

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Ambiental

“Cuantificación de metales pesados en aire y suelo y su posible relación con la prevalencia de Nefropatía Mesoamericana en el cantón de Cañas, Guanacaste, Costa Rica”

Sharon Paola Ulate Chacón

CARTAGO, setiembre, 2022

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Ingeniería Ambiental

“Cuantificación de metales pesados en aire y suelo y su posible relación con la prevalencia de Nefropatía Mesoamericana en el cantón de Cañas, Guanacaste, Costa Rica”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

Miembros del Tribunal

Ph.D. Virginia Montero Campos
Directora

Ph.D. Matthew G. Siebecker
Lector 1

Ph.D. Federico Masís Meléndez
Lector 2

Dra. Ir. Mary Luz Barrios Hernández
Coordinadora COTRAFIG

MGLA. Ricardo Coy Herrera
Director Escuela de Química

MSc. Diana A. Zambrano Piamba
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

DEDICATORIA

A mi hermana, por ser el motor de mi vida y mi inspiración para ser una mejor versión de mí.

A mis padres, por estar siempre dos pasos delante para motivarme a seguir o dos pasos detrás para sostenerme en los momentos difíciles.

A mi familia, por hacer este sueño posible.

A mí misma, por decidir que cada día merece la pena.

Vivo, porque muero.
Lucho, porque puedo.
Sueño, porque quiero.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y a todas aquellas personas que colaboraron económica, académica y psicológicamente cuando más lo necesitaba con el fin de cumplir los requisitos de este trabajo.

A los profesores, Isaac Céspedes Camacho, Federico Masís Meléndez, y profesoras, Laura Quesada Carvajal y Diana Zambrano Piamba por su apoyo emocional y guía académica brindada a lo largo del proceso. A la profesora Virginia Montero Campos por darme la oportunidad de ser parte de su proyecto de investigación.

Al colaborador Armando Chaves por ayudarme a tomar muestras de suelos en lugares difíciles, aunque se le hicieran ampollas en las manos. Al microbiólogo Benedicto Valdés por su apoyo en los análisis de PXRF de las muestras de suelo.

A mi compañero de carrera Luis Gómez Vargas por siempre tener palabras de aliento para conmigo y por hacer este proceso más llevadero, a pesar de las circunstancias. A Laura Zelaya Vallecillo por sus servicios de filología y su amistad incondicional después de tantos años.

To Texas Tech University for the opportunity to work in the Department of Plant and Soil Sciences; especially to Ph.D. Matthew Siebecker, AmandaJo Zimmerman, Aakriti Sharma, and Karin Ardon-Dryer for their guidance in the laboratory and their unconditional support in the experimental stage of this process.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1 Enfermedad Renal Crónica.....	4
3.2 Nefropatía Mesoamericana (NM).....	5
3.3 Antecedentes de la NM.....	7
3.3.1 Contexto histórico.....	7
3.3.2 Contexto geográfico.....	8
3.3.3 Factores socioeconómicos.....	8
3.3.4 Factores ambientales.....	9
3.4 Situación de Costa Rica	10
3.4.1 Provincia de Guanacaste, Costa Rica	11
3.5 Contaminantes ambientales	12
3.5.1 Contaminantes atmosféricos.....	12
3.5.2 Material Particulado PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1	13
3.5.3 Suelo como matriz contaminante	14
3.6 Metales pesados nefrotóxicos	15
3.6.1 Arsénico (As).....	15
3.6.2 Cadmio (Cd).....	16
3.6.3 Mercurio (Hg).....	16
3.6.4 Plomo (Pb).....	17
3.6.5 Silicio (Si).....	17
3.6.6 Vanadio (V).....	18
3.6.7 Efectos combinados	18

4. MATERIALES Y MÉTODOS	22
4.1 Lugar de estudio.....	22
4.2 Diseños de experimentos	23
4.2.1 Muestreo de suelo	24
4.2.2 Muestreo material particulado atmosférico	30
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
5.1 Condiciones ambientales	33
5.1.1 Condiciones atmosféricas	33
5.1.2 Condiciones geológicas	37
5.2 Cuantificación de metales pesados	43
5.2.1 Muestras de suelo	43
5.2.2 Muestras de aire	46
5.3 Relación de metales pesados encontrados y la prevalencia de nefropatía mesoamericana.....	51
5.3.1 Arsénico	51
5.3.2 Cadmio.....	53
5.3.3 Mercurio	53
5.3.4 Plomo	53
5.3.5 Sílice.....	55
5.3.6 Vanadio.....	57
5.3.7 Muestra del polvo del Sahara.....	58
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
6.1 Conclusiones.....	61
6.2 Recomendaciones	62
7. REFERENCIAS.....	63
8. APÉNDICES	76
APÉNDICE 1: Resultados obtenidos del análisis de muestras de suelo	76

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Ejemplificación de las condiciones visuales de un riñón sano y uno con ERC. A la izquierda se muestra una imagen de un riñón sano y una tinción de tejido renal sano, en donde se muestran túbulos renales (TR) y glomérulos (G) bien definidos. A la derecha, una imagen de un riñón dañado con ERC en donde se visualizan tejido cicatricial (TC) y cambios estructurales, tanto en el exterior como en la forma y tamaño de glomérulos (Gd) y túbulos renales dañados (TRd) presentes en la tinción. (Mayo Foundation for Medical Education and Research, 2021)..... 5
- Figura 2. Muestras de tejido renal con NM vistas en microscopio ampliado a 500 μm . (a) Tinción de HE (hematoxilina-eosina) de una muestra de tejido renal normal de un paciente con NM. (b) Tinción de PAS (*Periodic Acid-Schiff*) de una muestra de tejido renal de un paciente con NM: glomérulos esclerosados y agrandados, fibrosis intersticial y túbulos inflamados. (García-Trabanino & Correa-Rotter, 2020). 6
- Figura 3. Regiones en donde se ha documentado la presencia de la nefropatía mesoamericana. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha, marcadas en color rojo las áreas afectadas, en orden respectivo: (1) México, (2) Guatemala, (3) El Salvador, (4) Honduras, (5) Nicaragua, y (6) Costa Rica. Modificado de García-Trabanino (2017). 8
- Figura 4. Fotografía tomada durante una jornada de trabajo en un ingenio en el distrito de Bebedero, Cañas, Guanacaste. 9
- Figura 5. Foto del distrito de Bebedero en Cañas, en época lluviosa, octubre de 2020. 10
- Figura 6. Mapa cantonal de afectación por Enfermedad Renal Crónica en la provincia de Guanacaste, según su tasa de mortalidad. (Ministerio de Salud, 2018). 12
- Figura 7. Valores de arsénico total reportados en la primera versión del Atlas Geoquímico de Costa Rica. (Chacón, 2019). 15
- Figura 8. Ubicación del cantón de Cañas y las zonas de estudio. Elaborado mediante *QGIS Desktop 3.18.1*..... 23
- Figura 9. Primera etapa de muestreo, a la izquierda, extracción de las muestras de suelo utilizando el barreno, y a la derecha, ejemplo de una muestra recién recolectada (CG-11). 24
- Figura 10. Etapa de tamizado y empaque. Arriba, tamizaje de muestras en el laboratorio multiuso de Ingeniería Ambiental, Tecnológico de Costa Rica. Abajo a la izquierda, proceso de

tamizado de la muestra CG-58 y a la derecha, 13 g de suelo en cada una de las muestras empacadas y listas para enviar al TTU en Estados Unidos.	25
Figura 11. Espectrómetro Olympus serie Vanta M utilizado para los análisis.	26
Figura 12. Sistema de digestión de microondas MARS 6 utilizado en el análisis.....	27
Figura 13. Tubos de teflón con muestras y mezclas de ácidos luego de una ronda de digestión por microondas.....	28
Figura 14. Filtración a 0.22 μ m de resultante de digestión por microondas.....	28
Figura 15. Tríplicas y controles diluidos listas para cuantificación mediante ICP-OES.....	29
Figura 16. Espectrómetro ICP-OES Thermo Scientific serie iCAP 7000 utilizado en los análisis.	29
Figura 17. Colector de partículas por gravedad ya ensamblado según las indicaciones del TTU.30	
Figura 18. Sector del muestreador por impactación en donde se colocaba el filtro, enviada por el TTU.....	31
Figura 19. Microscopio Hitachi modelo Tabletop TM-1000 utilizado en los análisis.	32
Figura 20. Representación gráfica del promedio de temperatura mensual en el cantón de Cañas en el periodo 2015-2021.	34
Figura 21. Representación gráfica del promedio de precipitación mensual en el cantón de Cañas en el periodo 2015-2021.	34
Figura 22. Foto de una plaza de deportes en el distrito de Cañas, Cañas, en época lluviosa, en julio de 2020.....	35
Figura 23. Foto de una plaza de deportes en el distrito de Cañas, Cañas, en época seca, marzo 2021.	35
Figura 24. Representación gráfica de la velocidad promedio mensual del viento en el cantón de Cañas en el periodo 2015-2021.....	36
Figura 25. Relación entre la altura promedio de cada distrito y la cantidad de casos de NM reportados al 2021.....	37
Figura 26. Mapa de órdenes de suelo de Cañas, Guanacaste. Elaborado mediante <i>QGIS Desktop 3.18.1</i>	38
Figura 27. Tres muestras de suelo tamizadas a 1.18 mm del distrito de Palmira, Cañas, Guanacaste.	39

Figura 28. Fotografía de uno de los sitios de muestreo cercano a las faldas del Volcán Tenorio, Palmira, Cañas.	39
Figura 29. Tres muestras de suelo tamizadas a 1.18 mm del distrito de San Miguel, Cañas, Guanacaste.	40
Figura 30. Tres muestras de suelo tamizadas a 1.18 mm del distrito de Bebedero, Cañas, Guanacaste.	41
Figura 31. Tres muestras de suelo tamizadas a 1.18 mm del distrito de Porozal, Cañas, Guanacaste.	42
Figura 32. Tres muestras de suelo tamizadas a 1.18 mm del distrito de Cañas, Cañas, Guanacaste.	42
Figura 33. Mapa de uso de suelo para los cinco distritos de Cañas, Guanacaste. Elaborado mediante <i>QGIS Desktop 3.18.1</i>	43
Figura 34. Diez muestras de suelo al azar tamizadas a 20 μm	45
Figura 35. Mapa sobre la prevalencia de NM en Cañas, Guanacaste. Elaborado mediante <i>QGIS Desktop 3.18.1</i>	46
Figura 36. Muestras de aire tomadas en los cinco distritos del cantón de Cañas.	48
Figura 37. Imágenes obtenidas tras analizar la muestra mensual de Cañas, Cañas, mediante SEM-EDS. A la izquierda, imagen del microscopio electrónico de barrido ampliado 100x y a la derecha, con una resolución de 1500x, las medidas de algunas partículas.	49
Figura 38. Imágenes obtenidas tras analizar la muestra mensual de Palmira, Cañas, mediante SEM-EDS. A la izquierda, imagen del microscopio electrónico de barrido ampliado 100x y a la derecha, con una resolución de 1500x, las medidas de algunas partículas.	49
Figura 39. Imágenes obtenidas tras analizar la muestra mensual de San Miguel, Cañas, mediante SEM-EDS. A la izquierda, imagen del microscopio electrónico de barrido ampliado 100x y a la derecha, con una resolución de 1500x, las medidas de algunas partículas.	50
Figura 40. Imágenes obtenidas tras analizar la muestra mensual de Bebedero, Cañas, mediante SEM-EDS. A la izquierda, imagen del microscopio electrónico de barrido ampliado 100x y a la derecha, con una resolución de 1500x, las medidas de algunas partículas.	50
Figura 41. Imágenes obtenidas tras analizar la muestra mensual de Porozal, Cañas, mediante SEM-EDS. A la izquierda, imagen del microscopio electrónico de barrido ampliado 100x y a la derecha, con una resolución de 1500x, las medidas de algunas partículas.	51

Figura 42. Relación entre la concentración promedio de As obtenida en suelo versus la prevalencia de NM.	52
Figura 43. Relación entre la concentración promedio de As obtenida en suelo versus la prevalencia de NM.	52
Figura 44. Relación entre la concentración promedio de Cd obtenida en suelo versus la prevalencia de NM.	53
Figura 45. Relación entre la concentración promedio de Pb obtenida en suelo versus la prevalencia de NM.	54
Figura 46. Relación entre la concentración promedio de Pb obtenida en aire versus la prevalencia de NM.	55
Figura 47. Relación entre la concentración promedio de Si obtenida en suelo versus la prevalencia de NM.	56
Figura 48. Relación entre la concentración promedio de Si obtenida en suelo versus la prevalencia de NM.	56
Figura 49. Patrones de XRD de una muestra de suelo del distrito de Bebedero, Cañas, Guanacaste.	56
Figura 50. Patrones de XRD de una muestra de un ingenio reconocido del distrito de Cañas, Cañas Guanacaste.	57
Figura 51. Relación entre la concentración promedio de V obtenida en suelo versus la prevalencia de NM.	57
Figura 52. Relación entre la concentración promedio de V obtenida en suelo y aire versus la prevalencia de NM.	58
Figura 53. Muestra aérea recolectada por gravedad durante el fenómeno del paso del polvo del Sahara por Costa Rica en junio de 2020.	58

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Ejemplos de agentes causales asociados con el padecimiento de NM categorizados según su fuente de origen.	7
Cuadro 2. Cantidad de casos de ERC de causa no tradicional reportados en Cañas entre 2018-2022.	12
Cuadro 3. Síntomas de toxicidad o intoxicación aguda y crónica de algunos metales nefrotóxicos de importancia para este estudio.	20
Cuadro 4. Muestreos realizados en el campo en matrices ambientales de aire y suelo.	23
Cuadro 5. Distribución de muestras recolectadas según el distrito y la matriz ambiental correspondiente.	32
Cuadro 6. Estaciones meteorológicas automáticas consultadas para este proyecto.	33
Cuadro 7. Resumen de resultados obtenidos en muestras de suelo mediante PXRF y datos comparables de literatura.	44
Cuadro 8. Representación porcentual de la masa del producto tamizado a 20 μm en comparación con la masa total de la muestra.	45
Cuadro 9. Resultados obtenidos al analizar la totalidad de las muestras mediante PXRF y SEM-EDS.	47
Cuadro 10. Resultados obtenidos al analizar las 5 muestras mensuales mediante PXRF.	51
Cuadro 11. Resultados de un análisis completo mediante la técnica PXRF en una muestra del polvo del Sahara durante 2020.	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

(US) DHHS	<i>(United States) Department of Health and Human Services</i>
(US) EPA	<i>(United States) Environmental Protection Agency</i>
ACECANH	Asociación Centroamericana y del Caribe de Nefrología e Hipertensión
AKF	<i>American Kidney Fund</i>
As	Arsénico
ASCONE	Asociación Costarricense de Nefrología
ATSDR	<i>Agency for Toxic Substances and Disease Registry</i>
CAIS	Centro de Atención Integral en Salud
CCSS	Caja Costarricense del Seguro Social
Cd	Cadmio
CENCAM	<i>Consortium for the Epidemic of Nephropathy in Central America and Mexico</i>
ERC	Enfermedad Renal Crónica
ERCnt	Enfermedad Renal Crónica de causas no tradicionales
Hg	Mercurio
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i>
ICP-OES	Espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente
IRC	Insuficiencia Renal Crónica
KDIGO	<i>Kidney Disease: Improving Global Outcomes</i>
LD	Límites de detección
NM	Nefropatía Mesoamericana
OS	Estrés Oxidativo
Pb	Plomo
PM	Material Particulado
PXRF	Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X
SALTRA	Programa Salud, Trabajo y Ambiente de la Universidad Nacional de Costa Rica

SEM-EDS	Microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de energía dispersiva
Si	Sílice
TFG	Tasa de Filtración Glomerular
Ti	Titanio
TTU	<i>Texas Tech University</i>
V	Vanadio

RESUMEN

La enfermedad renal crónica de causa no tradicional representa un problema de salud pública en determinados países. Regiones de Mesoamérica han reportado casos en casi toda la costa pacífica del territorio. Costa Rica no es la excepción, la patología y su mortalidad asociada se manifiestan en el Pacífico Norte, siendo el cantón de Cañas, Guanacaste, uno de los más afectados en cuanto a casos reportados. Existen factores ambientales, que se vuelven cada vez más significativos en investigación, asociados con la enfermedad: altas temperaturas, baja humedad relativa, velocidad del viento predominante y baja altitud son algunos de ellos. Los patrones de formación geológica y composición del suelo parecen ser relevantes en este contexto, debido a que se pueden encontrar dosis bajas de metales pesados que tienen como órgano blanco el riñón; arsénico, cadmio, mercurio, plomo, sílice y vanadio entre ellos. El objetivo de esta investigación fue determinar el contenido de metales nefrotóxicos presente en partículas de las matrices ambientales aire y suelo en diferentes épocas del año entre 2020-2021 en los 5 distritos Cañas, Palmira, San Miguel, Bebedero y Porozal. Para ello, se tomaron 72 muestras regionales de suelo, a 50 cm de profundidad cada una y procurando lugares públicos de reunión, para conocer sus características fisicoquímicas; 5 muestras atmosféricas por gravedad, durante 30 días, para conocer la carga contaminante; y 10 muestras de 24 horas por impactación, para conocer la calidad del aire en ciertos sectores. La cuantificación en las matrices concluye en que existen concentraciones promedio de As 6.08 mg/kg, Cd 12.14 mg/kg, Pb 6.49 mg/kg, Si 116 273 mg/kg y V 165.16 mg/kg en los suelos de la región. Por su parte, las concentraciones diarias promedio halladas en aire son de As 12.75 mg/kg, Pb 12.14 mg/kg, Si 429 370 mg/kg y V 154.54 mg/kg de material particulado. Lo anterior, aunado a las condiciones ambientales predominantes de la región, evidencia un riesgo y manifiestan un escenario de exposición positivo para la población.

Palabras clave: Nefropatía Mesoamericana, material particulado, suelo, metales pesados nefrotóxicos, Costa Rica.

ABSTRACT

Chronic kidney disease of unknown cause represents a public health issue in certain countries. Mesoamerican regions have reported cases in almost all the Pacific coast of the territory. Costa Rica is not the exception, the pathology and its associated mortality are manifested in the North Pacific region, being Cañas, Guanacaste, one of the most affected places in terms of reported cases. There are environmental factors, which are becoming increasingly significant in research, associated with the disease: elevated temperatures, low relative humidity, wind speed and direction, and low altitude are some of them. Geological formation patterns and soil composition are relevant in this context because it is common to find low doses of heavy metals affecting the kidney, such as arsenic, cadmium, mercury, lead, silica, and vanadium among them. The objective of this research was to determine the content of nephrotoxic heavy metals present in air particles and soil environmental matrices at different seasons in the five districts of Cañas, Palmira, San Miguel, Bebedero, and Porozal during 2020-2021. For this purpose, seventy-two regional soil samples were taken, each at a depth of 50 cm and from public gathering places, to determine their physicochemical characteristics, five atmospheric samples by gravity, for 30 days, to determine the pollutant load, and ten 24-hour samples by impact, to determine the air quality in certain areas. Experimental analyses concluded that there are average concentrations of As 6.08 mg/kg, Cd 12.14 mg/kg, Pb 6.49 mg/kg, Si 116 273 mg/kg and V 165.16 mg/kg in the soils of the region. The average daily concentrations found in air are As 12.75 mg/kg, Pb 12.14 mg/kg, Si 429 370 mg/kg and V 154.54 mg/kg from particulate matter. The above, together with the predominant environmental conditions in the region, exhibit a toxicological risk for the population.

Key words: Mesoamerican Nephropathy, particulate matter, soil, nephrotoxic heavy metals, Costa Rica.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, en Costa Rica, cada vez más personas son diagnosticadas con enfermedad renal crónica (ERC). Hasta marzo de 2019 se contabilizaron 27 000 casos de costarricenses con ese padecimiento, los cuales son atendidos en algún hospital de la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS) en todo el país (Chavarría & Chacón, 2020). Un 70% de ellos presenta un grado inicial de la enfermedad, el resto la padece en etapas avanzadas (entre III y V). Casi 1 000 de ellos (etapa V) son quienes necesitan un trasplante renal o apegarse a tratamientos de diálisis de por vida (Bustamante, 2018). La tasa de incidencia (casos nuevos por año) pasó de 133.8 por cada 100 000 habitantes en el 2016 a 244.6 en el año 2018. La mortalidad por esta causa también se ha visto en aumento, pues en los últimos diez años se pasó de 600 fallecimientos anuales a 1800 en la actualidad (Cerdas Calderón, 2005).

La ERC es la cuarta causa de muerte prematura en el país entre la población joven, después de las enfermedades cardiovasculares, las demencias y el cáncer, según el Dr. Manuel Cerdas del Servicio de Nefrología del Hospital México (2005). La incidencia acumulada de mortalidad por Insuficiencia Renal Crónica en el periodo 2000-2016, la encabezaron respectivamente los cantones guanacastecos de Cañas (34.53), Bagaces (28.86) y Carrillo (22.54); por su parte, la incidencia acumulada nacional para este mismo periodo se estableció en 6.37 (Ministerio de Salud, 2018).

La Asociación Centroamericana y del Caribe de Nefrología e Hipertensión (ACECANH), manifestó en el año 2017 el consenso científico que afirma que la exposición a metales pesados es un factor de riesgo determinado para el padecimiento de ERC. La Nefropatía Mesoamericana (NM) es una forma de ERC endémica de la costa del Pacífico de Centroamérica, con elevada mortalidad de varones jóvenes dedicados a labores agrícolas (García-Trabanino *et al.*, 2017). Diferentes autores afirman que la NM tiene un componente ocupacional y ambiental importante (de Arriba *et al.*, 2021; Roncal-Jimenez, García-Trabanino, Barregard, *et al.*, 2016; Roncal-Jimenez, García-Trabanino, Wesseling, *et al.*, 2016). La contaminación atmosférica puede causar efectos adversos agudos y crónicos en la salud humana por ingesta, contacto dérmico y exposición por inhalación. Estos efectos van desde una irritación menor de las vías respiratorias superiores, hasta enfermedades respiratorias y cardíacas crónicas, cáncer de pulmón, hígado, riñones, infecciones respiratorias agudas en niños y bronquitis crónica en adultos. (Kampa & Castanas, 2008; Peled, 2011).

Estudios previos en los suelos de la región de interés, confirman la presencia de metales pesados nefrotóxicos, por ejemplo; arsénico, cadmio, mercurio, plomo; y metales que tienen como órgano blanco al riñón, tales como vanadio y sílice (Mayorga López, 2022; Zimmerman *et al.*, 2021). Una vez que se considera que el escenario de exposición es concordante con un ingreso de contaminantes vía oral y por inhalación, es de suma importancia estudiar las matrices de aire y suelo de la zona de Cañas, pues se considera que en ellos se encuentran partículas de tamaño relevante en concordancia con las vías de ingreso de los contaminantes previamente descritas.

Por esta razón, se decide cuantificar la concentración de metales pesados nefrotóxicos en muestras de aire y suelo en los 5 distritos del cantón de Cañas, Guanacaste, Costa Rica, durante la época seca y lluviosa, con la finalidad de establecer si existe una posible relación entre los metales pesados encontrados y la prevalencia de la enfermedad en la región descrita. Para ello, se tomó un total de 72 muestras de suelo, las cuales fueron analizadas posteriormente mediante Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X (PXRF) y Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES); 2 muestras atmosféricas estacionales de 24 horas por distrito para un total de 10 y 5 muestras de material particulado por 30 días, una por distrito, analizadas mediante PXRF. Con base en los resultados se estableció una relación entre la disponibilidad de metales pesados nefrotóxicos en partículas terrestres y atmosféricas con una vía de ingreso corporal predominante por ingestión e inhalación, y la prevalencia de la NM en el sitio de estudio.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar el contenido de metales nefrotóxicos presente en partículas de las matrices ambientales aire y suelo en las estaciones seca y lluviosa entre 2020 y 2021, en el cantón de Cañas, provincia de Guanacaste, sitio con alta prevalencia de Nefropatía Mesoamericana.

2.2 Objetivos específicos

Caracterizar fisicoquímicamente el material particulado disponible en diferentes épocas climáticas en el periodo 2020-2021, en el cantón de Cañas, Guanacaste.

Cuantificar la concentración de metales pesados relevantes (arsénico, cadmio, mercurio, plomo, vanadio y sílice), en muestras de suelo y aire, que corresponden a un escenario de exposición toxicológico positivo para la población del cantón mencionado.

Establecer la posible relación entre la concentración de metales pesados determinada en las matrices ambientales y la prevalencia de la enfermedad en los distritos de Cañas, Porozal, San Miguel, Bebedero y Palmira.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

En esta sección se muestra un compendio de literatura y datos teóricos existentes hasta 2021 sobre la Enfermedad Renal Crónica, de causas conocidas y desconocidas, específicamente en el contexto costarricense. Se hará un abordaje desde las matrices de aire y suelo como vías de movilización de contaminantes, que inciden en un escenario de exposición toxicológico positivo ante metales pesados nefrotóxicos en el ambiente.

3.1 *Enfermedad Renal Crónica*

La Enfermedad Renal Crónica (ERC) o nefropatía crónica se asocia a una disminución lenta y progresiva de la capacidad de los riñones para filtrar los productos metabólicos de desecho presentes en la sangre, lo que interfiere con la capacidad de mantener la homeostasis de líquidos y electrolitos en el cuerpo (Gómez Carracedo *et al.*, 2007; Malkina, 2020; Ribes, 2004). Una lesión renal aguda se convierte en ERC si la función no se recupera después del tratamiento, es por ello que progresa a insuficiencia renal crónica (IRC). Sin embargo, en las fases iniciales del padecimiento hay pocas anomalías evidentes debido a que el tejido funcional remanente aumenta su capacidad, resultando en lo que se conoce como adaptación de la funcional renal, según lo explica la organización *American Kidney Fund* (2021) y otros autores (Mendez, 2018; Organización Panamericana de la Salud, 2009).

El diagnóstico se establece mediante un análisis de sangre y de orina. La organización internacional *Kidney Disease: Improving Global Outcomes* (KDIGO, por sus siglas en inglés) manifiesta un diagnóstico positivo para ERC cuando: (1) la Tasa de Filtración Glomerular (TFG) del paciente es menor que $60 \text{ mL/min/1.73 m}^2$, o (2) existen anomalías funcionales y estructurales del riñón con o sin alteración de la TFG (ver Figura 1); y la presencia de daño renal se prolonga por 3 meses o más, independientemente de la causa (Gorostidi *et al.*, 2014; Levey *et al.*, 2003, 2005; Noordzij *et al.*, 2005). La TFG equivale al volumen de fluido filtrado por unidad de tiempo desde los capilares glomerulares renales hacia el interior de la cápsula de Bowman, en palabras simples, el volumen de sangre que puede ser filtrado por unidad de tiempo en los riñones (Matsushita *et al.*, 2010, 2015).

Por su parte el Manual Merck manifiesta que los síntomas pueden incluir micción nocturna, cansancio, náuseas, prurito o picor, espasmos musculares y calambres, pérdida de sensibilidad, confusión, ahogo y coloración marrón-amarillenta de la piel. Los factores de riesgo más comunes

en el padecimiento de ERC, según la comunidad médica, son la diabetes mellitus, la hipertensión, la obesidad, enfermedades renales preexistentes (*e.g.* obstrucción de las vías urinarias, anomalías de los riñones) y los trastornos autoinmunitarios en los que los anticuerpos lesionan los glomérulos y los túbulos de los riñones. Además, los pacientes se caracterizan en su mayoría por ser de edad avanzada (Comisión Técnica Regional, 2007; Malkina, 2018).

