

ESTUDIO DE LOS NIVELES DE Pb, Cd Y Ni EN EL SUELO Y LA
VEGETACION ADYACENTES A ALGUNAS CARRETERAS DE PUERTO RICO*

por

Enrique Rodríguez Castellón



CENTER FOR ENERGY AND ENVIRONMENT RESEARCH
UNIVERSITY OF PUERTO RICO — U.S. DEPARTMENT OF ENERGY

ESTUDIO DE LOS NIVELES DE Pb, Cd Y Ni EN EL SUELO Y LA
VEGETACION ADYACENTES A ALGUNAS CARRETERAS DE PUERTO RICO*

por

Enrique Rodríguez Castellón

Tesis Maestro en Ciencias, Depto de Química
RUM, 1980

Esta investigación fue patrocinada, en parte,
por la División de Ecología Marina de CEEA

A Pepe y María Teresa

AGRADECIMIENTO

Esta investigación no se hubiera llevado a cabo sin la supervisión, las ideas y el magisterio del Dr. Manuel Rodríguez Flores. Los consejos del Dr. José M. López y del Dr. César Reyes, los comentarios oportunos del Dr. Narinder K. Mehta y la total disposición del Dr. Juan Gerardo González fueron de gran ayuda. Mi agradecimiento al Dr. Guillermo Guerreros por su colaboración en la clasificación de las especies vegetales y a la Prof. Milagros Miró por su ayuda en el análisis de suelos.

El reconocimiento a la División de Ecología Marina del Centro para Estudios Energéticos y Ambientales por el uso de sus laboratorios y especialmente a sus miembros por su entusiasmo.

Agradezco los ánimos y la ayuda prestada por el personal del Laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería del R. U. M.

Mi agradecimiento al Departamento de Química del R. U. M. especialmente a su Director Dr. José R. Sánchez Caldas, por su orientación y al Dr. Robert Tsai por el uso de su laboratorio.

Destaco los méritos de la señorita Priscilla Fuentes por su paciencia en la transcripción de este trabajo. Finalmente mi mayor agradecimiento a mis compañeros y a la Colonia Española en Mayagüez por su amistad.

RESUMEN

La contaminación debida al Pb, Cd y Ni en las zonas adyacentes a algunas carreteras de Puerto Rico ha sido investigada.

Los niveles de dichos metales en el suelo y en la vegetación son muy superiores a los considerados como normales. La descarga de Pb en los suelos y en la vegetación está correlacionada muy significativamente con la densidad de tráfico. El viento solamente afecta a la distribución del Pb en el ecosistema que rodea a las carreteras. Los contenidos de Pb, Cd y Ni en el suelo y el contenido de Pb en la vegetación disminuyen a medida que aumenta la distancia a la carretera. La acumulación de Pb y Cd es significativa hasta una distancia de aproximadamente 33.3 metros a partir de la carretera. Cantidades apreciables de Pb, Cd y Ni de las plantas se pueden eliminar fácilmente mediante lavado con agua.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
INTRODUCCION	1
REVISION DE LITERATURA	3
Fuentes de Pb, Cd y Ni	4
Química, distribución y dinámica de Pb, Cd y Ni	5
Efectos de los metales pesados en el biotopo del suelo	14
Efectos del Pb, Cd y Ni en las plantas . . .	15
Efectos de Pb, Cd y Ni en la salud humana .	17
UBICACION Y DESCRIPCION DE LAS ZONAS DE MUESTREO	19
MATERIALES Y METODOS	25
Toma de muestras	25
Grado de acidez (pH)	26
Carbonatos	26
Materia orgánica	27
Textura	29
Determinación de la concentración de Pb, Cd y Ni extraíble con HCl 1 N en suelos	30
Determinación de la concentración de Pb, Cd y Ni en plantas	31
RESULTADOS Y DISCUSION	34
Contenidos de metales en suelos y plantas .	39
Estudio de la distribución del Pb en el suelo	39

	Página
Estudio de la distribución del Pb en las plantas	46
Estudio de la distribución de Cd en el suelo	51
Estudio de la distribución de Cd en las plantas	52
Estudio de la distribución de Ni en el suelo	57
Estudio de la distribución de Ni en las plantas	59
Estudio de los niveles de Pb, Cd y Ni en los suelos y las plantas de las isletas	65
Estudio de la variación de los contenidos de Pb, Cd y Ni con la profundidad en un perfil de suelo	65
Estudio de la relación entre la densidad de tráfico y la contaminación de suelos y plantas con Pb, Cd y Ni	70
Estudio de la relación entre las áreas de la descarga de Pb, Cd y Ni en suelos y plantas .	76
Estudio de la relación entre los cocientes de concentración Pb/Cd en suelos y plantas . . .	76
CONCLUSIONES ,	80
REFERENCIAS	82
APENDICE I	90
APENDICE II	91

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1	Nombre en clave y ubicación de las zonas muestreadas	20
2	Clasificación de suelos según la VII Aproximación	24
3	Condiciones de operación del Perkin-Elmer 303	32
4	% de materia orgánica, pH, % CaCO ₃ y textura de las zonas muestreadas	35
5	Valores de pH de las muestras de suelo a las diferentes distancias desde las carreteras	37
6	Precisión de los análisis de suelos	38
7	Análisis de National Bureau of Standards (NBS) orchard leaves n. 1571	38
8	Variación de los contenidos promedio de Pb, Cd y Ni con la distancia a la carretera en las zonas P-1 y P-2	40
9	Variación de los contenidos promedio de Pb, Cd y Ni con la distancia a la carretera en las zonas P-4 y P-5	41
10	Variación de los contenidos promedio de Pb, Cd y Ni con la distancia a la carretera en las zonas P-6 y P-7	42
11	Variación de los contenidos promedio de Pb, Cd y Ni con la distancia a la carretera en las zonas P-8 y P-9	43
12	Variación de los contenidos promedio de Pb, Cd y Ni con la distancia a la carretera en la zona P-10	44
13	Contenidos de Pb, Cd y Ni en el suelo y la vegetación de jardines intermedios	66
14	Variación del contenido de Pb con la profundidad	67

Tabla		Página
15	Variación del contenido de Cd con la profundidad	68
16	Variación del contenido de Ni con la profundidad	69
17	Variación del área de la descarga de Pb en suelos y plantas con respecto a la densidad de tráfico	72
18	Variación del área de la descarga de Cd en suelos y plantas con respecto a la densidad de tráfico	73
19	Variación del área de la descarga de Ni en suelos y plantas con respecto a la densidad de tráfico	74
20	Variación de los cocientes Pb/Cd con el % de arcilla	79

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Mapa de Puerto Rico con la ubicación de las zonas muestreadas	21
2	Contenido de Pb en suelos de las zonas P-1 y P-2	47
3	Contenido de Pb en plantas de las zonas P-1 y P-2	47
4	Contenido de Pb en suelos de las zonas P-4 y P-5	48
5	Contenido de Pb en plantas de las zonas P-4 y P-5	48
6	Contenido de Pb en suelos de las zonas P-6 y P-7	49
7	Contenido de Pb en plantas de las zonas P-6 y P-7	49
8	Contenido de Pb en suelos de las zonas P-8 y P-9	50
9	Contenido de Pb en plantas de las zonas P-8 y P-9	50
10	Contenido de Cd en suelos de las zonas P-1 y P-2	53
11	Contenido de Cd en plantas de las zonas P-1 y P-2	53
12	Contenido de Cd en suelos de las zonas P-4 y P-5	54
13	Contenido de Cd en plantas de las zonas P-4 y P-5	54
14	Contenido de Cd en suelos de las zonas P-6 y P-7	55
15	Contenido de Cd en plantas de las zonas P-6 y P-7	55
16	Contenido de Cd en suelos de las zonas P-8 y P-9	56

Figura		Página
17	Contenido de Cd en plantas de las zonas P-8 y P-9	56
18	Contenido de Ni en suelos de las zonas P-1 y P-2	60
19	Contenido de Ni en plantas de las zonas P-1 y P-2	60
20	Contenido de Ni en suelos de las zonas P-4 y P-5	61
21	Contenido de Ni en plantas de las zonas P-4 y P-5	61
22	Contenido de Ni en suelos de las zonas P-6 y P-7	62
23	Contenido de Ni en plantas de las zonas P-6 y P-7	62
24	Contenido de Ni en suelos de las zonas P-8 y P-9	63
25	Contenido de Ni en plantas de las zonas P-8 y P-9	63
26	Contenido de Pb, Cd y Ni en suelos de la zona P-10	64
27	Contenidos de Pb, Cd y Ni en plantas de la zona P-10	64
28	Relación entre el área de la descarga de Pb en el suelo y la densidad de tráfico . .	75
29	Relación entre el área de la descarga de Pb en las plantas y la densidad de tráfico	75
30	Relación entre el área de la descarga de Pb en el suelo y el área de la descarga de Pb en las plantas	77
31	Relación entre el área de la descarga de Cd en el suelo y el área de la descarga de Cd en las plantas	77

INTRODUCCION

En los últimos años se ha encontrado que en las áreas aledañas a carreteras de mucho tránsito, los niveles de plomo, cadmio y níquel en el suelo y en la vegetación son excesivamente altos, por lo cual el ecosistema se afecta seriamente debido a la acción dañina ya comprobada de estos metales. Esto atañe fundamentalmente a los suelos, a la vegetación, al biotopo del suelo y también al ser humano; bien sea inhalando la atmósfera que le rodea, o bien a través de la cadena biológica (1-5).

Las fuentes de Pb en la carretera son ciertas gasolinas donde las concentraciones oscilan entre 0.13 y 1.06 g de Pb por litro de gasolina. El Cd proviene de las cubiertas de los neumáticos donde la concentración oscila entre 20 y 90 ppm. Finalmente, el Ni se origina a partir de los agentes lubricantes y de ciertas gasolinas (2, 6).

Puerto Rico presenta una superficie de alrededor de 8,960 Km². El número de vehículos de motor sobrepasa el millón de unidades (7), lo cual supone una de las densidades de vehículos más altas del mundo. Esto hace presumir que los niveles de Pb, Cd y Ni deben ser bastante altos, incluso mayores que lo esperado, ya que en Puerto Rico hay una gran acumulación de industrias que suponen una contaminación adicional. Debido a la gran expansión de las ciudades satélites, nuevas vías de comunicación invaden áreas rurales, lo que provoca una

extensión del problema de la contaminación por estos metales a nuevas zonas fuera de las ciudades.

La casi ausencia de datos sobre los niveles de estos metales en el medio ambiente que rodea a la carretera en Puerto Rico, hace que el principal objetivo de esta investigación sea evaluar los niveles de Pb, Cd y Ni en el suelo y en la vegetación a una distancia variable de la carretera. Otros objetivos importantes son: el estudio del efecto de ciertos factores que influyen en los contenidos de metales como: la densidad de tráfico, la dirección del viento, el pH y el contenido de materia orgánica del suelo. También se hará una comparación entre los niveles encontrados cerca de carreteras de mucho tránsito y los encontrados cerca de carreteras de escasa circulación.

La zona estudiada con más detalle fue el área Oeste de Puerto Rico, además se incluye en el trabajo la carretera número 3 que comunica Carolina con Río Piedras, la cual está considerada como una de las vías de mayor tránsito de la isla.

REVISION DE LA LITERATURA

La contaminación debida al Pb proveniente de las emisiones de los automóviles y otras fuentes industriales ha sido investigada ampliamente en las últimas dos décadas. En cambio, no se ha prestado demasiada atención a otros metales como el Cd y el Ni. Solamente Lagerwerff y Specht (2), Ward y colaboradores (6) y Gish y Christensen (8), informan la presencia de Cd y Ni, además de Pb, en suelos y plantas cercanos a las carreteras.

Los primeros trabajos que dan a conocer la contaminación en el suelo y en la vegetación se deben a Canon y Bowles en 1962 (9) y Leh en 1966 (10). Dichos autores encontraron altas concentraciones de Pb en las plantas (pastos, rábanos y nabos) cultivadas en zonas cercanas a las autopistas.

En Minneapolis, en abril de 1969, se celebró un simposio que bajo el título "Air Quality Lead" se presentaron varios trabajos acerca del tema, destacando por su trascendencia las publicaciones de Motto y colaboradores (1), Daines y colaboradores (11), Dedolph y colaboradores (12), Ter Haar (13) y Schuck y Locke (14). Teniendo como base estos trabajos, en la década de los setenta se han realizado estudios afines en países como: Nueva Zelanda (6, 15), Gran Bretaña (16, 17), España (4), Italia (18), Japón (19) y Egipto (20). Esto indica que este tipo de contaminación es un problema universal y que los estudios locales son necesarios por existir muchos

factores que gobiernan los niveles de estos metales pesados.

Fuentes de Pb, Cd y Ni

Las áreas cercanas a las carreteras están contaminadas con Pb que proviene de la combustión de ciertas gasolinas. La mejor evidencia de este origen se obtiene a partir del estudio de las proporciones isotópicas del Pb, ya que este elemento es una mezcla de los isótopos ^{204}Pb , ^{206}Pb y ^{208}Pb . Según sea el origen del Pb, la proporción isotópica variará (21). Se ha encontrado que las proporciones isotópicas del Pb de las gasolinas y las del Pb del aire, suelo y plantas que rodean a las carreteras están correlacionadas (22).

La adición de Pb a las gasolinas en forma de tertaetil y tetrametil plomo es el medio más barato de elevar el octanaje (23). Las concentraciones de Pb en las gasolinas varían de 0.13 a 1.06 g/l.

No todo el Pb de las gasolinas se emite a la atmósfera. Entre el 70-80% es eliminado al medio ambiente (24). Los datos de emisión de Pb por kilómetro recorrido son dispares: 81 mg Pb/km según Smith (25); 70 mg Pb/km sugieren Cantwell y colaboradores (26) y 25 mg Pb/km como el valor más conservador dado por Ter Haar (27). El último valor de 25 mg Pb/km es el más cercano para el caso de Puerto Rico. El cálculo se hizo de la siguiente manera: suponiendo una concentración promedio de 0.19 g Pb/l, presumiendo un 80% de emisión a la atmósfera y tomando un recorrido promedio de 6.34 km/l (15 mi/gal) se obtiene:

$$\frac{0.19 \text{ g Pb/l} \times 0.80}{6.34 \text{ km/l}} = 24 \text{ mg Pb/km}$$

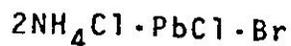
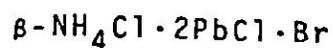
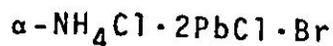
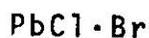
El Cd procede de las cubiertas de los neumáticos y de ciertos aceites lubricantes. El contenido de Cd en diferentes tipos de cubiertas oscila entre 20 y 90 ppm (2). La presencia de Cd en los neumáticos es debida al uso de óxido de cinc en la vulcanización. Generalmente los procesos que requieren cinc están sujetos a la presencia de Cd, ya que ambos proceden del mismo mineral. El contenido de Cd en los aceites lubricantes oscila entre 0.20 y 0.60 ppm (28).

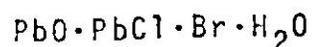
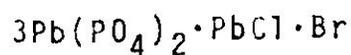
La existencia de ciertas gasolinas y aceites con Ni (29) y la abrasión atmosférica de las partes del automóvil que contienen Ni son el origen del ya detectable gradiente de Ni en zonas cercanas a las carreteras (2).

Química, distribución y dinámica de Pb, Cd y Ni

Plomo:

Los compuestos de alquil plomo se transforman en óxidos de plomo debido a las elevadas temperaturas y presiones que ocurren durante la combustión. Estos óxidos reaccionan a su vez con otros aditivos dando lugar a la formación de las siguientes sales (24, 26):





El cloro bromuro de plomo es la sal de mayor importancia que se emite a la atmósfera a través del tubo de escape (27). Las posteriores reacciones que sufren estas sales son objeto de gran polémica. Pierrard (30) sugirió que el $\text{PbCl} \cdot \text{Br}$ se descomponía fotoquímicamente, resultando óxido de plomo, cloro y bromo libre. Robbinz y Snitz (31), Ter Haar y Bayard (27) confirmaron la emisión de halógenos, pero no apoyaron la descomposición fotoquímica. En cambio, Boyer y Laitinen (32), que estudiaron la estabilidad en el laboratorio de los aerosoles de los haluros de plomo en un medio con H_2O , CO_2 y luz ultravioleta, concluyeron que los halógenos no provenían de las sales de plomo.

El Pb puede existir también en forma orgánica en la atmósfera cercana a la carretera. La evaporación de la gasolina es el origen principal. La exposición en el laboratorio de polvo atmosférico en presencia de tetraetil plomo gaseoso da como resultado la adsorción de Pb orgánico en la superficie de las partículas de polvo.

Conocer la composición y el tipo de reacciones de los compuestos de Pb es esencial para estudiar su efecto ambiental, ya que por ejemplo, la solubilidad de los haluros de plomo es mayor que la de los óxidos y sulfatos de plomo.

El Pb se emite al aire en forma de partículas, presentando un tamaño variable. Daines y colaboradores (11), encontraron que el 65% del Pb del aire, consiste de partículas con un diámetro menor de 2 μm . A medida que el kilometraje del automóvil aumenta, mayor es el tamaño de las partículas (33).

El Pb que entra en la atmósfera se transfiere a los suelos, plantas y animales vía sedimentación, impactación, precipitación e inhalación. Las partículas más gruesas siguen la vía de la sedimentación, mientras que las más ligeras siguen los últimos tres procesos. Varios estudios (11, 14) llegan a la conclusión de que los niveles altos de Pb en el aire decaen rápidamente a medida que la distancia perpendicular a la carretera aumenta. Las partículas de mayor tamaño ($> 9 \mu\text{m}$) se depositan rápidamente; las que tiene un tamaño comprendido entre 1 y 9 μm permanecen en el aire un corto período de tiempo, y por último aquellas que son menores de 1 μm permanecen en la atmósfera un período de tiempo significativo (26).

La descarga de Pb al medio ambiente está relacionada con la densidad de tráfico rodado. Daines y colaboradores (11) estudiaron la relación entre los niveles de Pb atmosférico y la densidad de tránsito. Motto y colaboradores (1), Schuck y Locke (14) y Ganje y Page (34), han mostrado cómo los niveles de Pb en los suelos y la vegetación aumentan con un incremento de la densidad de tráfico. Otros factores que también afectan al contenido de Pb atmosférico son los vientos dominantes, la época del año y la hora del día.

El efecto de la densidad de tránsito se limita a una zona de 76 m a partir del borde de la autopista según Daines y colaboradores (11), 100 m según Ward y colaboradores (35) y 20 m según Alvarez (4). En estudios estacionales hechos en Estados Unidos, se observó que en los meses de otoño los niveles de Pb en el aire eran mayores (11, 26, 27). La explicación que se da a este aumento es el patrón favorable de vientos que ocurre en esta época, los niveles de Pb atmosférico cerca de la carretera alcanzan un valor máximo en las horas de mayor tránsito rodado, o sea, en horas tempranas de la mañana y al atardecer (38).

El conocimiento de las reacciones químicas que sufren las partículas de Pb una vez que están en el suelo es incompleto. Singer y Hanson (39), especulan que el Pb probablemente reacciona con los aniones del suelo: SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , o CO_3^{2-} , o bien con los complejos orgánicos y arcillosos del suelo. Cualquiera de estas reacciones inmovilizará al Pb e impedirá su absorción por la planta. Asimismo, el Pb queda inmovilizado por la acción microbiana. Lagerwerff y Brower (40) estudiaron el comportamiento del Pb de cambio, y observaron que la solubilidad de los precipitados de Pb aumentaba al disminuir el pH del suelo. Olson y Skojerboe (41) empleando la difracción de rayos X para identificar los compuestos de Pb, encontraron que alrededor de 70% del Pb presente, estaba en forma de sulfato de plomo. Además, propusieron que la conversión podía suceder en la atmósfera o en el suelo, ya que el ácido sulfúrico formado en la atmósfera a partir del SO_2 puede reaccionar en el aire con las partículas

de Pb. Dicha reacción puede suceder en la interfase suelo atmósfera, ya que el anión SO_4^{2-} está presente.

El Pb se concentra en las capas superficiales del suelo, en los primeros 6 cm según Ward y colaboradores (35). A base de los trabajos publicados, se observa que una muestra de Pb tomada a escasos metros de la autopista, posee un nivel 30 veces superior al de la línea de fondo. A 10 m de distancia es de 5-15 veces el contenido de la línea de fondo, y a 20 m diversos estudios sugieren que la influencia de la autopista se pierde (2, 42, 43).

Los perfiles cercanos a las carreteras presentan contenidos más altos de Pb en las capas superiores. El movimiento en profundidad está restringido igualmente que en los perfiles de suelos no cercanos a las carreteras (44). Esta inmovilidad, es debida a que el Pb se enlaza con las sustancias húmicas y también con los aniones del suelo, fundamentalmente SO_4^{2-} . La concentración del Pb en la capa superior del suelo (la de mayor actividad biológica) tiene grandes implicaciones en la vida de los seres del suelo, de ahí el interés de estudiar los niveles de esta capa.

El Pb que se acumula en la vegetación del ecosistema que rodea a las carreteras proviene principalmente de la atmósfera y también del suelo. Los mecanismos por los cuales el Pb entra en la planta no están muy claros. La mayoría de los autores consideran que la toma de Pb por vía aérea es el principal (1, 2, 25). El Pb que está adherido pero no incorporado al vegetal,

se puede eliminar mediante lavado (5;14). Sin embargo, aún utilizando poderosas técnicas de lavado, ha sido imposible eliminar todo el Pb de la superficie foliar (45). Ter Haar (13) señala que aunque la contaminación que proviene de la atmósfera que rodea a la planta es importante, el suelo es la fuente principal de Pb de las partes comestibles de la mayoría de las plantas. Existen escasas evidencias de que el Pb se transloque de la superficie foliar al interior de la hoja. Aunque se desconozca un mecanismo para el transporte de Pb de la superficie foliar al interior de la planta, la presencia superficial no debe ignorarse, ya que estas plantas sirven para alimentar ganados, y pueden suponer una ingestión significativa del Pb por los animales (46).

