



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Análisis de riesgos en salud en relación al contenido en plomo y cadmio en la materia particulada en Cartagena en la última década del siglo XX

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Máster en Ingeniería Ambiental y Procesos Sostenibles

Autor: Cristian Martínez López
Director: Stella Moreno Grau
Codirector: María Josefa Martínez García



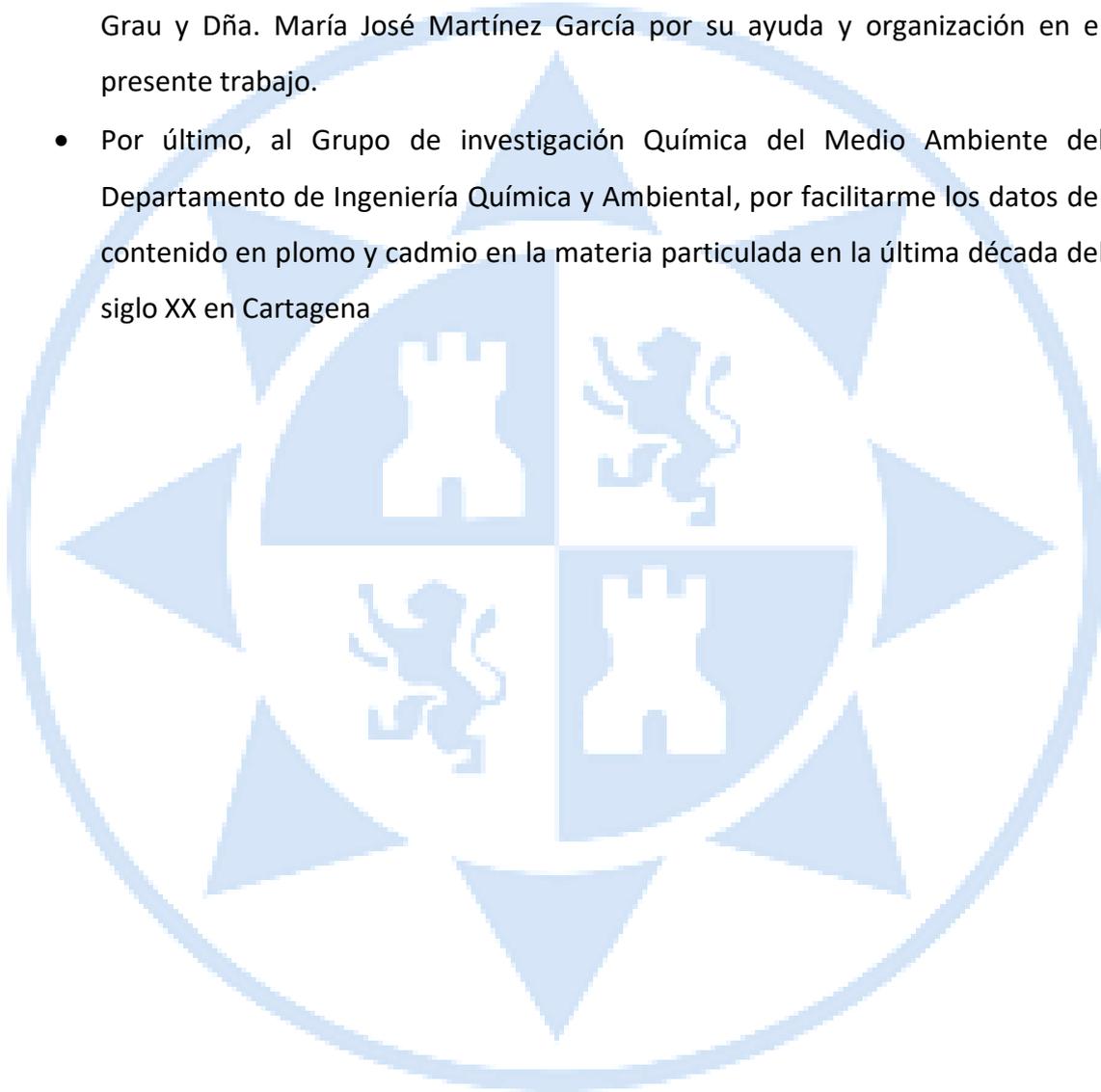
Universidad
Politécnica
de Cartagena

Cartagena, Septiembre 2021

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a ciertas personas e instituciones:

- En primer lugar a mi familia por el apoyo diario y por ello estoy aquí hoy.
- En segundo lugar, a mis directores de trabajo fin de máster, Dña. Stella Moreno Grau y Dña. María José Martínez García por su ayuda y organización en el presente trabajo.
- Por último, al Grupo de investigación Química del Medio Ambiente del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, por facilitarme los datos del contenido en plomo y cadmio en la materia particulada en la última década del siglo XX en Cartagena



INDICE

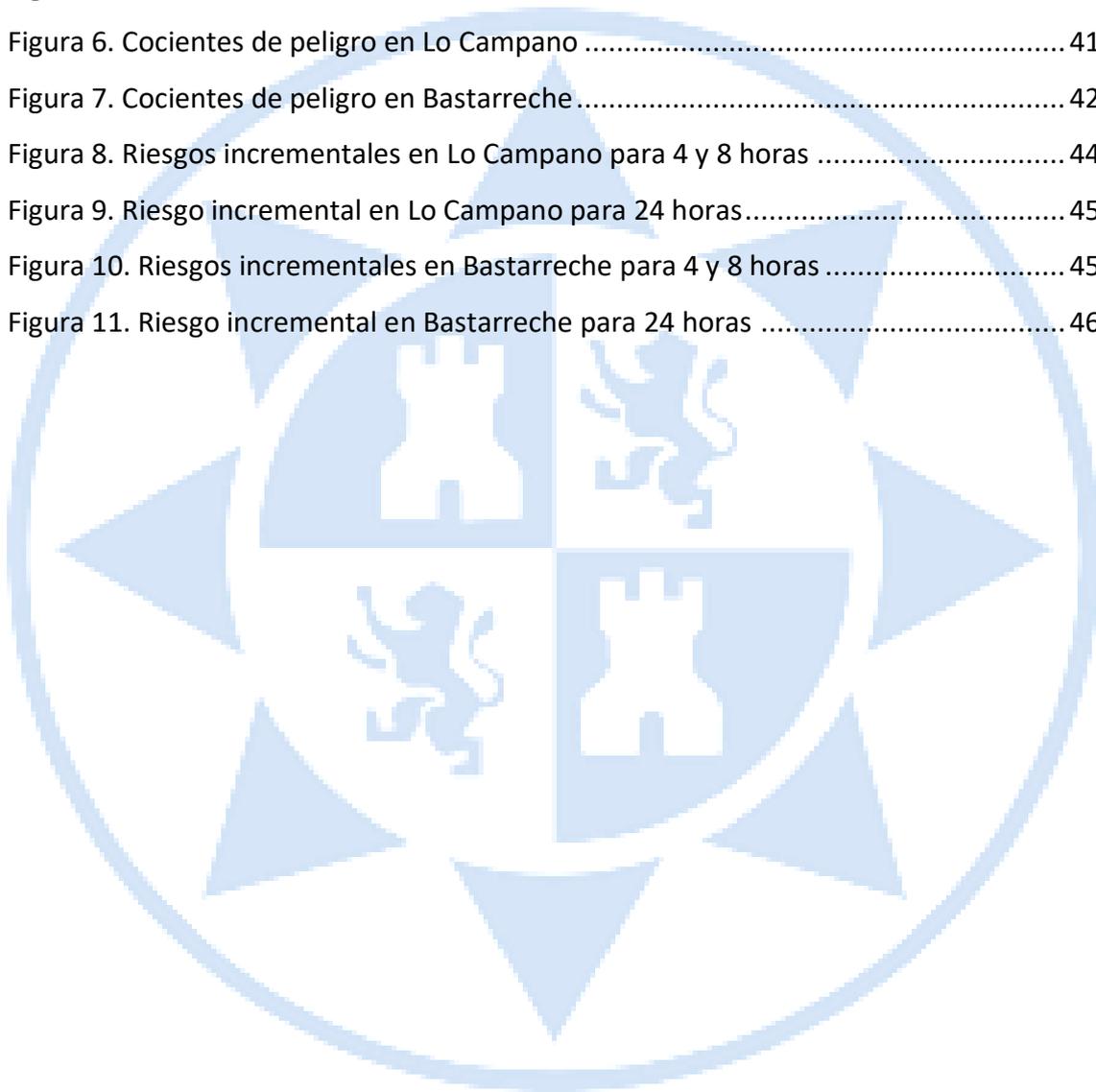
RESUMEN	6
ABSTRACT	8
1. Introducción y objetivos	9
2. Antecedentes bibliográficos	11
2.1. Plomo.....	13
2.1.1. Características físico-químicas y obtención	13
2.1.2. Fuentes antropogénicas.....	14
2.1.3. Distribución y formas de penetración en el organismo.....	15
2.1.4. Carcinogenicidad y toxicidad.....	16
2.1.5. Efectos en la salud	17
2.1.6. Normativa	19
2.2. Cadmio.....	21
2.2.1. Características físico-químicas	21
2.2.2. Fuentes antropogénicas.....	21
2.2.3. Distribución y formas de penetración en el organismo.....	22
2.2.4. Carcinogenicidad y toxicidad.....	23
2.2.5. Efectos en la salud	24
2.2.6. Normativa	24
2.3. Área de estudio	25
3. Materiales y métodos	27
3.1. Puntos de muestreo y filtros.....	27
3.2. Análisis de muestras.....	28
3.2.1. Cuantificación.....	29
3.3. Procedimiento de Evaluación de Riesgos en Salud.....	30
4. Resultados	34
4.1. Identificación del peligro	34
4.2. Relación dosis-respuesta	36
4.3. Evaluación de la exposición	36
4.4. Caracterización del riesgo.....	39
5. Discusión.....	47
6. Conclusiones.....	52
7. Bibliografía.....	53

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de compuestos cancerígenos de la EPA	11
Tabla 2. Tipos de cáncer en función de la concentración de plomo en sangre	16
Tabla 3. Valores límite de plomo	20
Tabla 4. Dosis de riesgo mínimo (MRL) del cadmio	25
Tabla 5. Valores de concentración de media anual en la Plaza de Bastarrece	29
Tabla 6. Valores de concentración de media anual en el barrio Lo Campano.....	29
Tabla 7. Valores de referencia de cadmio y plomo	36
Tabla 8. Valores de concentración de aire de exposición de plomo	38
Tabla 9. Valores de concentración de aire de exposición de cadmio.....	38
Tabla 10. Valores de concentración de aire de exposición de plomo y cadmio en 24 horas.....	39
Tabla 11. Valores del cociente de peligro por inhalación para 4 horas.....	39
Tabla 12. Valores del cociente de peligro por inhalación para 8 horas.....	40
Tabla 13. Valores del cociente de peligro por inhalación para 24 horas.....	41
Tabla 14. Valores del riesgo incremental de cáncer por inhalación para 4 horas	42
Tabla 15. Valores del riesgo incremental de cáncer por inhalación para 8 horas	43
Tabla 16. Valores del riesgo incremental de cáncer por inhalación para 24 horas	44

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Plaza de Bastarreche	26
Figura 2. Ubicación de Lo Campano.....	26
Figura 3. Fases del procedimiento de ERS	30
Figura 4. Concentraciones anuales de plomo	37
Figura 5. Concentraciones anuales de cadmio	37
Figura 6. Cocientes de peligro en Lo Campano	41
Figura 7. Cocientes de peligro en Bastarreche.....	42
Figura 8. Riesgos incrementales en Lo Campano para 4 y 8 horas	44
Figura 9. Riesgo incremental en Lo Campano para 24 horas.....	45
Figura 10. Riesgos incrementales en Bastarreche para 4 y 8 horas	45
Figura 11. Riesgo incremental en Bastarreche para 24 horas	46



RESUMEN

En el presente trabajo se aborda una evaluación de riesgos en salud en relación con la concentración de cadmio y plomo en la materia particulada en la ciudad de Cartagena a finales del siglo XX.

De ambos metales se relata información relativa a las características del propio metal, las fuentes naturales y antropogénicas, las distintas vías de distribución y penetración en el organismo, los posibles efectos que pueden producir en la salud de los seres humanos y la normativa que rige los valores límite de ambos metales.

En el trabajo se analiza el área de estudio donde se encuentran los puntos de muestreo. Las muestras fueron recogidas mediante captadores de alto volumen sin punto de corte (partículas totales en suspensión) sobre filtros de fibra de vidrio o de ésteres de celulosa, cuantificando el contenido en plomo y cadmio, respectivamente. Para la realización de este estudio se ha contado con la base de datos del grupo de Investigación Química del Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Cartagena.

La evaluación de riesgos en salud sigue un procedimiento de cuatro fases: identificación de peligros, evaluación dosis-respuesta, evaluación de la exposición y caracterización del riesgo.

La evaluación se realiza a distintos tiempos de exposición, 4, 8 y 24 horas. Tras el procedimiento, se obtienen resultados que informan de si son probables o no la aparición de efectos adversos por ambos metales o un incremento de la incidencia de cáncer.

En la cuantificación de los metales plomo y cadmio se aprecia un descenso general de la concentración a lo largo de la última década del siglo XX.

Los resultados del análisis de riesgos en salud mostraron para los efectos no cancerígenos que la aparición de efectos adversos no era probable para ningún tiempo de exposición debido a los valores de los coeficientes de peligro durante el período

estudiado y, por el contrario, el incremento de la incidencia de cáncer puede ser causada por ambos metales.

Con el paso de los años y a finales de la década estudiada, los riesgos a efectos adversos e incidencia de cáncer han disminuido.



ABSTRACT

In this work is carried out an assessment of health risks in relation to the concentration of cadmium and lead in particulate matter in the city of Cartagena at the end of the 20th century.

