

# UCUENCA

## Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería Química

Carrera de Ingeniería Ambiental

### **Influencia de la vía Cuenca - Molleturo sobre la concentración de plomo, la respiración microbiana y las condiciones del suelo en el Parque Nacional Cajas, Ecuador**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental


#### **Autores:**

Luis Sebastián Morejón Estévez

Jennifer Carolina Pacho Guerrero

#### **Director:**

Pablo Patricio Jara Torres

ORCID:  0000-0001-5911-6348

**Cuenca, Ecuador**

2023-07-24

### Resumen

Se conoce que las vías de transporte alrededor del mundo producen efectos negativos y contaminación sobre los diversos ecosistemas. Por tal motivo, el objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar la influencia de la vía Cuenca–Molleturo-Naranjal sobre la concentración de plomo, la respiración microbiana y las principales características químicas del suelo (pH, CE, Eh) en el PNC, Ecuador. Para el análisis, se establecieron tres sitios de muestreo a la entrada, mitad y salida del parque en los cuales se tomaron muestras de suelo (0-20 cm), junto a la vía (0 m) y lejos de la vía (30 m); para la respiración microbiana n=3, plomo n=2, pH n=3, CE n=3, Eh n=3 y densidad aparente n=3. Los valores promedio junto y lejos de la vía fueron 0,72-0,65 g cm<sup>-3</sup>, 5.89-5.51, 96.76-67.37  $\mu\text{S cm}^{-1}$  y 303.59-323.46 mV para densidad aparente, pH, CE y Eh respectivamente, 0.63-0.51 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>; para la respiración microbiana, 34.36-28.84 mg kg<sup>-1</sup> para el Pb. Los resultados indicaron una influencia de la vía sobre los parámetros químicos al mostrar una diferencia estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ) entre los valores de los sitios cercanos y alejados de la vía para el pH, CE y Eh, a diferencia de la respiración microbiana y del Pb donde no se hallaron diferencias. Sin embargo, la concentración de Pb en los suelos supera en 1,7 el límite permisible estipulado en los criterios de calidad de suelo del Ecuador el cual es de 19 mg kg<sup>-1</sup>.

*Palabras clave:* contaminación química, carreteras, metales pesados



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

**Repositorio Institucional:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

### Abstract

Transport routes around the world are known to produce negative effects and pollution on various ecosystems. For this reason, the aim of this research work was to assess the influence of the Cuenca–Molleturo-Naranjal route on lead concentration, microbial respiration and the main chemical characteristics of the soil (pH, CE, Eh) in the PNC, Ecuador. For analysis, three sampling sites were established at the entrance, half and exit of the park in which soil samples (0-20 cm) were taken, next to the road (0 m) and away from the road (30 m); for microbial respiration  $n=3$ , lead  $n=2$ , pH  $n=3$ , CE  $n=3$ , Eh  $n=3$  and apparent density  $n=3$ . The average values along and away from the pathway were 0.72-0.65  $\text{g cm}^{-3}$ , 5.89-5.51, 96.76-67.37  $\mu\text{S cm}^{-1}$  and 303.59-323.46 mV for apparent density, pH, CE and Eh respectively, 0.63-0.51  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ; for microbial respiration, 34.36-28.84  $\text{mg kg}^{-1}$  for Pb. The results indicated a pathway influence on chemical parameters by showing a statistically significant difference ( $p<0.05$ ) between the values of near and distant pathway sites for pH, CE and Eh, as opposed to microbial respiration and Pb where no differences were found. However, the concentration of Pb in soils exceeds by 1.7 the permissible limit stipulated in Ecuador's soil quality criteria which is 19  $\text{mg kg}^{-1}$ .

*Keywords:* chemical contamination, highways, heavy metals



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

**Institutional Repository:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

## Índice de contenidos

<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO II. OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
Objetivo general.....	12
Objetivos específicos.....	12
<b>CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>13</b>
3.1 Parámetros físicos, químicos y biológicos indicadores de las condiciones del suelo.....	13
3.2 Contaminación del suelo producida por las vías terrestres.....	14
3.3 Efectos de la contaminación del suelo por metales pesados sobre los microorganismos.....	15
3.4 Contaminación del suelo en Ecuador y Cuenca.....	16
3.5 Situación ambiental del PNC.....	18
3.6 Principales características de los suelos del PNC.....	19
<b>CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA.....</b>	<b>21</b>
4.1 Zona de estudio.....	21
4.2. Selección de los sitios de muestreo.....	22
4.3. Recolección de muestras de suelo.....	24
4.4. Determinación de los parámetros básicos del suelo.....	24
4.4.1 Densidad aparente del suelo.....	24
4.4.2. pH del suelo.....	24
4.4.3. Conductividad eléctrica del suelo.....	25
4.4.4. Potencial redox del suelo.....	25
4.5. Determinación de la concentración de plomo en el suelo.....	25
4.6 Determinación de la respiración microbiana del suelo.....	26
4.7 Análisis estadístico.....	28
<b>CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>29</b>
5.1. Principales parámetros del suelo junto (0 m) y lejos (30 m) de la vía Cuenca - Molleturo - Naranjal en el PNC.....	29
5.1.1. Densidad del suelo.....	29
5.1.2. pH del suelo.....	34
5.1.3. Conductividad eléctrica del suelo.....	39
5.1.4. Potencial redox del suelo.....	44
5.2. Concentración de Pb en el suelo.....	49
5.3. Respiración microbiana del suelo.....	54
5.4. Relación entre la concentración de Pb en el suelo y la respiración microbiana del suelo.....	60
<b>CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>62</b>
Conclusiones.....	62
Recomendaciones.....	62
<b>Referencias.....</b>	<b>63</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Mapa de la zona de estudio.....	24
Figura 3. Distribución de la densidad del suelo según la distancia de la vía.....	33
Figura 4. Distribución de la densidad del suelo en las zonas de monitoreo.....	34
Figura 5. Distribución de la densidad del suelo en las 3 zonas de monitoreo.....	34
Figura 6. Distribución de la densidad del suelo a la derecha e izquierda de la vía.....	35
Figura 7. Distribución de la densidad del suelo en todos los puntos de monitoreo .....	35
Figura 8. Distribución del pH del suelo según la distancia de la vía.....	39
Figura 9. Distribución del pH del suelo en las zonas de monitoreo.....	39
Figura 10. Distribución del pH del suelo en las 3 zonas de monitoreo.....	40
Figura 11. Distribución del pH del suelo a la derecha e izquierda de la vía.....	40
Figura 12. Distribución del pH del suelo en todos los puntos de monitoreo.....	41
Figura 13. Distribución de la conductividad del suelo según la distancia de la vía.....	44
Figura 14. Distribución de la conductividad eléctrica del suelo en las zonas de monitoreo..	44
Figura 15. Distribución de la conductividad eléctrica del suelo en las 3 zonas de monitoreo.....	45
Figura 16. Distribución de la conductividad eléctrica del suelo a la derecha e izquierda de la vía.....	45
Figura 17. Distribución de la conductividad eléctrica del suelo en todos los puntos de monitoreo.....	46
Figura 18. Distribución del potencial redox del suelo según la distancia de la vía.....	49
Figura 19. Distribución del potencial redox del suelo en los puntos de monitoreo.....	49
Figura 20. Distribución del potencial redox del suelo en las zonas de monitoreo.....	50
Figura 21. Distribución del potencial redox del suelo a la izq y dcha.....	50
Figura 22. Distribución específica de potencial redox del suelo.....	51
Figura 23. Distribución del plomo en el suelo según la distancia de la vía.....	54
Figura 24. Distribución del plomo en el suelo en los puntos de monitoreo.....	54
Figura 25. Distribución del plomo en el suelo en las zonas de estudio.....	55
Figura 26. Distribución del plomo en el suelo a la derecha e izquierda de la vía.....	55
Figura 27. Distribución del plomo en el suelo en todos los puntos de monitoreo.....	56
Figura 28. Distribución de la respiración microbiana del suelo según la distancia de la vía.....	59
Figura 29. Media de la respiración microbiana del suelo por cada día de ensayo de todos los sitios lejos de la vía vs todos los sitios junto a la vía.....	59
Figura 30. Distribución de la respiración microbiana del suelo en los puntos de monitoreo.....	60
Figura 31. Media de la respiración microbiana del suelo por cada día de ensayo, de todos los sitios lejos de la vía vs todos los sitios junto a la vía, por cada zona de estudio.....	60
Figura 32. Distribución de la respiración microbiana del suelo en las zonas de monitoreo...61	
Figura 33. Distribución de la respiración microbiana del suelo a la derecha e izquierda de la vía.....	61
Figura 34. Distribución de la respiración microbiana en todos los puntos de monitoreo.....	62

Figura 35. Relación concentración de plomo vs respiración microbiana del suelo..... 63

## Índice de tablas

Tabla 1. Características generales de los sitios de estudio.....	26
Tabla 2. Densidad del suelo alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal del PNC.....	33
Tabla 3. Prueba Mann-Whitney del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre la densidad del suelo.....	34
Tabla 4. Prueba t-student del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía, sobre la densidad del suelo.....	34
Tabla 5. Efecto del lado (izquierdo/derecho) de los sitios de estudio sobre la densidad del suelo.....	35
Tabla 6. pH del suelo alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal del PNC.....	39
Tabla 7. Prueba Mann-Whitney del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre el pH del suelo.....	39
Tabla 8. Prueba Mann-Whitney del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre el pH del suelo.....	39
Tabla 9. Efecto del lado (izquierdo/derecho) de los sitios de estudio sobre el pH del suelo.....	40
Tabla 10. CE del suelo alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal del PNC.....	44
Tabla 11. Prueba Mann-Whitney del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre la CE del suelo.....	45
Tabla 12. Prueba Mann-Whitney del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre la CE del suelo.....	45
Tabla 13. Efecto del lado (izquierdo/derecho) de los sitios de estudio sobre la CE del suelo.....	45
Tabla 14. Eh del suelo alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal del PNC.....	49
Tabla 15. Prueba t-Student del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre el Eh del suelo.....	50
Tabla 16. Efecto de la zona de los sitios de estudio (entrada, mitad y salida) sobre el Eh del suelo.....	50
Tabla 17. Prueba Mann-Whitney del efecto del lado (izquierdo/derecho) de los sitios de estudio sobre el Eh del suelo.....	50
Tabla 18. Concentración de Pb ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en el suelo alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal del PNC.....	54
Tabla 19. Prueba t-Student del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre el Pb del suelo.....	55
Tabla 20. Prueba t-Student del efecto de la zona de los sitios de estudio (entrada, mitad y salida) sobre el Pb del suelo.....	55
Tabla 21. Prueba t-Student del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre el Pb del suelo.....	55
Tabla 22. Respiración microbiana del suelo alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal del PNC.....	59
Tabla 23. Prueba Mann-Whitney del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre la respiración microbiana del suelo.....	60
Tabla 24. Prueba t-student del efecto de la zona de los sitios de estudio (entrada, mitad y salida) sobre la respiración microbiana del suelo.....	60
Tabla 25. Prueba Mann-Whitney del efecto del lado (izquierdo/derecho) de los sitios de estudio sobre la respiración microbiana del suelo.....	60

### Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres Carlos y Fanny, y a mi hermano Eddy. Gracias a su apoyo y sacrificio el día de hoy estoy alcanzando una de las metas que algún día soñé, ellos fueron parte de todo este proceso y sin su ayuda jamás lo habría conseguido, quiero que sepan que este logro no lo conseguí yo sola, este logro es suyo y mío. También quiero dedicar este trabajo a mis abuelos César y María, a mis tías Martha y Teolinda y a mi primo Bryam quienes a pesar de la distancia siempre han estado pendientes de mí, apoyándome en cada momento que lo he necesitado y animándome para no rendirme.

Dedico a todos mis amigos quienes durante toda esta etapa estuvieron apoyándome, escuchándome y aconsejándome cuando lo necesitaba. Quiero que sepan que estoy feliz de tenerlos en mi vida y siempre los llevaré en mi corazón.

Finalmente, a todas las personas quienes pusieron su granito de arena para que la realización de este trabajo haya sido posible.

Jennifer Carolina Pacho Guerrero

El presente trabajo es dedicado a mi familia en general por su apoyo a lo largo de mi vida universitaria, entre ellos a mis hermanas Valeria y Adriana, a mis tíos Daniel, Carolina, Andres y Emilio, a mi padre Walter y especialmente a mi mamá Viviana y a mis abuelos Eduardo y Elena quienes sin ellos no habría alcanzado mis objetivos planteados.

Luis Sebastián Morejón Estévez



## Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios por haberme guiado durante todo este largo camino y haberme permitido alcanzar esta meta.

Agradezco de manera especial a mi tutor al Biólogo Pablo Jara por todo su apoyo, sus conocimientos brindados durante toda la carrera y el tiempo dedicado para poder llevar a cabo este trabajo.

De igual manera agradezco al Doctor Geovanny Larriva quien nos abrió las puertas del laboratorio para poder llevar a cabo los respectivos análisis y a su vez nos brindó sus conocimientos para desarrollar de la mejor manera el trabajo.

Jennifer Carolina Pacho Guerrero

Agradezco a todas aquellas personas que contribuyeron de alguna manera en el desarrollo del presente trabajo de investigación. Especialmente a aquellos compañeros de carrera que brindaron su apoyo, al Dr. Geovanny Larriva quien nos abrió la puerta de su laboratorio y nos proporcionó los equipos y los reactivos necesarios, y finalmente a Pablo Jara por ser nuestro tutor y guiarnos en cada paso para el desarrollo de la tesis

Luis Sebastián Morejón Estévez

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Las vías de transporte alrededor del mundo producen contaminación y efectos negativos en los diversos ecosistemas del planeta (Spellerberg, 1998; Forman & Deblinger, 2000; Nikolaeva et al., 2021). Las principales consecuencia de las vías terrestres son principalmente: (i) aumentar el riesgo de muerte de la fauna debido a la colisión contra vehículos (Astudillo et al., 2015; Aguilar et al., 2019); (ii) impedir el flujo de especies al actuar como barrera física (lo que produce la fragmentación del hábitat con consecuencias negativas en la limitación de la diversidad biológica y el aumento de la probabilidad de extinción; Spellberg, 1998; Alexander & Waters, 2000; Forman & Deblinger, 2000); y (iii). generar diversas sustancias y compuestos que pueden llegar a contaminar el agua, el aire y el suelo (Spellerberg, 1998).

La vía terrestre que atraviesa el Parque Nacional Cajas (PNC) produce diversos efectos negativos sobre los ecosistemas del área natural (MAE, 2018). Las consecuencias de esta carretera en la vida silvestre incluyen muertes por colisiones de animales y perturbación de las rutas de migración de animales (Aguilar et al., 2019). Las carreteras también obstruyen los cursos de agua, lo que pone en grave peligro a pequeños cuerpos de lagos que dependen del flujo y el drenaje de lugares altos (MAE, 2018). Además, se han encontrado que los cursos de agua cerca de la ruta Cuenca-Molleturo-Naranjal superan la norma actual en el parámetro de sustancias solubles en hexano, indicando contaminación del agua con aceites y grasas del tráfico en movimiento (Etapa, 2012a; MAE, 2018). Aunque es una gran preocupación los efectos de contaminación que podría tener sobre las condiciones del suelo, esto todavía no ha sido estudiado.

Las vías se han vuelto una de las principales fuentes de contaminación por metales pesados en los suelos (Zhang et al., 2015; Wang, Birch et al., 2022). Los metales pesados provienen de la quema de combustibles fósiles, abrasión de neumáticos, uso de aceites lubricantes y el desgaste de los materiales de la vía con el paso del tiempo (Zhang et al., 2015). Estos metales pesados se acumulan al borde de las autopistas por deposición atmosférica húmeda y seca y su concentración tiende a decrecer a medida que aumenta la distancia respecto a la vía (Werkenthin et al., 2014; Zhang et al., 2015; Wang, Birch et al., 2022).

La contaminación del suelo por metales pesados causa daños a los organismos y a los procesos funcionales de los ecosistemas (Wang, Cui, et al., 2022; Aliyu et al., 2023; Napoletano et al., 2023). Principalmente debido a que los metales pesados son tóxicos

cuando se encuentran en grandes cantidades (Kao et al., 2006; Khalid et al., 2017). Se ha visto que afectan la actividad de los microorganismos edáficos, la formación del suelo y el crecimiento de las plantas (Kizilkaya et al., 2004; Tiwari & Lata, 2018). Al afectar la actividad enzimática de los microorganismos del suelo (Yang et al., 2006; Zhang et al., 2010; Abdul et al., 2016), también afectan la disponibilidad de nutrientes para las plantas, por lo que la regeneración vegetal del ecosistema se ve limitada (Wan et al., 2023).

Para conocer si existe contaminación y afecciones en las propiedades físico químicas y biológicas del suelo como consecuencia de la vía Cuenca-Molleturo-Naranja en este estudio se recolectaron muestras de suelo superficial siguiendo un diseño cuasi-experimental en el cual se dividió el tramo de la vía que atraviesa el PNC en tres secciones: (i). Entrada, (ii). Mitad y (iii). Salida. Posteriormente en laboratorio se determinó la concentración de Pb, la respiración microbiana, conductividad eléctrica, potencial redox, pH y densidad aparente.

En el PNC existe muy escasa información acerca de la contaminación por metales en el suelo producto de la vía. En este estudio se evidenció contaminación del suelo del PNC por un metal pesado y además se evidenció un potencial efecto en los parámetros físico-químicos del suelo.

## CAPÍTULO II. OBJETIVOS

### Objetivo general

Evaluar la influencia de la vía Cuenca – Molleturo sobre la concentración de plomo, la respiración microbiana y las principales características químicas del suelo en el Parque Nacional Cajas, Ecuador

### Objetivos específicos

Determinar el pH, conductividad, potencial redox y densidad, al borde y a 30 m de la vía Cuenca - Molleturo en el Parque Nacional Cajas.

Determinar la concentración de plomo en el suelo, al borde y a 30 m de la vía Cuenca-Molleturo en el Parque Nacional Cajas.

Determinar la respiración microbiana del suelo al borde y a 30 m de la vía Cuenca-Molleturo en el Parque Nacional Cajas.

Analizar la relación entre la concentración de plomo y la respiración microbiana del suelo, en la vía Cuenca-Molleturo en el Parque Nacional Cajas.

## CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

### 3.1 Parámetros físicos, químicos y biológicos indicadores de las condiciones del suelo.

La formación del suelo es un proceso continuo que implica cambios químicos, físicos y biológicos de la roca madre (García et al., 2012). Los cambios biológicos se llevan a cabo por las plantas y microorganismos (bacterias, actinomicetos, cianobacterias, hongos, algas, protozoarios y virus; Arias et al., 2018) quienes son la principal fuente de materia orgánica que se descompone y da lugar al humus (Julca-Otiniano et al., 2006).

Cada suelo tiene características diferentes por lo que no se puede establecer una condición de calidad estándar, es por eso por lo que se analiza la condición del suelo a partir de indicadores, los cuales pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (SQI, 1996; Segueda, 2011).

Dentro de los principales parámetros físicos utilizados como indicadores de la condición del suelo se encuentra la textura, densidad aparente, capacidad de retención del agua, infiltración, conductividad hidráulica, profundidad del suelo superficial y porosidad (Doran & Pakin, 1994).

Por otro lado, los indicadores químicos están relacionados con las condiciones que afectan la disponibilidad de agua y nutrientes tanto para los microorganismos y plantas (García-Mendoza et al., 2004; Moreira, 2010; Navarro, 2013). Algunos indicadores químicos son el N total y P disponible (Nieves, 2007). Autores como Doran y Parkin (1994) proponen como indicadores químicos el pH, conductividad eléctrica y contenido de materia orgánica.

El pH indica la concentración de iones hidrógeno presentes en una disolución (Rivera et al., 2018) y hace referencia a las relaciones de acidez y basicidad que se presenta en el suelo (Fassbender y Bornemisza, 1987). Las diferentes relaciones que existen afectan varios procesos entre los cuales se encuentra la descomposición de la materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes para las plantas, la formación de arcillas, etc. (Navarro, 2013).

La conductividad eléctrica (CE) es una medida del contenido de sales solubles presentes en el suelo (Rincón et al., 2002). El alto contenido de sales de cloruro de sodio, cloruro de calcio, cloruro de magnesio, nitratos de sodio, boratos de sodio y potasio hacen que los suelos sean

llegando a tener una  $CE > 4$  (Álvarez Riera, 1998). Por otro lado, los suelos sódicos poseen altas concentraciones de sodio intercambiable y se caracterizan por tener un color oscuro debido a la acumulación de carbonato y bicarbonato de sodio (Álvarez Riera, 1998).

Por último, los parámetros biológicos hacen referencia a la abundancia de microorganismos y macroorganismos que se encuentran en el suelo. Este tipo de parámetros sirven para identificar de manera temprana la degradación o mejoría del suelo gracias a su carácter dinámico (Segueda, 2011). La biomasa microbiana, el N potencialmente mineralizable y la respiración del suelo son algunos de los indicadores biológicos (Ferreiro, 2006).

La respiración del suelo hace referencia a la cantidad total de  $CO_2$  producido por unidad de área y de tiempo (Lloyd & Taylor, 1994). Está conformada por la respiración producida por las raíces y los microorganismos en la rizosfera, también conocida como respiración autotrófica y la respiración heterotrófica la cual es la respiración producida por los microorganismos al momento de descomponer la materia orgánica en el suelo (Cueva et al., 2016).

### **3.2 Contaminación del suelo producida por las vías terrestres.**

La contaminación del suelo es la alteración de las características físicas, químicas y biológicas del suelo por la presencia de sustancias consideradas peligrosas en concentraciones tales que afecten el medio ambiente o la salud humana (Rodríguez Jiménez, 2008). La alteración de estas características genera un cambio en las condiciones del suelo lo que trae consigo la degradación reduciendo así la capacidad del suelo para producir bienes o servicios (Jimenez Ballesta, 2017).

La contaminación del suelo y las vías terrestres se relacionan por la presencia de metales en las emisiones vehiculares de los carros que circulan por las carreteras (Wang et al., 2022, De Silva., 2016; Huang et al., 2022; An et al., 2022). Estas emisiones contienen metales pesados que son depositados al borde de las carreteras (An et al., 2022). Los metales provienen del desgaste de frenos y neumáticos del vehículo, del combustible y del aceite de motor (De Silva., 2016).

Existen estudios que relacionan el tráfico vehicular con la presencia de metales pesados en los suelos de la carretera. Por ejemplo, De Silva et al. (2016) realizó un estudio sobre la acumulación de metales en el borde de la carretera en Melbourne, Australia y encontró presencia de Cd, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Pd y Zn, en donde la concentración de Pb se

encuentra por debajo de la normativa del país. Por otro lado, Korzeniowska (2023) analizó el contenido de metales pesados 17 Luis Sebastián Morejón Estévez - Jennifer Carolina Pacho Guerrero (Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) en el suelo de una carretera en Polonia y se encontraron valores considerablemente altos de Cr, Pb y Zn, también se analizó la influencia del viento con la concentración de metales y se obtuvo que las concentraciones de todos los metales analizados en el suelo fueron más altas en el lado de la carretera a favor del viento.

Estos metales pueden dispersarse hasta 200 m, sin embargo, la mayor deposición se da en los primeros 20 m al borde de la carretera (De Silva., 2016). Bernardino et al. (2019) analizaron la acumulación de metales en suelos al borde de las carreteras de Río de Janeiro, y conforme las muestras recolectadas se alejaban de la carretera la concentración de metales disminuyó. En el estado de Zulia en Venezuela se encontraron concentraciones significativamente elevadas de Pb, Zn, Ni y Cr en el suelo al borde de las carreteras en comparación con muestras alejadas de estas (Machado et al., 2008). Para el caso de Ecuador no se encontraron estudios relacionados al tema. Korzeniowska (2023) estudió la presencia de metales pesados (Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) en una carretera estatal al Sur de Polonia y las muestras de suelo fueron tomadas a una distancia de: 5, 50, 100, 300, 500 y 600 m del borde de la vía y las concentraciones de Cr, Cu, Ni, Pb y Zn disminuyeron al aumentar la distancia desde la carretera. Pese a esta información en el estudio realizado por An et al. (2022) al borde de las carreteras en la meseta del Tíbet los resultados demostraron que no existía una variación significativa en la concentración de metales en las diferentes distancias (5 m, 50 m y 100 m) al borde de dos carreteras principales

### **3.3 Efectos de la contaminación del suelo por metales pesados sobre los microorganismos**

La evidencia creciente sugiere que los microorganismos que habitan en el suelo son más susceptibles a los efectos del estrés de los metales pesados que plantas y animales (Zhang et al., 2010). Las concentraciones significativas de metales pesados pueden tener un impacto perjudicial en la composición y en la diversidad de las comunidades microbianas en los suelos (Giler et al., 2009; Zhang et al., 2010; Nwachukwu & Pulford, 2011; Chodak et al., 2013; Naz et al., 2022), ocasionado por una fuerte disminución en la cantidad de biomasa microbiana del suelo (Giler et al., 2009; Zhang et al., 2010; Naz et al., 2022), que está vinculado a cambios en la estructura de las comunidades microbianas del suelo con grandes diferencias entre especies microbianas, cepas de la misma especie y diferentes actividades de la misma especie (Giler et al., 2009; Zhang et al., 2010; Naz et al., 2022).

Carolina Pacho Guerrero et al., 2009). Las concentraciones particularmente altas de metales pesados pueden restringir la variedad de microorganismos en el suelo, y estas comunidades microbianas menos diversas pueden ser menos resistentes a otras perturbaciones (Chodak et al., 2013).