Mediante estudios hidropónicos (47), se ha encontrado que la toma de Pb por la planta es pasiva, que depende del pH del suelo y finalmente que es relativamente insensible a los inhibidores metabólicos. Parece ser que el Pb se localiza principalmente en la pared celular (48). Zimdahl (49) indica que el Pb tiene cierta movilidad en el interior de la planta bajo ciertas condiciones, y que la concentración de Pb en el interior es mucho mayor ante una toma de la misma cantidad de Pb vía raíz que con respecto a una toma por vía aérea a través de la superficie foliar.

En cuanto a la identidad química del Pb en las plantas, se ha encontrado pirofosfato de plomo en raíces de habas con elevadas concentraciones de plomo. Asimismo, se identificó

ortofasto de plomo en raíces de guisantes. Estudios de solubilidad sugieren que el pirofosfato de plomo debe ser la forma predominante en la planta (50).

Estudios representativos de la contaminación de pastos por Pb en el entorno de las carreteras (1, 2, 42, 51), indican invariablemente que los niveles de Pb descienden a medida que la distancia a la carretera aumenta. Motto y colaboradores (1) y Smith (52) presumen que el contenido de Pb en pastos que se desarrollan en zonas lejanas a las carreteras oscila entre 1 y 5 ppm a base del peso seco. Los valores obtenidos en los estudios representativos van de 50 a 900 ppm de Pb a base del peso seco en las áreas más cercanas a la carretera. Generalmente estos valores son de tres a diez veces mayores que el valor de la línea de fondo o control. La contaminación debida al Pb en pastos varía positivamente con la densidad de tráfico.

Los niveles encontrados en los cultivos aprovechables para el consumo humano varían mucho; un factor muy importante es el tipo de planta. Los niveles dados para la línea de fondo son menores de 5 ppm a base del peso seco (1). Los cultivos aledaños a las carreteras presentan niveles que van de 50 ppm a 742 ppm (348 veces el valor de la línea de fondo). Normalmente, los valores oscilan de 20 a menos de 10 veces el valor de la línea de fondo (25). Los valores más altos de Pb no se encuentran en las partes comestibles del vegetal, sino en la superficie foliar (1).

En la mayoría de los casos la toma de Pb a través del

suelo fue muy significativa, sobre todo cuando el pH del suelo era bajo. MacLean y colaboradores (53) sugirieron que la adición de materia orgánica, cal y fosfatos reduciría la toma del metal por la planta a través de la raíz.

Cadmio:

La identidad química de los compuestos de Cd que se depositan en la superficie de la carretera es desconocida. El rozamiento de los neumáticos con la superficie de asfalto hace que se forme una película donde se localiza el Cd. Una vez en la carretera, el Cd se desplaza a ambos lados mediante escorrentía. El Cd es sólo ligeramente soluble en medios acuosos asociados con aniones fosfato y carbonato que son muy comunes en el suelo (2). Por las mismas razones su movilidad a lo largo del perfil será escasa (6).

Los escasos trabajos dedicados al cadmio muestran que el contenido de dicho metal disminuye con la distancia a la carretera y que además el gradiente de concentración con respecto a la distancia seguía el siguiente orden: $Cd > Pb > Ni$ (2, 8). Los niveles máximos encontrados en suelos aledaños a carreteras de alto tránsito oscilan entre .94 y 1.82 ppm (extracción con HCl 1 N) y de 40-60 ppm (digestión con una mezcla de HNO_3 concentrado y HF 1:1) (6).

Contrariamente al caso del Pb, el Cd entra principalmente a la planta por la raíz (54). Es interesante reseñar que los cocientes de concentración Pb/Cd en el suelo, promediados a distintas distancias de la carretera, siempre excedieron los

valores de dichos cocientes en la vegetación. Esto indica que las plantas acumulan Cd preferentemente. Este efecto se reduce con un aumento del pH del suelo, lo cual indica que el Cd está sujeto en mayor medida que el Pb a los efectos asociados a un aumento de la saturación con bases de los complejos del suelo. Street y colaboradores (55) demuestran la influencia decisiva del pH del suelo en la toma de Cd por la planta. Un aumento en una unidad de pH puede suponer una disminución mayor del 50% en la toma del metal por la planta. Indican además que pH mayores de 7.25 limitan grandemente la solubilidad del cadmio en el suelo.

Dentro de la planta, el Cd es bastante móvil; tiene tendencia a acumularse en las hojas (56). Asimismo los niveles de Cd en plantas fueron correlacionados significativamente con los contenidos de cinc y cobre en las mismas partes de la planta (57).

Los niveles encontrados en pastos cercanos a las carreteras de alta densidad de tráfico van de 0.3 a 2.2 a base del peso seco (8, 2).

Níquel:

No se tiene información sobre la forma química de los compuestos de Ni que pasan a la carretera. Al igual que el Cd, el Ni una vez asentado en el pavimento, se desplaza a ambos lados debido a la esorrentía.

Hinesly y colaboradores (58) estudiaron la movilidad del Ni en el suelo y comprobaron que se trataba de un elemento que

tenía gran afinidad hacia la materia orgánica, formando con ésta complejos muy estables. Parece ser que esta unión ocurre a través de los grupos carboxílicos, fenólicos y amídicos. También puede asociarse con los complejos inorgánicos del suelo.

Los niveles de Ni en suelos cercanos a las carreteras oscilan entre 4.7-7.4 ppm (extracción con HCl 1 M). A medida que la distancia a la carretera aumenta, los niveles de Ni disminuyen progresivamente (2).

Según Le Riche (59), una vez que el Ni entra en la planta, se acumula en las partes aéreas de la misma. La absorción del metal por la planta decrece ostensiblemente al aumentar el pH del suelo. Patterson (60) indica que la toma es casi nula a partir de valores de pH superiores a 7.7.

El contenido de Ni en los pastos más próximos a la carretera oscila entre 3.8-5.0 ppm a base del peso seco (2).

Efectos de los metales pesados en el biotopo del suelo

La acumulación de metales pesados en los perfiles de ecosistemas naturales produce alteraciones en la descomposición de la materia orgánica y ciertas anomalías en el ciclo nutritivo de dicho ecosistema. Estas alteraciones son debidas a que tales metales pesados inhiben la acción de ciertas enzimas del suelo, además de causar intoxicaciones en los microorganismos que habitan en el suelo (61, 62). Estudios hechos por Tyler y colaboradores (63) indican que el Pb del suelo está relacionado con el ciclo del nitrógeno y con las transformaciones microbiológicas de Fe, P y S.

En diversos trabajos se ha estudiado la fauna que vive en las proximidades de las carreteras de alta densidad de tráfico, observándose concentraciones altas de Pb, Cd y Ni en los animales. Gish y Christensen (8), muestran cómo las lombrices que viven en las zonas próximas a las carreteras poseen las concentraciones más altas, y que estas concentraciones a su vez estaban relacionadas con la densidad de tráfico. Las lombrices son depredadas por pájaros, anfibios y mamíferos lo que provoca la acumulación de metales pesados en tales animales. Quarles y colaboradores (3) obtuvieron conclusiones análogas a las de Gish y colaboradores trabajando con mamíferos inferiores.

Efectos del Pb, Cd y Ni en las plantas

Según experimentos llevados a cabo por Bazzaz y colaboradores (64), las altas concentraciones de Pb en las plantas producen una disminución en el peso seco de éstas. También informan que altas concentraciones de Pb, Cd y Ni frenan el intercambio de gases en las hojas.

Los fenómenos de fotosíntesis y transpiración se reducen simultáneamente ante la presencia de tales metales, ya que éstos afectan la apertura y el cierre de los estomas (65, 66). Estudios acerca de la fotosíntesis del maíz y del girasol cultivados hidropónicamente, sugieren que la rapidez neta de la fotosíntesis disminuye grandemente con Cd, Ni y Pb siguiendo este orden en toxicidad (67).

La germinación de semillas se altera ante la presencia de Cd, Ni y Pb; concretamente la elongación radical disminuye. El mecanismo de acción de estos metales se desconoce, pues la transferencia de carbohidratos desde los tejidos de almacén hasta las regiones de crecimiento activo es relativamente insensible a la presencia de metales pesados (67).

El Pb, el Cd y el Ni inhiben el transporte de electrones en las mitocondrias aisladas del maíz (68, 69). La inhibición sucede en una etapa temprana, probablemente durante la reacción de la dehidrogenasa inicial. Sin embargo, el Cd inhibe también la acción de la oxidasa final. Asimismo, la producción de ATP asociado a la transferencia de electrones se reduce por la acción del Pb y del Cd. Las altas concentraciones de Pb y las bajas concentraciones de Cd inhiben la elongación de las raíces primarias. Los efectos tóxicos del Cd se amioraron con la adición de Zn a la solución nutritiva del cultivo. Parece ser que el Cd actúa tóxicamente al reemplazar al Zn en conformaciones moleculares críticas. El Zn es un componente esencial en la estructura de los ribosomas, pero todavía no se ha determinado el tipo de asociación del Cd con los ribosomas (70).

En estudios de significación ecológica hechos con líquenes, se informa que en áreas cercanas a autopistas donde los niveles de Pb en la atmósfera eran muy altos, el crecimiento de la especie *Pseudoparmelia baltimorensis* en su etapa juvenil era inhibido (71).

Efectos de Pb, Cd y Ni en la salud humana

Los efectos nocivos de los metales pesados en el hombre se deben principalmente al poder acumulativo de éstos, por lo cual la acción dañina suele manifestarse a largo plazo. La intoxicación por Pb (saturnismo), es un ejemplo de una enfermedad corriente de origen ambiental. La mayoría de los casos de saturnismo, se deben a la absorción y almacenamiento progresivo de pequeñas cantidades de Pb.

El Pb ejerce su efecto principal en el sistema nervioso central y en el riñón (72). A escala molecular, perturba la biosíntesis de la hemoglobina, ya que inhibe la acción de la enzima δ -ácido aminolevulínico dehidratasa, la cual es imprescindible para la biosíntesis del anillo hémico (73). Parece ser que la intoxicación por Pb supone un aumento en los niveles de colesterol, β -lipoproteínas y β y γ -globulinas, lo que aumenta las probabilidades de arterioesclerosis (74). El Pb está considerado como un agente potencialmente cancerígeno (75).

El Cd es un metal tóxico que tiene una vida media biológica muy prolongada. Se acumula principalmente en el hígado y en el riñón. Se combina con una proteína soluble de bajo peso molecular denominada tioneína que tiene gran afinidad por dicho catión. La síntesis de metaloproteínas es un mecanismo de defensa contra el Cd y otros metales pesados (76).

Se ha demostrado que el Cd está implicado en la hipertensión (77), también causa bronquitis y enfisema pulmonar (78).

La manifestación de toxicidad debida al Cd más espectacular se observó al norte del Japón. Las intoxicaciones se debieron a la ingestión de arroz y soja con una elevada concentración de Cd (0.37 - 3.36 ppm). La enfermedad causada se llama Itai Itai (79). Es importante señalar que existe una relación significativa entre el contenido de Cd en la atmósfera y determinadas enfermedades cardiovasculares (80).

El peligro del Ni se debe a que es un potente agente cancerígeno (75).

UBICACION Y DESCRIPCION DE LAS ZONAS DE MUESTREO

La investigación se llevó a cabo fundamentalmente en el área Oeste de Puerto Rico. Siendo la carretera número 2 la vía de mayor estudio, se muestreó la carretera 406 cerca de Añasco para utilizarla como control. Finalmente, también se tomaron muestras en la carretera número 3 (Avenida 65 de Infantería), por ser ésta la de mayor tránsito de la Isla. A continuación en la Tabla 1 se indica el nombre en clave de cada zona, la localización y la orientación. En la Figura 1 se observa el mapa de la Isla con la ubicación de las distintas zonas.

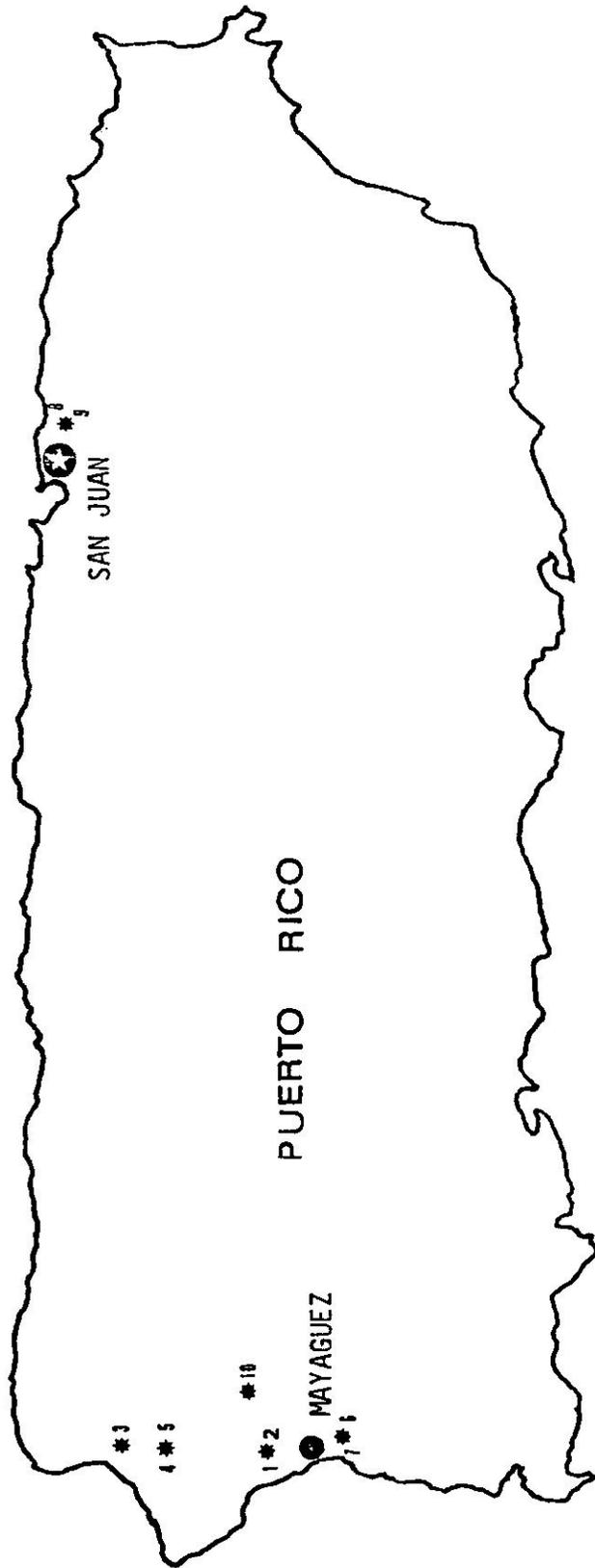
La región Oeste se caracteriza por sus llanuras interrumpidas por montañas pequeñas. Los suelos residuales son los que predominan en la zona: éstos se originan a partir de tobas andesíticas y serpentinita. No ocurren formaciones de calizas importantes (81).

El clima se caracteriza por períodos de lluvia y sequía definidos. La precipitación pluvial anual oscila desde 1397 mm en Rincón a 2082 mm en el área de Mayagüez. Las lluvias más abundantes y de mayor intensidad ocurren de mayo a octubre, mientras que la sequía sucede de diciembre a marzo. La temperatura promedio de la región es de 27°C en verano y 23°C en el invierno (82).

El viento de superficie en Puerto Rico es principalmente de componente Este, con leves variaciones entre el verano y el invierno. Se afecta por factores locales tales como la

Tabla 1. Nombre en clave y ubicación de las zonas muestreadas

Nombre en clave	Carretera	Km	Orientación
P-1	2	147	lado Oeste
P-2	2	147	lado Este
P-3-J	2	150	Jardín intermedio
P-4	2	133	lado Oeste
P-5	2	133	lado Este
P-6	2	159	lado Este
P-6-J	2	159	Jardín intermedio
P-7	2	159	lado Oeste
P-8	3	9	lado Norte
P-8-J	3	9	Jardín intermedio
P-9	3	9	lado Sur
P-10	406	1	lado Oeste



* ZONAS MUESTREADAS

Figura 1. Mapa de Puerto Rico con la ubicación de las zonas muestreadas.

topografía y el efecto de mar y tierra. Este último da lugar a las brisas marinas. En el área de Mayagüez, se observa cómo a veces la brisa marina del Oeste vence la corriente del Este. Es de señalar que en la costa Oeste la brisa marina se opone al viento del Este por la tarde y está a favor durante la noche. En los Apéndices I y II se pueden ver las frecuencias mensuales (%) de la dirección del viento en el Aeropuerto de Mayagüez y en el de la Base Borinquen de Aguadilla.

Aparte de la variación diurna descrita anteriormente, existe un ciclo diurno en la velocidad del viento: ésta es máxima durante la tarde, que es cuando el calentamiento solar alcanza su mayor intensidad, creándose corrientes convectivas y turbulencias. La velocidad es mínima durante la noche.

Con respecto al área de las zonas P-8 y P-9 (Avenida 65 de Infantería), es de destacar que son suelos de aluvi6n, donde los vientos predominantes provienen del Noreste y del Sureste, la precipitaci6n pluvial anual es de alrededor de 1905 mm y la temperatura promedio es de 28°C en el verano y de 24°C en el invierno.

Es importante indicar que los datos acerca del viento, sólo son aplicables a las zonas P-1, P-2, P-4 y P-5. A pesar de que todas las zonas presentaban una topografía plana o ligeramente ondulada, las zonas P-6, P-7, P-8 y P-9 estaban rodeadas de montañas muy cercanas, con lo cual no se puede aplicar una descripci6n general debido a los factores locales.

En la Tabla 2 se indican los tipos de suelos clasificados

según la Séptima Aproximación.

Finalmente, las especies vegetales pertenecen al orden de las gramíneas, dominando las siguientes especies: *Chenchrus echinatus* L., *Sorghum halepense*, *Paspalum paniculatum* L. y *Stipa ichu*.

Tabla 2. Clasificación de suelos según la VII Aproximación

Zona	Serie de suelo	Familia	Subgrupo	Orden
P-1	Coloso	Fino, mixto noácido, isohipertérmico	Aeric Tropic Fluvaquents	Entisols
P-2				
P-4	Río Piedras	Arcilloso, caolinitico, isohipertérmico	Typic Tropudults	Ultisols
P-5				
P-6	Lares	Arcilloso, mixto, isohipertérmico	Aquic Tropohumults	Ultisols
P-7				
P-10	Lares	Arcilloso, mixto, isohipertérmico	Aquic Tropohumults	Ultisols

MATERIALES Y METODOS

Toma de muestras

Se tomaron las muestras de suelos y plantas en ambos lados de la carretera a las siguientes distancias en línea perpendicular al trazado de la vía: 3.3, 10.0, 20.0 y 33.3 m, más una muestra de fondo situada a más de 100 m. En algunas ocasiones, se tomaron muestras a 66.6 m. La toma de suelo fue superficial, con una profundidad máxima de 5 cm. También se hizo un perfil en cada lado muestreando a distintas profundidades (0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm). Cuando hubo un jardín intermedio entre ambos lados se tomaron también muestras de suelo y planta. De la planta solamente se muestreó la parte aérea.

Todas las muestras se almacenaron en bolsas plásticas y se llevaron a una cámara frigorífica a una temperatura de 4°C.

Todos los lugares escogidos presentaron una topografía llana, si bien, en algunos casos había una ligera inclinación hacia abajo en los primeros 20 metros. Se evitó la presencia de árboles, pues éstos hacen de barrera protectora frente a los agentes contaminantes (83).

Las muestras de suelo se dejaron secar al aire. Una vez secas, se molieron en un mortero de porcelana y se pasaron por un tamiz de 2 mm de ojo. Hecho esto, ya se pudo comenzar a hacer los distintos análisis.

Las muestras de plantas se secaron en un horno a 95°C

durante 2 días por lo menos. Una vez secas, se molieron en una licuadora cuyas aspas eran de acero inoxidable. Ya pulverizadas, las muestras vegetales se volvieron a secar en el horno a 95°C; antes de pesar se dejaron enfriar en un desecador.

En las muestras de suelo se determinaron algunas propiedades como pH, materia orgánica, carbonatos y textura, que están relacionadas con la dinámica de los metales pesados en el suelo, y con su entrada a la planta. Por último en las muestras de suelo y de planta (sin lavar), se determinaron espectrofotométricamente los niveles de Pb, Cd y Ni. A continuación se explica con detalle cada una de las determinaciones. En las zonas P-8 y P-9 se determinaron los niveles de Pb, Cd y Ni de las muestras de plantas lavadas durante una hora con agua corriente y posteriormente con agua destilada.

Grado de acidez (pH)

El pH del suelo se determinó por el método del punto pastoso (84). Se usó un medidor de pH Corning equipado con un electrodo combinado de vidrio y calomelanos. Antes de comenzar las lecturas de pH, se aguardó un tiempo mínimo de una hora para que se estableciese el equilibrio entre el suelo y la disolución. Se le hizo la medida de pH a todas las muestras de suelo.

Carbonatos

Los carbonatos alcalinotérreos se determinaron mediante

una neutralización ácida, cuyo procedimiento es el siguiente (85):

Se colocan 5 g de suelo seco y pasado por un tamiz de 2 mm en un matraz Erlenmeyer de 150 ml, se añaden a continuación 25 ml de HCl 1 M y se deja reposar durante 24 horas; se filtra y se lava el ácido del suelo con H₂O. A continuación se determina la cantidad de ácido no consumida mediante una valoración con NaOH 1 M previamente factorado con ftalato ácido de potasio. Se usó fenolftaleína como indicador. El % de CaCO₃ se calculó usando la siguiente ecuación:

$$\text{CaCO}_3 \text{ equivalente en \%} = \frac{(\text{meq de HCl añadido} - \text{meq NaOH gastado})}{\text{peso de la muestra en g}}$$

Así se calcula la alcalinidad total expresada como % de carbonato. Estos valores son ligeramente superiores a los reales ya que hay otras sustancias en el suelo que pueden reaccionar con el ácido.