Information of both metals is related on the characteristics of cadmium and lead, natural and anthropogenic sources, different routes of distribution and penetration into the body, possible effects that they can produce on human health and the limit values of both metals.

The project analyzes the area where are located the sampling points. The samples were collected using high-volume collectors without a cut-off point (total suspended particles) on fiberglass or cellulose ester filters, quantifying the lead and cadmium, respectively. This work has been used the database of the Environmental Chemical Research group of the Polytechnic University of Cartagena.

Health risk assessment have four phases: risks identification, dose-response assessment, exposure assessment and risk characterization.

The evaluation is carried out at different exposure times, 4, 8 and 24 hours. After the procedure, results were obtained and informed about appearance or not of adverse effects from both metals or an increase in the incidence of cancer.

Quantification shows a general decrease in the concentration of both metals in the last decade of the 20th century.

The results showed that the appearance of adverse effects wasn't likely for any exposure time due the values of the risk coefficients during the period studied. On the other hand, the increase in the incidence of cancer can be caused by both metals.

Over the years, the risk of adverse effects and incidence of cancer have decreased.

1. Introducción y objetivos

A lo largo de la historia desde el primer milenio antes de Cristo hasta la actualidad en la ciudad de Cartagena se ha estado explotando la industria minera debido a su carácter económico y posición estratégica, conllevando a una disminución de la calidad del aire por presencia de contaminantes en exceso en el aerosol atmosférico. Las partículas, sólidas y líquidas, en suspensión en el aire constituyen el aerosol atmosférico.

La industria minera ha tenido repercusiones en la población de la zona al estar en contacto con ciertos metales de alta biopersistencia por medio de la inhalación del aire, por agua o por suelos contaminados [1].

La contaminación del aire puede ser la causa de gran cantidad de efectos adversos en la salud humana, desde más leves como tos hasta enfermedades cardíacas, cáncer de pulmón, infecciones respiratorias agudas o crónicas. También puede agravar enfermedades pulmonares o cardíacas ya existentes [2].

Históricamente se han realizado medidas de las partículas totales en suspensión. No es hasta el primer decenio del siglo XXI cuando en España la normativa legal establece valores límite para las partículas PM₁₀ (diámetro aerodinámico de 10 μm) y se establecen los métodos normalizados para el muestreo y la cuantificación. Definiendo la cantidad retenida en un período de tiempo por cierto volumen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) generalmente, valores medios diarios.

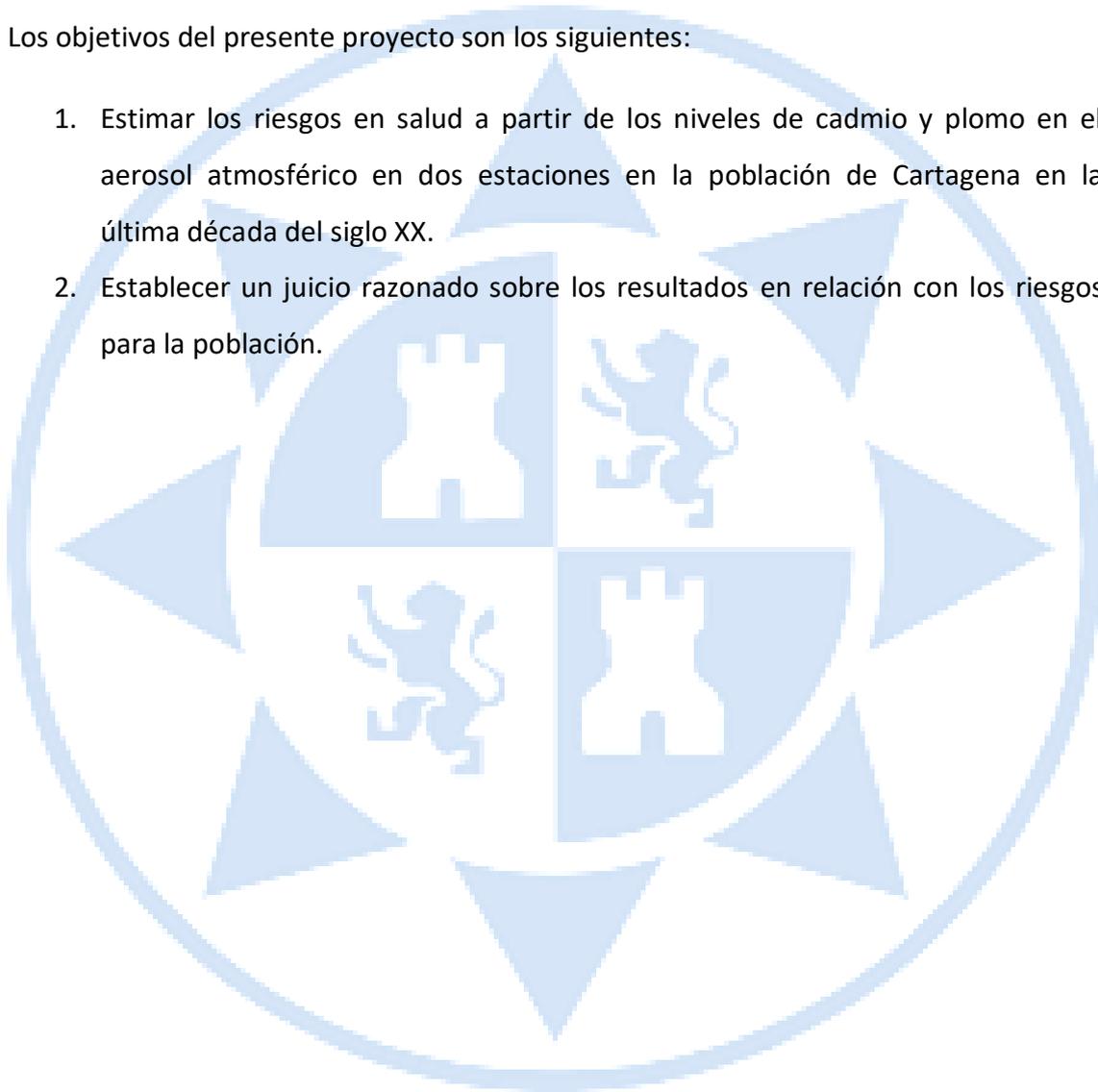
Pocos estudios han determinado los riesgos para la población relacionados con la calidad en el aire urbano con relación a contenidos de metales de plomo y cadmio en la materia particulada.

En las últimas décadas, se ha mostrado mayor interés por los riesgos para la salud para poder definir la necesidad o no de intervención y así prevenir enfermedades y traumatismos. El análisis de riesgos ha evolucionado velozmente determinando métodos para llevar a cabo la evaluación del riesgo.

La evaluación de riesgos en salud (ERS) es empleada para predecir y describir los resultados de la actividad humana en los niveles de exposición a las personas por distintos factores de riesgo, siendo una herramienta que permite caracterizar tanto cualitativamente como cuantitativamente los distintos impactos a la salud que se relacionan con cualquier proyecto que es sometido a Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) [3].

Los objetivos del presente proyecto son los siguientes:

1. Estimar los riesgos en salud a partir de los niveles de cadmio y plomo en el aerosol atmosférico en dos estaciones en la población de Cartagena en la última década del siglo XX.
2. Establecer un juicio razonado sobre los resultados en relación con los riesgos para la población.



2. Antecedentes bibliográficos

En este estudio se parte de la base de datos de la materia particulada en suspensión, partículas totales en suspensión, en la ciudad de Cartagena en los años 1990 a 2000, centrandó la atención en el contenido en plomo y cadmio analizados en dos puntos de muestreo. Ambos contaminantes tienen diferentes efectos sobre la salud, tanto cancerígenos como no cancerígenos.

La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) determina una clasificación de las sustancias carcinogénicas en cuatro grupos:

Grupo 1: Sustancias carcinogénicas para el ser humano, se tienen suficientes evidencias epidemiológicas en humanos.

Grupo 2A: Sustancias posiblemente carcinogénicas en humanos, hay algunas pruebas de que pueden causar cáncer a los humanos pero no son determinantes actualmente.

Grupo 2B: Sustancias posiblemente carcinogénicas en humanos, existen ciertas pruebas de que pueden producir cáncer a los humanos pero están lejos de ser concluyentes.

Grupo 3: Sustancias que no pueden ser clasificadas como carcinogénicas en humanos. Son aquellas que no tienen pruebas de que provoquen cáncer al ser humano.

Grupo 4: Sustancias posiblemente no carcinogénicas en humanos, hay suficientes pruebas de que no provoca cáncer en el ser humano [4].

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) a partir de estudios en humanos y animales determina una clasificación de sustancias carcinogénicas en cinco grupos mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de compuestos cancerígenos de la EPA

Grupo	Clasificación	Análisis
1	Cancerígeno humano	Hay suficiente evidencia epidemiológica para concluir una relación causal entre el desarrollo del cáncer y la exposición al agente que lo ha provocado
2	Probable cancerígeno	Se divide en dos:

	humano	- B1: cuando la evidencia en humanos es limitada - B2: la evidencia en animales es suficiente pero en los humanos no es adecuada
3	Posible cancerígeno humano	Cuando la evidencia en humanos no es adecuada pero en animales es limitada
4	No clasificado	Evidencias en humanos y animales inadecuadas o faltan datos
5	No cancerígeno	Cuando hay evidencias negativas en por lo menos dos estudios epidemiológicos

Fuente:[5].

La Unión Europea establece tres categorías:

Primera categoría: sustancias que son cancerígenas para la población. Existe una relación causa/efecto a la exposición a la población a dichas sustancias y la aparición de cáncer.

En esta categoría se basan en estudios epidemiológicos, mientras que en la segunda y tercera en estudios en animales.

Segunda categoría: sustancias que pueden ser cancerígenas para la población. Hay evidencias de que la exposición ante estas sustancias puede producir cáncer.

Las sustancias clasificadas en esta categoría han de tener evidencia de por lo menos dos especies animales o resultados contundentes en una especie junto con otras pruebas como genotoxicidad, inducción de tumores benignos, etc.

Tercera categoría: se encuentran sustancias de las que sus efectos carcinógenos son preocupantes para la población y no se dispone de evidencia suficiente, habiendo solo algunos experimentos en animales que son insuficientes.

Esta categoría está dividida en dos subcategorías:

- A. Se encuentran aquellas sustancias que se han investigado pero no hay suficiente evidencia para clasificarlas en la segunda categoría y no es probable conseguir esta información.
- B. Se encuentran aquellas sustancias de las que no se ha investigado lo suficiente ya que los datos son inadecuados pero son preocupantes para el hombre.

Según la clasificación de American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) se dividen las sustancias en cinco grupos:

Grupo A1: Sustancias carcinógenas para humanos, se tienen suficientes evidencias epidemiológicas en humanos.

Grupo A2: Sustancias carcinógenas con sospecha de serlo en humanos.

Grupo A3: Sustancias carcinogénicas en animales.

Grupo A4: Sustancias no clasificadas como carcinogénicas en humanos. Son aquellas que no se tiene suficiente evidencia en experimentos en humanos y/o animales.

Grupo A5: Sustancias sin sospechas de carcinogenicidad en humanos. Son aquellas cuyos experimentos en humanos no han levantado sospecha de riesgo de inducir cáncer [5].

2.1. Plomo

2.1.1. Características físico-químicas y obtención

El **plomo** es un metal brillante de color gris azulado con un número y peso atómico de 82 y 207,21 respectivamente. Sus puntos de fusión y ebullición son de 327,5°C y 1750°C. Posee una densidad a la temperatura de 20°C de 11,34 g/cm³ [6].

Es un metal con un alto grado de toxicidad que se encuentra en la naturaleza como carbonato, sulfato y su forma mineral más abundante es la galena (PbS). Hasta 1881 la mayor producción de plomo mundial fue española, desde entonces ha sido superada por la producción americana.

En Europa, el Parlamento Europeo prohibió la gasolina con plomo desde el año 2000. Por ello, se obligó a mejorar los vehículos que se producían y un uso de combustibles más adecuados con el medio ambiente. Se tuvo en cuenta a los países con menor poder adquisitivo, que podían retrasar esta prohibición hasta 2005 [7].

El plomo ha sido también una gran fuente de contaminación en EEUU, siendo usado por la combustión de la gasolina, que se dejó de usar en 1973 y luego se prohibió en 1995 (con excepción de las aeronaves de pistón).

Sin embargo, continuó utilizándose como agente antidetonante en los combustibles de la Asociación Nacional de Carreras de Autos de Stock (NASCAR) hasta que se fue eliminando gradualmente a partir de 2008 [5].

2.1.2. Fuentes antropogénicas

Con el paso de los años, su uso ha dado lugar a una gran contaminación, lo que ha producido impactos en el medio ambiente afectando a la salud de las personas al aumentar su concentración en el aire y, por tanto, una elevada exposición. No es la única vía, también está regulado el contenido en plomo en el agua de consumo.

Según un estudio de Ubillus Limo, 2003[8], algunas fuentes industriales antropogénicas con mayor riesgo al ser humano en la actualidad por las intoxicaciones que puedan derivar son:

- Fabricantes de cerámica.
- Fabricantes de plástico (estearato de plomo).
- Combustibles en motores.
- Plomo en equipos químicos.
- Fabricantes de insecticidas que contienen plomo (arseniato de plomo).
- Plásticos PVC.
- Fabricantes de pigmentos para pinturas.
- Fabricantes de masillas con plomo.
- Soldadores de metales.
- Extracción y fundición de minerales.
- Fabricantes de acumuladores.
- Combustión de carbón y petróleo.

- Incineración de desechos.
- Baterías de almacenamiento.

2.1.3. Distribución y formas de penetración en el organismo

Según un estudio toxicológico del plomo realizado por la ATSDR [9], el material particulado que contiene plomo se puede transportar a través del aire, el agua y el suelo. En general, la disposición atmosférica es la mayor fuente de plomo que se encuentra en suelos que no se ven afectados por otras fuentes locales distintas del aire.