Además, varios estudios han demostrado que ciertos metales pesados (Pb, Cd, Zn, Cu) tienen un efecto perjudicial en la biomasa y la actividad de los microorganismos del suelo (Liao & Xie, 2007; Nwachukwu & Pulford, 2011; Chodak et al., 2013; Naz et al., 2022). Esto ocurre como resultado de los mayores gastos de energía asociados con los microorganismos bajo estrés producido por los metales, que por ejemplo disminuyen la eficiencia del consumo de sustrato (Giller et al., 2009). Por lo tanto, se han sugerido una variedad de parámetros microbiológicos como posibles indicadores de la contaminación del suelo por metales, incluyendo la biomasa microbiana, la respiración basal, la mineralización C y N, y la estructura de la comunidad microbiana (Gülser & Erdoğan, 2007; Liao & Xie, 2007; Zhang et al., 2010).

Las altas concentraciones de metales pueden ralentizar significativamente la tasa de degradación (Kao et al., 2006; Nwachukwu & Pulford, 2011), debido a que la capacidad de los microorganismos para digerir sustratos complejos se reduce drásticamente por los metales pesados (Giler et al., 2009; Nwachukwu & Pulford, 2011). Algunos metales pueden obstruir el acceso a los sustratos, inhibiendo la actividad enzimática de descomposición, y por consecuencia afectando negativamente el metabolismo de los microorganismos produciendo una reducción en la respiración microbiana (Kao et al., 2006). De este modo, la producción de CO<sub>2</sub> por parte de los microorganismos es un indicador bastante fiable sobre la contaminación metálica en el suelo (Nwachukwu & Pulford, 2011).

### **3.4 Contaminación del suelo en Ecuador y Cuenca**

Algunos suelos de Ecuador se encuentran contaminados por la presencia de metales pesados (Ramírez Requelme et al., 2003; Ochoa, 2020; Jiménez-Oyola et al., 2021; Romero et al., 2022), sin embargo, la principal contaminación se encuentra en las zonas mineras, petroleras, agrícolas e industriales.

En Ecuador y otros países en desarrollo que tienen mineras de oro artesanal ilegales presentan considerables problemas ambientales pues estas emiten algunos metales (As, Cr y Pb) que 19 Luis Sebastián Morejón Estévez - Jennifer Carolina Pacho Guerrero afectan el medio ambiente (contaminación de ríos, sedimentos y suelo por metales pesados,



acumulación de metales en las plantas; Jiménez-Oyola et al, 2021; Cahuana & Aduvire, 2019). En los suelos de la zona minera de Ponce Enríquez ubicada al suroeste del Ecuador se han reportado concentraciones de Ni ( $443 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Cr ( $214 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Cu ( $1125 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Zn ( $430 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Cd ( $49.9 \text{ mg kg}^{-1}$ ), As ( $201 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y Pb ( $68.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) que están por encima de la normativa ecuatoriana (Jiménez-Oyola et al, 2021). En una zona minera en la Amazonía Ecuatoriana se evaluó la contaminación por Hg en los suelos y se encontró que la concentración media (Hg:  $1.68 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ ) sobrepasa 3 veces el límite permisible (Hg:  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) esto debido a la mala disposición de los relaves y al uso excesivo de Hg durante la amalgamación del Au (Requelme et al., 2003). En los cantones de Portovelo y Zaruma de la provincia del Oro en sitios donde se practica minería ilegal se encontró concentraciones de Pb ( $4060 \text{ mg kg}^{-1}$ ), As ( $8800 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Cd ( $27.40 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Zn ( $2670 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y Hg ( $35.90 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en el suelo que estaban 27, 587, 3, 7 y 4 veces por encima de lo estipulado en la normativa ambiental respectivamente, provenientes de los relaves de amalgamación (Oviedo-Anchundia, 2017).

Los metales en los suelos de Ecuador también están presentes debido al uso de pesticidas, fertilizantes y agua no tratada para riego en la agricultura (Romero et al., 2022). En la provincia de Esmeraldas los cultivos son regados con agua de ríos que se encuentran contaminados con metales no esenciales (As, Cd, Cr, Pb, Hg) debido a las actividades mineras (Romero et al., 2022). En la provincia de Guayas y El Oro se encontró una acumulación de Cd ( $2.45 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en el suelo superficial (0 - 15 m) de fincas cacaoteras, esto debido al riego con el agua proveniente de dos ríos que presentaban concentraciones de Cd superiores al nivel máximo permisible por la USEPA (Chávez et al., 2016). En las provincias del Guayas y Los Ríos se encuentran las mayores áreas de cultivo de arroz del país (Otero, 2016), en la provincia del Guayas se analizó el contenido de Pb y Cd en suelos de cultivo de arroz que son regados con agua del río Daule y los resultados mostraron que las concentraciones de Pb ( $13.52 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y Cd ( $0.26 \text{ mg kg}^{-1}$ ) no superan lo estipulado en la normativa ecuatoriana Pb ( $19 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y Cd ( $0.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Ochoa, 2020).

El área industrial es otra fuente de contaminación de metales pesados en suelos del Ecuador. En el sector del Parque Industrial de la ciudad de Cuenca se reportaron valores promedio de plomo (Pb;  $37.56 - 78.22 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y cadmio (Cd;  $0.52 - 0.756 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en el suelo superiores a la Norma de Calidad Ambiental del Ecuador ( $25 \text{ mg kg}^{-1}$  para el Pb y  $0.5 \text{ mg kg}^{-1}$  para el Cd; Tello, 20 Luis Sebastián Morejón Estévez - Jennifer Carolina Pacho Guerrero 2018). Por otro lado, en los suelos del área industrial de Latacunga, se evaluaron las concentraciones de Pb, Cd, Cu y Ni, resultando concentraciones de Cobre ( $39 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y

Níquel ( $30 \text{ mg kg}^{-1}$ ) sobre los límites establecidos en la normativa nacional ( $30 \text{ mg kg}^{-1}$ ) para el Cu y  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  para el Ni (Cela et al., 2021).

Las vías terrestres también contribuyen con la acumulación de metales en el suelo, en el Ecuador no se han realizado muchos estudios sobre el impacto de las vías en la contaminación del suelo. Únicamente se pudo encontrar el estudio realizado por Nicholas Hewitt & Candy (1990) donde se determinó las concentraciones de metales pesados (Pb, Cd, Zn) en el suelo y polvo en y alrededor de la ciudad de Cuenca. Las muestras de suelo fueron recolectadas a 5 m del borde del camino en los valles del río Mazán (Pb:  $2 \mu\text{g g}^{-1}$ , Cd:  $0.28 \mu\text{g g}^{-1}$  y Zn:  $101 \mu\text{g g}^{-1}$ ), río Quinuas (Pb:  $59 \mu\text{g g}^{-1}$ , Cd:  $0.39 \mu\text{g g}^{-1}$  y Zn:  $192 \mu\text{g g}^{-1}$ ), una zona urbana (Pb:  $293 \mu\text{g g}^{-1}$ , Cd:  $0.36 \mu\text{g g}^{-1}$  y Zn:  $509 \mu\text{g g}^{-1}$ ) y suburbana de Cuenca (Pb:  $76 \mu\text{g g}^{-1}$ , Cd:  $0.28 \mu\text{g g}^{-1}$  y Zn:  $70 \mu\text{g g}^{-1}$ ). Los resultados mostraron que en la zona urbana de la ciudad se encontraron concentraciones muy por encima de las concentraciones en las zonas fuera de la ciudad.

### 3.5 Situación ambiental del PNC

Dentro del Parque Nacional Cajas se han presentado algunos problemas ambientales como: incendios forestales, sobrepastoreo, sistemas de cultivos inadecuados entre otros (Sánchez, 2020). Los incendios forestales registrados dentro del parque no siguen ningún patrón lo que indica que son aleatorios, provocados por acción antropogénica y sus efectos dependen principalmente de las condiciones climáticas, topografía y el tiempo de reacción (ETAPA EP, 2012b). El último incendio registrado dentro del parque fue en el sector de Quinuas en diciembre de 2022 en donde más de 120 hectáreas fueron quemadas al paso del fuego por la extensa zona de pajonal (Orellana, 2022).

Otro problema que se presenta en el PNC es la presencia de basura debido a la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal y las visitas al parque, la basura se encuentra en el borde la vía y unos cuantos metros hacia dentro. Entre los principales desechos se encuentran plásticos de diferentes productos, latas, botellas de cerveza e incluso ropa. Con el objetivo de reducir esta contaminación la empresa ETAPA EP que es la institución que administra el PNC ha firmado un convenio con la empresa EMAC para que una vez por semana se recolecta la basura que se encuentra en la vía y hasta 2 m hacia dentro (Mazza, 2022).

La vía Cuenca-Molleturo-Naranjal no solo crea impactos por la presencia de basura sino también afecta a la flora y fauna del PNC (Takushi, 2011; Astudillo et al., 2015; Aguilar et al., 2019). El estudio realizado por Astudillo et al. (2014) analiza el impacto de la vía en la

avifauna del parque. Se concluyó que la abundancia se ve afectada en tramos cerca y lejos de la carretera a diferencia de la riqueza de aves que no se vio afectada. Esto se debe al cambio de la vegetación pues al borde de la carretera predominan los arbustos no nativos como *Polylepis* sp mientras que los arbustos nativos se encuentran lejos de la vía. Es por esto que la abundancia de las especies especialistas en páramos arbustivos aumenta conforme se aleja de la carretera.

Otro estudio realizado por Aguilar et al (2019) analiza la tasa de atropellos de aves en 15 km de la vía que cruza por el Parque Nacional Cajas. El tiempo de monitoreo del estudio fue de un año y se concluyó que la tasa de mortalidad fue de 4 aves  $\text{km}^{-1} \text{año}^{-1}$  y la tasa de mortalidad media mensual fue de 0.3 aves  $\text{km}^{-1} \text{mes}^{-1}$ . Las especies con mayor tasa de mortalidad que se registró en el estudio fueron *Cinclodes* sp.

El estudio realizado por Takushi (2011) analiza como la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal influye en las proporciones de los sexos de la especie *Phrygilus unicolor*. El estudio mostró que existe mayor presencia de hembras cerca de la carretera, sin embargo, no se pudo concluir si todas las hembras de la población prefieren estar cerca de la carretera. Algunas de las razones por las que la especie *Phrygilus unicolor* se encuentra cerca de la carretera es por el mayor acceso a la comida, zonas para creación de nidos y el calor que absorbe el concreto

### 3.6 Principales características de los suelos del PNC

La mayor parte de los suelos de páramo de Ecuador caen bajo la categoría de andosoles (Buytaert, Célleri, et al., 2006; Buytaert et al., 2006b; Suárez et al., 2016; Guio Blanco et al., 2018). Estos tienen un rango de pH ácido de 4,4 a 5,5 con un contenido de materia orgánica del suelo (MOS) entre 100 y 400  $\text{g kg}^{-1}$ , deficiencia de P, retención de agua y toxicidad por Al (Buytaert et al., 2005; Buytaert, Célleri, et al., 2006; Buytaert, Deckers, et al., 2006; Guio Blanco et al., 2018; Jara, 2018; Quinteros et al., 2013).

Bajo condiciones naturales, la mayoría de los andosoles tienen una estructura abierta y fuerte como resultado de la micro-agregación y la alta resistencia al corte (Buytaert, Célleri, et al., 2006). Una de sus características distintivas es el alto contenido de vidrio volcánico del suelo y un alto 22 Luis Sebastián Morejón Estévez - Jennifer Carolina Pacho Guerrero grado de permeabilidad (Poulenard et al., 2003; Buytaert, Célleri, et al., 2006). En circunstancias naturales, la infiltración de los andisoles es alta, y por ende la pérdida de sedimento es baja (Buytaert, Célleri, et al., 2006)

Los andosoles son llamados como suelos volcánicos basados en cenizas que son ricos en material orgánico (Guio Blanco et al., 2018). Para la formación de andosoles se han identificado dos procesos primarios que son la acumulación de carbono orgánico y el desarrollo de depósitos de cenizas volcánicas (Buytaert et al., 2005; Buytaert, Deckers, et al., 2006). La desintegración de los depósitos de ceniza volcánica resulta en cantidades extremadamente concentradas de aluminio, hierro y minerales (Buytaert et al., 2007; Bech et al., 2015). Además, los suelos de las zonas volcánicas a menudo tienen una secuencia de horizontes Ah-Bh-Bhs/Bw-C; el horizonte Ah es negro en color y contiene una gran cantidad de carbono orgánico (Bech et al., 2015).

## CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

### 4.1 Zona de estudio

El Parque Nacional Cajas se encuentra ubicado en la cordillera de los Andes en la parte suroeste del Ecuador en la provincia del Azuay a 34 km de la ciudad de Cuenca (Martínez, 2010). Tiene una altitud entre los 3.160 - 4.445 m s.n.m (Astudillo, 2015). El PNC cuenta con una superficie aproximada de 29.000 ha (Martínez, 2010)

El clima presenta las típicas características de los páramos andinos del Ecuador (Ansaloni et al., 2022). Es frío y húmedo y la temperatura oscila entre los 0 °C - 30 °C (MAE, 2018). La precipitación media anual es alrededor de 1200 mm, sin embargo, el régimen de lluvia no es constante y mucho menos uniforme (Astudillo, 2015). Las mayores precipitaciones se han registrado en el mes de abril y las mínimas en agosto (Buytaert et al., 2006b).

Según Astudillo (2015) dentro del parque se encuentran dos tipos principales de vegetación: páramo de pajonal y bosque andino de altura. Sin embargo, dentro del Mapa de Ecosistemas del Ecuador se identifican 3 tipos de vegetación: páramo herbáceo, páramo de almohadillas y bosque siempre verde montano alto (Minga et al., 2016). El páramo herbáceo ocupa alrededor del 90,6 % de la superficie del parque (CEMAPRIMES, 2002).

La flora presente en el Parque Nacional Cajas constituye casi el 10 % de la flora del Ecuador (Sklenář et al., 2005). Existen 500 especies de plantas vasculares de las cuales 71 son endémicas del país (Minga et al., 2016).

La diversidad dentro del parque también se representa en la fauna pues existen 47 mamíferos, 157 aves, 17 anfibios y 4 reptiles (Ministerio del Ambiente, S/F). De los mamíferos registrados la mayoría pertenecen a los micromamíferos y 2 especies de ellos son únicos del parque (ECOLAP & MAE, 2007).

La historia del Parque Nacional Cajas comienza en 1977 cuando fue declarado como Área Nacional de Recreación (Astudillo, 2014, Minga et al., 2016). Luego en 1996 pasó a ser Parque Nacional ya partir del año 2005 la empresa ETAPA EP adquiere la responsabilidad del manejo y gestión del parque (Minga et al., 2019).

El Parque Nacional Cajas cuenta con algunos reconocimientos como: Humedal de importancia RAMSAR 2002 por la presencia de 4000 cuerpos de agua dentro del parque. Área de importancia internacional para la conservación de aves en el año 2003 por contar

con los recursos adecuados para la reproducción, anidación y migración de aves que se encuentran en peligro de extinción. El último reconocimiento que ha obtenido es como Área Núcleo de Reserva de la Biósfera que fue otorgado por la UNESCO en el año 2013. (Visita Técnica - Parque Nacional El Cajas | GAD Municipal de Cuenca, 2022).

A pesar de que el parque cuenta con todos estos reconocimientos y es considerado Parque Nacional ha sufrido impactos por las actividades antropogénicas (Minga et al., 2019). Uno de estos impactos es la apertura de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal. Esta carretera ha provocado contaminación del suelo por la emanación de gases producto de la combustión de los vehículos (Vicuña & Bravo, 2007).

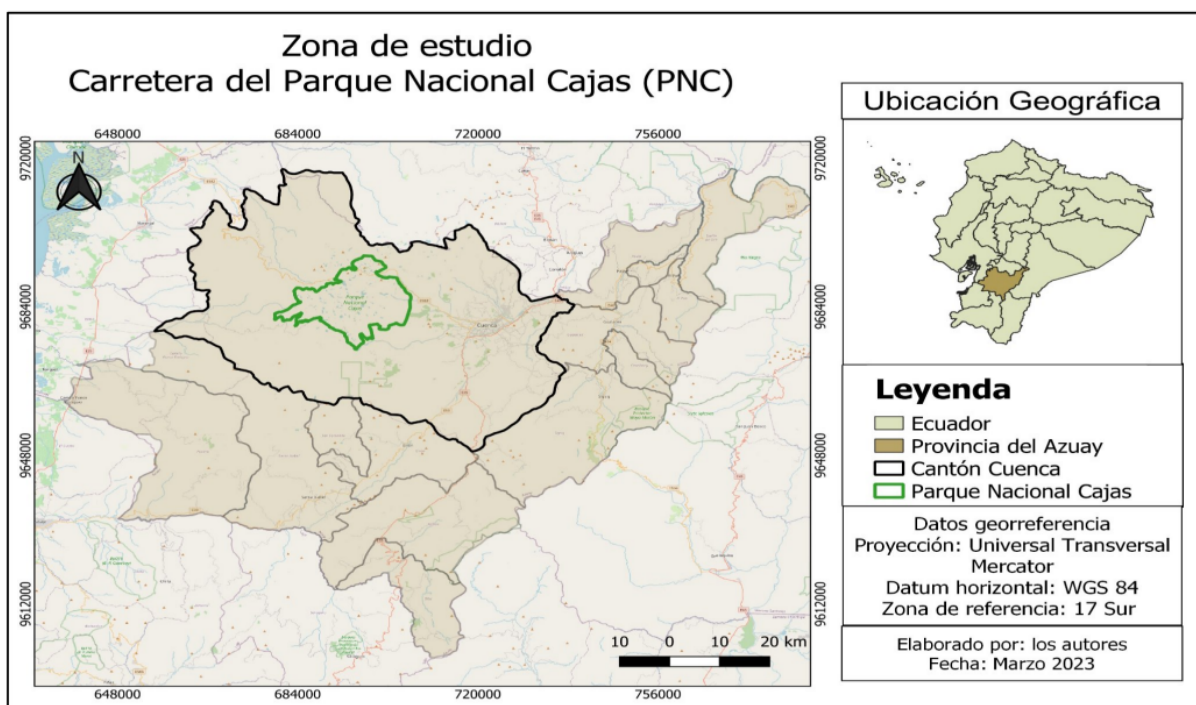


Figura 1. Mapa de la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia

## 4.2. Selección de los sitios de muestreo

Los sitios de muestreo fueron ubicados dentro de los 15 km de vía que cruzan el PNC. Se escogieron en total 3 zonas de muestreo: la primera zona estaba ubicada a la entrada del parque (km 28 vía Cuenca- Molleturo-Naranjal); la segunda a la mitad (km 32 vía Cuenca-Molleturo-Naranjal) y la tercera a la salida (km 36 vía Cuenca- Molleturo-Naranjal) (Figura 2).

Tabla 1. Características generales de los sitios de estudio.

Sitios de estudio		Altitud	Coordenada X	Coordenada Y	Pendiente	Cobertura Vegetal	Tipo de suelo	
		m s.n.m.	UTM	UTM	grados			
Entrada	Izquierda	Alejado de la vía	3769.0	699780	9691804	15	Arbustiva - herbácea	Andisol
		Junto a la vía	3772.5	699771	9691785	15	Arbustiva - herbácea	Andisol
	Derecha	Alejado de la vía	3782.8	699769	9691750	15	Arbustiva - herbácea	Andisol
		Junto a la vía	3775.3	699759	9691775	15	Arbustiva - herbácea	Andisol
Mitad	Izquierda	Alejado de la vía	3972.0	697893	9691962	5	Arbustiva - herbácea	Andisol
		Junto a la vía	3973.5	697882	9691915	5	Arbustiva - herbácea	Andisol
	Derecha	Alejado de la vía	3982.4	697876	9691906	5	Arbustiva - herbácea	Andisol
		Junto a la vía	3985.3	694876	9692873	5	Arbustiva - herbácea	Andisol
Salida	Izquierda	Alejado de la vía	4102.7	694848	9692902	10	Arbustiva - herbácea	Andisol
		Junto a la vía	4102.0	694869	9692882	10	Arbustiva - herbácea	Andisol
	Derecha	Alejado de la vía	4103.3	694886	9692842	10	Arbustiva - herbácea	Andisol
		Junto a la vía	4102.4	694872	9692868	10	Arbustiva - herbácea	Andisol

Fuente: Elaboración propia

Según Roel (2006) cuando se tiene información preliminar disponible se puede aplicar un muestreo dirigido con base en esta información, es por esto que para este caso de estudio se consideraron ciertos criterios para seleccionar la zona:

- zonas en las cuales se presentan planicies sin presencia de montañas con el objetivo de asegurar una dispersión de los contaminantes.
- zonas en donde no exista la presencia de árboles para que no interfieran en la dispersión de los contaminantes.

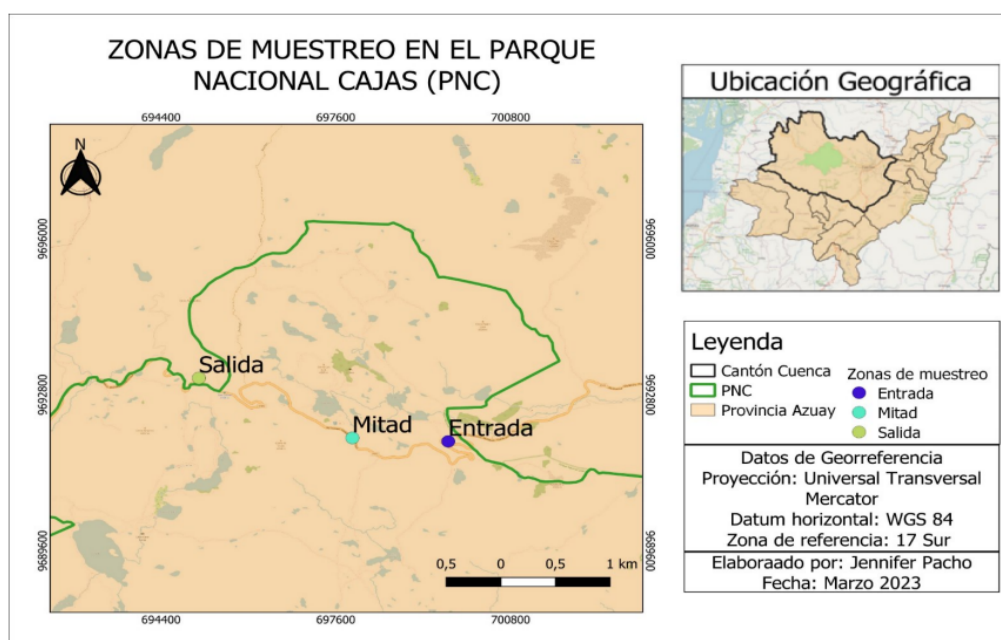


Figura 2. Puntos de muestreo dentro del PNC

Fuente: Elaboración propia

### 4.3. Recolección de muestras de suelo

Las muestras fueron recolectadas durante los meses de enero, febrero y marzo del 2023. Se tomaron un total de 36 muestras compuestas por 5 submuestras que fueron recogidas a una profundidad de 20 cm de suelo junto a la vía y 30 m lejos de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal, tanto del lado izquierdo como derecho a la entrada, mitad y salida del tramo de carretera que cruza por el PNC.

### 4.4. Determinación de los parámetros básicos del suelo

#### 4.4.1 Densidad aparente del suelo

Se realizó el procedimiento descrito por Gabriels & Lobo (2006) y Jara Torres (2018). Se introdujeron cilindros de 50 mL directamente sobre el suelo, haciendo presión con un martillo de hierro. Luego, las muestras fueron llevadas al laboratorio de Análisis de Agua de la Universidad de Cuenca y se secaron a 105 °C de temperatura. Una vez secas se pesaron las muestras de suelo y se restó el peso del cilindro. Finalmente, el valor obtenido se dividió para el volumen del cilindro, según la siguiente ecuación:

$$Dap = \frac{Ps}{V} \quad (1)$$

donde:

Dap: Densidad aparente del suelo

Ps: Peso seco de la muestra

V: Volumen del cilindro

#### 4.4.2. pH del suelo

Las muestras fueron previamente secadas al aire libre y tamizadas con un tamiz de malla 5 mm. Para la medición se aplicó la metodología recomendada por López et al. (2002). Para ello se pesó en una balanza analítica 20 g de suelo y se agregó 50 mL de agua destilada con una probeta graduada, teniendo una disolución suelo: agua de 1:2.5. La mezcla suelo:agua se colocó en recipientes rotarios y se dejó agitar por 30 min a 60 rpm. Luego se dejó reposar alrededor de 30 min.



El equipo utilizado fue el pH METER BT-600, el cual fue previamente calibrado con soluciones de pH 4, pH 7 y pH 10. Se introdujo el electrodo en cada una de las muestras y se anotó el valor registrado. Para cada muestra se realizó un total de 3 mediciones.

#### **4.4.3. Conductividad eléctrica del suelo**

Se aplicó la metodología aplicada por López et al. (2002) y se utilizó un multiparámetro de TDS & CE (hold). Se pesó 20 g de cada muestra de suelo y se agregó 50 mL de agua destilada. Posteriormente, se agitó y se dejó reposar por 30 min. En cada muestra se introdujo el electrodo previamente calibrado y se esperó hasta que la medida se estabilizara, de igual manera que para la medición del pH se realizó 3 mediciones por muestra.

#### **4.4.4. Potencial redox del suelo**

Se aplicó la metodología utilizada por Husson et al. (2016). Se preparó una solución con 50 g de suelo seco con 100 mL de agua destilada en un vaso de precipitación dando una relación 1:2. Luego, el vaso se agitó durante 1 minuto cada 10 minutos durante 1 hora en un agitador. Finalmente, se utilizó el equipo ORP/REDOX TESTER para registrar los valores del potencial redox para cada muestra. Cada medición por muestra se realizó por triplicado.

#### **4.5. Determinación de la concentración de plomo en el suelo**

La concentración de plomo se determinó mediante espectrometría de absorción atómica vía horno de grafito por el Laboratorio de Química y Análisis Instrumental de la Universidad del Azuay. La metodología utilizada fue la AOAC Official Method 999.11 descrita por Horwitz & Latimer (2005).