Materia orgánica

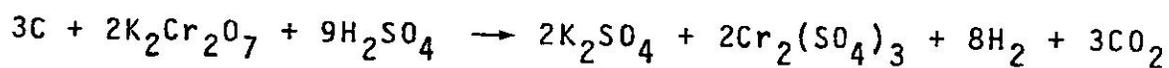
El carbono se encuentra en los suelos formando parte de cuatro tipos de materiales orgánicos y minerales:

1. Carbonatos minerales, principalmente CaCO₃.
2. Formas muy condensadas próximas al carbono elemental (carbón vegetal, grafito, hulla).
3. Residuos de plantas, animales y microorganismos más o menos descompuestos, denominados "humus".
4. Residuos orgánicos poco alterados, que sufren

descomposiciones bastante rápidas en el suelo.

El carbono orgánico total incluye las tres últimas formas. La materia orgánica químicamente activa es un factor fundamental en la génesis del suelo.

Para esta determinación se siguió el método propuesto por Walkey y Black (84), que consiste en una oxidación húmeda del carbono orgánico del suelo mediante un exceso de dicromato potásico normal en medio fuertemente sulfúrico, utilizando el calor de disolución de este ácido para facilitar la oxidación que tiene lugar:



El exceso de dicromato se valora con sulfato ferroso amoniacal en presencia de ácido fosfórico, usando ferroína como indicador. El procedimiento es el siguiente:

Se pesa 1 g de suelo seco y pasado por un tamiz de 2 mm, se añaden 10 ml de $K_2Cr_2O_7$ 1 N y seguidamente se agregan 20 ml de H_2SO_4 concentrado, se agita vigorosamente y se deja enfriar media hora por lo menos, al mismo tiempo se prepara un blanco con el que se sigue el mismo procedimiento. A continuación se lleva el volumen a 200 ml con H_2O destilada y se añaden 10 ml de ácido fosfórico al 85%, antes de comenzar la titulación se añaden 10 gotas de ferroína. Se valora el dicromato no consumido con una solución de sulfato ferroso amoniacal 0.5 N. El % de materia orgánica se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ M. O.} = 10 (1 - T/S) 1.34$$

donde T = valoración de la muestra (ml de disolución ferrosa). S = valoración del blanco (ml de disolución ferrosa).

Textura

Por tratarse del mismo tipo de suelo en las diferentes distancias a la carretera a partir de 20 m, se preparó una muestra promedio mezclando cantidades alícuotas de suelo de distintas distancias a partir de 20 metros. Se empleó el método de Bouyoucus (86), cuyo procedimiento es el siguiente:

Se pesan 50 g de suelo, previamente seco y pasado por un tamiz de 2 mm. A este suelo se le añade H_2O y 50 ml de dispersante, que consiste en una mezcla de 35.7 g de hexametáfosfato sódico y 7.94 g de carbonato sódico en 1 l de disolución. Se agita vigorosamente la muestra tratada con el dispersante, luego se pasa esta disolución a una probeta especialmente aforada donde se vuelve a agitar de nuevo. Acabada la agitación se toma la temperatura y se hace una lectura con el hidrómetro a los 40 s. De esta manera se conoce la cantidad de limo y arcilla que hay en la suspensión. A las 2 horas, se hace una nueva lectura con el hidrómetro y se toma la temperatura, determinándose así la cantidad de arcilla en suspensión. La fracción arena se obtuvo por diferencia.

Dividiendo la lectura corregida del hidrómetro por el peso de la muestra en gramos y multiplicando por 100, se obtiene

el porcentaje del material que permanece en suspensión

Determinación de la concentración de Pb, Cd y Ni extraíble con HCl 1 N, en suelos

Para determinar Pb, Cd y Ni en suelos, primeramente hay que hacer una extracción de tal manera que se disponga de dichos elementos en la disolución. El agente extractante usado fue HCl 1 N, ya que según estudios de Samuelson (87), la formación de complejos solubles de Pb(II), Cd(II) y Ni(II) es máxima a esa concentración de ácido. Se descartó el uso de agentes orgánicos para evitar interferencias.

La extracción se hizo de la siguiente manera: a 25 g de suelo seco y pasado por un tamiz de 2 mm se le añadieron 50 ml de HCl 1 N. Se dejó reposar la mezcla durante 24 horas, después de lo cual se agitan las disoluciones en un agitador de vaivén Burrel durante una hora. Después de esto se filtra la mezcla y se conserva el filtrado en envases de nalgeno. De esta manera ya están preparadas las muestras para analizar los metales por espectrofotometría de absorción atómica.

Sucede que algunas muestras, sobre todo las más próximas a la carretera, presentan un contenido alto en carbonatos; si se añaden a estas muestras 50 ml de HCl 1 N, parte del ácido se consumirá al neutralizar los carbonatos, con lo cual la concentración de HCl no será la adecuada para extraer los metales. Debido a esto se recurre a un método por el cual se añade la suficiente cantidad de ácido como para neutralizar los carbonatos y para extraer los metales, de tal manera que

La disolución extractora sea 1 N y que se conserve la relación 1:2. El método consiste en tratar 5 g de suelo con 25 ml de HCl 1 N, se deja reposar durante 24 horas, después se titula con NaOH 1 N para determinar el HCl consumido por el suelo. entonces se prepara una disolución más concentrada de HCl que proveerá los miliequivalentes de ácido necesarios para la neutralización y para la extracción.

Los elementos Pb, Cd y Ni fueron determinados utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin-Elmer, modelo 303. Se operó con una llama de aire/acetileno. Las longitudes de onda, la apertura, la corriente y las concentraciones de los estándares usados se indican en la Tabla 3. Las disoluciones estándares al igual que las muestras, se prepararon con HCl 1 N.

Determinación de la concentración de Pb, Cd y Ni en plantas

Las plantas pulverizadas y secas a una temperatura de 95°C durante 48 horas, se pasan a un desecador. Se pesan 2 g de muestra y se ponen en un vaso de precipitado de 150 ml. Primeramente se añaden 50 ml de agua regia modificada (tres partes de HNO₃ concentrado y una de HCl concentrado). Los vasos cubiertos con un vidrio de reloj, se colocan en una plancha caliente. La temperatura de la disolución durante la digestión oscila de 90 a 95°C. Se continúa la digestión hasta que el volumen se reduce a 1 ml. A continuación se añaden 25 ml de H₂O₂ al 30%. Se deja evaporar hasta un volumen de 3 ml, tras lo cual se añaden 6 ml de HCl 2 N y se

Tabla 3. Condiciones de operación del Perkin-Elmer 303

Parámetros instrumentales	Plomo	Cadmio	Níquel
Fuente: lámpara sencilla de cátodo hueco	Pb	Cd	Ni
Corriente (mA)	11	11	18
Longitud de onda (nm)	283.3	228.8	232.0
Apertura (nm)	1.0	1.0	0.3
Combustible	Acetileno	Acetileno	Acetileno
Presión (psig)	5	5	5
Flujo (l/min)	5	5	5
Oxidante	Aire	Aire	Aire
Presión (psig)	30	30	30
Flujo (l/min)	25	25	25
Velocidad de aspiración (ml/min)	4.0	4.0	4.0
Expansión de escala	X1	X2	X2
Concentraciones estándares (ppm)	0-20	0-0.5	0-1.0
Sensitividad (ppm)	0.6	0.03	0.1

vuelve a evaporar hasta un volumen de 3 ml. Una vez enfriada la mezcla, se filtra para eliminar pequeñas cantidades de sólidos cerosos, llevando las disoluciones a un volumen final de 10 ml con agua destilada. Cada vez que se hizo la digestión de una serie de muestras, se prepararon 2 blancos que siguieron los mismos pasos que las muestras. Preparadas las muestras, se determinaron las concentraciones de Pb, Cd y Ni análogamente al caso de las muestras de suelo.

Es importante indicar que se siguieron los tratamientos recomendados por la E. P. A. para la cristalería usada (88).

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 4, se muestran los valores del % de materia orgánica, pH, carbonatos y textura de las distintas zonas estudiadas. En el caso del % de materia orgánica, carbonatos y textura, los valores corresponden a muestras promedio preparadas mezclando cantidades alícuotas de suelos tomados a diferentes distancias, excluyendo de la mezcla las muestras más cercanas a la carretera. En cuanto al pH, los valores corresponden a la media de los valores individuales a partir de 20 metros de distancia a la carretera, ver Tabla 5. La exclusión de las muestras que están a menos de 20 metros de distancia a la carretera, es debido a que los suelos están muy afectados por la proximidad de la carretera y sus propiedades no son representativas de la zona estudiada.

Los % de materia orgánica llegan a alcanzar valores francamente altos, sobre todo en las zonas P-6, P-7, P-8, P-9 y P-10. En cambio, los niveles de carbonatos son muy bajos y a veces prácticamente inexistentes. Las texturas de todas las zonas no difieren mucho entre sí, dominando los suelos franco arcillosos y arcillosos; esto indica que el tamaño de las partículas es bastante pequeño, siendo ésta una condición que favorece la retención de los metales por el suelo.

Los valores de las muestras de las zonas intermedias (isletas) P-3-J, P-6-J y P-8-J difieren bastante de los valores a ambos lados de la carretera; esto es debido a que los suelos

Tabla 4. % de materia orgánica, pH % CaCO₃ y textura de las zonas muestreadas.

Zona	% M. O. ¹	pH ²	% CaCO ₃ ¹	Textura ¹
P-1	1.92	6.15	3.5	F-Ac
P-2	2.37	5.50	2.0	F-Ac
P-3-J	8.37	7.50	17.2	--
P-4	3.45	4.75	0.0	Ac
P-5	2.06	5.51	0.0	Ac
P-6	5.77	5.20	0.0	Ac
P-6-J	6.75	7.20	6.0	--
P-7	5.58	5.35	2.5	F-Ac
P-8	4.99	6.85	3.6	F-Ac
P-8-J	5.12	7.35	6.3	--
P-9	4.40	4.30	2.3	Ac-Ar
P-10	6.29	4.55	0.0	Ac

¹Valores de muestras promedio

²Valores medios de muestras

de los jardines intermedios son diferentes.

El pH de las zonas es ácido a excepción de la zona P-8. En la Tabla 5 se ve cómo generalmente, a medida que la distancia a la carretera aumenta, el pH disminuye. Esto se debe a que en los lugares próximos a las carreteras, las distintas sustancias que se utilizaron en la construcción de éstas, provocaron un aumento del pH. También se observa que el pH de los lados opuestos son similares, excepto en las zonas P-8 y P-9. Esto es explicable, ya que la zona P-8 es un lugar sin cultivos mientras que la zona P-9 había sido cultivada, y por tanto, tratada con abonos que pudieron provocar la disminución del pH, entre otros factores.

Antes de realizar los análisis de los metales en el suelo y la vegetación, se estudió la precisión de los análisis. Para la determinación de los metales extraíbles con HCl 1 N en suelos, se estimó la precisión mediante el análisis de réplicas de una muestra de suelo. Los resultados de la Tabla 6 indican que la precisión es muy aceptable en los análisis de los tres metales.

En el caso de la determinación de los contenidos totales de los metales en plantas, se utilizó "National Bureau of Standards orchard leaves No. 1571" para estudiar la precisión y el porcentaje de recuperación del método usado. En la Tabla 7 se observa que los resultados son bajos para el caso del Pb, con un 89% de recuperación. En los casos de Cd y Ni se obtuvo 109% y 100% respectivamente. La baja recuperación en

Tabla 5. Valores de pH de las muestras de suelo a las diferentes distancias desde las carreteras.

Zona	Distancia a la carretera (metros)					
	3.3	10	20	33.3	66.6	fondo
P-1	7.25	7.00	6.10	6.00	6.05	6.40
P-2	7.30	--	6.60	5.55	4.80	4.95
P-4	7.55	4.90	4.90	4.50	--	--
P-5	7.35	4.80	5.00	6.75	--	--
P-6	7.20	7.15	5.90	5.25	4.45	4.95
P-7	7.30	6.30	5.80	4.70	4.65	5.10
P-8	7.50	7.20	7.25	7.35	--	6.00
P-9	7.60	7.25	4.50	4.00	--	4.35
P-10	4.55	4.60	4.50	4.60	--	4.60

Tabla 6. Precisión de los análisis de suelos.

Metal	Núm. de réplicas	\bar{x}	Sd	Precisión
Pb	12	95.2	2.6	2.7%
Cd	14	0.30	0.01	3.3%
Ni	12	5.6	0.2	3.5%

Tabla 7. Análisis de National Bureau of Standards (NBS) orchard leaves n. 1571.

	Núm. de réplicas	Valor certificado	Valor obtenido
Pb, ppm	11	45 ± 3	40 ± 3
Cd, ppm	5	0.11 ± 0.02	0.12 ± 0.05
Ni, ppm	7	1.3 ± 0.2	1.3 ± 0.4

el análisis de Pb es debida a que parte del metal se acumula o almacena en la pared celular (48) y la digestión no es lo suficientemente fuerte como para disolver todo el metal.

El estadístico usado en la Tabla 7 es 2 desviaciones estándar para el análisis realizado en la investigación y 2 desviaciones estándar o el intervalo completo de los valores observados en los datos certificados de "National Bureau of Standards".

Contenidos de metales en suelos y plantas

En las Tablas 8-12 se pueden ver los niveles de los metales Pb, Cd y Ni en las distintas zonas y su variación con la distancia a la carretera. Esto último se observa mejor en las correspondientes Figuras 2-27, donde el eje de abscisas es la distancia a la carretera en metros y el eje de ordenadas el contenido promedio del metal en ppm. Este valor promedio se obtiene de dos valores, ya que de cada muestra se hizo un duplicado.

Estudio de la distribución del Pb en el suelo

Los niveles de Pb en el suelo disminuyen claramente a medida que aumenta la distancia a la carretera. En las zonas P-4 (Tabla 9 y Figura 4) y P-8 (Tabla 11 y Figura 8) el contenido de Pb a 10 m es menor que a 20 m; este tipo de anomalía ha sido observada en algunos trabajos (35). La razón más probable es que existe un desnivel inicial entre la carretera y la zona, lo que provoca que por escorrentía se pierda Pb del suelo. Es interesante observar que esta anomalía no sucede

Tabla 8. Variación de los contenidos promedio de Pb, Cd y Ni con la distancia a la carretera en las zonas P-1 y P-2

Zona	Metal	Distancia a la carretera (m)	Contenido promedio (ppm)		
			Suelo	Planta	
P-1	Pb	3.3	906	40.0	
		10.0	111	19.3	
		20.0	29.7	16.4	
		33.3	17.6	5.8	
		66.6	13.4	8.3	
		fondo	13.6	5.9	
		Cd	3.3	0.84	0.30
	10.0		0.40	0.24	
	20.0		0.29	0.39	
	33.3		0.29	0.47	
	66.6		0.24	0.23	
	fondo		0.28	0.20	
	Ni		3.3	29.3	9.6
		10.0	21.0	4.5	
		20.0	17.1	7.1	
		33.3	17.5	5.8	
		66.6	17.0	2.9	
		fondo	18.7	3.9	
		P-2	Pb	3.3	511
	10.0			--	--
	20.0			12.0	9.4
33.3	12.1			6.9	
66.6	7.2			2.9	
fondo	6.0			2.9	
Cd	3.3			0.76	0.35
	10.0		--	--	
	20.0		0.31	0.50	
	33.3		0.30	1.67	
	66.6		0.24	0.29	
	fondo		0.22	0.17	
	Ni		3.3	34.7	5.8
10.0			--	--	
20.00			12.3	7.4	
33.3			12.6	6.3	
66.6			9.6	2.7	
fondo			10.5	2.6	

Tabla 9. Variación de los contenidos promedio de Pb, Cd y Ni con la distancia a la carretera en las zonas P-4 y P-5

Zona	Metal	Distancia a la carretera (m)	Contenido promedio (ppm)	
			Suelo	Planta
P-4	Pb	3.3	679	99.0
		10.0	17.9	13.6
		20.0	30.8	12.6
		33.3	23.0	7.5
	Cd	3.3	0.93	2.47
		10.0	0.20	0.37
		20.0	0.16	0.40
		33.3	0.18	0.25
	Ni	3.3	11.0	2.7
		10.0	0.7	5.0
		20.0	1.3	3.6
		33.3	1.1	2.8
P-5	Pb	3.3	522	13.4
		10.0	10.1	7.6
		20.0	9.4	5.0
		33.3	5.5	3.6
	Cd	3.3	0.86	0.90
		10.0	0.20	0.40
		20.0	0.17	0.57
		33.3	0.28	0.52
	Ni	3.3	6.0	3.5
		10.0	1.2	15.2
		20.0	1.4	14.5
		33.3	3.6	15.1

Tabla 10. Variación de los contenidos promedio de Pb, Cd y Ni con la distancia a la carretera en las zonas P-6 y P-7

Zona	Metal	Distancia a la carretera (m)	Contenido promedio (ppm)		
			Suelo	Planta	
P-6	Pb	3.3	676	128	
		10.0	168	29.5	
		20.0	99.9	17.7	
		33.3	58.5	12.1	
		66.6	11.4	7.7	
		fondo	11.7	5.9	
		Cd	3.3	0.60	0.90
	10.0		0.24	0.44	
	20.0		0.33	0.73	
	33.3		0.31	0.61	
	66.6		0.23	0.32	
	fondo		0.17	0.13	
	Ni		3.3	60.5	9.7
		10.0	13.6	3.8	
		20.0	20.5	4.1	
		33.3	17.2	4.5	
		66.6	6.7	5.7	
		fondo	3.3	3.3	
		P-7	Pb	3.3	913
	10.0			102	32.7
	20.0			29.0	19.3
33.3	34.1			16.5	
66.6	18.3			10.0	
fondo	12.0			5.9	
Cd	3.3			0.85	0.81
	10.0		0.30	0.45	
	20.0		0.36	0.35	
	33.3		0.34	0.59	
	66.6		0.28	0.57	
	fondo		0.28	0.21	
	Ni		3.3	63.1	3.9
10.0			12.0	2.5	
20.0			6.8	2.5	
33.3			13.6	4.4	
66.6			9.5	4.0	
fondo			11.6	3.9	

Tabla 11. Variación de los contenidos promedio de Pb, Cd y Ni con la distancia a la carretera en las zonas P-8 y P-9

Zona	Metal	Distancia a la carretera (m)	Contenido promedio (ppm)		
			Suelo	Planta	Planta lavada
P-8	Pb	3.3	889	311	256
		10.0	78.6	51.3	38.9
		20.0	308	52.9	45.4
		33.3	282	15.7	18.0
		fondo	12.4	10.1	9.2
	Cd	3.3	0.76	0.73	0.54
		10.0	0.40	0.42	0.24
		20.0	0.47	0.40	0.31
		33.3	0.45	0.25	0.20
		fondo	0.39	0.23	0.21
	Ni	3.3	7.3	7.4	4.1
		10.0	6.9	5.2	3.8
		20.0	11.0	3.1	2.5
		33.3	8.7	5.5	3.6
		fondo	7.0	3.9	3.5
P-9	Pb	3.3	390	208	152
		10.0	287	31.4	28.7
		20.0	52.5	17.4	14.2
		33.3	56.8	11.6	10.5
		fondo	12.5	9.0	7.9
	Cd	3.3	0.61	0.57	0.40
		10.0	0.40	0.50	0.20
		20.0	0.20	0.32	0.18
		33.3	0.12	0.25	0.20
		fondo	0.13	0.32	0.15
	Ni	3.3	11.6	6.8	5.9
		10.0	7.2	3.7	2.7
		20.0	2.2	2.3	2.4
		33.3	1.4	3.9	2.8
		fondo	3.1	4.7	4.2

Tabla 12. Variación de los contenidos promedio de Pb, Cd y Ni con la distancia a la carretera en la zona P-10

Zona	Metal	Distancia a la carretera (m)	Contenido promedio (ppm)	
			Suelo	Planta
P-10	Pb	3.3	21.0	13.7
		10.0	19.4	7.0
		20.0	9.8	3.0
		33.3	11.0	3.0
		fondo	10.8	3.0
	Cd	3.3	0.09	0.31
		10.0	0.09	0.21
		20.0	0.06	0.20
		33.3	0.07	0.16
		fondo	0.07	0.18
	Ni	3.3	1.6	2.5
		10.0	1.1	2.0
		20.0	0.9	1.5
		33.3	0.9	1.0
		fondo	1.0	1.0

en la planta, ya que gran parte del Pb que reciben las plantas llega por vía aérea.

En las distancias de fondo, o control, los niveles encontrados son muy similares para todos los casos, oscilando de 13.6 en la zona P-1 a 10.8 ppm en la zona P-10, que también se utiliza como control. Los niveles encontrados son muy similares e incluso a veces superiores a los dados a conocer en otras investigaciones (24). Es importante señalar que la contaminación no es mayor en aquella zona donde hayan los niveles más altos, sino donde la descarga de Pb a lo largo de una línea es mayor. Esta descarga se determinó integrando gráficamente hasta 33.3 m de distancia. Esto se observa muy bien entre las zonas P-1, P-2 con 22100 vehículos/día de densidad de tráfico y las zonas P-8 y P-9 con 72250 vehículos/día, (Tabla 17). En las zonas de menor tráfico los niveles a 3.3 m son mayores que en las de tránsito superior, lo cual no es lógico, en cambio al determinar las áreas relativas, éstas son de 1.84 para la carretera de 22100 vehículos/día y 5.25 para la de 72250 vehículos/día.

En las zonas P-1, P-2, P-4 y P-5 que son los únicos lugares donde se puede estudiar el efecto del viento, se observa (ver Figuras 2-5) que los niveles, o mejor dicho las áreas de descarga de Pb en suelo son mayores en los lados Oeste. P-1 lado Oeste (1.10), P-2 lado Este (0.74) y P-4 lado Oeste (0.74), P-5 lado Este (0.56). En efecto, con los datos tomados del Aeropuerto del Maní en Mayaguez y de la

Base Borinquen en Aguadilla (ver Apéndices I, II), se deduce que el viento dominante es de componente Este, y lógicamente se produce una mayor contaminación en los lados Oeste. Estos resultados son también una prueba importante de que gran parte del Pb llega al ecosistema por vía aérea.

