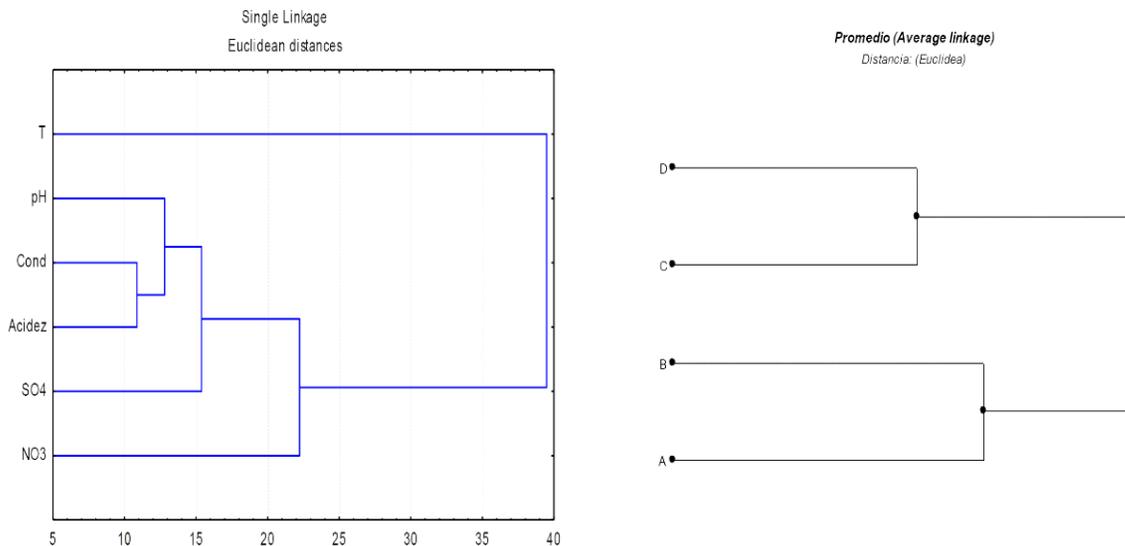


Figura 4. Dendrograma obtenido por análisis de agrupamiento jerárquico para parámetros fisicoquímicos (a) y sitios de muestreo (b).

3.2 Deterioro estatuario

Aunque se han utilizado diferentes tipos de piedra para la escultura, los más vulnerables a los posibles daños causados por la lluvia ácida son el mármol y la piedra caliza; compuestos principalmente de CaCO₃ (Steiger, 2015). Otros tipos de piedra que están compuestos de minerales de silicato como el granito o la arenisca son intrínsecamente más resistentes al ataque de ácido (Ford & Williams, 2007). En el parque arqueológico San Agustín la composición de la estatuaria corresponde a piedra volcánica, el cual es un material rico en compuestos de calcita. Razón por lo

cual la exposición, debido a procesos de deposición seca y húmeda pueden influir en el deterioro de la estatuaria. La tasa de erosión total de un material expuesto al ambiente exterior consta de dos componentes: disolución química y desintegración granular. La última consiste en la pérdida de granos sólidos del material debido a las fuerzas mecánicas de la gravedad, el viento, los ciclos térmicos, etc, lo cual podría estar presentándose en la estatuaria del parque en función del tiempo y características meteorológicas (Mossotti, *et al.*, 2001); mientras que la disolución química podría estar asociada al almacenamiento o depósito de gases de carácter ácido que contribuyen al desgaste de las rocas ricas en carbonatos en la superficie. Además, material particulado emitido por las distintas fuentes antrópicas que a través del tiempo puede llegar a producir ennegrecimiento de la superficie, como se muestra en la figura 5c respecto a la figura 5b.

