

Análisis de deposición total en la zona protectora de los cerros de Escazú en Costa Rica

Total deposition analysis around the protective zone of the Escazú hills in Costa Rica

Javier E. Rodríguez-Yáñez *, María Chaves-Villalobos **

* Laboratorio de Ecología Urbana, Universidad Estatal a Distancia, urutico@gmail.com

** Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, maria.chaves.villalobos@una.cr

Cómo citar / How to cite

Rodríguez, J. y Chaves, M. (2019). Análisis de deposición total en la zona protectora de los cerros de Escazú en Costa Rica. *Yulök Revista de Innovación Académica*. 3(1), 28-37.

Resumen

La Zona Protectora de los cerros de Escazú (ZPCE) es una zona planteada como sumidero de contaminantes dentro del Valle Central Occidental (VCO) de Costa Rica. Se analizaron las características de la deposición total obtenida de la ZPCE durante la época lluviosa del año 2015. Se evaluaron los parámetros de pH y conductividad en campo, mientras que los aniones (Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻) fueron determinados por cromatografía de intercambio iónico y los cationes (Ca⁺² y Mg⁺²) se analizaron por absorción atómica. La ZPCE presenta lluvias ácidas (pH menor a 5,6) en el 90% de las muestras. El pH presenta una distribución más ácida en la parte noroeste de la ZPCE. El pH, como concentración de H⁺ presenta una correlación moderada (0,585) con la conductividad según la ley de Kohlraush. Los iones más abundantes en la lluvia recolectada son en orden decreciente: CO₃²⁻ > Cl⁻ > SO₄²⁻ > NO₃⁻. Las correlaciones de los iones fueron elevadas (mayor a 0,7) entre Cl⁻ y Mg⁺², entre Ca⁺² y CO₃²⁻ y moderada (mayor a 0,4) entre SO₄²⁻ y NO₃⁻.

Palabras clave: deposición atmosférica total, lluvia ácida, pH, conductividad, aniones, cationes

Abstract

The Protective Area of the Escazú Hills (ZPCE, Spanish acronym) is an area designated as a pollution sink within the Western Central Valley (VCO, Spanish acronym), in Costa Rica. For this study, the total deposition characteristics obtained in the ZPCE during 2015's rainy season were analyzed. The pH parameters and field conductivity were assessed. The Cl⁻, SO₄²⁻ and NO₃⁻ anions were determined by ion exchange chromatography while the Ca⁺² and Mg⁺² cations were analyzed by atomic absorption. It was possible to identify acid rain (pH less than 5.6) in 90% of the ZPCE samples. There is more acidic pH distribution in the northwest part of ZPCE. The pH, as H⁺ concentration, presents a moderate conductivity correlation (0.585), according to Kohlraush's law. The most abundant rain ions collected are as follows, in decreasing order: CO₃²⁻ > Cl⁻ > SO₄²⁻ > NO₃⁻. The ion correlations were high (more than 0.7) between Cl⁻ and Mg + 2, between Ca+ 2 and CO₃²⁻ and moderate (more than 0.4) between SO₄²⁻ and NO₃⁻.

Keywords: total atmospheric deposition, acid rain, pH, conductivity, anions, cations

Introducción

En Costa Rica la depresión intermontana central, conocida como Valle Central Occidental (VCO) es el área de mayor concentración de población y actividades antropogénicas (PRUGAM, 2009). El Valle Central Occidental está delimitado por la Cordillera Volcánica Central al noreste y las estribaciones de la cordillera de Talamanca al suroeste (Solano & Villalobos, 2000). Esta última cierra el valle con los cerros de Ochomogo y los cerros de Escazú, donde se ubica la llamada Zona Protectora de los Cerros de Escazú (ZPCE). Esta es un área protegida que, aunque definida hace más de 30 años en el decreto 6112-A (MINAE, 1976), no ha tenido un adecuado control y evaluación como área de protección ambiental hasta años recientes (Municipalidad de Escazú, 2006; Zúñiga, 2007).

Adicionalmente, su posición en el área suroeste del Valle Central Occidental hace de la ZPCE un área de interés, pues se percibe que la zona actúa como sumidero potencial de las emisiones del VCO (Rojas, 2006; Neurohr, Monge-Nájera, & González, 2011; Neurohr, Monge-Nájera, & Mández-Estrada, 2013). Esta idea se debe a que la dispersión de contaminantes del aire está dada en gran parte por la dirección principal de los vientos. En este caso los vientos principales son los alisios, los cuales entran por el paso de la Palma, recorren el Valle Central Occidental en dirección noreste a suroeste e impactan con la ZPCE (Zárate, 1978; Zárate, 1980; Muñoz, Fernández, Gutiérrez, & Zárate, 2002b).

Una forma básica y económica de visualizar la contaminación atmosférica es por medio de la evaluación de la deposición total, definida como, la precipitación sobre un colector abierto, en un determinado sitio y de forma continua. La recolección en este tipo de dispositivos es mixta: húmeda a través de la lluvia, y seca al depositarse naturalmente las partículas del aire (Herrera & Rodríguez, 2009).