El plomo se transfiere continuamente entre el aire, el agua y el suelo mediante procesos físicos y químicos naturales como la meteorización, la escorrentía, la precipitación, etc.

En general, la población puede estar expuesta al plomo en el aire ambiente, los alimentos, el agua potable, el suelo y el polvo. Además, también se ha encontrado en una variedad de otros productos de consumo que incluyen baterías de almacenamiento, soldaduras, cosméticos, alimentos, etc.

En cuanto a la exposición por inhalación, se distinguen dos grupos distintos, plomo inorgánico y orgánico.

- **Plomo inorgánico:** se basa en aerosoles de partículas que se pueden depositar en el sistema respiratorio cuando se inhalan. La cantidad inhalada varía en función del tamaño de las partículas o el factor de la edad del individuo. Además, la absorción del plomo está influenciada por el patrón regional dentro del tracto respiratorio.

Las partículas más grandes ($> 2,5 \mu\text{m}$) se depositan en las vías respiratorias ciliadas y pueden transportarse por vía mucosa al esófago y tragarse. Las partículas más pequeñas ($< 1 \mu\text{m}$) se pueden depositar en la región alveolar y se pueden absorber tras la disolución extracelular o la ingestión por células fagocíticas.

- **Plomo orgánico:** entre el 60 % y el 80 % de tetraetil o tetrametil plomo que se deposita en el tracto respiratorio de los individuos se absorbe.

Independientemente de la vía de exposición al plomo, los individuos excretan plomo absorbido principalmente por la orina y las heces. En menor medida por el sudor, el cabello o las uñas entre otros.

2.1.4. Carcinogenicidad y toxicidad

La IARC ("Agencia Internacional en la Investigación del Cáncer") clasifica al plomo inorgánico como un probable cancerígeno para seres humanos y no al orgánico, ya que de este no se tiene suficiente evidencia adecuada en animales y seres humanos.

El plomo ha sido clasificado como un elemento probable cancerígeno humano, teniendo una clasificación B2 de la USEPA ya que tiene suficiente evidencia en animales y la evidencia humana es inadecuada. Diez bioensayos en ratas y un ensayo en ratones mostraron significancia en los tumores renales por exposición dietética y subcutánea a varias sales solubles de plomo [10].

Se han asociado distintos tipos de cáncer debido al plomo dependiendo de su concentración como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Tipos de cáncer en función de la concentración de plomo en sangre

Concentración	Mayor riesgo
Menor o igual a 10 µg/dL	Todos los cánceres
	Cáncer de pulmón
Mayor a 10 µg/dL	Cánceres vías respiratorias
	Cáncer de estómago
	Cáncer intestinal
	Cáncer de laringe
	Glioma

Fuente: elaboración propia

2.1.5. Efectos en la salud

La toxicidad del plomo es conocida desde hace miles de años, según Robles-Osorio y Sabath, 2014 [11], tiene su inicio en la región de Anatolia sobre el año 3500 a.C. donde se realizaron las primeras extracciones de plomo. Surgiendo así, que el riesgo que producía sobre el medio ambiente la intoxicación y contaminación del plomo fue uno de los primeros riesgos descritos en la historia.

En Egipto, el plomo era utilizado en las redes de pesca y en las esculturas al culto de la diosa Osiris, siendo improbable que conociesen la intoxicación del metal. En Creta, el metal estuvo presente en el palacio de Knossos y en las tumbas micénicas.

En el imperio romano, el empleo de plomo era importante por sus características de densidad y resistencia a la corrosión, siendo empleado en vasijas o tuberías. Desde el siglo I a.C. aparecieron los síntomas derivados de la exposición al plomo. También, se le adicionaba plomo al vino para mejorar su color, sabor y preservación, a los polvos faciales, ungüentos oculares e incluso se recomendó la propia ingesta del metal para agente anticonceptivo.

Existen pocas evidencias por intoxicación después de la caída del imperio romano. En el año 1047 el Papa Clemente II falleció, estimándose que una costilla tenía una concentración de plomo suficiente como para ser la causa de la muerte.

En la Edad Media, el metal fue utilizado por los alquimistas en su pensamiento de poder producir oro por medio de otros metales. Gutenberg, también la utilizó en la producción de las primeras imprentas [11].

Una excelente revisión de la toxicología del plomo esta publicada por la ATSDR [9], a continuación se incluye un resumen que trata los aspectos más relevantes sobre los efectos en salud con evidencia en seres humanos.

Cabe destacar, que los efectos en la salud del plomo son los mismos independientemente de la vía de exposición (por ejemplo: ingestión o inhalatoria).

Los grupos vulnerables al plomo abarcan tanto a los niños como a los adultos, siendo de gran vulnerabilidad los niños de corta edad ya que absorben una cantidad de plomo mayor por sus costumbres y pueden tener distintos efectos como son:

- **Efectos neurológicos** en niños y en adultos. En el primer grupo, se muestran disminuciones en la función neurológica, incluyendo también disminuciones cognitivas (memoria y aprendizaje), comportamiento y estado de ánimo alterados, alteraciones neuromotoras y función neurosensorial (balanceo postural o cambios en los umbrales auditivo y visual).

En el segundo grupo, se muestran disminuciones de la función neurológica asociadas con plomo en sangre. Todos los efectos mencionados anteriormente para niños también se observan en adultos. En ambos grupos se muestran los efectos para una cantidad de plomo del rango de 10 a 50 µg/dL.

- **Efectos renales:** se muestran efectos evidentes en el daño y funciones renales reducida a mismos valores de plomo mencionados anteriormente. Las deficiencias en la función renal incluyen enzimuria, proteinuria, alteración del transporte de aniones orgánicos y glucosa y disminución de la tasa de filtración glomerular.

- **Efectos cardiovasculares:** Muestran efectos adversos asociados a un rango de plomo de 5 a 50 µg/dL. Se produce un incremento de la presión arterial. También, se incluyen efectos como un mayor riesgo de hipertensión y de enfermedad al corazón, aterosclerosis, conducción cardíaca alterada, enfermedad cardíaca y aumento de la mortalidad debido a enfermedad cardiovascular.

- **Efectos hematológicos:** En el sistema hematológico se producen disminuciones de la hemoglobina en sangre en pequeña cantidad y puede no representar un problema. Sin embargo, un aumento del plomo, disminuye aún más la hemoglobina en sangre y puede dar como resultado anemia. Otros efectos son una disminución de la actividad de otras enzimas eritrocitarias y niveles alterados de eritropoyetina en plasma (hormona que fomenta la formación de glóbulos rojos).

- **Efectos inmunológicos:** La exposición al plomo puede afectar al sistema inmunológico tanto de niños como de adultos. Se pueden producir efectos como cambios en varios indicadores de inmunidad humoral.
- **Efectos reproductivos en varones:** El plomo puede producir daño a los espermatozoides (disminución del recuento, concentración, etc) y posibles alteraciones en los niveles de hormonas reproductivas (testosterona, estradiol). La gravedad aumenta con la concentración de plomo orgánico.
- **Efectos reproductivos en mujeres:** pueden producirse algunas alteraciones en los niveles de las hormonas reproductivas, disminución de la fertilidad, aumento de los abortos espontáneos, aumento de nacimientos prematuros y una iniciación a la menopausia en una edad más temprana.
- **Efectos sobre el desarrollo:** puede producirse una disminución de tamaño al nacer y del crecimiento posterior del niño.
- **Efectos respiratorios:** Se observa una hiperreactividad bronquial aumentada, síntomas de enfermedad respiratoria y un riesgo aumentado de sufrir una enfermedad respiratoria (por ejemplo: asma).
- **Cáncer:** Se informa de un aumento de sufrir cualquier tipo de cáncer.

Los niños son un grupo poblacional más vulnerable a este contaminante ya que están expuestos a lo largo de su vida, desde que nacen por medio de la madre hasta tragar ciertos objetos o respirar el polvo de la tierra, ambos con contenido en plomo.

Además, los niños necesitan una menor cantidad de plomo en el cuerpo para desarrollar los mismos efectos que un adulto a una concentración mayor. Estos pueden sufrir anemias, daños al riñón, debilidad muscular y daño cerebral e incluso fallecer con una cantidad baja de plomo [9].

2.1.6. Normativa

La tabla 3 muestra los límites de exposición laborales al plomo según distintos organismos.

Tabla 3. Valores límite de plomo

Organismo	Medio	Límite	Duración
INSST	Aire	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio jornada 8h
OSHA	Aire	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio jornada 8h
NIOSH	Aire	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio jornada 10h
ACGIH	Aire	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio jornada 8h

Fuente:[12] [13]

"INSST: Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo.

OSHA: Administración para la Seguridad y Salud Ocupacional.

ACGIH: Asociación Americana Gubernamental de Higienistas Industriales.

NIOSH: Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional".

Según el "Real Decreto 717/1987, de 27 de mayo, por el que se modifica parcialmente el Decreto 833/1975, de 6 de Febrero, y se establecen nuevas normas de calidad del aire en lo referente a contaminación por dióxido de nitrógeno y plomo", el plomo en aire en partículas totales en suspensión para una media anual es de 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ [14].

Posteriormente, por la Directiva 1999/30/CE se disminuye a un valor máximo de 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ anual referido a la fracción PM10 [15]. Este valor se mantiene según la "Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008", que establece como valor límite en aire para el plomo la cantidad de 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante 1 año civil referido a la fracción PM10 [16].

La EPA no establece ningún valor de concentración de referencia para el plomo ya que no ha sido evaluado y marca que la concentración de plomo en el aire para la población no supere los 1,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio durante 3 meses [17].

La concentración de referencia oral del plomo se estima en 3,50x10⁻³ mg/m³ [18].

Se estima el nivel de riesgo de inhalación (URC) en 1,2x10⁻⁵ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [19].

2.2. Cadmio

2.2.1. Características físico-químicas

El cadmio no se encuentra en gran cantidad de forma libre en la naturaleza, la mayoría que es producido se obtiene como subproducto tanto en la fundición como en el refinamiento de los minerales zinc. De fuentes naturales se encuentran en las rocas sedimentarias e ígneas, depósitos arcillosos y rocas metamórficas.

Es un metal blanco metálico y algo azulado. Tiene un número y peso atómico de 48 y 112,41 respectivamente. Sus puntos de ebullición y fusión son de 763,3 °C y 320,9 °C. Posee una densidad a la temperatura de 20 °C de 8,64 g/cm³ [6].

Cuando es calentado a altas temperaturas desprende vapores amarillos rojizos de CdO (óxido de cadmio) que al enfriarse se condensan y dan lugar a cristales con una forma octaédrica regular. También, es un metal que se oxida muy lentamente en contacto con el aire con presencia de humedad y es débil frente a ácidos.

Posee numerosas aleaciones como pueden ser con zinc (soldadura), cobre (cables eléctricos), oro (joyería), plomo o estaño (aleaciones con punto de fusión bajo).

Se caracteriza por ser un elemento escaso que en el ambiente está principalmente en la PM2.5.

2.2.2. Fuentes antropogénicas

La presencia del cadmio es poco abundante en la litosfera. A mitad del siglo XX las emisiones antropogénicas aumentaron notablemente, destacando que las fuentes de contaminación humanas son mucho mayores a las naturales en relación con el cadmio.

Entre algunas fuentes y aplicaciones antropogénicas se encuentran:

- Minería y metalurgia.
- Industria.

- Fertilizantes fosfatados.
- Galvanizado de acero.
- Estabilizadores de PVC y otros plásticos.
- Pigmentos, joyería, tintas de impresión.
- Fotografía.

Sin embargo, con el paso de los años el uso del cadmio y sus compuestos se ha reducido debido al aumento de las restricciones en la normativa respecto a las fuentes de cadmio [20].

2.2.3. Distribución y formas de penetración en el organismo

Este metal llega a los seres humanos principalmente por la alimentación. También puede llegar por la inhalación del humo del tabaco y por residir cerca de fábricas o vertederos de residuos peligrosos que liberan cadmio al aire. Este se acumula en los riñones y tiene diversos efectos negativos para la salud [21].

Cabe destacar, que el cadmio presenta distinta movilidad en el medio ambiente dependiendo de ciertos factores, donde se destaca el grado de acidez (pH). La acidificación del suelo y las aguas superficiales aumentan la movilidad del cadmio y, por ello, su concentración aumenta al disminuir el pH [22].

El cadmio se absorbe en mayor cantidad por las plantas cuando el pH del agua es ácido. Siendo así, las plantas una ruta principal de exposición a este contaminante ya que a través de ellas llega a los seres vivos.

A través de las plantas, existe una gran fuente directa de cadmio a las personas por el tabaco ya que este se encuentra en la propia hoja del tabaco. Además, según el estudio de Wuana y Okieimen, 2011 [23], el uso de plaguicidas, biosólidos, desechos industriales o la deposición de contaminantes procedentes de la atmósfera incrementan la concentración del cadmio en el suelo y su biodisponibilidad.

Entre un 1 a 5 % de cadmio ingerido se absorbe en el intestino, dependiendo de la nutrición del individuo, teniendo una mayor cantidad absorbida cuando peor es la dieta.

En cuanto a la vía inhalatoria, la solubilidad y tamaño de las partículas influye en la cantidad de partículas inhaladas, siendo normalmente óxido de cadmio como polvo o humo.

Cuando el cadmio es absorbido se transporta a través de la sangre a distintos tejidos y órganos del cuerpo, destacando hígado y riñones por su alta capacidad de retención. El cadmio también se acumula en los huesos. El mecanismo no está definido totalmente. Sin embargo, se cree en la afinidad de cadmio por los radicales nucleofílicos de las proteínas. También desplaza a metales como zinc, cobre, hierro y calcio de su unión con las enzimas y así altera sus rutas [21].

El cadmio es muy biopersistente, permanece durante muchos años una vez que entra en el organismo [23].