Estudio de la distribución del Pb en las plantas

En todas las zonas se observa invariablemente que los contenidos de Pb en las plantas disminuyen a medida que la distancia a la carretera aumenta (ver Tabla 8-12 y Figuras 3, 5, 7, 9 y 27). Los niveles más altos se alcanzaron en las zonas P-8 y P-9 con 311 y 208 ppm de Pb respectivamente a 3,3 m de distancia.

El efecto del viento también se puede observar en el caso de las plantas; P-1 lado Oeste (0.17), P-2 lado Este (0.11) y P-4 lado Oeste (0.16), P-5 lado Este (0.03). En efecto, hay una mayor contaminación en las zonas situadas al Oeste.

Los niveles encontrados en las plantas se consideran muy altos; debe tenerse en cuenta que la planta puede acumular grandes cantidades de Pb en un período corto de tiempo. Los niveles en los lugares de fondo, son similares, oscilando entre 29 ppm en la zona P-2 a 9.2 ppm de Pb en la zona P-8, los cuales son considerados como normales.

En las zonas P-8 y P-9 (ver Tabla 11) se hizo un lavado de las plantas con agua, y se observa cómo a medida que la distancia a la carretera aumenta, el Pb eliminado por lavado disminuye. Este tipo de observación ha sido recogida en

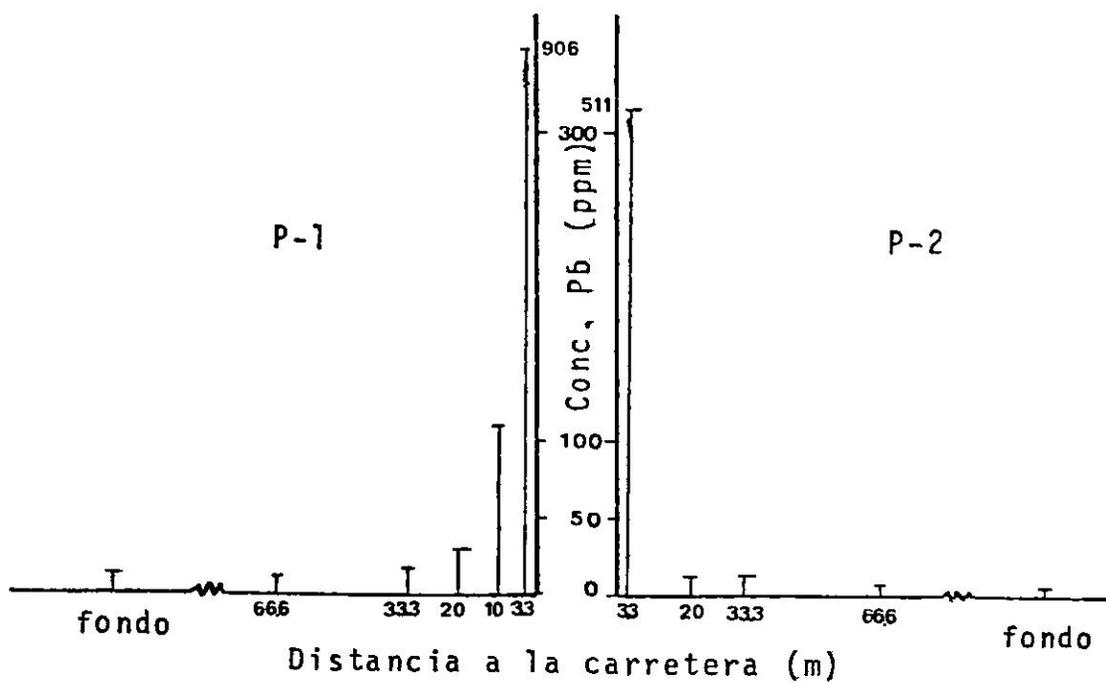


Figura 2. Contenido de Pb en suelos de las zonas P-1 y P-2

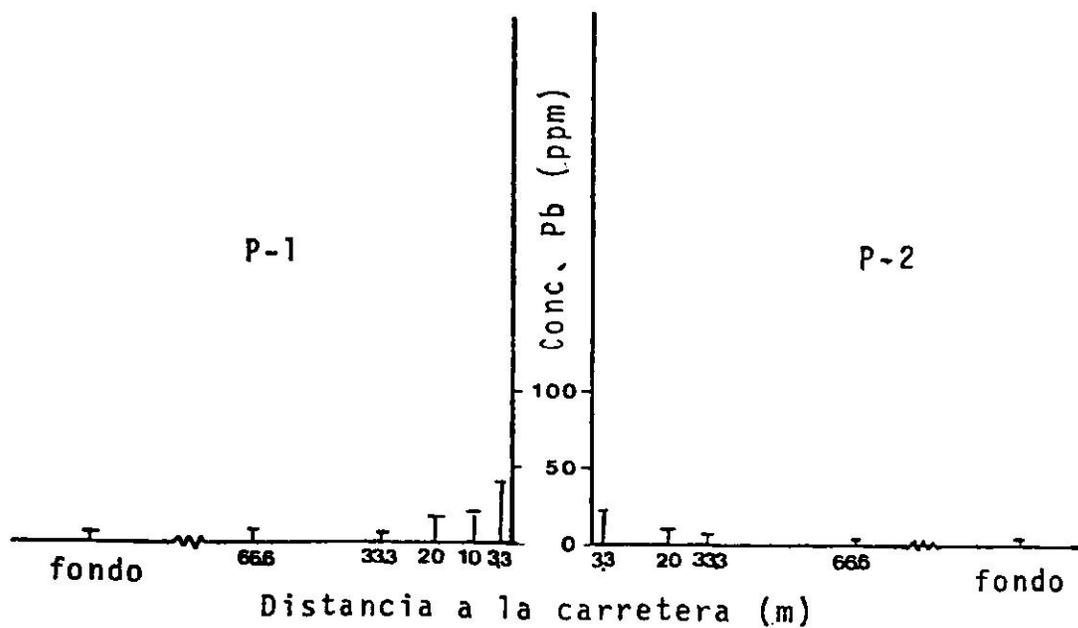


Figura 3. Contenido de Pb en plantas de las zonas P-1 y P-2

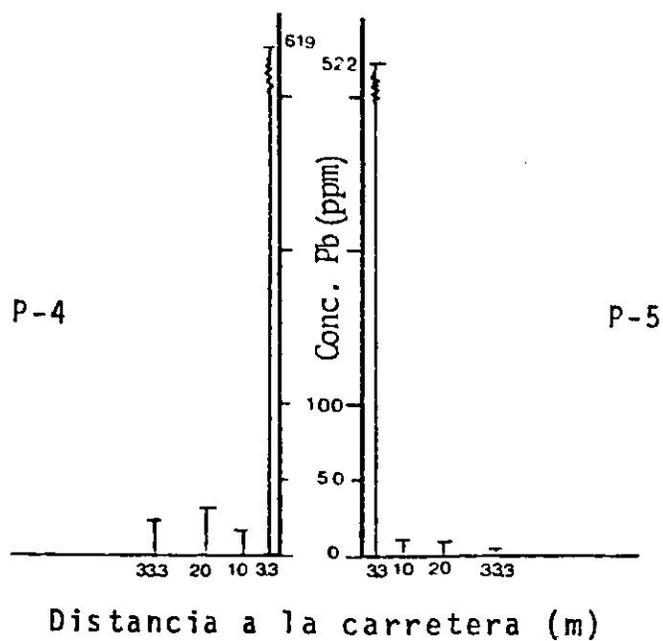


Figura 4. Contenido de Pb en suelos de las zonas P-4 y P-5

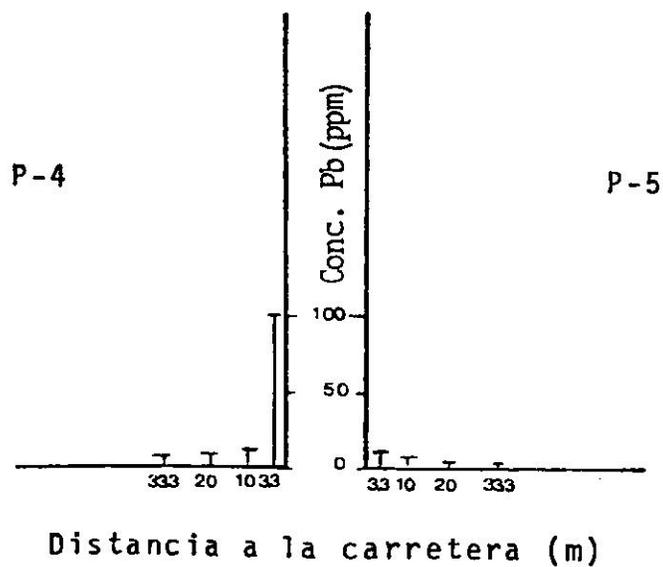


Figura 5. Contenido de Pb en plantas de las zonas P-4 y P-5

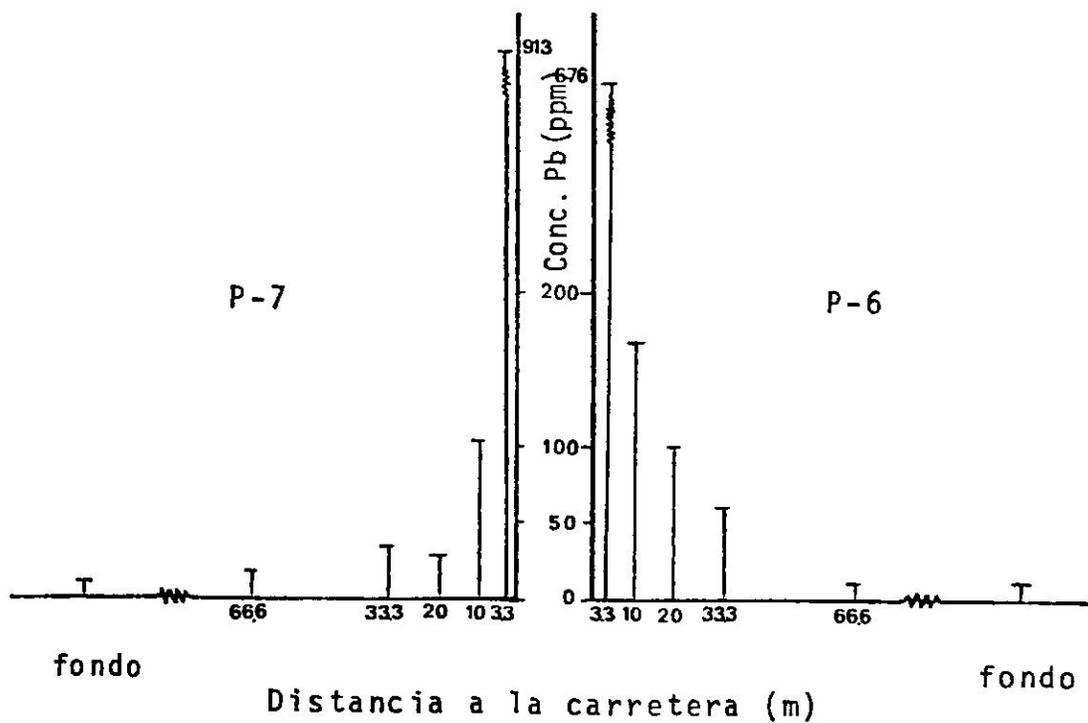


Figura 6. Contenido de Pb en suelos de las zonas P-6 y P-7

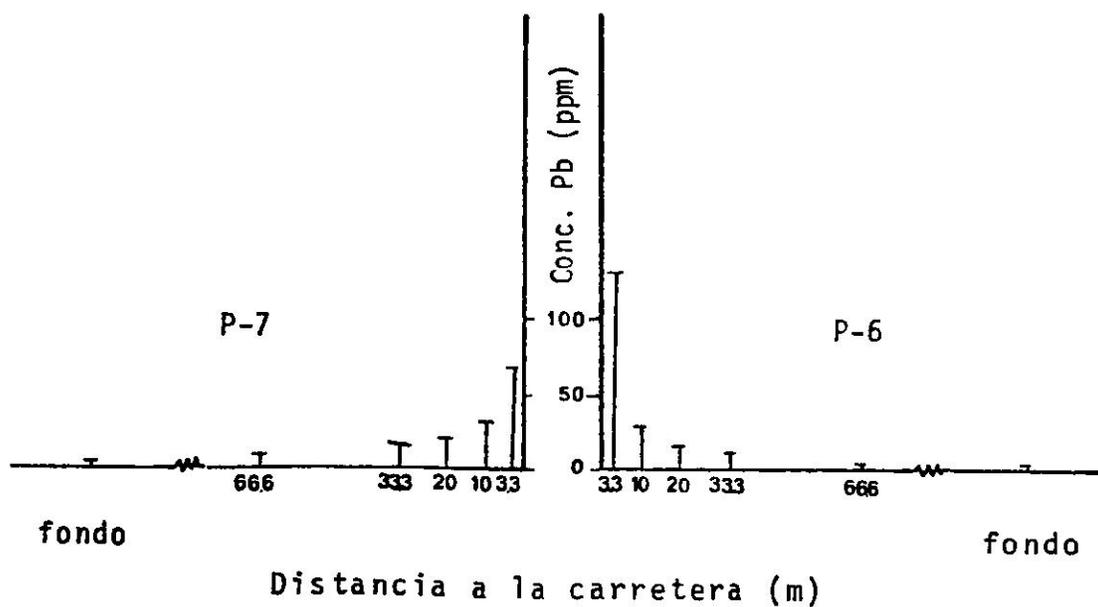


Figura 7. Contenido de Pb en plantas de las zonas P-6 y P-7

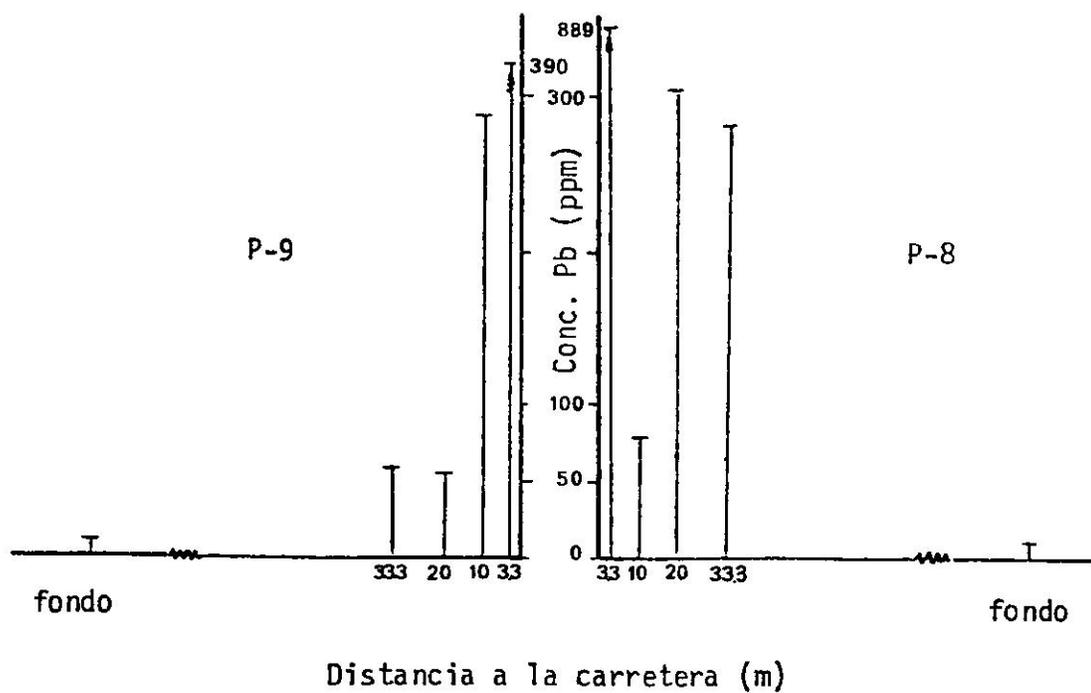


Figura 8. Contenido de Pb en suelos de las zonas P-8 y P-9

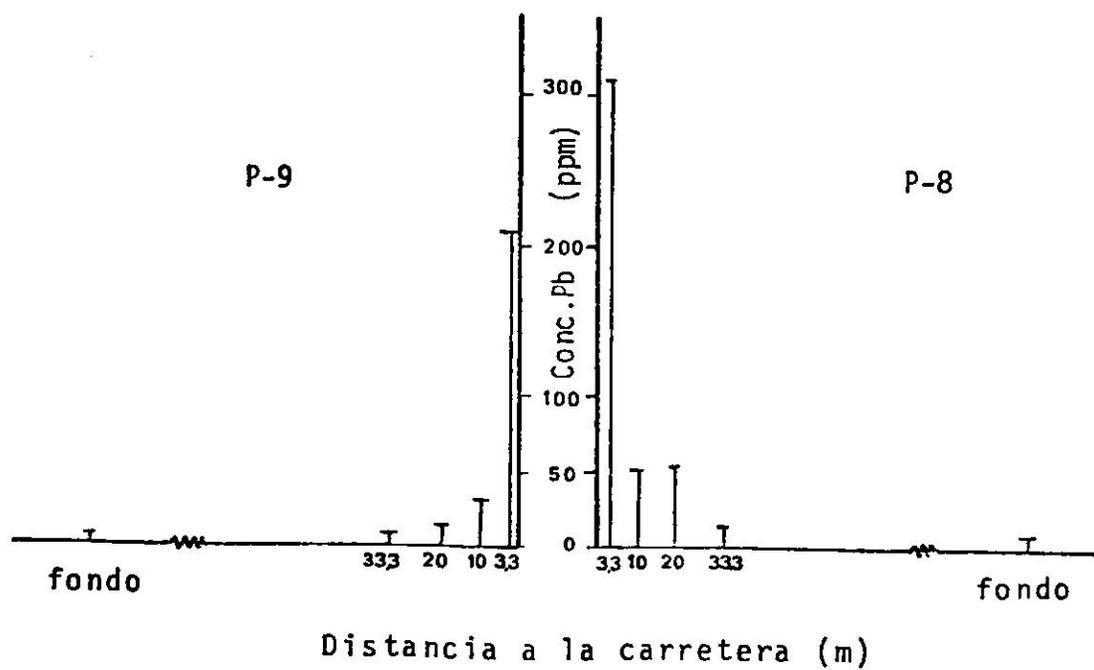


Figura 9. Contenido de Pb en plantas de las zonas P-8 y P-9

trabajos anteriores (34, 5). La explicación que se da a este hecho es que el Pb se emite a la atmósfera con un tamaño de partícula variable. Las partículas mayores de 9 micras se depositan rápidamente, las medianas, entre 1 y 9 micras, se mantienen en las atmósferas más tiempo, pero no el suficiente como para recorrer una distancia larga. Por último las partículas menores de 1 micra, permanecen en la atmósfera un período de tiempo significativo y pueden desplazarse recorriendo largas distancias (89, 26, 43). Entonces las plantas más cercanas a la carretera reciben un aporte importante de partículas gruesas, que debido a su tamaño difícilmente pueden incorporarse al interior de la planta, y por tanto, son fáciles de eliminar mediante un lavado. En cambio, las plantas lejanas a la carretera reciben sólo partículas de tamaño pequeño, que sí se pueden incorporar al interior de la planta, y que son más difíciles de eliminar por lavado.

Estudio de la distribución de Cd en el suelo

La variación de los niveles de Cd en el suelo con respecto a la distancia a la carretera sigue un patrón muy similar en todas las zonas. A 3.3 m los contenidos de Cd en el suelo son los más altos, para descender rápidamente a un valor más o menos constante (ver Tablas 8-12 y Figuras 10, 12, 14, 16, 26). La zona P-9 es una excepción, pues los valores van disminuyendo paulatinamente, alcanzándose el contenido constante a 33.3 m de distancia. Los niveles informados son muy similares a los dados a conocer en la literatura (1-1).

Las concentraciones de Cd en los lugares de fondo oscilan entre 0.07 ppm en la zona P-10 y 0.39 ppm en la zona P-9. Estas diferencias son demasiado altas, y se puede afirmar que el suministro de Cd a partir de la roca madre es muy importante y que puede enmascarar la posible contaminación procedente de los automóviles.

El viento no ejerce ningún tipo de efecto, ya que las áreas de descarga de Cd son muy similares a ambos lados de la carretera: P-1 lado Oeste (0.39), P-2 lado Este (0.38) y P-4 lado Oeste (0.26), P-5 lado Este (0.30). Este es el resultado esperado, ya que el Cd se transporta a través del suelo mediante escorrentía.

Estudio de la distribución de Cd en las plantas

La variación de los contenidos de Cd en las plantas con respecto a la distancia a la carretera no siguen el mismo patrón que en el caso de los suelos (ver Tablas 8-12 y Figuras 11, 13, 15, 17, 2). Un factor muy importante en la toma de Cd por la planta es el pH del suelo. Está demostrado que los pH ácidos favorecen la entrada del metal a la planta (55, 57). En las zonas estudiadas se observa que el pH disminuye de forma importante con la distancia a la carretera (ver Tabla 5).

Se tienen pues dos efectos que deben gobernar la distribución del Cd: la distancia a la carretera y el pH del suelo. Otro factor muy importante que no se controló totalmente es que las distintas especies de gramíneos tienen capacidades de absorción de Cd diferentes.