Los resultados de la recolección dependen, por lo tanto, de procesos meteorológicos, sitios de recolección y química atmosférica, por lo que su caracterización es compleja. Usualmente, se plantean relaciones básicas de los parámetros meteorológicos con el pH y los iones considerados, para, posteriormente, discutir los posibles aportes (naturales o antropogénicos) de estos (Herrera, Rojas, Beita, & Chaves, 2014; DIGECA, 2009).

El estudio analizó la variabilidad de las características fisicoquímicas y de composición de la deposición total, en el entorno de los cerros de Escazú, durante la época lluviosa del año 2015 (mayo a noviembre) con el fin de considerar los posibles impactos al ambiente en la ZPCE.

Objetivo

Objetivo General

El objetivo general del estudio fue analizar la deposición total en la ZPCE, mediante la realización de análisis fisicoquímicos para la determinación de una de las variables de influencia en la contaminación atmosférica.

Objetivos específicos

Analizar la composición fisicoquímica de la deposición total en la ZPCE, para la realización de pruebas estadísticas.

Realizar una prueba estadística de Pearson, para la correlación de las sustancias que componen la deposición total en la ZPCE.

Analizar los componentes principales de la deposición total en la ZPCE, para la identificación de las posibles fuentes de emisión.

Metodología

Muestreo

Se seleccionaron 10 sitios de muestreo alrededor de la ZPCE, y se instalaron equipos de muestreo con base en un embudo de 10 cm de diámetro, conectado por una manguera de silicona a un recipiente de recolección de 5 litros. Todo el sistema estaba sellado con silicona y el embudo tenía una malla antiinsecto, de abertura de malla N.º 18 (1 mm). La altura de los muestreadores era de 1 a 1,5 m, según las condiciones del sitio.

La tabla 1 indica los sitios, su ubicación, altura sobre el nivel del mar y la estación meteorológica asociada. En la figura 1 se aprecia el mapa asociado a dichos puntos.

Todo el equipo de muestreo es lavado con agua ultra pura tipo 1 (18,2 M Ω) previo al inicio del muestreo (ASTM-D1193-06, 2018). La recolección de muestras se hizo en periodos de 28 a 35 días, durante la época lluviosa de mayo a noviembre del 2015, con un número total de muestras recolectadas de 58.

En campo se determinó el volumen recolectado con probeta de 200 ml, luego se midió el pH y la conductividad, con un equipo LabQuest 2. Una muestra de 1 litro fue recolectada en envases limpios, lavados con agua tipo 1 para su análisis en el laboratorio, y la muestra se conservó en refrigeración durante el traslado y tiempo de espera para análisis.

Tabla 1. Información de los sitios de recolección de muestras de deposición total y la estación meteorológica asociada.

N.º	Sitio	Ubicación			
		Latitud	Longitud	Altura (m)	Estación
1	Finca Ciprés	9°52'54.79"N	84° 07'14.07"O	1620	A
2	Finca Ana	9°53'00.03"N	84° 08'07.71"O	1680	A
3	Iglesia del Carmen	9°53'47.29"N	84° 08'37.21"O	1370	A
4	Escuela Bebedero	9°54'14.30"N	84° 09'32.82"O	1540	B
5	Proyecto Eólico CNFL 01	9°53'33.39"N	84°11'58.77"O	1643	B
6	Proyecto Eólico CNFL 02 Seguridad	9°52'54.18"N	84°11'13.77"O	1770	B
7	Finca Elvis	9°52'24.03"N	84°12'52.26"O	1380	B
8	Finca Bendición	9°50'35.49"N	84°10'25.38"O	1500	A
9	Alto de los Granados	9°48'37.20"N	84° 09'00.35"O	1400	C
10	Calle Azulillos	9°50'25.21"N	84° 07'16.32"O	2000	C

Análisis de la muestra:

En el laboratorio se trata la muestra con un filtro de membrana de 0,45 µm, antes de realizar los análisis de aniones y metales pesados para remover cualquier material sólido que pueda obstruir la tubería del equipo. Es importante mencionar que los iones se determinaron sobre la porción soluble de la muestra. Los iones inorgánicos analizados son: Cl⁻, SO₄⁻², NO₃⁻, y los cationes Ca⁺², Mg⁺². La determinación de los iones se realizó mediante cromatografía de intercambio iónico modelo DIONEX ICS-3000, utilizando un detector de conductividad, una columna de Dionex ASRS ULTRA II con una disolución de fase móvil fue carbonato de sodio 9 mM. Los volúmenes de inyección fueron de 25 µl, mientras que la fase móvil circula a 1,00 ml/min y la temperatura de trabajo fue de 30°C. La determinación de la concentración de Ca⁺² y Mg⁺² se realizó mediante la técnica espectrofotometría de absorción atómica mediante el análisis de llama utilizando un equipo Perkin Elmer modelo AAnalyst 700, el cual cuenta con lámparas de cátodo hueco, un detector y un fotomultiplicador ajustable a todo el ancho de banda espectral. Por otro lado, se analizó la alcalinidad total (carbonatos, CO₃⁻²) y parcial (bicarbonatos, HCO₃⁻), por medio de curvas potenciométricas, así como sólidos totales, por secado a 103°C hasta peso constante, definido como residuo seco (American Public Health Association (APHA), 2012).