La estatuaria del parque San Agustín evidencia en la superficie rugosidad y porosidad (Figura 5a). Donde la deposición seca del SO₂ y NO_x gaseoso, procedente fundamentalmente de las actividades antropogénicas desarrolladas en zonas cercanas al parque y su subsecuente oxidación son agentes de deterioro muy importante que pueden afectar a largo plazo la estatuaria (Grossi & Brimblecombe, 2004) (Figura 5 b-c). Sin embargo, la humedad higroscópica del material parental de la estatuaria, asociada a la superficie específica y tamaño de poro juegan un papel primordial en la capacidad de absorción de los contaminantes (Livingston, 2016). Por lo cual se debe realizar monitoreo continuo de las variables anteriormente mencionadas para conocer el efecto de fuerzas mecánicas.

La disolución química a menudo facilita la desintegración granular al atacar las fases de unión intergranular que mantienen unidos los granos (Comité, *et al.*, 2017). La deposición húmeda, o lluvia ácida, se considera el precursor fundamental de este proceso y se define como la presencia de acidez en el agua de lluvia en exceso de los ácidos naturales como resultado de las actividades humanas. Cabe resaltar que los resultados de pH en la zona de estudio indican lluvia no ácida. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la contribución antropogénica consiste principalmente de ácido sulfúrico y nítrico procedente de las reacciones de oxidación gases de azufre y nitrógeno de las diferentes fuentes antropogénicas aledañas al parque arqueológico. El contacto de tal solución con piedra de carbonato neutraliza esta acidez a través de la reacción Ecuación 1:



Lo mismo sería válido para el NO₃, o cualquier otro anión ácido presente (Comité, *et al.*, 2017). Dado que esta reacción implica solo la disolución de una sal neutra, no produce cambio en el pH y las concentraciones de las especies de carbonato, por lo cual se presenta ganancia neta en la concentración de SO₄ y disolución del carbonato (Livingston, 2016). Lo anterior indica que la estatuaria del parque San Agustín se encuentra expuesta a estos procesos en función del tiempo por lo cual se puede presentar deterioro de las características físicas (Figura 5 b-c), por lo que se deben realizar estudios más a fondo respecto a este tipo de procesos. Cabe resaltar, que incluso en ausencia de cualquier acidez antropogénica, la piedra con iones carbonato se disolverá en el agua de lluvia, ya que la calcita tiene una ligera solubilidad en agua pura, que en teoría es de 11 mg/L a 25°C. Esto se incrementa en presencia de dióxido de carbono atmosférico y la presión atmosférica de CO₂ de 101.5 Pa (10 -3.5 bar), alcanza 43 mg/L (Butler, 1982) que para el caso de estudio podría ser el componente principal de la acidez del agua lluvia. Esta leve cantidad de disolución se vuelve muy significativa a lo largo de los periodos geológicos (disolución natural) y recibe el nombre de efecto karst. Finalmente, para comprender la falta de correlación entre las variables fisicoquímicas de la lluvia y los efectos sobre la estatuaria del parque San Agustín se debería utilizar un enfoque (escorrentía frente a lluvia y deposición seca) en la estatuaria para conocer el balance de masa frente a estos tres fenómenos y así establecer cuál es el de mayor contribución en el deterioro. Cabe resaltar que la estatuaria no es la única en recibir efectos negativos por la lluvia o precipitaciones en función del tiempo; la vegetación puede estar expuesta a enfermedades o plagas producto de la translucidez de las hojas por la pérdida del revestimiento ceroso en ellas (Angel & Aparicio, 2015). Además, el suelo podría perder elementos primordiales como potasio, magnesio y calcio; generando efectos crónicos que por tratarse de una zona de gran extensión territorial serían difíciles de controlar o proteger.



Figura 5. Deterioro estatuario en el parque San Agustín.

4. Conclusiones

Las concentraciones de parámetros fisicoquímicos en las muestras de precipitaciones mostraron variabilidad espacial, siendo más alta en zonas que reciben cargas de contaminantes desde fuentes antropogénica más cercanas. El deterioro antropogénico de la estatuaria no solo se puede presentar por fuentes de contaminación que pueden causar variación en la acidez; puede depender de muchas variables e ir de leve a grave, o evidenciarse o no de forma inmediata.