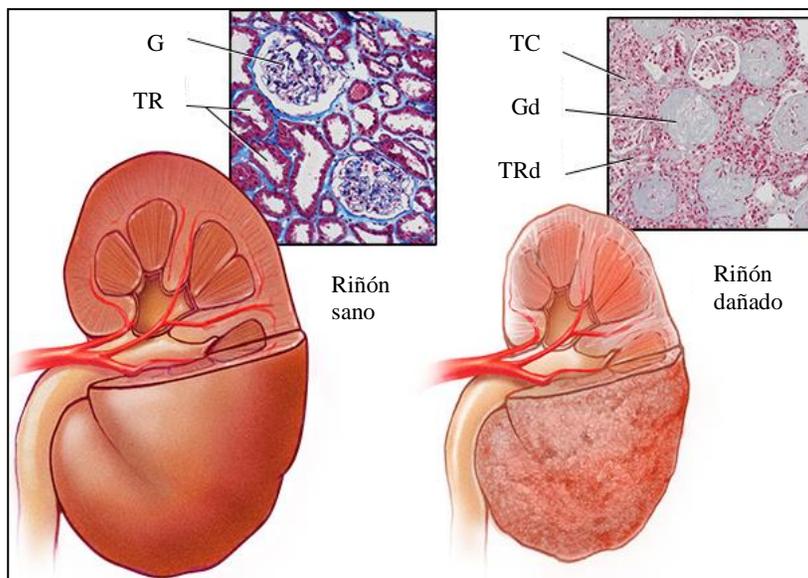


Figura 1. Ejemplificación de las condiciones visuales de un riñón sano y uno con ERC. A la izquierda se muestra una imagen de un riñón sano y una tinción de tejido renal sano, en donde se muestran túbulos renales (TR) y glomérulos (G) bien definidos. A la derecha, una imagen de un riñón dañado con ERC en donde se visualizan tejido cicatricial (TC) y cambios estructurales, tanto en el exterior como en la forma y tamaño de glomérulos (Gd) y túbulos renales dañados (TRd) presentes en la tinción. (Mayo Foundation for Medical Education and Research, 2021).

El tratamiento consiste en restringir los líquidos, el sodio y el potasio de la dieta, ingesta de medicamentos para corregir o controlar enfermedades adyacentes (*e.g.* diabetes, hipertensión, anemia, entre otros) y, cuando es necesario, diálisis, hemodiálisis o un trasplante renal (Malkina, 2018). Cuando el deterioro de la actividad renal es grave (IRC) la supervivencia se limita por lo general a varios meses en las personas que no reciben tratamiento alguno, por el contrario, las que han recibido diálisis pueden vivir mucho más tiempo. Sin embargo, incluso con diálisis, las personas con IRC fallecen antes que el promedio (Ashe-Goins *et al.*, 2021; de Arriba *et al.*, 2021; Ribes, 2004).

3.2 Nefropatía Mesoamericana (NM)

La aparición de una forma de ERC de causa no identificada o no tradicional (ERCnt) y de alta prevalencia en varones jóvenes trabajadores agrícolas de los países centroamericanos, se ha

convertido en un importante reto sanitario y epidemiológico para la región (Correa-Rotter *et al.*, 2014; García-Trabanino *et al.*, 2017). Los pacientes con ERCnt o Nefropatía Mesoamericana (NM) se caracterizan porque no existe precedente de enfermedad renal, es decir, no han recibido atención médica previa por dicha causa cuando acuden al centro médico, ni son conocidos como portadores de alguna enfermedad asociada o factor de riesgo típico para ERC hasta el momento en el que consultan, y es descubierto en etapas avanzadas (IV y V), cuando comúnmente requieren tratamiento dialítico (Marín-Trigueros *et al.*, 2020; Valladares Sánchez *et al.*, 2017).

En etapas iniciales (I, II y III), la mayoría de los pacientes son asintomáticos y solo son diagnosticados por la coexistencia de una TFG alterada, acompañada de proteinuria leve o moderada. Por lo general, se presenta con un síndrome urémico grave, pero con potasemia normal o levemente disminuida, sin evidencia de retención hídrica o edemas, y en ocasiones con anemia, hiponatremia e hipomagnesemia. El examen por ultrasonido usualmente no presenta daños visibles o signos de enfermedad, por lo que, al no presentar anomalías externas en imagenología médica, es de gran dificultad detectar la NM en etapa temprana (García-Trabanino *et al.*, 2017; McClure *et al.*, 2014; Roncal-Jimenez, García-Trabanino, Wesseling, *et al.*, 2016). En la Figura 2 se evidencian dos tinciones de muestras de pacientes con el padecimiento, sin embargo, en la tinción (a) el tejido no presenta variaciones visuales significativas, mientras que la muestra interna (b) ejemplifica, a simple vista, cambios significativos en su estructura.

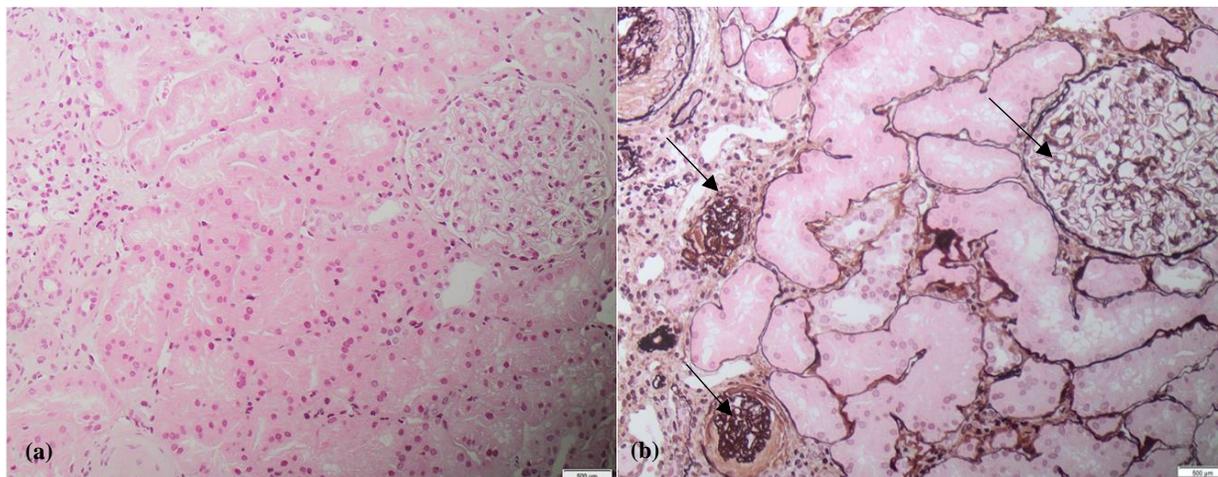


Figura 2. Muestras de tejido renal con NM vistas en microscopio ampliado a 500 µm. (a) Tinción de HE (hematoxilina-eosina) de una muestra de tejido renal normal de un paciente con NM. (b) Tinción de PAS (*Periodic Acid-Schiff*) de una muestra de tejido renal de un paciente con NM: glomerulos esclerosados y agrandados, fibrosis intersticial y túbulos inflamados. (García-Trabanino & Correa-Rotter, 2020).

Si bien, hasta la fecha no existe un perfil causal estandarizado para la determinación de la enfermedad, investigaciones científicas durante la última década han permitido concordar en un

perfil causal provisional para la enfermedad (Chavarría & Chacón, 2020). En el Cuadro 1 se ejemplifican agentes causales de NM propuestos por expertos de diferentes regiones que se consideran relevantes para la presente investigación, la mayoría de los factores se establecieron durante el Segundo Taller Internacional del CENCAM realizado en San José, Costa Rica, en noviembre de 2015.

Cuadro 1. Ejemplos de agentes causales asociados con el padecimiento de NM categorizados según su fuente de origen.

Agente causal	Ejemplos			
Sustancias químicas	Agroquímicos	2,4-D Clorpirifos	Glifosato Paraquat	Cipermetrina
	Metales	Arsénico Plomo	Cadmio Sílice cristalino	Mercurio Vanadio
Otras	Exposición laboral		Deshidratación Golpe de calor	

(Fuente: Adaptado de García-Trabanino, (2017)).

3.3 Antecedentes de la NM

3.3.1 Contexto histórico

El resumen informativo de la enfermedad que se presenta a continuación se recabó mediante el sitio web oficial de la Asociación Centroamericana y del Caribe de Nefrología e Hipertensión (ACECANH). Alrededor del año 1999 en El Salvador, un grupo de médicos notó que un número alto de pacientes acudía al hospital por primera vez, con diagnóstico de ERC, a recibir tratamiento dialítico y que muchos de ellos desempeñaban labores agrícolas. A partir de ese momento, se inician investigaciones para determinar el perfil epidemiológico de estos pacientes (Asociación Centroamericana y del Caribe de Nefrología e Hipertensión, 2017). El estudio describió que había un importante número de pacientes, mayoritariamente adultos jóvenes masculinos, que procedían principalmente de las zonas de la costa del océano Pacífico y que no presentaban los factores típicos de riesgo para ERC: diabetes mellitus e hipertensión (Johnson *et al.*, 2019). Como consecuencia del estudio anterior, se plantea la hipótesis de que los plaguicidas o los metales pesados en los mantos acuíferos podrían estar causando daño renal en este elevado número de pacientes (Trabanino, 2002).

3.3.2 Contexto geográfico

Tal y como se ha explicado anteriormente, la enfermedad presenta una tendencia geográfica particular; se identifica en su mayoría en pobladores de la región pacífica de Mesoamérica, tal y como se evidencia en la Figura 3. “A pesar de que la NM está claramente caracterizada en ciertas zonas costeras de El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Guatemala, se carece todavía de estudios apropiados de prevalencia en la mayor parte de la región.” (Wijkström *et al.*, 2013). Sin embargo, otros autores explican que, en Veracruz, México y el estado de California, Estados Unidos, existen zonas en las que se ha observado un número significativo de casos de ERC con un perfil epidemiológico diferenciado, similar al descrito en Centroamérica (Johnson *et al.*, 2019).



Figura 3. Regiones en donde se ha documentado la presencia de la nefropatía mesoamericana. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha, marcadas en color rojo las áreas afectadas, en orden respectivo: (1) México, (2) Guatemala, (3) El Salvador, (4) Honduras, (5) Nicaragua, y (6) Costa Rica. Modificado de García-Trabanino (2017).

3.3.3 Factores socioeconómicos

El eje laboral de la población diagnosticada con NM en la región coincide con la actividad agrícola. Entre los principales cultivos está la caña de azúcar, el de mayor importancia y extensión en el área afectada, y los de café, algodón y maíz (American Society of Nephrology, 2018; Johnson *et al.*, 2019). La relación previamente establecida entre la NM y la actividad agrícola radica en las largas horas de trabajo extenuante y continuo en una actividad al aire libre (ver Figura 4), así como la sudoración profusa en ausencia de hidratación adecuada (Carl-Gustaf *et al.*, 2015; McClure *et*

al., 2014). Por último, la mayoría de los pacientes incluidos en estudios de caracterización clínica de la NM, son personas provenientes de áreas rurales, que se ven afectados por condiciones sociales de extrema pobreza, servicios de salud de difícil acceso, y deficiencias en el acceso a servicios básicos como agua potable y electricidad (Fernández-Rojas, 2018). Con respecto al factor género, existen autores que afirman que se presenta una proporción masculina de 3:1 en comparación con la población femenina afectada. Para el factor edad, el promedio etario de pacientes con ERC se encuentra entre los 50 y 60 años. En contraste, los pacientes que son diagnosticados con NM, suelen ser pacientes jóvenes entre 20 y 30 años (Marín-Trigueros *et al.*, 2020).



Figura 4. Fotografía tomada durante una jornada de trabajo en un ingenio en el distrito de Bebedero, Cañas, Guanacaste.

3.3.4 Factores ambientales

Fernández Rojas (2018) analizó, en la costa pacífica centroamericana, factores de riesgo en pacientes con ERC de causa desconocida. El estudio recabó información sobre la función renal en trabajadores de cultivo de caña de azúcar a diferentes altitudes. El autor concluye que los pacientes diagnosticados con NM viven en áreas costeras, a una altitud menor o igual a 200 metros sobre el nivel del mar; además, demostró que sujetos de investigación que tenían una concentración de creatinina plasmática más elevada y una menor TFG, vivían y trabajaban en altitudes bajas, pero a mayores altitudes, los trabajadores no experimentaban estos hallazgos de laboratorio, aunque las condiciones de trabajo y el uso de agroquímicos fuera similar en ambos grupos. Es importante destacar que una disminución en la TFG conlleva un ligero aumento de la creatinina

plasmática, como consecuencia, con TFG levemente reducidas la creatinina plasmática puede arrojar valores de creatinina normales o casi normales, por lo tanto, diagnosticar con los resultados únicamente de este biomarcador no es adecuado (Fernández-Fresnedo *et al.*, 2002). En su tesis Fernández Rojas determinó que factores ambientales como la altitud, la humedad, temperatura y el clima tropical son incidentes en el desarrollo de la NM (Fernández Tena & Casan Clarà, 2012; García-Trabanino *et al.*, 2017; Roncal-Jimenez, García-Trabanino, Barregard, *et al.*, 2016). En la Figura 5, se ejemplifica mediante una fotografía las condiciones climáticas durante la época lluviosa en un camino de Bebedero, frecuentemente transitado, con dirección a Cañas, Cañas Guanacaste.



Figura 5. Foto del distrito de Bebedero en Cañas, en época lluviosa, octubre de 2020.

3.4 Situación de Costa Rica

En el 2012, el Programa Salud, Trabajo y Ambiente de la Universidad Nacional de Costa Rica, SALTRA, organizó una reunión regional en Costa Rica con expertos en la temática. A partir de este momento, se denomina a la enfermedad como la “Nefropatía Mesoamericana”. Como consecuencia se crea en Costa Rica, la Comisión de Gestión Institucional de Nefropatía Mesoamericana y la Comisión Nacional Interinstitucional de Nefropatía Mesoamericana mediante las cuales las autoridades costarricenses legislan sobre el trabajo en zonas calientes y el estrés térmico a través del decreto ejecutivo N.º 38372-S (Ministerio de Salud, 2018).

Cada año, la Caja Costarricense del Seguro Social (CCSS) invierte \$8 640 (según el tipo de cambio actual, ₡5 832 000 aproximadamente,) en cada paciente que recibe diálisis peritoneal

crónica ambulatoria; mientras que invierte \$124 800 (al menos ₡84 240 000) en quienes reciben hemodiálisis. “*La ERC es la cuarta causa de muerte prematura en el país entre población, después de las enfermedades cardiovasculares, las demencias y el cáncer*” (Bustamante, 2018). En julio del 2017, se inició la implementación del protocolo para la atención de la persona con ERC en la red de servicios de la CCSS, dirigido a la prevención, diagnóstico temprano y tamizaje a los pacientes con riesgo, entre ellos diabéticos, hipertensos y con otras enfermedades asociadas a la ERC (Cerdas Calderón, 2005; Cordero Parra, 2018; Ministerio de Salud, 2018).

3.4.1 Provincia de Guanacaste, Costa Rica

De acuerdo con el estudio “Mortalidad y egresos hospitalarios por enfermedad renal crónica compatibles con enfermedad crónica de causas no tradicionales”, realizado en Costa Rica, la zona de Guanacaste muestra una tendencia al incremento progresivo en un rango de edad prematuro, entre los 30-34 años. Es decir, se adelanta 20 años a la tendencia nacional. (McClure , 2014). El jefe de Nefrología del Hospital México, Manuel Cerdas indicó al periódico Semanario Universidad en 2018:

“En el caso de la Nefropatía Mesoamericana de Guanacaste, lo que caracteriza al paciente es que son hombres que desempeñan una labor en el área agrícola, trabajan grandes jornadas expuestos a altas temperaturas e incluso con deshidratación. Por ahí va la hipótesis, de que esté asociado a cambio climático, deshidratación y esfuerzo físico” (Cordero Parra, 2018).

El Centro de Atención Integral en Salud (CAIS) de Cañas cuenta con una Unidad de Diálisis Peritoneal para atender pacientes que necesitan aplicarse el tratamiento hasta cinco veces al día. Allí se atiende a pacientes de los cantones Bagaces y Cañas (ver Cuadro 2) pues cuentan con el mayor índice de afectación en la provincia guanacasteca, tal y como se evidencia en la Figura 6 en donde el rojo más oscuro representa los sectores más afectados y los amarillos los menos afectados de la provincia.

Cuadro 2. Cantidad de casos de ERC de causa no tradicional reportados en Cañas entre 2018-2022.

Distrito	Cantidad estimada de habitantes	Casos reportados	Porcentaje estimado de población afectada	Tasa de ERCnt por cada 100 000 habitantes
Cañas	26577	626	2.36%	2355
Palmira	1361	14	1.03%	1029
San Miguel	2076	37	1.78%	1782
Bebedero	2582	108	4.18%	4183
Porozal	797	2	0.25%	251

(Fuente: Ministerio de Salud (2022), Instituto Nacional de Estadística y Censos (2021) y Caja Costarricense del Seguro Social (2019)).



Figura 6. Mapa cantonal de afectación por Enfermedad Renal Crónica en la provincia de Guanacaste, según su tasa de mortalidad. (Ministerio de Salud, 2018).

3.5 Contaminantes ambientales

3.5.1 Contaminantes atmosféricos

Los contaminantes atmosféricos primarios provienen de diversas fuentes, por lo que su naturaleza física y su composición química es muy variada. De acuerdo con sus características se agrupan según su estado físico (caso de partículas y metales), o elemento químico común (caso de los contaminantes gaseosos). Los contaminantes más frecuentemente emitidos a la atmósfera, que causan de alteraciones ambientales son: los aerosoles, en los que se incluye el polvo con partículas

sedimentables, en suspensión y los humos, además de, los óxidos de azufre, el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el ozono (Pignatello, 2010).

Además, existe una serie de contaminantes que se presentan menos comúnmente, pero que pueden afectar la salud por ser muy perjudiciales. Estos son: otros derivados del azufre y del nitrógeno; halógenos y sus derivados; As y sus derivados; componentes orgánicos; partículas de metales pesados y ligeros, como plomo, mercurio, cobre, zinc, y partículas de sustancias minerales, como el amianto y los asbestos (Carnicer-Blasco, 2007). La contaminación atmosférica puede causar efectos adversos agudos y crónicos en la salud humana por ingestión, contacto dérmico y exposición por inhalación; estos efectos van desde una irritación menor de las vías respiratorias superiores hasta enfermedades respiratorias y cardíacas crónicas, cáncer de pulmón, hígado, riñones, infecciones respiratorias agudas en niños y bronquitis crónica en adultos (Kampa & Castanas, 2008; Peled, 2011).

3.5.2 Material Particulado PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1

El interés en el estudio de los aerosoles ha aumentado ampliamente en los últimos años debido a su impacto en la calidad del aire, la salud humana y el cambio climático. La movilidad de partículas ambientales y antropogénicas influye en la formación y acumulación de aerosoles contaminantes a escala regional o incluso continental, debido a que se encuentran directamente asociados a condiciones meteorológicas circundantes. Estudios epidemiológicos coinciden en que existe una relación entre la exposición a partículas y las infecciones respiratorias, diferentes tipos de cáncer, enfermedades cardiovasculares agudas, entre otros, por lo cual, se convierten en un factor ambiental de riesgo para la salud (Kappos *et al.*, 2004; Romieu *et al.*, 2012). Por razones prácticas, una clasificación común del PM es por el diámetro aerodinámico de las partículas, así PM_{10} o partículas gruesas son aquellos aerosoles con diámetro menor a $10\ \mu\text{m}$, $PM_{2.5}$ o partículas finas, con diámetro menor a $2.5\ \mu\text{m}$ y PM_1 o partículas ultrafinas, con diámetro menor a $1\ \mu\text{m}$ (Kampa & Castanas, 2008).

La Organización Mundial de la Salud establece regulaciones alrededor de la exposición ante dichos aerosoles, y establece, por ejemplo, que las partículas PM_{10} pueden depositarse en las vías respiratorias y provocar otros problemas de salud como irritación de ojos y garganta, tos, dificultad para respirar y puede agravar el asma. Por su parte, las $PM_{2.5}$ pueden entrar en los pulmones, afectándolos con mayor gravedad y facilidad, y en el torrente sanguíneo causando problemas cardiovasculares y pulmonares crónicos. Por último, las PM_1 entran directamente al

torrente sanguíneo, por lo cual, pueden llegar a afectar cualquier órgano interno según los procesos de depuración y eliminación de sustancias en el cuerpo. Recientemente, se encontró que el $PM_{2.5}$ presenta mayores efectos negativos en la salud de hombres que de mujeres de una misma región (US EPA, 2021; World Health Organization, 2003).

3.5.3 Suelo como matriz contaminante

A nivel científico, el suelo es reconocido por proveer bienes y servicios ambientales y ecosistémicos para los seres vivos de su entorno. Los suelos establecen intercambios gaseosos vitales para permitir la vida en la Tierra, entre ellos, la absorción de oxígeno (O_2) y metano (CH_4) y la expulsión de dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O). Estas interacciones influyen directamente en la composición de gases atmosféricos y en la regulación térmica del planeta, debido a que la evaporación de las partículas de humedad en el suelo corresponde a la mayor fuente de vapor de agua, alterando la temperatura, composición del aire y los patrones climáticos de cada región (R. Miller & Donahue, 1992; Weil & Brady, 2016).

En zonas donde los suelos se caracterizan por ser secos, con estructura poco definida, poco compactos y sin vegetación, las partículas finas del suelo pueden movilizarse fácilmente gracias al viento, resultando como consecuencia gran cantidad de partículas de polvo en el aire. Lo anterior puede provocar reducción en la visibilidad, aumento de los riesgos en la salud por inhalación de aire o partículas peligrosas (partículas de polvo como vehículo de pesticidas o metales) y alteración en la temperatura del sitio de estudio (Abou , 2019; Deshmukh & Aher, 2014; Itabashi , 2019). Según Chacón (2019), en los cantones de Cañas, Bagaces, Los Chiles y Aguas Zarcas, para la recolección de datos del Atlas Geoquímico de Costa Rica “se registró la presencia (en suelo) de arsénico con los valores máximos encontrados de 8,83 miligramos por kilogramo (mg/kg)”, tal y como se evidencia en la Figura 7. En esta misma noticia del periódico Semanario Universidad afirman que también, se documentó plomo y cadmio en ciertas zonas de Guanacaste aledañas al Río Tempisque, además de la presencia de arsénico en diferentes cuerpos de agua de los cantones de Bagaces, Cañas, Los Chiles y Aguas Zarcas (Chacón, 2019).

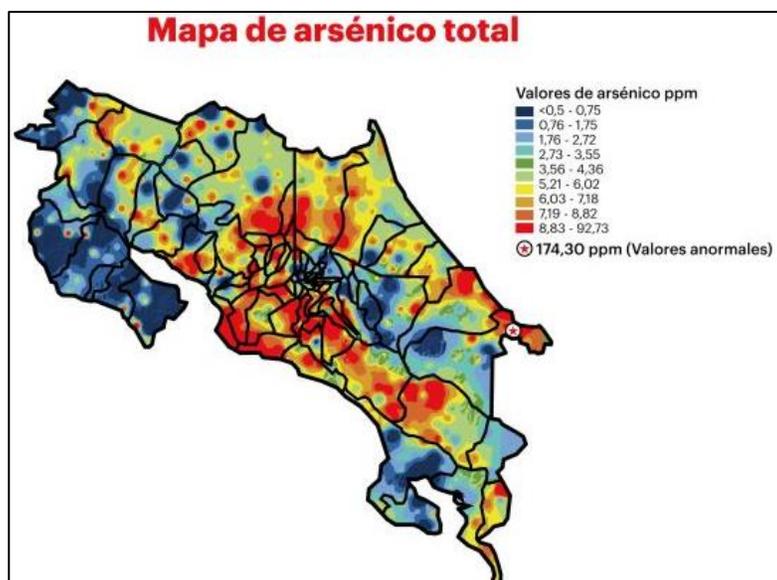


Figura 7. Valores de arsénico total reportados en la primera versión del Atlas Geoquímico de Costa Rica. (Chacón, 2019).

3.6 Metales pesados nefrotóxicos

En esta subsección se describen propiedades características generales de los metales nefrotóxicos de importancia en este proyecto. Es importante destacar que cada uno de los elementos en estudio presenta rasgos de toxicidad diferenciados según la dosis y el periodo de exposición al contaminante, los cuales determinan el efecto adverso que tendrá el tóxico en la salud humana, dicha información se encuentra resumida en el Cuadro 3 al finalizar este apartado.

3.6.1 Arsénico (As)

El arsénico se encuentra generalmente en el medio ambiente combinado con otros elementos como oxígeno, cloro y azufre. Una de las fuentes de contaminación por As se ha producido como resultado de procesos geológicos naturales en rocas sedimentarias y metasedimentarias. Los seres humanos están expuestos al As en el aire, los alimentos y el agua (Jaishankar *et al.*, 2014).

La toxicocinética del As inorgánico ha sido bien documentada por varias investigaciones, mediante las cuales se ha determinado que: tanto el arseniato como el arsenito son bien absorbidos por la vía oral y por inhalación; la absorción por la vía dérmica no ha sido bien caracterizada, pero es baja en comparación con las otras vías; la tasa de absorción de As en formas altamente insolubles (*e.g.* sulfuro de arsénico, arseniato de plomo) es mucho menor que la de las formas más solubles por vía oral y por inhalación (Institut national de recherche et de sécurité, 2008; Medina-Pizzali ,

2018; Abdul , 2015; Peters , 2015; Prabu & Muthumani, 2012; Rana , 2018). Hasta la fecha, la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (*IARC*, por sus siglas en inglés) ha demostrado la capacidad del As para inducir tumores cancerosos en el hígado, riñón y próstata. El As tiene efectos negativos en los riñones a pesar de que, una parte de los pacientes expuestos al contaminante no informan signos clínicos de lesión renal significativa, aún cuando otros sistemas se ven afectados (International Agency for Research on Cancer (*IARC*), 2012; Koedrith *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2015).

3.6.2 Cadmio (Cd)

El cadmio es un metal importante por su uso industrial pero también es uno de los metales más peligrosos por su acumulación en el medio ambiente. El Cd (como óxido, cloruro y sulfato) se moviliza en el aire como partículas o vapores por lo que puede ser transportado largas distancias en la atmósfera. El Cd y sus compuestos pueden viajar por el suelo, pero su movilidad depende de varios factores como el pH y la cantidad de materia orgánica (Satarug *et al.*, 2011). Se conoce que el Cd metálico y las sales de Cd no se absorben bien; aproximadamente el 25%, 1-10% o <1% de la dosis se absorbe después de la inhalación, exposición oral o dérmica respectivamente (Environmental Protection Agency, 1999; Paschal *et al.*, 2000; Tello, 2015).