Fuente: elaboración propia.

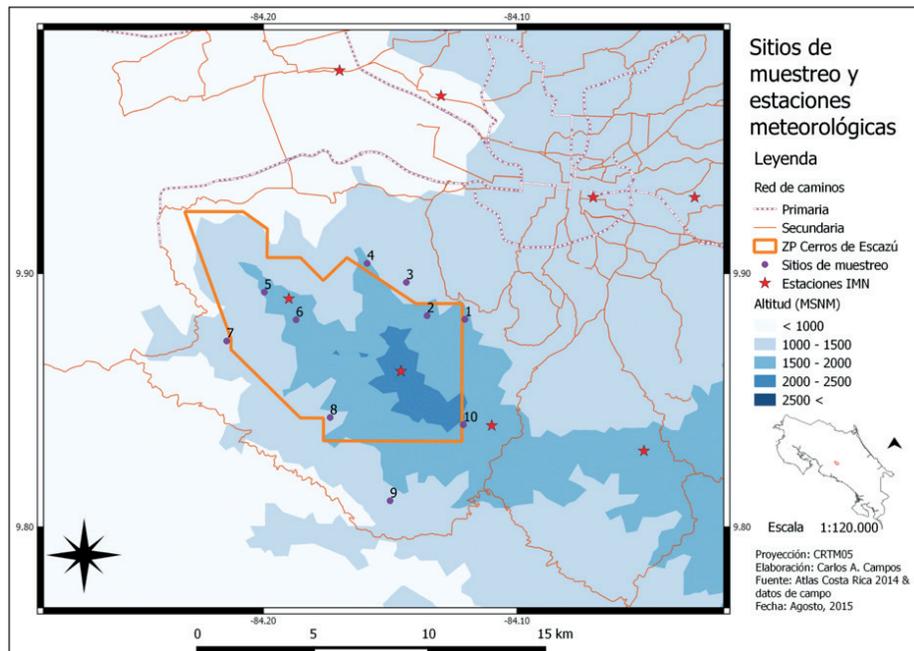


Figura 1. Mapa de ubicación de los sitios de muestreo de deposición total y las estaciones meteorológicas (A, B y C), en la Zona Protectora de los Cerros de Escazú. Fuente: Campos, C. (2015).

Tabla 2. Límites de cuantificación de ensayos en (mg/l), para las muestras de deposición total analizadas.

Ensayos	SO ₄ -2	NO ₃ -	Cl-	Ca+2	Mg+2	Alcalinidad	Residuo Seco
Límite de cuantificación (mg*l-1)	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,5	2

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2 se muestran los límites de cuantificación para cada uno de los iones analizados. En caso de que alguno de ellos se encuentre en valores inferiores a la cuantificación se considerará que el valor es 0 para la corrida del paquete estadístico.

Meteorología

Se solicitaron al Instituto Meteorológico Nacional (IMN) los datos climáticos asociados a las estaciones meteorológicas en la ZPCE para el periodo de estudio. En particular se solicitaron los valores horarios de temperatura (°C), la humedad relativa (%), la lluvia (mm) y el viento (velocidad en m*s⁻¹ y dirección en grados). Las estaciones consideradas son tres cuyas coordenadas se muestran en la tabla 3. Las estaciones se relacionan con los puntos de muestreo en la tabla 1.

Con base en los datos se determina, en forma diaria y por periodo la lluvia acumulada (mm), la intensidad de lluvia (mm*h⁻¹), la temperatura media (°C), la humedad relativa media (%), la mediana de la velocidad (m*s⁻¹) y la dirección preferencial del viento.

La estación de Cedral no presenta datos completos para la lluvia durante el mes de junio y no tiene datos de humedad relativa.

Estadística

Se realiza un ordenamiento de los datos de iones y parámetros meteorológicos por estación y por periodo, para realizar una evaluación general de la lluvia en el ZPCE durante el 2015.

La concentración de iones se pondera respecto al volumen recolectado utilizando la ecuación 1:

$$X \text{ ponderada} = \Sigma (V_i \times X_i) / V_t \quad (1)$$

Donde

V_i = volumen de precipitación total colectada para la muestra i

X_i = concentración del analito obtenida para la muestra i
V_t = volumen de precipitación colectada para la totalidad de muestras por sitio

Los iones ponderados por sitio son evaluados como micro equivalentes por litro (µeq/l)

Ley de Kohlrausch

Para disoluciones diluidas (concentración menor a 0,001 M) es posible establecer una relación entre la conductividad de una mezcla y la concentración promedio de sus iones o del ion de mayor conductividad. En soluciones de lluvia ácidas (para pH menor a 5,6) es posible establecer esta relación con el ion H⁺, el cual presenta una conductividad mucho más elevada que los otros iones (350 S cm² mol⁻¹). La fórmula de Kohlrausch plantea que:

$$= 0 - kC^{1/2}$$

Donde

χ es la conductividad en S/cm

Λ es la conductancia molar (χ/ C) en S cm² mol⁻¹

Λ₀ es la conductancia molar a dilución infinita

C es la concentración en M

Tabla 3. Ubicación de las estaciones meteorológicas consideradas en la ZPCE.