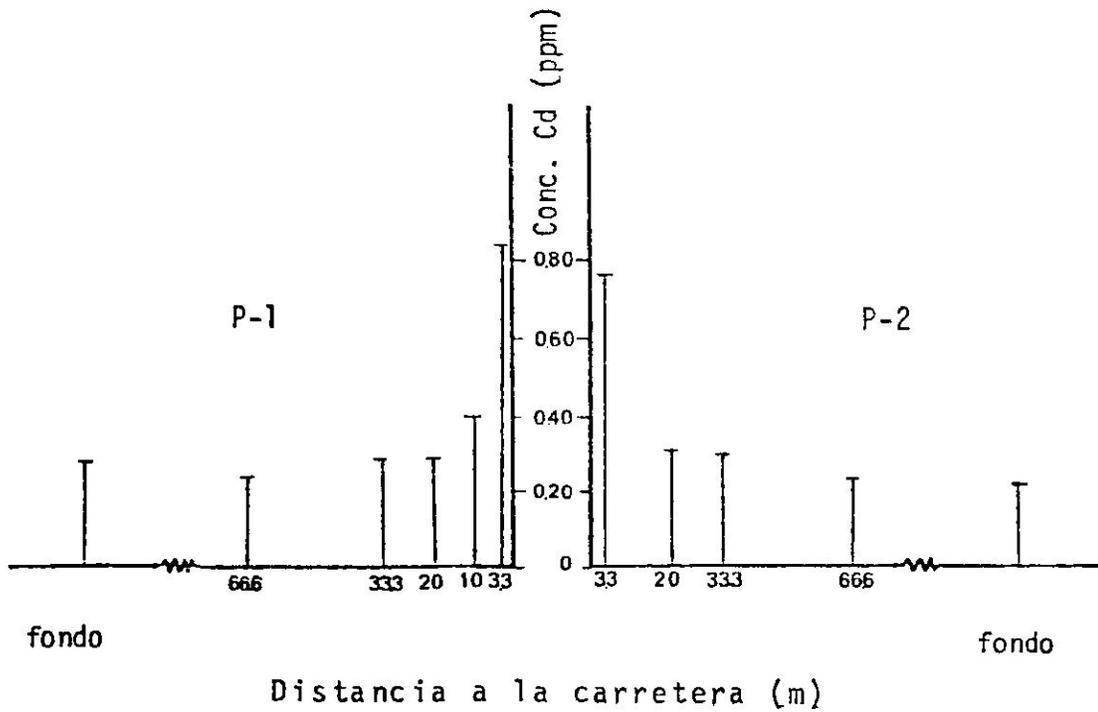


Figura 10. Contenido de Cd en suelos de las zonas P-1 y P-2

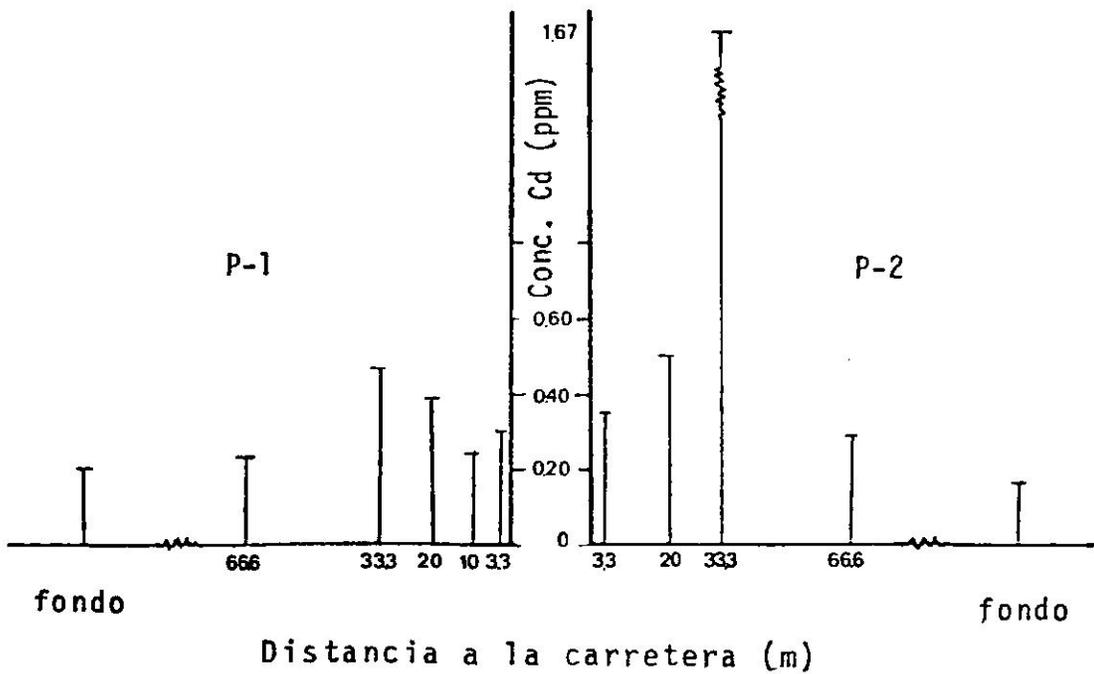


Figura 11. Contenido de Cd en plantas de las zonas P-1 y P-2

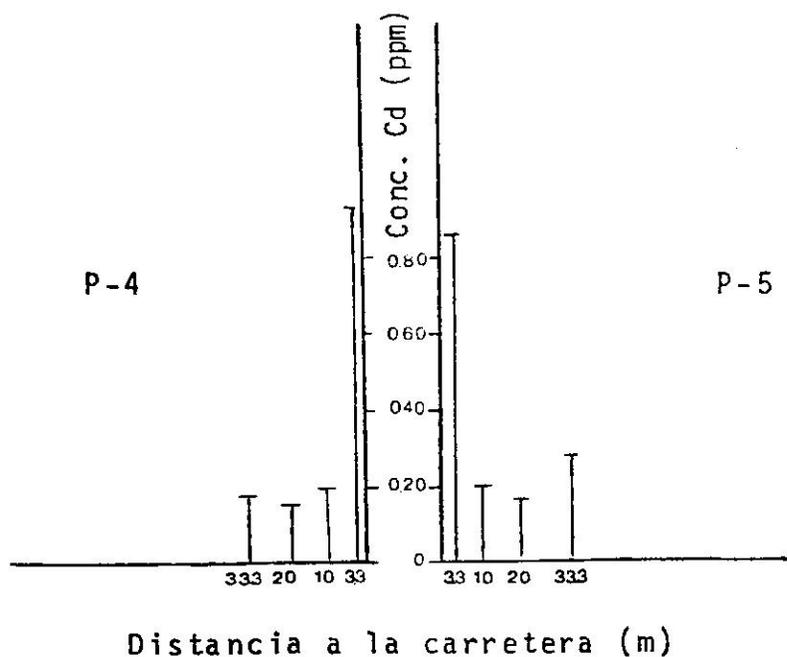


Figura 12. Contenido de Cd en suelos de las zonas P-4 y P-5

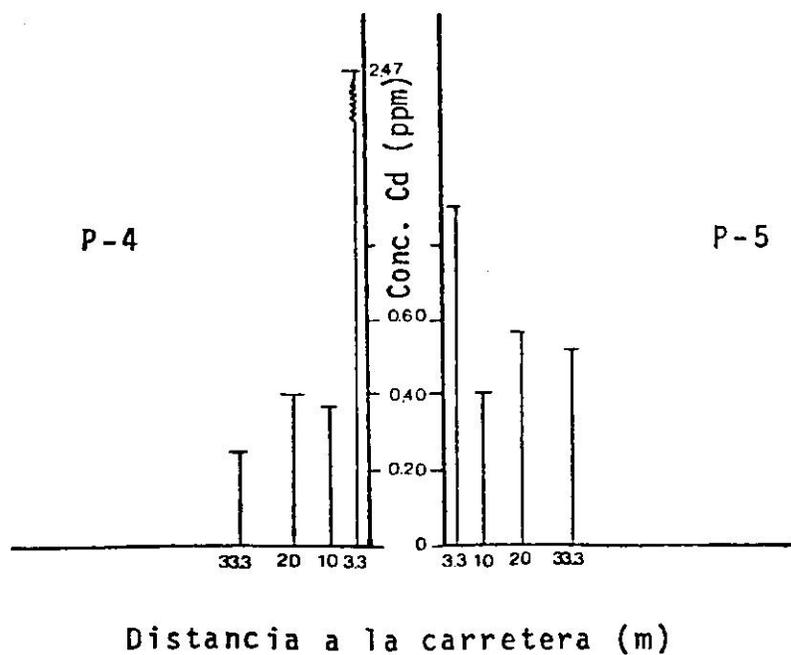


Figura 13. Contenido de Cd en plantas de las zonas P-4 y P-5

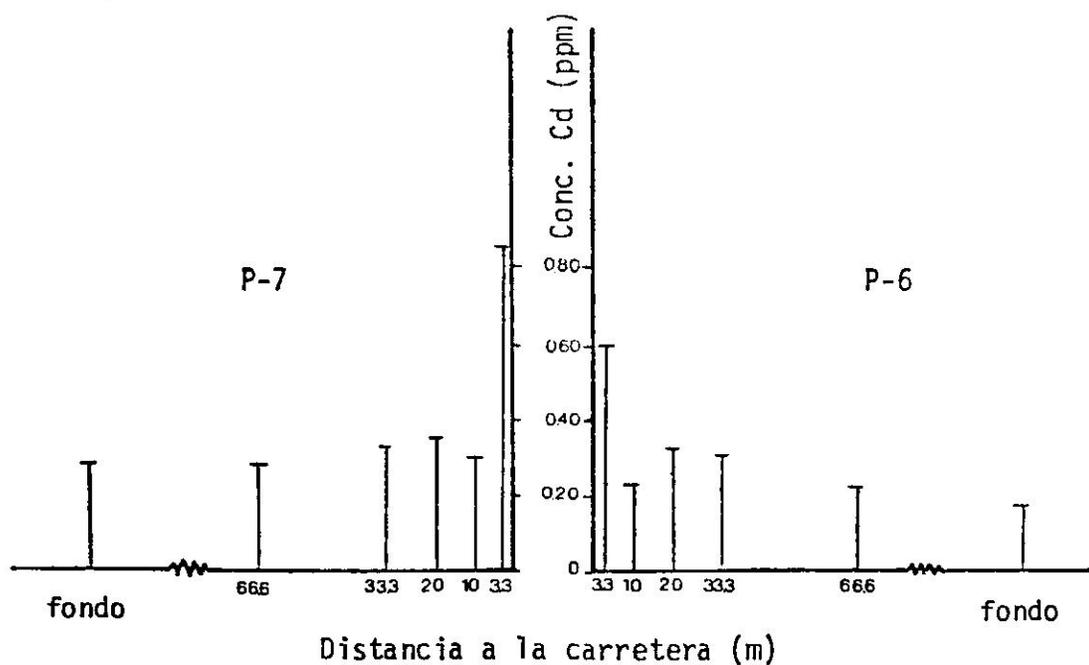


Figura 14. Contenido de Cd en suelos de las zonas P-6 y P-7

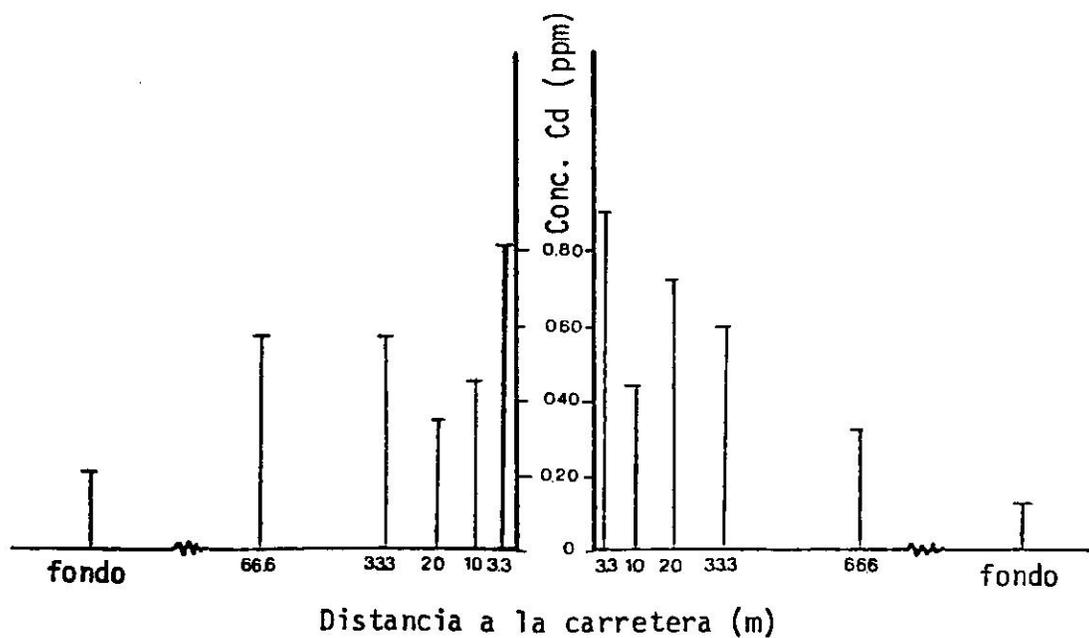


Figura 15. Contenido de Cd en plantas de las zonas P-6 y P-7

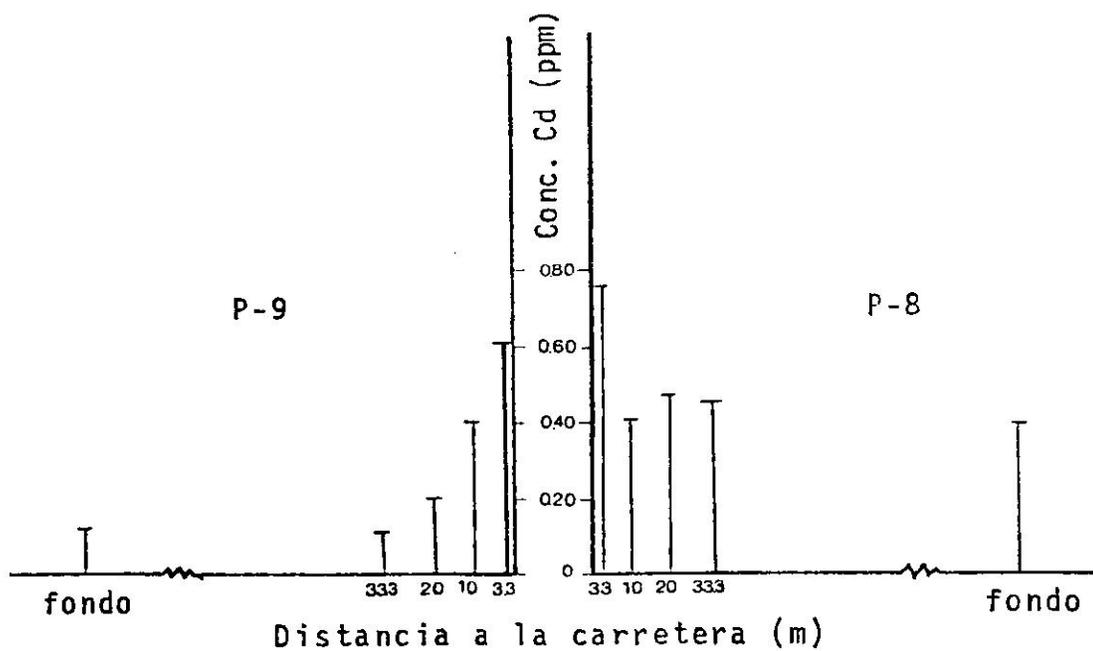


Figura 16. Contenido de Cd en suelos de las zonas P-8 y P-9

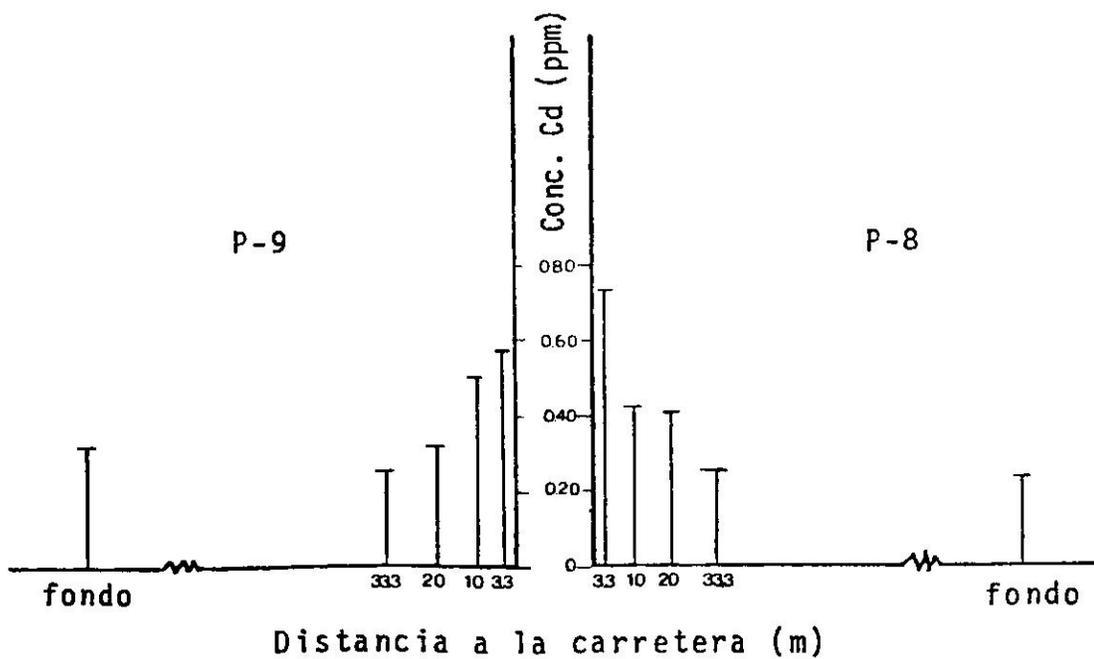


Figura 17. Contenido de Cd en plantas de las zonas P-8 y P-9

Se observa que en las zonas P-1 y P-2 los valores de Cd más altos ocurren a 33.3 m. En las demás zonas el valor más alto se alcanzó a 3.3 m, pero la distribución de esas zonas vuelve a tener un máximo a distancias intermedias, donde la acidez del suelo es apreciable.

Se destacan los valores altos encontrados en la mayoría de las zonas, por ejemplo 2.47 ppm en la zona P-4 a 3.3 m y 1.67 ppm en la zona P-2 a 33.3 m. Estos valores sobrepasan por mucho los valores considerados como normales. Los contenidos de Cd en los lugares de fondo oscilan entre 0.13 ppm en la zona P-6 y 0.32 ppm en la zona P-9. Con el resto de los valores en conjunto, las diferencias no son importantes como ocurrió en el caso del suelo.

Los niveles hallados en plantas lavadas de las zonas P-8 y P-9 muestran que a medida que aumenta la distancia a la carretera, la cantidad de Cd eliminada por lavado es menor, con excepción de la muestra de fondo de la zona P-9. No se encuentra explicación a esta disminución pues en teoría no debería ocurrir, ya que el Cd pasa a la planta casi exclusivamente a través de la raíz.

Estudio de la distribución de Ni en el suelo

En las Tablas 8-12 y Figuras 18, 20, 22, 24, 26, se puede ver que la variación de la distribución del Ni en el suelo con respecto a la distancia a la carretera es bastante irregular. Generalmente el valor más alto se alcanza en las proximidades de la carretera, luego ocurre una disminución, llegándose a

un valor casi constante con algunas irregularidades.

En el área Oeste de Puerto Rico, y sobre todo en las zonas P-6 y P-7, los contenidos encontrados son muy altos, siendo los valores más altos 60.5 y 63.1 ppm en P-6 y P-7, respectivamente. En muchas zonas el factor roca madre es muy importante, y a veces predominante, ya que la región es muy rica en serpentinita (90). Esta puede ser la causa de la distribución irregular encontrada. También se observa que el Ni procedente de la carretera tiene una movilidad baja, y su efecto sólo llega a unos pocos metros. Un factor que ayuda a esa inmovilidad es el alto contenido de materia orgánica del suelo.

El viento no afecta a la distribución del Ni, tal como era de esperar, pues el Ni se desplaza de la carretera a las zonas vía suelo por escorrentía.

Los valores hallados en los lugares de fondo son muy variables, oscilando entre 1.0 ppm en la zona P-10 y 18.7 ppm en la zona P-1. Esto es indicativo del efecto del factor roca madre que a veces enmascara el suministro de Ni que procede de la carretera.

En relación a las zonas P-8 y P-9 (ver Tabla 11 y Figura 24), que están ubicadas en el área Noreste de Puerto Rico, la distribución de la zona P-8 es irregular, alcanzándose un valor máximo a 20 m de distancia. En cambio, la zona P-9 sigue una distribución que involucra al tránsito rodado por la carretera como posible fuente de contaminación.

En general, el que los niveles de Ni más altos se encuentren

en las cercanías de la carretera, y el que exista una débil pero detectable gradiente de concentración, son indicativos de la existencia de contaminación por Ni procedente de la carretera.

Estudio de la distribución de Ni en las plantas

La distribución de Ni en las plantas con respecto a la distancia a la carretera no sigue el patrón de distribución del suelo (ver Tablas 8-12 y Figuras 19, 21, 23, 25, 27). Destaca que la irregularidad es mayor; ya no se obtienen los contenidos más altos a 3.3 m. Incluso a esa distancia se encontró el nivel más bajo, como es el caso de la zona P-5.

El pH del suelo es un factor importante en la toma del metal por la planta, pues cuando el pH es bajo, las plantas toman mayor cantidad de Ni. En la zona P-5 la disminución del pH va acompañada de un aumento de Ni en la planta. También, a partir de ciertos valores de pH la toma del metal puede quedar restringida (55).

No se observa un gradiente de concentración como en el caso del suelo; estos resultados no dan pie para afirmar que exista una contaminación de Ni procedente de la carretera.