Después de la absorción, el Cd se distribuye por todo el cuerpo a través de la sangre; las concentraciones más altas se encuentran en el hígado y el riñón produciendo daños irreversibles, aún para concentraciones reducidas. Por otra parte, el tiempo de permanencia en estos órganos puede ser muy elevado pues, el tiempo de vida media del Cd en el organismo es de 30 a 40 años; además, las principales vías de excreción son orina y heces. Por orina, diariamente se elimina 0.007% del contenido corporal y por heces 0.03% (Ramírez, 2013). El Registro Internacional de Sustancias Químicas Potencialmente Tóxicas reporta como valor crítico 10-15 mg Cd en el organismo, es decir, a la cantidad que debe bioacumularse diariamente para que se produzca un deterioro de la función renal después de 50 años (Institut national de recherche et de sécurité, 2019; Qing , 2021; Yang , 2009).

3.6.3 Mercurio (Hg)

La presencia del mercurio en el ambiente se encuentra en estado orgánico, inorgánico y metálico. El Hg puede llegar al organismo por medio de inhalación, vía oral y cutánea. Los compuestos inorgánicos pueden ingresar por las vías respiratorias y llegar a la sangre con una

eficiencia del 80%; mientras que los compuestos orgánicos por medio de ingestión se absorben de un 2% a un 15% (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012a; International Agency for Research on Cancer, 1997). Los riñones son órganos sensibles a la exposición a Hg metálico por inhalación. Su principal indicio consiste en detección de proteinuria transitoria leve y cambios en la acidez de la excreción urinaria, proteinuria franca, hematuria y oliguria, insuficiencia renal aguda con degeneración o necrosis de los túbulos contorneados proximales. Para estos síntomas se ha detectado una cantidad de Hg en orina de 59-193 µg/h (Prozialeck & Edwards, 2007; Zalups, 2000). Se ha determinado, que el riñón es el órgano principal de compuestos inorgánicos de Hg. Análisis realizados muestran como al exponerse durante unas pocas horas al metal, se acumula Hg²⁺ en las células renales del túbulo proximal (Hultman & Eneström, 1986; Rana *et al.*, 2018).

3.6.4 Plomo (Pb)

El Pb es un elemento que se caracteriza por viajar grandes distancias adherido a partículas de suelo. Trabaja como un fuerte adsorbente en la mayoría de los suelos, debido a esto existe una limitación de este elemento para lixiviarse. Dentro de los factores que pueden modificar la solubilidad de éste en suelo están el pH, las condiciones reductoras y el contenido de cloruro. Se puede absorber por medio de inhalación, vía oral y exposición cutánea; no obstante, esta última es más eficiente si está como compuesto orgánico y es a través de las manos (Ahamed & Siddiqui, 2007; Garçon *et al.*, 2007; Navarro-Moreno *et al.*, 2009).

Así mismo, para el caso de niños se ha determinado que pueden absorber el Pb soluble en agua hasta un 40-50% en comparación con los adultos, los cuales absorben tan solo un 3-10% (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2019). El principal efecto a nivel celular primario consiste en el estrés oxidativo (OS, por sus siglas en inglés) en el riñón al acumularse luego de la exposición. Según estudios realizados, se han encontrado concentraciones de Pb en el organismo de personas que tienen daño a nivel renal, así como disminución en la función renal que incluye enzimuria, proteinuria, transporte deficiente de aniones orgánicos y glucosa y deficiencias en la TFG (Bennett, 1985; Kwon *et al.*, 2015; Rana *et al.*, 2018).

3.6.5 Silicio (Si)

Dos agentes polimorfos de sílice cristalino (c-sílice), cuarzo y cristobalita, han sido clasificados como carcinógenos del grupo 1: "carcinógenos para los seres humanos" por la IARC. Los peligros para la salud asociados con la exposición al Si cristalino surgen de la inhalación de

partículas respirables. La sílice cristalina respirable consiste en partículas que tienen un diámetro aerodinámico más pequeño que 10 μm (Tchounwou *et al.*, 2012). El daño renal en individuos expuestos a c-sílice se ha asociado con dos vías mecánicas distintas: (1) efecto tóxico directo de la acumulación excesiva de c-sílice en el riñón y (2) efectos tóxicos indirectos secundarios a enfermedades autoinmunes. En la primera vía propuesta, la deposición de partículas de c-sílice en el riñón conduce a inflamación, que progresa a fibrosis y que puede conducir a insuficiencia renal (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2019; Ghahramani, 2010).

3.6.6 Vanadio (V)

El vanadio es un elemento distribuido ampliamente en la corteza terrestre a una concentración promedio de aproximadamente 100 mg / kg. El V se encuentra en unos 65 minerales diferentes (Wuana & Okieimen, 2011). Los estudios *in vitro* han demostrado que el V actúa como un análogo de fosfato y, como tal, interfiere con varias ATPasas, fosfatasas y transferencia de fosfato enzimas; sin embargo, hay poca información disponible sobre el mecanismo de toxicidad del V *in vivo* (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012b). El V puede causar OS en las células y participar en los mecanismos de lesión oxidativa. El riñón es particularmente vulnerable a los efectos nocivos de V debido a su bioacumulación. Se ha reportado que el V puede estar presente en células tubulares en una forma fácilmente intercambiable, se tiene la hipótesis de que puede estar involucrado en la patogenia de la distensión tubular renal acidosis, cálculos renales, síndrome urémico y enfermedad renal quística (Gustafsson, 2019; Wilk *et al.*, 2017). En estudios previos se demuestra una correlación entre la presencia de As y V, en los lugares en los que existen residuos del proceso de filtración (filtros de TiO_2) de las plantas potabilizadoras de agua en la zona aledañas de la provincia (Zimmerman *et al.*, 2021).

3.6.7 Efectos combinados

En la caracterización del riesgo toxicológico se emplea información toxicocinética y toxicodinámica para predecir o interpretar los resultados que una combinación específica de contaminantes puede tener sobre los receptores (Espinoza *et al.*, 2003). Existen tres tipos de interacción de interés: aditivos, sinérgicos y antagónicos. En los efectos aditivos hay una exposición a cierta combinación de sustancias químicas en la que simplemente se suman las diversas toxicidades individuales, es decir, $1+1=2$, considerando que las sustancias actúan a través del mismo mecanismo, aunque no siempre ocurre de esta manera. La interacción entre varias

sustancias puede resultar en antagonismo o inhibición, en la que el efecto combinado es menor de lo que sería la suma de los efectos individuales, es decir, $1+1 < 2$. Por el contrario, en el sinergismo la combinación de sustancias produce un impacto mayor que la suma de los efectos individuales, es decir, $1+1 > 2$ (Silbergeld, 1998).

Silbergeld (1998), explica en su contribución a la “Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo” ejemplos concretos de efectos combinados entre metales de interés. Por ejemplo, afirma que el As afecta la distribución del cobre en el cuerpo, movilizándolo desde el hígado y la sangre hasta los riñones; deteriora el metabolismo de hierro en el cuerpo; la velocidad de absorción de As inorgánico y su toxicidad se ven inhibidas por el zinc; además, el selenio y el As opacan su toxicidad entre sí. El Cd deteriora el metabolismo de cobalto, hierro y fosfatos en el organismo; los niveles altos de Pb reducen la velocidad de absorción del Cd; y el selenio y manganeso, en dosis bajas, reducen la toxicidad del Cd. El Hg favorece la movilización de cobre al hígado; el zinc y el selenio reducen su toxicidad y velocidad de absorción; el Cd aumenta la bioacumulación renal de Hg y a su vez disminuye su efecto tóxico por síntesis de metalotioneína. El Pb deteriora el metabolismo de cobalto, hierro y zinc, en deficiencia de estos últimos aumenta la velocidad de absorción y el efecto tóxico del Pb, por su parte el selenio reduce su toxicidad (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2004). Para más información sobre la toxicidad y escenarios de exposición refiérase al Cuadro 3.

Cuadro 3. Síntomas de toxicidad o intoxicación aguda y crónica de algunos metales nefrotóxicos de importancia para este estudio.

Metal nefrotóxico	Toxicidad aguda	Toxicidad crónica (dosis altas)	Toxicidad crónica (dosis bajas)
Arsénico (As)	Se ha observado congestión glomerular después de una exposición aguda a dosis altas. La toxicidad aguda de As causa una disminución de la función mitocondrial y regula la expresión de la proteína MRP2 la cual ayuda a excretarlo por la orina y generar tolerancia en el riñón ante la bioacumulación del metal (INRS, 2021; Medina-Pizzali, 2018).	La exposición a largo plazo puede provocar la formación de lesiones cutáneas, cáncer, problemas neurológicos, enfermedades pulmonares, cardiovasculares y vasculares periféricas, hipertensión y diabetes mellitus (Hong <i>et al.</i> , 2014). Las formas inorgánicas del As, como el arsenito y el arsenato son altamente cancerígenas y pueden causar cáncer de pulmón, hígado, vejiga, riñón y piel (International Agency for Research on Cancer (IARC), 2012).	La toxicidad sistémica puede incluir una necrosis tubular aguda junto con una falla renal aguda o insuficiencia renal crónica por necrosis cortical. Causa proteinuria incluida la beta 2-microglobulina, disminuye la reabsorción y aumenta la disfunción renal (Davey <i>et al.</i> , 2008; Rizwan <i>et al.</i> , 2014).
Cadmio (Cd)	Su inhalación en concentraciones superiores a 1 mg Cd/m ³ durante 8 horas o en concentraciones superiores durante períodos más cortos puede producir una neumonitis química y, en los casos graves, edema pulmonar. La ingestión de bebidas contaminadas en concentraciones superiores a 15 mg Cd/L produce náuseas, vómito, dolor abdominal y, en ocasiones, diarrea (Satarug <i>et al.</i> , 2011).	Bajo exposición prolongada por inhalación en concentraciones superiores a 0.1 mg Cd/m ³ se presentan cambios locales en las vías respiratorias: neumopatía de carácter obstructivo, en forma de enfisema. Asimismo, pueden observarse manchas amarillas en las piezas dentales y pérdida del sentido del olfato. Tras la exposición prolongada a niveles medios-elevados pueden verse afectados los glomérulos renales, produciéndose una disminución en la TFG (Rana <i>et al.</i> , 2018).	Cambios sistémicos: las exposiciones prolongadas a niveles bajos de Cd en el aire se asocian con insuficiencia o lesiones renales, proteinuria y anemia, debido a su acumulación. Concentraciones superiores a 200 µg Cd/g de peso en fresco producen disfunción de los túbulos renales y disminución de la reabsorción de las proteínas de bajo peso molecular en la orina (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2011; Occupational Safety and Health Administration, 2020).
Mercurio (Hg)	Los síntomas de una intoxicación aguda son: irritación pulmonar (neumonía química), que puede producir edema pulmonar agudo, grave inflamación del tracto gastrointestinal, seguida rápidamente de una insuficiencia renal por necrosis de los túbulos contorneados proximales, además de manifestaciones neurológicas en forma de sudoración profusa, dermatografismo y cierta inestabilidad emocional (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012a).	La intoxicación crónica por Hg suele comenzar de forma silenciosa. En ocasiones es posible detectar efectos renales leves (proteinuria, albuminuria, enzimuria), antes que efectos neurológicos. Si no se corrige, los síntomas neurológicos se acentúan y aparecen cambios de comportamiento y trastornos de la personalidad acompañados, en ocasiones, de trastornos digestivos (estomatitis, diarrea) y de un deterioro del estado general del paciente (<i>e.g.</i> anorexia, pérdida de peso) (Hazelhoff <i>et al.</i> , 2012).	Los efectos de la exposición a niveles bajos no están bien documentados ni se conocen claramente. A niveles superiores a 50 µg/g se han observado alteraciones de la función renal. En cuanto a la exposición crónica de este elemento, el Hg puede almacenarse en el riñón hasta provocar lesiones epiteliales, así como la necrosis tubular (Rana <i>et al.</i> , 2018).

Continuación del Cuadro 3.

Metal nefrotóxico	Toxicidad aguda	Toxicidad crónica (dosis altas)	Toxicidad crónica (dosis bajas)
Plomo (Pb)	Se concentra en los riñones, los huesos, los dientes y el pelo una hora después de su absorción desde el intestino. La tasa de excreción renal depende de la cantidad y la duración de la exposición. La administración aguda de plomo da lugar a la excreción por filtración glomerular y secreción tubular causando problemas metabólicos, e incluso, derivando en hipertensión arterial (Bennett, 1985).	La aminoaciduria, la glucosuria y la fosfaturia fueron reportadas en toxicidad aguda de Pb como marcador de disfunción del túbulo proximal (Ahamed & Siddiqui, 2007).	La exposición de células tubulares proximales renales humanas HK-2 a Pb produjo citotoxicidad tubular renal, aumento del OS, regulación de biomarcadores nefrotóxicos, así como alteraciones histopatológicas como las lesiones tubulointersticiales, la fibrosis renal (Kwon <i>et al.</i> , 2015).
Sílice (Si)	Se ha asociado a un amplio espectro de patologías renales con exposición ocupacional a c-sílice, que incluye nefritis/nefrosis renal aguda y crónica, insuficiencia renal en etapa terminal, glomerulonefritis y daño renal asociado con trastornos autoinmunes (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2019).	La exposición al Si se ha asociado con enfermedad túbulo intersticial, enfermedad multisistémica mediada por el sistema inmune, enfermedad renal crónica y enfermedad renal en etapa terminal; la nefropatía por sílice ocurre después de una fuerte exposición al polvo de sílice durante un período prolongado de tiempo (Brown <i>et al.</i> , 2005).	Con una exposición más prolongada, la tasa de filtración glomerular (TFG) disminuirá progresivamente (Ghahramani, 2010).
Vanadio (V)	Síntomas iniciales: lagrimeo profuso, sensación de ardor en la conjuntiva, rinitis serosa o hemorrágica, dolor de garganta, tos, bronquitis, expectoración y dolor torácico. Una exposición intensa puede producir neumonía, con resultados fatales (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012b).	Efectos metabólicos: interferencia con la biosíntesis de cistina y colesterol, e inhibición y estimulación de la síntesis de fosfolípidos. La exposición prolongada puede producir bronquitis crónica con o sin enfisema. Concentraciones elevadas han ocasionado la inhibición de la oxidación de la serotonina. Además, se ha demostrado que el vanadato inhibe varios sistemas enzimáticos (Wilk <i>et al.</i> , 2017).	Los estudios <i>in vitro</i> han demostrado que el vanadio actúa como un análogo de fosfato y, como tal, interfiere con varias ATPasas, fosfatasas y enzimas de transferencia de fosfato. Los túbulos renales son uno de los mayores portadores de Na ⁺ K ⁺ ATPasa y por ello se ven impactados ante una exposición crónica (Katz, 1982).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Tal y como se evidenció en la sección anterior, los metales pesados presentes en el ambiente se consideran un factor causal en la NM. Es por ello, que se realizaron tres muestreos en las matrices aire y suelo en los cinco distritos de Cañas, Guanacaste, con la finalidad de determinar la relación entre los metales nefrotóxicos disponibles en el suelo y el aire con la prevalencia de la NM en dicha región.

4.1 Lugar de estudio

Cañas es el sexto cantón de la provincia de Guanacaste, sus coordenadas geográficas son: 10°27'04" latitud norte y 85°06'47" longitud oeste. Limita al norte con Upala y Guatuso, al oeste con Bagaces, al este con Tilarán y Guatuso, al sureste con Abangares y al suroeste con Nicoya. Cuenta con una extensión de 682.20 km² y altitudes entre 0-1916 m.s.n.m., con una altitud media de 68 m.s.n.m (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2013; Municipalidad de Cañas, 2020). Además, consta de cinco distritos: Cañas: extensión 193.22 km² y altura media 86 m.s.n.m.; Palmira: extensión 204.81 km² y altura media de 225 m.s.n.m.; San Miguel: extensión 120.52 km² y altura media de 75 m.s.n.m.; Bebedero: extensión de 57.98 km² y altura media de 7 m.s.n.m., y Porozal: extensión de 105.67 km² y altura media de 36 m.s.n.m.; la distribución geográfica se visualiza en la Figura 8.

4.2.1 Muestreo de suelo

Schweizer Lassaga (2011) propone una metodología para el muestreo de suelo en donde establece tomar una muestra cada 1 o 2 hectáreas de suelo. A pesar de que la metodología se utiliza para diagnóstico de fertilidad por componentes, se utilizó esta misma metodología pues solo se necesitaba extraer suelo sin modificación previa de su composición en estado natural. Se decidió extraer la muestra a una profundidad de 50 cm, con el fin de ampliar la profundidad para contrastar con los resultados de un trabajo previo que se realizó en la misma zona pero con profundidades de 0 y 20 cm respectivamente (Ulate Chacón *et al.*, 2019).

Con base en la información recaudada en la etapa 1, se distribuyeron las muestras de la siguiente manera: 19 en Cañas, 20 en Palmira, 12 en San Miguel, 6 en Bebedero y 11 en Porozal para un total de 68 muestras tomadas entre diciembre de 2020 y noviembre de 2021. La totalidad de las muestras fueron analizadas por dos métodos, para una comparación de reproducibilidad de los datos en el laboratorio del Departamento de Ciencias de Plantas y Suelos de Texas Tech University (TTU), Lubbock, Texas. Para ello, se tamizaron las muestras a 1.18 mm en el laboratorio multiuso de la Escuela de Ingeniería Ambiental en el Tecnológico de Costa Rica (TEC), se pesaron 13 g y se enviaron a Estados Unidos para su posterior análisis, ver proceso ilustrado en la Figura 9 y la Figura 10.



Figura 9. Primera etapa de muestreo, a la izquierda, extracción de las muestras de suelo utilizando el barreno, y a la derecha, ejemplo de una muestra recién recolectada (CG-11).



Figura 10. Etapa de tamizado y empaque. Arriba, tamizado de muestras en el laboratorio multiuso de Ingeniería Ambiental, Tecnológico de Costa Rica. Abajo a la izquierda, proceso de tamizado de la muestra CG-58 y a la derecha, 13 g de suelo en cada una de las muestras empaçadas y listas para enviar al TTU en Estados Unidos.

Primero se analizó la totalidad de las muestras mediante espectroscopia de fluorescencia de rayos X (PXRF), utilizando un espectrómetro Olympus serie Vanta M en modo GeoChem operado a 40kV (ver Figura 11) con un escaneo que consistía en dos rondas de rayos X de dos minutos por cada ronda.

Se utilizaron tres estándares durante este análisis: una pieza de cuarzo (SiO_2) como blanco, específica para este tipo de análisis, el estándar *2710a Montana I Soil* del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), con concentraciones muy elevadas de oligoelementos y el estándar *2711a Montana II Soil* de NIST con concentraciones moderadamente elevadas de oligoelementos. Los tres estándares son comúnmente utilizados para el análisis de suelos, pues proporcionan un conjunto completo de elementos en concentraciones diferidas, que se pueden

utilizar para determinar el porcentaje de recuperación (Koch *et al.*, 2017; Weindorf & Chakraborty, 2016). El porcentaje de recuperación para los metales de interés se calculó utilizando el promedio de los resultados de PXRf de los estándares mencionados.



Figura 11. Espectrómetro Olympus serie Vanta M utilizado para los análisis.

En segundo lugar, se realizó una digestión ácida en un sistema de microondas de digestión ácida por lotes CEM Mars 6 (ver Figura 12), utilizando el método basado en la regulación US EPA 3051A “*Digestión ácida de sedimentos, lodos, suelos y aceites asistida por microondas*” (2007). En este proceso se incluyó el estándar CRM-LO-B *Loam Soil B* de High-Purity Standards con concentraciones conocidas.



Figura 12. Sistema de digestión de microondas MARS 6 utilizado en el análisis.

En el laboratorio se pesó 0.5 g de muestra o estándar por triplicado en una balanza analítica, se agregaron 9 ml de ácido nítrico (HNO_3) y 3 ml de ácido clorhídrico (HCl), ambos de alta pureza, en tubos de teflón específicos para el equipo utilizado. Se añadieron 4 tubos con solamente la mezcla de ácidos como control de calidad. Se dejaron reposar dentro de la capilla de gases, luego se taparon y se llevaron al microondas por alrededor de 30 minutos hasta alcanzar una temperatura de $175\text{ }^\circ\text{C}$, finalmente, se dejaron enfriar por 15 minutos y se obtuvo el resultado que se muestra en la Figura 13. Cuando la temperatura de las celdas era tolerable al contacto, se procedió a filtrar el supernatante mediante filtros de 0.22 micrones, tal y como se muestra en la Figura 14.

El paso siguiente consistió en extraer 5 ml del filtrado que posteriormente se añadieron a una solución de 45 ml de HNO_3 al 2%, para finalmente analizar las triplicas mediante espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES, por sus siglas en inglés). Los resultados de la dilución final del proceso se evidencian en la Figura 15. En total se realizaron 7 rondas de 40 celdas por digestión, para un total de 11 muestras por ronda (33 triplicas), 1 estándares (3 triplicas) y 4 mezclas de ácidos como control.

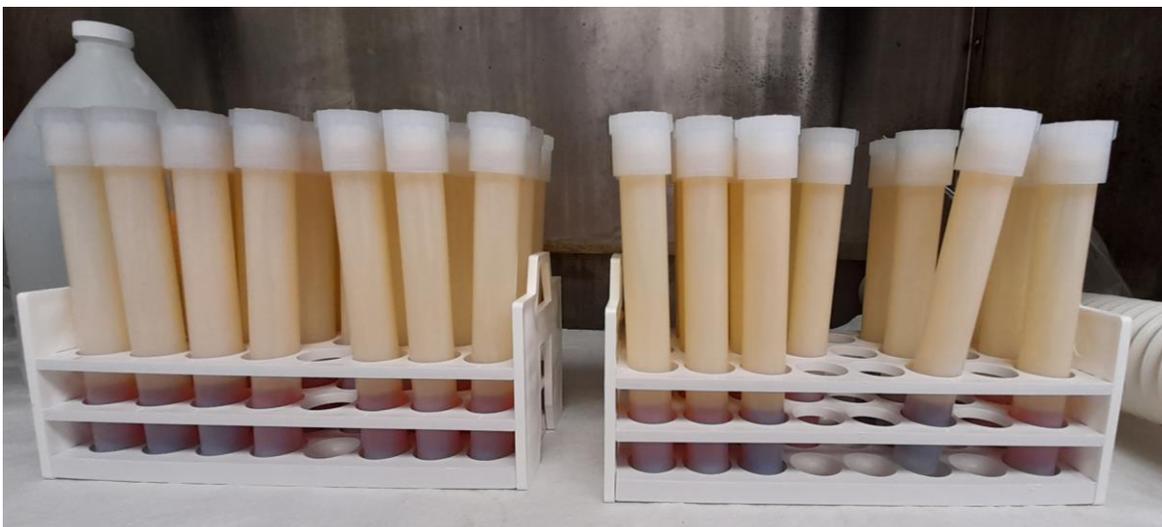


Figura 13. Tubos de teflón con muestras y mezclas de ácidos luego de una ronda de digestión por microondas.

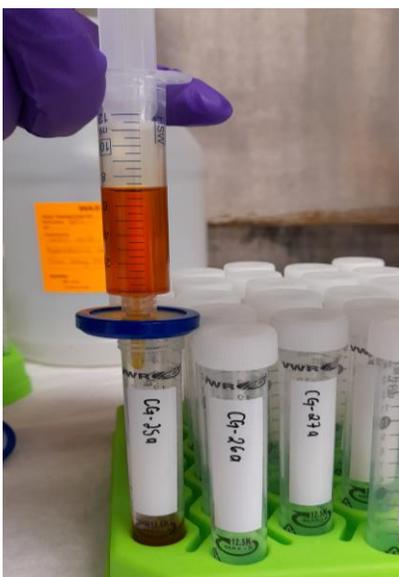


Figura 14. Filtración a 0.22 μm de resultante de digestión por microondas.



Figura 15. Trípticas y controles diluidos listas para cuantificación mediante ICP-OES.

La cuantificación por este método se realizó con un espectrómetro ICP-OES serie iCAP 7000 de Thermo Scientific (ver Figura 16) utilizando las siguientes longitudes de onda: As 189 nm y 197 nm, Cd 228 nm, Pb 220 nm, Rb 780 nm, Si 198 nm y 212 nm y V 289 nm y 311 nm. Para control interno se utilizó un estándar de itrio (Y) analizado a longitudes de 224.306 nm y 360.073 nm. Para la curva de calibración se utilizaron dos estándares generales en diferentes concentraciones: (1) Estándar multielementos con concentraciones de 0.01 ppm, 0.10 ppm, 1.00 ppm y 10 ppm y (2) solución estándar de aluminio (Al), fósforo (P), silicio (Si) y rubidio (Rb) en concentraciones de 0.10 ppm, 1.00 ppm, 10.00 ppm y 50.00 ppm.

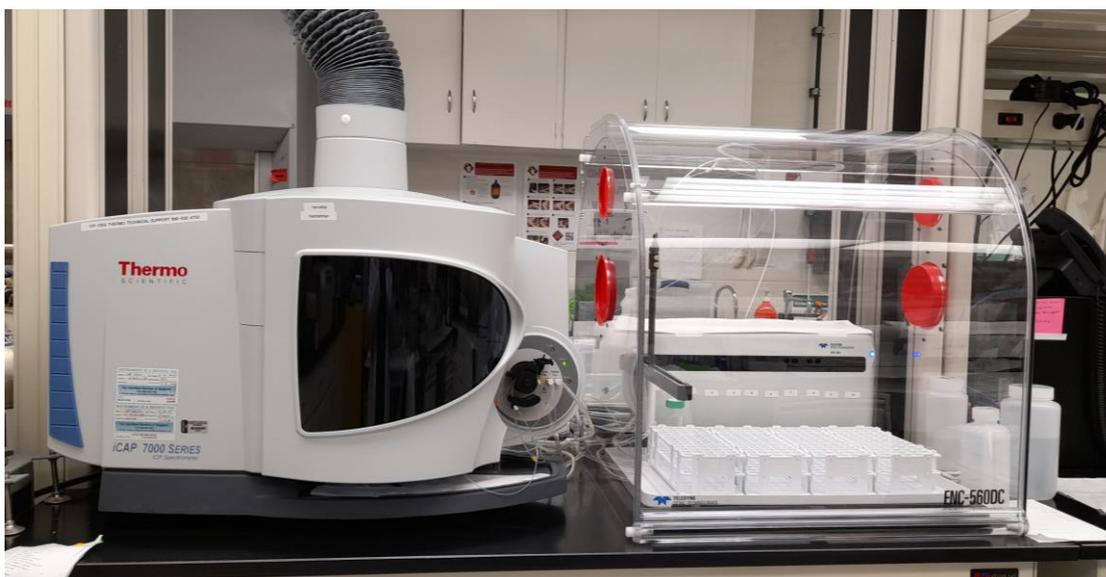


Figura 16. Espectrómetro ICP-OES Thermo Scientific serie iCAP 7000 utilizado en los análisis.

4.2.2 Muestreo material particulado atmosférico

Para esta matriz ambiental se realizaron dos tipos de muestreos, el primero mediante un colector de partículas enviado por el programa de Ciencias Atmosféricas del Departamento de Geociencias de Texas Tech University (ver Figura 17). Con él, se buscó recolectar material particulado móvil a nivel de la superficie del suelo por 30 días, se tomó una muestra en cada distrito con la finalidad de comparar la cantidad de material particulado disponible en el aire de acuerdo con las condiciones atmosféricas presentes. Las muestras se tomaron aleatoriamente de la siguiente manera: Cañas 20/04/21 - 20/05/21, Palmira 20/03/21 - 19/04/21, San Miguel 19/05/21 - 18/04/21, Bebedero 25/09/21 - 25/10/21 y Porozal 26/10/21 - 25/11/21, con el fin de cubrir ambas estaciones climáticas en todo el cantón. Como primer paso, se pesó las muestras por gravedad para determinar la cantidad recolectada en cada uno de los distritos. Estas muestras se analizaron a nivel físico conforme a su masa total recolectada y a nivel químico mediante espectroscopia de fluorescencia de rayos X siguiendo la misma metodología de las muestras de suelo y utilizando los mismos estándares para el cálculo del porcentaje de recuperación.