Estación	Latitud	Longitud	Altura (m)	Código
Cerro Cedral	09° 51' 41,1" N	84° 08' 45,2" O	2255	A
Cerro Chitaria	09° 53' 30,1" N	84° 11' 37,3" O	1717	B
Cerro Burio	09° 50' 25,3" N	84° 06' 45,6" O	1811	C

Fuente: elaboración propia.

Estadística por grupos

Los datos se analizan por sitio para algunos parámetros específicos como pH y conductividad. En otros casos los datos son separados en grupos por su ubicación geográfica, se asocian con las estaciones meteorológicas o respecto a si están en la ZPCE a sotavento (noreste) o barlovento (suroeste) de los vientos principales del VCO.

Se realizan comparaciones entre grupos según evaluaciones no paramétricas de U de Mann - Whitney o Kruskal -Wallis, con niveles de confianza del 95% ($p < 0,05$).

Con base en los datos generales se plantea la realización de correlaciones de Pearson entre los parámetros fisico-químicos y los iones medidos en laboratorio. Así como, un análisis de componentes principales.

Para los iones y la conductividad se realiza un análisis de componentes principales de tres componentes.

Para ello se utiliza como programa estadístico el software IBM SPSS Statistics 20®

Resultados y discusión

Variables meteorológicas

Las precipitaciones durante la época lluviosa en el 2015 fueron menores del promedio anual para la región, a causa del efecto del Niño. Este provocó una disminución en las lluvias promedio en el Valle Central Occidental y en la vertiente pacífica de Costa Rica (Morera, 2015). La actividad volcánica fue significativa entre el 16 y el 30 de octubre en el volcán Turrialba, y afectó parcialmente el VCO, pero no en forma significativa la ZPCE (OVSICORI, 2015).

En la figura 2 se presenta el pH y los volúmenes promedios recolectados, los cuales varían a lo largo de la época lluviosa. Estos últimos presenta una forma similar a las fluctuaciones usuales de precipitación en la época lluviosa para el VCO (Solano & Villalobos, 2000). La recolección del proyecto representa al menos el 80% de la precipitación indicada en las estaciones meteorológicas de referencia para cada sitio de muestreo.

La cantidad e intensidad de lluvia no presentan diferencias significativas entre grupos por estaciones meteorológicas.

La temperatura, la humedad relativa y el viento son dependientes de la altura de la estación meteorológica, por lo que no se consideran sus relaciones en los resultados de este estudio. Mientras que la dirección del viento es

predominantemente condicionada por la ubicación y el entorno de la estación, siendo del norte para la estación Chitaria (A) del este para la estación Cedral (B) y del noreste para la estación Burio (C). Los valores de la velocidad del viento (m/s) aumentan entre julio y agosto para todas las estaciones, y disminuye en el resto de los meses. Este efecto está asociado al periodo de la canícula. Las velocidades a lo largo del periodo de estudio se muestran en la figura 3. Las estaciones tienen velocidades de viento promedio decreciente en el siguiente orden Cedral (5,42 m/s), Chitaria (2,35 m/s) y Burio (0,97 m/s). La velocidad aumenta con la altura de la estación y la circulación de los vientos, la cual planteada en forma saliente del VCO en la estación de Cedral y de choque o elevación en las otras dos.

4.2 PH

Se considera que la lluvia contiene elementos ácidos, no asociados a gases atmosféricos naturales como el dióxido de carbono cuando su valor de pH es inferior a 5,6 (Charlson & Rodhe, 1982). El pH de la ZPCE tiene un promedio global de $(5,08 \pm 0,30)$. El 90% de las muestras presentan valores de pH menores que 5,6 en estos casos la alcalinidad parcial nula confirma que todo el componente de la acidez está asociada a ácidos fuertes.

La correlación que se obtiene entre la concentración de H^+ y el volumen recolectado es baja (0,308).

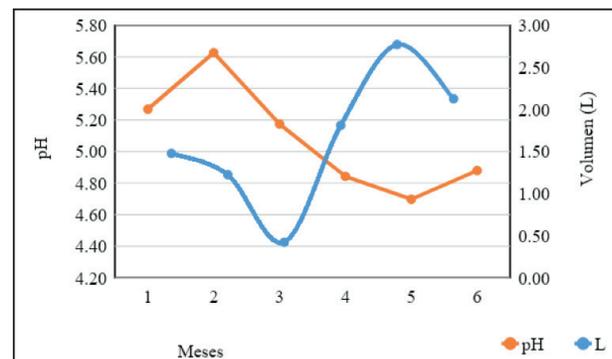


Figura 2. Niveles promedio del pH y las precipitaciones recolectadas en el ZPCE, en 2015. **Fuente:** elaboración propia.