Las muestras fueron previamente homogeneizadas como pre-tratamiento. Luego, se pesaron de 5-10 g de suelo por cada muestra para ser secadas a 100 °C y posteriormente calcinadas a 450 °C. A continuación, se añadió 6M HCl (1+1) a las cenizas resultantes de la calcinación y se dejó evaporar hasta su totalidad en una placa caliente. Luego, se disolvió el residuo en 10 mL de 0.1M HNO<sub>3</sub>. Finalmente, se prepararon las curvas de calibración y se realizó la medición por las técnicas de llama y horno de grafito (Horwitz & Latimer, 2005).

#### 4.6 Determinación de la respiración microbiana del suelo

Para la determinación de la respiración microbiana por el método de circuito cerrado se utilizó el procedimiento descrito por Jara (2018), que a su vez es similar a lo expuesto por Kopec et al. (2013).

Las muestras de suelo se molieron y tamizaron con malla de 5 mm para homogeneizar las muestras, además se preparó una solución de un litro de hidróxido de sodio a 1M. Luego, se pesaron 30 gramos de suelo por muestra y se humedecieron con 20 mL de agua destilada, y se colocaron en las botellas de vidrio del respirómetro junto a 20 mL de la solución de NaOH en su respectivo envase. Cada botella está cerrada por un cabezal, el cual consta de un sensor que registra la pérdida de presión dentro del envase. Se continuó colocando los recipientes del respirómetro en una cámara a temperatura constante a 25 oC durante 4 días. Posteriormente, se registraron los valores del respirómetro cada 24 horas contando el día 0.

El respirómetro OxiTop, reporta datos de la disminución de la presión en cada recipiente. Por lo tanto, para calcular la cantidad de oxígeno consumido durante 5 días por los microorganismos se utilizó la ecuación general de los gases.

$$R_s = \frac{PMO_2}{R*T} * \frac{V_{fr}}{mBt} * |\Delta p| \quad (2)$$

donde:

$R_s$ : Respiración del suelo

R: Constante universal de los gases

$PMO_2$ : Peso molecular del oxígeno

T: Temperatura de incubación

$V_{fr}$ : Volumen libre del sistema

mBt: Masa de la muestra

$\Delta p$ : Pérdida de la presión registrada por el respirómetro

El volumen libre del sistema es igual al volumen total del recipiente, menos el volumen ocupado por la muestra de suelo y el volumen ocupado por el envase donde se coloca el absorbente. Por lo tanto, el  $V_{fr}$  se lo calcula con la siguiente ecuación:

$$V_{libre} = V_{fr} - (Vd + Vm) \quad (3)$$

donde:

$V_{libre}$ : volumen libre del sistema

$V_{fr}$ : volumen del frasco

$Vd$ : volumen ocupado por absorbente y su envase

$Vm$ : volumen ocupado por la muestra de suelo

Para obtener el valor de  $CO_2$  emitido en  $mg\ kg^{-1}$  se calculó por estequiometría química utilizando el peso equivalente del  $O_2$  y  $CO_2$  mediante la siguiente ecuación:

$$CO_{2\ mg/kg} = \frac{\frac{O_2}{(Peso\ molecular\ O_2)_{equivalente\ gramos}}}{(Peso\ molecular\ CO_2)_{equivalente\ gramos}} \quad (4)$$

donde:

$CO_2\ mg\ kg^{-1}$ : emisión de  $CO_2$  del suelo

$O_2$ : Cantidad de oxígeno consumido en el recipiente

Finalmente, se estimó la cantidad de  $CO_2$  emitido en  $g\ m^{-2}$  mediante la siguiente ecuación:

$$CO_{2\ g\ m^{-2}} = \frac{(CO_2\ (mg\ kg^{-1}) * Ms\ (masa\ del\ suelo\ en\ g\ ha^{-1}))}{1000} \quad (5)$$

$$Ms_{\ g\ ha^{-1}} = L * A * Pr * Dap\ (g\ cm^{-3}) \quad (6)$$

donde:

L (largo de 1 ha): 10000 cm

A (ancho de 1 ha): 10000 cm

Pr (profundidad de la muestra de suelo): 20 cm

Dap ( $\text{g cm}^{-3}$ ): densidad aparente obtenida para cada muestra de suelo

#### 4.7 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó en el software libre R Studio versión 3.6.3, para analizar la normalidad de los datos se aplicó dos tipos de test según la cantidad de datos a analizar. La prueba Shapiro-Wilk el cual se utiliza cuando la cantidad de datos a analizar es menor a 50 (Novales, 2010) y la prueba Lilliefors que es una modificación de la prueba Kolmogorov-Smirnov que se aplica cuando se tiene más de 50 datos (Lasa & Iraeta, 2002).

Para evaluar si existe una diferencia estadísticamente significativa al analizar las medias de los parámetros químicos, biológicos y concentración de plomo en los puntos junto a la vía y lejos de la vía y al analizar los datos tomados a la derecha e izquierda se aplicó la prueba paramétrica t-Student para dos muestras independientes cuando los datos seguían una distribución normal y la prueba no paramétrica Mann-Whitney cuando los datos no seguían una distribución normal.

Finalmente, para determinar si existe relación entre la respiración microbiana del suelo y la concentración de Pb se utilizó una regresión lineal simple y se analizó el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ).

## CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Principales parámetros del suelo junto (0 m) y lejos (30 m) de la vía Cuenca - Molleturo - Naranjal en el PNC

#### 5.1.1. Densidad del suelo

El rango de la densidad del suelo en los sitios de estudio alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal en el PNC varió entre 0.49 y 1.05 g cm<sup>-3</sup> (Tabla 2).

A nivel general, la densidad del suelo de los sitios de estudio junto a la vía (0.72 g cm<sup>-3</sup>) no fue significativamente ( $p>0.05$ ) diferente que la densidad del suelo de los sitios de estudio localizados lejos de la vía (0.65 g cm<sup>-3</sup>; Tabla 3; Figura 3).

A nivel de zona, la densidad del suelo de los sitios de estudio junto a la vía tampoco mostró diferencias significativas ( $p>0.05$ ) de los sitios de estudio localizados lejos de la vía, en la zona de la entrada, mitad y de la salida (Tabla 4; Figura 4).

Por su parte, la densidad aparente del suelo de los sitios de estudio en la entrada, mitad y salida del PNC no presentaron una diferencia significativa ( $p>0.05$ ) (Figura 5).

La densidad del suelo de los sitios de estudio localizados a la izquierda fue significativamente ( $p>0.05$ ) mayor que la densidad del suelo de los sitios de estudio localizados a la derecha de la vía (Tabla 5; Figura 6).

Finalmente, a nivel específico, la densidad aparente del suelo de los sitios de estudio junto a la vía fue significativamente mayor que la densidad aparente del suelo de los sitios de estudio localizados lejos de la vía, en la mitad en ambos lados y en la salida del lado izquierdo (Figura 7).

Los suelos del PNC se caracterizan por ser del tipo Andisol en su mayoría. La característica principal de estos suelos es el alto contenido de materia orgánica y retención de agua debido a su porosidad, es por eso que presentan una densidad aparente baja (Buytaert, Deckers, et al., 2006).

La densidad aparente de los suelos Andisoles se encuentra entre 0.14 y 0.45 g cm<sup>-3</sup> (Quichimbo et al, 2012) y según Podwojewski (1999) entre 0.3 a 0.9 g cm<sup>-3</sup>. Los valores de densidad aparente obtenidos se encuentran dentro del rango que indican los autores (Podwojewski, 1999; Quichimbo et al., 2012).

Según Jim (1993) y Kozlowski (1999) los suelos al borde de la carretera sufren compactación debido al pisoteo humano y tráfico vehicular. Esta compactación provoca una reducción del volumen del suelo generando una mayor densidad aparente.

En el estudio realizado por Mills et al. (2021) obtuvo que la densidad aparente del suelo era mayor al borde de la carretera (1.65 g cm<sup>-3</sup>) que hacia los puntos lejos del borde (1.38 g cm<sup>-3</sup>), conforme se alejaba de la carretera la densidad aparente disminuye.

La densidad aparente del suelo del PNC también disminuye, pues en los sitios junto a la vía se presentan valores altos y en los sitios alejados se tiene valores menores, sin embargo, estadísticamente no se encontró ninguna diferencia significativa entre los sitios junto a la vía y alejados.

La densidad del suelo a la izquierda de la vía fue mayor ( $p < 0.05^*$ ) que a la derecha de la vía. Esto posiblemente puede deberse a que del lado derecho se encuentra la peña y del lado izquierdo el suelo es plano, por lo que los sitios que se localizan del lado derecho de la vía son menos propensos a que alguien los pise y se compacten.

Tabla 2. Densidad del suelo alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal del PNC

Sitios de estudio			Densidad del suelo g cm <sup>-3</sup>							
			n	min	Q1	mediana	Q3	max	media	desviación estándar
Entrada <sup>a</sup>	Izquierda	Lejos de la vía	3	0.5	0.66	0.81	0.87	0.93	0.75	0.22
		Junto a la vía	3	0.6	0.63	0.63	0.84	1.05	0.77	0.24
	Derecha	Lejos de la vía	3	0.5	0.60	0.62	0.64	0.66	0.62	0.04
		Junto a la vía	3	0.5	0.57	0.61	0.73	0.84	0.66	0.16
Mitad	Izquierda	Lejos de la vía	3	0.5	0.63	0.74	0.85	0.97	0.74	0.23
		Junto a la vía	3	0.8	0.86	0.91	0.95	0.99	0.91	0.09
	Derecha	Lejos de la vía	3	0.5	0.53	0.55	0.59	0.64	0.57	0.07
		Junto a la vía	3	0.5	0.63	0.73	0.76	0.79	0.68	0.14
Salida	Izquierda	Lejos de la vía	3	0.4	0.56	0.63	0.65	0.68	0.60	0.10
		Junto a la vía	3	0.6	0.68	0.76	0.76	0.77	0.71	0.09
	Derecha	Lejos de la vía	3	0.5	0.58	0.61	0.64	0.67	0.61	0.06
		Junto a la vía	3	0.5	0.57	0.60	0.63	0.66	0.60	0.06
<i>Todos los sitios Lejos de la vía</i>			18	0.4	0.55	0.62	0.68	0.97	0.65	0.14
<i>Todos los sitios Junto a la vía</i>			18	0.5	0.60	0.70	0.81	1.05	0.72	0.16
<i>Todos los sitios</i>			36	0.4	0.57	0.64	0.77	1.05	0.68	0.15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Prueba Mann-Whitney del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre la densidad del suelo.

Variable	n	Medias	w	p-value	Diferencia de medias
Lejos de la vía	18	0.65	208	0.1516	0.0722
Junto a la vía	18	0.72			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Prueba t-student del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía, sobre la densidad del suelo

Variable	n	Medias	t	GI	p-value	Diferencia de medias
Lejos de la vía	6	0.6837	0.3095	9.656	0.7635	0.03163
Entrada Junto a la vía	6	0.7154				
Lejos de la vía	6	0.6541	1,4247	9.892	0.185	0.14982
Mitad Junto a la vía	6	0.7940				
Lejos de la vía	6	0.6038	1.0926	0.615	0.3012	0.051633
Salida Junto a la vía	6	0.6554				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Efecto del lado (izquierdo/derecho) de los sitios de estudio sobre la densidad del suelo

Variable	n	Medias	t	GI	p-value	Diferencia de medias
Izquierdo	18	0.7443	-2.568	25589	0.0164*	0.1199
Derecho	18	0.6244				

Fuente: Elaboración propia

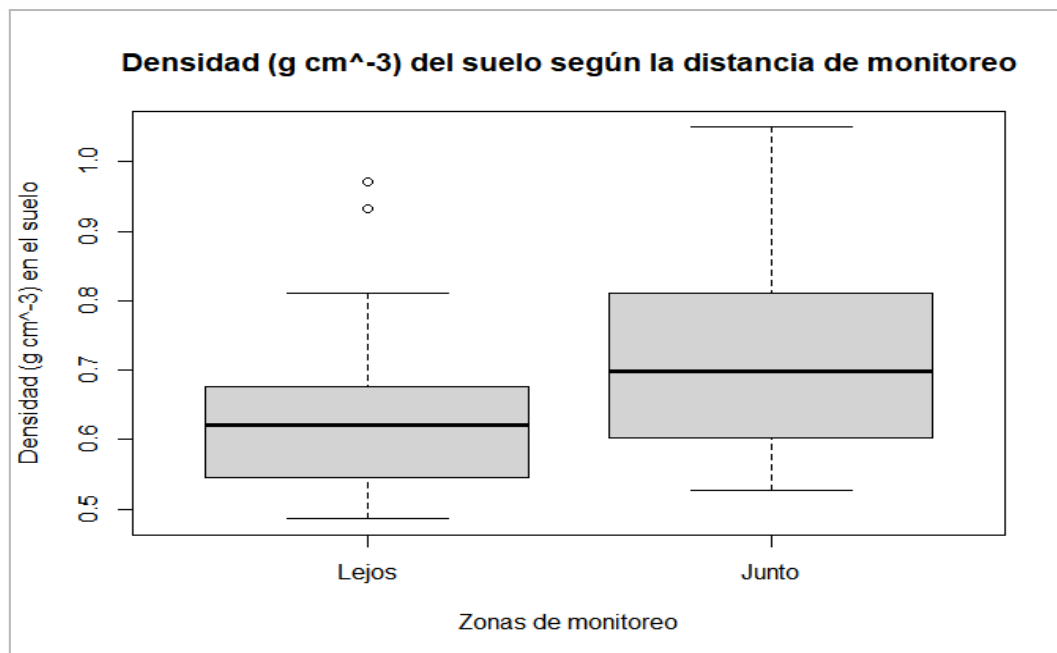


Figura 3. Distribución de la densidad del suelo según la distancia de la vía. Lejos (30 m lejos de la vía) y Junto (al borde de la vía)  
Fuente: Elaboración propia

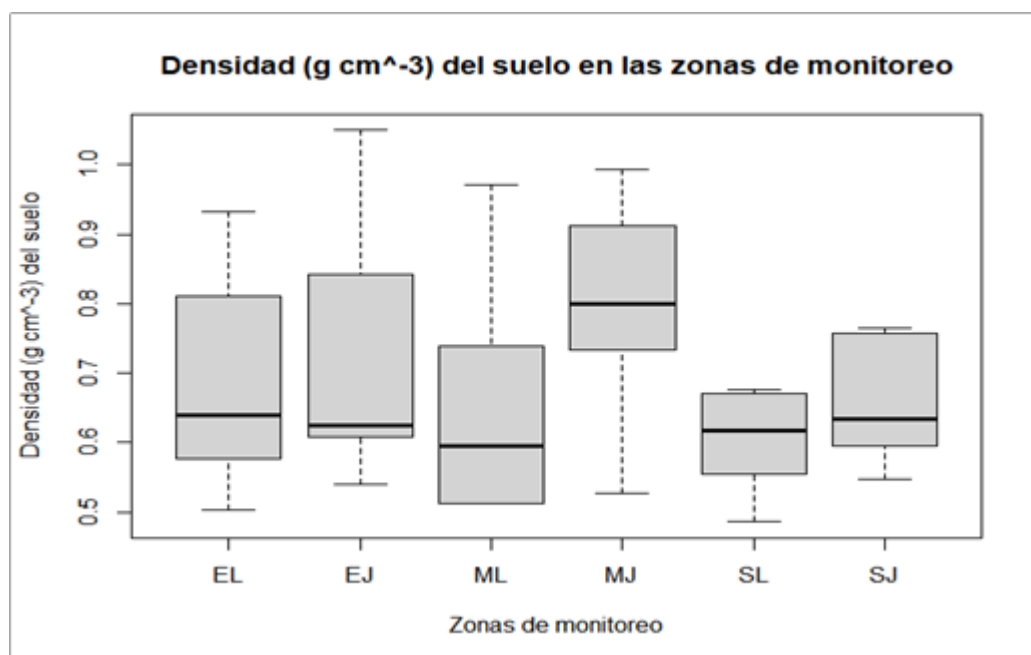


Figura 4. Distribución de la densidad del suelo en las zonas de monitoreo. EL (Entrada lejos de la vía), EJ (Entrada junto a la vía), ML (Mitad lejos de la vía), MJ (Mitad junto a la vía), SL (Salida lejos de la vía) y SJ (Salida junto a la vía).  
Fuente: Elaboración propia



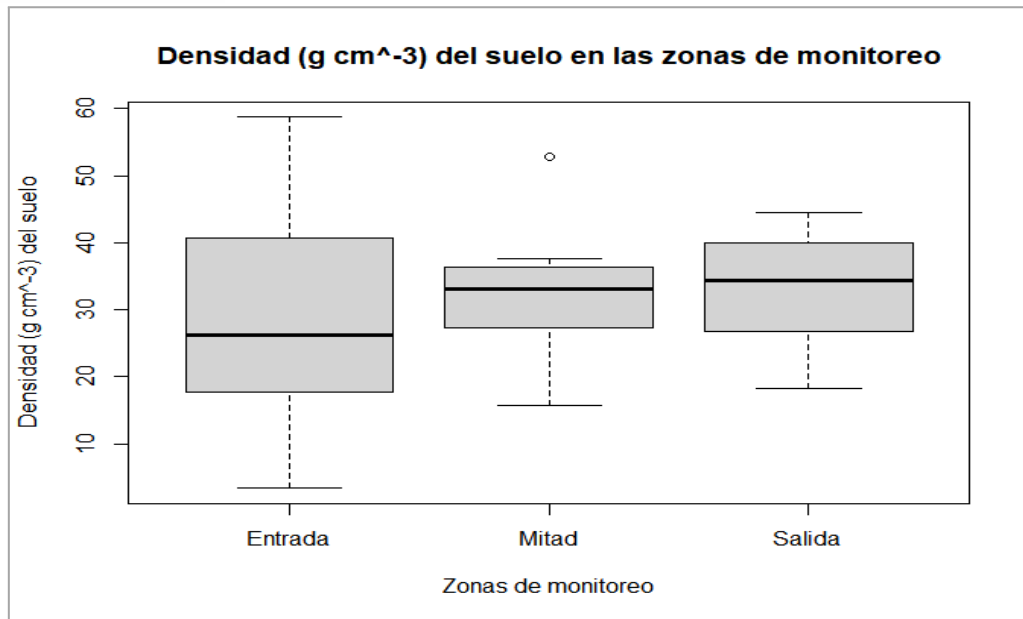


Figura 5. Distribución de la densidad del suelo en las 3 zonas de monitoreo  
Fuente: Elaboración propia

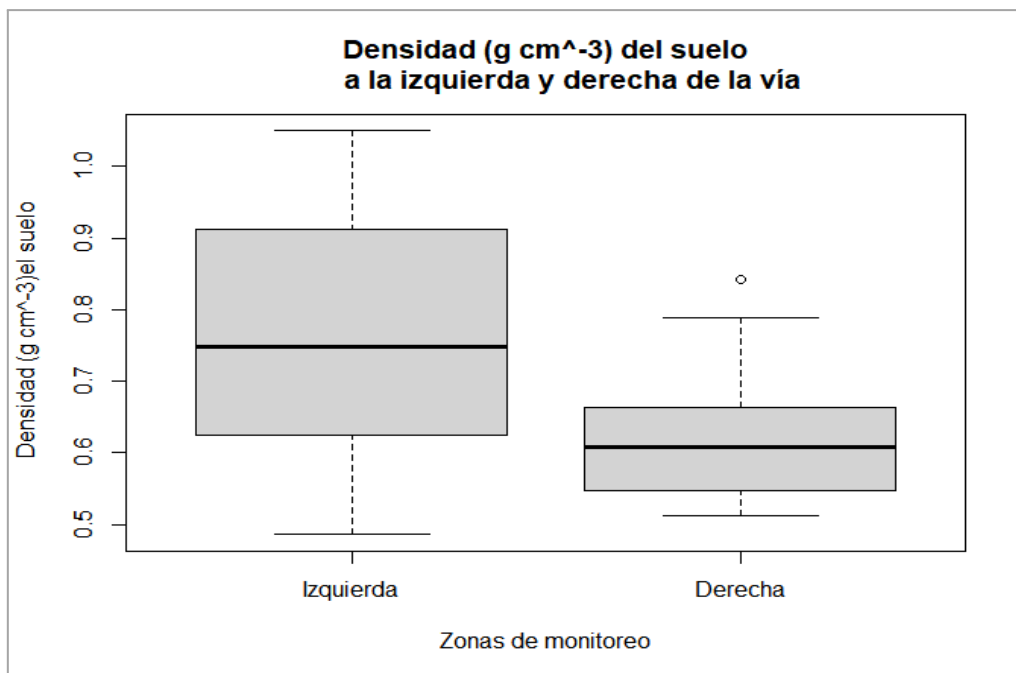


Figura 6. Distribución de la densidad del suelo a la derecha e izquierda de la vía  
Fuente: Elaboración propia

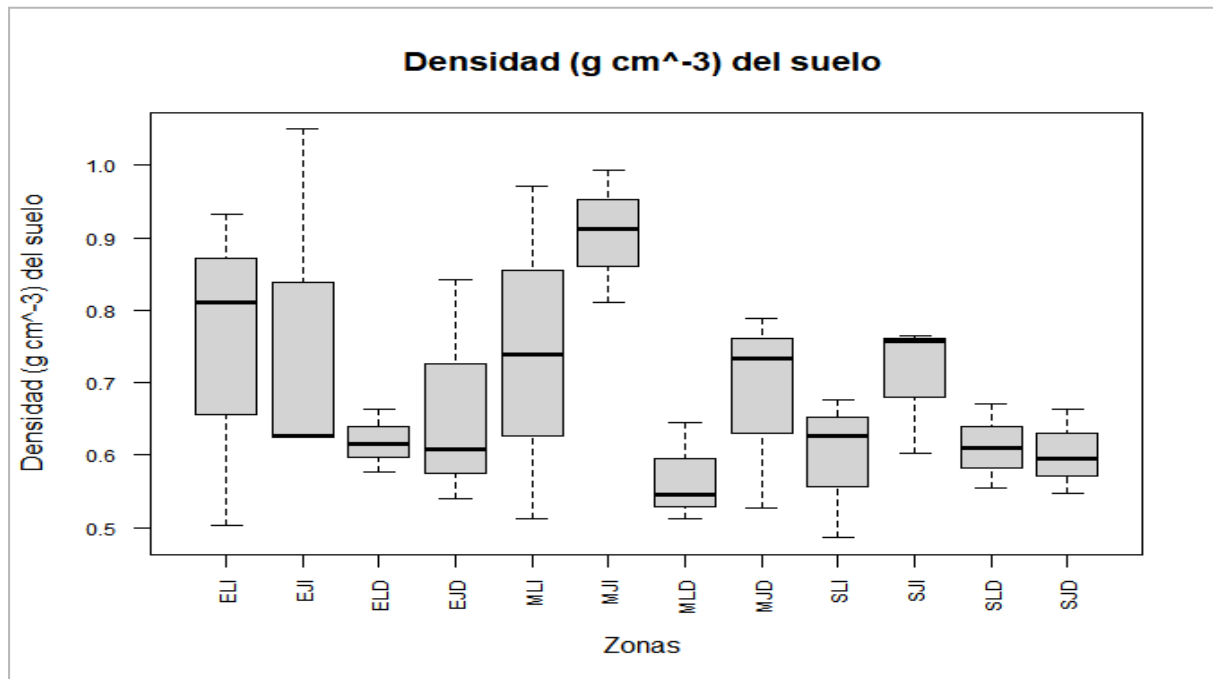


Figura 7. Distribución de la densidad del suelo en todos los puntos de monitoreo. ELI (Entrada lejos de la vía izq), EJI (Entrada junto a la vía izq), ELD (Entrada lejos vía dcha), EJD (Entrada junto a la vía dcha), MLI (Mitad lejos de la vía izq), MJI (Mitad junto a la vía izq), MLD (Mitad lejos de la vía dcha), MJD (Mitad junto a la vía dcha), SLI (Salida lejos de la vía izq), SJI (Salida junto a la vía izq), SLD (Salida lejos de la vía dcha) y SJD (Salida junto a la vía dcha).

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.2. pH del suelo

El rango del pH del suelo obtenido en los sitios de estudio alrededor de la vía Cuenca-Molleturo- Naranjal en el PNC varió entre 4,97 y 7,97 (Tabla 6).

A nivel general, el pH del suelo de los sitios de estudio junto a la vía (5,96; Tabla 6) fue significativamente ( $p < 0.05$ ) menos ácido que el pH del suelo de los sitios de estudio localizados lejos de la vía (5,51; Tabla 7; Figura 8).

A nivel de zona, el pH del suelo de los sitios de estudio junto a la vía fue significativamente ( $p < 0.05$ ) menos ácido que el pH del suelo de los sitios de estudio localizados lejos de la vía, en la zona de la mitad y de la salida (Tabla 8; Figura 9).

Por su parte, el pH del suelo de los sitios de estudio en la entrada del PNC fue significativamente ( $p < 0.05$ ) menos ácido que el pH del suelo de los sitios de estudio localizados en la mitad y salida del PNC (Figura 10).

El pH del suelo de los sitios de estudio localizados a la izquierda de la vía fue significativamente ( $p < 0.05$ ) menos ácido que el pH del suelo de los sitios de estudio localizados a la derecha de la vía (Tabla 9; Figura 11).

Finalmente, a nivel específico, el pH del suelo de los sitios de estudio junto a la vía fue significativamente menos ácido que el pH del suelo de los sitios de estudio localizados lejos de la vía, en la mitad del lado izquierdo y en la salida del lado izquierdo (Figura 12).

Los valores de pH del suelo de los sitios de estudio de la presente investigación son similares a los reportados por otros estudios realizados dentro del PNC donde se registra un rango de pH de 4 - 6 (Quinteros et al., 2013; Jara Torres, 2018).

Estos resultados son iguales a los obtenidos por Johnston & Johnston (2004) en el estudio realizado en el Parque Nacional Kosciuszko en Australia en donde también se analizó el efecto de la carretera que pasa por el parque y se demostró que el suelo natural (10 m del borde de la carretera) fue el más ácido (4.760) y al borde del camino (0-2 del borde) menos ácido (5.360).