Los contenidos hallados en las plantas lavadas de las zonas P-8 y P-9 (ver Tabla 11) muestran que hay una disminución del metal al lavar la planta. Como el Ni entra a la planta vía raíz, no es fácil explicar por qué se elimina Ni lavando. Se puede pensar que al lavar, el Ni que entró a la planta de forma pasiva, puede volver a salir de la misma

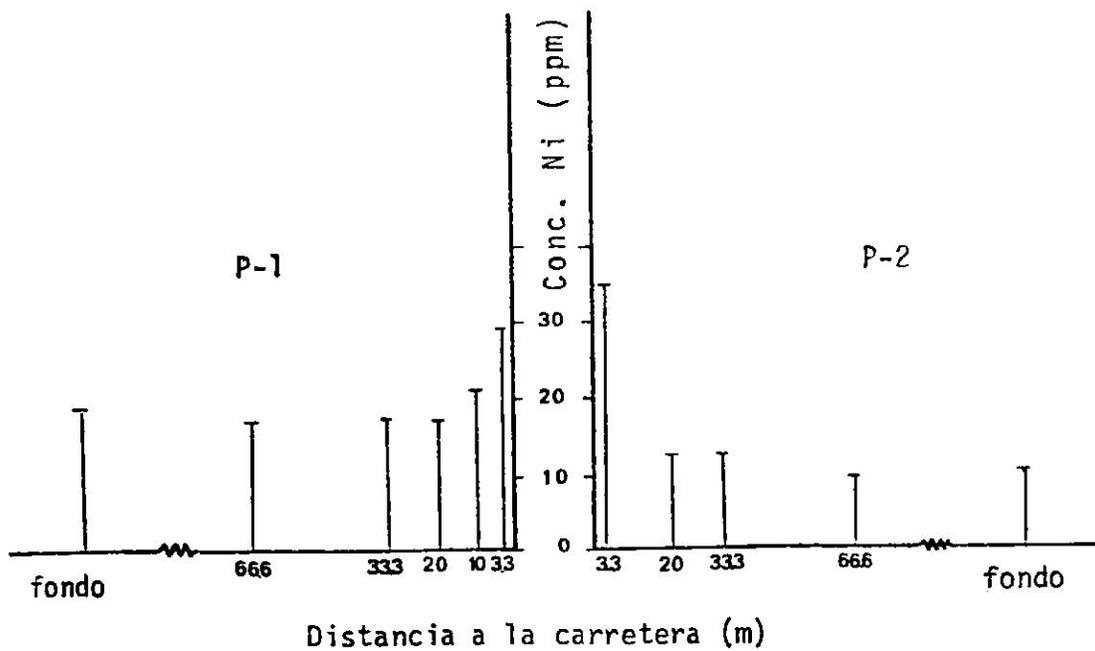


Figura 18. Contenido de Ni en suelos de las zonas P-1 y P-2

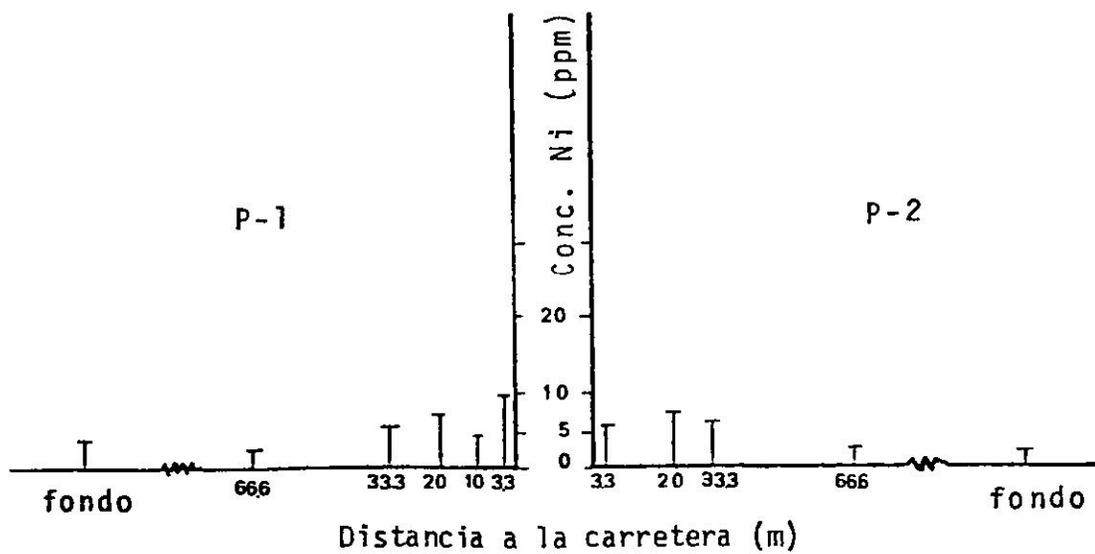


Figura 19. Contenido de Ni en plantas de las zonas P-1 y P-2

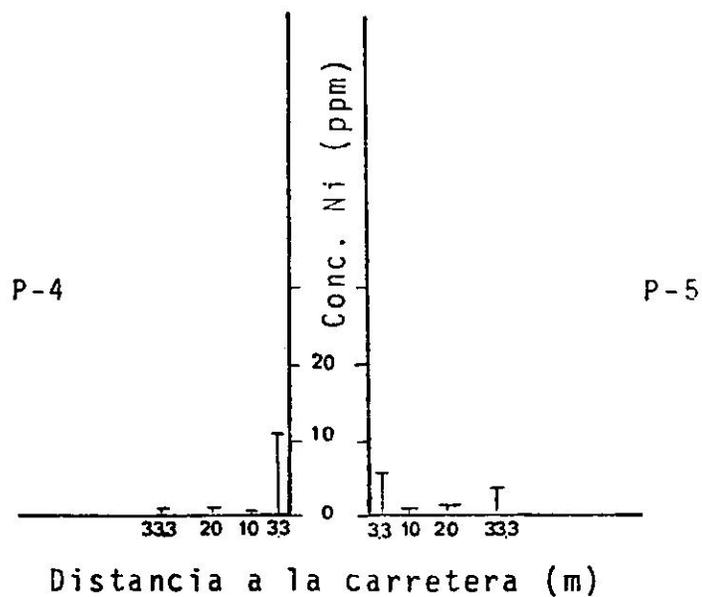


Figura 20. Contenido de Ni en suelos de las zonas P-4 y P-5

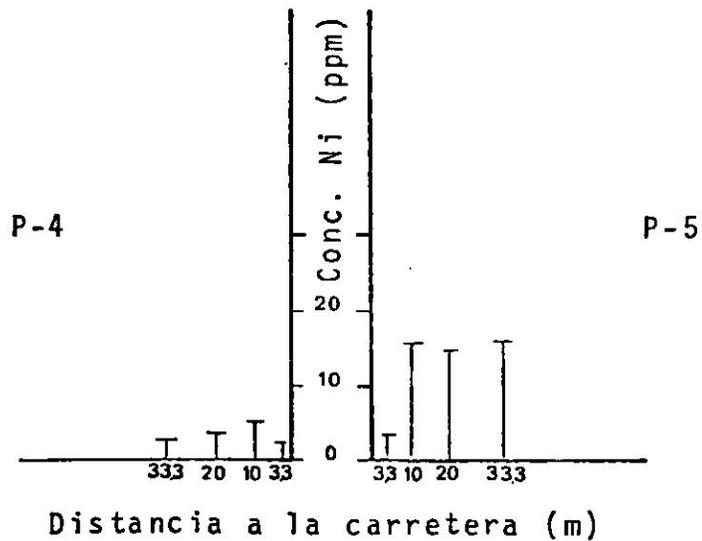


Figura 21. Contenido de Ni en plantas de las zonas P-4 y P-5

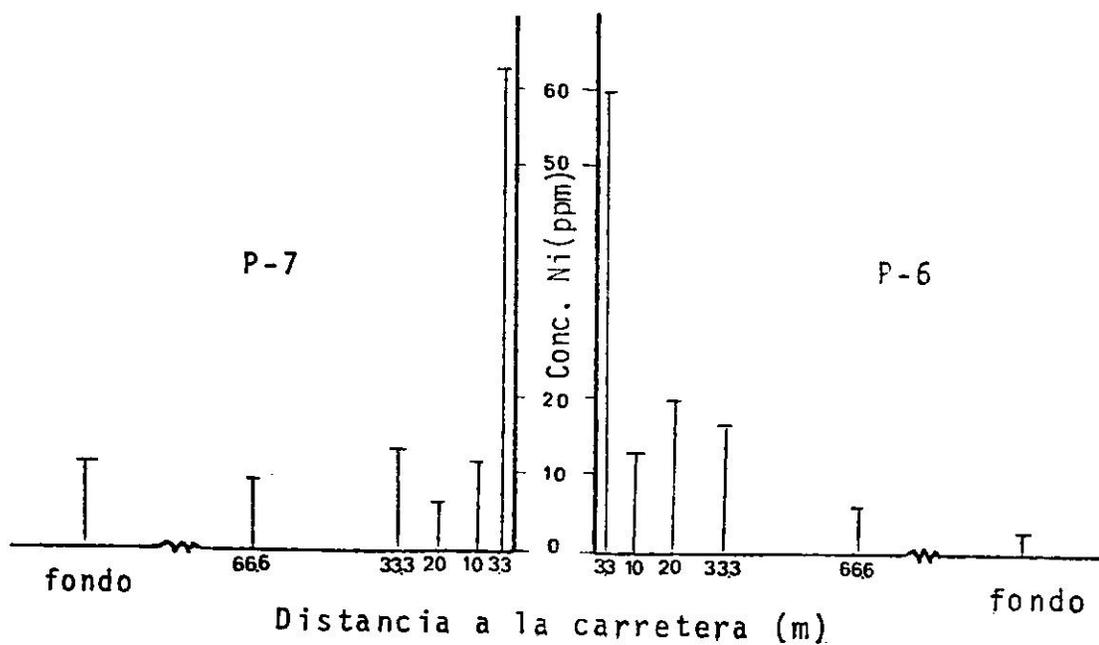


Figura 22. Contenido de Ni en suelos de las zonas P-6 y P-7

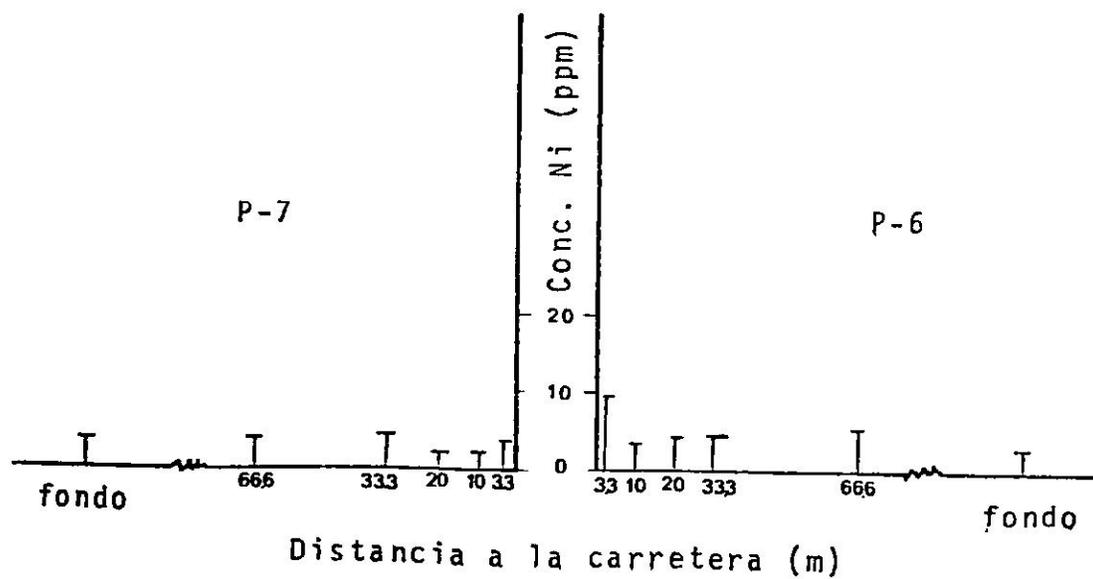


Figura 23. Contenido de Ni en plantas de las zonas P-6 y P-7

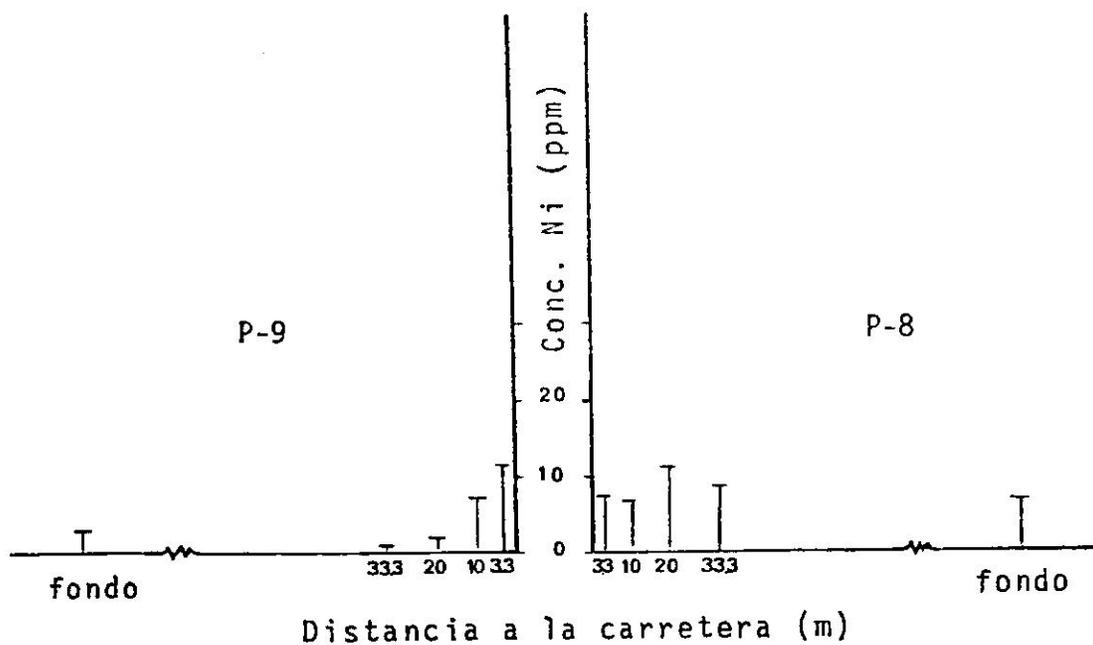


Figura 24. Contenido de Ni en suelos de las zonas P-8 y P-9

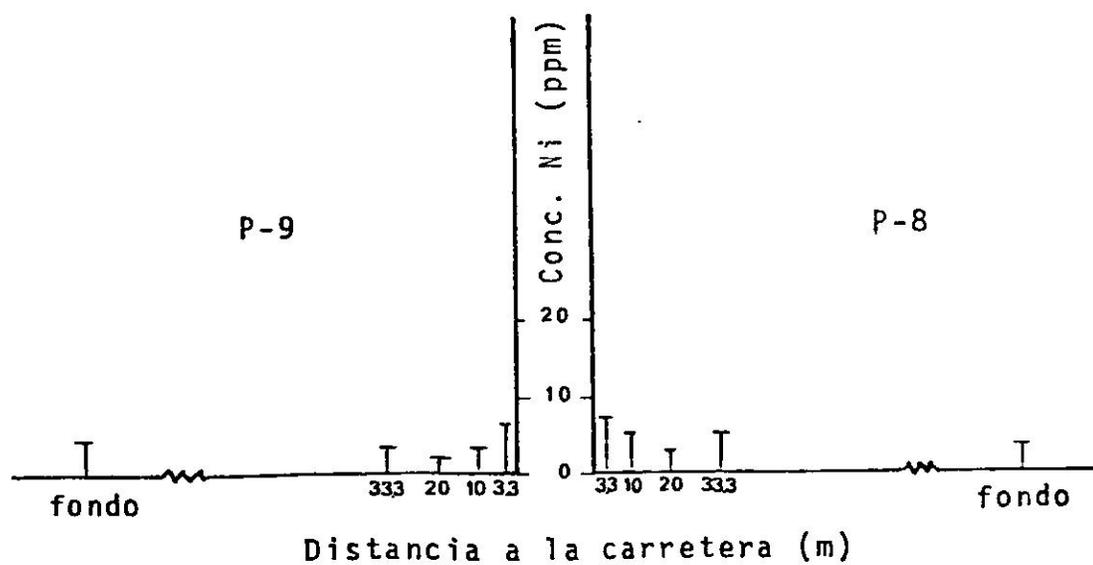


Figura 25. Contenido de Ni en plantas de las zonas P-8 y P-9

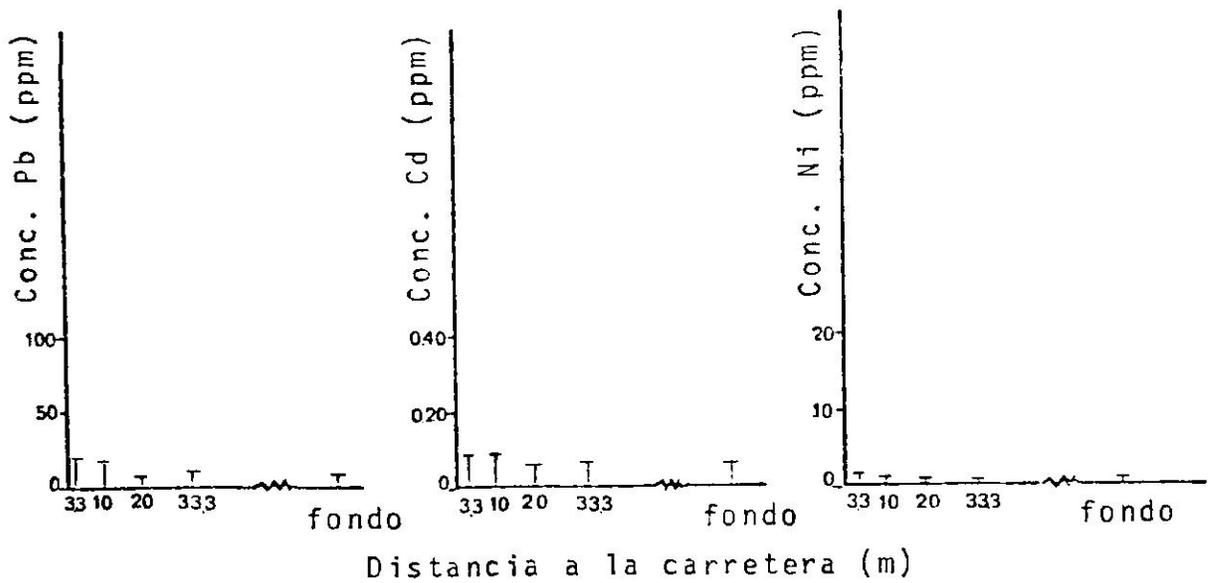


Figura 26. Contenido de Pb, Cd y Ni en suelos de la zona P-10

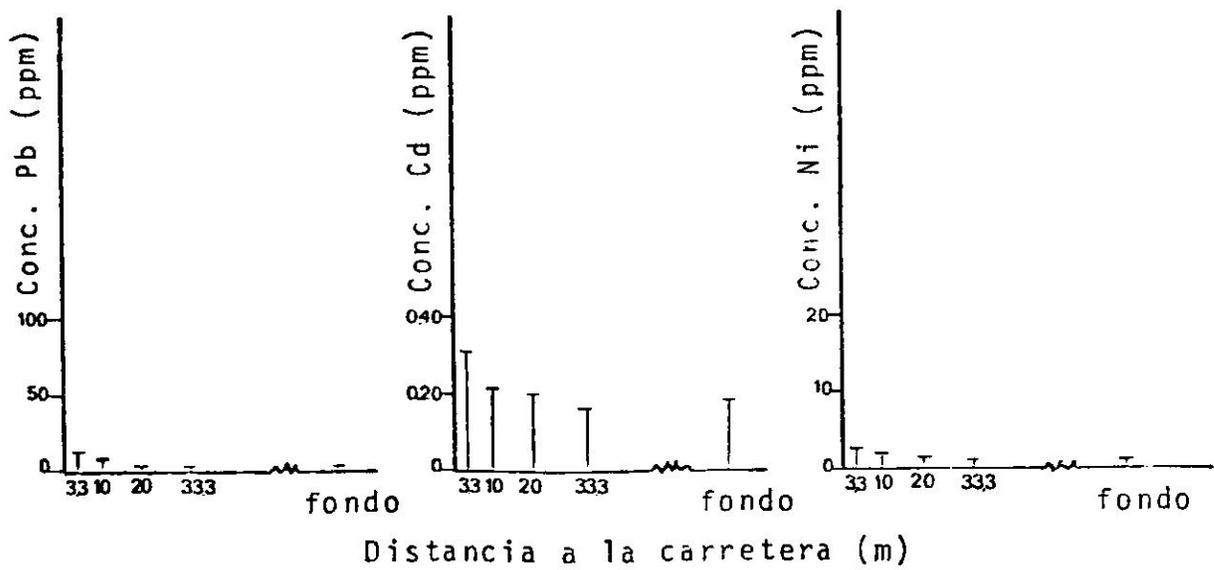


Figura 27. Contenidos de Pb, Cd y Ni en plantas de la zona P-10

manera.

Estudio de los niveles de Pb, Cd y Ni en los suelos y las plantas de las isletas

En la Tabla 13 se observa que los niveles de Pb en los suelos y las plantas son mayores que los encontrados en los lados colindantes. La causa principal es que la zona intermedia recibe de una forma más directa la descarga de los vehículos que circulan en ambas direcciones. También son mayores porque la muestra se encontraba a menos de 1 m del firme de la carretera. Es importante señalar la gran cantidad de Pb que acumulan las plantas, teniendo en cuenta que la hierba es cortada periódicamente.

Los niveles de Cd no difieren mucho de los encontrados a ambos lados de la carretera (ver Tabla 13). La razón por la cual no son mayores es el escalón que evita el movimiento del metal hacia la zona ajardinada en cierta manera. Exactamente lo mismo se puede decir del Ni.

Los valores obtenidos están dentro de los intervalos encontrados por Ward y colaboradores (35) en las isletas ajardinadas de Nueva Zelanda.

Estudio de la variación de los contenidos de Pb, Cd y Ni con la profundidad en un perfil de suelo

En las Tablas 14-16 se muestran los contenidos de Pb, Cd y Ni a diferentes profundidades. En las zonas P-8, P-9 y P-10 se hizo el perfil a 10 m de distancia por considerar que a 20 m el efecto de la carretera no era lo suficientemente importante

Tabla 13 Contenidos de Pb, Cd y Ni en el suelo y la vegetación de jardines intermedios.