2.2.4. Carcinogenicidad y toxicidad

Este elemento se ha clasificado como carcinogénico en humanos, perteneciendo al grupo I en la clasificación de la IARC ya que existe suficiente información que lo avala [15].

Sin embargo, el cadmio ha sido clasificado como un elemento de probable cancerígeno humano, teniendo una clasificación B1 de la USEPA ya que tiene suficientes evidencias de carcinogenicidad en ratas y ratones por inhalación e inyección intramuscular y subcutánea, pero en siete estudios no se mostraron evidencias de respuesta carcinogénica. El riesgo por unidad de inhalación se estima en $0,0018 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [24].

En la Unión Europea se clasifica como A2 siendo un probable cancerígeno humano por sus evidencias en distintos estudios.

Es un xenobiótico, siendo un metal tóxico a bajas concentraciones y no necesario para los seres vivos en los que se acumula.

Puede detectarse su concentración en el organismo por medio de la orina, sangre, hígado y heces entre otros. Siendo la orina la que representa con gran exactitud la cantidad de cadmio en el sujeto.

2.2.5. Efectos en la salud

Según un estudio de ecotoxicología del cadmio [20], el metal presenta numerosos efectos sobre los seres humanos entre los que se destacan los siguientes:

- Irritación en estómago, vómitos y diarrea por ingestión alta en alimentación
- Fallo de la función renal por acumulación de cadmio en el riñón durante el paso de los años. Por ello, se eliminan proteínas con un peso molecular bajo en la orina.
- Alteraciones en el metabolismo del calcio y resorción ósea, por lo que tiene efecto en la osteoporosis y dolor en las articulaciones.
- Neumonitis aguda y edema pulmonar por inhalación de grandes cantidades de óxido de cadmio en el aerosol atmosférico.
- Carcinogénico en humanos, siendo declarado tipo I por la IARC.
- Disruptor endocrino.

Además de los mencionados anteriormente, también disminuye las actividades del ácido delta-aminolevulínico sintetasa, alcohol deshidrogenasa y lipoamida deshidrogenasa. Sin embargo, incrementa las de los ácidos delta-aminoevulínico deshidratasa, piruvato deshidrogenasa y piruvato descarboxilasa [23].

2.2.6. Normativa

"La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) es una agencia de salud pública federal que forma parte del Departamento de Salud y

Servicios Humanos de los Estados Unidos". Esta agencia establece las dosis de riesgo mínimo (MRL) mostradas en la tabla 4 para el cadmio.

Tabla 4. Dosis de riesgo mínimo (MRL) del cadmio

Ruta	Duración	MRL	Punto final
Inhalatoria	Aguda	0,00003 mg/m ³	Respiratorio
Inhalatoria	Crónica	0,00001 mg/m ³	Renal

Fuente: [25]

Aguda: 1 a 14 días.

Crónica: 1 año o más.

Según la "Directiva 2004/107/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de diciembre de 2004", se establece como valor objetivo en aire para el cadmio la cantidad de 5 ng/m³ como promedio durante un período anual referido a PM10 [24].

Según el "Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire", se mantiene el valor objetivo en 5 ng/m³ como promedio durante un período anual referido a PM10 [27].

Se estima como concentración de referencia por inhalación (RfCi) un valor de 1x10⁻⁵ mg/m³ [18].

La base de datos IRIS establece un nivel de riesgo de inhalación (URC) en 1,8x10⁻³ µg/m³.

2.3. Área de estudio

En el proyecto se estudia la evaluación de riesgos en salud por cadmio y plomo en la ciudad de Cartagena a finales del siglo XX. Las figuras 1 y 2 muestra la ubicación de la plaza de Bastarreche y Lo Campano, lugares donde se realizaron las medidas.



Figura 1. Ubicación Plaza de Bastarreche

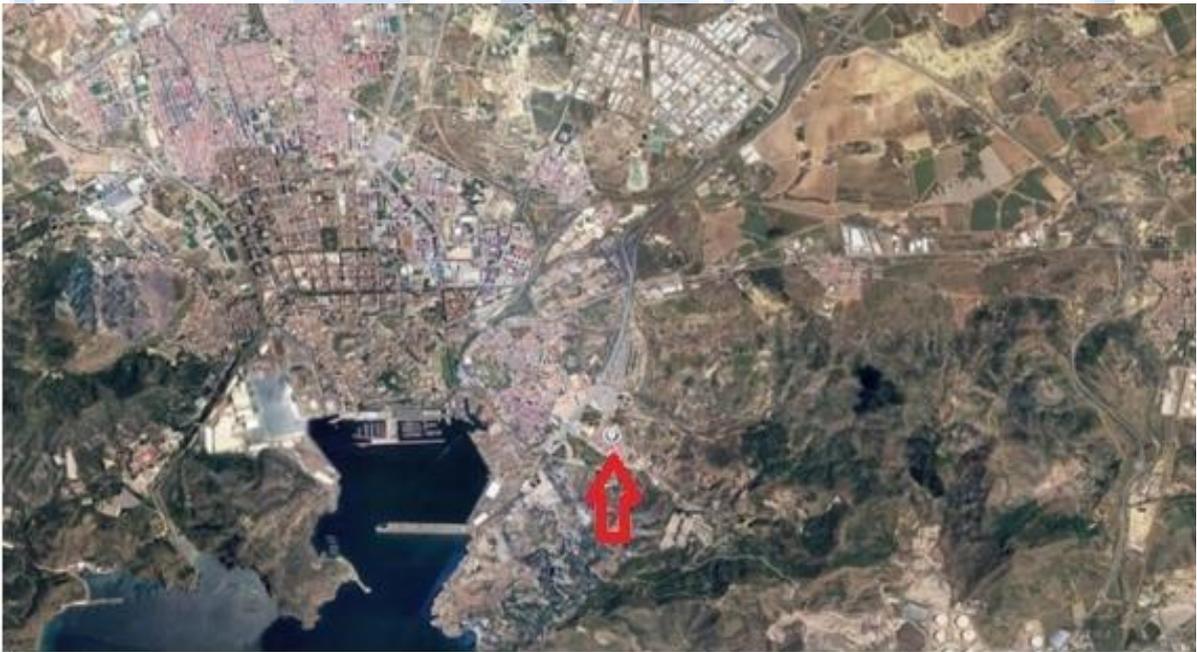


Figura 2. Ubicación de Lo Campano

3. Materiales y métodos

Este apartado recoge los distintos materiales y métodos utilizados para realizar el presente trabajo. Por un lado, se explican los puntos de muestreo y cómo se han determinado las muestras en los filtros empleados. Por otro lado, se explica el procedimiento de ERS empleado.

3.1. Puntos de muestreo y filtros

En este presente trabajo se han empleado los datos de los metales plomo y cadmio en muestras del aerosol atmosférico (facilitados por el grupo de Investigación Química del Medio Ambiente del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental) de la ciudad de Cartagena en dos puntos de muestreo:

Plaza de Bastarreche (B): La plaza está ubicada en la zona urbana rodeada de una gran afluencia de tráfico y siendo un punto de inmisión fuerte. Se localiza en las siguientes coordenadas: latitud $37^{\circ} 36' 14''$ N, longitud $0^{\circ} 58' 28''$ W y altitud de 20 metros.

Lo Campano (LC): Se encuentra ubicado en el este de la ciudad, teniendo en su cercanía la zona de carga del Puerto de Cartagena y adyacente al punto de muestreo la antigua fundición de plomo. Se localiza en las siguientes coordenadas: latitud $37^{\circ} 35' 38''$ N, longitud $0^{\circ} 57' 27''$ W y altitud de 15 metros.

El muestreo de las partículas totales en suspensión se realizó mediante captadores de alto volumen MCV. En función del metal a analizar se utilizó un tipo de soporte, filtros de fibra de vidrio (AP40) para el plomo y filtros de ésteres de celulosa (AAWP00010) para el cadmio.

Para ambos filtros se realizan operaciones previas. Por un lado, los filtros de fibra de vidrio se pesaron y se introdujeron en bolsas de plástico etiquetadas antes de llevarlos al punto de muestreo. Por otro lado, los filtros de ésteres de celulosa no se pesaron y también se introdujeron en bolsas de plástico antes de trasladarse al punto de muestreo.

Una vez han recogido las muestras a analizar se doblan por la mitad y se trasladan al laboratorio en las mismas bolsas de plástico con las que se enviaron [6].

3.2. Análisis de muestras

Para el análisis de los filtros de fibra de vidrio, las muestras se digirieron en vasos de teflón cerrados que contenían una mezcla de ácidos. Se decidió trabajar con una mezcla de ácidos que contenía 1 ml de ácido fluorhídrico (HF) al 40 % y 10 ml de ácido nítrico (HNO₃) al 65 %. Los vasos son cerrados en condiciones estándar.

A continuación, se realizó una digestión en microondas que consta de dos etapas, una con mayor potencia y otra con menor. La primera etapa se realizó con un 80 % en un tiempo de 10 minutos y la segunda al 70 % durante 5 minutos. Cabe destacar, que esta potencia se refiere a cuando hay doce vasos de teflón, en caso de realizarse con menos la potencia tendría que disminuir.

Una vez que se terminó la digestión, los vasos descendieron su temperatura y las muestras se pasaron a una serie de matraces aforados de teflón con una capacidad de 50 ml, rellenándolos hasta su límite con agua bidestilada.

Las muestras se analizaron mediante un equipo de espectroscopia de absorción atómica Perkin Elmer 3100, el cual contenía un nebulizador de alta sensibilidad. En ambos análisis de filtros se utilizó la técnica de adición de concentraciones conocidas en la muestra, en uno de plomo y en otro de cadmio.

En el análisis de los filtros de ésteres de celulosa se buscó descomponer totalmente la materia orgánica de la muestra (necesario llevar a sequedad) y tener los analitos en disolución. El blanco para el análisis se realizó en 1 de cada 10 filtros que forman los lotes.

En la digestión para estos filtros se empleó una mezcla de ácidos compuesta por 1 ml de HF, 10 ml de HNO₃ y 3 ml de H₂O₂, siendo el tratamiento el mismo que en el caso anterior [6].

3.2.1. Cuantificación

Se determinaron los metales presentes en las muestras y su concentración. A partir de esos datos se ha obtenido la concentración media anual de plomo medida en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y cadmio en ng/m^3 obtenidas desde el año 1990 al 2000. Las tablas 5 y 6 muestran las concentraciones en la Plaza de Bastarreche y el barrio de Lo Campano.

Tabla 5. Valores de concentración de media anual en la Plaza de Bastarreche

Año	Concentración media anual Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentración media anual Cd (ng/m^3)
1990	1,733	-
1991	1,476	5,96
1992	0,772	6,52
1993	0,559	4,53
1994	0,510	2,87
1995	0,383	17,32
1996	0,296	9,55
1997	0,269	20,89
1998	0,327	8,94
1999	0,297	5,01
2000	0,240	5,49

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Valores de concentración de media anual en el barrio Lo Campano

Año	Concentración media anual Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentración media anual Cd (ng/m^3)
1990	2,77	-
1991	3,52	23,327
1992	1,03	9,641
1993	0,41	5,832
1994	0,58	9,454
1995	0,46	10,718
1996	0,33	7,766
1997	0,18	10,990
1998	0,14	8,983
1999	0,12	5,022
2000	0,14	4,183

Fuente: elaboración propia.

3.3. Procedimiento de Evaluación de Riesgos en Salud

El procedimiento de ERS tratado en este análisis tiene aspectos recogidos de las metodologías empleadas por Estados Unidos de "la Agencia de Protección Medioambiental y la Agencia para las Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR)", mayoritariamente. Este procedimiento se compone de cuatro fases mostradas en la Figura 3.

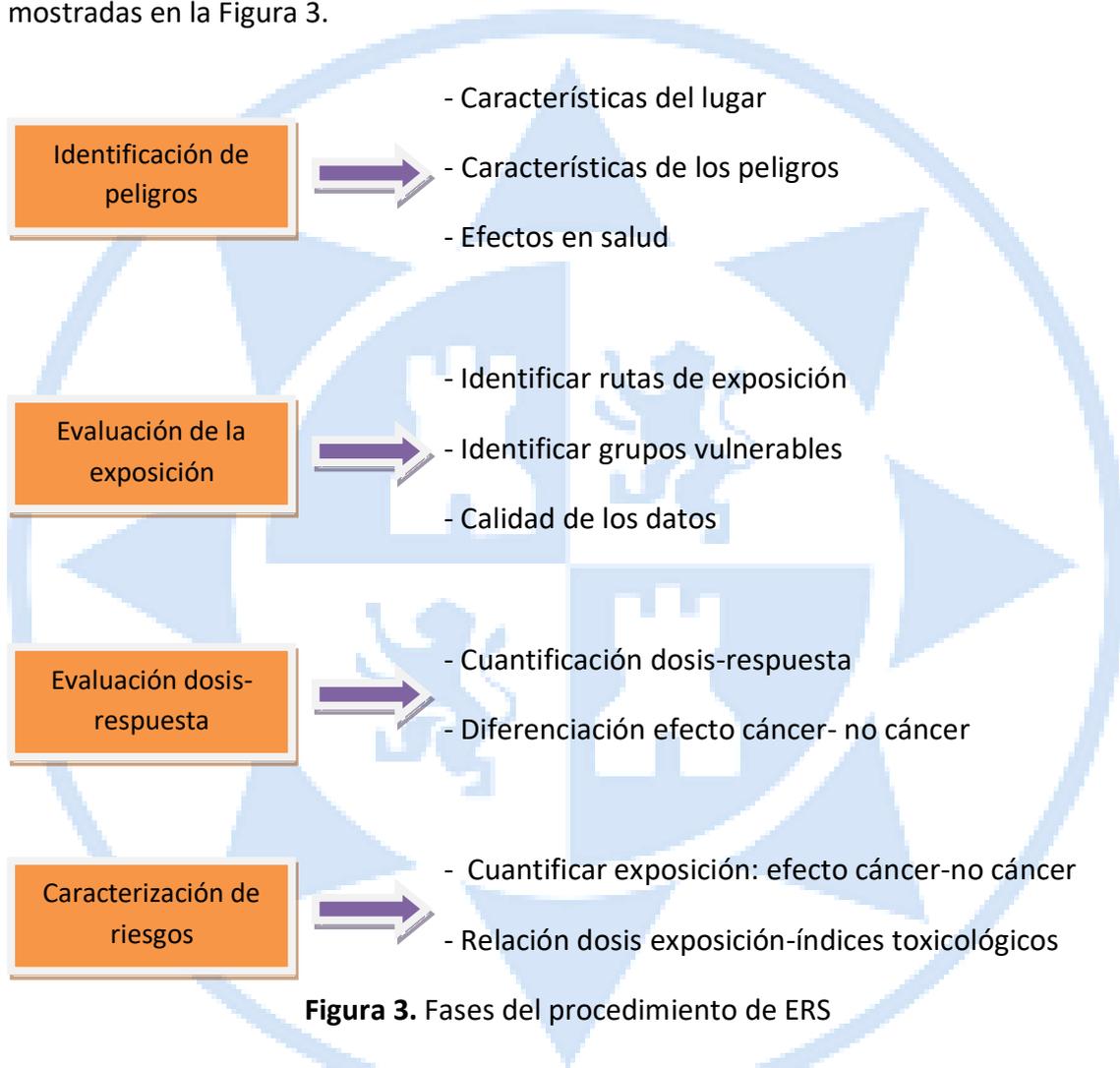


Figura 3. Fases del procedimiento de ERS

La primera etapa de ERS es una fase cualitativa en la que se identifican las posibles situaciones o peligros que puedan producir efectos adversos en un lugar determinado de exposición. Además, en esta etapa se caracteriza la naturaleza de los efectos, pudiendo ser un efecto carcinogénico o no carcinogénico.