Lo mismo se obtuvo en el estudio de Park et al. (2010) en donde se analizó el efecto de la cercanía de las vías en las propiedades químicas del suelo en 3 ciudad en Ohio, en los lugares al borde de la carretera, los niveles de pH fueron de neutros a alcalinos, mientras que el pH en los lugares interiores era ligeramente ácido (pH~6.5).

*En los estudios realizados por Jim (1998a) y Shaw & Reeve (2008) concluyeron que el aumento del pH al borde de la carretera se debe a los materiales calcáreos del cemento y hormigón que son los principales materiales que se utilizan en la pavimentación de las vías. Esto fue corroborado por Park et al. (2010) en donde en su estudio encontró una correlación positiva entre el contenido de Ca del suelo y el aumento de la alcalinidad del suelo al borde de la vía, pues una de las principales materias primas del cemento es la piedra caliza ( $\text{CaCO}_3$ ).*

Tabla 6. pH del suelo alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal del PNC

Sitios de estudio			pH							
			n	min	Q1	mediana	Q3	max	media	desviación estándar
Entrada	Izquierda	Lejos de la vía	3	5.82	5.87	5.95	6.74	6.78	6.19	0.43
		Junto a la vía	3	5.13	5.39	6.14	7.91	7.97	6.45	1.18
	Derecha	Lejos de la vía	3	5.13	5.17	5.47	5.73	5.78	5.46	0.26
		Junto a la vía	3	5.12	5.17	5.68	5.97	6.11	5.62	0.39
Mitad	Izquierda	Lejos de la vía	3	5.18	5.24	5.31	5.38	5.38	5.31	0.07
		Junto a la vía	3	5.35	5.50	5.75	6.55	6.60	5.90	0.53
	Derecha	Lejos de la vía	3	5.10	5.19	5.35	5.39	5.46	5.30	0.13
		Junto a la vía	3	5.25	5.29	5.37	6.79	6.81	5.82	0.74
Salida	Izquierda	Lejos de la vía	3	4.97	5.20	5.30	5.84	5.93	5.44	0.36

	Junto a la vía	3	5.60	5.62	5.71	6.23	6.28	5.86	0.30
Derecha	Lejos de la vía	3	5.25	5.31	5.32	5.54	5.62	5.40	0.15
	Junto a la vía	3	5.33	5.35	5.40	6.18	6.42	5.68	0.46
Todos los sitios Lejos de la vía		18	4.97	5.25	5.38	5.75	6.78	5.51	0.40
Todos los sitios Junto a la vía		18	5.12	5.37	5.68	6.23	7.97	5.89	0.69
Todos los sitios		36	4.97	5.31	5.47	5.93	7.97	5.70	0.59

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Prueba Mann-Whitney del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre el pH del suelo

Variable	n	Medias	w	p-value	Diferencia de medias
Lejos de la vía	18	5.51	1989.5	0.0011**	0.25007
Junto a la vía	18	5.89			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Prueba Mann-Whitney del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre el pH del suelo

Variable	n	Medias	W	p-value	Diferencia de medias
Lejos de la vía	6	5.824	170	0.8124	0.0717474
Entrada Junto a la vía	6	6.035			
Lejos de la vía	6	5.305	263.5	0.001386**	0.273764
Mitad Junto a la vía	6	5.860			
Lejos de la vía	6	5.415	260.5	0.001922**	0.330004
Salida Junto a la vía	6	5.767			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Efecto del lado (izquierdo/derecho) de los sitios de estudio sobre el pH del suelo

Variable	n	Medias	w	p-value	Diferencia de medias
Izquierdo	18	5.856	1881	0.009424**	0.21405
Derecho	18	5.547			

Fuente: Elaboración propia

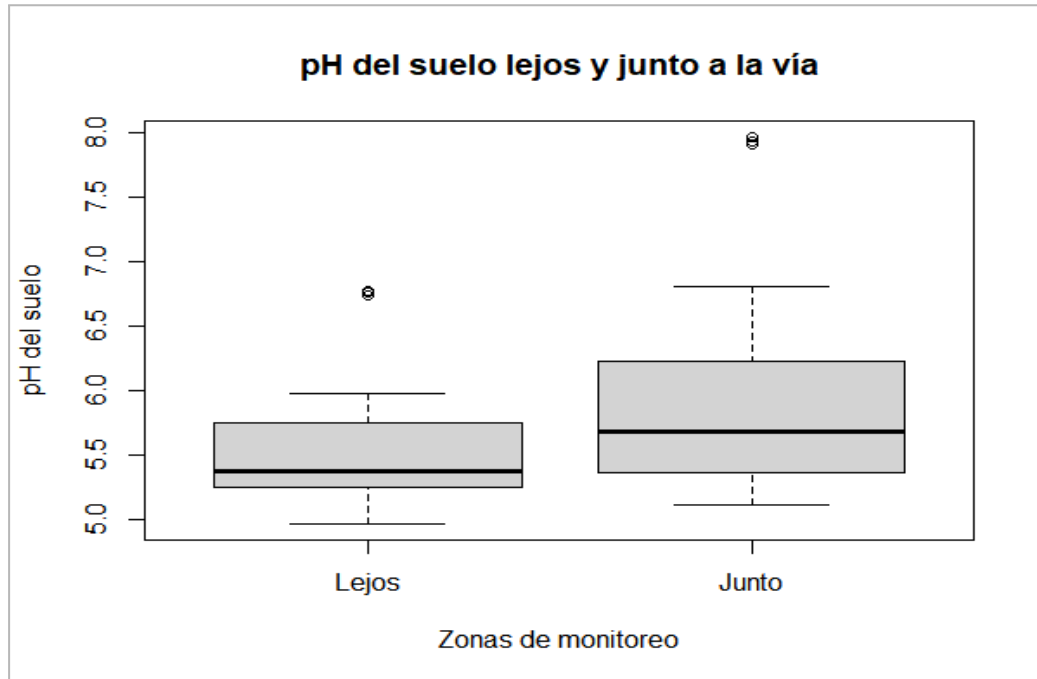


Figura 8. Distribución del pH del suelo según la distancia de la vía. Lejos (30 m lejos de la vía) y Junto (al borde de la vía)  
Fuente: Elaboración propia

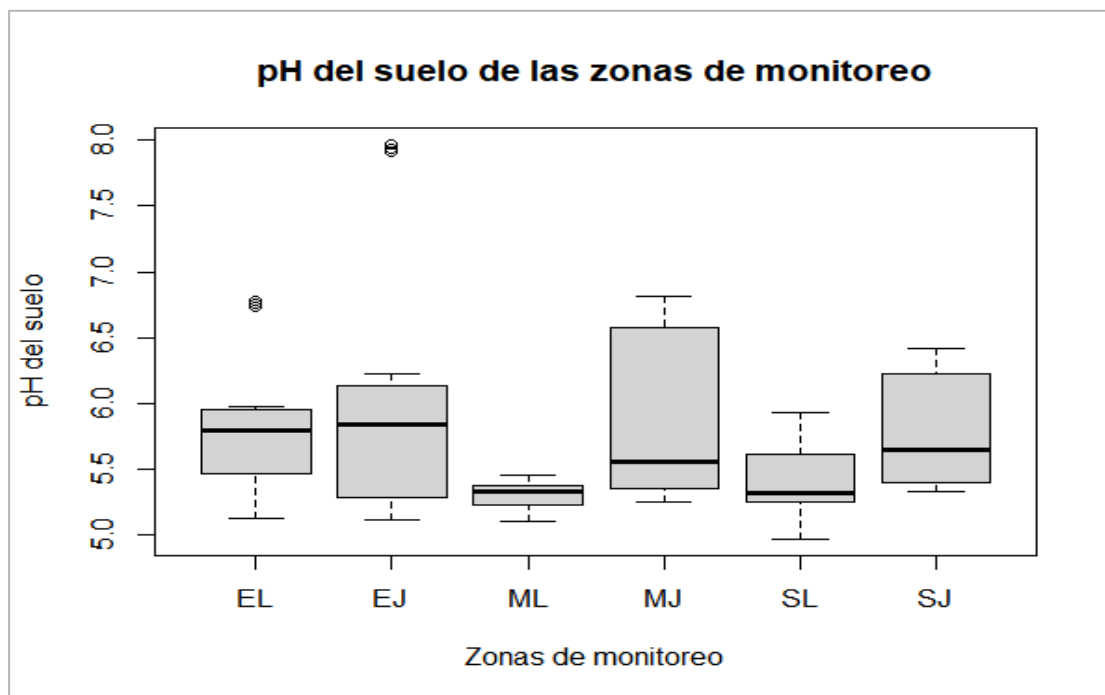


Figura 9. . Distribución del pH del suelo en las zonas de monitoreo. EL (Entrada lejos de la vía), EJ (Entrada junto a la vía), ML (Mitad lejos de la vía), MJ (Mitad junto a la vía), SL (Salida lejos de la vía) y SJ (Salida junto a la vía).  
Fuente: Elaboración propia

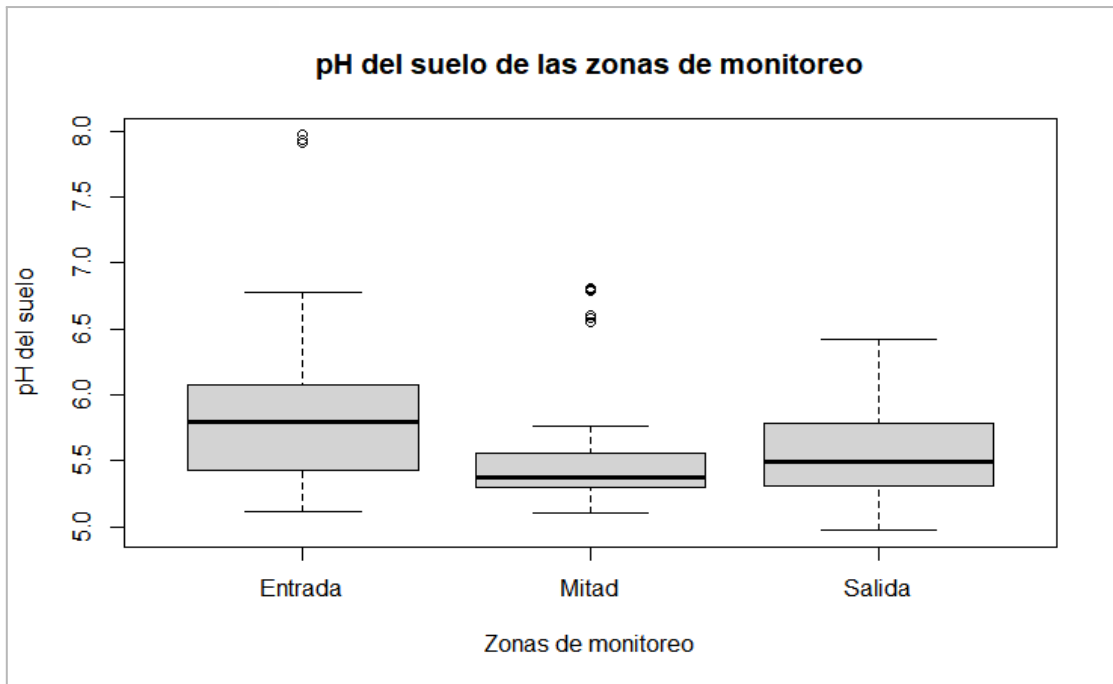


Figura 10. Distribución del pH del suelo en las 3 zonas de monitoreo  
Fuente: Elaboración propia

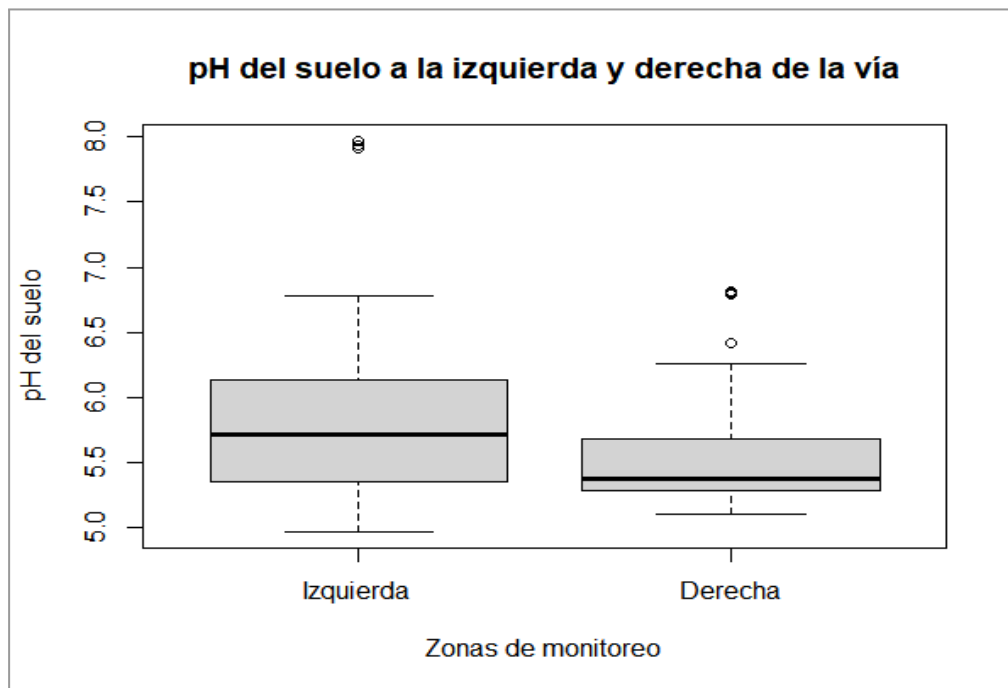


Figura 11. Distribución del pH del suelo a la derecha e izquierda de la vía  
Fuente: Elaboración propia

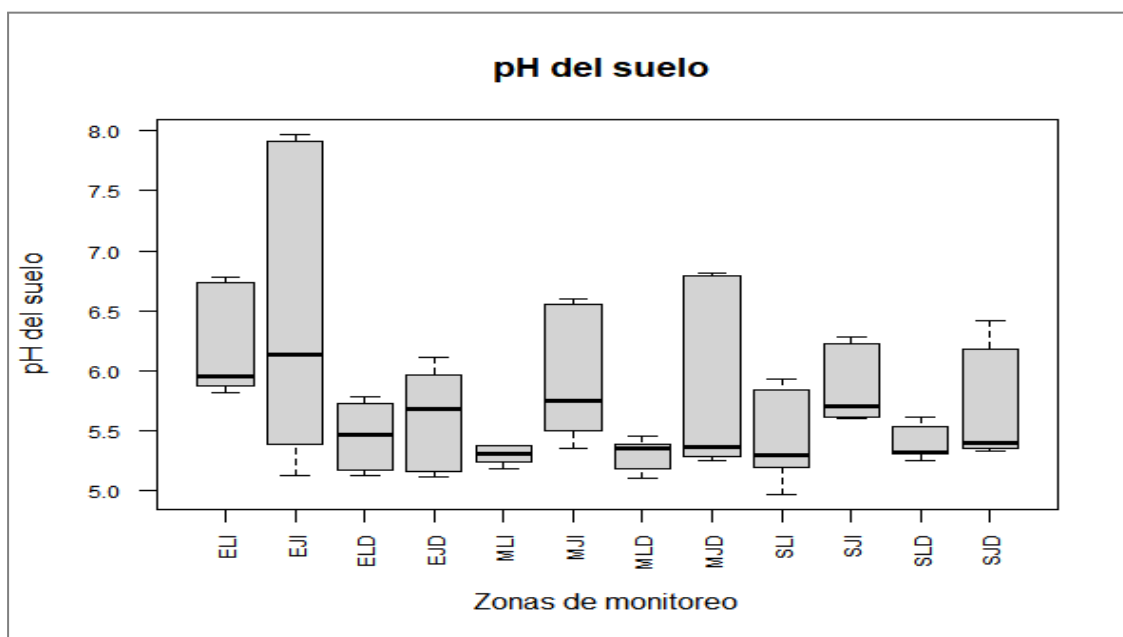


Figura 12. Distribución del pH del suelo en todos los puntos de monitoreo. ELI (Entrada lejos de la vía izq), EJI (Entrada junto a la vía izq), ELD (Entrada lejos vía dcha), EJD (Entrada junto a la vía dcha), MLI (Mitad lejos de la vía izq), MJJ (Mitad junto a la vía izq), MLD (Mitad lejos de la vía dcha), MJD (Mitad junto a la vía dcha), SLI (Salida lejos de la vía izq), SJI (Salida junto a la vía izq), SLD (Salida lejos de la vía dcha) y SJD (Salida junto a la vía dcha).

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.3. Conductividad eléctrica del suelo

El rango de conductividad eléctrica del suelo obtenido en los sitios de estudio alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal en el PNC varió entre 26,4 y 256  $\mu\text{g cm}^{-1}$  (Tabla 10).

A nivel general, la conductividad eléctrica del suelo de los sitios de estudio junto a la vía (96,73  $\mu\text{g cm}^{-1}$ ; Tabla 10) fue significativamente ( $p < 0.05$ ) mayor que los sitios de estudio localizados lejos de la vía (67,37  $\mu\text{g cm}^{-1}$ ; Tabla 11; Figura 13).

A nivel de zona, la conductividad eléctrica del suelo de los sitios de estudio junto a la vía fue significativamente ( $p < 0.05$ ) mayor que la conductividad eléctrica del suelo de los sitios de estudio localizados lejos de la vía, en la zona de la Entrada (Tabla 12; Figura 14).

Por su parte, la conductividad del suelo de los sitios de estudio en la zona de entrada, mitad y salida del PNC no presentaron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) (Figura 15).

La conductividad eléctrica del suelo de los sitios de estudio localizados a la izquierda de la vía no fue significativamente ( $p > 0.05$ ) mayor que la conductividad del suelo de los sitios de estudio localizados a la derecha de la vía (Tabla 13; Figura 16).

Finalmente, a nivel específico, la CE del suelo de los sitios de estudio junto a la vía fue significativamente mayor que el CE del suelo de los sitios de estudio localizados lejos de la vía en la entrada del lado derecho (Figura 17).

Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango registrado por Quinteros et al. (2013) en su estudio realizado en el PNC, el cual va desde los 50 hasta los 706  $\mu\text{g cm}^{-1}$ .

En la Entrada existe una gran disminución de la CE al alejarse de la vía, esto coincide con el estudio de Trammell et al. (2011) en donde analiza la influencia de carreteras interestatales sobre las propiedades físicas y químicas de suelos forestales y obtuvo que la CE disminuye exponencialmente a medida que aumenta la distancia desde la carretera interestatal.

Sin embargo, Johnston & Johnston (2004) obtuvieron lo contrario en su estudio, donde en el área natural (87,766  $\mu\text{g cm}^{-1}$ ) fue mayor al borde de la carretera (49,766  $\mu\text{g cm}^{-1}$ ). Deljouei et al. (2018) también observó que la CE del suelo aumentaba con respecto a la distancia. Luis Sebastián Morejón Estévez - Jennifer Carolina Pacho Guerrero De forma general, el aumento de la CE del suelo junto a la vía se puede deber a la presencia de calcio que proviene del carbonato de calcio, materia prima utilizada para la pavimentación (Park et al., 2010).

El carbonato de calcio se encuentra en la superficie del suelo y debido a la evapotranspiración se deposita en el suelo en grandes cantidades lo que provoca un mayor contenido de sales en el mismo generando así una mayor CE (Soriano, 2018).

Tabla 10. CE del suelo alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal del PNC

Sitios de estudio		CE del suelo ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )								
		<i>n</i>	<i>min</i>	<i>Q1</i>	<i>mediana</i>	<i>Q3</i>	<i>max</i>	<i>media</i>	<i>desviación estándar</i>	
Entrada	Izquierda	Lejos de la vía	3	48	48	56	71	72	58.7	10.41
		Junto a la vía	3	46	47	72	252	256	123	98.64
	Derecha	Lejos de la vía	3	32	33	42	48	50	41	7.42
		Junto a la vía	3	88	94	107	108	113	102.59	9.54
Mitad	Izquierda	Lejos de la vía	3	41	42	48	128	134	73.62	43.41
		Junto a la vía	3	32	34	37	82	124	58.89	36.98
	Derecha	Lejos de la vía	3	26	27	60	88	90	58.68	27.04
		Junto a la vía	3	57	61	61	166	188	99.46	59.18
Salida	Izquierda	Lejos de la vía	3	31	32	42	119	146	68.79	49.81
		Junto a la vía	3	42	43	67	198	232	108.86	79.85
	Derecha	Lejos de la vía	3	46	47	122	128	150	103	43.30
		Junto a la vía	3	39	43	72	119	174	87.41	46.49



Todos los sitios Lejos de la vía	18	26	41.53	48.45	88.30	150	67.37	37.94
Todos los sitios Junto a la vía	18	32	46.85	72	112.90	256	96.73	62.57
Todos los sitios	36	26	43.05	60.70	112.00	256	82.05	53.57

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Prueba Mann-Whitney del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre la CE del suelo

Variable	n	Medias	w	p-value	Diferencia de medias
Lejos de la vía	18	67.37	1880.5	0.009514**	18.5
Junto a la vía	18	96.73			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Prueba Mann-Whitney del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre la CE del suelo

Variable	n	Medias	W	p-value	Diferencia de medias
Lejos de la vía	6	50.07	282.5	0.000146***	45.80
Entrada Junto a la vía	6	112.87			
Lejos de la vía	6	66.15	178	0.6238	7.6775
Mitad Junto a la vía	6	60.55			
Lejos de la vía	6	85.89	184	0.501	7.8
Salida Junto a la vía	6	98.13			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Efecto del lado (izquierdo/derecho) de los sitios de estudio sobre la CE del suelo

Variable	n	Medias	w	p-value	Diferencia de medias
Izquierdo	18	82	1269	0.2468	-7.2264
Derecho	18	82.10			

Fuente: Elaboración propia

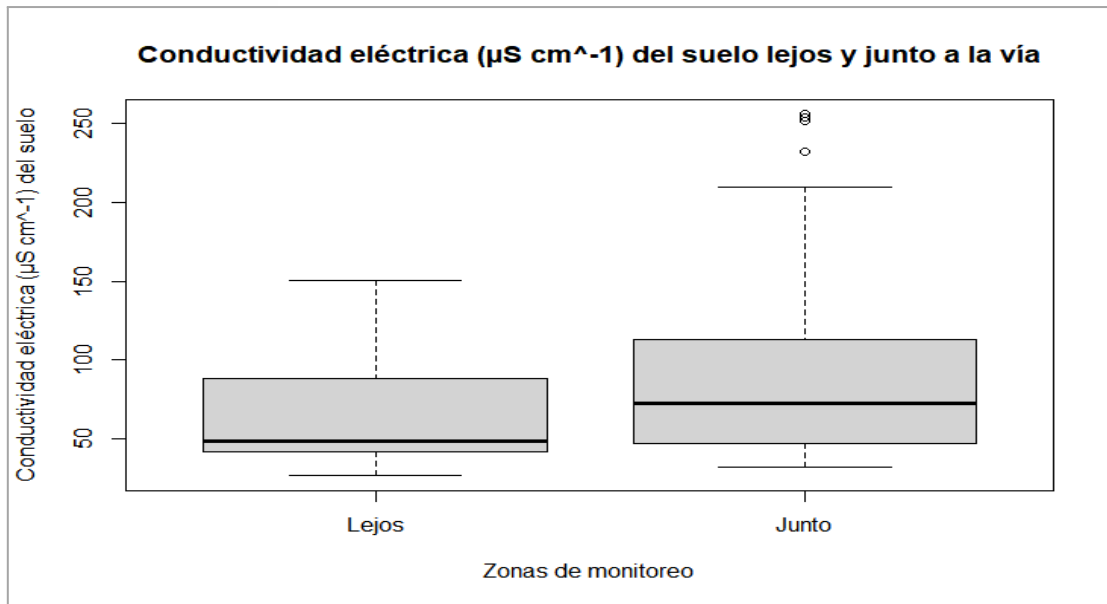


Figura 13. Distribución de la conductividad del suelo según la distancia de la vía. Lejos (30 m lejos de la vía) y Junto (al borde de la vía)  
Fuente: Elaboración propia

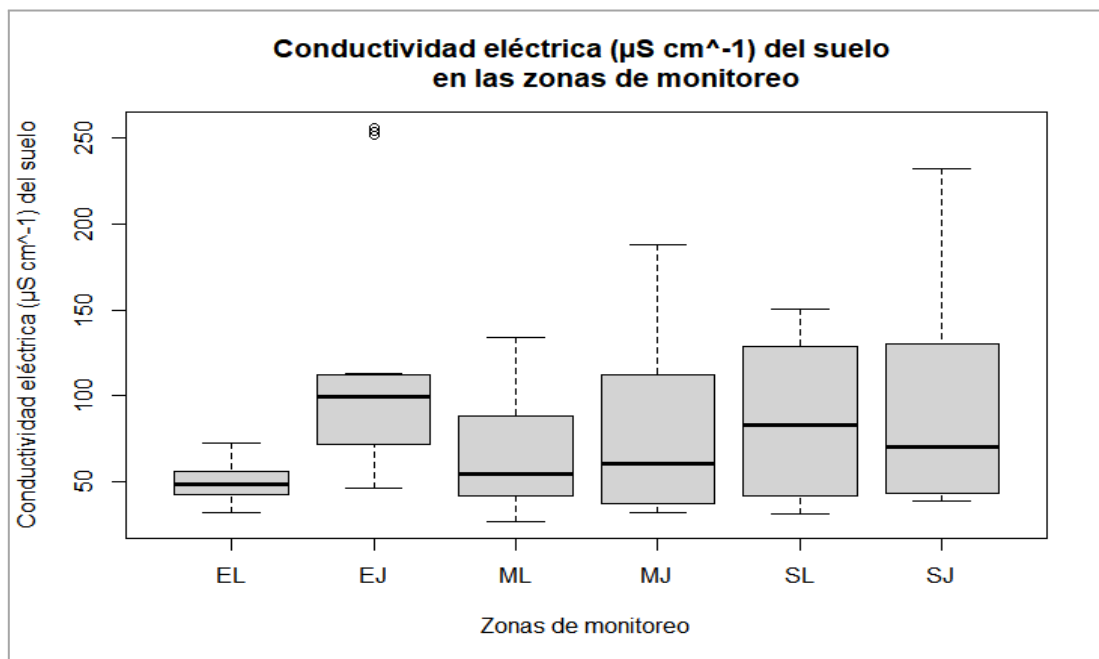


Figura 14. Distribución de la conductividad eléctrica del suelo en las zonas de monitoreo. EL (Entrada lejos de la vía), EJ (Entrada junto a la vía), ML (Mitad lejos de la vía), MJ (Mitad junto a la vía), SL (Salida lejos de la vía) y SJ (Salida junto a la vía).  
Fuente: Elaboración propia