Zona	Contenidos de Pb, Cd y Ni (ppm)			densidad de tráfico (vehículos por día)
	Metal	Suelo	Plantas	
P-3 Jardín	Pb	481	235	24680
	Cd	1.00	0.70	
	Ni	11.8	4.4	
P-6 Jardín	Pb	1204	221	40000
	Cd	0.71	0.25	
	Ni	34.5	15.4	
P-8 Jardín	Pb	1427	427	72250
	Cd	0.91	0.72	
	Ni	11.7	4.4	

Tabla 14. Variación del contenido de Pb con la profundidad
 Contenido de Pb (ppm) en un perfil

Zona	Profundidad (cm)				Distancia a la carretera (m)
	0-5	5-10	10-15	15-20	
P-1	12.1	6.4	9.6	8.1	20
P-2	15.5	18.0	16.1	14.4	20
P-4	27.4	28.4	17.8	12.4	20
P-5	5.8	5.5	4.8	5.0	20
P-6	106	41.9	23.9	11.9	20
P-7	58.3	8.2	11.1	8.6	20
P-8	593	162	150	57.4	10
P-9	304	176	121	153	10
P-10	19.4	17.8	15.8	15.7	10

Tabla 15. Variación del contenido de Cd con la profundidad

Contenido de Cd (ppm) en perfiles de suelo

Zona	Profundidad (cm)				Distancia a la carretera (m)
	0-5	5-10	10-15	15-20	
P-1	0.22	0.18	0.22	0.20	20
P-2	0.31	0.29	0.26	0.30	20
P-4	0.18	0.21	0.25	0.20	20
P-5	0.16	0.17	0.23	0.16	20
P-6	0.32	0.28	0.33	0.22	20
P-7	0.35	0.28	0.29	0.33	20
P-8	0.68	0.40	0.35	0.30	10
P-9	0.43	0.35	0.34	0.36	10
P-10	0.10	0.06	0.03	0.03	10

Tabla 16. Variación del contenido de Ni con la profundidad.

Zona	Contenido de Ni (ppm) en perfiles de suelo				Distancia a la carretera (m)
	Profundidad (cm)				
	0-5	5-10	10-15	15-20	
P-1	13.8	10.3	13.8	12.0	20
P-2	17.1	19.5	15.0	13.8	20
P-4	1.2	1.2	1.2	0.8	20
P-5	1.2	1.2	1.3	1.2	20
P-6	30.6	34.7	32.5	27.7	20
P-7	12.0	6.2	10.5	6.5	20
P-8	11.8	10.2	10.7	11.0	10
P-9	9.2	6.7	5.8	4.6	10
P-10	1.1	0.8	0.8	0.9	10

tomando como base de esta aseveración los resultados obtenidos de las zonas muestreadas anteriormente.

En las zonas P-1, P-2, P-4, P-5, P-6 y P-7 no existe una variación significativa del contenido de los metales con respecto a la profundidad, excepto en el caso del Pb en las zonas P-4, P-6 y P-7. Las razones que explican la ausencia de variaciones pueden ser, o bien la antropización del suelo o que el efecto del tráfico a 20 m no es considerable. En cambio, en las zonas P-8, P-9 y P-10, el Pb disminuyó con la profundidad, demostrándose así que éste se deposita superficialmente. El Cd disminuye con la profundidad en las zonas P-8 y P-10, mientras que el Ni sólo lo hace en la zona P-9.

Los datos de la zona P-10 son interesantes, ya que la densidad de tránsito es muy pequeña (630 vehículos/día). En esta zona se observa un gradiente de concentración con la profundidad para el Pb y el Cd.

Estudio de la relación entre la densidad de tráfico y la contaminación de suelos y plantas con Pb, Cd y Ni

Los contenidos más altos de un metal en una zona no son indicativos del nivel de contaminación de ésta. La descarga total del metal que sufre la zona será un parámetro más adecuado. Para calcular éste se hace una integración gráfica de la curva de distribución del metal con respecto a la distancia, determinándose el área bajo la curva con un planímetro. Se puede calcular la descarga del metal a diferentes distancias. En la investigación se escogió 33.3 m, ya que a partir

de esta distancia, el efecto de la densidad de tráfico es poco marcado. Las áreas así calculadas son relativas.

Como la densidad de tráfico afecta a ambos lados, se sumaron las áreas individuales de las zonas opuestas. A continuación se determinaron los coeficientes de correlación entre las áreas que corresponden a las descargas de los metales en el suelo y las plantas con respecto a la densidad de tráfico. En el caso de la zona P-10, en la que sólo se muestreó un lado de la carretera, se multiplicó por 2 el área de la descarga.

En las Tablas 17, 18, 19 se observan los valores individuales de las áreas de descarga para suelos y plantas y en las siguientes columnas las sumas de tales áreas que se relacionarán con las respectivas densidades de tráfico. En las Figuras 28, 29 se representan gráficamente para el caso del Pb las relaciones entre las áreas de las descargas en suelos y plantas con respecto a la densidad de tráfico. Se observa que la relación entre la densidad de tráfico y la descarga de Pb en el suelo y en las plantas es muy significativa ($P < 0.01$).

Este hecho apoya aún más la tesis de que el Pb proviene de la carretera. En cambio la relación resultó no ser significativa para los casos del Cd y del Ni tal como se observa en las Tablas 18, 19). Esto no indica que se pueda afirmar que el Cd y el Ni no provengan del tránsito rodado, ya que hay otros factores como el tipo de suelo, pH, % de materia orgánica y textura que afectan los niveles de Cd y Ni en el suelo.

Tabla 17. Variación del área de la descarga de Pb en suelos y plantas con respecto a la densidad de tráfico.

Zona	Area Pb Suelo	Area Pb Planta	Suma Suelo	Plantas	Densidad de tráfico ¹
P-1	1.10	0.17	1.84	0.28	22100
P-2	0.74	0.11			
P-4	0.74	0.16	1.30	0.19	13680
P-5	0.56	0.03			
P-6	1.65	0.34	2.61	0.51	40000
P-7	0.96	0.17			
P-8	3.56	0.86	5.25	1.36	72250
P-9	1.69	0.50			
P-10	0.07	0.02	0.14	0.04	630

¹vehículos/día

r (descarga Pb Suelo: densidad de tráfico) = 0.994 (P < 0.01)

r (descarga Pb Planta: densidad de tráfico) = 0.978 (P < 0.01)

Tabla 18. Variación del área de la descarga de Cd en suelos y plantas con respecto a la densidad de tráfico.

Zona	Area		Suma		Densidad de tráfico ¹
	Pb Suelo	Pb Planta	Suelo	Plantas	
P-1	0.39	0.88			
P-2	0.38	0.41	0.77	1.29	22100
P-4	0.26	0.55			
P-5	0.30	0.70	0.56	1.25	13680
P-6	0.24	0.72			
P-7	0.28	0.63	0.52	1.35	40000
P-8	0.40	0.51			
P-9	0.29	0.40	0.69	0.91	72250
P-10	0.08	0.18	0.16	0.36	630

¹vehículos/día

r (descarga Cd suelo: densidad de tráfico) = 0.582 (P. < 0.20)

r (descarga Cd planta: densidad de tráfico) = 0.266 (P. < 0.40)

Tabla 19. Variación del área de la descarga de Ni en suelos y plantas con respecto a la densidad de tráfico.

Zona	Area Ni Suelo	Area Ni Planta	Suma Suelo	Plantas	Densidad de tráfico ¹
P-1	0.43	0.16	0.77	0.30	22100
P-2	0.44	0.14			
P-4	0.03	0.15	0.10	0.46	13680
P-5	0.07	0.31			
P-6	0.45	0.10	0.75	0.18	40000
P-7	0.30	0.08			
P-8	0.17	0.07	0.29	0.14	72250
P-9	0.12	0.07			
P-10	0.03	0.05	0.06	0.10	630

¹vehículos/día

r (descarga Ni suelo: densidad de tráfico) = 0.282 (P < 0.40)

r (descarga Ni planta: densidad de tráfico) = 0.296 (P < 0.40)

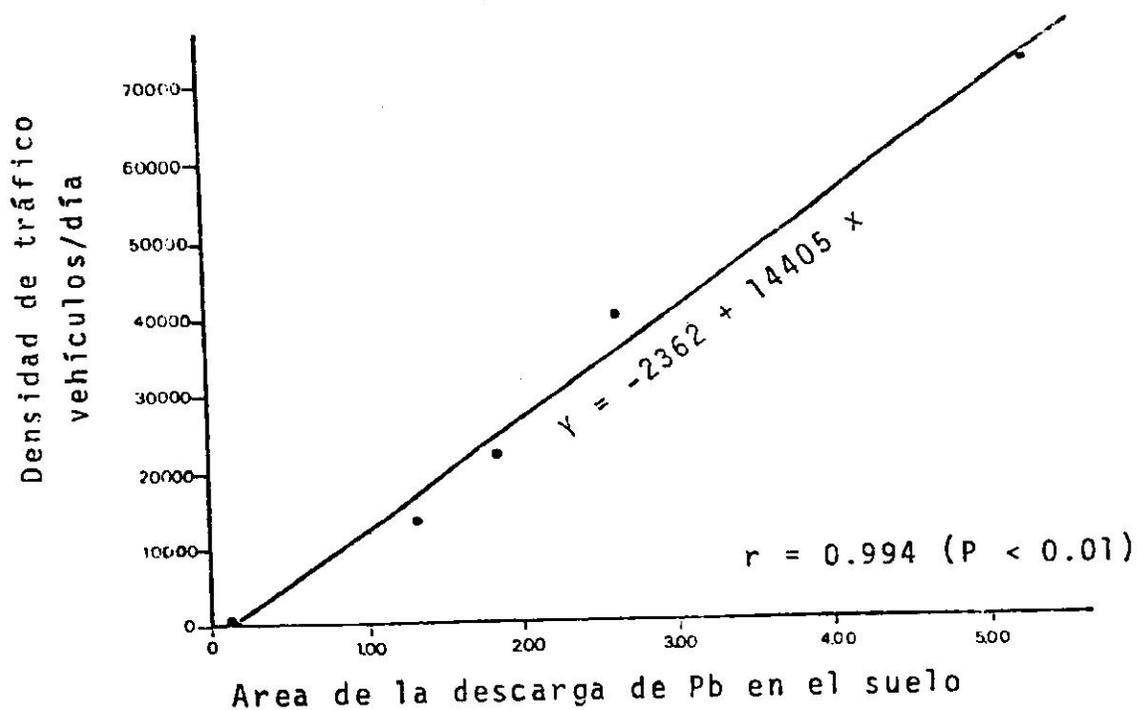


Figura 28. Relación entre el área de la descarga de Pb en el suelo y la densidad de tráfico.

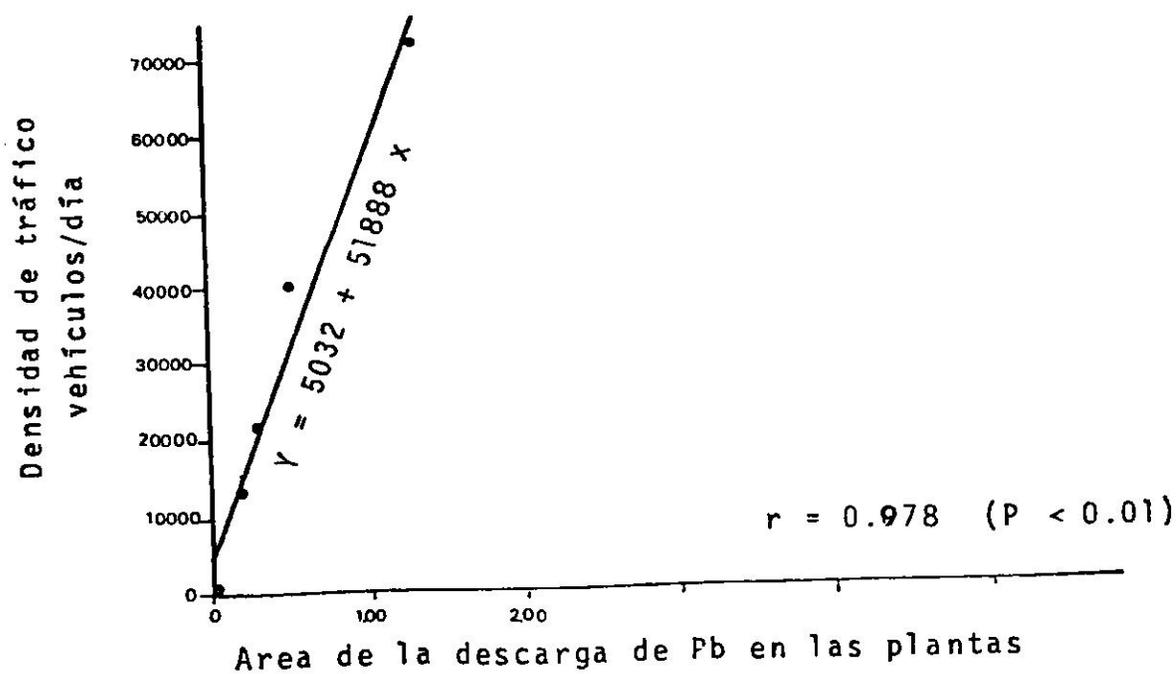


Figura 29. Relación entre el área de la descarga de Pb en las plantas y la densidad de tráfico.

Estudio de la relación entre las áreas de la descarga de Pb, Cd y Ni en suelos y plantas

Es interesante relacionar los contenidos de los metales extraíbles con HCl 1 N en el suelo con los contenidos totales de los metales en las plantas. Como se reseñó anteriormente, es preferible utilizar como parámetro el área de la descarga del metal. En la Figura 30 se observa cómo en el caso del Pb, existe una relación muy significativa. Esto indica que la extracción con HCl 1 N puede ser útil para interpretar la contaminación del suelo.

En cuanto a los resultados obtenidos para el Cd (ver Figura 31), éstos indican que existe una relación significativa, aunque no tanto como ocurría con el Pb. John y colaboradores sugieren que extrayendo con NH_4Ac 1 N la correlación será mucho mayor (57).

Finalmente, en el caso del Ni, no existe relación entre ambos parámetros. Esto era de esperar, teniendo en cuenta que los suelos estudiados son muy ricos en Ni. El coeficiente de correlación fue de 0.076; este valor indica que la relación es prácticamente nula. Es interesante observar que los valores obtenidos en las zonas P-4 y P-5 son los responsables de que no hubiese buena correlación.

Estudio de la relación entre los cocientes de concentración Pb/Cd en suelos y plantas

Los cocientes de concentración Pb/Cd del suelo promediados en todas las distancias, exceden los valores correspondientes

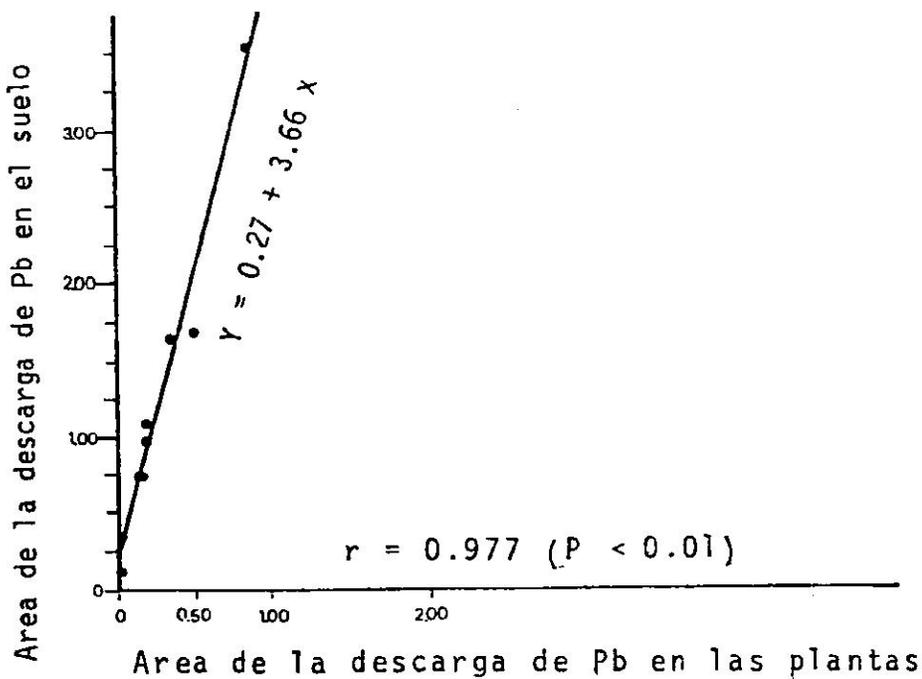


Figura 30. Relación entre el área de la descarga de Pb en el suelo y el área de la descarga de Pb en las plantas.

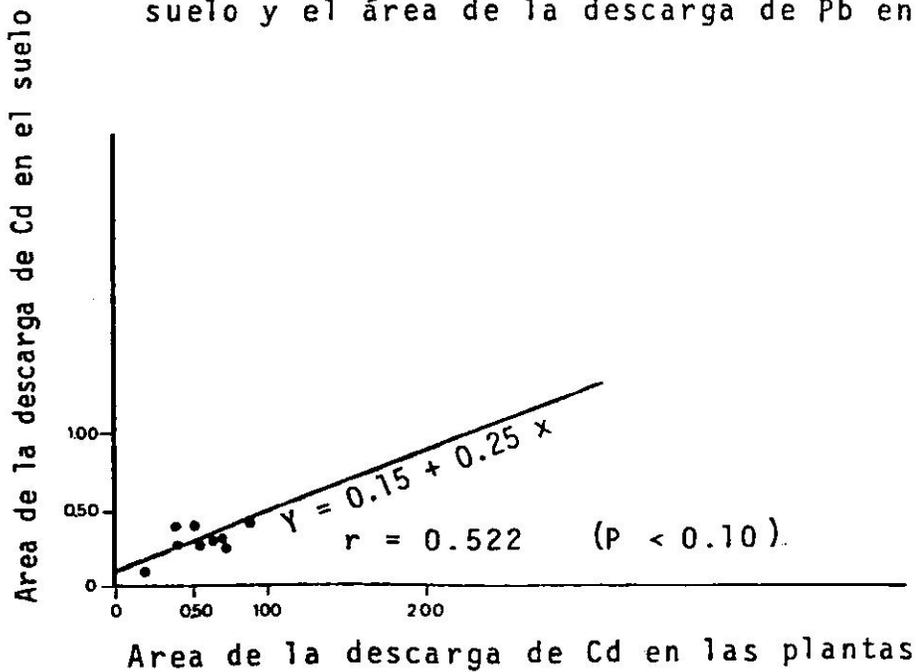


Figura 31. Relación entre el área de la descarga de Cd en el suelo y el área de la descarga de Cd en las plantas.

de estos cocientes Pb/Cd en las plantas (ver Tabla 20). Esto indica que las plantas acumulan preferentemente Cd. Estos datos confirman los resultados obtenidos por Motto y colaboradores (1). Esta disminución del cociente de concentración Pb/Cd es muy interesante desde el punto de vista toxicológico, ya que el valor del cociente en la dieta normal humana en los Estados Unidos es de 13 (54), 3 en el cuerpo humano y 0.04 en órganos como el hígado y el riñón (89).

La toma de Cd por la planta debe afectarse más que la del Pb al variar algunas de las propiedades de los suelos tales como la textura, ya que el Cd entra a la planta principalmente por la raíz. En la Tabla 20 se relaciona el cociente Pb/Cd suelo: Pb/Cd planta con el % de arcilla que se obtuvo al determinar la textura del suelo. Se encontró que existe una correlación significativa, el coeficiente de correlación fue 0.622 ($P < 0.05$).

Tabla 20. Variación de los cocientes Pb/Cd con el % de arcilla

Zona	P-1	P-2	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	P-9	P-10
Pb/Cd Suelo	270.5	161.7	285.0	183.1	406.0	283.8	536.0	437.8	184.7
Pb/Cd Planta	55.6	22.8	34.6	12.4	53.7	47.6	183.3	141.5	25.6
$\frac{\text{Pb/Cd Suelo}}{\text{Pb/Cd Planta}}$	4.9	7.1	8.2	14.8	7.6	6.0	2.9	3.1	7.2
% Arcilla	32	37	50	49	45	36	39	37	52

CONCLUSIONES

Los niveles máximos de Pb, Cd y Ni en el suelo y en la vegetación aledaños a las carreteras de Puerto Rico son comparables y a veces superiores a los hallados en Estados Unidos y en Europa. Esto puede suponer un serio peligro para la vida del ecosistema que rodea a las carreteras.

El área de la descarga de Pb y Cd a lo largo de una línea perpendicular a la carretera resultó ser un indicador más apropiado del grado de contaminación que los niveles más altos de dichos metales.

Los contenidos de Pb, Cd y Ni en los suelos (extracción con HCl 1 N) y los contenidos de Pb en la vegetación disminuyen según aumenta la distancia a la carretera. Sin embargo, los contenidos de Cd y Ni en la vegetación no presentan un gradiente regular de concentración con la distancia a la carretera.

Las áreas de las descargas de Pb en los suelos y en la vegetación están muy significativamente correlacionados con la densidad de tráfico, siendo ésta la primera vez que se demuestra este hecho sobre una base estadística firme.

Las áreas de las descargas de Pb y Cd en los suelos (extracción con HCl 1 N) están significativamente correlacionados con las áreas de las descargas de Pb y Cd en la vegetación, lo cual indica que esta extracción constituye un método válido, puesto que los contenidos de dichos metales extraíbles con HCl 1 N pueden usarse como indicadores de la disponibilidad de Pb y Cd en el suelo.

El viento predominante afecta notablemente la distribución del Pb en el ecosistema que rodea a la carretera: las descargas de Pb son mucho mayores en las zonas ubicadas en direcciones contrarias a las de los vientos predominantes, lo cual demuestra que gran parte del Pb se transporta por vía aérea.

El lavado de las plantas con agua reduce apreciablemente los contenidos de Pb, Cd y Ni. Esto indica que existe un depósito superficial de dichos metales en las plantas.