Los valores de pH de los sitios asociados a la estación meteorológica B, presentan una diferencia significativa ($p > 0,05$) con los otros grupos definidos. Este grupo B se presenta como más ácido respecto a los otros (valor promedio $pH = 4,84$), y se asocia a los puntos de la región noroeste, puntos 4 al 7, en los sitios de Bebedero, Salitral, Santana y Quitirrisí. Esto podría estar relacionado con el flujo de vientos, los cuales utilizan este punto como sali-

da del VCO y eventualmente el arrastre de contaminantes (Zárate, 1980; Muñoz, Fernández, Gutiérrez, & Zárate, 2002a; Muñoz, Fernández, Gutiérrez, & Zárate, 2002b; Herrera, 2009)

No existe para pH una diferencia significativa ($p < 0,05$) entre los puntos del 1 al 4 (vertiente noreste) respecto a los puntos del 7 al 10 (vertiente suroeste). Por lo que no es posible indicar diferencias de pH entre vertientes de la ZPCE.

Conductividad

La conductividad promedio fue estable, con valores del orden de $(14,4 \pm 2,7)$ $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores son ligeramente más altos en el muestreo de agosto por la disminución de la precipitación y ligeramente menores con las lluvias más abundantes e intensas de setiembre a noviembre. Los valores de conductividad presentan una correlación moderada con la concentración de (H^+) a través de la ley de Kohlrausch, con un coeficiente de correlación de 0,585.

La conductividad presenta diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las vertientes, siendo ligeramente más alto en la vertiente noreste ($16,4 \pm 1,5$ vs. $10,7 \pm 1,5$) $\mu\text{S}/\text{cm}$.

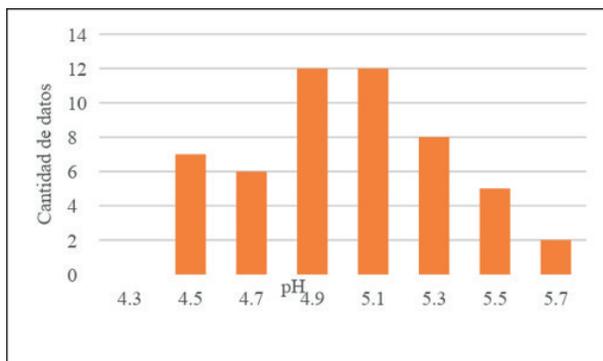


Figura 3. Distribución de los valores de pH asociados a la deposición total obtenidos en el ZPCE durante el 2015

Nota: los rangos son definidos por el valor mayor del intervalo, Ej. 5.1 representa el intervalo (4,9 - 5,1]. **Fuente:** elaboración propia.

Iones

Los sólidos disueltos, calcio y magnesio, también presentan un aumento en agosto asociado al menor nivel de precipitaciones y más viento. Los análisis de calcio y magnesio en los meses más lluviosos (setiembre y octubre) son menores al límite de detección. Los iones analizados no presentan una diferencia significativa entre los grupos asociados a las estaciones meteorológicas o por vertiente.

En la tabla 4 se presentan los valores medios ponderados por volumen, para las medidas de cada ion en cada sitio de muestreo. La importancia de las especies monitoreadas sigue el siguiente orden: $\text{CO}_3^{-2} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{-2} > \text{NO}_3^- > \text{Mg}^{+2} \approx \text{Ca}^{+2} \approx \text{H}^+$, y representa de los iones medidos el 35 %, 20,3%, 16,3 %, 9,6 %, 6,6 %, 6,5 % y 5,7 %, respectivamente.

En el caso del NO_3^- se tienen los medios ponderados más bajos de todos los aniones, lo anterior puede deberse a que según la metodología que plantea American Public Health Association (APHA, 2012), el tiempo máximo establecido para el análisis de este anión es de 48 horas, por el efecto de algunas bacterias sobre los compuestos reducidos nitrogenados en presencia de una atmósfera oxidante. Y según la metodología planteada en esta investigación los tiempos de análisis para todos los iones superaron las 48 horas establecidas, lo que pudo afectar la concentración real de NO_3^- .

En la tabla 5 se exponen las correlaciones de Pearson obtenidas para los iones, en donde se aprecia que estas son elevadas y significativas para las relaciones de Ca^{+2} y CO_3^{-2} , así como para Mg^{+2} y Cl^- con los sólidos disueltos y entre sí. Esto hace presumir que estos aportes son principalmente asociados a los sólidos disueltos de origen antropogénico o cristal (o de la corteza terrestre) y en alguna medida a la deposición seca que se produce sobre el muestreador.

La relación de estos valores se asocia a lluvias, donde la acidez puede estar asociada a varios tipos de contaminación dada por ácidos fuertes de sulfato o nitrato, en ese orden. Según Herrera *et al.* (2014), los valores de acidez en áreas urbanas se asocian principalmente a la emisión de óxidos de azufre y a óxidos de nitrógeno, provenientes de la quema de combustibles, tanto de fábricas como de altos flujos vehiculares. Los valores de sulfato observados son similares a las obtenidos para muestreos de lluvia en el área metropolitana, mientras que los valores de nitratos son mayores, lo que podría estar indicando algún tipo de acumulación de estos en la ZPCE. Por su parte, los valores de cloruros se presentan elevados respecto a otros estudios, considerándose por tanto un aporte del factor marino (Herrera, Rojas, Beita, & Chaves, 2014; Herrera & Rodríguez, 2009; Herrera Murillo, Rodríguez, Rojas Marín, & Baez, 2012). (Ver tabla 4).