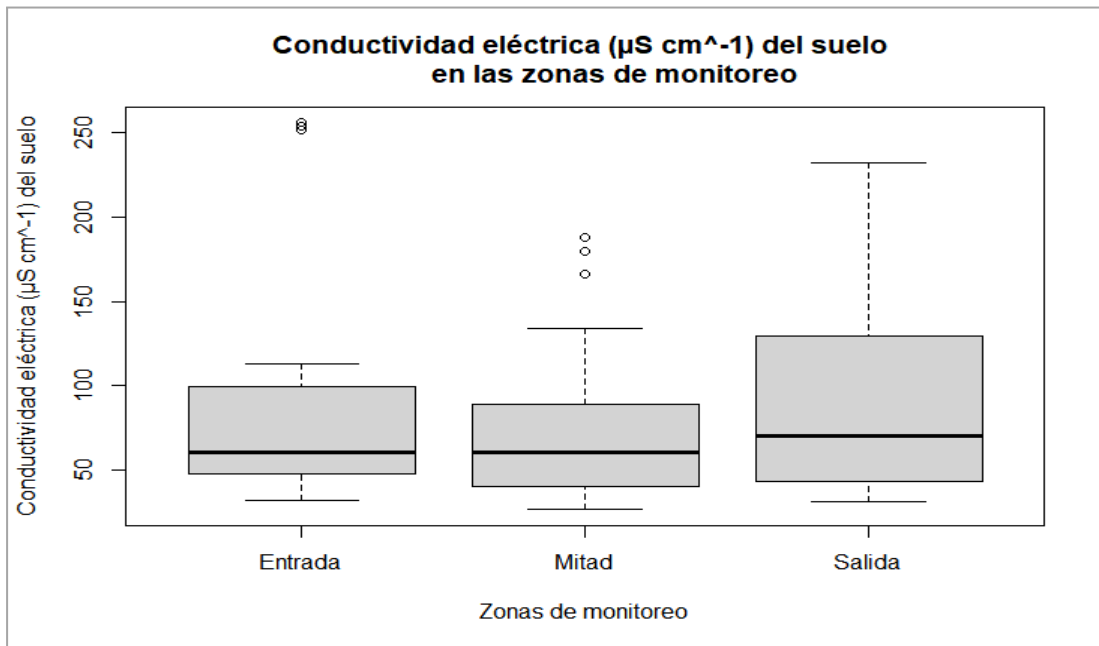


Figura 15. Distribución de la conductividad eléctrica del suelo en las 3 zonas de monitoreo  
Fuente: Elaboración propio

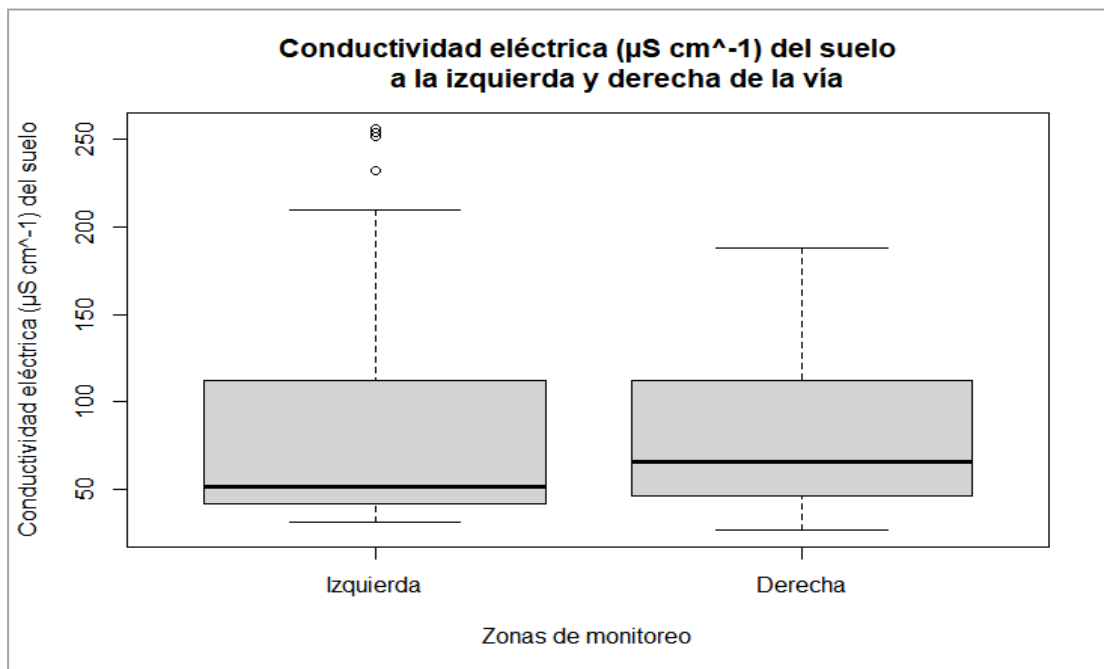


Figura 16. Distribución de la conductividad eléctrica del suelo a la derecha e izquierda de la vía  
Fuente: Elaboración propia

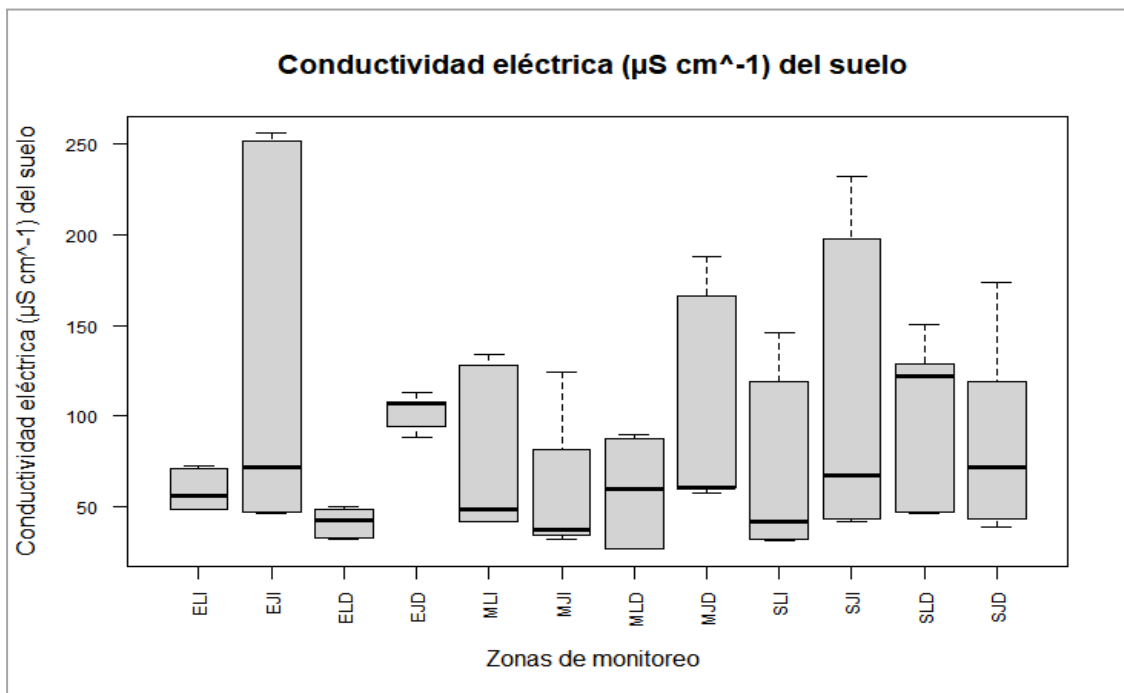


Figura 17. Distribución de la conductividad eléctrica del suelo en todos los puntos de monitoreo. ELI (Entrada lejos de la vía izq), EJI (Entrada junto a la vía izq), ELD (Entrada lejos vía dcha), EJD (Entrada junto a la vía dcha), MLI (Mitad lejos de la vía izq), MJI (Mitad junto a la vía izq), MLD (Mitad lejos de la vía dcha), MJD (Mitad junto a la vía dcha), SLI (Salida lejos de la vía izq), SJI (Salida junto a la vía izq), SLD (Salida lejos de la vía dcha) y SJD (Salida junto a la vía dcha).  
Fuente: Elaboración propia

#### 5.1.4. Potencial redox del suelo

El rango de potencial redox del suelo obtenido en los sitios de estudio alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal en el PNC varió entre 174 y 391 mV (Tabla 14).

A nivel general, el potencial redox del suelo de los sitios de estudio junto a la vía (303,59 mV) fue significativamente ( $p < 0.05$ ) menor que los sitios de estudio localizados lejos de la vía (323,46 mV; Tabla 15; Figura 18).

A nivel de zona, en la entrada el potencial redox del suelo de los sitios de estudio junto a la vía fue significativamente ( $p > 0.05$ ) menor que el potencial redox del suelo de los sitios de estudio localizados lejos de la vía. (Tabla 16; Figura 19).

Por su parte, el potencial redox del suelo de los sitios de estudio en la zona de entrada, mitad y salida del PNC no presentaron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) (Figura 20).

Al analizar el potencial redox del suelo de los sitios de estudio localizados a la izquierda de la vía no fue significativamente ( $p > 0.05$ ) diferente que el potencial redox del suelo de los sitios de estudio localizados a la derecha de la vía (Tabla 17; Figura 21).

Finalmente, a nivel específico, el Eh del suelo de los sitios de estudio junto a la vía fue significativamente menor que el Eh del suelo de los sitios de estudio localizados lejos de la vía, en la entrada en ambos lados, en la mitad del lado derecho y en la salida del lado izquierdo (Figura 22).

Los valores obtenidos de Eh se encuentran dentro del rango que comúnmente se puede hallar en suelos que están entre los -300 mV y +900 mV (Husson, 2013). Además, los suelos del PNC se catalogarían como suelos moderadamente reducidos (+100 mV a +400 mV), según la clasificación propuesta por Kaurichev & Shishova (1967).

El Eh del suelo es menor junto a la vía y aumenta en los sitios alejados de la vía, esto podría estar relacionado con el pH pues están correlacionados negativamente (García Trenado et al., 1976; Husson, 2013). A pH ácido y valores positivos de Eh en un suelo predominan procesos de oxidación (Gómez et al., 2005) y tener un ambiente de oxidación indica que en el suelo existe una buena aireación (Pidello et al., 1995).

Tabla 14. Eh del suelo alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal del PNC

Sitios de estudio		Eh del suelo (mV)								
		n	min	Q1	mediana	Q3	max	media	desviación estándar	
Entrada	Izquierda	Lejos de la vía	3	260	316	325	356	368	325.9	35.82
		Junto a la vía	3	223	227	288	297	318	274	38.52
	Derecha	Lejos de la vía	3	308	338	343	367	372	347	20.71
		Junto a la vía	3	174	269	313	322	339	289.22	51.33
Mitad	Izquierda	Lejos de la vía	3	254	288	314	372	380	321.56	44.25
		Junto a la vía	3	288	295	373	380	386	349.44	43.36
	Derecha	Lejos de la vía	3	247	290	315	335	346	309.78	32.10
		Junto a la vía	3	260	267	288	292	338	289.56	26.60
Salida	Izquierda	Lejos de la vía	3	312	337	354	368	391	352.78	25.51
		Junto a la vía	3	262	267	299	340	351	302.89	35.18
	Derecha	Lejos de la vía	3	260	264	269	319	323	283.78	28.11
		Junto a la vía	3	260	267	324	361	365	316.44	43.80
Todos los sitios Lejos de la vía		1	8	247	294.50	323.50	353.25	391	323.46	38.31
Todos los sitios Junto a la vía		1	8	174	267.50	296	336.75	386	303.59	45.73
Todos los sitios		3	6	174	283.50	316.50	345.25	391	313.53	43.16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Prueba t-Student del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre el Eh del suelo

Variable	n	Medias	t	GL	p-value	Diferencia de medias
Lejos de la vía	18	323.46	2.4477	102.85	0.01607*	19.87
Junto a la vía	18	303.59				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Efecto de la zona de los sitios de estudio (entrada, mitad y salida) sobre el Eh del suelo

Sitio de estudio		n	Medias	Estadístico	p-value	Diferencia de medias
Entrada	Lejos de la vía	6	336.44	t = 4.3028	0.00017***	54.83
	Junto a la vía	6	281.61			
Mitad	Lejos de la vía	6	315.67	W = 170	0.812	3.83
	Junto a la vía	6	319.5			
Salida	Lejos de la vía	6	318.28	W = 143	0.558	8.61
	Junto a la vía	6	309.67			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Prueba Mann-Whitney del efecto del lado (izquierdo/derecho) de los sitios de estudio sobre el Eh del suelo

Variable	n	Medias	w	p-value	Diferencia de medias
Izquierdo	54	321.09	1757.5	0.06613	15.13
Derecho	54	305.96			

Fuente: Elaboración propia

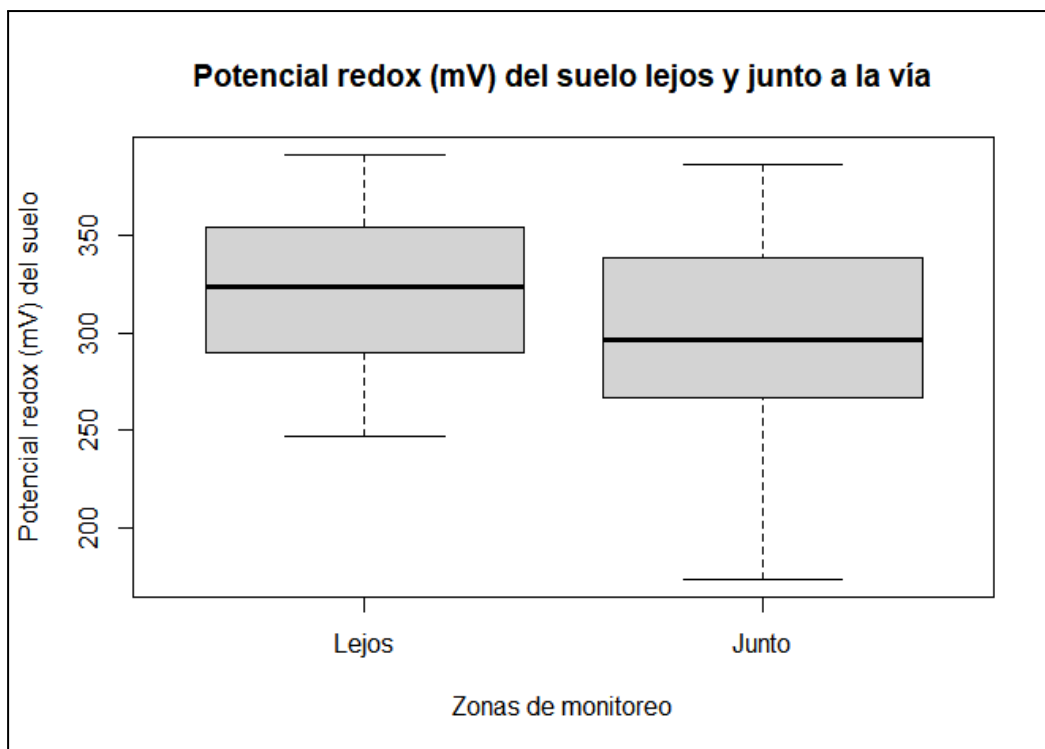


Figura 18. Distribución del potencial redox del suelo según la distancia de la vía. Lejos (30 m lejos de la vía)

Fuente: Elaboración propia

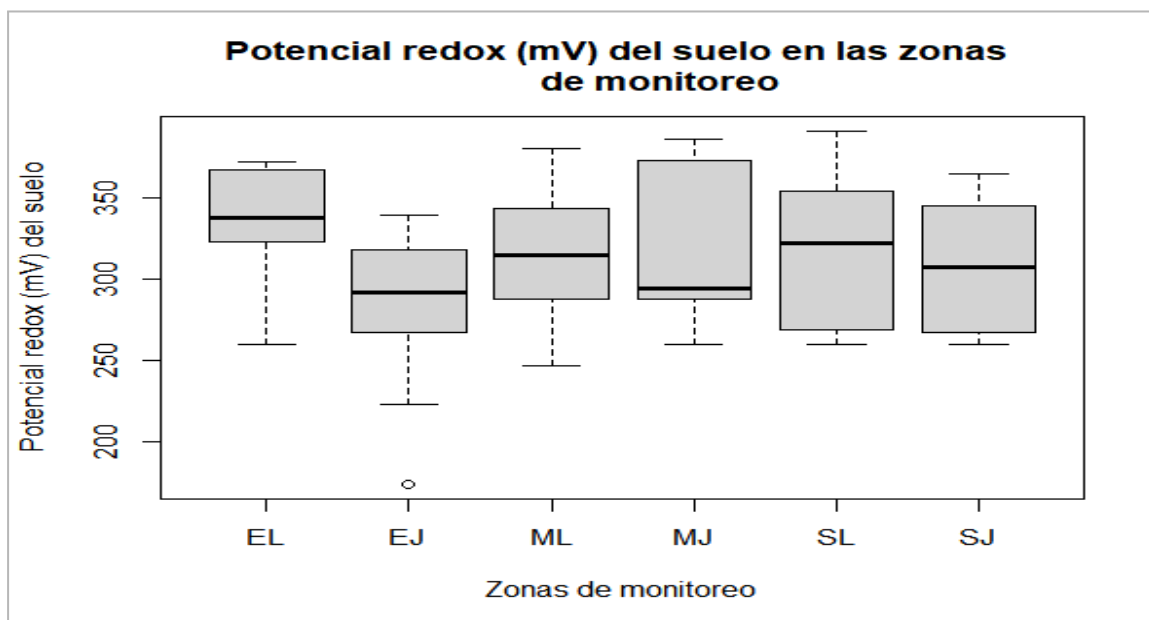


Figura 19. Distribución del potencial redox del suelo en los puntos de monitoreo. EL (Entrada lejos de la vía), EJ (Entrada junto a la vía), ML (Mitad lejos de la vía), MJ (Mitad junto a la vía), SL (Salida lejos de la vía) y SJ (Salida junto a la vía).

Fuente: Elaboración propia

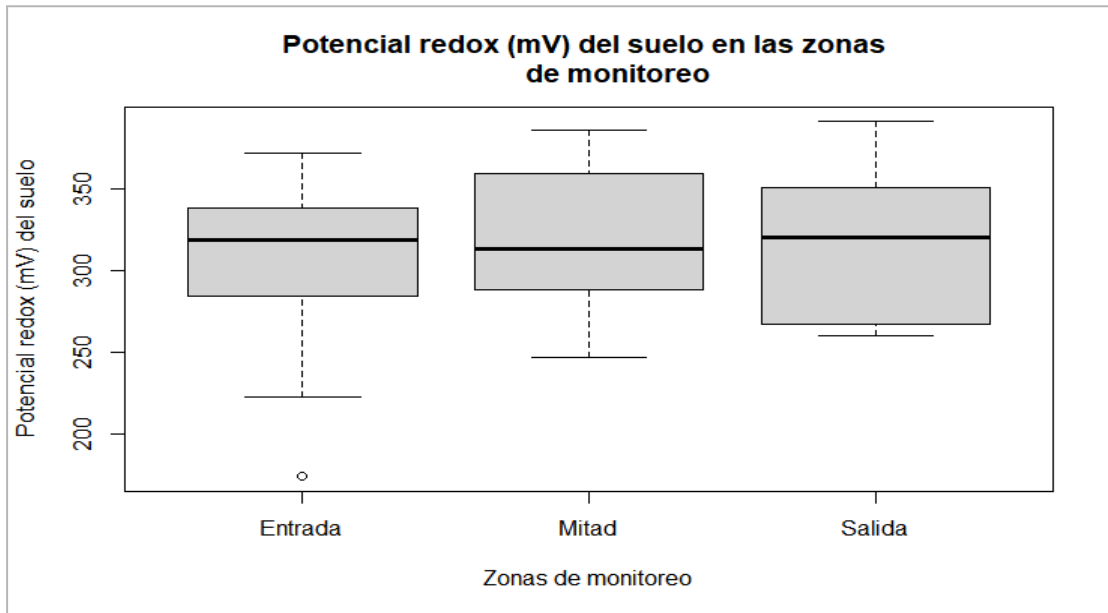


Figura 20. Distribución del potencial redox del suelo en las zonas de monitoreo.

Fuente: Elaboración propio

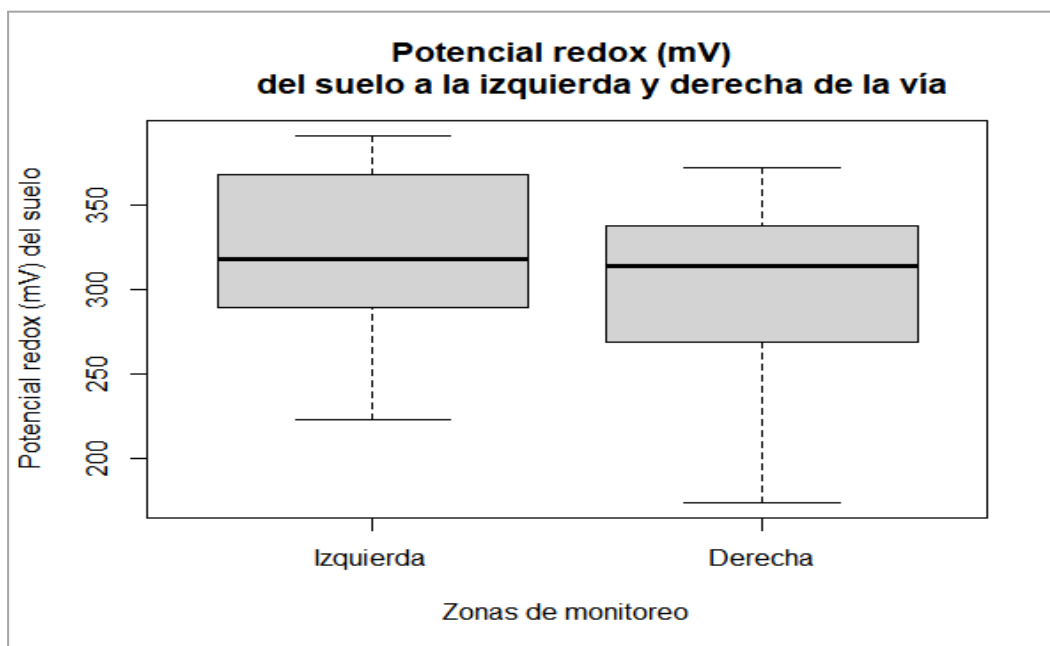


Figura 21. Distribución del potencial redox del suelo a la izq y dcha.

Fuente: Elaboración propia



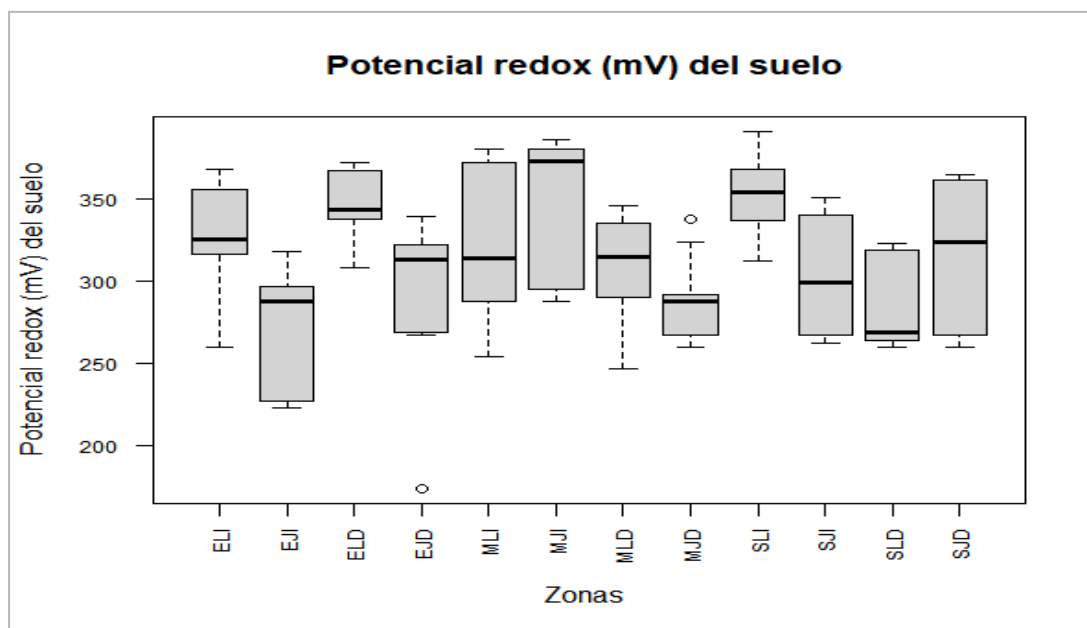


Figura 22. Distribución específica de potencial redox del suelo ELI (Entrada lejos de la vía izq), EJI (Entrada junto a la vía izq), ELD (Entrada lejos vía dcha), EJD (Entrada junto a la vía dcha), MLI (Mitad lejos de la vía izq), MJI (Mitad junto a la vía izq), MLD (Mitad lejos de la vía dcha), MJD (Mitad junto a la vía dcha), SLI (Salida lejos de la vía izq), SJI (Salida junto a la vía izq), SLD (Salida lejos de la vía dcha) y SJD (Salida junto a la vía dcha).