El análisis estadístico multivariado (análisis de componentes principales y correlación de Pearson) reveló el origen mixto de parámetros fisicoquímico en base a las fuentes antropogénicas. En general, pH probablemente esté asociado a las emisiones de gases de óxidos de azufre y CO_2 a partir de la quema de biomasa y parque automotor. La conductividad, acidez, SO_4 y NO_3 producidas por la industria panelera y ladrilleras localizados al noreste y sureste del parque arqueológico San Agustín.

En términos generales, existen acciones establecidas de conservación preventiva y la restauración basada en la Política Pública del Patrimonio Cultural de mueble en Colombia (2013). Sin embargo, para cumplir a cabalidad y poder mantener el regalo histórico de nuestros ancestros debe existir interrelación entre diferentes disciplinas (política, social, científica, académica, etc...) que permitan implementar estrategias y tomar decisiones a los entes gubernamentales para la preservación y conservación de la estatuaria del parque San Agustín.

5. Referencias Bibliográficas

Alarcon, S., Burgos, F. (2015). Plan manejo ambiental para la ladrillera el Santuario. Bogotá: Universidad Distrital. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/3484/PLAN%20DE%20MANEJO%20AMBIENTAL%20PARA%20LA%20LADRILLERA%20EL%20SANTUARIO.pdf?sequence=1>

Angel, M., Aparicio M., 2015. Determinación de comportamiento ácido en las precipitaciones del parque natural Chicaque y su posible afectación a la vegetación. Facultad De Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás. Retrieved from <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/340>

APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 25th ed. Washington, DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation; 2012.

- Bonazza, A., Messina, P., Sabbioni, C., Grossi, C.M., Brimblecombe, P., 2009. Mapping the impact of climate change on surface recession of carbonate buildings in Europe. *Sci Total Environ* 407(6):2039–2050. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.10.067
- Bravo, A.H., Soto, A.R., Torres, J.R., Sanchez, A.P., 2000. Effects of wet acidic deposition on carbonate stone from Maya Monuments, Mexico (paper # 939). *Air & Waste Management. A & WMA '93rd. Annual Conference & Exhibition Proceedings (CD-ROM)*.
- Butler, J., 1982. *Carbon Dioxide Equilibria and Their Applications*. Addison-Wesley, Reading MA.
- Caucalí, C., Ibarra, N. 2008. Diagnóstico de lluvia ácida en el sector histórico de la Candelaria Bogotá D,C y sus efectos sobre la fachada de la catedral primada de Colombia. Universidad de La Salle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/660
- Cardell-Fernandez, C., Vleugels, G., Torfs, K., Van Grieken, R., 2002. The processes dominating Ca dissolution of limestone when exposed to ambient atmospheric conditions as determined by comparing dissolution models. *Environ Geol* 43(1–2):160–171. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0640-x>
- Eyssautier-Chuine, S., Marin, B., Thomachot-Schneider, C., Fronteau, G., Schneider, A., Gibeaux, S., Vazquez, P., 2016. Simulation of acid rain weathering effect on natural and artificial carbonate stones. *Environ Earth Sci* 75:748. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5555-z>
- Ford, D., Williams, P.D., 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Revised Edition. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK. DOI:10.1002/9781118684986
- Franzoni, E, Sassoni, E., 2011. Correlation between microstructural characteristics and weight loss of natural stones exposed to simulated acid rain. *Sci Total Environ* 412:278–285. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.080>
- Garcia-Guinea, J., Benavente, D., Sanchez-Moral, S., Recio-Vazquez, L., Correcher, V., Almendros, G., Perez-Garcia, A., Fernandez-Cortes, A., 2013. Petrophysical properties, composition and deterioration of the Calatorao biogenic stone: case of the sculptures masonry of the Valley of the Fallen (Madrid, Spain). *Environ Earth Sci* 69:1733–1750. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2007-2>
- Grossi, C.M., Brimblecombe, P., 2004. Aesthetics of simulated soiling patterns on architecture, *Environ. Sci. Technol* 38: 3971–3976. <https://doi.org/10.1021/es0353762>
- Herut, B., Starinsky, A., Katz, A., Rosenfeld, D., 2000. Relationship between the acidity and chemical composition of rainwater and climatological conditions along a transition zone between large deserts and Mediterranean climate, Israel. *Atmospheric Environment* 34 (8): 1281-1292. DOI: 10.1016/S1352-2310(99)00291-5
- Holynska, B., Gilewicz-Wolter, J., Ostachowicz, B., Bielewski, M., Strela, C., Wobrauschek, P., 2004. Study of the deterioration of sandstone due to acid rain and humid SO₄ gas. *X-Ray Spectrom* 33(5):342–348. DOI: 10.1002/xrs.723
- ICANH. (2011). *Parque Arqueológico Nacional de San Agustín*. San Agustín: Instituto Colombiano de Antropología e Historia.
- IDEAM. (2017). *Boletín informativo sobre el monitoreo de los fenómenos de variabilidad climática "Niño" y "Niña"*. Colombia.