Por tanto, la base de esta etapa es recopilar información para aumentar la eficiencia del resto de fases y, así, obtener un mejor análisis de riesgos para la salud en la zona concreta del trabajo.

La segunda etapa se caracteriza por determinar los grupos más vulnerables y, por tanto, más afectados de la población. También se muestran las vías por las que los contaminantes pueden entrar en contacto con ellos. Además, se cuantifica la cantidad y frecuencia del contacto.

El alcance de la evaluación de exposición y su complejidad dependen del objetivo final, siendo delimitado por aspectos legales, factores ambientales o demográficos, estados de salud y patrones de alimentación.

La escala de la evaluación de exposición depende del problema planteado, de las fuentes que emiten los contaminantes y de la población que resulta afectada. Distinguiendo así, cuatro tipos de escalas: local, regional, nacional o internacional. En este proyecto se abarca una escala geográfica a nivel local por la emisión de cadmio y plomo a la atmósfera.

Cuando se ha planteado el problema y se tiene delimitado la escala de este, se procede al desarrollo de un plan de análisis que contempla los métodos a utilizarse para cuantificar la exposición, recopilar información y la presentación de los resultados.

La cantidad de sustancia que puede tener contacto con las barreras de absorción de un individuo se denomina exposición. Ésta viene determinada por la concentración de contaminante en el medio físico (agua, aire, alimentos o suelo), del tiempo expuesto (exposición aguda, subaguda o crónica) y de la actividad de los individuos que lo ponen en contacto con la sustancia [3].

En esta etapa para calcular la exposición por vía inhalatoria se emplea la siguiente ecuación:

$$C_{aire\ exposición} = \frac{C_{aire} \times TE \times \frac{1\ dia}{24\ horas} \times F \times DR}{AT} \quad [3]$$

En ella, las distintas variables significan lo siguiente:

"C_{aire exposición} : Concentración en el aire de exposición ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

TE: Tiempo de exposición (h/día).

F: Frecuencia de exposición (día/año).

DR: Duración de exposición (años).

AT: Tiempo promedio (días)".

En el caso de estudio, se toman los siguientes valores: como tiempo de exposición se consideran tres escenarios, tanto 4 como 8 y 24 horas al día (siendo este el escenario más desfavorable), frecuencia de exposición 365 días por año, duración de exposición 70 años para cáncer y 30 no cáncer y tiempo promedio de exposición en 70x365 días para el caso de efecto cáncer y 30x365 días para el efecto no cáncer.

La tercera etapa establece la relación cuantitativa dosis-respuesta, el vínculo entre la dosis y la incidencia y la gravedad del efecto.

La última etapa, se trata de una estimación de la incidencia que puede producir un efecto adverso (cancerígeno o no) en la salud en distintas situaciones que puedan presentar la población para un tipo u otro de exposición, establecidas en la evaluación de la exposición, combinando la información sobre efectos y exposición para obtener medidas cuantitativas del riesgo [3].

En esta etapa para cuantificar el riesgo de efecto no cáncer por inhalación, se emplea la siguiente ecuación:

$$HQ_i = \frac{C}{(RfC_i)} \quad [3]$$

Donde las distintas variables son:

"HQ_i: Cociente de peligro por inhalación (adimensional).

C: Concentración de exposición por inhalación ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

RfC_i: Concentración de referencia por inhalación ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)".

Por último, para cuantificar el riesgo de efecto cáncer por inhalación, se emplea la siguiente ecuación:

$$RIC_{inh} = URC_{inh} \times C_{aire} \quad [3]$$

Donde las distintas variables son:

" RIC_{inh} : Riesgo incremental de cáncer por inhalación (adimensional).

C_{aire} : Concentración de exposición en el aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

URC_{inh} : Riesgo incremental de cáncer por unidad de concentración de contaminante en el aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)⁻¹."



4. Resultados

4.1. Identificación del peligro

- **Descripción de la zona**

Los puntos de estudio se encuentran en dos puntos de la ciudad de Cartagena, España. La ciudad se encuentra a 67 metros por encima del nivel del mar con una población de 216 108 habitantes [28].

En su orografía se encuentran varias ramblas pero carece de cauces hidráulicos, teniendo predominancia por suelos de tipo xerosol cálcico. El municipio ronda los 256 mm anuales de precipitaciones, siendo uno de los lugares más secos de la Región de Murcia.

El clima destacado de la localización es mediterráneo cálido árido o subárido pero su ubicación cerca de la costa disminuye las temperaturas, teniendo así una media anual poco superior a 20 °C, variando de invierno a verano la media de 13,7 °C a 28,7 °C.

En cuanto al viento, es un factor muy importante del lugar siendo del primer y tercer cuadrante los más predominantes [28].

- **Actividades pasadas, presentes o futuras**

La ciudad de Cartagena tiene una dilatada historia minera con buena fama desde el primer milenio antes de Cristo, sobretodo en plomo y plata. En los primeros siglos, ya había pequeñas fábricas a poca distancia de la costa por la demanda de los metales. Con el paso de los años fueron aumentando su producción y número de fábricas. Más adelante, durante la época romana se multiplicaron las instalaciones llegando a producir sobre 80 000 toneladas anuales.

Desde el siglo XIII al XVIII la industria minera tuvo más declives que crecimientos debido a las guerras, la peste y la crisis económica. En el siglo XIX se recuperó la industria minera y, sobre todo, la del plomo [1].

La ciudad tuvo una gran explotación de yacimientos de hierro, plomo y cinc desde finales del siglo XIX y durante el siglo XX.

Durante la década de 1960 en Cartagena se desarrollaron grandes fábricas que deterioraron la ciudad respecto a su calidad de aire y dieron lugar a una preocupación por la salud de la población. Debido a la industria aumentó tanto el dióxido de azufre (SO₂) como las partículas totales en suspensión(PTS).

En 1990, el ayuntamiento de Cartagena autorizó la intervención en las fábricas para poder reducir o detener la producción y así disminuir los niveles de contaminación que excedían el límite. El plan de intervención disminuyó la contaminación del aire urbano altamente contaminado [29].

Entre 1957 y 1990, en la Bahía de Portman se vertían 7 000 toneladas diarias de residuos con contenidos en zinc, cadmio, restos reactivos y plomo. Poco después de 1990 la empresa cerró y se detuvieron los vertidos, dejando un impacto ambiental sin precedentes. Esto fue debido a la escasa normativa relacionada a la contaminación atmosférica y vertidos [30].

Se sospecha que los contaminantes relacionados con la actividad minera han tenido influencia en el aire de las áreas cercanas residenciales, pudiendo ser depositados en el suelo y, por tanto, los seres humanos que allí viven estar expuestos a inhalar pequeñas cantidades de cadmio o plomo de las partículas en suspensión. Siendo evaluada la vía inhalatoria en este proyecto .

Según el estudio de Martínez-García et al, 2001 [31], donde se realizan análisis de suelos en tres zonas distintas (una zona contaminada que incluye el casco antiguo y desde Santa Lucía hasta el Valle de Escombreras, una zona no contaminada más alejada de la ciudad y la industria y una antigua zona industrial de fundición de plomo), las concentraciones de cadmio y plomo son mayores en el área de la antigua fundición de plomo y, en general, los suelos han tenido consecuencias de las actividades industriales y mineras.

La historia minera en Cartagena ha tenido repercusión en la población durante el paso de los años como se muestra en el estudio de Martínez-García et al, 2005 [1], donde se determinaron distintos metales en huesos humanos procedentes de diferentes épocas

y muestras actuales. En ellas se observó un incremento de la concentración de metales en los huesos por el uso de estos por el hombre.

4.2. Relación dosis-respuesta

La tabla 7 muestra los valores de referencia para el cadmio y el plomo.

Tabla 7. Valores de referencia de cadmio y plomo

Elemento	Concentración referencia	Grupo USEPA	Valor de riesgo cáncer (URC) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Cadmio	$1 \times 10^{-5} \text{ mg}/\text{m}^3$ (RfCi)	B1	$1,8 \times 10^{-3}$
Plomo	$3,50 \times 10^{-3} \text{ mg}/\text{m}^3$ (RfD _o)	B2	$1,2 \times 10^{-5}$

Fuente: [18], [19]

Para las concentraciones de referencia por inhalación del cadmio y el plomo se tomó un estudio reciente de Sun et al, 2014 [18], destacando que para el plomo se tomó el valor de referencia oral (RfD_o).

Para los valores de riesgo por inhalación (URC_{inh}) se extrajeron los datos de la base IRIS y de un estudio de Mutlu y Lee, 2012 [19].

En la bibliografía especializada no se pudo encontrar un valor de referencia para la inhalación del plomo, por lo que se ha optado por utilizar un valor de referencia por la vía oral como se ha realizado en otros estudios (Megido et al, 2017 [2]; Keshavarzi et al, 2015 [32]). Este último autor dice que después de la inhalación, la absorción de los contaminantes tóxicos de las partículas tiene efectos para la salud parecidos a la vía oral.

4.3 Evaluación de la exposición

Las figuras 4 y 5 muestran las concentraciones anuales de plomo y cadmio en ambos puntos de muestreo.

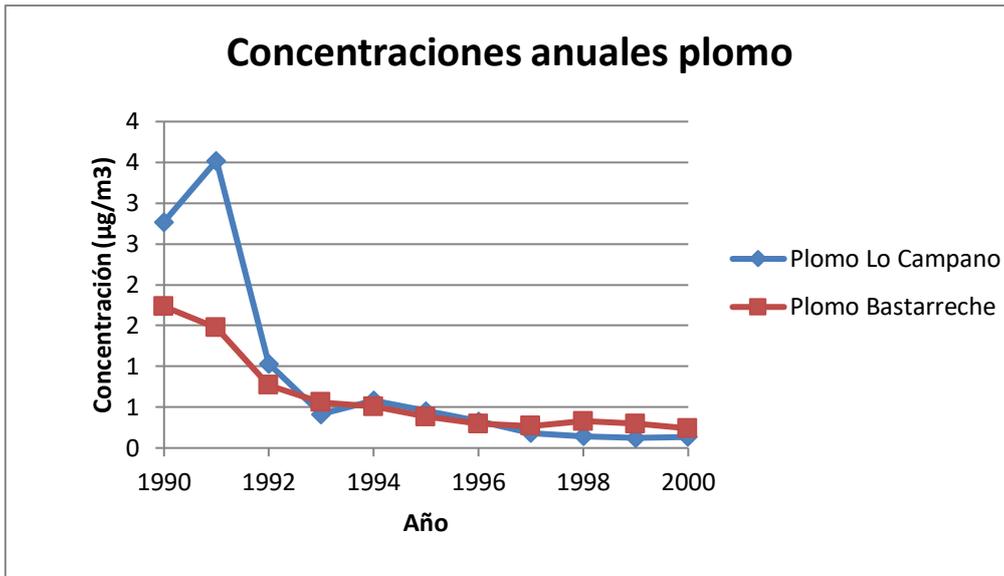


Figura 4. Concentraciones anuales de plomo

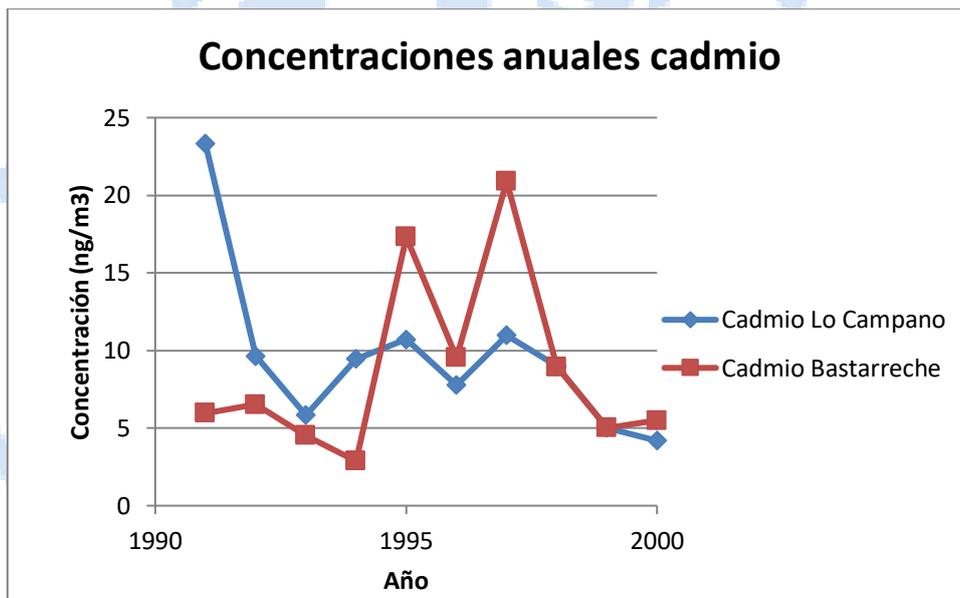


Figura 5. Concentraciones anuales de cadmio

Las tablas 8, 9 y 10 muestran las concentraciones en el aire de plomo y cadmio en exposiciones de 4, 8 y 24 horas al día, contemplando así los distintos escenarios que son iguales tanto para efecto cáncer como no cáncer.