Análisis de componentes principales

Se realizan previamente los análisis de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y de Bartlett, para verificar la adecuación muestral (0,651) y la esfericidad (36). Ambos análisis indican que los valores son adecuados para la realización de un análisis de componentes principales.

El análisis de componentes principales de tres componentes nos plantea la explicación de la varianza en un 69,4%. Uno de los componentes presenta asociación entre el nitrato, sulfato, otro componente agrupa al calcio y la alcalinidad, y el tercer componente se asocia a los tres iones restantes: cloruro, magnesio y sólidos disueltos; de acuerdo con los valores para los componentes rotados (ver tabla 6 y figura 4).

Tabla 5. Correlaciones de Pearson obtenidas para los iones analizados en la ZPCE, en 2015.

Variables	Cl-	NO3-	SO4-2	Ca+2	Mg+2	CO3-2	Sólidos disueltos
H+	0,114	0,034	0,043	0,131	-0,259	-0,017	-0,017
Cl-		0,340	0,336	0,106	0,748	0,207	0,669
NO3-			0,413	0,129	0,166	0,235	0,381
SO4-2				0,039	0,173	0,169	0,105
Ca+2					0,286	0,799	0,371
Mg+2						0,319	0,701
CO3-2							0,424

Nota: las correlaciones en negrita presentan una alta significancia ($p < 0,05$). **Fuente:** elaboración propia.

Tabla 4. Concentraciones promedio ponderadas por volumen para cada sitio, en $\mu\text{eq/l}$, obtenidas en las muestras de deposición total en el ZPCE para el año 2015.

Sitio de muestreo	H ⁺ ($\mu\text{eq/l}$)	Cond ($\mu\text{S/cm}$)	SO ₄ ⁻² ($\mu\text{eq/l}$)	NO ₃ ⁻ ($\mu\text{eq/l}$)	Cl ⁻ ($\mu\text{eq/l}$)	Ca ⁺² ($\mu\text{eq/l}$)	Mg ⁺² ($\mu\text{eq/l}$)	Alcalinidad Total (CO ₃ ⁻²) ($\mu\text{eq/l}$)	Sólidos (mg/l)	Volumen Total recolectado (ml)
1	7,9 (1,2)	18,2 (1,9)	59,5 (6,2)	32 (8)	67,7 (5,8)	17,8 (2,2)	39,5 (3,5)	94,6 (3,0)	20 (11)	8873
2	8,0 (1,2)	16,2 (1,1)	47,0 (3,1)	16,3 (2,7)	50,3 (3,2)	19,1 (2,0)	14,5 (1,5)	123,2 (4,5)	13,6 (6,0)	9011
3	13,6 (2,0)	13,3 (1,5)	40,7 (3,3)	20,6 (3,2)	49,2 (4,9)	15,8 (1,5)	39,8 (3,8)	80,1 (4,3)	32 (13)	7128
4	29,6 (5,6)	12,7 (1,4)	43,2 (3,5)	21,9 (3,1)	49,4 (5,5)	7,8 (0,7)	10,8 (1,1)	99,0 (9,1)	12,3 (5,7)	9144
5	19,5 (3,6)	12,9 (0,9)	36,6 (2,5)	21,5 (2,5)	49,2 (5,1)	50,0 (8,2)	15,2 (1,2)	110,3 (4,8)	27,8 (6,8)	11424
6	23,5 (4,2)	11,2 (1,6)	38,1 (4,0)	23,8 (3,9)	51,0 (6,9)	5,8 (0,8)	4,3 (0,6)	55,2 (3,3)	24,2 (7,5)	9882
7	25,6 (5,4)	12,7 (1,5)	33,1 (2,9)	9,2 (1,5)	49,6 (5,3)	9,9 (0,9)	14,4 (1,7)	80,2 (4,3)	13,3 (5,1)	11862
8	14,1 (2,2)	9,3 (1,3)	34,0 (3,4)	12,4 (1,8)	53,7 (6,7)	3,4 (0,7)	3,2 (0,6)	74,9 (5,3)	8,8 (5,0)	11378
9	10,8 (1,9)	10,2 (1,2)	37,7 (3,4)	11,1 (1,3)	54,0 (5,7)	6,4 (0,7)	16,8 (1,5)	71,3 (4,7)	10,4 (7,4)	9476
10	13,0 (3,4)	10,2 (1,8)	45,7 (4,0)	77 (27)	44,9 (7,6)	10,2 (1,4)	10,1 (1,4)	107,2 (10,3)	16,5 (0,4)	6855

Nota: Los valores entre paréntesis son las desviaciones estándar. Los equivalentes de los iones se realizan a partir de $\text{mg/l} \cdot \text{carga} \cdot 1000 / \text{PM} = \mu\text{eq/l}$. Un pH de 5,6 corresponde a 2,5 $\mu\text{eq/l}$ de H⁺. **Fuente:** elaboración propia.

El primer componente tendría como posible fuente el aerosol marino (Cl^- y el Mg^{+2}), mientras que la segunda componente se asociaría a la neutralización (CO_3^{-2}) combinada con elementos crustales (Ca^{+2}), mientras que el tercer componente se relacionaría con la contaminación atmosférica (SO_4^{-2} y NO_3^-).