Fuente: Elaboración propia

## 5.2. Concentración de Pb en el suelo

El rango de concentración de Pb en el suelo en los sitios de estudio alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal en el PNC varió entre 3.33 y 58.72 mg kg<sup>-1</sup> (Tabla 18).

A nivel general, la concentración de Pb en el suelo de los sitios de estudio junto a la vía (34.36 mg kg<sup>-1</sup>) no fue significativamente ( $p > 0.05$ ) diferente que la concentración de Pb en el suelo de los sitios de estudio localizados lejos de la vía (28.84 mg kg<sup>-1</sup>; Tabla 18; Tabla 19; Figura 23).

A nivel de zona, la concentración de Pb en el suelo de los sitios de estudio junto a la vía tampoco mostró diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) de los sitios de estudio localizados lejos de la vía, en la zona de la entrada, mitad y de la salida (Tabla 20, Figura 24).

Por su parte, la concentración de plomo en el suelo de los sitios de estudio en la entrada, mitad y salida del PNC no presentaron una diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) mayor que la concentración de plomo en el suelo de los sitios de estudio localizados en la mitad y salida del PNC (Figura 25).

A nivel específico, la concentración de Pb en el suelo de los sitios de estudio localizados a la izquierda de la vía no varió significativamente ( $p>0.05$ ) igual que la concentración de Pb en el suelo de los sitios de estudio localizados a la derecha de la vía (Tabla 21; Figura 26).

Finalmente, el Pb en el suelo de los sitios de estudio junto a la vía fue significativamente menor que el Pb en el suelo de los sitios de estudio localizados lejos de la vía en la entrada del lado izquierdo, en la mitad del lado derecho y en la salida del lado izquierdo (Figura 27).

La concentración promedio de Pb obtenida tanto cerca de la vía y alejada de la vía sobrepasa el límite permisible estipulado en los Criterios de Calidad de Suelo del Anexo 2 del Libro VI del TULSMA el cual es de  $19 \text{ mg kg}^{-1}$ .

La concentración se vio disminuida a medida que aumentó la distancia respecto a la vía en la mitad y salida, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en otros estudios donde muestran que la concentración de Pb decrece a medida que incrementa la distancia respecto al borde de la vía (Werkenthin et al., 2014; Zhang et al., 2015; Nikolaeva et al., 2021; Wang et al., 2022), mientras que en la entrada la concentración de Pb alejada de la vía fue incluso ligeramente mayor que junto a la vía.

A nivel general no se evidenció influencia de la vía sobre la concentración de Pb en el suelo del PNC, aunque esto pudo deberse a otros factores como a que la cantidad de muestras, los puntos de muestreo y la distancia respecto a la vía no fue la suficiente.

Debido a que, si bien hay evidencia que la concentración de Pb tiende a decrecer a partir de  $<10 \text{ m}$ , hay estudios que muestran contaminación por Pb relacionada con el tráfico vehicular pasado los  $80 \text{ m}$  (Viard et al., 2004; Werkenthin et al., 2014; Zhang et al., 2015; Wang et al., 2022).

Tabla 18. Concentración de Pb (mg/kg) en el suelo alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal del PNC

Sitios de estudio		Pb ( $\text{mg kg}^{-1}$ )								
		<i>n</i>	<i>min</i>	<i>Q1</i>	<i>mediana</i>	<i>Q3</i>	<i>max</i>	<i>media</i>	<i>desviación estándar</i>	
Entrada	Izquierda	Lejos de la vía	2	11.93	14.78	17.64	20.50	23.36	17.64	08.08
	Izquierda	Junto a la vía	2	29.16	31.24	33.32	35.40	37.48	33.32	5.88
		Derecha	Lejos de la vía	2	23.33	32.17	41.02	49.87	58.72	41.02
	Derecha	Junto a la vía	2	3.33	13.47	23.61	33.75	43.89	23.61	28.68
Mitad	Izquierda	Lejos de la vía	2	24.56	27.83	31.09	34.36	37.63	31.09	9.24
		Junto a la vía	2	30.03	31.16	32.29	33.42	34.55	32.29	3.20
	Derecha	Lejos de la vía	2	15.68	20.52	25.37	30.21	35.05	25.37	13.70

	Junto a la vía	2	31.69	36.99	42.30	47.61	52.91	42.30	15.01
Izquierda	Lejos de la vía	2	18.16	22.33	26.50	30.67	34.84	26.50	11.80
	Junto a la vía	2	34.02	36.01	38.00	39.98	41.97	38.00	5.62
Derecha	Lejos de la vía	2	24.91	28.15	31.40	34.64	37.89	31.40	9.18
	Junto a la vía	2	28.76	32.70	36.64	40.58	44.51	36.64	11.14
<i>Todos los sitios lejos de la vía</i>		12	11.93	22.03	24.73	35.70	58.72	28.84	12.77
<i>Todos los sitios Junto a la vía</i>		12	3.33	29.81	34.29	42.45	52.91	34.36	12.26
<i>Todos los sitios</i>		24	3.33	24.26	32.85	37.70	58.72	31.60	12.56

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 19. Prueba t-Student del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre el Pb del suelo

Variable	n	Medias	t	GL	p-value	Diferencia de medias
Lejos de la vía	12	28.84	1.0802	21.963	0.2918	2.52
Junto a la vía	12	34.36				

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 20. Prueba t-Student del efecto de la zona de los sitios de estudio (entrada, mitad y salida) sobre el Pb del suelo

Sitio de estudio	n	Medias	t	p-value	Diferencia de medias	
Entrada	Lejos de la vía	4	29.34	0.06441	0.9508	0.87
	Junto a la vía	4	28.47			
Mitad	Lejos de la vía	4	28.23	1.2399	0.261	9.07
	Junto a la vía	4	37.3			
Salida	Lejos de la vía	4	28.95	1.4402	0.2022	8.37
	Junto a la vía	4	37.32			

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 21. Prueba t-Student del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre el Pb del suelo

Variable	n	Medias	t	GL	p-value	Diferencia de medias
Izquierda	12	29.81	0.69039	17.363	0.4991	3.58
Derecha	12	33.39				

Fuente: *Elaboración propia*

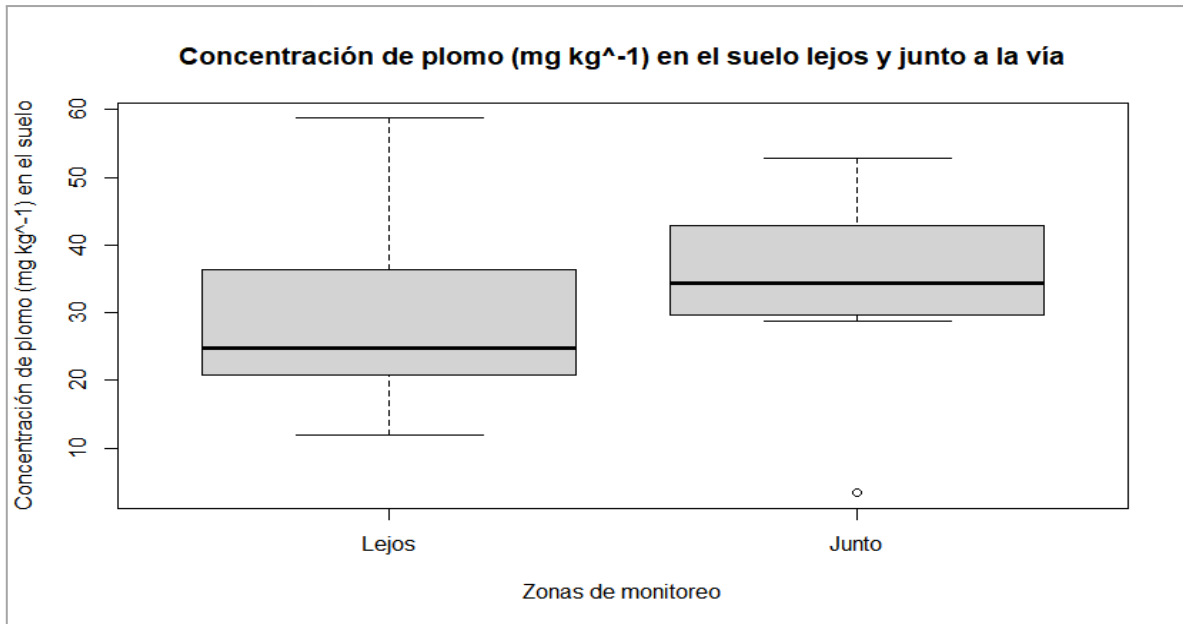


Figura 23. Distribución del plomo en el suelo según la distancia de la vía. Lejos (30 m lejos de la vía) y Junto (al borde de la vía).

Fuente: Elaboración propia

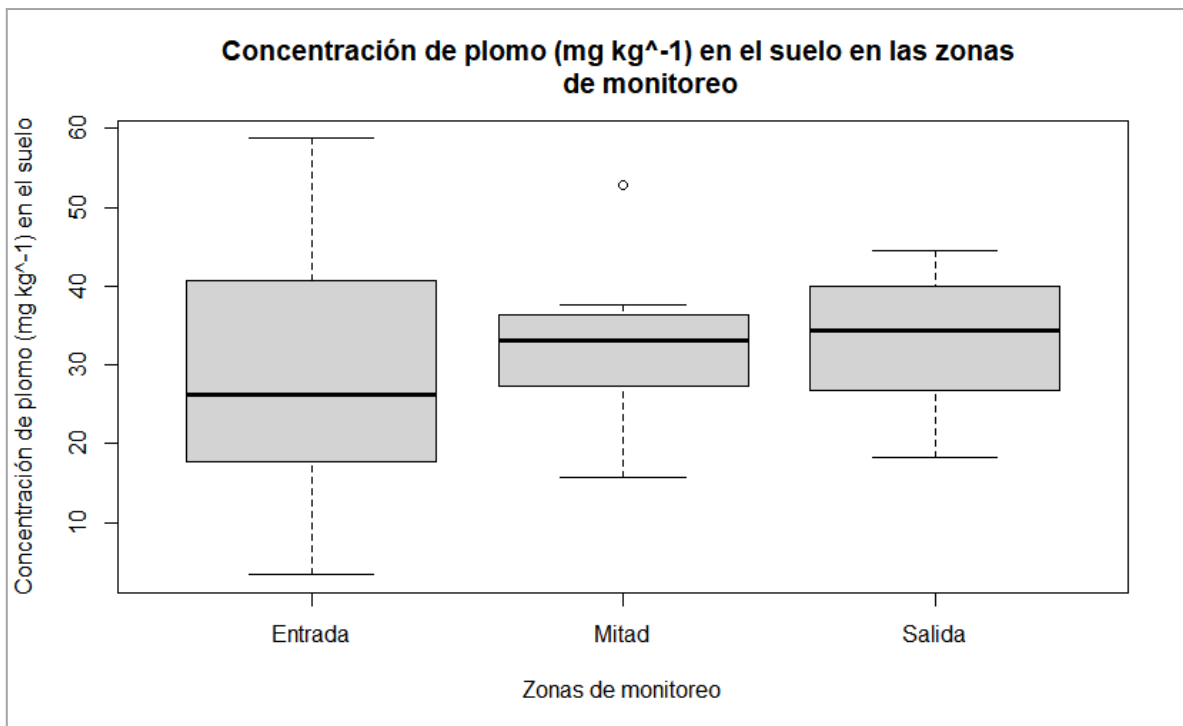


Figura 24. Distribución del plomo en el suelo en los puntos de monitoreo. EL (Entrada lejos de la vía), EJ (Entrada junto a la vía), ML (Mitad lejos de la vía), MJ (Mitad junto a la vía), SL (Salida lejos de la vía) y SJ (Salida junto a la vía).

Fuente: Elaboración propia

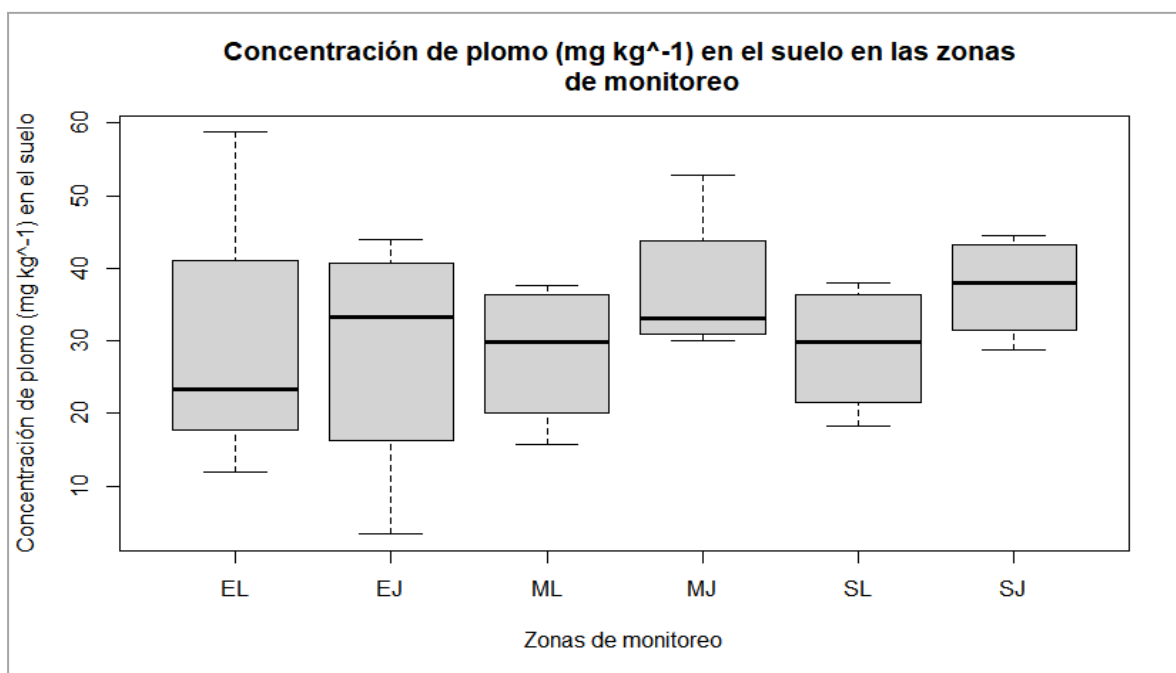


Figura 25. Distribución del plomo en el suelo en las zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia

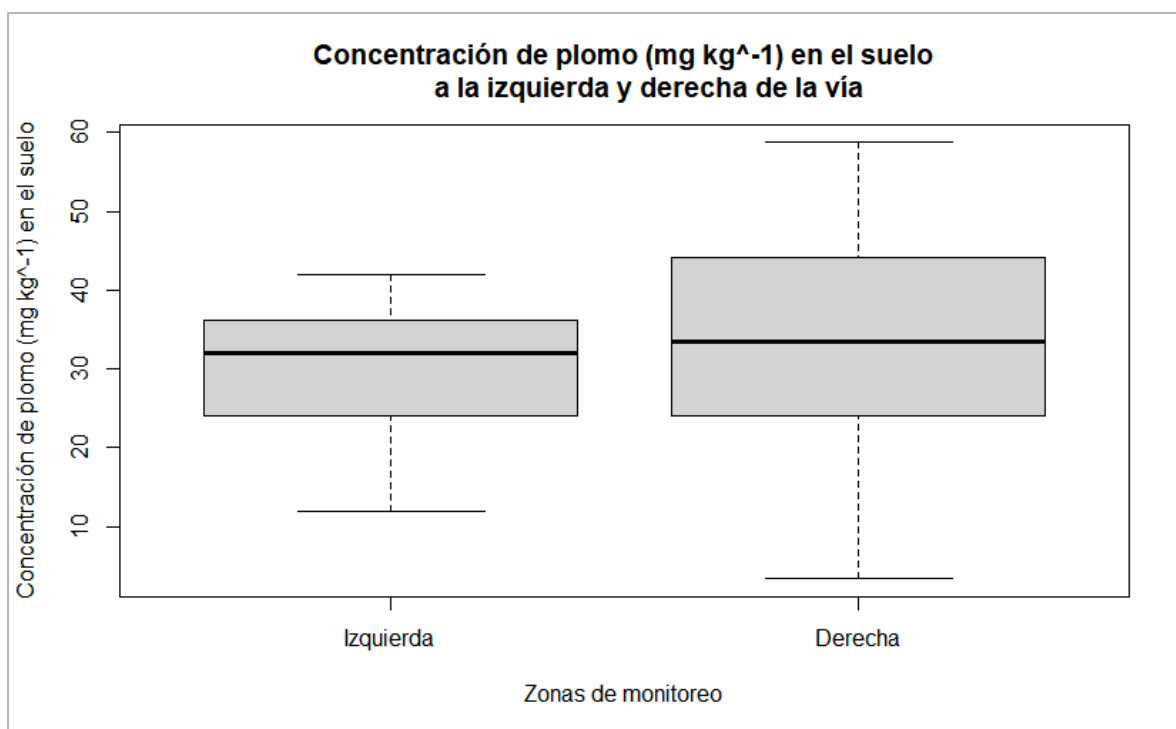


Figura 26. Distribución del plomo en el suelo a la derecha e izquierda de la vía

Fuente: Elaboración propia

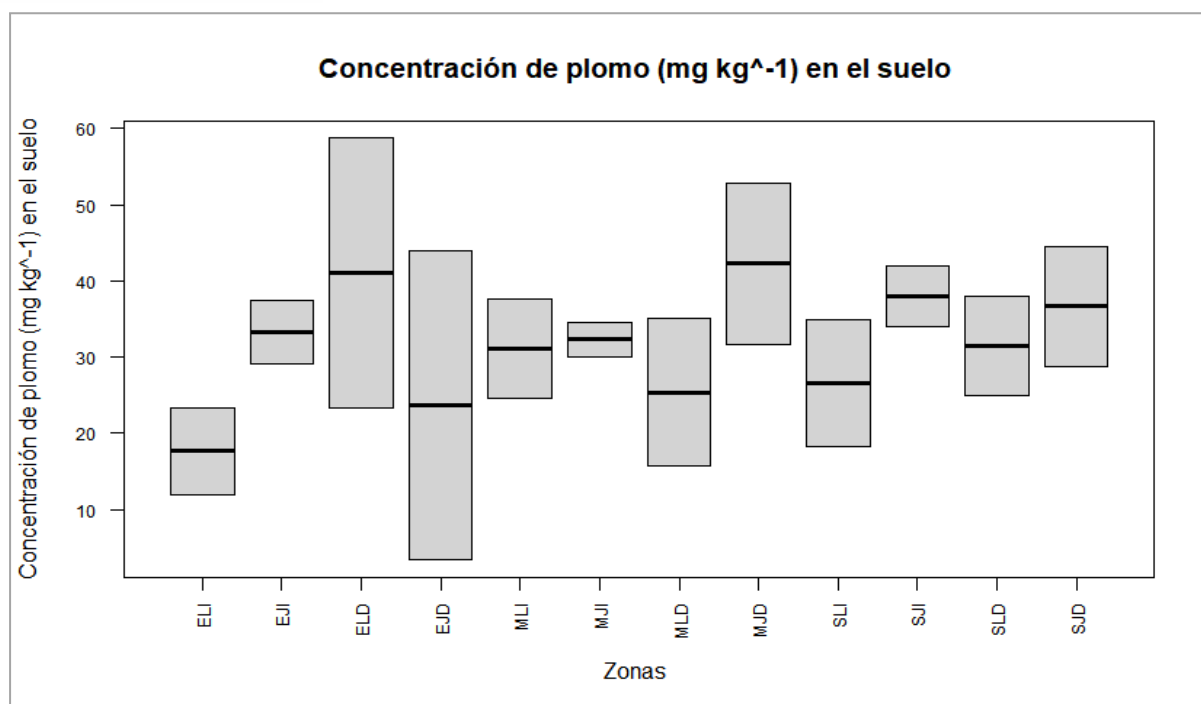


Figura 27. Distribución del plomo en el suelo en todos los puntos de monitoreo. ELI (Entrada lejos de la vía izq), EJI (Entrada junto a la vía izq), ELD (Entrada lejos vía dcha), EJD (Entrada junto a la vía dcha), MLI (Mitad lejos de la vía izq), MJI (Mitad junto a la vía izq), MLD (Mitad lejos de la vía dcha), MJD (Mitad junto a la vía dcha), SLI (Salida lejos de la vía izq), SJI (Salida junto a la vía izq), SLD (Salida lejos de la vía dcha) y SJD (Salida junto a la vía dcha).

Fuente: Elaboración propia

### 5.3. Respiración microbiana del suelo

El rango de la respiración microbiana del suelo en los sitios de estudio alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal en el PNC varió entre 0.15 y 1.51 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. (Tabla 22).

A nivel general, la respiración microbiana del suelo de los sitios de estudio junto a la vía (0.65 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) no fue significativamente ( $p > 0.05$ ) diferente que la respiración microbiana del suelo de los sitios de estudio localizados lejos de la vía (0.50 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>; Tabla 22; Tabla 23; Figura 28; Figura 29).

A nivel de zona, en la entrada la respiración microbiana del suelo de los sitios de estudio junto a la vía fue significativamente ( $p > 0.05$ ) mayor que la respiración microbiana del suelo de los sitios de estudio localizados lejos de la vía. (Tabla 24; Figura 30; Figura 31).

Por su parte, la respiración microbiana del suelo de los sitios de estudio en la entrada, mitad y salida del PNC no presentaron una diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) (Figura 32).

Al analizar la respiración microbiana del suelo de los sitios de estudio localizados a la izquierda de la vía no varió significativamente ( $p>0.05$ ) a la respiración microbiana del suelo de los sitios de estudio localizados a la derecha de la vía (Tabla 25; Figura 33).

Finalmente, a nivel específico, la respiración microbiana del suelo de los sitios de estudio junto a la vía fue significativamente menor que la respiración microbiana del suelo de los sitios de estudio localizados lejos de la vía en la mitad del lado izquierdo y en la salida del lado derecho, mientras que los sitios junto a la vía del lado izquierdo de la entrada y de la salida la respiración microbiana fue mayor. (Figura 34).

El rango promedio de emisión de  $\text{CO}_2$  del suelo estuvo comprendido entre 0.15 y 1.51  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ . Los valores obtenidos son comparables a los registrados por Jara Torres (2018), quien reportó valores de la respiración potencial del suelo de El Cajas entre 0.56 y 2.63  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , y concuerdan con los valores reportados por Carillo et al. (2019) para emisiones netas de páramo (0.45 - 7.98  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ).

Además, difieren al ser menores respecto a los valores reportados por Potthast et al. (2011) donde se determinó la respiración in situ para raíces finas en lugares Altoandinos en el Ecuador (2.81 - 3.37  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) y respecto a los obtenidos por McKnight et al. (2016) para emisiones netas de suelos de los Andes ecuatorianos (13.72 y 21.21  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ).

*La respiración microbiana del suelo en la entrada ( $p<0.05^*$ ) y en la mitad ( $p<0.05$ ) es mayor junto a la vía que alejada de esta. Esto puede deberse a que en los lugares perturbados el carbono lábil se vuelve inestable, lo que significa que el carbono orgánico del suelo se está transformando en  $\text{CO}_2$  y como resultado haya una mayor respiración del suelo (Potthast et al. 2011).*

Tabla 22. Respiración microbiana del suelo alrededor de la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal del PNC

Sitios de estudio		Respiración microbiana del suelo ( $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )								
		<i>n</i>	<i>min</i>	<i>Q1</i>	<i>mediana</i>	<i>Q3</i>	<i>max</i>	<i>media</i>	<i>desviación n estándar</i>	
Entrada	Izquierda	Lejos de la vía	3	0.20	0.21	0.21	0.49	0.7	0.39	0.32
		Junto a la vía	3	0.72	0.75	0.78	0.97	1.1	0.88	0.23
	Derecha	Lejos de la vía	3	0.34	0.36	0.39	0.39	0.3	0.37	0.03
		Junto a la vía	3	0.36	0.39	0.42	0.78	1.1	0.64	0.43
Mitad	Izquierda	Lejos de la vía	3	0.27	0.30	0.34	0.62	0.9	0.50	0.35
		Junto a la vía	3	0.41	0.41	0.41	0.52	0.6	0.48	0.12
	Derecha	Lejos de la vía	3	0.29	0.40	0.50	0.57	0.6	0.48	0.18
		Junto a la vía	3	0.39	0.55	0.71	0.82	0.9	0.68	0.27
Salida	Izquierda	Lejos de la vía	3	0.15	0.21	0.27	0.32	0.3	0.26	0.11
		Junto a la vía	3	0.45	0.60	0.76	0.83	0.8	0.70	0.23
	Derecha	Lejos de la vía	3	0.54	0.78	1.02	1.27	1.5	1.02	0.48

	Junto a la vía	3	0.15	0.34	0.54	0.73	0.9	0.54	0.39
Todos los sitios lejos de la vía		18	0.15	0.28	0.38	0.61	1.5	0.50	0.35
Todos los sitios Junto a la vía		18	0.15	0.41	0.67	0.86	1.1	0.65	0.29
Todos los sitios		36	0.15	0.35	0.48	0.77	1.5	0.58	0.32

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Prueba Mann-Whitney del efecto de la distancia de los sitios de estudio a la vía sobre la respiración microbiana del suelo

Variable	n	Medias	w	p-value	Diferencia de medias
Lejos de la vía	18	0.65	200	0.2351	0.06
Junto a la vía	18	0.59			

Tabla 24. Prueba t-student del efecto de la zona de los sitios de estudio (entrada, mitad y salida) sobre la respiración microbiana del suelo

Sitio de estudio		n	Medias	Estadístico	p-value	Diferencia de medias
Entrada	Lejos de la vía	6	0.40	2.201	0.05759*	0.35
	Junto a la vía	6	0.75			
Mitad	Lejos de la vía	6	0.49	0.57587	0.5774	0.08
	Junto a la vía	6	0.57			
Salida	Lejos de la vía	6	0.66	0.30968	0.7655	0.08
	Junto a la vía	6	0.58			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Prueba Mann-Whitney del efecto del lado (izquierdo/derecho) de los sitios de estudio sobre la respiración microbiana del suelo

Variable	n	Medias	w	p-value	Diferencia de medias
Izquierdo	6	0.11	102.85	0.07536	0.05
Derecho	6	0.16			

Fuente: Elaboración propia.