Figura 17. Colector de partículas por gravedad ya ensamblado según las indicaciones del TTU.

El segundo muestreo se realizó mediante técnica de impactación a una altura de 120 cm del suelo en donde se conectó un colector (ver Figura 18) que contenía un filtro de PTFE de 0.5 μm y 47 mm de diámetro, a una bomba de alta capacidad de succión modelo 1531-107B-G557X de Gast Manufacturing Inc., a un flujo constante de succión de 28.31 l/min. Se realizaron 2 muestras por distrito con una duración de 24 horas continuas cada una, procurando una muestra durante la época lluviosa de la región y una durante la época seca.

El primer método de análisis se realizó por microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de energía dispersiva (SEM-EDS). Las muestras atmosféricas colectadas se analizaron en el microscopio modelo *Tabletop Microscope TM-1000* de 15kV (ver Figura 19) de la marca Hitachi, ubicado en el Laboratorio Institucional de Microscopía del Tecnológico de Costa Rica, en su sede central, con el fin de comparar los tamaños de partícula y establecer la composición química de las muestras impregnadas en los filtros. Finalmente, se analizaron por PXRF bajo las mismas condiciones que las muestras de suelo.

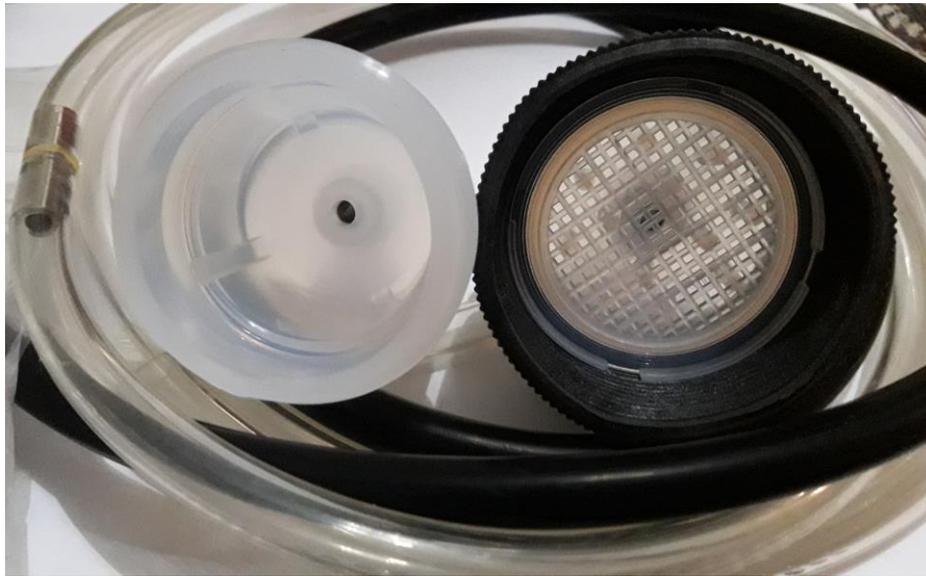


Figura 18. Sector del muestreador por impactación en donde se colocaba el filtro, enviada por el TTU.



Figura 19. Microscopio Hitachi modelo Tabletop TM-1000 utilizado en los análisis.

En resumen, la distribución de muestras en cada uno de los distritos del cantón de Cañas se presenta en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Distribución de muestras recolectadas según el distrito y la matriz ambiental correspondiente.

Distrito	Muestras suelo	Muestras de aire	
		Gravedad	Impactación
Cañas	19	1	2
Palmira	20	1	2
San Miguel	12	1	2
Bebedero	10	1	2
Porozal	11	1	2

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Condiciones ambientales

5.1.1 Condiciones atmosféricas

El IMN cuenta con 4 estaciones automáticas de medición en el cantón de Cañas mediante las cuales se obtuvo la información climática considerada para esta investigación (ver Cuadro 6). La información meteorológica fue recabada del año 2015 en adelante según estuviera disponible hasta el 2021. Con ello se determinó el promedio mensual total de precipitación (mm), la temperatura promedio mensual (°C), el promedio mensual de humedad relativa (%), el promedio mensual de la velocidad del viento (km/h) y la dirección predominante mensual para el periodo comprendido entre 2015-2021 considerando las condiciones más realistas ante un escenario de cambio climático y a su vez tomando como variable importante la altitud.

Cuadro 6. Estaciones meteorológicas automáticas consultadas para este proyecto.

Número de estación	Nombre	Coordenadas geográficas		Altitud (m.s.n.m)
		Latitud Norte	Longitud Oeste	
76059	Hacienda Taboga	10° 20' 45"	85° 10' 39"	29
76061	Palo Alto, Montezuma	10° 39' 52.93"	85° 04' 48.83"	469
76063	Universidad Invenio	10° 28' 36.1"	85° 03' 34.8"	333
78035	Refugio Nacional de Vida Silvestre Cipancí	10°12'43.87"	85°14'4.07"	10

(Fuente: Instituto Meteorológico de Costa Rica, 2022).

Las condiciones climáticas de la región coinciden con un clima tropical monzónico. En las estaciones de menor altitud (76059 y 78035) el mes más caliente es abril, mientras que en las estaciones de mayor altitud (76061 y 76063) mayo es el mes más caliente. Los meses más frescos son noviembre y diciembre, respectivamente. Las temperaturas medias en la bajura oscilan entre los 26°C y los 30°C, mientras que en zonas altas varía entre 22.5°C y 26°C tal y como se muestra en la Figura 20.

Existen dos regímenes temporales bien diferenciados, uno con poca o nula precipitación mensual en las zonas bajas (temporada seca) entre diciembre y abril, y disminución considerable en las zonas altas, y el otro con precipitaciones moderadas (temporada lluviosa) entre mayo y noviembre. La temporada lluviosa se divide en 2 partes: mayo-junio y setiembre-octubre; normalmente el segundo periodo es más lluvioso que el primero. En el primer periodo las

cantidades varían entre 200-300 mm, mientras que en el segundo oscilan entre 250-400 mm tal y como se evidencia en la Figura 21.

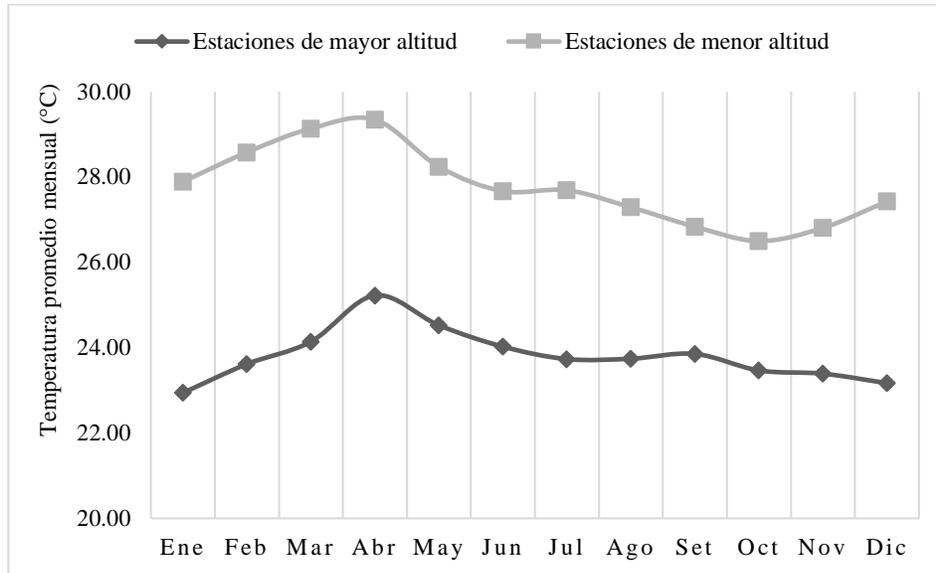


Figura 20. Representación gráfica del promedio de temperatura mensual en el cantón de Cañas en el periodo 2015-2021.

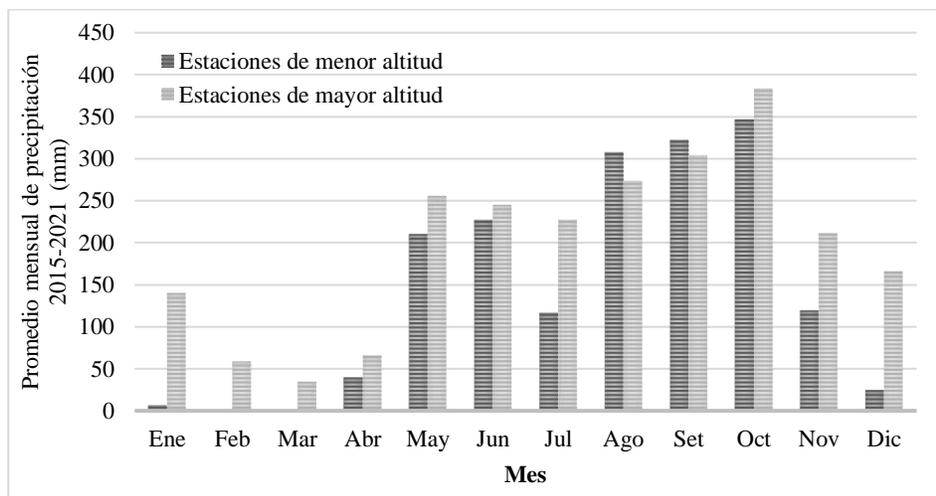


Figura 21. Representación gráfica del promedio de precipitación mensual en el cantón de Cañas en el periodo 2015-2021.

Por otra parte, en la Figura 22 y en la Figura 23 se manifiestan condiciones climáticas del distrito de Cañas, Guanacaste. En la Figura 22 se presenta una foto en época lluviosa de la plaza de béisbol de Cañas centro, en ella se pueden ver árboles con su respectivo follaje verde. Por su parte, en la Figura 23 se presenta una foto en época seca de la plaza de fútbol Tres Marías en Cañas centro, en ella se puede ver la vegetación seca y deshidratada y, como consecuencia, suelos más áridos.



Figura 22. Foto de una plaza de deportes en el distrito de Cañas, Cañas, en época lluviosa, en julio de 2020.



Figura 23. Foto de una plaza de deportes en el distrito de Cañas, Cañas, en época seca, marzo 2021.

La mayor cantidad de lluvia en setiembre-octubre se debe a que los vientos monzónicos son más frecuentes e intensos y a los “temporales” asociados con ciclones tropicales en el mar Caribe. El término “temporal” hace referencia a un periodo de varios días consecutivos con condiciones lluviosas tanto de día como de noche. En julio y agosto las lluvias disminuyen a tal grado que no llueve por varios días consecutivos, fenómeno conocido como “veranillo” o “canícula” y es causado por la intensificación de los vientos alisios y la desaparición o alejamiento de la Zona de Confluencia Intertropical. Un anticiclón semipermanente se desplaza estacionalmente entre las islas de las Bermudas y la Azores, ambas en el Atlántico Norte. Este

fenómeno es responsable en gran medida de la estación seca de la Vertiente Pacífica costarricense y de los vientos alisios fuertes que se producen en el Valle Central y Guanacaste a finales y principios de año. Entre julio y agosto el anticiclón se ubica más al sur, situación en la que se establecen las canículas en el Pacífico; por el contrario, entre setiembre y octubre es cuando el anticiclón registra la presión más baja, lo cual causa vientos alisios más calmados y la formación de ciclones tropicales, trayendo consigo condiciones más lluviosas en la Vertiente Pacífica (Alfaro & Pérez-Briceño, 2014; Instituto Meteorológico Nacional, 2020).

En el caso de las condiciones de viento, en la Figura 24 se demuestra gráficamente, los cambios en la velocidad del viento a lo largo del año. En este ámbito, marzo es el mes que presenta promedios cantonales más altos, con vientos promedio de 16.9 km/h y octubre con vientos promedio de 5.6 km/h representa el valor más bajo. Un aspecto que llama la atención es que durante todo el año y desde el año 2015, las cuatro estaciones meteorológicas estudiadas reportan direcciones predominantes de viento 2 o noreste (la mayor parte del año) y 3 o este (principalmente marzo y abril en las zonas altas), lo cual define el rango de dirección del viento entre 22.6° y 112.5°; mientras que otras estaciones cercanas al área del Río Tempisque y Porozal reportan vientos con dirección predominante 8 o noroeste (rango de dirección 292.6°-337.5°); sin embargo, dichas estaciones no fueron consideradas en los análisis numéricos del presente trabajo por encontrarse fuera del cantón en estudio.

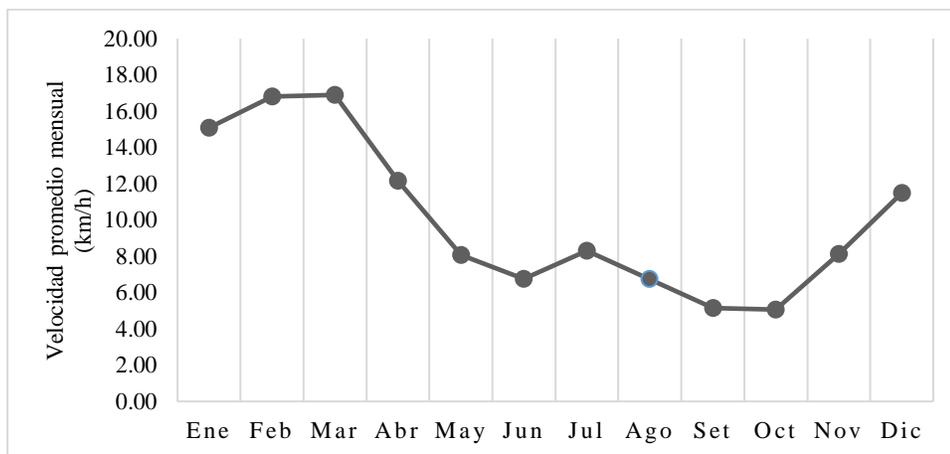


Figura 24. Representación gráfica de la velocidad promedio mensual del viento en el cantón de Cañas en el periodo 2015-2021.

Tanto en la Figura 20 como en la Figura 21, se establece como una variable determinante la altura en relación con los factores climáticos. Y es que la altitud de los distritos parece relacionarse exponencialmente con la cantidad de casos reportados hasta el 2021, así se refleja en la Figura 25.

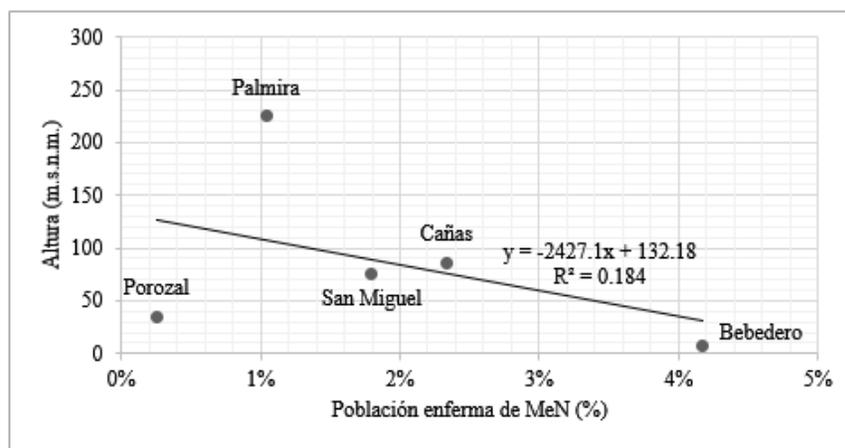


Figura 25. Relación entre la altura promedio de cada distrito y la cantidad de casos de NM reportados al 2021.

En la Figura 25 se evidencia el primer punto disperso de la linealidad, este punto corresponde al distrito de Porozal, el cual tiene una altura promedio de 35 m.s.n.m., una población estimada por el INEC de 793 personas y una cantidad de 2 casos reportados hasta el 2021. Sin embargo, al tener una influencia de factores climáticos (corrientes marítimas) y geográficos (cercanía con el Río Tempisque y la Península de Nicoya) distintas a las condiciones climáticas y de relieve en las zonas occidentales del Cinturón de Fuego del Pacífico, ubicación relacionada con la prevalencia de la enfermedad (López *et al.*, 2012; Murray *et al.*, 2015), no cumple con la totalidad de variables de exposición ambiental contempladas en el presente estudio, pero se tomó en cuenta para establecer la cuantificación de metales pesados al ser parte de la región de estudio.

A pesar de que en la figura anterior no se evidencia una clara correlación, se aplicó estadística descriptiva para saber si existe o no tal correlación, para lo cual se planteó como hipótesis nula que no existe correlación significativa entre las variables. Los resultados estadísticos de la prueba de correlación de Spearman entre la altitud y el porcentaje de la población que se encuentra diagnosticada con NM hasta 2021 fueron los siguientes: coeficiente de correlación -0.3, un valor de α de 0.05 y un p-value de 0.62. Dado que el valor de p es mayor que el de alfa, se rechaza la hipótesis nula, y se acepta la hipótesis alternativa de que existe una correlación significativa entre ambas variables. Además, al obtener un coeficiente de correlación negativo se establece que cuanto mayor altura, menor es la incidencia reportada de la enfermedad y viceversa.

5.1.2 Condiciones geológicas

Los factores de formación geológica modelan en gran escala los órdenes de suelo que se pueden encontrar en una región. En el caso del cantón de Cañas, existe diversidad de tipos de

suelos que, aunados a los factores climáticos descritos anteriormente, acrecientan la posibilidad de exposición ante el factor de riesgo de metales pesados preexistentes de manera natural en la región. En la Figura 26 se ejemplifican los tipos de suelo predominantes a lo largo del sitio de estudio.

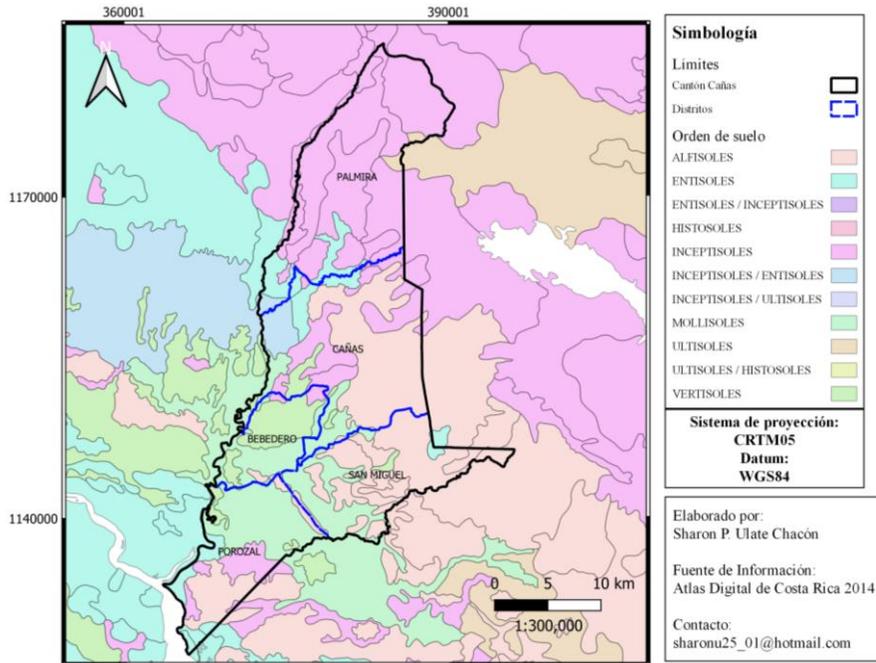


Figura 26. Mapa de órdenes de suelo de Cañas, Guanacaste. Elaborado mediante *QGIS Desktop 3.18.1*.

Según el mapa anterior, Palmira, posee suelos Andisoles y Entisoles, en las pendientes medias de los Andisoles la arcilla dominante es la Alofana la cual se hidrata y/o se liga a la materia orgánica formando complejos organominerales difíciles de descomponer. Durante la época seca, domina la Haloisita, típica de los suelos pardo-rojizos y pardo-amarillentos, tal y como se evidencia en la Figura 27 .



Figura 27. Tres muestras de suelo tamizadas a 1.18 mm del distrito de Palmira, Cañas, Guanacaste.

En partes cercanas al volcán Tenorio, estos suelos son de textura franco-arenosa o más gruesa, mientras que en las posiciones intermedias del relieve presentan texturas francolimosas o francas, y en las partes inferiores ocurren con texturas arcillosas, particularmente en el horizonte B. En la fotografía presentada por la Figura 28 se evidencian algunas de las características anteriores, el sitio de muestreo se encuentra a una altura aproximada de 800 m.s.n.m. en las cercanías del Volcán Tenorio, aproximándose por Cañas.

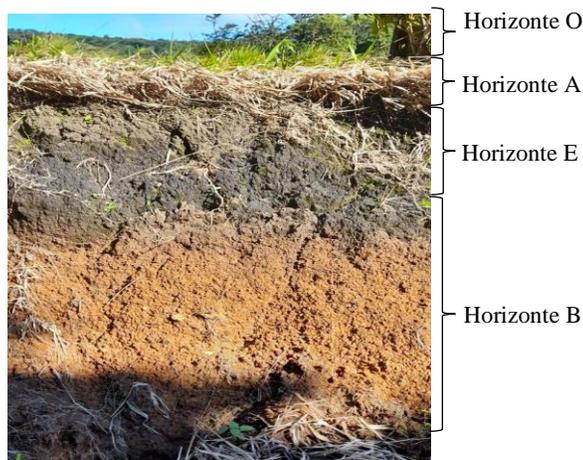


Figura 28. Fotografía de uno de los sitios de muestreo cercano a las faldas del Volcán Tenorio, Palmira, Cañas.

San Miguel, presenta suelos Alfisoles y Ultisoles, estos dos órdenes de suelos se caracterizan por ser de los suelos más viejos y meteorizados del país, en ambos casos, estos suelos “rojos” ocupan por lo general, como se ejemplifica en la Figura 29, las partes altas de las cuencas

y las posiciones más altas de las pendientes, o sea, aquellas zonas que no han estado sujetas a proceso alguno de rejuvenecimiento, y por el contrario han estado sometidas a constante lixiviación.



Figura 29. Tres muestras de suelo tamizadas a 1.18 mm del distrito de San Miguel, Cañas, Guanacaste.

Por otra parte, Bebedero, presenta suelos Vertisoles y Molisoles, los Vertisoles se caracterizan por mal drenaje, ser ricos en silicio, calcio y magnesio y una estacionalidad muy definida, generalmente son de color oscuro, presentan poca diferenciación de horizontes y textura arcillosa, lo que hace que el suelo se agriete bajo condiciones de baja humedad, tal y como se evidencia en la Figura 30. Los Molisoles se forman en áreas entre semiáridas y semihúmedas, típicamente bajo una cobertura de pasturas. El material parental es generalmente calcita, sus compuestos son fundamentalmente movidos por el viento. Los procesos específicos que participan en la formación de molisoles de praderas son: melanización (la coloración oscura de los horizontes minerales del suelo por la mezcla íntima con la materia orgánica), descomposición y humificación (transformación de materia orgánica en humus) (Elizondo Alvarado, 2015; Henríquez *et al.*, 2014).



Figura 30. Tres muestras de suelo tamizadas a 1.18 mm del distrito de Bebedero, Cañas, Guanacaste.

Porozal posee suelos Inceptisoles y Ultisoles en la mayor parte de su distrito, en los Inceptisoles su origen proviene del efecto de meteorización que sufren los sedimentos depositados cuando permanecen sin recibir nuevos aportes por un cierto período de tiempo, son suelos delgados, muy pedregosos y tienen poca materia orgánica; los Ultisoles, poseen una coloración roja característica debida principalmente al grado de hidratación del hierro el cual, en su forma oxidada, confiere tonalidades pardo rojizas o rojizas en las partes cóncavas del relieve, y en su forma hidratada da cabida a los colores pardo-amarillentos y amarillentos en las depresiones convexas de estos paisajes (Castillo-Muñoz, 2019; Henríquez *et al.*, 2014). La Figura 31 se ejemplifican tres muestras de suelo tomadas en el distrito de Porozal.

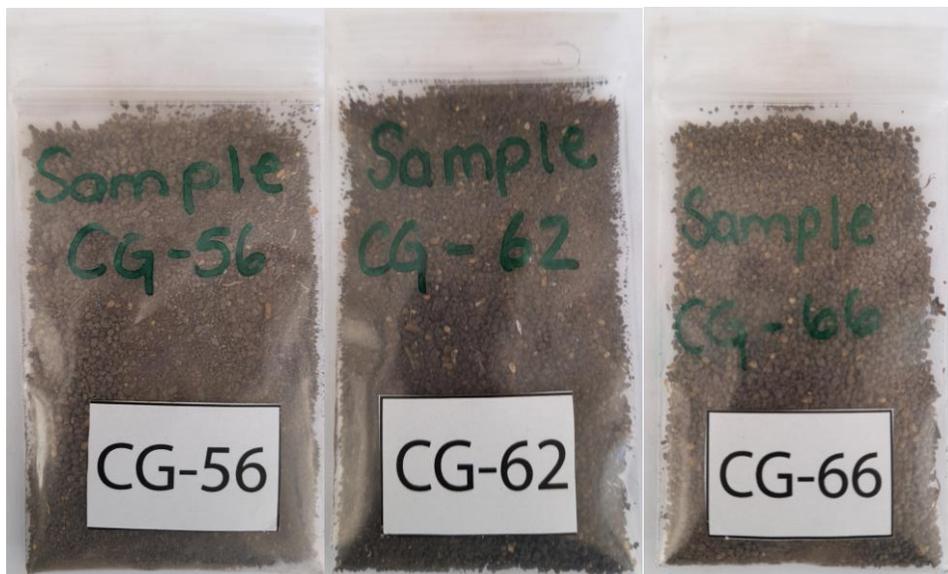


Figura 31. Tres muestras de suelo tamizadas a 1.18 mm del distrito de Porozal, Cañas, Guanacaste.

Por último, el distrito de Cañas presenta una mezcla de todos los tipos mencionados anteriormente según su cercanía limítrofe con los otros distritos al encontrarse en el centro de la distribución, ejemplos de muestra tomada en esta región se encuentran en la Figura 32.



Figura 32. Tres muestras de suelo tamizadas a 1.18 mm del distrito de Cañas, Cañas, Guanacaste.

En cuanto a los tipos de suelo se encuentran varias categorías presentes a lo largo del cantón (ver Figura 33). El Inder, reporta que las actividades predominantes en los suelos de cada uno de los distritos son las siguientes: en Cañas: comercio, servicios, ganadería, granos básicos (*i.e.* arroz), caña azúcar y tilapia; Palmira: ganadería, hortalizas y forestal; San Miguel: granos básicos y

ganadería; Bebedero ganadería, granos básicos y caña azúcar; y Porozal: Ganadería y granos básicos (Instituto de Desarrollo Rural, 2015, 2016).