La conductividad se reparte entre el componente marino y el de contaminación atmosférica. El componente de la concentración de (H^+) presenta una asociación negativa con el componente de aerosol marino, y bajas asociaciones positivas con los componentes de neutralización y contaminación atmosférica.

Factores de relacionamiento

Los factores de relacionamiento permiten considerar como están asociados los iones muestreados, en relación con sus interacciones y orígenes.

La acidez fraccional (AF) definida como la relación entre la cantidad de (H^+) respecto a los aniones ácidos asociados, se puede expresar, según Balasubramanian *et al* (2001) como:

$$AF = (\text{H}^+) / [(\text{nsm SO}_4^{-2}) + (\text{NO}_3^-)]$$

Donde (nsm SO_4^{-2}) considera la fracción de la concentración de sulfato no proveniente de sal marina, que según Herrera (2009) es del orden del 50% para el VCO.

Tabla 6. Matriz de coeficientes para el cálculo, de las puntuaciones en las componentes.

	Componente		
	1	2	3
% Varianza	39,369	16,43	13,571
Valor Propio	3,543	1,479	1,221
Conductividad	0,504	0,222	0,481
Cloruro (Cl-)	0,776	0,046	0,374
Nitrato (NO3-)	0,131	0,122	0,735
Sulfato (SO4-2)	0,067	-0,026	0,844
Calcio (Ca+2)	0,073	0,949	-0,004
Magnesio (Mg+2)	0,897	0,216	0,08
Alcalinidad total (CO3-2)	0,179	0,889	0,151
Sólidos disueltos	0,720	0,387	0,235
Concentración (H+)	-0,472	0,226	0,262

Fuente: elaboración propia.

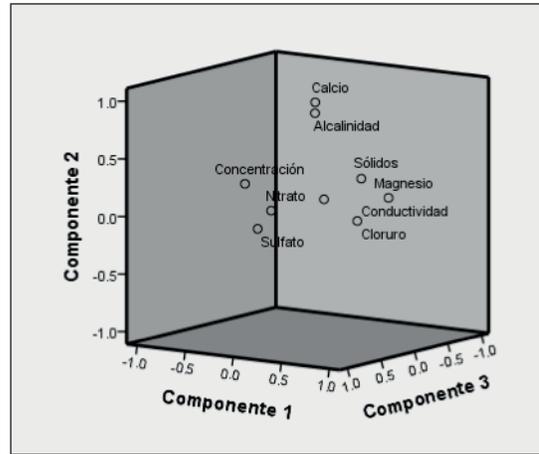


Figura 4. Distribución de los componentes en un espacio rotado. Fuente: elaboración propia.

En función de esto la AF en la ZPCE resulta elevada (mayor a 0,4) entre los puntos de muestreo 4 al 8 (zona noroeste de la ZPCE), esto implica que en ellos la acidez no es neutralizada por los componentes alcalinos.

La proporción de aporte de acidez para ambos aniones resulta en la mayoría de los sitios cercana al 50% o equivalente.

En otro sentido, los factores de neutralización (FN) permiten ver la interacción entre los iones alcalinos, consideran solo calcio (Ca^{+2}) y los aniones ácidos (SO_4^{-2} y NO_3^-), según:

$$FN = (\text{Ca}^{+2}) / [(\text{SO}_4^{-2}) + (\text{NO}_3^-)]$$

Este factor presenta un promedio de $45\% \pm 26\%$, lo que responde a una neutralización parcial de la acidez por los iones alcalinos, pero muestra una alta variabilidad.

La relación $\text{SO}_4^{-2}/\text{NO}_3^-$ presenta valores de $1,8 \pm 0,5$, lo que resulta menor que los valores reportados para áreas urbanas, que es en general entre 2 y 5, lo que plantearía una mayor proporción de los óxidos de nitrógeno en la ZPCE (Herrera, 2009; Herrera, Rojas, Beita, & Chaves, 2014).

Conclusiones

La ZPCE presenta en su entorno valores de pH relacionados con lluvia ácida. Los valores más bajos de pH se concentran en la zona noroeste de la ZPCE, asociado posiblemente a los flujos de viento y la cantidad de lluvia.

Las muestras presentan una conductividad relativamente estable, con una correlación moderada (0,585) con base

en la relación de Kohlrausch respecto a la concentración de (H^+). Se presenta una diferencia significativa de conductividad entre las vertientes noreste y suroeste, pero no así de pH.

Las principales especies de iones evaluadas en este análisis son, en orden descendente, $CO_3^{-2} > Cl^- > SO_4^{-2} > NO_3^-$, y se mantienen correlaciones moderadas para SO_4^{-2} y NO_3^- .

En el caso de los cationes las correlaciones son elevadas y las más importantes encontradas se dan entre Mg^{+2} y Cl^- y así como entre Ca^{+2} y CO_3^{-2} .

El análisis de componentes principales plantea como posibles fuentes de iones al aerosol marino, elementos crustales de neutralización y contaminación atmosférica, en ese orden de importancia.