Livingston R.A. Acid rain attack on outdoor sculpture in perspective. *Atmospheric Environment* 146 (2016) 332-345. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.029>

Ma, X.L., Zuo, H., Tian, M.J., Zhang, L.Y., Meng, J., Zhou, X.N., Min, N., Chang, X.Y., Liu, Y., 2015. Assessment of heavy metals contamination in sediments from three adjacent regions of the Yellow River using metal chemical fractions and multivariate analysis techniques. *Chemosphere* 144 (3): 264-272. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.08.026>

Mpheyua, J.N., Piennar, J.J., Galy-Lacaux, C., Held, G., Turner, C.R., 2004. Precipitation chemistry in semiarid areas of Southern Africa: a case study of a rural and an industrial site. *J. Atmos. Chem.* 47: 1-24. [ff10.1023/B:JOCH.0000012240.09119.c4ff.ffhal-00136459](https://doi.org/10.1023/B:JOCH.0000012240.09119.c4ff.ffhal-00136459)

Mossotti, V.G., Eldeeb, A.R., Reddy, M.M., Fries, T.L., Coombs, M.J., Schmiermund, R.L., Sherwood, S.I., 2001. Statistical Compilation of NAPAP Chemical Erosion Observations. Open File Report 98-755. U.S. Geological Survey, Reston, VA. <https://doi.org/10.3133/ofr98755>

Murcia, M. (2012). Análisis del impacto ambiental y el desarrollo humano y social, producto del procesamiento de la caña panelera en las veredas Salen, Idolos y Betania del municipio de Isnos departamento del Huila. Manizales: Universidad de Manizales.

Ruiz Velásquez, S., 2018. Patrimonio y territorio: conceptos en construcción. Monografía, Universidad Externado de Colombia. Especialización de estudios del territorio 20-4-2018.

Sánchez, L., Morales, J., Barroso, O., Quiva, D., Mesa, J., Portillo, D., Cano, Y., e Iriarte, N., 2001. Evaluación de la composición química de muestras de lluvia en la ciudad de Maracaibo. V Congreso Venezolano de Química. Maracaibo, Venezuela. 1 al 5 de abril, 2001. 701-704.

Steiger, M., 2015. Air pollution damage to stone. In: Brimblecombe, P. (Ed.), *Urban Pollution and Changes to Materials and Building Surfaces*. Imperial College Press 65-102.

Thornbush, M.J, Viles, H.A., 2007. Simulation of the dissolution of weathered versus unweathered limestones in carbonic acid solutions of varying strength. *Earth Surf Process Landf* 32:841–852. DOI: 10.1002/esp.1441

Tovar Suárez, N. L, Orjuela Ortiz, C. A., 2017. Determinación de acidez del agua lluvia y las condiciones meteorológicas asociadas, en el parque arqueológico de San Agustín, Huila. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/713

La Revista Ingeniería y Región cuenta con la Licencia
Creative Commons Atribución (BY), No Comercial (NC) y Compartir Igual (SA)