Tabla 8. Valores de concentración de aire de exposición de plomo

Año	Caire exposición ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 4 horas		Caire exposición ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 8 horas	
	Lo Campano	Bastarreche	Lo Campano	Bastarreche
1990	0,462	0,289	0,923	0,578
1991	0,587	0,246	1,174	0,492
1992	0,172	0,129	0,345	0,257
1993	0,069	0,093	0,138	0,186
1994	0,097	0,085	0,194	0,170
1995	0,076	0,064	0,152	0,128
1996	0,054	0,049	0,109	0,099
1997	0,031	0,045	0,061	0,090
1998	0,024	0,055	0,048	0,109
1999	0,021	0,049	0,041	0,099
2000	0,023	0,040	0,045	0,080

Fuente: elaboración propia

Tabla 9. Valores de concentración de aire de exposición de cadmio

Año	Caire exposición ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 4 horas		Caire exposición ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 8 horas	
	Lo Campano	Bastarreche	Lo Campano	Bastarreche
1990	-	-	-	-
1991	0,00389	0,00099	0,00778	0,00199
1992	0,00161	0,00109	0,00321	0,00271
1993	0,00097	0,00076	0,00194	0,00151
1994	0,00158	0,00048	0,00315	0,00096
1995	0,00179	0,00289	0,00357	0,00577
1996	0,00129	0,00159	0,00259	0,00318
1997	0,00183	0,00348	0,00366	0,00696
1998	0,00150	0,00149	0,00299	0,00298
1999	0,00084	0,00084	0,00167	0,00167
2000	0,00070	0,00091	0,00139	0,00183

Fuente: elaboración propia

Tabla 10. Valores de concentración de aire de exposición de plomo y cadmio en 24 horas

Año	C _{aire exposición} (µg/m ³) plomo		C _{aire exposición} (µg/m ³) cadmio	
	Lo Campano	Bastarreche	Lo Campano	Bastarreche
1990	2,770	1,733	-	-
1991	3,522	1,476	0,023	0,006
1992	1,034	0,772	0,010	0,007
1993	0,413	0,559	0,006	0,005
1994	0,582	0,510	0,009	0,003
1995	0,455	0,383	0,011	0,017
1996	0,326	0,296	0,008	0,010
1997	0,184	0,269	0,011	0,021
1998	0,143	0,327	0,009	0,009
1999	0,124	0,297	0,005	0,005
2000	0,136	0,240	0,004	0,005

Fuente: elaboración propia

4.4 Caracterización del riesgo

La tabla 11 muestra el riesgo de efecto no cáncer por inhalación mediante el cociente de peligro HQ_i en ambos lugares para una exposición de 4 horas.

Tabla 11. Valores del cociente de peligro por inhalación para 4 horas

Año	HQ _i (Plomo)		HQ _i (Cadmio)	
	Lo Campano	Bastarreche	Lo Campano	Bastarreche
1990	0,132	0,0825	-	-
1991	0,168	0,0703	0,389	0,099
1992	0,049	0,0368	0,161	0,109
1993	0,020	0,0266	0,097	0,076
1994	0,028	0,0243	0,158	0,048
1995	0,022	0,0182	0,179	0,289

1996	0,016	0,0141	0,129	0,159
1997	0,009	0,0128	0,183	0,348
1998	0,007	0,0156	0,150	0,149
1999	0,006	0,0141	0,084	0,084
2000	0,006	0,0114	0,070	0,091

Fuente: elaboración propia

La tabla 12 muestra el riesgo de efecto no cáncer por inhalación mediante el cociente de peligro HQ_i en ambos lugares para una exposición de 8 horas.

Tabla 12. Valores del cociente de peligro por inhalación para 8 horas

Año	HQ _i (Plomo)		HQ _i (Cadmio)	
	Lo Campano	Bastarreche	Lo Campano	Bastarreche
1990	0,264	0,165	-	-
1991	0,336	0,1406	0,778	0,198
1992	0,098	0,0736	0,322	0,218
1993	0,040	0,0532	0,194	0,152
1994	0,056	0,0486	0,316	0,096
1995	0,044	0,0364	0,358	0,578
1996	0,032	0,0282	0,158	0,318
1997	0,018	0,0256	0,366	0,696
1998	0,014	0,0312	0,300	0,298
1999	0,012	0,0282	0,168	0,168
2000	0,012	0,0228	0,140	0,182

Fuente: elaboración propia

La tabla 13 muestra el riesgo de efecto no cáncer por inhalación mediante el cociente de peligro HQ_i en ambos lugares para una exposición de 24 horas.

Tabla 13. Valores del cociente de peligro por inhalación para 24 horas

Año	HQ _i (Plomo)		HQ _i (Cadmio)	
	Lo Campano	Bastarreche	Lo Campano	Bastarreche
1990	0,792	0,495	-	-
1991	1,006	0,422	2,333	0,596
1992	0,295	0,221	0,964	0,652
1993	0,118	0,160	0,583	0,453
1994	0,166	0,146	0,945	0,287
1995	0,130	0,109	1,072	1,732
1996	0,093	0,085	0,777	0,955
1997	0,053	0,077	1,099	2,089
1998	0,041	0,094	0,898	0,894
1999	0,035	0,085	0,502	0,501
2000	0,039	0,069	0,418	0,549

Fuente: elaboración propia

La figura 6 muestra los valores del cociente de peligro en Lo Campano para unos tiempos de exposición de 4, 8 y 24 horas.

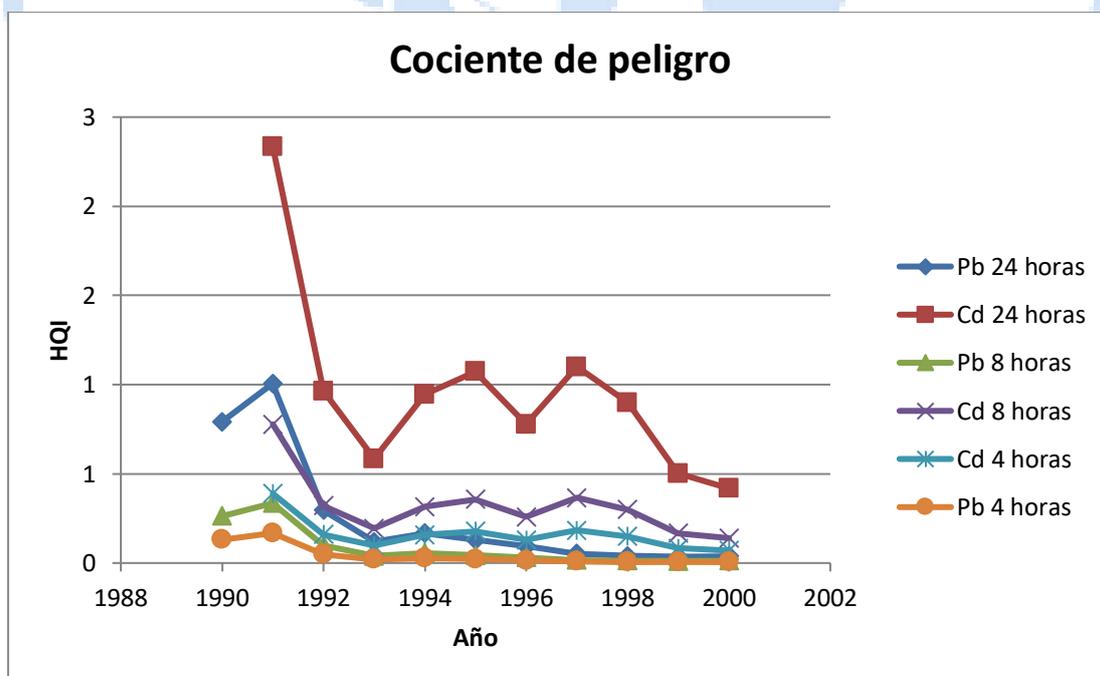


Figura 6. Cocientes de peligro en Lo Campano

La figura 7 muestra los valores del cociente de peligro en Bastarreche para unos tiempos de exposición de 4, 8 y 24 horas.

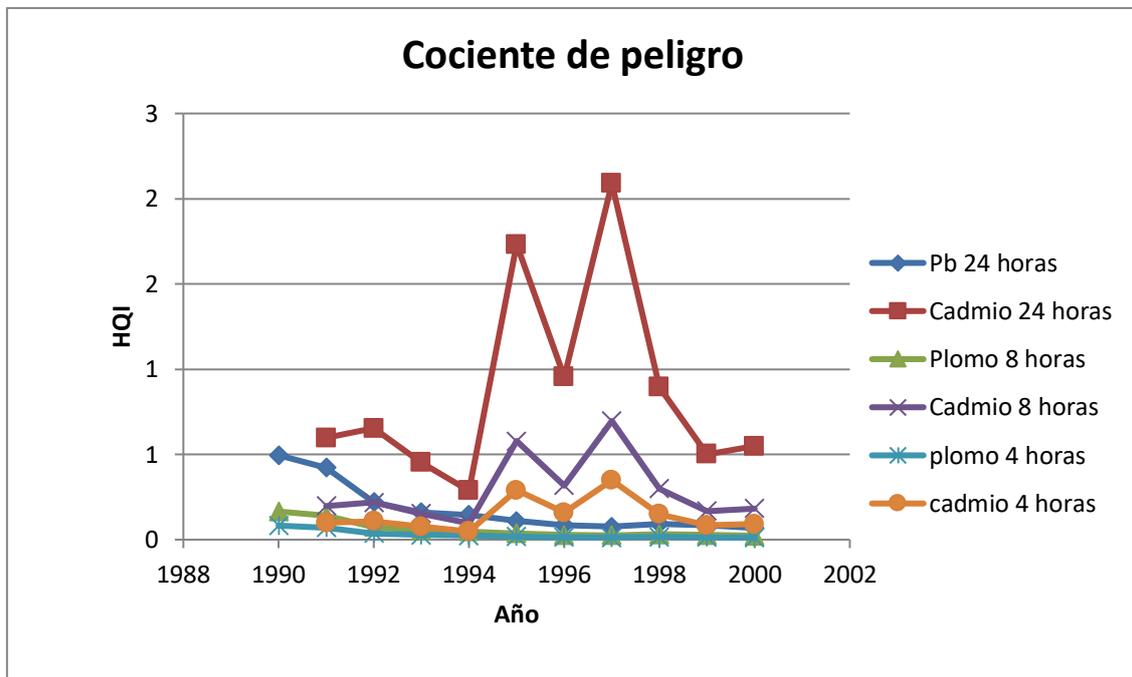


Figura 7. Cocientes de peligro en Bastarreche

La tabla 14 muestra el riesgo de efecto cáncer por inhalación mediante el riesgo incremental RIC_{inh} en ambos lugares para una exposición de 4 horas.

Tabla 14. Valores del riesgo incremental de cáncer por inhalación para 4 horas

Año	RIC_{inh} (Plomo)		RIC_{inh} (Cadmio)	
	Lo Campano	Bastarreche	Lo Campano	Bastarreche
1990	5,54E-06	3,47E-06	-	-
1991	7,04E-06	2,95E-06	7,00E-06	1,79E-06
1992	2,07E-06	1,54E-06	2,89E-06	1,96E-06
1993	8,26E-07	1,12E-06	1,75E-06	1,36E-06
1994	1,16E-06	1,02E-06	2,84E-06	8,6E-07
1995	9,10E-07	7,66E-07	3,21E-06	5,19E-06
1996	6,53E-07	5,93E-07	2,33E-06	2,86E-06
1997	3,68E-07	5,38E-07	3,30E-06	6,27E-06

1998	2,85E-07	6,55E-07	2,70E-06	2,68E-06
1999	2,48E-07	5,93E-07	1,51E-06	1,50E-06
2000	2,71E-07	4,80E-07	1,26E-06	1,64E-06

Fuente: elaboración propia

La tabla 15 muestra el riesgo de efecto cáncer por inhalación mediante el riesgo incremental RIC_{inh} en ambos lugares para una exposición de 8 horas.

Tabla 15. Valores del riesgo incremental de cáncer por inhalación para 8 horas

Año	RIC_{inh} (Plomo)		RIC_{inh} (Cadmio)	
	Lo Campano	Bastarreche	Lo Campano	Bastarreche
1990	1,108E-05	6,93E-06	-	-
1991	1,409E-05	5,90E-06	1,40E-05	3,58E-06
1992	4,13E-06	3,08E-06	5,78E-06	3,91E-06
1993	1,65E-06	2,24E-06	3,50E-06	2,72E-06
1994	2,33E-06	2,04E-06	5,67E-06	1,72E-06
1995	1,82E-06	1,53E-06	6,43E-06	1,04E-05
1996	1,31E-06	1,19E-06	4,67E-06	5,73E-06
1997	7,37E-07	1,08E-06	6,59E-06	1,25E-05
1998	5,71E-07	1,31E-06	5,39E-06	5,36E-06
1999	4,97E-07	1,19E-06	3,01E-06	3,01E-06
2000	5,42E-07	9,60E-07	2,51E-06	3,29E-06

Fuente: elaboración propia

La tabla 16 muestra el riesgo de efecto cáncer por inhalación mediante el riesgo incremental RIC_{inh} en ambos lugares para una exposición de 24 horas.