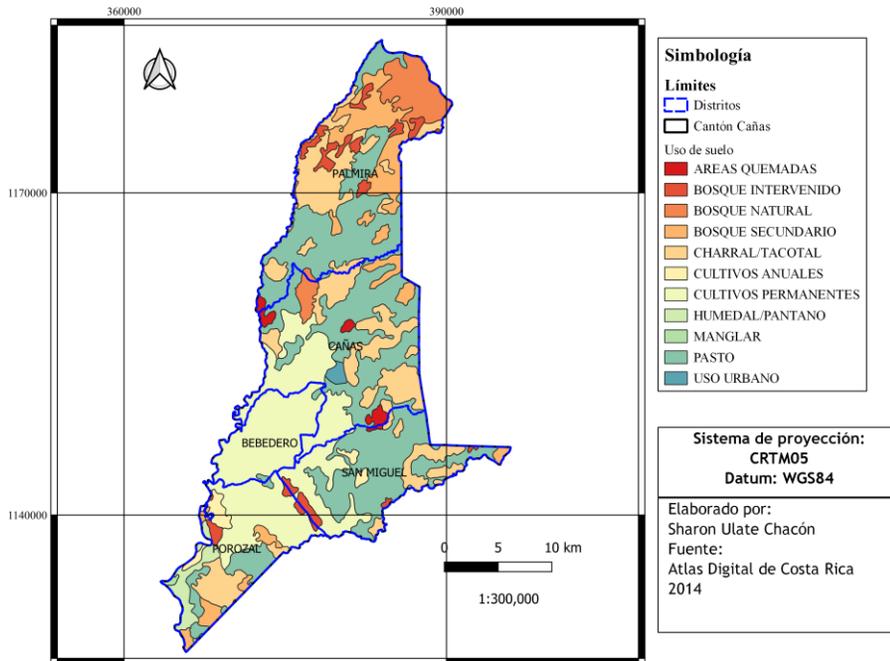


Figura 33. Mapa de uso de suelo para los cinco distritos de Cañas, Guanacaste. Elaborado mediante *QGIS Desktop 3.18.1*.

5.2 Cuantificación de metales pesados

5.2.1 Muestras de suelo

Como se explicó en el apartado anterior, se realizaron dos procedimientos para la cuantificación de metales pesados nefrotóxicos en las muestras de suelo. Dado que en el distrito de Bebedero solo se requerían 6 muestras, se decidió ampliar la cantidad a 10 con la finalidad de tener una cantidad un poco más equitativa a la hora de comparar entre los 5 distritos de muestreo. En el Cuadro 7 se muestra un resumen de la totalidad de resultados cuantitativos obtenidos (véase Apéndice 1, Cuadro A.1.1) mediante PXRf, los datos reportados por el Atlas Geoquímico de Costa Rica y las concentraciones permitidas por la EPA para suelos agrícolas.

Se decide utilizar ambos conjuntos de datos, a pesar de que en los provenientes del ICP-OES no se logró separar algunos compuestos que contenían los metales nefrotóxicos de importancia para la presente investigación, de manera tal que fueran cuantificados y los resultados reportan gran cantidad de muestras por debajo del límite de detección. Según la metodología aplicada esto se debe a ciertas interferencias en las que algunos compuestos no pueden descomponerse, se explica: “Algunos compuestos refractarios de la matriz en la muestra, como el

cuarzo, los silicatos, el dióxido de titanio, la alúmina y otros óxidos, pueden no disolverse y, en algunos casos, pueden retener los elementos analíticos objetivo” (U.S. Environmental Protection Agency, 2007). Por ejemplo, en el valor máximo cuantificado por la metodología del PXRF distrito de Cañas fue de (127 ± 1) mg As/kg suelo, la concentración reportada mediante el ICP-OES fue de (7.32 ± 0.24) mg As/kg suelo.

Lo anterior se explica pues estudios anteriores en la región demuestran que la combinación de ácidos utilizados no logra un proceso de digestión completa cuando se encuentran compuestos de V y As y el titanio (Ti) principalmente. En el caso de dicha muestra, la cuantificación de Ti resultó ser $(146\ 949 \pm 293)$ mg Ti/kg suelo, casi 2000% más que la concentración de Ti reportada en la segunda muestra de valor más alto encontrado. En un estudio previo relacionado con este fenómeno se encontraron relaciones lineales entre la presencia As/Ti y V/Ti (Mayorga López, 2022; Zimmerman *et al.*, 2021).

Cuadro 7. Resumen de resultados obtenidos en muestras de suelo mediante PXRF y datos comparables de literatura.

Valor / Metal en estudio		As	Cd	Hg	Pb	Si	V
Concentración promedio¹ (mg/kg)	Cañas	12.05	12.50	<LD	7.16	114818	186.42
	Palmira	4.70	8.00	<LD	4.21	98379	199.35
	San Miguel	6.00	13.50	3.00	4.09	111175	192.50
	Bebedero	6.80	<LD	<LD	11.80	126859	175.40
	Porozal	3.27	<LD	<LD	4.45	147262	130.27
Concentración máxima¹ (mg/kg)	Cañas	127.00	16.00	<LD	20.00	152924	312.00
	Palmira	8.00	8.00	<LD	7.00	142285	323.00
	San Miguel	12.00	14.00	3.00	8.00	136733	248.00
	Bebedero	16.00	<LD	<LD	30.00	154680	232.00
	Porozal	4.00	<LD	<LD	7.00	163121	225.00
Concentración mínima¹ (mg/kg)	Cañas	2.00	10.00	<LD	3.00	51216	90.00
	Palmira	3.00	8.00	<LD	<LD	52875	70.00
	San Miguel	2.00	13.00	3.00	<LD	93019	126.00
	Bebedero	3.00	<LD	<LD	4.00	101756	77.00
	Porozal	2.00	<LD	<LD	3.00	128412	88.00
Concentración promedio² (mg/kg)		3.23	1.96	-----	34.37	15.25	228.72
Concentración máxima² (mg/kg)		92.73	3.25	-----	78.11	37.87	984.92
Concentración mínima² (mg/kg)		0.05	0.01	-----	0.5	3.15	14.74
US EPA³ (mg/kg)		0.11	0.48	1	200	-----	-----

¹Resultados experimentales obtenidos en el laboratorio de TTU. ²Valores preestablecidos por el Atlas Geoquímico de Costa Rica ^o Valores regulatorios estándares para suelos agrícolas establecidos por la EPA (He *et al.*, 2015)

Por otra parte, se tomaron al azar dos muestras de suelo por distrito y se pasaron por un tamiz No. 635 (de 20 μm) con la finalidad de comparar características físicas del material tamizado. De esta manera se logró evidenciar diferencias en los colores, texturas y porcentaje en peso del tamizado. Se eligió el 20 μm era el tamiz con diámetro de poro más cercanos posibles a PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_1 , tamaños de partícula de gran importancia en esta investigación para conocer la ruta toxicológica que siguen los metales pesados hallados en las matrices.

Las muestras evidenciadas en la Figura 34 se distribuyen en columnas de dos filas cada una, la primera columna, de izquierda a derecha, muestra el tamizado obtenido de las muestras CG-03 y CG-09 del distrito de Cañas; la segunda columna, el resultado de tamizar CG-27 y CG-33 de Palmira; la tercer columna, el resultado de tamizar CG-44 y CG-49 de San Miguel; la cuarta columna, el resultado de tamizar CG-63 y CG- 64 de Porozal, y la cuarta columna, el resultado de tamizar CG-52 y CG-71 de Bebedero.

Cuadro 8. Representación porcentual de la masa del producto tamizado a 20 μm en comparación con la masa total de la muestra.

Masa del tamizado <20 μm con respecto de la masa total de la muestra									
CG-03	CG-09	CG-27	CG-33	CG-44	CG-49	CG-63	CG-64	CG-52	CG-71
2.58%	0.82%	0.11%	0.44%	0.33%	0.63%	0.73%	0.57%	1.10%	2.28%



Figura 34. Diez muestras de suelo al azar tamizadas a 20 μm .

Tal y como se evidencia en el Figura 34 y en el Cuadro 8, los lugares con mayor cantidad de material particulado en sus muestras fueron Cañas y Bebedero, lo cual coincide con la

prevalencia porcentual de la NM en este cantón mostrada en la Figura 35, en donde el código de color más oscuro representa la zona de mayor prevalencia porcentual de la enfermedad, y decrece hasta llegar al color más claro con el menor índice de personas enfermas.

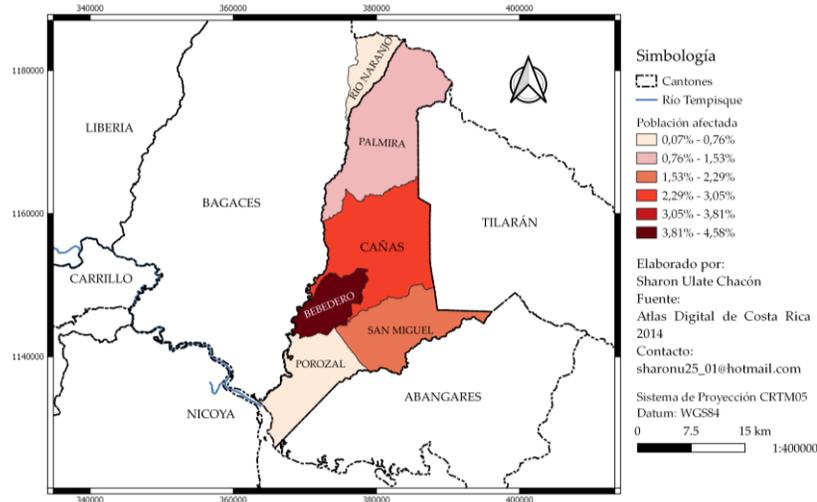


Figura 35. Mapa sobre la prevalencia de NM en Cañas, Guanacaste. Elaborado mediante *QGIS Desktop 3.18.1*.

5.2.2 Muestras de aire

Las primeras muestras de aire analizadas fueron las que se tomaron por estaciones (una en época seca y una en época lluviosa por 24h) en cada distrito. Las muestras desde la CS-01 hasta la PL-10 se identificaron como la inicial de su distrito, una S si corresponde a época seca, una L si corresponde a época lluviosa y el número muestra. Los resultados analizados mediante PXRf y SEM-EDS de las 10 muestras se presentan en el Cuadro 9. Acá se demuestra que metales como el V y Cd, tienden generalmente, a movilizarse en menor cantidad en la época lluviosa. El Pb, por el contrario, se encuentra en mayores concentraciones en época lluviosa en 3 de los 5 distritos.

En cuanto a las muestras mensuales, se tomó una muestra en cada distrito con las masas correspondientes, en el distrito de Cañas la muestra total recolectada fue de (1.00 ± 0.05) g, en Palmira (3.30 ± 0.05) g, San Miguel (2.20 ± 0.05) g, Bebedero (2.20 ± 0.05) g y en Porozal de (1.40 ± 0.05) g. Además, las muestras de Cañas, Bebedero y San Miguel se tomaron en época seca y las de Porozal y Palmira en época lluviosa. Las muestras obtenidas se pueden visualizar en la Figura 36. En esta fotografía se encuentra, a la izquierda y en el centro, ambos filtros de 24 horas, uno para época seca y otro para época lluviosa, y a la derecha, la muestra tomada a lo largo de 30 días en cada uno de los distritos.

Cuadro 9. Resultados obtenidos al analizar la totalidad de las muestras mediante PXRF y SEM-EDS.

Metal / Método	Filtro Blanco*	Concentraciones									
		Cañas		Palmira		San Miguel		Bebedero		Porozal	
		CS-01	CL-02	PS-03	PL-04	SS-05	SL-06	BS-07	BL-08	PS-09	PL-10
As											
PXRF*	<LD	<LD	(19 ± 2)	<LD	<LD	(6 ± 2)	<LD	(12 ± 1)	(14 ± 2)	<LD	<LD
SEM-EDS**		1.85	0.51	0.72	0.18	3.30	0.31	0.69	0.36	0.37	2.95
Cd											
PXRF*	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
SEM-EDS**		0.90	0.48	0.97	0.23	0.45	0.18	0.91	0.44	0.83	1.12
Hg											
PXRF*	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
SEM-EDS**		0.12	0.08	0.13	0.00	0.41	0.02	0.06	0.00	0.09	0.28
Pb											
PXRF*	<LD	(9 ± 2)	(11 ± 2)	<LD	(10 ± 2)	<LD	(10 ± 2)	(24 ± 2)	(14 ± 2)	(7 ± 2)	<LD
SEM-EDS**		0.22	0.21	0.32	0.10	0.38	0.11	0.44	0.16	0.32	0.31
Si											
PXRF*	(25 861 ± 761)	(340 027 ± 801)	(559 925 ± 801)	(470 331 ± 809)	(371 780 ± 1 460)	(471 742 ± 787)	(460 276 ± 1 463)	(402 491 ± 718)	(486 520 ± 580)	(254 590 ± 1 523)	(476 025 ± 1 498)
SEM-EDS**		0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
V											
PXRF*	<LD	<LD	<LD	(255 ± 59)	<LD	(330 ± 62)	<LD	<LD	(413 ± 55)	<LD	<LD
SEM-EDS**		0.14	0.08	0.55	0.07	0.38	0.05	0.64	0.09	0.42	0.39

*Muestras analizadas mediante la técnica de PXRF, concentraciones en (mg Metal/kg polvo). ** Muestras analizadas mediante la técnica de SEM-EDS, concentraciones en (% de peso).



Figura 36. Muestras de aire tomadas en los cinco distritos del cantón de Cañas.

En promedio y considerando la coexistencia de todos estos metales como una sola carga contaminante los sitios que representan un mayor riesgo toxicológico para la población son Bebedero y Cañas. Como segundo punto se analizaron las muestras mensuales distritales (1 muestra continua por 30 días calendario).

Las muestras desde la CM-1 hasta la PM-15 se identificaron como la inicial de su distrito, una M correspondiente a mensual y el número muestra, en el Cuadro 10 se muestran los resultados para dichos análisis. El resumen de las concentraciones se describe a continuación, de mayor a menor: As → Cañas > Bebedero > Palmira > San Miguel > Porozal; Pb → Cañas > Bebedero > San Miguel > Porozal > Palmira; Si → Porozal > San Miguel > Cañas > Bebedero > Palmira; y V → Bebedero > Palmira > San Miguel > Porozal > Cañas.

Además, mediante el análisis en el SEM-EDS se logró visualizar algunos tamaños de partículas y contenido de las muestras mensuales. Los distritos que presentaron menor tamaño de partícula y mayor cantidad de material particulado en este análisis fueron Cañas (Figura 37) y Bebedero (Figura 40). Mientras que las partículas de mayor tamaño se encontraron en la muestra de San Miguel (Figura 39), Palmira (Figura 38) y Porozal (Figura 41).

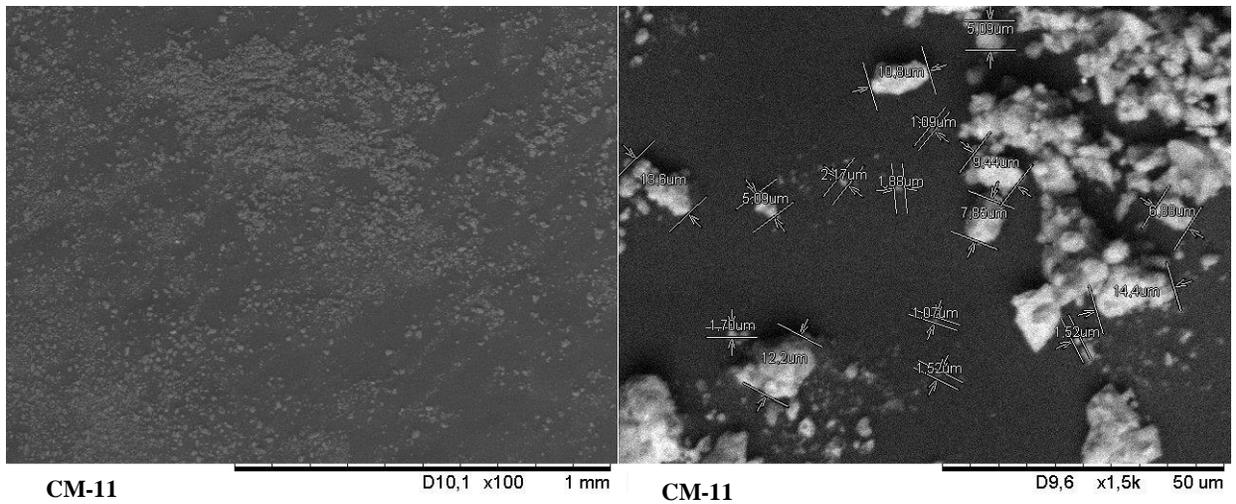


Figura 37. Imágenes obtenidas tras analizar la muestra mensual de Cañas, Cañas, mediante SEM-EDS. A la izquierda, imagen del microscopio electrónico de barrido ampliado 100x y a la derecha, con una resolución de 1500x, las medidas de algunas partículas.

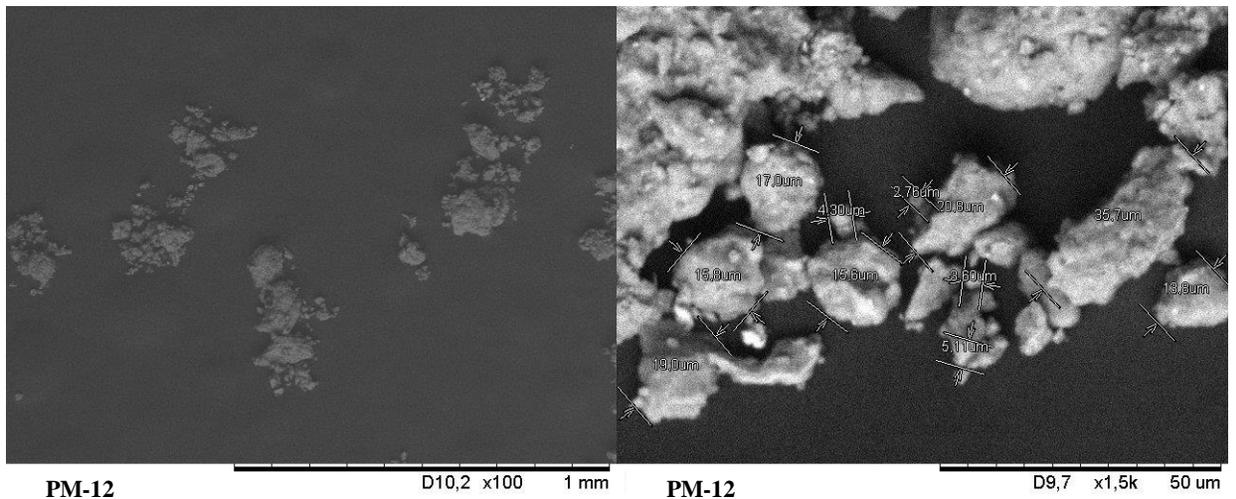


Figura 38. Imágenes obtenidas tras analizar la muestra mensual de Palmira, Cañas, mediante SEM-EDS. A la izquierda, imagen del microscopio electrónico de barrido ampliado 100x y a la derecha, con una resolución de 1500x, las medidas de algunas partículas.

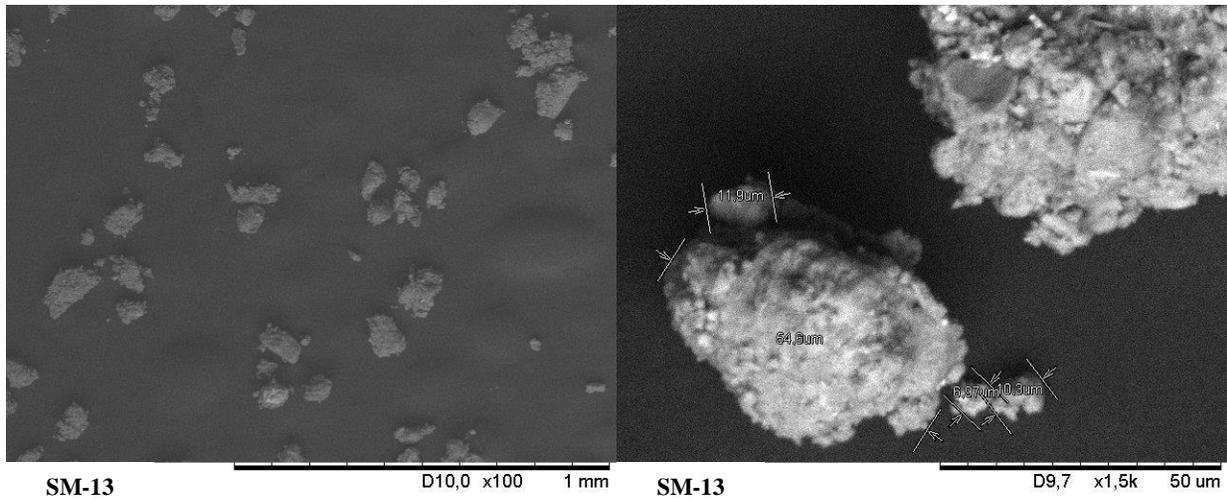


Figura 39. Imágenes obtenidas tras analizar la muestra mensual de San Miguel, Cañas, mediante SEM-EDS. A la izquierda, imagen del microscopio electrónico de barrido ampliado 100x y a la derecha, con una resolución de 1500x, las medidas de algunas partículas.

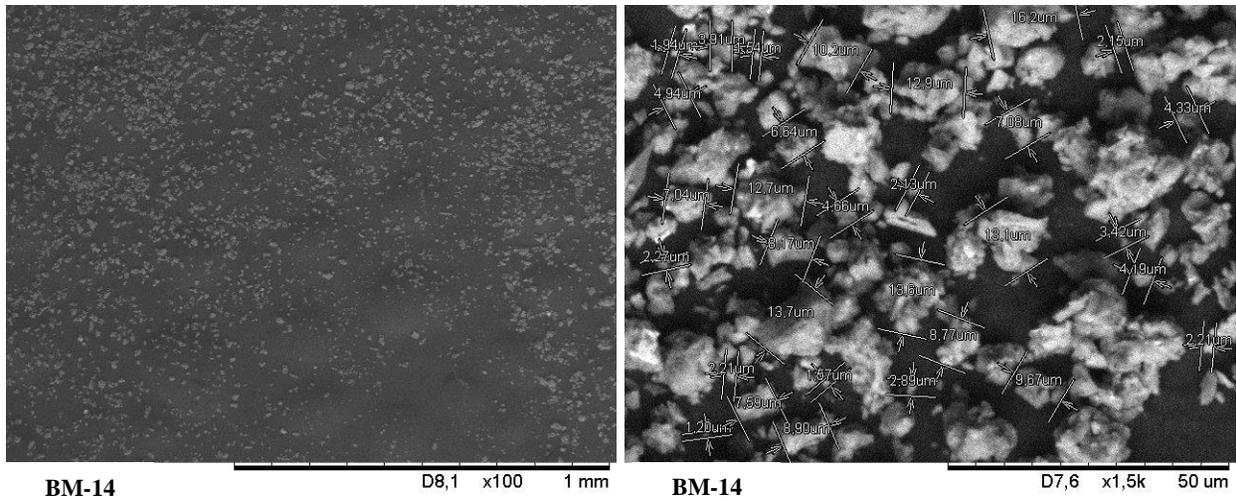


Figura 40. Imágenes obtenidas tras analizar la muestra mensual de Bebedero, Cañas, mediante SEM-EDS. A la izquierda, imagen del microscopio electrónico de barrido ampliado 100x y a la derecha, con una resolución de 1500x, las medidas de algunas partículas.

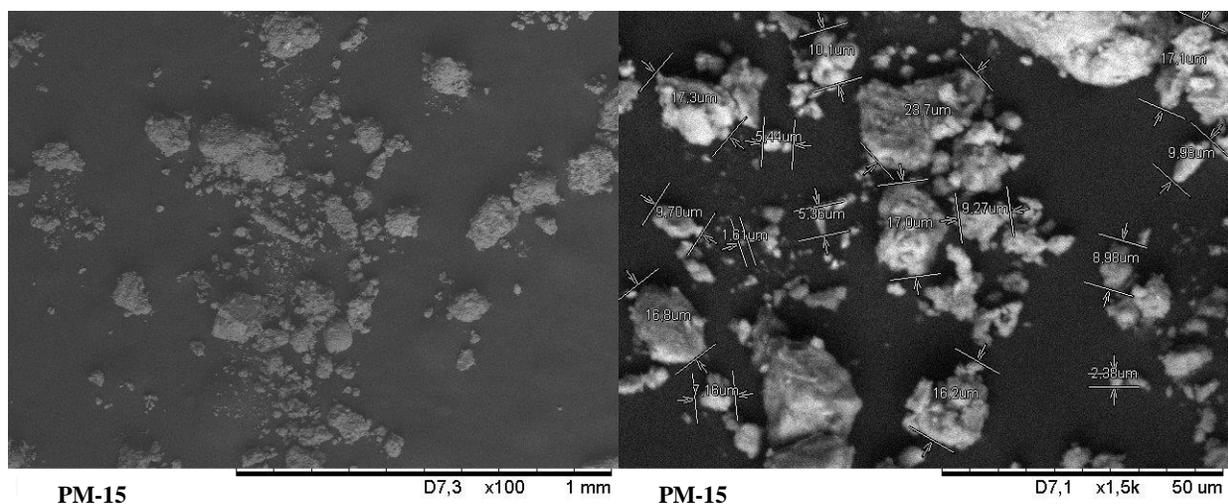


Figura 41. Imágenes obtenidas tras analizar la muestra mensual de Porozal, Cañas, mediante SEM-EDS. A la izquierda, imagen del microscopio electrónico de barrido ampliado 100x y a la derecha, con una resolución de 1500x, las medidas de algunas partículas.

Cuadro 10. Resultados obtenidos al analizar las 5 muestras mensuales mediante PXRF.

Ubicación	Valor	Concentraciones (mg/kg de PM)				
		As	Cd	Pb	Si	V
Cañas	CM-11	15	<LD	136*	144052	149
	Error	1	<LD	1	257	14
Palmira	PM-12	6	<LD	3	135237	224
	Error	0	<LD	1	236	12
San Miguel	SM-13	5	<LD	4	145299	223
	Error	0	<LD	1	241	14
Bebedero	BM-14	7	<LD	8	143809	287
	Error	0	<LD	1	245	13
Porozal	PM-15	4	<LD	4	186310	182
	Error	0	<LD	0	340	13

5.3 Relación de metales pesados encontrados y la prevalencia de nefropatía mesoamericana

En la siguiente sección se analizará la correlación entre los datos obtenidos de muestras de suelo y muestras mensuales que fueron tomadas en el mismo sitio de muestreo que la muestra de suelos, para así poder establecer una correlación entre los metales en el suelo y su movilidad en el medio ambiente de acuerdo con las condiciones ambientales de la zona.

5.3.1 Arsénico

De acuerdo con los resultados obtenidos y tal como se muestra en la Figura 42 y la Figura 43, se evidencia una relación positiva entre las concentraciones de As encontradas entre ambas matrices y los casos reportados en cada una de las regiones, de manera que el distrito de Cañas es el que cuenta con mayores concentraciones de As y mayor cantidad absoluta de personas enfermas.

Las correlaciones lineales entre la cantidad de casos y las concentraciones de As encontradas fueron del 96% en el suelo y 99% en el aire.