La característica de la deposición total en la ZPCE la presenta como un área de sumidero de contaminantes atmosféricos. En particular, asociado a efectos de lluvia ácida y de contaminantes secundarios, expresados en esta, en las proporciones de nitratos obtenidos (NO_3^-) a pesar de los tiempos de exposición.

En este estudio se presenta la región noroeste como la de mayor afectación para los parámetros medidos.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias a la financiación del fondo de la Cooperación Suiza para el Desarrollo (COSUDE). Se agradece la cooperación en este proyecto de la Municipalidad de Escazú, la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, y todas las personas que permitieron la instalación de los muestreadores en sus casas, fincas o sitios de trabajo. Asimismo al Instituto Meteorológico Nacional por el aporte de los datos y su apoyo en el análisis asociado a estos y a la Licda. Ligia Bermúdez por su colaboración en el análisis estadístico.

Referencias bibliográficas

- American Public Health Association (APHA). (2012). *Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater*. En *Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington, DC.
- ASTM-D1193-06. (2018). *Standard Specification for Reagent Water*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.

- Balasubramanian, R., Victor, T., & Chun, N. (2001). *Chemical and statistical analysis of precipitation in Singapore*. *Water, Air and Soil Pollution*, 130, 451-456.
- Campos, C. (2015). *Atlas Costa Rica 2014 y datos de campo* [Mapa].
- Charlson, R., & Rodhe, H. (1982). *Factors controlling the acidity of natural rainwater*. *Nature*, (295) 683-685.
- DIGECA. (2009). *Propuesta del Sistema de Protección Ambiental –SIPA, Plan Nacional de Calidad Ambiental*. San José, Costa Rica: MINAE.
- Herrera Murillo, J., Rodríguez, S., Rojas Marin, J., & Baez, A. (2012). *Relations Between Bulk Precipitation, PM10 Composition and Meteorological Conditions in the Metropolitan Area of Costa Rica*. *The Open Journal of Atmospheric Sciences*, 6: 19-32.
- Herrera, J. (2009). *Caracterización fisicoquímica de partículas de PM10 y precipitación total en el área metropolitana de Costa Rica*. México D. F., México: Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Doctorado.
- Herrera, J., & Rodríguez, S. (2009). *Determinación de la concentración de aniones en muestras de precipitación total colectadas en San José, Costa Rica*. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 25 (2) 65-72.
- Herrera, J., Rojas, J., Beita, V., & Chaves, M. (2014). *Composición química de muestras de deposición total colectadas en el área metropolitana de Costa Rica en 2012*. *Ciencias Ambientales*, (48) 30 - 38.
- MINAE. (23 de junio de 1976). DEC 6112-A-MINAE *Creación de Zona Protectora Cerros de Escazú*. *La Gaceta*. San José., Costa Rica.
- Morera Rodríguez, R. (Noviembre de 2015). *Instituto Meteorológico Nacional*. Recuperado de *Boletín Meteorológico*: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/14641/NOVIEMBRE>
- Municipalidad de Escazú. (11 de mayo de 2006). *Plan Regulador de Escazú*. *Gaceta N.º 90*, San José, Costa Rica.

- Muñoz, A. C., Fernández, W., Gutiérrez, J., & Zárate, E. (2002a). *Distribucion horaria de la magnitud del viento en Costa Rica*. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 9 (1) 14 - 29.
- Muñoz, A., Fernández, W., Gutiérrez, J., & Zárate, E. (2002b). *Variación estacional del viento en Costa Rica y su relacion con los regímenes de lluvia*. *Tópicos meteorológicos y oceanográficos*, 9 (1), 1 - 13.
- Neurohr, E., Monge-Nájera, J., & González, M. (2011). *Air pollution in tropical city. The relationship between wind direction and lichen bio indicators in San José, Costa Rica*. *Biología Tropical*, (59) 899 - 905.
- Neurohr, E., Monge-Najera, J., & Méndez Estrada, V. (2013). *Use of geographic informatioin system and lichens to map air pollution in tropical city*, San José, Costa Rica. *Biología Tropical*, 61 (2), 557- 563.
- OVSICORI. (Noviembre de 2015). OVSICORI. Obtenido de *Boletin Vulcanologia*: www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/vulcanologia/estado-de-los-volcanes/category/4-ev2015%3Fdownload%3D571:estado-volcanes-noviembre-2015+%&cd=2&hl=es&c=t=clnk
- PRUGAM. (2009). *Planificación Regional Urbana del Gran Área Metropolitana*, Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos, San José, Costa Rica. Recuperado de Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos: <http://www.mivah.go.cr/PRUGAM.shtml>
- Rojas, O. (2006). *Situacion de la Calidad de Aire en Costa Rica, 2005*. San José, Costa Rica: Estado de la Nacion, en Desarrollo Humano Sostenible.
- Solano, J., & Villalobos, R. (2000). *Regiones y Subregiones Climáticas de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.
- Zárate, E. (1978). *Comportamiento del viento en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.
- Zárate, E. (1980). *El viento en San José*. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.
- Zúñiga, W. (2007). *Los Cerros de Escazú, un ejemplo del uso irracional del paisaje*. *Revista Reflexiones*, 86-1: 59-75.