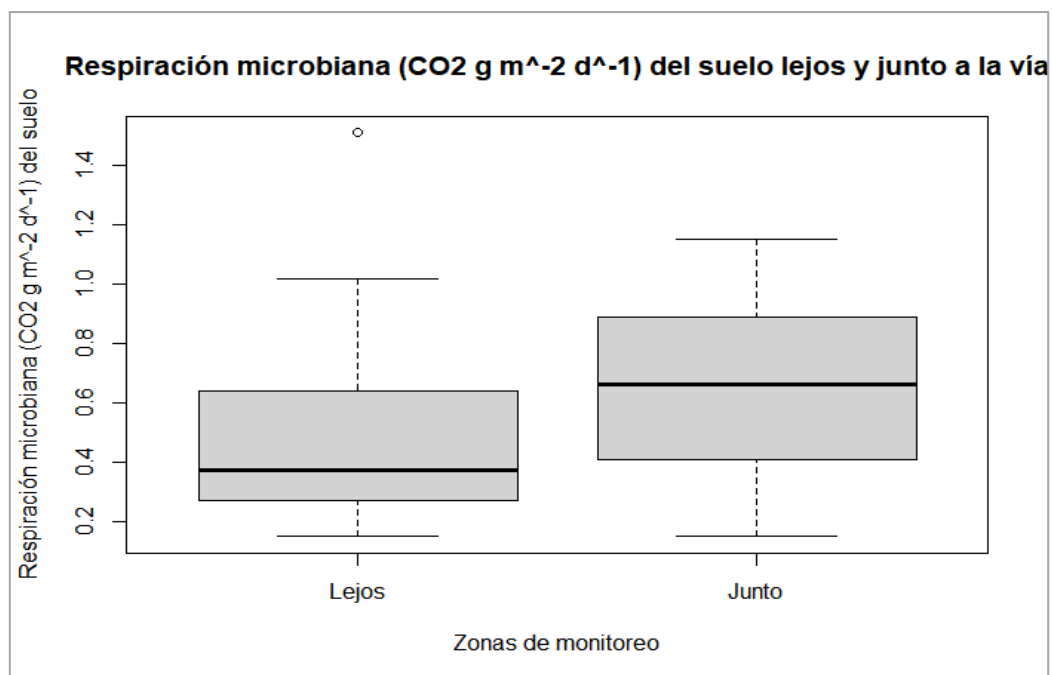


Figura 28. Distribución de la respiración microbiana del suelo según la distancia de la vía. Lejos (30 m lejos de la vía) y Junto (al borde de la vía).  
Fuente: Elaboración propia

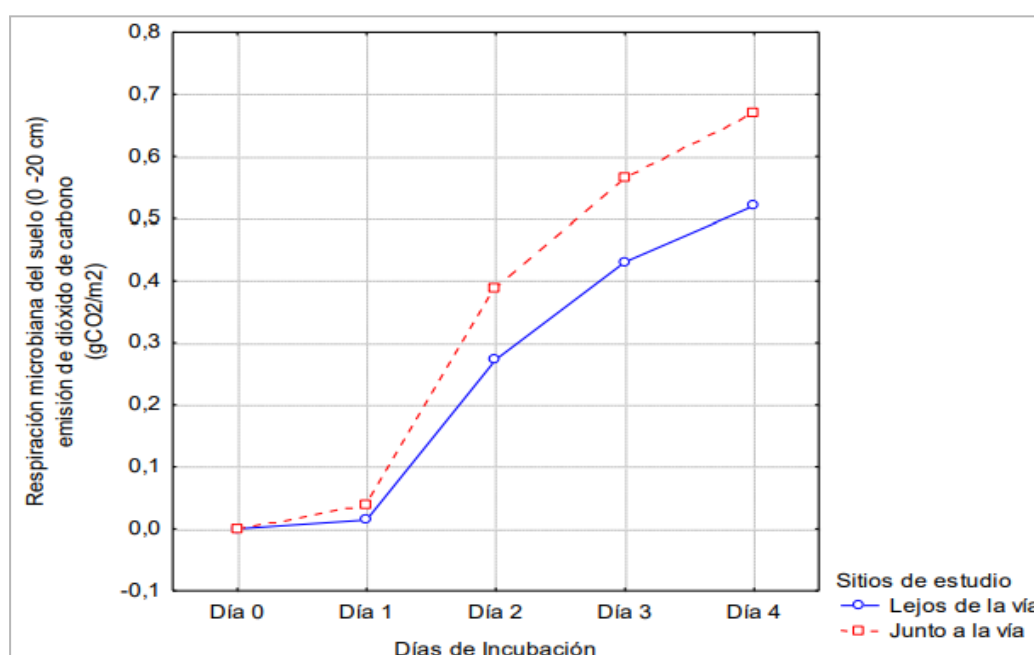


Figura 29. Media de la respiración microbiana del suelo por cada día de ensayo de todos los sitios lejos de la vía vs todos los sitios junto a la vía  
Fuente: Elaboración propia

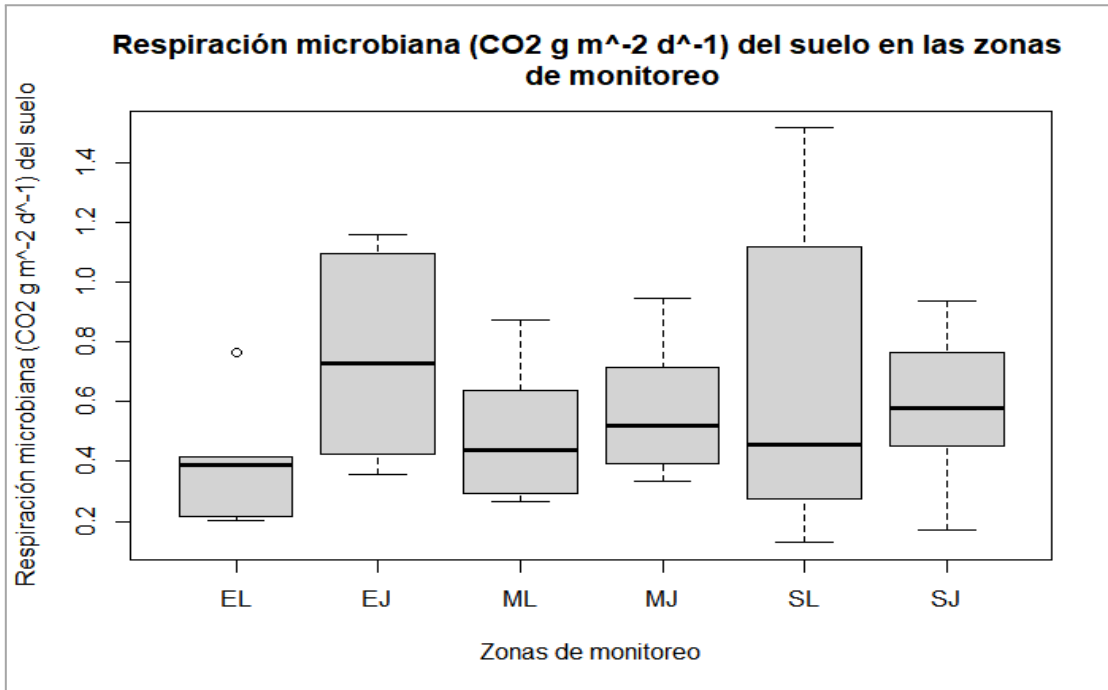


Figura 30. Distribución de la respiración microbiana del suelo en los puntos de monitoreo. EL (Entrada lejos de la vía), EJ (Entrada junto a la vía), ML (Mitad lejos de la vía), MJ (Mitad junto a la vía), SL (Salida lejos de la vía) y SJ (Salida junto a la vía).  
Fuente: Elaboración microbiana

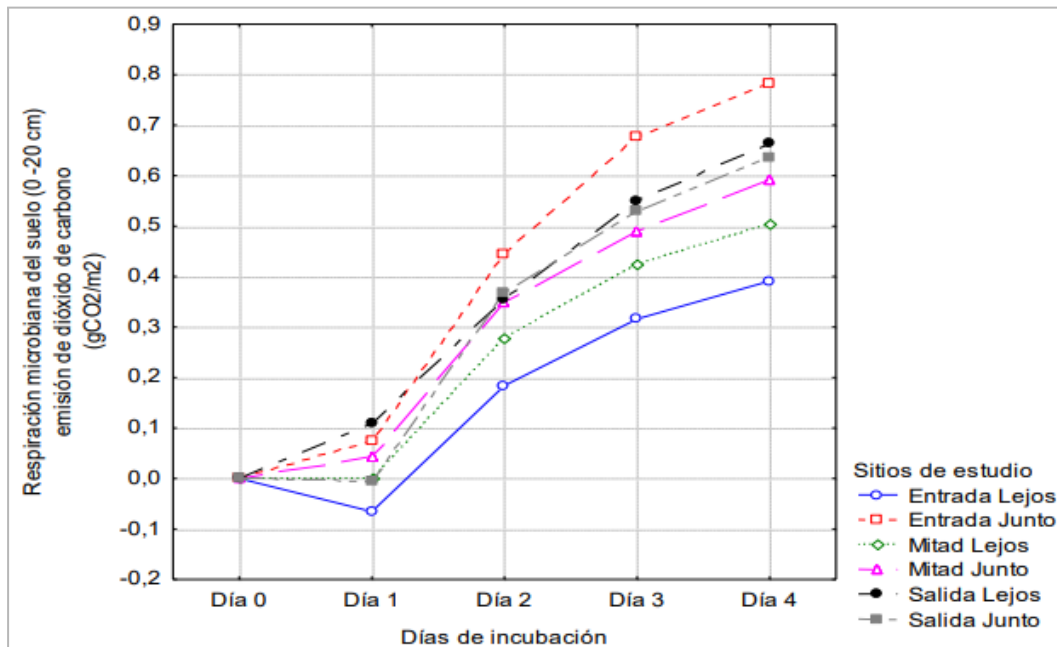


Figura 31. Media de la respiración microbiana del suelo por cada día de ensayo, de todos los sitios lejos de la vía vs todos los sitios junto a la vía, por cada zona de estudio.  
Fuente: Elaboración propia

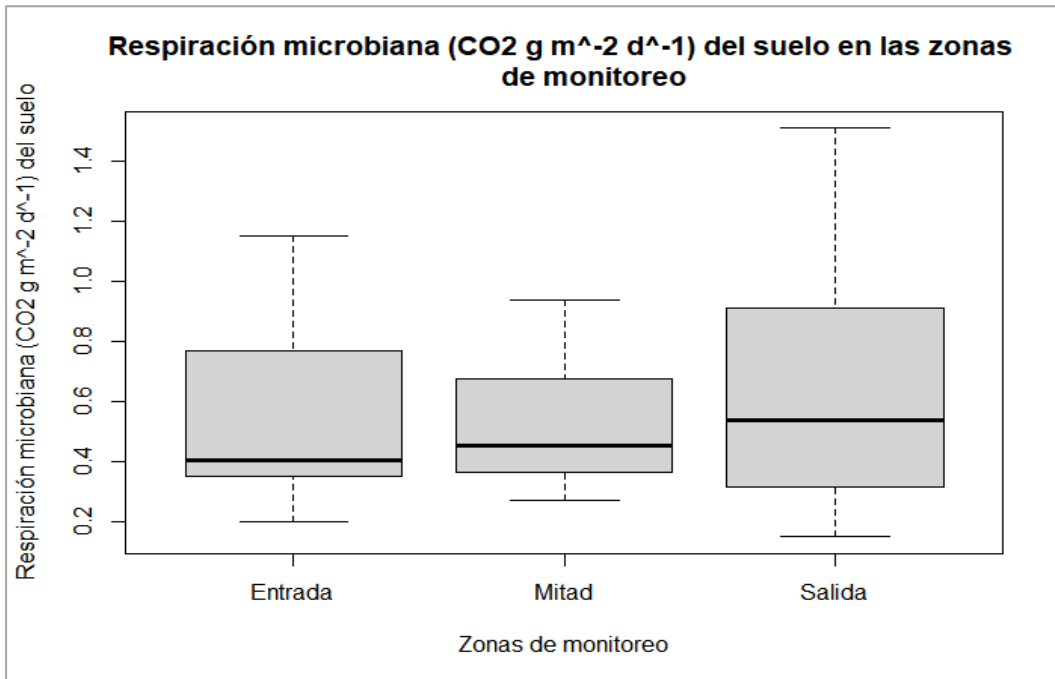


Figura 32. Distribución de la respiración microbiana del suelo en las zonas de monitoreo.  
Fuente: Elaboración propia

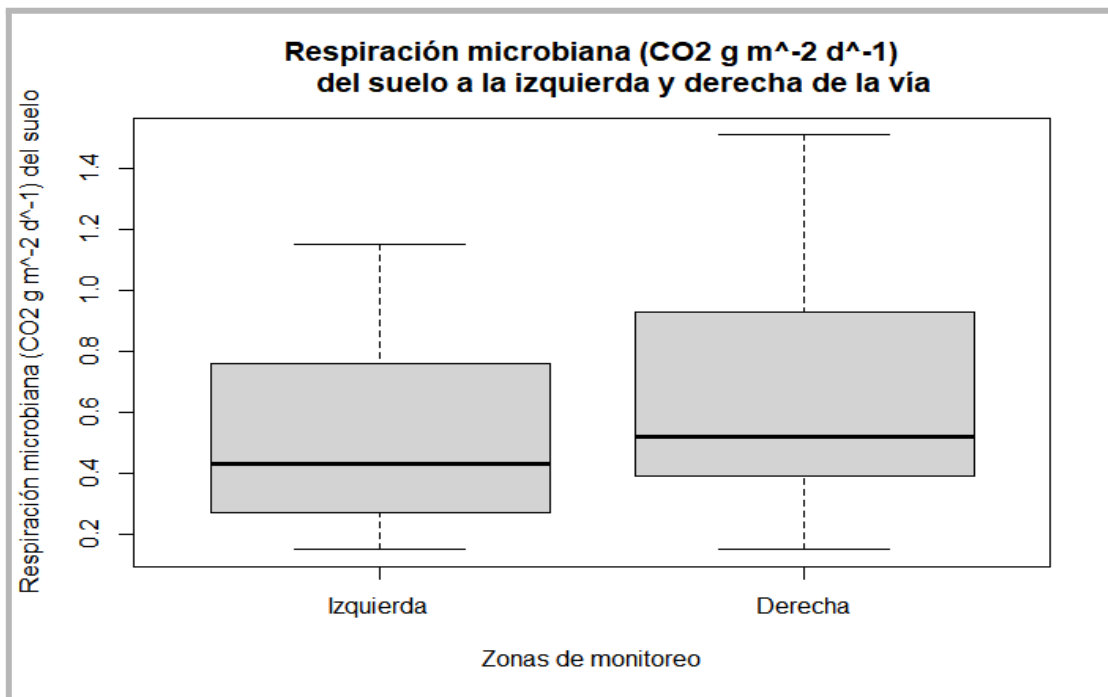


Figura 33. Distribución de la respiración microbiana del suelo a la derecha e izquierda de la vía  
Fuente: Elaboración propia

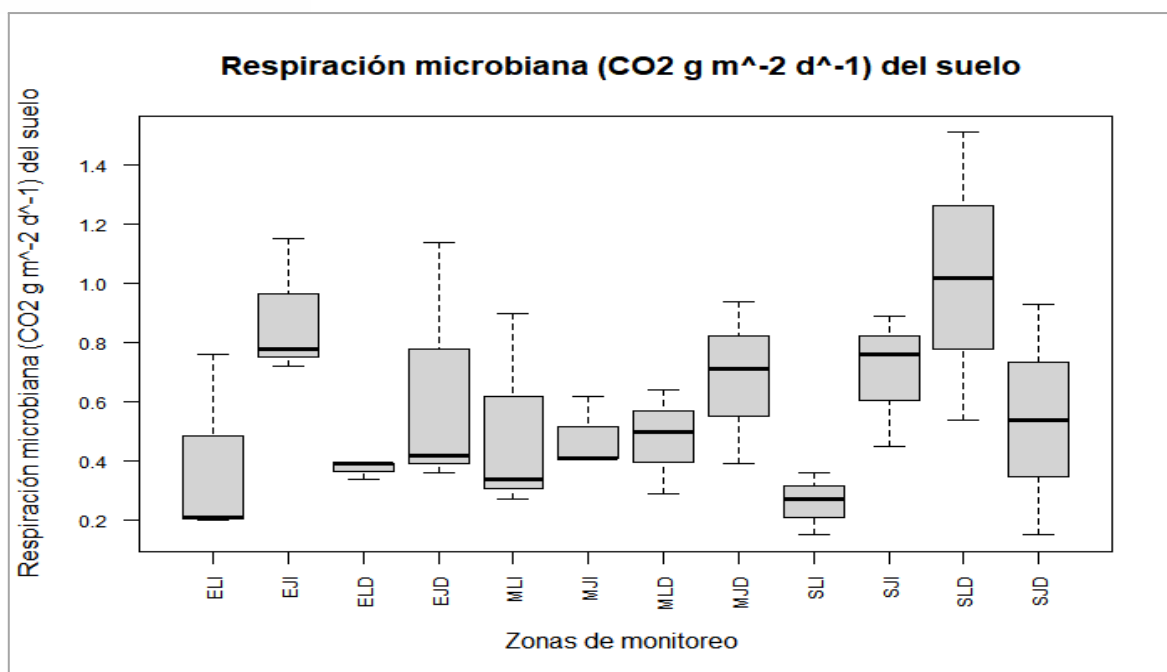


Figura 34. Distribución de la respiración microbiana en todos los puntos de monitoreo. ELI (Entrada lejos de la vía izq), EJI (Entrada junto a la vía izq), ELD (Entrada lejos vía dcha), EJD (Entrada junto a la vía dcha), MLI (Mitad lejos de la vía izq), MJJ (Mita junto a la vía izq), MLD (Mitad lejos de la vía dcha), MJD (Mitad junto a la vía dcha), SLI (Salida lejos de la vía izq), SJI (Salida junto a la vía izq), SLD (Salida lejos de la vía dcha) y SJD (Salida junto a la vía dcha).  
Fuente: Elaboración propia

#### 5.4. Relación entre la concentración de Pb en el suelo y la respiración microbiana del suelo

La respiración del suelo mostró una correlación negativa con la concentración de Pb con un coeficiente de Pearson de -0.1900394 (Figura 33). Brookes (1995), Kilzikaya et al. (2004) y Zhang et al. (2010) reportaron que el CO<sub>2</sub> producido por los microorganismos del suelo decrece a medida que incrementa la contaminación por metales pesados.

Gülser & Erdoğan (2008) también mostraron relaciones negativas entre la respiración microbiana y la concentración de metales (Pb,  $r = -0.283$ ; Cr,  $r = -0.386$ ; Cd,  $r = -0.325$ ; Ni,  $r = -0.263$ ; Fe,  $r = 0.330$ ; Mn,  $r = -0.325$ ; Zn,  $r = -0.218$ ; Cu,  $r = -0.2$ ). Y otro estudio realizado por Liao & Xie (2007) también reportó una relación negativa entre la respiración microbiana y la concentración de Pb ( $r = -0.729$ ).

El efecto que tienen los metales en el decrecimiento de la respiración microbiana podría deberse a una inhibición directa en los procesos microbianos, en la disminución de la disponibilidad de los sustratos u ocasionando la muerte directa de los microorganismos del suelo (Nwachukwu & Pulford, 2010; Liao & Xie, 2007).

El efecto que tienen los metales en el decrecimiento de la respiración microbiana podría deberse a una inhibición directa en los procesos microbianos, en la disminución de la disponibilidad de los sustratos u ocasionando la muerte directa de los microorganismos del suelo (Nwachukwu & Pulford, 2010; Liao & Xie, 2007).

Además, según Chodak et al. (2013) la respiración microbiana depende directamente del contenido de carbono orgánico, humedad del suelo, nitrógeno total y la disponibilidad de nutrientes.

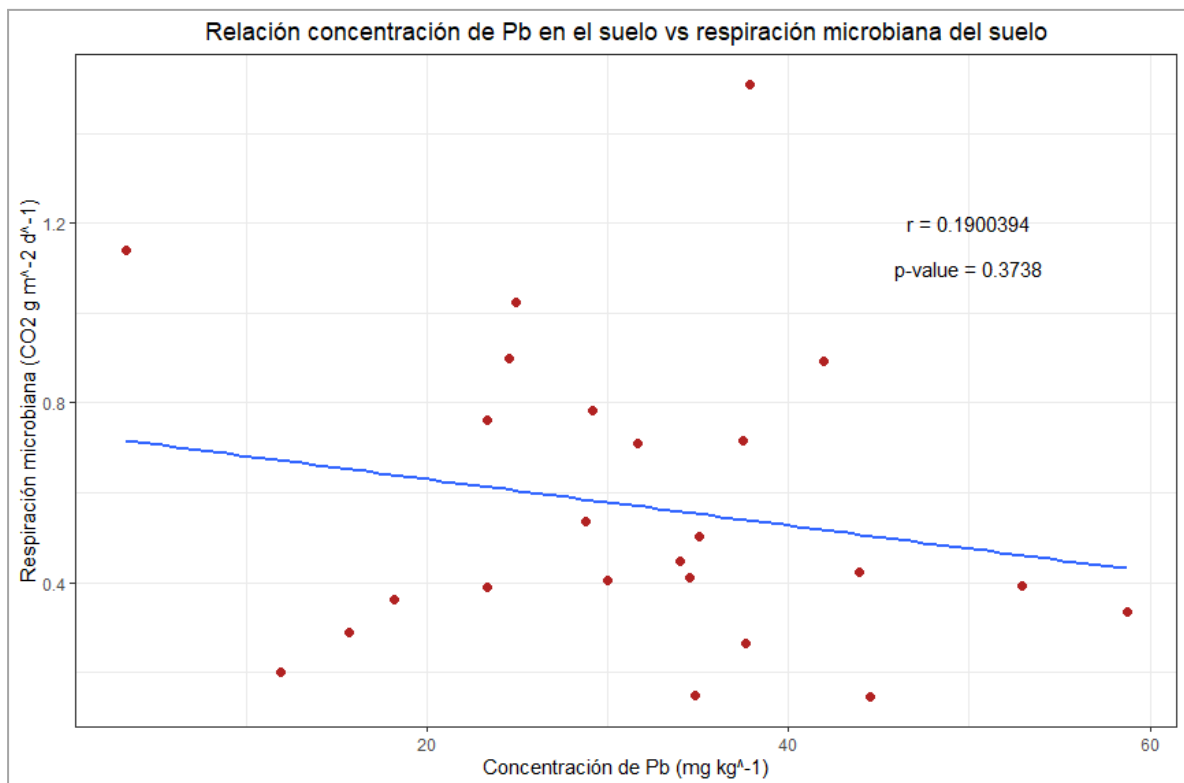


Figura 35. Relación concentración de plomo vs respiración microbiana del suelo.  
Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

La vía Cuenca-Molleturo-Naranjal está ejerciendo una influencia sobre los parámetros químicos del suelo del PNC. Debido a que se evidenció una alteración del pH, CE y Eh al borde de la vía (0 metros) con respecto a 30 metros alejada de esta. Por lo que se sugiere que las reacciones químicas del suelo están siendo alteradas por la vía, posiblemente por el tipo de material utilizado en la construcción de la carretera.

La concentración de Pb fue mayor a 0 metros respecto a la vía que a 30 metros alejada de ésta, sin embargo, no se obtuvo evidencia suficiente para concluir que haya influencia de la vía en la concentración de Pb en los suelos del PNC. Esto podría deberse a que el número de muestras recolectadas no fue la suficiente. A pesar de ello, se demostró que los suelos están contaminados por Pb al sobrepasar 1.7 veces los límites permisibles de la normativa ambiental ecuatoriana vigente.

No se evidenció que la vía ejerza algún tipo de influencia sobre la respiración microbiana del suelo. Pero, esto puede deberse a otros factores que influyen en la respiración que no fueron tomados en cuenta en el presente trabajo de investigación, como: el contenido de carbono orgánico, la disponibilidad de nutrientes, la cobertura vegetal, nitrógeno total. Por ende, como no se evidenció influencia de la vía sobre la respiración y la concentración de Pb tampoco se esperó que hubiera una correlación entre estos dos parámetros

### Recomendaciones

Se recomienda definir más puntos de monitoreo a lo largo de los 15 Km de la vía Cuenca\*Molleturo- Naranjal que atraviesa el PNC para poder abarcar una mayor área representativa de la zona de estudio.

También se recomienda tomar una mayor cantidad, esto con el objetivo de tener un mayor número de datos y generar un mejor análisis estadístico.