Tabla 16. Valores del riesgo incremental de cáncer por inhalación para 24 horas

Año	RIC _{inh} (Plomo)		RIC _{inh} (Cadmio)	
	Lo Campano	Bastarreche	Lo Campano	Bastarreche
1990	3,32E-05	2,08E-05	-	-
1991	4,23E-05	1,77E-05	4,20E-05	1,07E-05
1992	1,24E-05	9,27E-06	1,74E-05	1,17E-05
1993	4,95E-06	6,71E-06	1,05E-05	8,16E-06
1994	6,98E-06	6,12E-06	1,70E-05	5,17E-06
1995	5,46E-06	4,59E-06	1,93E-05	3,12E-05
1996	3,92E-06	3,56E-06	1,40E-05	1,72E-05
1997	2,21E-06	3,23E-06	1,98E-05	3,76E-05
1998	1,71E-06	3,93E-06	1,62E-05	1,61E-05
1999	1,49E-06	3,56E-06	9,04E-06	9,02E-06
2000	1,63E-06	2,88E-06	7,53E-06	9,88E-06

Fuente: elaboración propia

Para una mejor apreciación del riesgo incremental se han separado los tiempos de exposición de 4 y 8 horas de 24 horas. La figuras 8 y 9 muestran los valores del riesgo incremental de cáncer por acumulación en Lo Campano para 4, 8 y 24 horas.

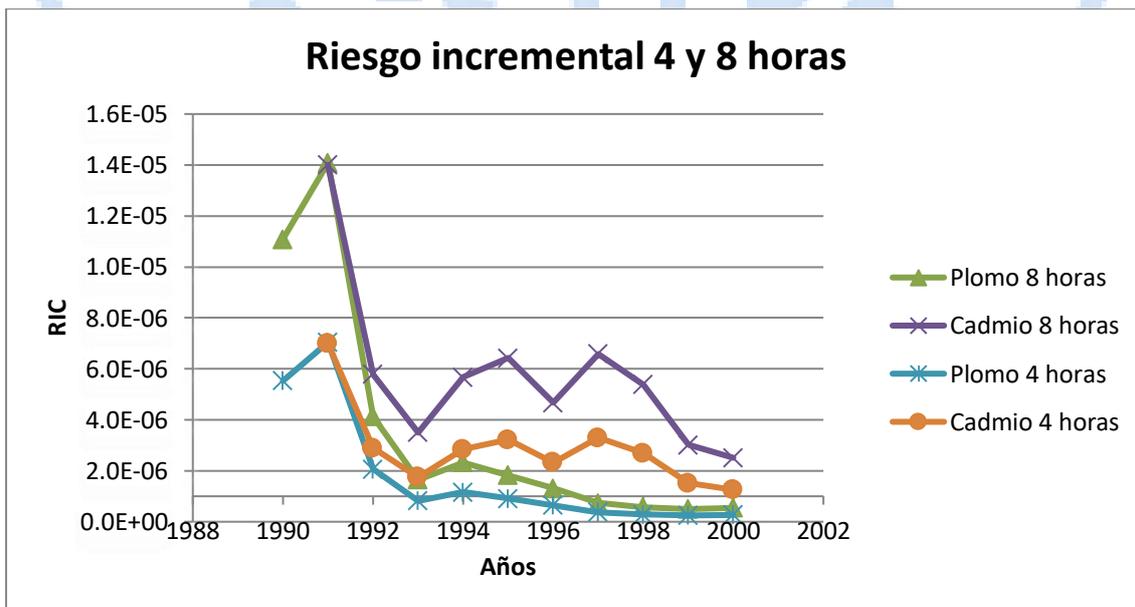


Figura 8. Riesgos incrementales en Lo Campano para 4 y 8 horas

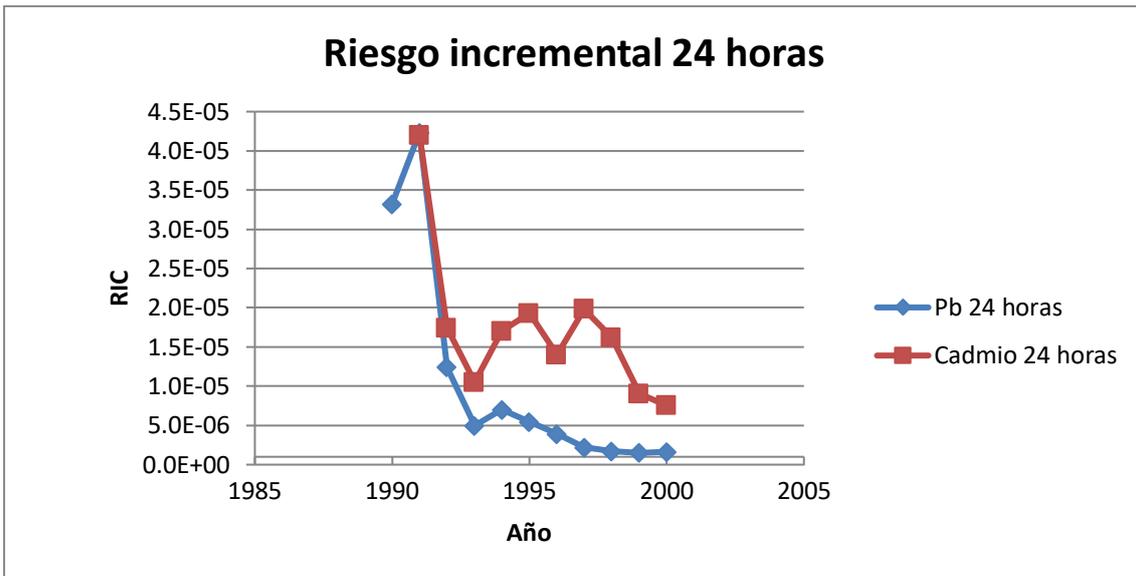


Figura 9. Riesgo incremental en Lo Campano para 24 horas

La figuras 10 y 11 muestran los valores del riesgo incremental de cáncer por acumulación en Bastarreche para 4, 8 y 24 horas.

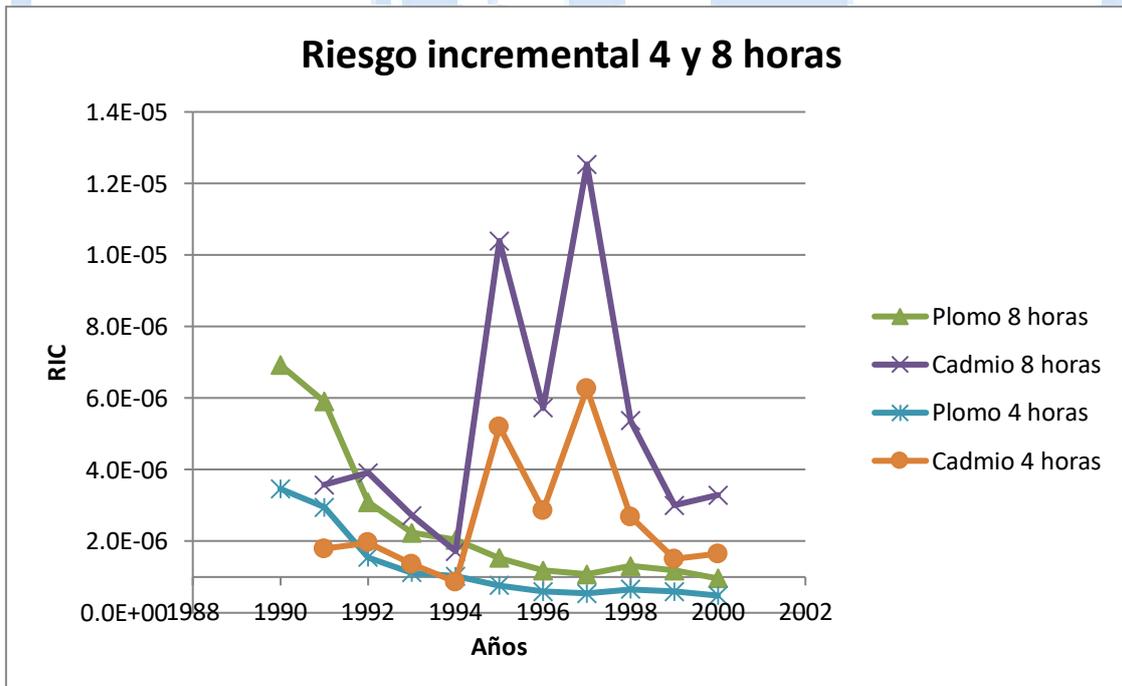


Figura 10. Riesgos incrementales en Bastarreche para 4 y 8 horas

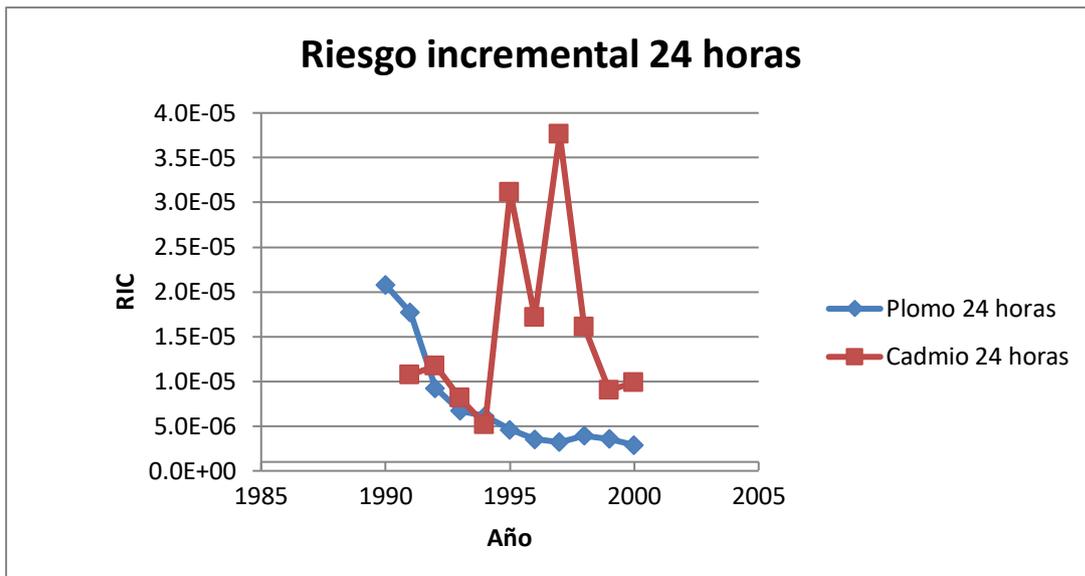
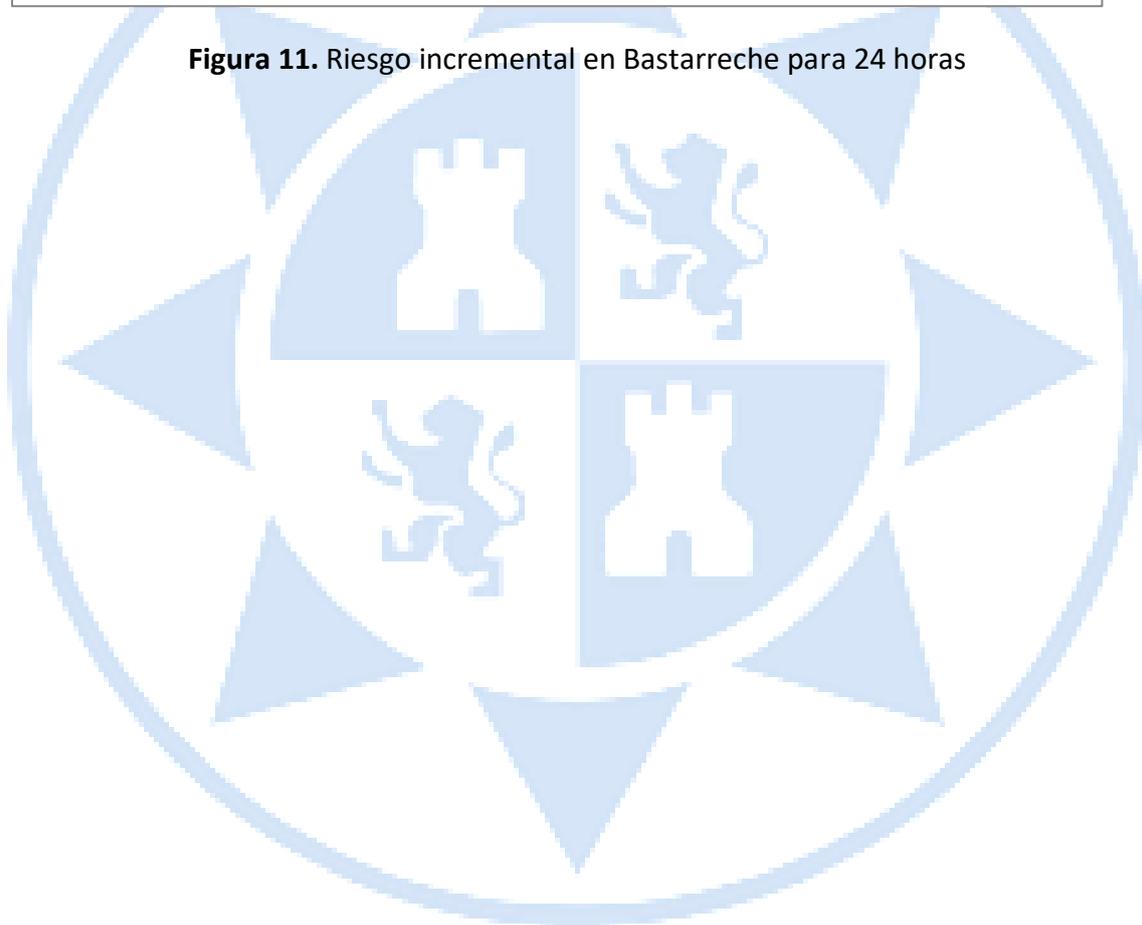


Figura 11. Riesgo incremental en Bastarreche para 24 horas



5. Discusión

La valoración de los efectos para la salud mediante una ERS es compleja, teniendo cierta incertidumbre en cuanto a los efectos de los contaminantes en la salud de los seres humanos, las referencias de las dosis de referencia o del escenario contemplado. Por ello, se ha de tener en cuenta cierta incertidumbre en la discusión de los resultados.