Es importante aclarar que, a pesar de que el distrito de Cañas cuenta con mayor cantidad de personas enfermas, este presenta una mayor cantidad de población, mientras que Bebedero presenta gran cantidad de casos, pero su población es menor; es por ello por lo que en número absolutos Cañas es la región con mayor cantidad casos, pero Bebedero es el distrito con mayor prevalencia porcentual por cada 100 000 habitantes del cantón. De acuerdo con los datos obtenidos, para el caso del arsénico se encontró un coeficiente de correlación lineal de 0.97, lo cual indica una correlación positiva entre las matrices, de manera que cuando más arsénico se encontró en el suelo, más arsénico se encontró en el material particulado recolectado por un mes en el sitio.

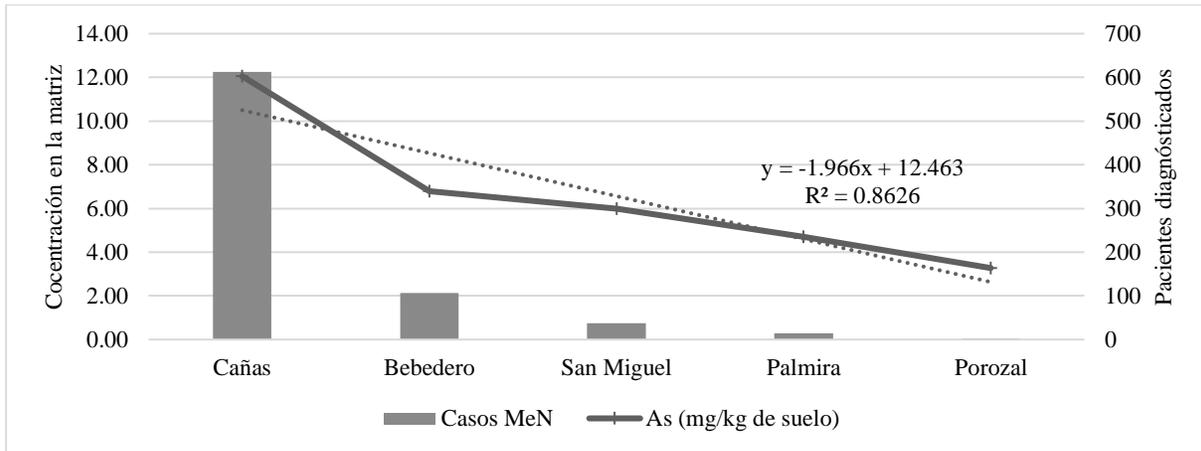


Figura 42. Relación entre la concentración promedio de As obtenida en suelo versus la prevalencia de NM.

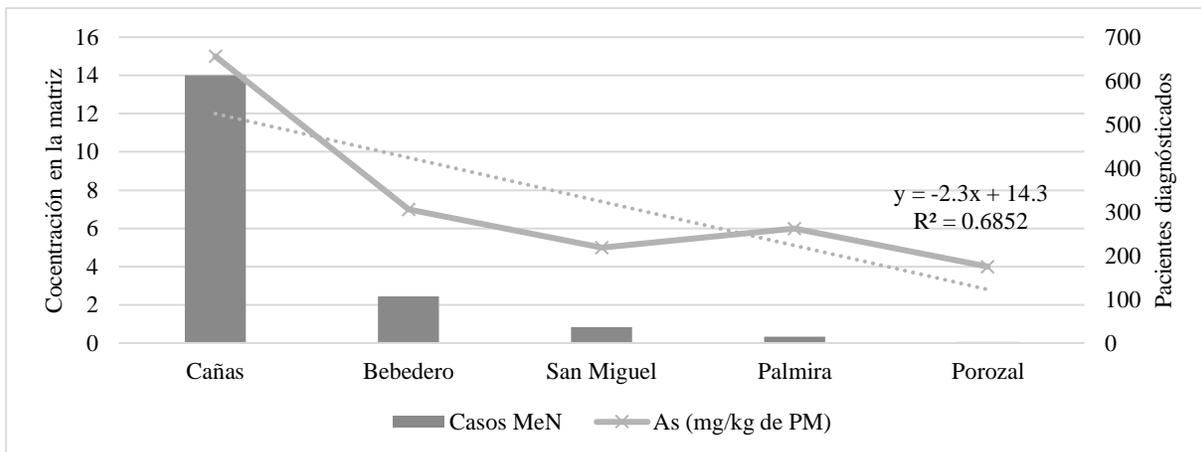


Figura 43. Relación entre la concentración promedio de As obtenida en suelo versus la prevalencia de NM.

5.3.2 Cadmio

De acuerdo con los resultados obtenidos y tal como se muestra en la Figura 44, no se evidencia una relación directa entre las concentraciones de Cd encontradas y los casos reportados. Este dato puede cambiar con un método que presente límites de detección más bajos (< 5 ppb) que los del equipo utilizado para este proyecto. Las correlaciones lineales entre la cantidad de casos y las concentraciones de Cd encontradas son del 44% en el suelo. Para este metal no se logró establecer una correlación lineal entre matrices, pues todos los valores de las muestras de aire se establecieron por debajo del límite de detección.

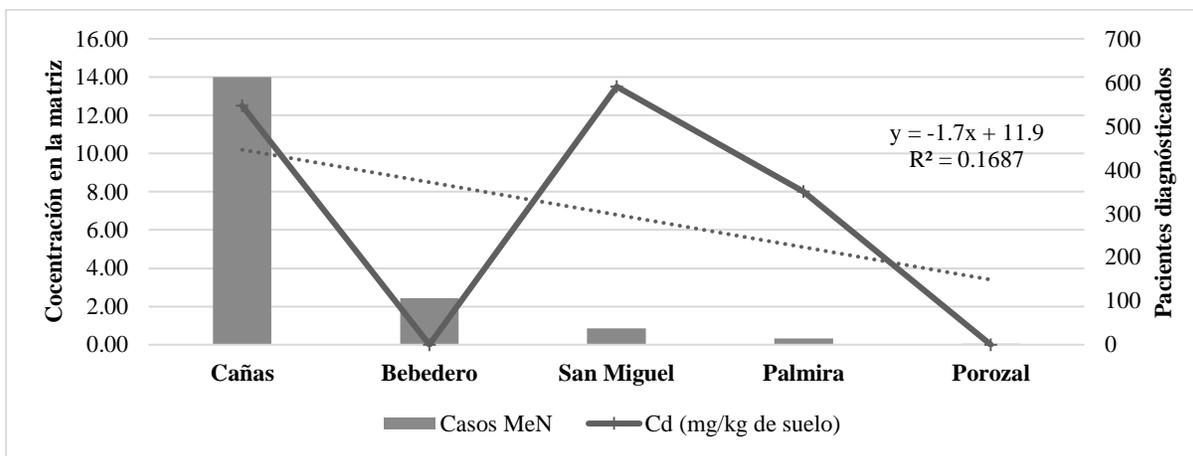


Figura 44. Relación entre la concentración promedio de Cd obtenida en suelo versus la prevalencia de NM.

5.3.3 Mercurio

En el caso del mercurio, se necesita un muestreo mayor y un análisis más exhaustivo debido a que solo el distrito de San Miguel presentó concentraciones cuantificables de Hg. El valor obtenido en ambas matrices fue de 3 mg/kg de material, sin embargo, este valor se encuentra por debajo del límite de detección para este metal (5 ppm). Por el motivo anterior, no se evidencia una relación entre las concentraciones de Hg encontradas y los casos reportados. Es importante destacar que tanto la muestra de suelo como la de aire que cuantificaron mercurio se tomaron en el mismo lugar, por lo cual, de encontrarse en la región supone movilidad directa entre las matrices ambientales.

5.3.4 Plomo

De acuerdo con los resultados obtenidos y tal como se muestra en la Figura 45 y la Figura 46, se evidencia que para la matriz de suelo no se establece una clara línea que logre relacionar las

concentraciones de Pb encontradas y los casos reportados en cada una de las regiones pues el coeficiente de correlación lineal obtenido fue del 28%. Sin embargo, para la matriz de aire sí se evidencia dicha correlación lineal con un valor del 99%, lo cual demuestra que la movilidad atmosférica representa un mayor riesgo toxicológico que la movilidad del compuesto en el suelo.

Por otra parte, no se logró encontrar una correlación lineal fuerte entre las concentraciones en las matrices, pues el coeficiente obtenido es del 17%, en este valor inciden las concentraciones considerablemente altas obtenidas en la matriz aérea del distrito de Cañas (136 mg/kg de PM), la cual no coincide con el mayor valor obtenido en la matriz suelo que se obtuvo en Bebedero (11.80 mg/kg de suelo). En este caso, el hecho de que el distrito de Cañas sea el centro suburbano del cantón representa un mayor tránsito vehicular y este factor no fue tomado en consideración como una variable de análisis, pues es una emisión contaminante antropogénica. Sin embargo, dado que la muestra se tomó en el centro del distrito, la carga de automotores pudo incidir en la elevación de la concentración de Pb en la matriz aérea de la zona.

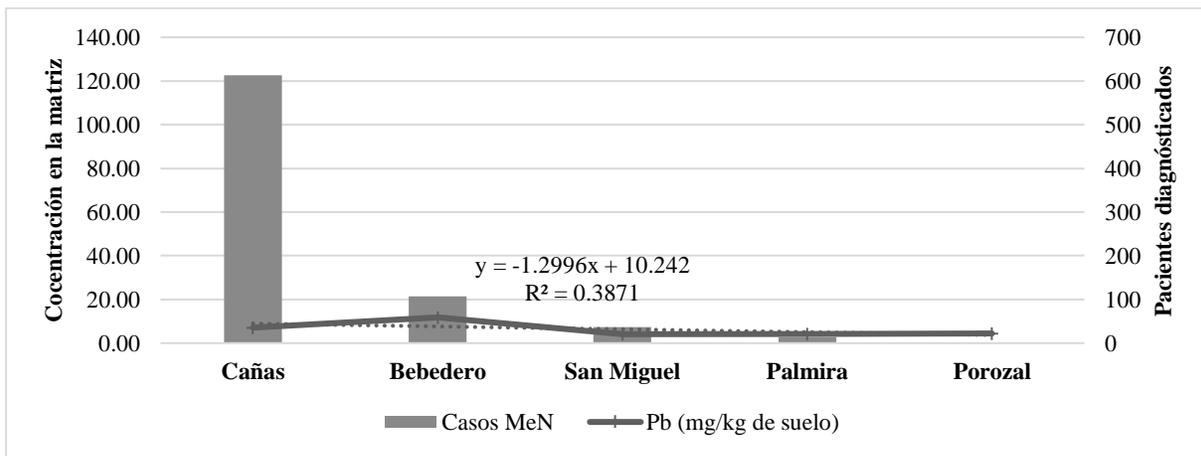


Figura 45. Relación entre la concentración promedio de Pb obtenida en suelo versus la prevalencia de NM.

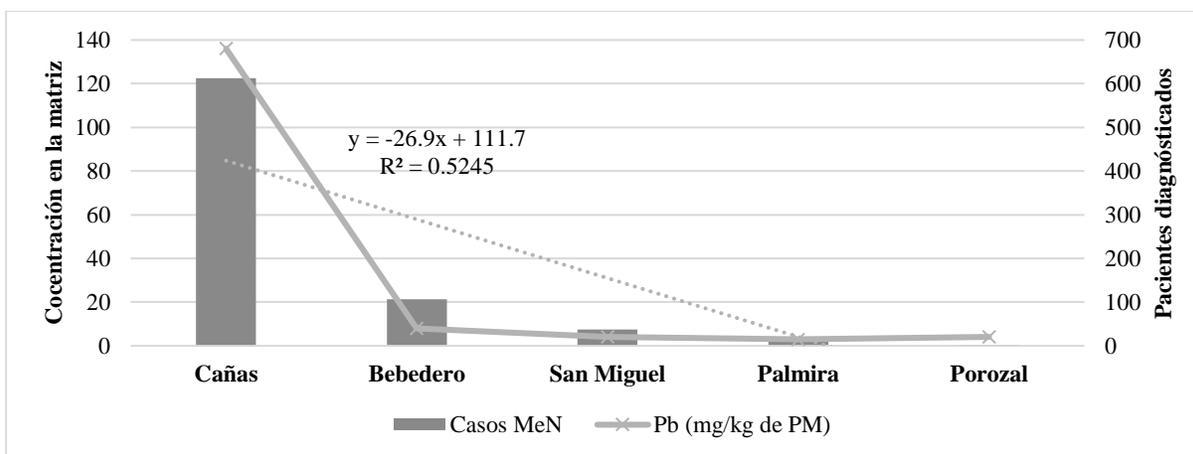


Figura 46. Relación entre la concentración promedio de Pb obtenida en aire versus la prevalencia de NM.

5.3.5 Sílice

Las Figura 47 y Figura 48 no evidencian una relación directa entre las concentraciones de Si encontradas y los casos reportados en cada una de las regiones, a pesar de que estudios previos confirman que el Si proveniente de los residuos de la quema de caña contribuye con el escenario toxicológico. Los valores obtenidos para la correlación lineal entre el número de pacientes y la concentración en matrices son los siguientes: -0.15 para suelo y -0.26 para aire. Posteriormente, se deberá analizar si el Si se encuentra como c-sílice o Si amorfo en ambas matrices, lo cual determinaría si existe un riesgo real por este compuesto y en qué grado, debido a que el Si cristalino representa un riesgo como carcinógeno tal y como se explicó anteriormente. Para un estudio previo de suelos de la zona que se encuentra pendiente de publicación, se logró comparar 2 muestras superficiales de suelos del área en estudio (ver Figura 49 y Figura 50), en él se logró comprobar la existencia de c-sílice tanto en Bebedero como en Cañas. El índice de correlación lineal obtenido entre ambas matrices fue del 90% lo cual puede relacionarse con un movimiento vertical del compuesto entre el suelo y el aire de la región.

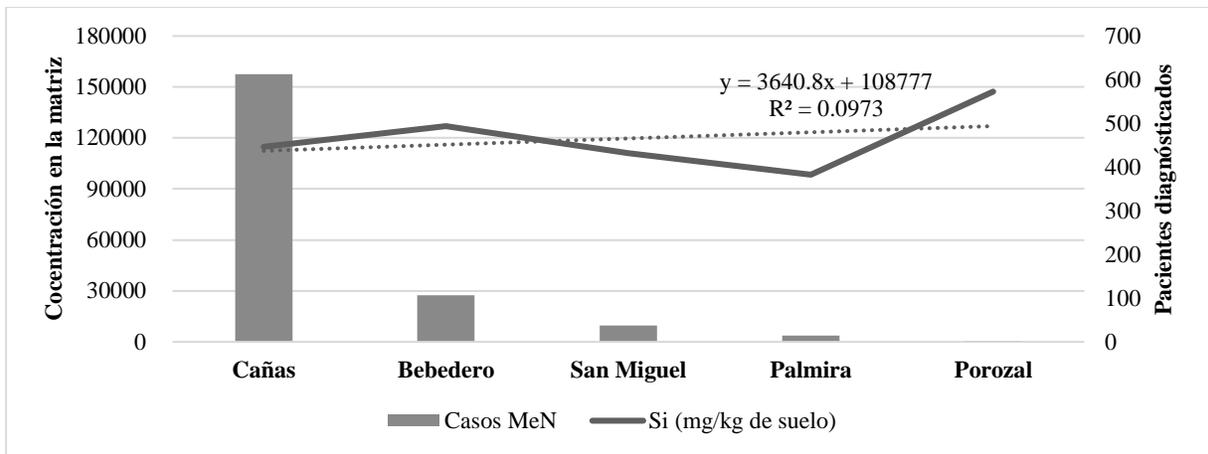


Figura 47. Relación entre la concentración promedio de Si obtenida en suelo versus la prevalencia de NM.

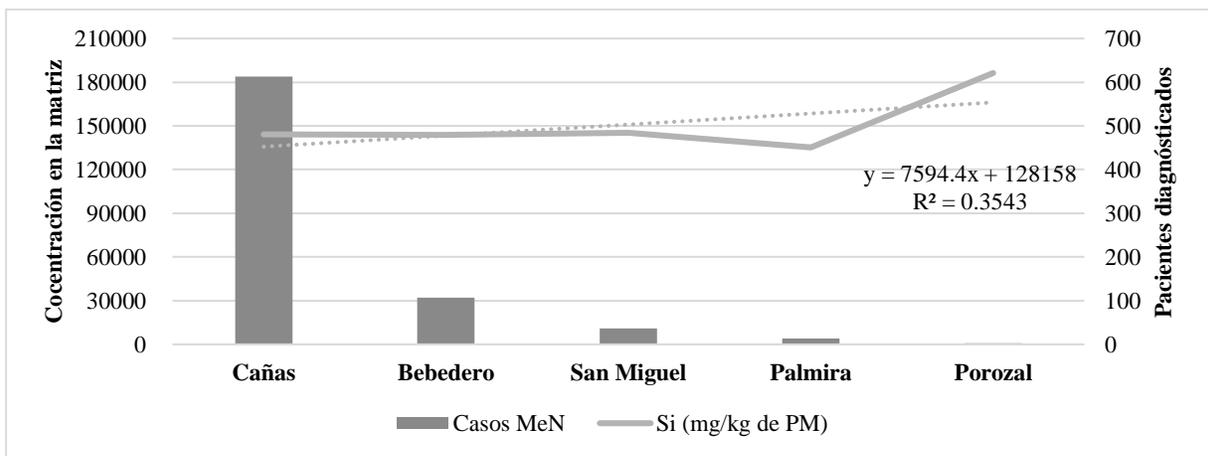


Figura 48. Relación entre la concentración promedio de Si obtenida en suelo versus la prevalencia de NM.

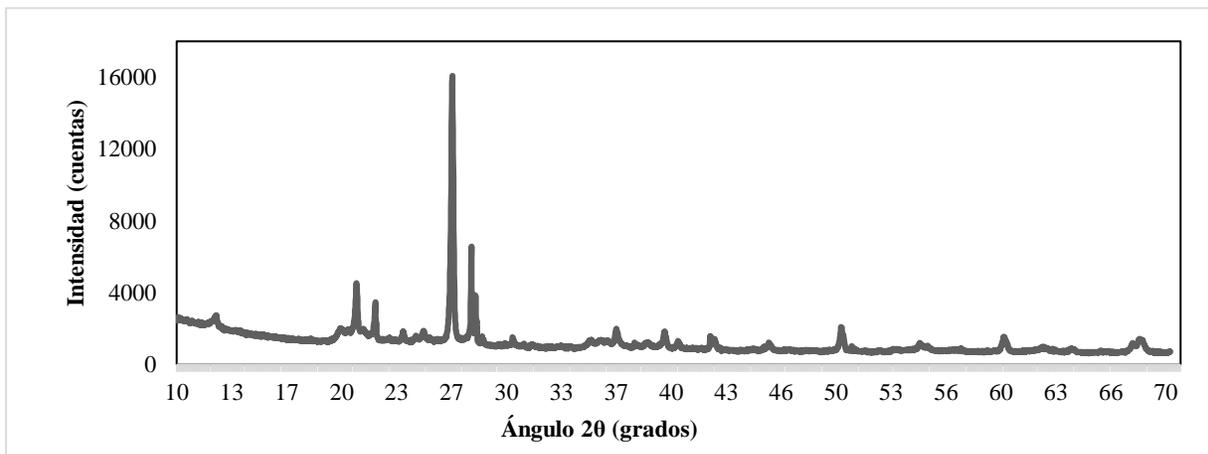


Figura 49. Patrones de XRD de una muestra de suelo del distrito de Bebedero, Cañas, Guanacaste.

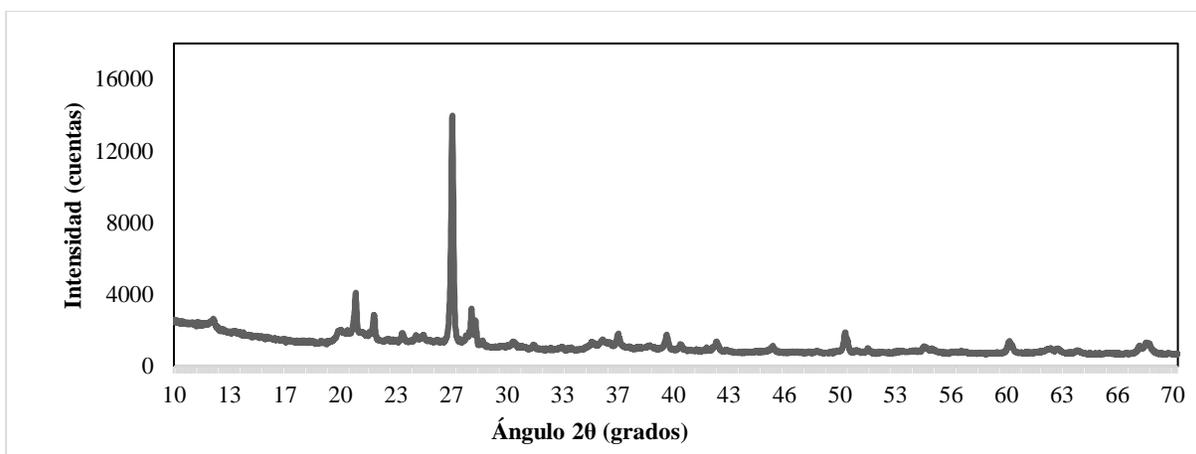


Figura 50. Patrones de XRD de una muestra de un ingenio reconocido del distrito de Cañas, Cañas Guanacaste.

5.3.6 Vanadio

De acuerdo con los resultados obtenidos y tal como se muestra en la Figura 51 y Figura 52, no se evidencia una alta correlación entre las concentraciones de V encontradas y los casos reportados en cada una de las regiones, para el caso del suelo el valor obtenido fue de 0.23 y para el caso del aire el valor fue de -0.57. Aunado a esto, no se encontró correlación lineal significativa en ambas matrices, pues la obtenida fue de 20%; sin embargo, en los lugares con mayores concentraciones se lograron cuantificar en un rango de 150-200 mg/kg en suelo y 150-200 mg/kg en aire, lo cual podría suponer un movimiento vertical del compuesto en la región.

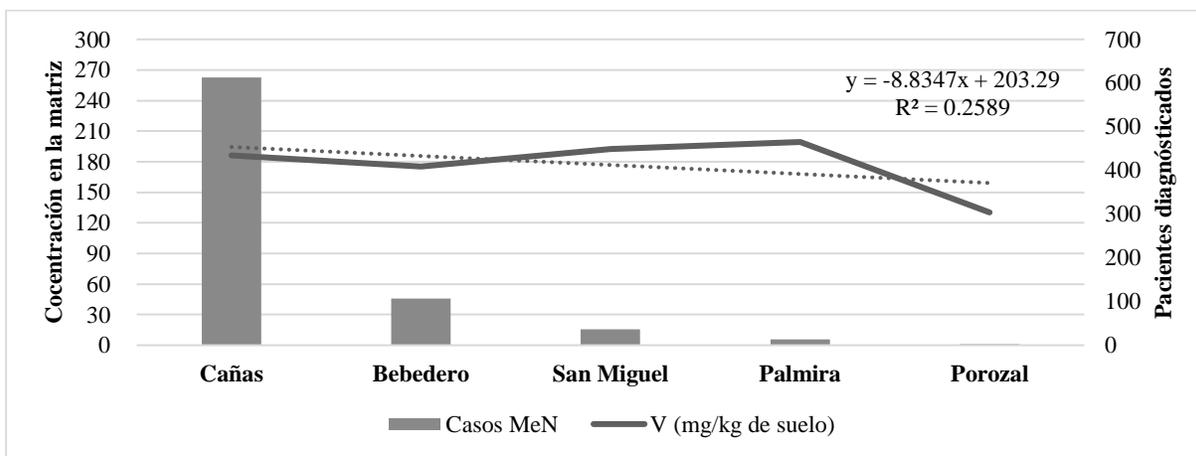


Figura 51. Relación entre la concentración promedio de V obtenida en suelo versus la prevalencia de NM.

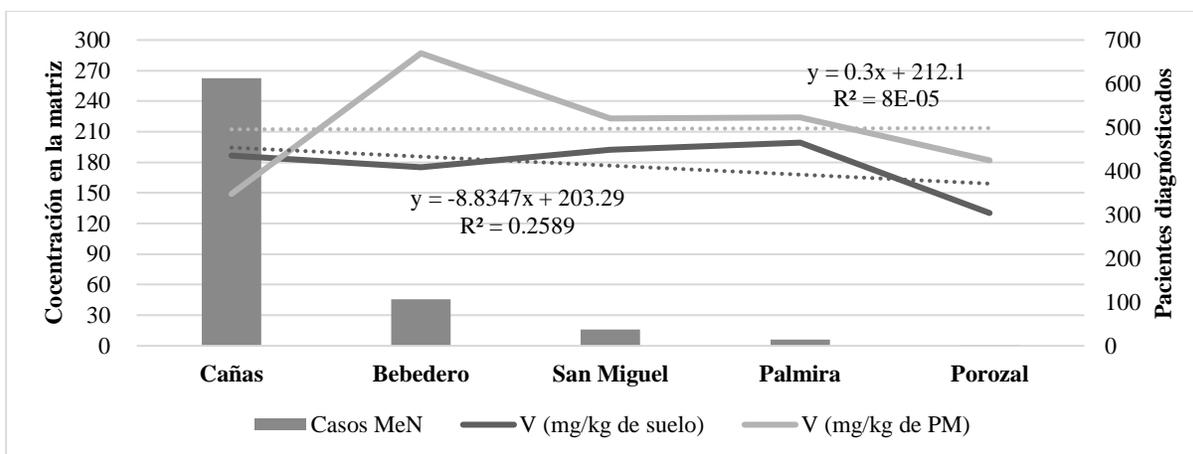


Figura 52. Relación entre la concentración promedio de V obtenida en suelo y aire versus la prevalencia de NM.

5.3.7 Muestra del polvo del Sahara

Como un adicional para esta investigación se tomó una muestra de PM durante la ocurrencia del fenómeno del paso del polvo del Sahara en Costa Rica. La muestra tuvo una duración temporal de 48 horas efectivas entre el 23 y 25 de junio del año 2020, con 0 mm de precipitación contabilizados, rangos de temperatura entre 24 °C y 27 °C medida cada 2 horas y con velocidades de viento entre los 1.08 km/h y 23 km/h durante todo el tiempo de muestreo. La masa total recolectada fue de 3.6 g y la muestra se ejemplifica en la Figura 53. Se decidió tomar esta muestra ante la creencia nacional popular de que el PM de la región desértica es beneficioso pues aporta gran cantidad de minerales para los suelos agrícolas.



Figura 53. Muestra aérea recolectada por gravedad durante el fenómeno del paso del polvo del Sahara por Costa Rica en junio de 2020.

Entre el 23 y el 30 de junio del 2020, el país estuvo bajo una capa densa de polvo de más de 3 km de espesor desde el nivel del mar, con una máxima concentración de partículas el 25 de

ese mes, de acuerdo con la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) la nube de polvo del Sahara observada en junio del 2020 es la más densa de los últimos 50 años, con una cantidad de partículas suspendidas de diámetro, aerodinámico equivalente de 10 μm (PM_{10}) de hasta 425 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Martinez, 2020).

Para analizar el polvo del Sahara que ingresó a Costa Rica, los científicos utilizaron el Microscopio Electrónico de Barrido SEM-EDS JEOL del LANOTEC-CeNAT, el cual mostró una composición química rica en elementos como: carbono, oxígeno, silicio, sodio, magnesio, aluminio, potasio, azufre, cloro, calcio y hierro. Además, mediante el SEM se observó la morfología, textura y el tamaño de las partículas recolectadas que en su mayoría tienen un tamaño muy pequeño igual o menor a 5 μm de diámetro con una distribución de tamaños entre 0,2 μm y 5 μm (Ortiz Cubero, 2020).