La acumulación de Pb y Cd es apreciable dentro de una distancia de aproximadamente 33.3 m a partir de la carretera, por lo que se recomienda evitar el uso de estas franjas de terreno con propósitos agrícolas.

REFERENCIAS

1. Motto, H. L., Daines, R. H., Chilko, D. M. y Motto, C. K. (1970). Lead in soils and plants. Its relationship to traffic volume and proximity to highways. *Environ. Sci. Technol.*, 4, 231-237.
2. Lagerwerff, J. V. y Specht, A. W. (1970). Contamination of roadside soil and vegetation with cadmium, nickel, lead and zinc. *Environ. Sci. Technol.*, 4, 583-586.
3. Quarles III, H. D., Hanawalt, R. B. y Odum, W. E. (1974). Lead in small mammals, plant, and soil at varying distances from a highway. *J. Appl. E.*, 11, 937-949.
4. Alvarez, A. M. (1978). Contaminación de suelos y plantas por efecto del tráfico rodado en el entorno de las carreteras. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Madrid, Departamento de Geoquímica, 69 págs.
5. Wong, M. H. y Tam, F. Y. (1978). Lead contamination of soil and vegetation grown near motorways in Hong-Kong. *J. Environ. Sci. Health*, 1, 13-22.
6. Ward, N. I., Brooks, R. R. y Robert, E. (1977). Heavy metal pollution from automotive emissions and its effect on roadside soils and pasture species in New Zealand. *Environ. Sci. Technol.*, 11, 917-920.
7. Departamento de Transportación y Obras Públicas, Estado Libre Asociado de Puerto Rico, Negociado de Vehículos de Motor. (1978). Registro de vehículos de motor por municipio y categoría al 30 de junio de 1978.
8. Gish, C. D. y Christensen, R. E. (1973). Cadmium, nickel, lead, and zinc in the earthworms from roadside soil. *Environ. Sci. Technol.*, 7, 1060-1062.
9. Cannon, H. L. y Bowles, J. M. (1962). Contamination of vegetation by tetraethyl lead. *Science*, 37, 765-766.
10. Leh, H. O. (1966). Contamination of plants by lead. *Gesunde Pflanzen*, 18, 21-24.
11. Daines, R. H., Motto, H. L. y Chilko, D. M. (1970). Atmospheric lead: its relationship to traffic volume and proximity to highways. *Environ. Sci. Technol.*, 4, 318-322.
12. Dedolph, R., Ter Haar, G., Holtzman, R. y Lucas, H. Jr. (1970). Source of lead in perennial ryegrass and radishes. *Environ. Sci. Technol.*, 4, 217-223.

- 39
13. Ter Haar, G. (1970). Air a source of lead in edible crops. *Environ. Sci. Technol.*, 4, 226-229.
 14. Schuck, E. A. y Locke, J. K. (1970). Relationship of automotive lead particulates to certain consumer crops. *Environ. Sci. Technol.*, 4, 324-330.
 15. Ward, N. I., Brooks, R. R. y Reeves, R. D. (1974). Lead from motorvehicle exhaust in trees along a major throughfare in Palmerston North, New Zealand. *Environ. Pollut.*, 6, 149-158.
 16. Chamberlain, A. C., Heard, M. J., Little, P. y Wiffen, R.D. (1979). The dispersion of lead from motor exhausts. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A.*, 290, 577-589. (Resumen) *Chem. Abstr.* 90: 173821e.
 17. Little, P. y Wiffen, R. (1978). Emission and deposition of lead from motor exhaust. II, Airborne concentration particle size and deposition of lead near motorways. *Atmos. Environ.*, 12, 1331-1341.
 18. Alessio, L., Cambiaghi, G., Groce, E., Frigier, P. y Trucco, R. (1979). Determination of the lead, cadmium, zinc and iron, in the atmospheric particulates of the industrialized urban area of Lombardy. *Med. Lav.*, 17, 24-37. (Resumen) *Chem. Abstr.* 90: 61877s.
 19. Kazuno, T., Nagase, Y. y Kobayashi, M. (1978). Survey of heavy metals in soil along the roads of Nagano-ken. *Eisei Kogui Kenkyusho Chesa Kenkyn Hokoka* 148, 11 págs. (Resumen) *Chem. Abstr.* 90: 85774m.
 20. Elsokarry, I. H. (1978). Contamination of roadside soils and plants near highway traffic with cadmium, nickel, lead and zinc in Alexandria district, Egipt. *Stud. Environ. Sci.*, 1, 25-28.
 21. Rabinowitz, M. B. y Wetherill, G. W. (1972). Identifying sources of lead contamination by stable isotope technique. *Environ. Sci. Technol.*, 6, 705-709.
 22. Chow, T. J., Snyder, C. B. y Earl, J. L. (1975). Isotope ratios of lead as pollutant source indicator. *Isot. Ratios Pollut. Source Behav Indic. Proc. Symp.*, págs. 95-108.
 23. Ewing, B. B. y Pearson, J. E. (1974). Lead in the environment. *Advan. Environ. Sci. Technol.*, 3, 1-126.
 24. Hirschler, D. A. y Gilbert, L. F. (1964). Nature of lead in automobile exhaust. *Arch. Environ. Health*, 8, 297-313. (Resumen) *Chem. Abstr.* 60: 1504z.

25. Smith W. H. (1976). Lead contamination of roadside ecosystem. *J. Air Poll. Control Assoc.*, 26, 753-766.
26. Cantwell, E. N., Jacob, E. S., Gunz, W. G. y Liberi, V. E. (1972). Control of particulate lead emission from automobiles. En *Cycling and control of metals*. Eds. Curry, M. G. y Gigliotti, G. M., Circinnati, USEPA, págs. 95-107.
27. Ter Haar, G. L. y Boyard, M. A. (1971). Composition of airborne lead particles. *Nature*, 232, 553-554.
28. Korkish, J. y Hazan, I. (1965). Anion exchange separations in hidrobromic acid-organic solvent media. *Anal. Chem.*, 37, 707-710.
29. Hale, C. C. y King, Jr. W. H. (1961). Direct nickel determination in petroleum oils by X-Ray at the 0.1 ppm level. *Anal. Chem.*, 33, 74-77.
30. Pierrard, J. M. (1969). Photochemical decomposition of lead halides from automobile exhaust. *Environ. Sci. Technol.*, 3, 48-51.
31. Robbins, J. A. y Snitz, F. L. (1972). Bromine and chlorine loss from lead halide automobile exhaust particulates. *Environ. Sci. Technol.*, 6, 164-169.
32. Boyer, K. W. y Laitinen, H. A. (1974). Lead halide aerosols. Some properties of environmental significance. *Environ. Sci. Technol.*, 8, 1093-1096.
33. Ter Haar, G. L., Lenane, D. L., Hu, J. N. y Brandt, M. (1972). Composition, size and control of automotive exhaust particulates. *J. Air Poll. Control Assoc.*, 22, 39-46.
34. Ganje, T. J. y Page, A. L. (1972). Lead concentrations, soil and air near highways. *Calif. Agric.*, 26, 7-9.
35. Ward, N. I., Reeves, R. D. y Brooks, R. R. (1975). Lead in soil and vegetation along a New Zealand State highway with low traffic volume. *Environ. Pollut.*, 9, 243-251.
36. Chow, T. J. y Earl, J. L. (1970). Lead, aerosols in the atmosphere increasing concentrations. *Science*, 169, 577-580.
37. Burnham, C. D., Moore, C. E., Kanabrocki, E. y Hattori, D. M. (1969). Determination of lead airborne particulates in Chicago and Cook County, Illinois, by atomic absorption spectroscopy. *Environ. Sci. Technol.*, 3, 472-475.

38. Atkin., P. R. (1969). Lead in a suburban environment. *J. Air Poll. Control Assoc.*, 19, 591-594.
39. Singer, M. y Hanson, L. (1969). Lead accumulation in soils near highways in the Twin cities metropolitan area. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33, 152-153.
40. Lagerwerff, J. V. y Brower, D. L. (1973). Exchange absorption or precipitation of lead in soils treated with chlorides of aluminum calcium and sodium. *Soil Sci. Amer. Proc.*, 37, 11-13.
41. Olson, K. W. y Skogerboe, R. K. (1975). Identification of soil lead compounds from automotive sources. *Environ. Sci. Technol.* 9, 227-230.
42. Chow, T. J. (1970). Lead accumulation in roadside soil and grass. *Nature*, 225, 295-296.
43. Wheeler, G. L. y Rolfe, G. L. (1979). The relationship between daily traffic volume and the distribution of lead in roadside soil and vegetation. *Environ. Pollut.*, 18, 265-274.
44. Swaine, D. J. y Mitchell, R. L. (1960). Trace-element distribution in soil profiles. *J. Soil Sci.*, 11, 347-368.
45. Lagerwerff, J. V., Arminger, W. H. y Specht, A. W. (1973). Uptake of lead by alfalfa and corn from soil and air. *Soil Sci.*, 115, 455-460.
46. Neathery, M. W. y Miller, W. J. (1976). Lead toxicity and metabolism in animals. *Feedstuffs*, 16 de febrero, 36-41.
47. Arvik, J. H. y Zimdahl, R. L. (1974). Influence of temperature, pH and metabolic inhibitor on uptake of lead by plant roots. *J. Environ. Qual.*, 3, 374-376.
48. Malone, C., Koeppe, D. E. y Miller, R. J. (1974). Localization of lead accumulated by corn plants. *Plant Phys.*, 53, 388-394.
49. Zimdahl, R. L. (1976). Entry and movement in vegetation of lead derived from air and soil sources. *J. Air Poll. Control Assoc.*, 26, 655-660.
50. University of Illinois. (1974). Environmental pollution by lead and other metals. Progress report to National Science Foundation, 574 págs.
51. Graham, D. L. y Kalmar, S. M. (1974). Lead in forage grass from a suburban area in Northern California. *Environ. Pollut.*, 7, 209-215.

52. Smith, W. H. (1973). Metal contamination of urban woody plants. *Environ. Sci. Technol.*, 7, 631-636.
53. Mac Lean, A. J., Halstead, R. L. y Finn, B. J. (1969). Extractability of added lead in soils and its concentration in plant. *Can. J. Soil Sci.*, 49, 327-334.
54. Schroeder, H. A. y Balassa, J. J. (1961). Abnormal trace metal (cadmium) in man. *J. Chronic Dis.*, 14, 236-258.
55. Street, J. J., Sabey, B. R. y Lindsay, W. L. (1978). Influence of pH, phosphorus, calcium, sewage sludge, and incubation time on the solubility and plant uptake of cadmium. *J. Environ. Qual.*, 7, 286-290.
56. Jones, R. L., Hinesly, T. D. y Ziegler, E. L. (1973). Cadmium content of soybeans grown in sewage sludge amended soil. *J. Environ. Qual.*, 2, 351-353.
57. John, M. K., van Laerhoven, C. J. y Chuah, H. H. (1972). Factors affecting plant uptake and phytotoxicity of cadmium added to soils. *Environ. Sci. Technol.*, 6, 1005-1008.
58. Hinesly, T. D., Jones, R. L. y Ziegler, E. L. (1972). Effect of heated anaerobically digested sludge on corn. *Compost Sci.*, 13, 26-30.
59. Le Riche. (1968). Metal contamination of soil in the Woburn market-garden experiment resulting from the application of sewage sludge. *J. Agri. Sci. Camb.*, 71, 205-208.
60. Patterson, J. B. (1971). Metal toxicities arising from industry. Technical Bulletin, Ministry of Agriculture Fisheries and Food, Agriculture Development and Advisory Service. Cambridge, England, 21, 193-207.
61. Tyler, G. (1972). Heavy metals pollute nature, may reduce productivity. *Ambio*, 1, 52-59.
62. Tyler, G. (1974). Heavy metals pollution and soil enzymatic activity. *Plant Soil*, 41, 303-311.
63. Tyler, G., Mornsjo, T. y Nilsson, B. (1974). Effects of cadmium, lead and sodium salts on nitrification in a mull soil. *Plant Soil*, 40, 237-242.
64. Bazzaz, F. A., Carlson, R. W. y Rolfe, G. L. (1974). Effect of heavy metals on plants. Part I. Inhibition of gas exchange in sunflower by lead, cadmium, nickel and thallium. *Environ. Pollut.*, 7, 241-246.

65. Bazzaz, F. A., Rolfe, G. L. y Carlson, R. W. (1974). Effect of cadmium on photosynthesis and transpiration of excised leaves of corn and sunflower. *Physiol. Plant.* 32, 373-376.
66. Bazzaz, F. A., Rolfe, G. L. y Windle, D. (1974). Differing sensitivity of corn and soybean photosynthesis and transpiration to lead contamination. *J. Environ. Qual.*, 3, 156-158.
67. Carlson, R. W., Bazzaz, F. A. y Rolfe, G. L. (1977). Plant effect (Part I). An Environmental contamination by lead and other heavy metals, Volumen IV. Eds. Rolfe, G. L. y Reinbold, K. A. University of Illinois at Urban Champaign, Institute for Environmental Studies, págs: 67-94.
68. Koeppe, D. E. y Miller, R. J. (1970). Lead effect on corn mitochondrial respiration. *Science*, 167, 1376-1379.
69. Bittle, J. E., Koeppe, D. E. y Miller, R. J. (1974). Sorption of heavy metal cations by corn mitochondria and the effect on electron and energy transfer reactions. *Physiol. Plant.*, 30, 226-230.
70. Bogges, S. y Koeppe, D. E. (1977). The effect of zinc on cadmium accumulation by soybeans. An Environmental contamination by lead and other heavy metals. Volume IV. Eds. Rolfe, G. L. y Reinbold, K. A. University of Illinois of Urbana Champaign. Institute for Environmental Studies, pages 112-133.
71. Lawrey, J. L. y Male, M. E. (1979). Lichen growth responses to stress induced by automobile exhaust pollution. *Science*, 204, 423-424.
72. Grandjean, P., Arnvig, E. y Beckmann, J. (1978). Psychological dysfunction in lead-exposed workers. Relation to biological parameters of exposure. *Environ. Health*, 4, 295-303.
73. Meredith, P. A., Moore, N. R. y Goldbery, A. (1979). Erythrocyte γ -aminolevulinic acid dehydratase activity and blood protoporphyrin concentrations as indexes of lead exposure and altered heme biosynthesis. *Clin. Sci.*, 56, 61-69. (Resumen) *Chem. Abstr.* 91: 43876s.
74. Mirochnik, L. M. (1978). Some lipid and protein metabolism disorders as an index of the possible atherogenic effect of lead. *Med. Zh. Uzb.*, 11, 42-47. (Resumen) *Chem. Abstr.* 90: 109151j.

75. Colucci, J. M. y Begenan, C. R. (1971). Carcinogenic air pollutants in relation to automotive traffic in New York. *Environ. Sci. Technol.*, 5, 145-150.
76. Nordbery, G. F., Piscator, M. y Lind, B. (1971). Distribution of cadmium among protein fractions of mouse liver. *Acta Pharmacol. Toxicol.*, 29, 456-470.
77. Schroeder, H. A. (1965). Cadmium as a factor in hypertension. *J. Chronic Dis.*, 18, 647-656.
78. Lewis, G. P., Lyle, H. y Miller, S. (1969). Association between elevated hepatic water soluble protein-bound cadmium levels and chronic bronchitis and/or emphysema. *Lancet*, 11, 1330-1333.
79. Tsuchiya, K. (1969). Causation of ouch-ouch disease. Nature of disease. Death rate. *Keio J. Med.*, 18, 181-194.
80. Tiplou, I. M. (1960). Distribution of trace metals in the human body. *Metal Binding Med., Proc. Symposium, Philadelphia*, págs. 27-42.
81. Abruña, F., Lugo, M. A. y Pérez, R. (1977). Los suelos de Puerto Rico. En *Geovisión de Puerto Rico*. Ed. Galiñanes, M. T. Editorial Universitaria, Universidad de Puerto Rico, págs. 121-157.
82. Colón, J. A. (1977). Climatología. En *Geovisión de Puerto Rico*. Ed. Galiñanes, M. T. Editorial Universitaria, Universidad de Puerto Rico, págs. 45-119.
83. Collet, P. (1978). Lead contamination of plants adjacent to highway and the protective influence of wind screens. *Qual. Plant - Plant Food Hum. Nutr.*, 28, 187-194. (Resumen) *Chem. Abstr.* 89: 54301e.
84. Jackson, M. L. (1970). Actividad de los iones hidrógeno. Su determinación en los suelos. En *Análisis químico de suelos*. Ed. Omega, 2º Edición, Barcelona, págs. 67-90.
85. Richards, L. A. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *United States Salinity Laboratory Staff*. U. S. Department of Agriculture. 160 págs.
86. Bouyoucos, G. L. (1934). A comparison between the pipet method and the hydrometer method for making mechanical analysis of soil. *Soil Sci.*, 38, 335-345.
87. Samuelson, O. (1963). Ion exchange separation in Analytical Chemistry. Wiley, New York. 311 págs.

88. United States Environmental Protection Agency, (1974). Methods for chemical analysis of water and wastes. U. S. E. P. A. Office of Technology Transfer, Washington, D. C., 298 págs.
89. Boutron, C. (1979). Past and present day tropospheric fallout fluxes of lead, cadmium, copper, zinc and silver in Antarctica and Greenland. Geophys. Res. Lett., 6, 159-162. (Resumen) Chem. Abstr. 91: 95779b.
90. Bureau of Mines. (1970). Availability of U. S. primary nickel resources. United States Department of the Interior I. C. 8469, 57 págs.

APENDICE I

Frecuencia mensual (%) de la dirección en el Aeropuerto de Mayagüez, Puerto Rico.
 Datos para las horas diurnas únicamente.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
N	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4	0.2	0.4	0.2	0.1	0	0.2
NNE	7.8	6.4	4.6	6.4	6.9	6.6	4.9	6.2	4.9	5.3	7.1	5.4	6.1
NE	5.3	6.3	4.2	5.9	5.1	12.3	11.3	13.1	13.0	8.8	8.3	5.8	8.1
ENE	47.6	45.8	45.1	39.0	37.1	35.7	43.4	34.3	31.5	32.4	44.7	50.2	40.8
E	2.2	2.3	2.0	1.2	2.6	3.1	2.6	3.1	3.3	1.5	1.7	1.2	2.2
ESE	7.3	7.5	7.2	4.6	6.5	6.6	5.3	6.3	6.7	5.5	5.0	9.0	6.5
SE	1.1	0.6	0.4	0.9	1.6	2.0	0.5	1.2	2.0	2.0	0.7	1.2	1.2
SSE	2.3	2.1	1.8	5.0	7.9	6.1	3.5	4.4	5.0	6.8	3.2	2.3	4.2
S	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.4	0.2
SSO	2.2	1.4	2.1	3.1	3.1	1.7	1.9	3.6	3.6	4.8	3.4	2.1	2.1
SO	0.3	0.2	0.3	0.3	0.7	0.5	0.6	1.0	1.5	1.7	0.6	0.4	0.5
OSO	7.0	6.2	10.6	7.5	6.2	3.8	5.1	5.9	5.0	5.0	5.3	5.5	6.2
O	0.4	0.9	0.4	0.6	1.0	0.9	0.7	1.1	0.6	0.2	0.4	0.4	0.5
ONO	4.9	8.3	11.2	10.1	6.5	6.1	4.9	4.8	5.5	5.5	5.4	4.7	6.6
NO	0.3	0.5	0.2	0.6	0.8	0.3	1.0	1.2	1.1	0.9	0.4	0.2	0.5
NNO	1.8	2.5	2.1	3.5	3.8	3.7	2.5	2.3	2.2	2.7	1.7	1.6	2.5
Calma	8.8	8.7	7.6	10.9	9.7	9.9	11.6	11.2	13.3	16.5	11.3	9.5	10.6

APENDICE II

Frecuencia mensual (%) de la dirección del viento en la Base Borinquen, Aguadilla, P.R.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
N	1.1	1.3	1.5	1.3	1.3	0.5	0.1	0.5	0.8	1.2	1.2	0.9	1.0
NNE	1.6	2.5	1.7	2.5	2.2	1.1	0.4	1.0	1.8	2.2	1.9	1.5	1.7
NE	9.6	12.3	9.0	8.4	8.5	4.9	3.3	5.0	6.8	7.4	7.7	6.2	7.4
ENE	24.9	25.0	24.4	20.6	18.8	22.5	27.4	23.9	19.1	14.4	20.6	23.2	22.0
E	29.5	27.3	33.1	32.4	29.2	35.6	40.7	32.2	27.1	23.6	32.2	37.3	31.7
ESE	15.4	11.9	11.8	13.8	14.5	14.3	14.5	12.9	13.3	13.2	11.8	12.9	13.4
SE	7.2	7.5	8.2	8.6	8.2	8.3	7.0	9.6	11.4	13.5	10.0	7.8	9.0
SSE	1.1	1.9	1.4	1.7	1.4	1.2	0.6	1.2	2.6	2.8	2.5	1.2	1.6
S	1.0	2.4	1.8	2.3	1.5	1.2	0.6	1.1	2.7	3.2	1.8	1.2	1.7
SSO	0.3	0.7	0.7	0.7	0.8	0.5	0.3	0.7	1.7	2.1	2.6	0.4	0.8
SO	0.6	1.3	1.0	0.8	1.6	0.8	0.3	0.8	2.1	2.0	1.0	0.5	1.1
OSO	0.4	0.2	0.3	0.4	0.4	0.2	0.1	0.4	0.7	0.5	0.3	0.2	0.4
O	0.6	0.6	0.7	0.6	0.2	0.1	0.4	1.0	1.0	1.0	0.9	0.2	0.6
ONO	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.5	0.3
NO	0.6	0.8	0.9	0.7	0.9	0.3	0.2	0.2	0.6	0.9	1.3	0.6	0.7
NNO	0.6	0.6	0.4	0.6	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.5	0.5	0.4	0.4
Calma	5.1	3.4	2.8	4.1	8.9	8.0	4.4	9.8	7.5	11.0	5.0	5.0	6.3