## Referencias

- Abdu, N., Abdullahi, A. A., & Abdulkadir, A. (2017). Heavy metals and soil microbes. *Environmental Chemistry Letters*, 15(1), 65–84. <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0587-x>
- Aguilar, J. M., Nieto, A., Espinoza, N., Loja, G., & Tinoco, B. A. (2019). Assessing patterns of bird roadkills in a high Andean Ecuadorian national park. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 54(3), 149–156. <https://doi.org/10.1080/01650521.2019.1649953>
- Alexander, S. M., & Waters, N. M. (2000). *The effects of highway transportation corridors on wildlife: A case study of Bank National Park*.
- Aliyu, A. A., Mudansiru, A., Obadiah, C. D., & Dharmendra, S. (2023). Accumulation of heavy metals in autochthonous plants around Bagega Artisanal Gold Mining Village and the remediation potential of selected plants. *Acta Ecologica Sinica*, S1872203223000094. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2023.02.005>
- Alvarez Rivera, U., Gonzalez Castro, I., & Lopez Anaya, L. (1998). *Quimica li. Manual de Actividades Experimentales Para El Alumno*. UNAM.
- An, S., Liu, N., Li, X., Zeng, S., Wang, X., & Wang, D. (2022). Understanding heavy metal accumulation in roadside soils along major roads in the Tibet Plateau. *Science of The Total Environment*, 802, 149865.
- Arias, N. M. M., Rangel, M. del C. N., López, I. C. P., Sánchez, E. C., & Cruz, J. M. de la. (2018). El suelo y su multifuncionalidad: ¿qué ocurre ahí abajo? *CIENCIA ergo-sum*, 25(3), Article 3. <https://doi.org/10.30878/ces.v25n3a9>
- Astudillo, P. X., Tinoco, B. A., & Siddons, D. C. (2015). The avifauna of Cajas National Park and Mazán Reserve, southern Ecuador, with notes on new records. *Cotinga*, 37, 1-11.
- Bech, J., Roca, N., Boluda, R., Gil, C., Ramos-Miras, J., & Rodríguez, J. A. (2015). Spatial variability in depth and landscape of heavy metal contents of volcanic soils of the National Cajas Park in the Azuay Andes (Ecuador). *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 1955. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015EGUGA..17.1955B/abstract>
- Borch, T., Kretzschmar, R., Kappler, A., Cappellen, P. V., Ginder-Vogel, M., Voegelin, A., & Campbell, K. (2010). Biogeochemical Redox Processes and their Impact on

Contaminant Dynamics. *Environmental Science & Technology*, 44(1), 15–23.  
<https://doi.org/10.1021/es9026248>

Brookes, P. C. (1995). The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. *Biology and Fertility of Soils*, 19(4), 269–279. doi:10.1007/bf00336094

Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>

Buytaert, W., Deckers, J., & Wyseure, G. (2006). Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo). *Geomorphology*, 73(3–4), 207–221.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.012>

Buytaert, W., Deckers, J., & Wyseure, G. (2007). Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use. *CATENA*, 70(2), 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.08.003>

Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., & Deckers, J. (2005). The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes*, 19(20), 3985–3997. <https://doi.org/10.1002/hyp.5867>

Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Céleri, R., & Bendix, J. (2019). The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 30–47. doi:10.1016/j.agrformet.2018.11.0

Cela, J., Bonilla, W., & Urrutia-Goyes, R. (2021). Copper, Nickel, Lead, and Cadmium Concentration in Soils around Industrial Areas from Latacunga, Ecuador. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 728(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/728/1/012006>

CEMAPRIMES. (2002). Parque Nacional Cajas Plan de Manejo. Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. ETAPA. CAMAPRIMES CIA LTDA. Cuenca, Ecuador.

Chavez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., & Baligar, V. C. (2016). Chemical speciation of cadmium: An approach to evaluate plant-available cadmium in Ecuadorian soils under cacao production. *Chemosphere*, 150, 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.013>



- Chen, H., Wang, P., Gu, Y., Kretzschmar, R., Kopittke, P. M., & Zhao, F.-J. (2020). The within-field spatial variation in rice grain Cd concentration is determined by soil redox status and pH during grain filling. *Environmental Pollution*, 261, 114151. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114151>
- Chodak, M., Gołębiewski, M., Morawska-Płoskonka, J., Kuduk, K., & Niklińska, M. (2013). Diversity of microorganisms from forest soils differently polluted with heavy metals. *Applied Soil Ecology*, 64, 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.11.004>
- Cueva, A., Robles Zazueta, C. A., Garatuza Payan, J., & Yépez, E. A. (2016). Soil respiration in Mexico: Advances and future directions. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 253-269.
- Deljouei, A., Sadeghi, S. M. M., Abdi, E., Bernhardt-Römermann, M., Pascoe, E. L., & Marcantonio, M. (2018). The impact of road disturbance on vegetation and soil properties in a beech stand, Hyrcanian forest. *European Journal of Forest Research*, 137(6), 759-770. <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1138-8>
- De Silva, S., Ball, A. S., Huynh, T., & Reichman, S. M. (2016). Metal accumulation in roadside soil in Melbourne, Australia: Effect of road age, traffic density and vehicular speed. *Environmental Pollution*, 208, 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.09.032>
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and Assessing Soil Quality. En *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* (pp. 1-21). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>
- ETAPA EP (2012a). Informe del monitoreo de la circulación vehicular por la vía Cuenca-Molleturo-El Empalme sobre los recursos hídricos del Parque Nacional Cajas. Programa de Monitoreo y vigilancia de los recursos hídricos y de clima.
- ETAPA EP. (2012b). Propuesta para la declaratoria de la Reserva de Biosfera dirigida a la UNESCO denominada: Área de Biosfera del Macizo Cajas. 230 pp.
- ECOLAP y MAE. (2007). Guía del Patrimonio de Áreas Naturales Protegidas del Ecuador. ECOFUND, FAN, DarwinNet, IGM. Quito, Ecuador
- Fassbender, H. W., & Bornemisza, E. (1987). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. IICA.
- Ferreiro, J. P. (2006). *Propiedades bioquímicas de suelos de prado de Galicia*. Univ Santiago de Compostela.

- Forman, R. T. T., & Deblinger, R. D. (2000). The Ecological Road-Effect Zone of a Massachusetts (U.S.A.) Suburban Highway. *Conservation Biology*, 14(1), 36–46. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99088.x>
- Gabriels, D., Lobo, D. (2006). Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venesuelos*, 14(1), 37-48. <https://www.academia.edu/download/34979002/982-1895-1-SM.pdf>
- García Trenado, J. G., Aguilar, J., García Navarro, A., & M, D. (1976). Potencial redox en suelos de la zona de Cabo de Gata (Almería). *Ars Pharmaceutica (Internet)*, 17(4), Article 4.
- García-Mendoza, A. J., Díaz, M. de J. O., & Briones-Salas, M. (2004). *Biodiversidad de Oaxaca*. UNAM.
- García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y forrajes*, 35(2), 125-138.
- Giller, K. E., Witter, E., & McGrath, S. P. (2009). Heavy metals and soil microbes. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(10), 2031–2037. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.04.026>
- Gómez, M. I., Castro, H. E., & Malagón, D. (2005). Interpretación de procesos redox en suelos sulfatados ácidos del distrito de riego del Alto Chicamocha, Boyacá. *Agronomía Colombiana*, 23(1), 136-142
- Guio Blanco, C. M., Brito Gomez, V. M., Crespo, P., & Ließ, M. (2018). Spatial prediction of soil water retention in a Páramo landscape: Methodological insight into machine learning using random forest. *Geoderma*, 316, 100–114. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.002>
- Gülser, F., & Erdoğan, E. (2008). The effects of heavy metal pollution on enzyme activities and basal soil respiration of roadside soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 145(1–3), 127–133. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-0022-7>
- Horwitz W. & Latimer G. W. (2005). Official methods of analysis of aoac international (18th ed.). AOAC International.
- Huang, C., Zhang, L., Meng, J., Yu, Y., Qi, J., Shen, P., Li, X., Ding, P., Chen, M., & Hu, G. (2022). Characteristics, source apportionment and health risk assessment of heavy metals in urban road dust of the Pearl River Delta, South China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 236, 113490. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113490>

- Husson, O. (2013). Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: A transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant and Soil*, 362(1–2), 389–417. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1429-7>
- Husson, O., Husson, B., Brunet, A., Babre, D., Alary, K., Sarthou, J.-P., Charpentier, H., Durand, M., Benada, J., & Henry, M. (2016). Practical improvements in soil redox potential (Eh) measurement for characterisation of soil properties. Application for comparison of conventional and conservation agriculture cropping systems. *Analytica Chimica Acta*, 906, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.11.052>
- Jara Torres, P. P. (2018). *Efectos del cambio de la cobertura vegetal y del uso de la tierra sobre la cantidad y calidad de materia orgánica del suelo en ecosistemas alto-andinos de Ecuador* [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidad de Salamanca]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=256145>
- Jenkinson, D. S. (1992). La materia orgánica del suelo: evolución. Wild A. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas. Madrid. Mundi-Prensa.
- Jim, C. Y. (1998a). Physical and chemical properties of a Hong Kong roadside soil in relation to urban tree growth. *Urban Ecosystems*, 2(2), 171-181. <https://doi.org/10.1023/A:1009585700191>
- Jim, C. Y. (1993b). Soil Compaction as a Constraint to Tree Growth in Tropical & Subtropical Urban Habitats. *Environmental Conservation*, 20(1), 35-49. <https://doi.org/10.1017/S0376892900037206>
- Jiménez Ballesta, R. (2017). *Introducción a la contaminación de suelos*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Jiménez-Oyola, S., Chavez, E., García-Martínez, M.-J., Ortega, M. F., Bolonio, D., Guzmán-Martínez, F., García-Garizabal, I., & Romero, P. (2021). Probabilistic multi-pathway human health risk assessment due to heavy metal(loid)s in a traditional gold mining area in Ecuador. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 224, 112629. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112629>
- Johnston, F. M., & Johnston, S. W. (2004). Impacts of Road Disturbance on Soil Properties and on Exotic Plant Occurrence in Subalpine Areas of the Australian Alps. *Arctic*,

*Antarctic, and Alpine Research*, 36(2), 201-207.  
[https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2004\)036\[0201:IORDOS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2004)036[0201:IORDOS]2.0.CO;2)

Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., & Bello-Amez, S. (2006). LA MATERIA ORGÁNICA, IMPORTANCIA Y EXPERIENCIA DE SU USO EN LA AGRICULTURA. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61.  
<https://doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>

Kao, P.-H., Huang, C.-C., & Hseu, Z.-Y. (2006). Response of microbial activities to heavy metals in a neutral loamy soil treated with biosolid. *Chemosphere*, 64(1), 63–70.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.11.039>

Kaurichev, I.S., & Shishova, V.S. (1967) Oxidation reduction conditions of coarse textured soils of the Meschera lowland. *Sov Soil Sci*, 5, 636–646

Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N. K., Murtaza, B., Bibi, I., & Dumat, C. (2017). A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 247–268.  
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.021>

Kızılkaya, R., Aşkın, T., Bayraklı, B., & Sağlam, M. (2004). Microbiological characteristics of soils contaminated with heavy metals. *European Journal of Soil Biology*, 40(2), 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2004.10.002>

Kopeć, M., Gondek, K., & Baran, A. (2013). Assessment of respiration activity and ecotoxicity of composts containing biopolymers. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 89, 137–142. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.11.021>

Korzeniowska, J. (2023). Heavy Metal Content in the Soil along the Road No. 7 near Chyżne. *Atmosphere*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/atmos14010002>

Kozłowski, T. T. (1999). Soil Compaction and Growth of Woody Plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14(6), 596-619.  
<https://doi.org/10.1080/02827589908540825>

Lasa, N. B., & Iraeta, A. I. V. (2002). *Diseños de investigación experimental en psicología: Modelos y análisis de datos mediante el SPSS 10.0*. Pearson Educación.

- Liao, M., & Xie, X. M. (2007). Effect of heavy metals on substrate utilization pattern, biomass, and activity of microbial communities in a reclaimed mining wasteland of red soil area. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 66(2), 217–223. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2005.12.013>
- Lloyd, J. y A. Taylor. (1994). On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology* 8: 315-323
- Mazza, A. (7 de diciembre de 2022). La basura y los plásticos contaminan el cajas. *El Mercurio*. <https://elmercurio.com.ec/2022/12/07/la-basura-y-los-plasticos-contaminan-el-cajas/>
- Martínez, A. (2010). Procesos de manejo y gestión del Parque Nacional Cajas. *El Paramo del Austro*.
- McKnight, J. Y., Harden, C. P., & Schaeffer, S. M. (2017). Soil CO<sub>2</sub> flux trends with differences in soil moisture among four types of land use in an Ecuadorian páramo landscape. *Physical Geography*, 38(1), 51–61. <https://doi.org/10.1080/02723646.2016.1256101>
- Mills, S. D., Mamo, M., Ruis, S. J., Blanco-Canqui, H., Schacht, W. H., Awada, T., Li, X., & Sutton, P. (2021). Soil properties limiting vegetation establishment along roadsides. *Journal of Environmental Quality*, 50(1), 110-121. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20184>
- Minga-Ochoa, D., Ansaloni, R., Verdugo-Navas, A., & Ulloa-Ulloa, C. (2019). Flora del páramo del Cajas, Ecuador. En *Universidad del Azuay Casa Editora*. Universidad del Azuay Casa Editora. <https://doi.org/10.33324/ceuzuay.42>
- Ministerio del Ambiente. (2018). Actualización del Plan de Manejo del Parque Nacional Cajas. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/03/ACUERDO-001-ANEXO-PAQUE-NACIONAL-CAJAS.pdf>
- Ministerio del ambiente (s/f). *Parque Nacional Cajas*. Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador. <http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/areas-protegidas/parque-nacional-cajas>
- Moreira, M. de M. (2010). *Aplicación y selección de indicadores de calidad ecológica en la utilización de fertilizantes orgánicos para la producción de forraje*. Univ Santiago de Compostela.
- Napoletano, P., Guezgouz, N., Di Iorio, E., Colombo, C., Guerriero, G., & De Marco, A. (2023). Anthropogenic impact on soil heavy metal contamination in riparian ecosystems

- of northern Algeria. *Chemosphere*, 313, 137522.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137522>
- Navarro García, G. (2013). *Química agrícola: química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Naz, M., Dai, Z., Hussain, S., Tariq, M., Danish, S., Khan, I. U., Qi, S., & Du, D. (2022). The soil pH and heavy metals revealed their impact on soil microbial community. *Journal of Environmental Management*, 321, 115770.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115770>
- Nicholas Hewitt, C., & Candy, G. B. B. (1990). Soil and street dust heavy metal concentrations in and around Cuenca, Ecuador. *Environmental Pollution*, 63(2), 129-136. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(90\)90063-I](https://doi.org/10.1016/0269-7491(90)90063-I)
- Nieves, S. (2007). *Potencial biotecnológico de microorganismos en ecosistemas naturales y agroecosistemas*. Univ. Nacional de Colombia.
- Nikolaeva, O., Karpukhin, M., Streletskii, R., Rozanova, M., Chistova, O., & Panina, N. (2021). Linking pollution of roadside soils and ecotoxicological responses of five higher plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111586.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111586>
- Novales, A. (2010). *Análisis de regresión*. Universidad Complutense de Madrid.  
[https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-13-Analisis de Regresion.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-13-Analisis%20de%20Regresion.pdf)
- Nwachukwu, O. I., & Pulford, I. D. (2011). Microbial respiration as an indication of metal toxicity in contaminated organic materials and soil. *Journal of Hazardous Materials*, 185(2–3), 1140–1147. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.10.024>
- Ochoa, M., Tierra, W., Tupuna-Yerovi, D. S., Guanoluisa, D., Otero, X. L., & Ruales, J. (2020). Assessment of cadmium and lead contamination in rice farming soils and rice (*Oryza sativa* L.) from Guayas province in Ecuador. *Environmental Pollution*, 260, 114050. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114050>
- Orellana, F. (13 de diciembre de 2022). 150 personas combaten incendio forestal en el Parque Nacional Cajas. *El Mercurio*.  
<https://elmercurio.com.ec/2022/12/13/150-personas-combaten-incendio-forestal-en-el-parque-nacional-cajas/>
- Otero, X. L., Tierra, W., Atiaga, O., Guanoluisa, D., Nunes, L. M., Ferreira, T. O., & Ruales, J. (2016). Arsenic in rice agrosystems (water, soil and rice plants) in Guayas and Los Ríos provinces, Ecuador. *Science of The Total Environment*, 573, 778-787.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.162>

- Oviedo-Anchundia, R., Moína-Quimí, E., Naranjo-Morán, J., & Barcos-Arias, M. (2017). Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. *Bionatura*, 2(4), 437-441. <https://doi.org/10.21931/RB/2017.02.04.5>
- Park, S.-J., Cheng, Z., Yang, H., Morris, E. E., Sutherland, M., McSpadden Gardener, B. B., & Grewal, P. S. (2010). Differences in soil chemical properties with distance to roads and age of development in urban areas. *Urban Ecosystems*, 13(4), 483-497. <https://doi.org/10.1007/s11252-010-0130-y>
- Pidello, A., Perotti, E., Chapo, G., & Menendez, L. (1995). Materia orgánica, actividad microbiana y potencial redox en dos Argiudoles típicos bajo labranza convencional y siembra directa. *Ciencia del Suelo*, 13, 6-10.
- Podwojewski, P. (1999). Los suelos de las altas tierras andinas: los páramos del Ecuador. *Bol Soc Ecuador Cie Suelo*, 18(9), 14.
- Porta, J., López-Acevedo, M. y Poch, R. M. (2014). Edafología: uso y protección de suelos. Madrid: Mundi-Prensa S. A. de C. V.
- Potthast, K., Hamer, U., & Franz Makeschin. (2011). Land-use change in a tropical mountain rainforest region of southern Ecuador affects soil microorganisms and nutrient cycling. 111(1-3), 151–167. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9626-7>
- Poulenard, J., Podwojewski, P., & Herbillon, A. J. (2003). Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian páramos. *Geoderma*, 117(3–4), 267–281. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00128-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00128-9)
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Célleri, R. (2012). EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS POR EL CAMBIO DE LA COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO: PÁRAMO DE QUIMSACOA AL SUR DEL ECUADOR. *Suelos Ecuatoriales*, 42, 138-156.
- Quinteros A., P., Piercosimo, T., & Rafaella, A. (2013). *Comparación química de suelos en distintas coberturas vegetales del PNC mediante métodos de clúster análisis*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/11169>
- Ramírez Requelme, M. E., Ramos, J. F. F., Angélica, R. S., & Brabo, E. S. (2003). Assessment of Hg-contamination in soils and stream sediments in the mineral district of Nambija, Ecuadorian Amazon (example of an impacted area affected by artisanal gold mining). *Applied Geochemistry*, 18(3), 371-381. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00088-4)

Rodríguez Jiménez, J. J. (2008). La contaminación de los suelos. La herencia que no cesa.

Romero-Estévez, D., Yáñez-Jácome, G. S., & Navarrete, H. (2023). Non-essential metal contamination in Ecuadorian agricultural production: A critical review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 115, 104932. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104932>

Rincón, M. A. P., Parra, M. A., Escobar, R. F., Navarro, C., & Arquero, O. (2002). *Los Suelos y la Fertilización Del Olivar Cultivado en Zonas Calcáreas*. Mundi-Prensa Libros.

Rivera, E., Sánchez, M., & Domínguez, H. (2018). PH como factor de crecimiento en plantas. *Revista de Iniciación Científica*, 4, 101-105. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.0.1829>

Sánchez, C. (15 de junio de 2020). Riesgos y Amenazas para el parque nacional cajas. *El Mercurio*. <https://elmercurio.com.ec/2020/06/15/riesgos-y-amenazas-para-el-parque-nacional-cajas/#:~:text=En%20lo%20ambiental%20entre%20los,carrozables%20que%20cruzan%20esta%20zona.>

Schoenholtz, S. H., Miegroet, H. V., & Burger, J. A. (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: Challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 138(1-3), 335-356. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00423-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0)

Segueda, A. N., Correa, G. V., & Blanco, J. L. (2011). *Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo*.

Shaw, P., & Reeve, N. (2008). Influence of a parking area on soils and vegetation in an urban nature reserve. *Urban Ecosystems*, 11(1), 107-120. <https://doi.org/10.1007/s11252-007-0044-5>

Shelly, M. A., & Nigel, W. (2000). The effects of highway transportation corridors on wildlife: a case study of Banff National Park. 8(1-6), 307-320. [https://doi.org/10.1016/s0968-090x\(00\)00014-0](https://doi.org/10.1016/s0968-090x(00)00014-0)

Sklenář, P. J. L., Luteyn, C., Ulloa Ulloa, P. M., Jørgensen & M. O. Dillon. (2005). Flora genérica de los páramos. Guía ilustrada de las plantas vasculares. Mem. New York Bot. Gard. 92: 1-499.

Soriano Soto, M. (2018). Conductividad eléctrica del suelo.



- Spellerberg, I. (1998). Ecological effects of roads and traffic: A literature review: Ecological effects of roads. *Global Ecology and Biogeography*, 7(5), 317–333. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822x.1998.00308.x>
- SQI. (1996). *Indicators for soil quality evaluation*. USDA Natural Resources Conservation Service. Soil Quality Institute. Agricultural Research Service, E.U.
- Suárez Duque, D., Acurio, C., Chimbolema, S., & Aguirre, X. (2016). Análisis del carbono secuestrado en humedales Altoandinos de dos áreas protegidas del Ecuador. *Ecología Aplicada*, 15(2), 171-177. <https://doi.org/10.21704/rea.v15i2.756>
- Takushi, S. (2011). Preferencias Sexuales de Aves a las Carreteras Los Efectos de la Carretera Cuenca—Molleturo – Naranjal en las Proporciones de los Sexos en los Individuos de la Especies de Phrygilus Unicolor en el Parque Nacional de Cajas. *Independent Study Project (ISP) Collection*. [https://digitalcollections.sit.edu/isp\\_collection/1191](https://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/1191)
- Tello, M. de los Á. (2018). Determinación de las concentraciones de plomo y cadmio en suelos de sectores aledaños al parque industrial de la ciudad de Cuenca. *RECIMUNDO: Revista Científica de la Investigación y el Conocimiento*, 2(Extra 1), 560-577.
- Tiwari, S., & Lata, C. (2018). Heavy Metal Stress, Signaling, and Tolerance Due to Plant-Associated Microbes: An Overview. *Frontiers in Plant Science*, 9, 452. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00452>
- Trammell, T. L. E., Schneid, B. P., & Carreiro, M. M. (2011). Forest soils adjacent to urban interstates: Soil physical and chemical properties, heavy metals, disturbance legacies, and relationships with woody vegetation. *Urban Ecosystems*, 14(4), 525-552. <https://doi.org/10.1007/s11252-011-0194-3>
- Triola, M. F. (2018). *Estadística*. México: Pearson Educación de México.
- Viard, B., Pihan, F., Promeyrat, S., & Pihan, J.-C. (2004). Integrated assessment of heavy metal (Pb, Zn, Cd) highway pollution: Bioaccumulation in soil, Graminaceae and land snails. *Chemosphere*, 55(10), 1349–1359. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.01.003>

- Vicuña, D., & Bravo, M. (2007). *Aproximación a la Capacidad de Carga Turística en los senderos de Toreadora y Cucheros del Parque Nacional Cajas con fines educativos y de Investigación* (Guía superior de turismo). Universidad del Azuay
- Visita Técnica - Parque Nacional El Cajas | GAD Municipal de Cuenca. (2022). Cuenca.gob.ec.  
<https://www.cuenca.gob.ec/content/visita-t%C3%A9cnica-parque-nacional-el-cajas>
- Wan, L., Lv, H., Qasim, W., Xia, L., Yao, Z., Hu, J., Zhao, Y., Ding, X., Zheng, X., Li, G., Lin, S., & Butterbach-Bahl, K. (2022). Heavy metal and nutrient concentrations in top- and sub-soils of greenhouses and arable fields in East China – Effects of cultivation years, management, and shelter. *Environmental Pollution*, 307, 119494. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119494>
- Wang, X., Birch, G. F., & Liu, E. (2022). Traffic emission dominates the spatial variations of metal contamination and ecological-health risks in urban park soil. *Chemosphere*, 297, 134155. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134155>
- Wang, X., Cui, Y., Chen, L., Tang, K., Wang, D., Zhang, Z., Yu, J., & Fang, L. (2022). Microbial metabolic limitation and carbon use feedback in lead contaminated agricultural soils. *Chemosphere*, 308, 136311. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136311>
- Wang, X., Liu, E., Yan, M., Zheng, S., Fan, Y., Sun, Y., Li, Z., & Xu, J. (2023). Contamination and source apportionment of metals in urban road dust (Jinan, China) integrating the enrichment factor, receptor models (FA-NNC and PMF), local Moran's index, Pb isotopes and source-oriented health risk. *Science of The Total Environment*, 878, 163211. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163211>
- Werkenthin, M., Kluge, B., & Wessolek, G. (2014). Metals in European roadside soils and soil solution – A review. *Environmental Pollution*, 189, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.025>
- Yan, X., Gao, D., Zhang, F., Zeng, C., Xiang, W., & Zhang, M. (2013). Relationships between Heavy Metal Concentrations in Roadside Topsoil and Distance to Road Edge Based on Field Observations in the Qinghai-Tibet Plateau, China. 10(3), 762–775. <https://doi.org/10.3390/ijerph10030762>
- Yang, Y., Campbell, C. D., Clark, L., Cameron, C. M., & Paterson, E. (2006). Microbial indicators of heavy metal contamination in urban and rural soils. *Chemosphere*, 63(11), 1942–1952. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.10.009>

- Zafra Mejía, C. A., Luengas Pinzón, E. C., & Temprano González, J. (2013). Influencia del tráfico en la acumulación de metales pesados sobre vías urbanas: Torrelavega (España)-Soacha (Colombia). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 67, 146-160.
- Zhang, F.-P., Li, C.-F., Tong, L.-G., Yue, L.-X., Li, P., Ciren, Y.-J., & Cao, C.-G. (2010). Response of microbial characteristics to heavy metal pollution of mining soils in central Tibet, China. *Applied Soil Ecology*, 45(3), 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.03.006>
- Zhang, H., Wang, Z., Zhang, Y., Ding, M., & Li, L. (2015). Identification of traffic-related metals and the effects of different environments on their enrichment in roadside soils along the Qinghai–Tibet highway. *Science of The Total Environment*, 521–522, 160–172. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.054>