La muestra tomada a una altura de 1 279 m.s.n.m. para uso exclusivo del presente informe, fue analizada en el TTU mediante la técnica de PXRF, siguiendo la misma metodología de las muestras de aire y los resultados se muestran en el Cuadro 11; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Según los hallazgos de la Universidad Nacional sobre el tamaño de partícula y las elevadas concentraciones encontradas de algunos metales como Al, Zn y Pb, se considera un riesgo toxicológico real la exposición en largos periodos al polvo del Sahara que debe ser estudiado, pues comúnmente las afectaciones generales consisten en alergias y agravamiento de cuadros de asma en la salud humana.

Cuadro 11. Resultados de un análisis completo mediante la técnica PXRF en una muestra del polvo del Sahara durante 2020.

Elemento	Concentración (mg/kg de PM)	Error (mg/kg de PM)	Recuperación
Mg	0	4283	33.85%
Al	219909	491	83.81%
Si	8768	62	64.60%
P	0	65	39.43%
S	2146	17	-
K	0	113	83.41%
Ca	4849	13	80.34%
Ti	880	22	90.66%
V	0	13	77.79%
Cr	0	8	74.25%
Mn	120	3	90.15%
Fe	8787	21	119.96%
Co	69	4	281.43%
Ni	0	3	129.54%
Cu	84	2	106.75%
Zn	83745	136	104.61%
As	6	1	142.08%
Se	0	1	-
Rb	4	0	101.38%
Sr	77	1	98.64%
Zr	30	1	125.33%
Nb	5	1	-
Ag	0	2	52.50%
Cd	0	2	143.59%
Sb	0	4	80.35%
Ba	0	169	92.62%
W	0	25	104.39%
Hg	0	8	96.66%
Pb	204	2	97.85%
Th	15	2	-
U	0	1	44.20%

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

En esta sección se presentarán las conclusiones y recomendaciones por parte de la autora y colaboradores del proyecto. Primero, existen factores ambientales como la velocidad del viento, la humedad relativa, el promedio de precipitaciones y la temperatura en la zona de Cañas que inciden significativamente en el establecimiento de un escenario toxicológico positivo para movilización de metales pesados nefrotóxicos entre las matrices de aire y suelo, lo que sugiere vías de ingreso por inhalación, ingestión y contacto dérmico para los compuestos estudiados.

Segundo, se considera que existe movilidad de metales pesados nefrotóxicos entre las matrices ambientales estudiadas y en gran parte estos intercambios median las condiciones climáticas estudiadas. De manera que, existen concentraciones más altas de As, Cd, Hg, Pb, Si y V en las muestras de aire en época seca cuando las precipitaciones son casi nulas en los lugares en estudio. Mediante la técnica de PXRF, el V solo logró cuantificarse en época seca en Palmira y San Miguel, en época lluviosa en Bebedero, y las restantes las concentraciones se encontraban bajo el límite de detección. El Cd y el Hg no lograron ser cuantificados de manera satisfactoria en las muestras de aire por las limitaciones del análisis.

Tercero, se logró comprobar de manera visual que existen diferencias importantes entre la cantidad y textura del material particulado menor a 20 μm recolectado en la región, en donde la mayor disponibilidad coincide con los lugares de mayor impacto de la patología. Sin embargo, no se logró hacer análisis más profundos de textura en el suelo por limitaciones metodológicas debido a que no se contemplaba como parte del proyecto.

Cuarto, a pesar de que no existen correlaciones lineales absolutas entre la cantidad de casos, si, hipotéticamente, se estableciera un efecto aditivo considerando la suma de todas las concentraciones obtenidas como la exposición a una sola carga contaminante, en el caso de los suelos, la sumatoria de todos los tóxicos refleja que la mayor dosis de exposición toxicológica se presenta en el distrito de Porozal, y en orden decreciente Bebedero, Cañas, San Miguel y Palmira. Sin embargo, dado que condiciones ambientales como dirección y velocidad del viento son menores, así como la temperatura y precipitación mayores, existe menor movilidad de la carga contaminante desde los suelos en el distrito de Porozal. Por el contrario, si se aplicara la misma

relación estadística, la sumatoria de la carga contaminante en el aire resulta mayor en el distrito de Cañas, y en orden decreciente: Bebedero, San Miguel, Palmira y Porozal.

Por último, se logró comprobar la presencia de metales pesados nefrotóxico en todos los distritos del cantón de Cañas, y se concluye que existe una posible relación positiva entre las concentraciones de metales encontrados en el suelo y en el aire y la prevalencia de la Nefropatía Mesoamericana en el área de estudio. Además, existe una posible relación entre las condiciones ambientales, geográficas y geológicas como la temperatura, precipitación, humedad, dirección y velocidad del viento, altitud, relieve, origen del suelo, entre otros, y la prevalencia de la enfermedad.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda a futuros investigadores realizar un estudio de carácter estadístico de causalidad, con el fin de demostrar si realmente existe una relación causa-efecto entre la prevalencia de la enfermedad y la concentración de metales nefrotóxicos hallada en ambas matrices.
- Se recomienda a futuros investigadores establecer la composición gravimétrica de partículas menores a 20 μm , así como su composición fisicoquímica en ambas matrices, para así poder establecer con mayor precisión la toxicocinética de los metales en estudio dentro del cuerpo.
- Se recomienda a futuros investigadores analizar mayor cantidad de muestras de suelo a nivel superficial, para lograr una comparación directa entre la disponibilidad inmediata y la movilidad de los contaminantes.
- Se recomienda a futuros investigadores establecer un muestreo más amplio de la movilidad atmosférica de contaminantes existente en la región, de manera tal que, se amplie el número de muestras atmosféricas por gravedad, se amplíe el número de muestras por impactación y se establezca una mayor trazabilidad de los datos de las condiciones climáticas ocurrentes durante el periodo de muestreo.
- Se recomienda a futuros investigadores analizar muestras biológicas (*i.e.* pelo, sangre), para comprobar si existe bioacumulación real de los metales nefrotóxicos encontrados en los habitantes de la región y la carga que moviliza el paciente en su torrente sanguíneo.

7. REFERENCIAS

- Abdul, K. S., Jayasinghe, S. S., Chandana, E. P. S., Jayasumana, C., & De Silva, P. M. C. S. (2015). Arsenic and human health effects: A review. En *Environmental Toxicology and Pharmacology* (Vol. 40, Número 3, pp. 828–846). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2015.09.016>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2004). Interaction profile for arsenic, cadmium, chromium and lead. En *Department of Health and Human Services* (Número mayo).
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2011). *Cadmium (Cd) Toxicity: What Diseases Are Associated with Chronic Exposure to Cadmium?* Environmental Medicine. <https://www.atsdr.cdc.gov/csem/csem.asp?csem=6&po=12>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2012a). *Public Health Statement: Mercury*. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. <https://www.atsdr.cdc.gov/phs/phs.asp?id=112&tid=24>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2012b). *Toxicological profile for Vanadium*. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp.asp?id=276&tid=50>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2019). *Toxicological Profile for Silica*. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp.asp?id=1483&tid=290>
- Ahamed, M., & Siddiqui, M. K. J. (2007). Environmental lead toxicity and nutritional factors. En *Clinical Nutrition* (Vol. 26, Número 4, pp. 400–408). <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2007.03.010>
- Alfaro, E. J., & Pérez-Briceño, P. M. (2014). Análisis del impacto de fenómenos meteorológicos en Costa Rica, América Central, originados en los mares circundantes. *Revista de Climatología*, 14, 1–11.
- American Kidney Fund. (2021, septiembre 2). *Chronic Kidney Disease (CKD) Symptoms, Treatment, Causes & Prevention*. <https://www.kidneyfund.org/kidney-disease/chronic-kidney-disease-ckd/>
- American Society of Nephrology. (2018). Chronic Kidney Diseases in Agricultural Communities: A discussion with NIEHS and NIDDK. *ASN Kidney News*, 26–27.

- Ashe-Goins, F., Bansal, V., & Gutierrez, O. (2021). *Causas, síntomas y tratamientos de proteína en la orina (proteinuria)*. American Kidney Fund (AKF). <https://www.kidneyfund.org/en-espanol/enfermedad-de-los-rinones/falla-de-los-rinones/>
- Asociación Centroamericana y del Caribe de Nefrología e Hipertensión. (2017). *Historia de la Nefropatía Mesoamericana*. <http://acecanh.org/new/historia-de-la-nefropatia-mesoamericana>
- Bennett, W. M. (1985). Lead nephropathy. *Kidney International*, 28(2), 212–220. <https://doi.org/10.1038/ki.1985.143>
- Brown, J. M., Pfau, J. C., Pershouse, M. A., & Holian, A. (2005). Silica, apoptosis, and autoimmunity. *Journal of Immunotoxicology*, 1(3–4), 177–187. <https://doi.org/10.1080/15476910490911922>
- Bustamante, X. (2018). *Pacientes con enfermedad renal crónica en diálisis se triplicó*. Caja Costarricense de Seguro Social. <https://www.ccss.sa.cr/noticia?pacientes-con-enfermedad-renal-cronica-en-dialisis-se-triplico>
- Carl-Gustaf, E., Wernerson, A., & Wijkström, J. (2015). Mesoamerican Nephropathy (MeN): A ‘New’ Chronic Kidney Disease related to Occupational Heat Exposure with Repeated Deprivation of Salts and Water. *International Journal of Nephrology and Kidney Failure*, 1(2). <https://doi.org/10.16966/2380-5498.109>
- Castillo-Muñoz, R. (2019). *Atlas Geoquímico de Costa Rica, Suelos: Fertilidad y Medioambiente* (Vol. 1). Edinexo.
- Cerdas Calderón, M. (2005). Chronic kidney disease in Costa Rica. *Kidney International, Supplement*, 68(97), S31–S33. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1755.2005.09705.x>
- Chacón, V. (2019, noviembre 19). Costa Rica presenta concentraciones de arsénico en 40% de su territorio. *Semanario Universidad*, 148, 148–162.
- Chavarría, A. R., & Chacón, E. M. (2020). Mortalidad y egresos hospitalarios por enfermedad renal crónica compatibles con enfermedad crónica de causas no tradicionales, Costa Rica. *Acta Médica Costarricense*, 58(1), 1–14. <https://doi.org/10.51481/amc.v58i1.907>
- Chen, R., Yang, C., Yuming, G., Chen, G., Li, S., Li, P., Wang, J., Wang, F., & Zhang, L. (2022). POS-281 ASSOCIATION BETWEEN AMBIENT PM1 AND THE PREVALENCE OF CHRONIC KIDNEY DISEASE IN CHINA: A NATIONWIDE STUDY. *Kidney International Reports*, 7(2), S125. <https://doi.org/10.1016/j.ekir.2022.01.301>

- Comisión Técnica Regional. (2007). *Agrocadena de la caña de azúcar para la producción de dulce*.
- Cordero Parra, M. (2018, mayo 3). Se triplica cantidad de pacientes que recibieron diálisis por enfermedad renal crónica. *Semanario Universidad*.
- Correa-Rotter, R., Wesseling, C., & Johnson, R. J. (2014). CKD of unknown origin in Central America: The case for a mesoamerican nephropathy. En *American Journal of Kidney Diseases* (Vol. 63, Número 3, pp. 506–520). <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2013.10.062>
- Davey, J. C., Nomikos, A. P., Wungjiranirun, M., Sherman, J. R., Ingram, L., Batki, C., Lariviere, J. P., & Hamilton, J. W. (2008). Arsenic as an endocrine disruptor: Arsenic disrupts retinoic acid receptor- and thyroid hormone receptor-mediated gene regulation and thyroid hormone-mediated amphibian tail metamorphosis. *Environmental Health Perspectives*, *116*(2), 165–172. <https://doi.org/10.1289/ehp.10131>
- de Arriba, G., Gutiérrez Avila, G., Torres Guinea, M., Moreno Alia, I., Herruzo, J. A., Rincón Ruiz, B., Díaz Tejeiro, R., López Rubio, M. E., Vozmediano Poyatos, C., & Gómez Roldán, C. (2021). La mortalidad de los pacientes en hemodiálisis está asociada con su situación clínica al comienzo del tratamiento. *Nefrología*, *41*(4), 461–466. <https://doi.org/10.1016/j.nefro.2020.11.006>
- Elizondo Alvarado, M. J. (2015). Suelos de Costa Rica Orden Molisol. En *INTA*.
- Englert, N. (2004). Fine particles and human health - A review of epidemiological studies. *Toxicology Letters*, *149*(1–3), 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2003.12.035>
- Environmental Protection Agency. (1999). *Toxicological Review: Cadmium and Compounds*. 7440, 108.
- Espinoza, A., Vaquerano, B., Torres, R., Montiel, H., & Organización Panamericana de la Salud. (2003). Efectos de los plaguicidas en la salud y el ambiente en Costa Rica. En *Organización Panamericana de la Salud*. <https://doi.org/10.1007/BF02909308>
- Fernández-Fresnedo, G., Rodrigo, E., Piñera, C., Herráez, I., Ruiz, J., & Arias, M. (2002). Insuficiencia renal «oculta» por valoración de la función renal mediante la creatinina sérica. *Nefrología*, *XXII*(2), 144–151.
- Fernández-Rojas, M. M. (2018). *Prevalencia de Nefropatía Mesoamericana en pacientes con hemodiálisis*. Universidad Rafael Landívar.
- Fernández Tena, A., & Casan Clarà, P. (2012). Depósito pulmonar de partículas inhaladas. En

- Archivos de Bronconeumología* (Vol. 48, Número 7, pp. 240–246). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/j.arbres.2012.02.003>
- García-Trabanino, R., Cerdas, M., Madero, M., Jakobsson, K., Barnoya, J., Crowe, J., Jarquín, E., Guzmán-Quilo, C., & Correa-Rotter, R. (2017). Nefropatía mesoamericana: revisión breve basada en el segundo taller del Consorcio para el estudio de la Epidemia de Nefropatía en Centroamérica y México (CENCAM). *Nefrología Latinoamericana*, 14(1), 39–45.
<https://doi.org/10.1016/j.nefrol.2016.11.001>
- García-Trabanino, R., & Correa-Rotter, R. (2020, junio 6). *Nefropatía Endémica Mesoamericana*. Nefrología al día. <https://www.nefrologiaaldia.org/es-articulo-nefropatia-endemica-mesoamericana--319>
- Garçon, G., Leleu, B., Marez, T., Zerimech, F., Haguenoer, J. M., Furon, D., & Shirali, P. (2007). Biomonitoring of the adverse effects induced by the chronic exposure to lead and cadmium on kidney function: Usefulness of alpha-glutathione S-transferase. *Science of the Total Environment*, 377(2–3), 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.02.002>
- Ghahramani, N. (2010). Silica nephropathy. En *The international journal of occupational and environmental medicine* (Vol. 1, Número 3, pp. 108–115).
- Gómez Carracedo, A., Arias Muñana, E., & Jiménez Rojas, C. (2007). INSUFICIENCIA RENAL CRÓNICA. En International Marketing & Communication S.A (Ed.), *TRATADO de GERIATRÍA para residentes* (1a ed., pp. 637–646). Sociedad Española de Geriatria y Gerontología.
- Gorostidi, M., Santamaría, R., Alcázar, R., Fernández-Fresnedo, G., Galcerán, J. M., Goicoechea, M., Oliveras, A., Portolés, J., Rubio, E., Segura, J., Aranda, P., de Francisco, ángel L. M., del Pino, M. D., Fernández-Vega, F., Górriz, J. L., Luño, J., Marín, R., Martínez, I., Martínez-Castelao, A., ... Ruilope, L. M. (2014). Documento de la sociedad española de nefrología sobre las guías KDIGO para la evaluación y el tratamiento de la enfermedad renal crónica. *Nefrología*, 34(3), 302–316.
<https://doi.org/10.3265/Nefrologia.pre2014.Feb.12464>
- Gustafsson, J. P. (2019). Vanadium geochemistry in the biogeosphere –speciation, solid-solution interactions, and ecotoxicity. *Applied Geochemistry*, 102, 1–25.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.12.027>
- Hazelhoff, M. H., Bulacio, R. P., & Torres, A. M. (2012). Gender related differences in kidney

- injury induced by mercury. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(8), 10523–10536. <https://doi.org/10.3390/ijms130810523>
- He, Z., Shentu, J., Yang, X., Baligar, V. ., Zhang, T., & Stoffella, P. . (2015). Heavy Metal Contamination of Soils: Sources, Indicators, and Assessment. *Journal of Environmental Indicators*, 9, 17–18.
- Henríquez, C., Cabalceta, G., Bertsch, F., & Alvarado, A. (2014). Principales suelos de Costa Rica. *Ministerio de Agricultura y Ganadería*, 2.
- Hong, Y. S., Song, K. H., & Chung, J. Y. (2014). Health effects of chronic arsenic exposure. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, 47(5), 245–252. <https://doi.org/10.3961/jpmph.14.035>
- Hultman, P., & Eneström, S. (1986). Localization of mercury in the kidney during experimental acute tubular necrosis studied by the cytochemical Silver Amplification method. *British journal of experimental pathology*, 67(4), 493–503.
- Institut national de recherche et de sécurité (INRS). (2008, agosto 22). *Affections provoquées par l'arsenic et ses composés minéraux*. Tableaux des maladies professionnelles. https://www.inrs.fr/publications/bdd/mp/tableau.html?refINRS=RA_10
- Institut national de recherche et de sécurité (INRS). (2019, agosto). *Cadmium et composés minéraux(*)*. Fiche toxicologique n° 60. https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_60
- Institut national de recherche et de sécurité (INRS). (2021, noviembre). *Arsenic et composés minéraux*. Fiche toxicologique n° 192. https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_192§ion=historiqueRevisions
- Instituto de Desarrollo Rural. (2015). *Informe de Caracterización Básica: Territorio Abangares-Cañas-Bagaces-Tilarán*.
- Instituto de Desarrollo Rural. (2016). Plan de Desarrollo Rural Territorial (PDRT): Territorio Abangares-Cañas-Bagaces-Tilarán 2016-2021. En *Plan de Desarrollo Rural Territorial*.
- Instituto Geográfico Nacional. (s/f). *Sistema Nacional de Información Territorial*. Infraestructura de datos espaciales de Costa Rica. Recuperado el 22 de mayo de 2022, de https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc
- Instituto Meteorológico Nacional. (2020). *Sobre algunos fenómenos meteorológicos en Costa*

Rica.

- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2013). *Área en kilómetros cuadrados, según provincia, cantón y distrito administrativo 2013*. Anuario Estadístico - Geografía. <https://www.inec.cr/anuario-estadistico/anuario-estadistico-geografia>
- International Agency for Research on Cancer. (1997). Beryllium, Cadmium, Mercury, and Exposures in the Glass Manufacturing Industry. En *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume* (Vol. 58).
- International Agency for Research on Cancer (IARC). (2012). Arsenic, Metals, Fibres, and Dusts. *IARC Monographs, 100*(Arsenic, metals, fibres, and dusts), 407–443.
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., Beeregowda, K. N., Blessy, A., & Mathew, B. B. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology, 7*(2), 60–72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
- Johnson, R. J., Wesseling, C., & Newman, L. S. (2019). Chronic kidney disease of unknown cause in agricultural communities. En J. R. Ingelfinger (Ed.), *New England Journal of Medicine* (Vol. 380, Número 19, pp. 1843–1852). <https://doi.org/10.1056/NEJMra1813869>
- Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. En *Environmental Pollution* (Vol. 151, Número 2, pp. 362–367). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
- Kappos, A. D., Bruckmann, P., Eikmann, T., Englert, N., Heinrich, U., Höpfe, P., Koch, E., Krause, G. H. M., Kreyling, W. G., Rauchfuss, K., Rombout, P., Schulz-Klemp, V., Thiel, W. R., & Wichmann, H. E. (2004). Health effects of particles in ambient air. *International Journal of Hygiene and Environmental Health, 207*(4), 399–407. <https://doi.org/10.1078/1438-4639-00306>
- Katz, A. I. (1982). Renal Na-K-ATPase: its role in tubular sodium and potassium transport. *The American journal of physiology, 242*(3). <https://doi.org/10.1152/ajprenal.1982.242.3.f207>
- Koch, J., Chakraborty, S., Li, B., Kucera, J. M., Van Deventer, P., Daniell, A., Faul, C., Man, T., Pearson, D., Duda, B., Weindorf, C. A., & Weindorf, D. C. (2017). Proximal sensor analysis of mine tailings in South Africa: An exploratory study. *Journal of Geochemical Exploration, 181*, 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.06.020>
- Koedrith, P., Kim, H. L., Weon, J. Il, & Seo, Y. R. (2013). Toxicogenomic approaches for understanding molecular mechanisms of heavy metal mutagenicity and carcinogenicity.

- International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 216(5), 587–598.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2013.02.010>
- Kwon, S. Y., Bae, O. N., Noh, J. Y., Kim, K., Kang, S., Shin, Y. J., Lim, K. M., & Chung, J. H. (2015). Erythrophagocytosis of Lead-Exposed Erythrocytes by Renal Tubular Cells: Possible Role in Lead-Induced Nephrotoxicity. *Environmental Health Perspectives*, 123(2), 120–127. <https://doi.org/10.1289/ehp.1408094>
- Levey, A. S., Coresh, J., Balk, E., Kausz, A. T., Levin, A., Steffes, M. W., Hogg, R. J., Perrone, R. D., Lau, J., Eknoyan, G., & Willis, K. (2003). National Kidney Foundation Practice Guidelines for Chronic Kidney Disease: Evaluation, Classification, and Stratification. En *Annals of Internal Medicine* (Vol. 139, Número 2). *Ann Intern Med*. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-139-2-200307150-00013>
- Levey, A. S., Eckardt, K. U., Tsukamoto, Y., Levin, A., Coresh, J., Rossert, J., De Zeeuw, D., Hostetter, T. H., Lameire, N., Eknoyan, G., & Willis, K. (2005). Definition and classification of chronic kidney disease: A position statement from Kidney Disease: Improving Global Outcomes (KDIGO). *Kidney International*, 67(6), 2089–2100. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1755.2005.00365.x>
- López, D. L., Bundschuh, J., Birkle, P., Armienta, M. A., Cumbal, L., Sracek, O., Cornejo, L., & Ormachea, M. (2012). Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latin America. *Science of the Total Environment*, 429, 57–75. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.08.043>
- Malkina, A. (2018, marzo). *Enfermedad renal crónica o nefropatía crónica*. Manual Merck. <https://www.merckmanuals.com/es-pr/hogar/trastornos-renales-y-del-tracto-urinario/insuficiencia-renal/enfermedad-renal-crónica-o-nefropatía-crónica>
- Malkina, A. (2020, febrero). *Enfermedad renal crónica*. MANUAL MERCK Versión para profesionales. <https://www.merckmanuals.com/es-us/professional/trastornos-urogenitales/enfermedad-renal-crónica/enfermedad-renal-crónica>
- Marín-Trigueros, D., Guadamuz-Hernández, S., Suárez-Brenes, G., & Salas-Garita, F. (2020). Nefropatía Mesoamericana. *Revista de Medicina Legal de Costa Rica*, 37(1), 121–129.
- Martinez, A. (2020, septiembre 3). *Científicos costarricenses determinan tamaño y composición de partículas de polvo del Sahara en el país*. Delfino.cr. <https://delfino.cr/2020/09/cientificos-costarricenses-determinan-tamano-y-composicion-de-particulas-de-polvo-del-sahara-en-el-pais>

- Matsushita, K., Coresh, J., Sang, Y., Chalmers, J., Fox, C., Guallar, E., Jafar, T. H., Jassal, S. K., Landman, G. W. D., Muntner, P., Roderick, P., Sairenchi, T., Schöttker, B., Shankar, A., Shlipak, M., Tonelli, M., Townsend, J. N., van Zuilen, A., Yamagishi, K., ... Ballew, S. H. (2015). Estimated glomerular filtration rate and albuminuria for prediction of cardiovascular outcomes: A collaborative meta-analysis of individual participant data. *The Lancet Diabetes and Endocrinology*, 3(7), 514–525. [https://doi.org/10.1016/S2213-8587\(15\)00040-6](https://doi.org/10.1016/S2213-8587(15)00040-6)
- Matsushita, K., van der Velde, M., Astor, B. C., Woodward, M., Levey, A. S., de Jong, P. E., Coresh, J., Gansevoort, R. T., El-Nahas, M., Eckardt, K. U., Kasiske, B. L., Tonelli, M., Hemmelgarn, B., Wang, Y., Atkins, R. C., Polkinghorne, K. R., Chadban, S. J., Shankar, A., Klein, R., ... Manley, T. (2010). Association of estimated glomerular filtration rate and albuminuria with all-cause and cardiovascular mortality in general population cohorts: a collaborative meta-analysis. *The Lancet Diabetes and Endocrinology*, 375(9731), 2073–2081. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(10\)60674-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)60674-5)
- Mayorga López, G. (2022, marzo 30). *Composición del suelo se suma a factores de riesgo de la enfermedad renal crónica*. Universidad de Costa Rica. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2022/03/30/composicion-del-suelo-se-suma-a-factores-de-riesgo-de-la-enfermedad-renal-cronica.html>
- McClure, R. W., Cervantes Loaiza, M., & Abarca Gómez, L. (2014). *Factores asociados a Enfermedad Renal Crónica, Región Chorotega*.
- Medina-Pizzali, M. L., Robles, P., Mendoza, M., & Torres, C. (2018). Arsenic intake: Impact in human nutrition and health. En *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública* (Vol. 35, Número 1, pp. 93–102). Instituto Nacional de Salud. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.351.3604>
- Mendez, C. (2018). *La Enfermedad Renal Crónica | National Kidney Foundation*. <https://www.kidney.org/es/kidneydisease/aboutckd>
- Miller, D. S., Shaw, J. R., Stanton, C. R., Barnaby, R., Karlson, K. H., Hamilton, J. W., & Stanton, B. A. (2007). MRP2 and acquired tolerance to inorganic arsenic in the kidney of killifish (*Fundulus heteroclitus*). *Toxicological Sciences*, 97(1), 103–110. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfm030>
- Miller, R., & Donahue, R. (1992). *Soils: an introduction to soils and plant growth*. Prentice-Hall

- Inc.
- Ministerio de Salud. (2018). *Memoria Institucional 2014-2018* (Número Abril).
- Municipalidad de Cañas. (2020, agosto 27). *Distritos*. Cañas.
<http://municanas.go.cr/index.php/nuestro-canton/canas>
- Murray, K. O., Fischer, R. S. B., Chavarria, D., Duttmann, C., Garcia, M. N., Gorchakov, R., Hotez, P. J., Jiron, W., Leibler, J. H., Lopez, J. E., Mandayam, S., Marin, A., & Sheleby, J. (2015). Mesoamerican nephropathy: A neglected tropical disease with an infectious etiology? En *Microbes and Infection* (Vol. 17, Número 10, pp. 671–675). Elsevier Masson SAS. <https://doi.org/10.1016/j.micinf.2015.08.005>
- Navarro-Moreno, L. G., Quintanar-Escorza, M. A., González, S., Mondragón, R., Cerbón-Solorzáno, J., Valdés, J., & Calderón-Salinas, J. V. (2009). Effects of lead intoxication on intercellular junctions and biochemical alterations of the renal proximal tubule cells. *Toxicology in Vitro*, 23(7), 1298–1304. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2009.07.020>
- Noordzij, M., Korevaar, J. C., Boeschoten, E. W., Dekker, F. W., Bos, W. J., & Krediet, R. T. (2005). The kidney disease outcomes quality initiative (K/DOQI) guideline for bone metabolism and disease in CKD: Association with mortality in dialysis patients. *American Journal of Kidney Diseases*, 46(5), 925–932. <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2005.08.013>
- Occupational Safety and Health Administration. (2020, febrero). 1910.1027 - Cadmium. <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1027>
- Organización Panamericana de la Salud. (2009). Enfermedad renal crónica. En *Día Mundial del Riñon* (Vol. 16, Número SUPPL. 4). [https://doi.org/10.1016/S1134-2072\(09\)71805-5](https://doi.org/10.1016/S1134-2072(09)71805-5)
- Ortiz Cubero, L. (2020, septiembre 3). Científicos costarricenses logran determinar tamaño y composición de partículas del polvo del Sahara que llegan al país. *UNA Comunica*.
- Paschal, D. C., Burt, V., Caudill, S. P., Gunter, E. W., Pirkle, J. L., Sampson, E. J., Miller, D. T., & Jackson, R. J. (2000). Exposure of the U.S. population aged 6 years and older to cadmium: 1988- 1994. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 38(3), 377–383. <https://doi.org/10.1007/s002449910050>
- Peled, R. (2011). Air pollution exposure: Who is at high risk? En *Atmospheric Environment* (Vol. 45, Número 10, pp. 1781–1785). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.01.001>
- Peters, B. A., Liu, X., Hall, M. N., Ilievski, V., Slavkovich, V., Siddique, A. B., Alam, S., Islam, T., Graziano, J. H., & Gamble, M. V. (2015). Arsenic exposure, inflammation, and renal

- function in Bangladeshi adults: effect modification by plasma glutathione redox potential. *Free Radical Biology and Medicine*, 85, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2015.04.020>
- Prabu, S. M., & Muthumani, M. (2012). Silibinin ameliorates arsenic induced nephrotoxicity by abrogation of oxidative stress, inflammation and apoptosis in rats. *Molecular biology reports*, 39(12), 11201–11216. <https://doi.org/10.1007/s11033-012-2029-6>
- Prozialeck, W. C., & Edwards, J. R. (2007). Cell adhesion molecules in chemically-induced renal injury. En *Pharmacology and Therapeutics* (Vol. 114, Número 1, pp. 74–93). <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2007.01.001>
- Qing, Y., Yang, J., Zhu, Y., Li, Y., Zheng, W., Wu, M., & He, G. (2021). Dose–response evaluation of urinary cadmium and kidney injury biomarkers in Chinese residents and dietary limit standards. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 20(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/S12940-021-00760-9/FIGURES/4>
- Ramírez, A. (2013). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Anales de la Facultad de Medicina*, 63(1), 51. <https://doi.org/10.15381/anales.v63i1.1477>
- Rana, M. N., Tangpong, J., & Rahman, M. M. (2018). Toxicodynamics of Lead, Cadmium, Mercury and Arsenic- induced kidney toxicity and treatment strategy: A mini review. En *Toxicology Reports* (Vol. 5, pp. 704–713). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2018.05.012>
- Renugadevi, J., & Milton Prabu, S. (2010). Quercetin protects against oxidative stress-related renal dysfunction by cadmium in rats. *Experimental and Toxicologic Pathology*, 62(5), 471–481. <https://doi.org/10.1016/j.etp.2009.06.006>
- Ribes, E. A. (2004). Fisiopatología de la insuficiencia renal crónica. En *Anales de Cirugía Cardíaca y Vasculár* (Vol. 10, Número 1, pp. 8–12).
- Rizwan, S., Naqshbandi, A., Farooqui, Z., Khan, A. A., & Khan, F. (2014). Protective effect of dietary flaxseed oil on arsenic-induced nephrotoxicity and oxidative damage in rat kidney. *Food and Chemical Toxicology*, 68, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.03.011>
- Romieu, I., Gouveia, N., Cifuentes, L. A., de Leon, A. P., Junger, W., Vera, J., Strappa, V., Hurtado-Díaz, M., Miranda-Soberanis, V., Rojas-Bracho, L., Carbajal-Arroyo, L., Tzintzun-Cervantes, G., & HEI Health Review Committee. (2012). Multicity study of air

- pollution and mortality in Latin America (the ESCALA study). *Research report (Health Effects Institute)*, 171, 5–86.
- Roncal-Jimenez, C. A., García-Trabanino, R., Barregard, L., Lanaspá, M. A., Wesseling, C., Harra, T., Aragón, A., Grases, F., Jarquin, E. R., González, M. A., Weiss, I., Glaser, J., Sánchez-Lozada, L. G., & Johnson, R. J. (2016). Heat Stress Nephropathy from Exercise-Induced Uric Acid Crystalluria: A Perspective on Mesoamerican Nephropathy. *American Journal of Kidney Diseases*, 67(1), 20–30. <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2015.08.021>
- Roncal-Jimenez, C. A., García-Trabanino, R., Wesseling, C., & Johnson, R. J. (2016). Mesoamerican Nephropathy or Global Warming Nephropathy? *Blood Purification*, 41(1–3), 135–138. <https://doi.org/10.1159/000441265>
- Satarug, S., Garrett, S. H., Sens, M. A., & Sens, D. A. (2011). O cádmio, a exposição ambiental ao cádmio e as consequências para a saúde. *Ciencia e Saude Coletiva*, 16(5), 2587–2602. <https://doi.org/10.1590/S1413-81232011000500029>
- Schweizer Lassaga, S. (2011). Muestreo y análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. En *Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) Costa Rica*.
- Silbergeld, E. K. (1998). Toxicología. En Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales (Ed.), *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. Toxicología* (3a ed., pp. 33.1-33.83). Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Singh, R. D., Tiwari, R., Khan, H., Kumar, A., & Srivastava, V. (2015). Arsenic exposure causes epigenetic dysregulation of IL-8 expression leading to proneoplastic changes in kidney cells. *Toxicology Letters*, 237(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2015.05.014>
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. En *EXS* (Vol. 101, pp. 133–164). https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Tello, M. (2015). *Evaluación del Riesgo toxicológico de plomo y cadmio en suelos del entorno del parque industrial de la ciudad de Cuenca*. Universidad Estatal de Cuenca.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2007). METHOD 3051A: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. En *Test Methods for Evaluating Solid Waste* (Número February, pp. 1–30).
- Ulate Chacón, S., Maroto López, J., Ramos Roa, W., Valerín Navarro, A., Chaves Brenes, V.,

- Salas Salgado, I., & Calvo Tames, V. (2019). *Determinación de metales pesados en suelos de los cantones Bagaces y Cañas de la provincia de Guanacaste, Costa Rica*. (Evaluación de Riesgos Ambientales). Tecnológico de Costa Rica. Cartago.
- US EPA. (2021). *Particulate Matter (PM) Basics*. Particulate Matter Pollution. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- Valladares Sánchez, M., Vásquez Ortiz, J., Hernández Maradiaga, J. N., Álvarez, S. V., Cerrato, C. N., Linares Ochoa, N., Funes, K., Barahona, F., Benítez, E., & Durón, R. M. (2017). Nefropatía Crónica Mesoamericana: Llamado a resolver multidisciplinariamente un misterio médico en Honduras. *Innovare: Revista de ciencia y tecnología*, 5(2), 76–87. <https://doi.org/10.5377/innovare.v5i2.3191>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2016). *The nature and properties of soils* (D. Fox & A. Giffillan (eds.); 15a ed.). Pearson.
- Weindorf, D. C., & Chakraborty, S. (2016). Portable X-ray Fluorescence Spectrometry Analysis of Soils. *Methods of Soil Analysis*, 1(1), 0. <https://doi.org/10.2136/methods-soil.2015.0033>
- Wijkström, J., Leiva, R., Elinder, C. G., Leiva, S., Trujillo, Z., Trujillo, L., Söderberg, M., Hultenby, K., & Wernerson, A. (2013). Clinical and pathological characterization of mesoamerican nephropathy: A new kidney disease in central america. *American Journal of Kidney Diseases*, 62(5), 908–918. <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2013.05.019>
- Wilk, A., Wiszniewska, B., Szypulska-Koziarska, D., Kaczmarek, P., Romanowski, M., Róžański, J., Słojewski, M., Ciechanowski, K., Marchelek-Myśliwiec, M., & Kalisińska, E. (2017). The Concentration of Vanadium in Pathologically Altered Human Kidneys. *Biological Trace Element Research*, 180(1). <https://doi.org/10.1007/s12011-017-0986-2>
- World Health Organization. (2003). Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter , Ozone and Nitrogen Dioxide. *Report on a WHO Working Group Bonn, Germany 13–15 January 2003, January*, 98.
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*, 2011, 1–20. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
- Yang, L. Y., Wu, K. H., Chiu, W. T., Wang, S. H., & Shih, C. M. (2009). The cadmium-induced death of mesangial cells results in nephrotoxicity. *Autophagy*, 5(4), 571–572. <https://doi.org/10.4161/auto.5.4.8311>

Zalups, R. K. (2000). Molecular interactions with mercury in the kidney. En *Pharmacological Reviews* (Vol. 52, Número 1, pp. 113–143).

Zimmerman, A., Garcia Gutierrez, D., Montero Campos, V., Weindorf, D. C., Deb, S. K., Ulate Chacón, S. P., Landrot, G., Gonzalez Flores, N. G., & Siebecker, M. G. (2021). Arsenic speciation in titanium dioxide (TiO₂) waste produced via drinking water filtration: Potential environmental implications for soils, sediments, and human health. *Environmental Advances*, 3, 100036.

8. APÉNDICES

APÉNDICE 1: Resultados obtenidos del análisis de muestras de suelo

Cuadro A.1.1. Resultados obtenidos al analizar la totalidad de las muestras mediante PXRF.

ID	As (mg As/kg de suelo)		Cd (mg Cd/kg de suelo)		Hg (mg Hg/kg de suelo)		Pb (mg Pb/kg de suelo)		Si (mg Si/kg de suelo)		V (mg V/kg de suelo)	
	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error								
Cañas												
CG-01	8.00	1	<LD	4	<LD	-	20	1	139080	266	114	13
CG-02	4.00	0	<LD	4	<LD	-	10	1	152924	290	90	14
CG-03	4.00	0	<LD	4	<LD	-	7	1	122722	248	146	13
CG-04	5.00	0	<LD	4	<LD	-	5	1	97365	250	153	14
CG-05	5.00	0	<LD	4	<LD	-	8	1	108139	245	186	14
CG-06	7.00	1	<LD	4	<LD	-	14	1	103439	219	199	14
CG-07	7.00	1	<LD	4	<LD	-	15	1	139847	284	195	15
CG-08	5.00	0	<LD	4	<LD	-	3	1	108854	230	221	13
CG-09	3.00	0	<LD	4	<LD	-	3	1	118925	242	175	13
CG-10	4.00	0	<LD	4	<LD	-	10	1	114273	245	150	14
CG-11	127.00	1	16	3	<LD	-	6	1	51216	145	191	42
CG-12	7.00	0	11	3	<LD	-	3	1	123971	242	196	13
CG-13	3.00	0	<LD	4	<LD	-	3	1	122423	253	172	13
CG-14	4.00	0	10	3	<LD	-	7	1	117174	254	178	14
CG-15	17.00	1	<LD	4	<LD	-	3	1	106336	242	230	13
CG-16	4.00	0	<LD	4	<LD	-	6	1	117993	231	159	12
CG-17	8.00	0	<LD	3	<LD	-	5	1	119718	229	213	12
CG-67	2.00	0	<LD	3	<LD	-	4	1	111470	222	262	13
CG-72	5.00	1	13	3	<LD	-	4	1	105676	242	312	14

Continuación del Cuadro A.1.1. Resultados obtenidos al analizar la totalidad de las muestras mediante PXRF.

ID	As (mg As/kg de suelo)		Cd (mg Cd/kg de suelo)		Hg (mg Hg/kg de suelo)		Pb (mg Pb/kg de suelo)		Si (mg Si/kg de suelo)		V (mg V/kg de suelo)	
	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error								
Palmira												
CG-18	5.00	0	<LD	3	<LD	-	<LD	1	95790	199	323	12
CG-19	4.00	0	8	3	<LD	-	3	1	102680	208	318	12
CG-20	6.00	0	<LD	3	<LD	-	3	0	64563	145	177	10
CG-21	7.00	0	<LD	3	<LD	-	5	1	67807	158	208	11
CG-22	8.00	0	<LD	3	<LD	-	6	1	69309	170	218	12
CG-23	3.00	0	<LD	3	<LD	-	2	0	52875	142	169	10
CG-24	4.00	0	<LD	4	<LD	-	6	1	134103	272	139	14
CG-25	4.00	0	<LD	4	<LD	-	5	1	126382	249	189	13
CG-26	4.00	0	<LD	3	<LD	-	5	1	106570	216	240	13
CG-27	3.00	0	<LD	4	<LD	-	4	1	85516	216	233	14
CG-28	4.00	0	<LD	4	<LD	-	6	1	131125	268	70	14
CG-29	5.00	0	<LD	3	<LD	-	0	1	91308	217	239	12
CG-30	4.00	0	<LD	4	<LD	-	6	1	142285	278	109	14
CG-31	7.00	0	<LD	4	<LD	-	5	1	87985	216	163	13
CG-32	3.00	0	<LD	4	<LD	-	6	1	100636	231	144	13
CG-33	3.00	0	<LD	3	<LD	-	2	1	86990	210	266	12
CG-34	6.00	0	<LD	3	<LD	-	3	1	92623	189	230	11
CG-35	4.00	0	<LD	3	<LD	-	4	1	92594	203	171	12
CG-36	5.00	0	<LD	4	<LD	-	7	1	141454	256	157	13
CG-37	5.00	0	<LD	3	<LD	-	2	1	94994	213	224	13

Continuación del Cuadro A.1.1. Resultados obtenidos al analizar la totalidad de las muestras mediante PXRF.

ID	As (mg As/kg de suelo)		Cd (mg Cd/kg de suelo)		Hg (mg Hg/kg de suelo)		Pb (mg Pb/kg de suelo)		Si (mg Si/kg de suelo)		V (mg V/kg de suelo)	
	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error								
	San Miguel											
CG-38	2.00	0	<LD	4	<LD	-	4	1	103693	233	126	12
CG-39	7.00	0	14	3	<LD	-	4	1	108074	263	173	14
CG-40	5.00	0	<LD	3	<LD	-	2	1	122489	236	172	12
CG-41	4.00	0	<LD	3	3	1	3	1	93019	212	248	13
CG-42	10.00	0	<LD	4	<LD	-	5	1	129300	255	177	14
CG-43	4.00	0	<LD	4	<LD	-	8	1	98604	229	224	13
CG-44	7.00	0	<LD	3	<LD	-	5	1	126292	238	200	12
CG-45	12.00	1	13	3	<LD	-	6	1	136733	284	146	14
CG-46	0.00	0	<LD	3	<LD	-	0	1	107186	231	248	13
CG-47	5.00	0	<LD	4	<LD	-	5	1	109035	246	185	14
CG-48	8.00	0	<LD	3	<LD	-	3	1	104026	220	214	13
CG-49	2.00	0	<LD	4	<LD	-	<LD	1	95656	225	197	13
Bebedero												
CG-50	5.00	0	<LD	3	<LD	-	4	1	128739	238	191	13
CG-51	5.00	0	<LD	4	<LD	-	5	1	101756	225	232	14
CG-52	6.00	1	<LD	4	<LD	-	27	1	144173	261	125	14
CG-53	16.00	0	<LD	4	<LD	-	6	0	154680	264	130	12
CG-54	4.00	0	<LD	4	<LD	-	7	1	126260	239	158	13
CG-55	7.00	0	<LD	4	<LD	-	9	1	129716	265	225	14
CG-68	3.00	0	<LD	3	<LD	-	11	1	123763	226	77	13
CG-69	10.00	1	<LD	3	<LD	-	30	1	131230	237	196	13
CG-70	6.00	0	<LD	4	<LD	-	14	1	119028	241	202	13
CG-71	6.00	0	<LD	4	<LD	-	5	1	109251	235	218	14

Continuación del Cuadro A.1.1. Resultados obtenidos al analizar la totalidad de las muestras mediante PXRF.

ID	As (mg As/kg de suelo)		Cd (mg Cd/kg de suelo)		Hg (mg Hg/kg de suelo)		Pb (mg Pb/kg de suelo)		Si (mg Si/kg de suelo)		V (mg V/kg de suelo)	
	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error								
Porozal												
CG-56	3.00	0	<LD	4	<LD	-	4	0	151723	280	144	13
CG-57	4.00	0	<LD	4	<LD	-	7	0	163121	262	105	12
CG-58	4.00	0	<LD	4	<LD	-	5	1	140308	267	132	14
CG-59	4.00	0	<LD	4	<LD	-	4	1	128412	248	137	12
CG-60	2.00	0	<LD	4	<LD	-	3	1	152890	326	225	14
CG-61	3.00	0	<LD	4	<LD	-	4	0	157942	291	100	13
CG-62	4.00	0	<LD	4	<LD	-	4	0	141444	254	111	12
CG-63	3.00	0	<LD	4	<LD	-	6	1	140034	270	182	13
CG-64	2.00	0	<LD	4	<LD	-	4	1	138916	268	100	13
CG-65	3.00	0	<LD	4	<LD	-	5	1	146707	280	109	13
CG-66	4.00	0	<LD	4	<LD	-	3	0	158387	274	88	12

Cuadro A.1.2. Porcentaje de recuperación calculado para el análisis PXRf en suelos.

Estándar	As	Cd	Hg	Pb	Si	V
Silica						
Concentración del estándar (mg/kg de suelo)	0	0	1.25	0	445572.63	0
2710a						
Concentración del estándar (mg/kg de suelo)	1540	12.3	9.88	5520	311000	82
Promedio de concentración resultante (mg/kg de suelo)	1962	19.13	12.75	5309.13	196028.88	49.38
Desviación estándar (mg/kg de suelo)	15.77	2.53	1.58	25.53	1562.49	12.59
Porcentaje de recuperación	127.40%	155.49%	129.05%	96.18%	63.03%	60.21%
2711a						
Concentración del estándar (mg/kg de suelo)	107	54.1	7.42	1400	314000	80.7
Promedio de concentración resultante (mg/kg de suelo)	168.25	61.38	6.88	1390.38	222901.75	56.5
Desviación estándar (mg/kg de suelo)	4.71	1.69	0.64	5.5	1448.84	8.11
Porcentaje de recuperación	157.24%	113.45%	92.65%	99.31%	70.99%	70.01%
Porcentaje de recuperación total	142.32%	134.47%	110.85%	97.75%	67.01%	65.11%

Cuadro A.1.3. Resultados obtenidos al analizar la totalidad de las muestras mediante ICP-OES.

ID	As (mg As/kg de suelo)		Cd (mg Cd/kg de suelo)		Pb (mg Pb/kg de suelo)		Si (mg Si/kg de suelo)		V (mg V/kg de suelo)	
	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error
Cañas										
CG-01	<LD	-	<LD	-	<LD	-	86.04	37.51	127.66	13.78
CG-02	<LD	-	<LD	-	<LD	-	62.59	22.62	80.95	10.91
CG-03	<LD	-	<LD	-	<LD	-	50.90	9.44	147.13	10.84
CG-04	<LD	-	<LD	-	<LD	-	114.58	63.85	175.77	5.35
CG-05	<LD	-	<LD	-	<LD	-	126.84	39.06	188.32	11.42
CG-06	4.55	0.17	<LD	-	<LD	-	187.12	132.75	174.36	14.31
CG-07	2.54	0.56	<LD	-	<LD	-	136.82	30.17	131.25	7.29
CG-08	<LD	-	<LD	-	<LD	-	79.48	31.74	227.55	13.86
CG-09	<LD	-	<LD	-	<LD	-	98.12	10.90	142.46	18.85
CG-10	<LD	-	<LD	-	<LD	-	103.94	39.94	135.37	12.77
CG-11	7.32	0.24	<LD	-	<LD	-	233.05	134.14	85.25	4.69
CG-12	3.25	0.37	NR	-	<LD	-	116.35	51.85	212.98	26.59
CG-13	<LD	-	NR	-	<LD	-	195.24	6.97	139.53	10.13
CG-14	<LD	-	NR	-	<LD	-	194.20	9.28	122.97	7.33
CG-15	11.10	0.33	NR	-	<LD	-	187.18	44.54	173.31	11.93
CG-16	<LD	-	NR	-	<LD	-	171.48	47.77	123.00	3.13
CG-17	3.92	0.43	NR	-	<LD	-	258.78	57.62	142.91	6.00
CG-67	3.39	0.55	<LD	-	<LD	-	105.71	5.44	233.79	10.78
CG-72	3.98	0.33	NR	-	<LD	-	65.00	8.71	237.18	22.69

Continuación del Cuadro A.1.3. Resultados obtenidos al analizar la totalidad de las muestras mediante ICP-OES.

ID	As (mg As/kg de suelo)		Cd (mg Cd/kg de suelo)		Pb (mg Pb/kg de suelo)		Si (mg Si/kg de suelo)		V (mg V/kg de suelo)	
	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error
Palmira										
CG-18	<LD	-	NR	-	<LD	-	304.45	21.24	244.35	11.73
CG-19	<LD	-	NR	-	<LD	-	139.22	16.17	224.79	3.71
CG-20	4.39	0.29	NR	-	<LD	-	663.04	44.78	169.72	18.27
CG-21	5.05	0.43	<LD	-	<LD	-	140.62	3.52	164.60	19.52
CG-22	5.44	0.55	<LD	-	<LD	-	123.46	3.81	188.14	23.74
CG-23	2.77	-	<LD	-	<LD	-	1552.47	60.62	165.70	2.36
CG-24	<LD	-	<LD	-	<LD	-	228.36	112.82	83.07	10.22
CG-25	<LD	-	<LD	-	<LD	-	92.20	18.21	173.70	15.07
CG-26	<LD	-	<LD	-	<LD	-	82.06	5.21	214.67	15.49
CG-27	<LD	-	<LD	-	<LD	-	55.99	11.86	233.75	14.69
CG-28	<LD	-	<LD	-	<LD	-	148.94	9.47	72.88	2.81
CG-29	<LD	-	<LD	-	<LD	-	98.74	17.35	252.38	10.37
CG-30	<LD	-	<LD	-	<LD	-	85.86	9.48	110.43	5.73
CG-31	3.99	0.09	<LD	-	<LD	-	48.98	7.58	194.71	23.70
CG-32	<LD	-	<LD	-	<LD	-	115.11	10.94	137.05	10.78
CG-33	<LD	-	<LD	-	<LD	-	129.85	60.93	231.74	37.56
CG-34	2.77	0.11	<LD	-	<LD	-	80.25	18.33	194.07	6.98
CG-35	<LD	-	<LD	-	<LD	-	75.60	38.75	169.61	4.84
CG-36	<LD	-	<LD	-	<LD	-	57.38	19.83	163.37	4.21
CG-37	3.18	0.47	<LD	-	<LD	-	83.89	9.30	223.36	4.94

Continuación del Cuadro A.1.3. Resultados obtenidos al analizar la totalidad de las muestras mediante ICP-OES.

ID	As (mg As/kg de suelo)		Cd (mg Cd/kg de suelo)		Pb (mg Pb/kg de suelo)		Si (mg Si/kg de suelo)		V (mg V/kg de suelo)	
	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error
San Miguel										
CG-38	<LD	-	<LD	-	<LD	-	193.74	15.05	137.25	13.24
CG-39	3.40	0.07	<LD	-	<LD	-	130.61	164.82	141.10	2.76
CG-40	<LD	-	<LD	-	<LD	-	43.18	12.37	175.88	3.88
CG-41	<LD	-	<LD	-	<LD	-	217.14	11.26	184.24	0.74
CG-42	<LD	-	<LD	-	<LD	-	155.65	17.45	117.51	8.58
CG-43	2.93	-	<LD	-	<LD	-	88.77	11.91	175.53	4.11
CG-44	2.88	0.00	<LD	-	<LD	-	236.30	47.99	166.78	25.83
CG-45	4.69	0.90	<LD	-	<LD	-	229.47	18.56	92.69	3.32
CG-46	<LD	-	<LD	-	<LD	-	255.68	22.75	218.57	6.72
CG-47	<LD	-	<LD	-	<LD	-	271.04	88.02	162.76	7.71
CG-48	2.66	0.14	<LD	-	<LD	-	212.50	110.22	193.64	5.38
CG-49	<LD	-	<LD	-	<LD	-	171.14	99.56	138.08	82.66
Bebedero										
CG-50	<LD	-	<LD	-	<LD	-	131.58	141.32	175.46	4.37
CG-51	<LD	-	<LD	-	<LD	-	242.80	17.72	169.91	17.92
CG-52	<LD	-	<LD	-	21.18	4.87	46.38	9.35	124.43	1.72
CG-53	10.60	0.26	<LD	-	<LD	-	194.06	33.84	85.20	1.65
CG-54	<LD	-	<LD	-	<LD	-	254.00	121.29	93.00	6.81
CG-55	<LD	-	<LD	-	<LD	-	239.98	34.30	123.75	12.04
CG-68	3.02	0.30	NR	-	<LD	-	116.98	5.03	65.46	2.43
CG-69	5.29	0.26	NR	-	18.24	3.89	96.05	7.18	100.62	9.15
CG-70	4.43	0.51	NR	-	<LD	-	96.09	5.79	126.18	4.03
CG-71	4.74	0.72	NR	-	<LD	-	109.90	2.54	143.76	7.31

Continuación del Cuadro A.1.3. Resultados obtenidos al analizar la totalidad de las muestras mediante ICP-OES.

ID	As (mg As/kg de suelo)		Cd (mg Cd/kg de suelo)		Pb (mg Pb/kg de suelo)		Si (mg Si/kg de suelo)		V (mg V/kg de suelo)	
	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error	Concen- tración	Error
Porozal										
CG-56	<LD	-	<LD	-	<LD	-	279.24	186.15	100.04	2.29
CG-57	<LD	-	<LD	-	<LD	-	244.69	189.84	94.01	3.52
CG-58	<LD	-	<LD	-	<LD	-	158.55	161.43	121.93	3.24
CG-59	<LD	-	<LD	-	<LD	-	58.27	6.35	112.88	1.03
CG-60	<LD	-	<LD	-	<LD	-	285.01	72.47	133.93	8.78
CG-61	4.04	0.40	NR	-	<LD	-	178.19	83.19	56.84	3.92
CG-62	2.10	0.30	NR	-	<LD	-	63.89	40.37	61.51	3.78
CG-63	3.93	0.25	NR	-	<LD	-	74.32	14.35	128.32	11.04
CG-64	3.16	0.53	NR	-	<LD	-	98.64	6.82	60.58	0.94
CG-65	3.79	0.58	NR	-	<LD	-	85.34	9.36	84.09	5.34
CG-66	3.53	0.41	NR	-	<LD	-	76.24	7.31	77.64	2.25

Cuadro A.1.4 Límites de detección para la cuantificación de algunos metales mediante la técnica ICP-OES.

Metal	Límite de detección (LD)
As	5-10 ppb
Cd	1-5 ppb
Pb	50 ppb
V	50ppb