En el desarrollo de este trabajo nos hemos encontrado con varias limitaciones:

- Dosis de referencia: no se ha encontrado una dosis de referencia para el plomo por la vía inhalatoria (RfC_i), así que, para discutir los posibles riesgos distintos al cáncer se ha optado por emplear la dosis de referencia oral, solución adoptada en otras evaluaciones de riesgo [2],[32].
- Escenario: para el cálculo de la exposición se han asumido distintas horas de exposición, 4, 8 y 24, siendo ésta última el escenario más desfavorable y pudiendo ser realmente una duración menor o mayor.
- Población: se ha considerado por defecto como población adulta, sin diferenciar con los niños.

Según se aprecia en las figuras 4 y 5, en los valores de concentraciones anuales se observan cambios significativos, donde para la Plaza de Bastarrece el valor máximo de concentración media anual de plomo es en 1990 con un valor de $1,733 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el mínimo en el año 2000 con un valor de $0,240 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En ninguno de los casos se superó la normativa vigente del Real Decreto 717/1987 [14] que establecía el límite en $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y tampoco en los últimos dos años estudiados del período con la nueva directiva 1999/30/CE [15] que exponía un valor máximo de $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como valor límite anual referido a PM₁₀.

En cuanto al cadmio, se aprecia que el valor máximo de concentración media anual es en 1997 con un valor de $20,89 \text{ ng}/\text{m}^3$ y el valor mínimo es en 1994 con un valor de $2,87 \text{ ng}/\text{m}^3$. Según la normativa referente al cadmio de 2004/107/CE [26] que

establece un valor objetivo de 5 ng/m^3 durante un año natural referida a PM_{10} , se observa que al finalizar el período estudiado la concentración estará próxima al límite.

En Lo Campano, se observa que el valor máximo de concentración media anual de plomo es en 1991 con un valor de $3,52 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ y el mínimo en el año 1999 con un valor de $0,14 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. En los años 1990 y 1991 se supera la normativa del Real Decreto 717/1987 [14] y durante el resto del período se cumple dicha normativa. Durante los dos últimos años estudiados con la nueva directiva 1999/30/CE [15] se cumple la normativa vigente.

En el cadmio, se aprecia que el valor máximo de concentración media anual es en 1991 con un valor de $23,327 \text{ ng/m}^3$ y el valor mínimo es en el 2000 con un valor de $4,183 \text{ ng/m}^3$. Según la normativa referente al cadmio de 2004/107/CE [26] que establece un valor objetivo de 5 ng/m^3 durante un año natural referido a PM_{10} . Se observa que al finalizar el período estudiado la concentración estará próxima al límite.

En ambas localizaciones es destacable la disminución sobretodo de la concentración de plomo y, en menor medida, de cadmio durante la última década del siglo XX que concuerda con el plan de intervención autorizado por el ayuntamiento de Cartagena para reducir o detener la producción en el mismo período de tiempo [29].

La brusca disminución de plomo del año 1991 a 1992 está relacionada con el cierre de la fundición de plomo ya que ésta vertía aproximadamente 7 000 toneladas diarias de residuos, donde entre ellos se encontraba plomo [33].

El descenso liviano de la concentración anual de plomo a partir de 1992 puede ser debido también al uso de gasolina sin plomo como en el estudio de Olcese y Toselli, 2002 [34].

En comparación con otras ciudades más grandes los niveles de contaminación son menores según el estudio de Ballester et al, 2003 [35], donde se obtuvieron datos sobre contaminación atmosférica en 13 ciudades españolas (entre ellos partículas totales en suspensión) en el período de 1991 a 1996.

En el estudio de Mutlu y Lee, 2012 [19], los valores de concentración anual de plomo en las partículas totales en suspensión son menores que los del presente estudio para

todas las ciudades en las hay puntos de muestreo. Mostrando también una diferencia bastante notoria entre las concentraciones de Corea y España.

El cociente de peligro (HQ) supera el umbral de exposición al ser superior a 1, pudiendo producirse un efecto adverso. Sin embargo, por debajo de ese valor la probabilidad de producirse efectos adversos es baja [3].

Según se aprecia en la figura 6, los cocientes de peligro son menores a 1 en Lo Campano tanto en una exposición de 4 horas como de 8 horas para ambos metales, por lo que, no es probable que se produzcan efectos adversos y, por tanto, representando un riesgo potencial prácticamente insignificante.

Para un tiempo de exposición de 24 horas el cociente de peligro es inferior al límite para ambos metales excepto en los años 1991, 1995 y 1997 en el caso del cadmio, siendo el año 1991 donde el valor supera al límite en más del doble.

Según se observa en la figura 7, en Bastarache los cocientes de peligro son menores a 1 para los tiempos de exposición en ambos, por lo que, no es probable que se puedan producir efectos adversos y presentando así un riesgo potencial leve.

Sin embargo, en un tiempo de exposición de 24 horas para el cadmio el cociente de peligro es bastante superior al límite en los años 1995 y 1997, por lo que pueden producirse efectos adversos para la salud.

Los riesgos incrementales de cáncer por acumulación (RIC) tienen como límite general para elementos individuales un valor de 1×10^{-6} [3]. Este estudio supera el valor límite en múltiples casos.

Según la representación de las figuras 8,9,10 y 11, para un tiempo de exposición de 4 horas los resultados son superiores al límite en Lo Campano en el período 1990-1992 y también en 1994 para el plomo y superiores en todo el período 1990-2000 para el cadmio.

En un tiempo de exposición de 8 horas en Lo Campano, los resultados son superiores al límite para los valores de plomo en el período 1990-1996 y los del cadmio son superiores también durante todo el período.

En cuanto a 24 horas, todos los resultados son superiores al límite tanto para plomo como para cadmio y, en algunos años muy mayores, siendo más pronunciados en el caso del cadmio.

Para un tiempo de exposición de 4 horas los resultados son superiores que el límite en la Plaza de Bastarreche en el período 1990-1994 para el plomo y son inferiores para el cadmio únicamente en 1994.

En un tiempo de exposición de 8 horas, los resultados son superiores al límite en la Plaza de Bastarreche durante todo el período 1990-2000 para el plomo, excepto en el año 2000, en el caso del cadmio son superiores en todo el período.

Para las 24 horas, los resultados son bastante superiores al límite para ambos metales, siendo mayores en el caso del cadmio.

Por tanto, la inhalación de plomo y cadmio en los dos puntos de muestreo pueden producir un incremento de la incidencia del cáncer, aunque no es una medida exacta ya que la exposición real de cada persona en la población es variable. También destacar que como menciona el estudio de Ballester et al. [35], es complicado asociar a un solo contaminante como el responsable de los efectos en la salud, pero un deterioro en la calidad del aire a corto plazo se asocia a un mayor número de defunciones.

Por ello, se pueden llevar a cabo ciertas medidas como reducir las emisiones por parte de la industria o seguir más de cerca la salud de la población cercana.

También se puede observar cómo en líneas generales tanto los cocientes de peligro (HQ) como los riesgos incrementales de cáncer por acumulación (RIC) han disminuido durante el período estudiado de la última década del siglo XX.

Al contrario que en el estudio de Sun et al, 2014 [18], donde el coeficiente de peligro (HQ) es mayor para el plomo, sobrepasando el límite, y menor para el cadmio. En el presente estudio en varias ocasiones se sobrepasa el límite en el tiempo de exposición del estudio de 24 horas y el coeficiente es mayor en el cadmio y menor en el plomo.

En comparación con un estudio de Megido et al, 2017 [2], basado en muestras de PM10 y no en partículas totales en suspensión, los valores del coeficiente de peligro y de riesgo de cáncer para el cadmio son similares, teniendo un valor algo más elevado en el presente estudio y, por tanto, sobrepasando el límite en algunos casos.

Los valores para el coeficiente de peligro (HQ) por inhalación de plomo son notoriamente mayores en la presente evaluación de riesgos en salud que en el estudio de Ali et al.[36], así como los valores de concentración de plomo.

Comparado con China según un estudio basado en PM2.5 de Xiao et al, 2020 [37], los valores de riesgo no cancerígeno y cancerígeno mediante las variables HQ y RIC son bastante mayores en nuestro caso para ambos metales.

Por los resultados obtenidos de Moreno-Grau, 2002 [38], posiblemente una fracción importante de los metales estudiados se encuentren en nuestras muestras en tamaños de partículas grandes, procedentes de la resuspensión de suelos, por lo que cabe esperar que el análisis de riesgos de poder haber contado con datos para las fracciones PM10 o PM2.5 en este período de tiempo arrojará valores menores. Además, poder contar con valores a simultáneo de los metales en PTS, PM10 y PM2.5 permitiría discernir sobre la abundancia y procedencia de estos metales en el aerosol atmosférico.

En relación a un estudio de Weerasundara et al, 2018 [39], donde se comparan los coeficientes de peligro de distintos estudios en varios países, los valores de HQ realizados en nuestro estudio están por encima del resto de países.

6. Conclusiones

- La Evaluación de Riesgos en Salud (ERS) resulta de gran utilidad para determinar los impactos en la salud de la población expuesta a ciertos contaminantes, determinando estos impactos tanto cualitativamente como cuantitativamente.
- Las concentraciones medias anuales en las dos ubicaciones de muestreo de este estudio (Lo Campano y Plaza de Bastarreche) han disminuido a lo largo de la última década del siglo XX, siendo más significativa la disminución en el plomo que en el cadmio.
- En la Evaluación de Riesgos en Salud los cocientes de peligro (HQ) se encuentran por debajo del límite establecido de 1 para los escenarios de 4 y 8 horas y solo sobrepasan el límite ciertos casos de exposición de 24 horas que es el escenario más desfavorable y no es un caso usual, por tanto, se supone que no es probable que produzcan efectos adversos en la salud de la población afectada.
- En la Evaluación de Riesgos en Salud los riesgos incrementales de cáncer por acumulación (RIC) superan el límite en múltiples casos para los tiempos de exposición estudiados pudiendo producir una mayor incidencia de cáncer. Por ello, se han de establecer medidas de control de la contaminación.
- Los valores de HQ y RIC son mayores en este estudio que en los consultados, teniendo así un impacto sobre la salud de la población de cierta importancia.

7. Bibliografía

- [1] M. J. Martínez-García *et al.*, «Heavy metals in human bones in different historical epochs», *Science of The Total Environment*, vol. 348, n.º 1-3, pp. 51-72, sep. 2005, doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.12.075.
- [2] L. Megido, B. Suárez-Peña, L. Negral, L. Castrillón, y Y. Fernández-Nava, «Suburban air quality: Human health hazard assessment of potentially toxic elements in PM10», *Chemosphere*, vol. 177, pp. 284-291, jun. 2017, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.03.009.
- [3] P. Martín-Olmedo, M. Carroquino Saltó, J. Ordóñez Iriarte, y J. Moya, *La Evaluación de riesgos en salud. Guía metodológica. Aplicaciones prácticas de la metodología de Evaluación de riesgos en salud por exposición a químicos*. Madrid: Sociedad Española de Sanidad Ambiental y Escuela Andaluza de Salud Pública., 2016.
- [4] «Glosario: Clasificación estándar de la IARC». <https://www.greenfacts.org/es/glosario/abc/clasificacion-iarc.htm> (accedido jul. 19, 2021).
- [5] X. Solans Lampurlanés y L. Regidor Braojos, «NTP 465: Sustancias carcinogénicas: criterios para su clasificación», *INSHT*.
- [6] M. del C. Martínez Arroyo, «Evolución del contenido en partículas totales en suspensión y en los metales, plomo, cinc, cadmio, cobre, hierro y manganeso, en el aerosol atmosférico de Cartagena, durante el periodo 1995-2000», p. 403, jun. 2006.
- [7] EFE, «El Parlamento Europeo prohíbe la gasolina con plomo a partir del 2000», *El País*, Madrid, feb. 18, 1998. Accedido: jul. 21, 2021. [En línea]. Disponible en: https://elpais.com/diario/1998/02/19/sociedad/887842810_850215.html
- [8] U. Limo, «Estudio sobre la presencia del plomo en el medio ambiente de Talara en el año 2003». jul. 2003. Accedido: jun. 06, 2021. [En línea]. Disponible en: https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/ubillus_lj/cap3.pdf
- [9] ATSDR, «Toxicological Profile for Lead», *ATSDR*, ago. 2020, Accedido: abr. 27, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp13.pdf>
- [10] US EPA, «Lead and compounds (inorganic) CASRN 7439-92-1 | DTXSID2024161 | IRIS | US EPA, ORD». https://cfpub.epa.gov/ncea/iris2/chemicalLanding.cfm?substance_nmbr=277 (accedido abr. 26, 2021).
- [11] M. L. Robles-Osorio y E. Sabath, «Breve historia de la intoxicación por plomo: de la cultura egipcia al Renacimiento», p. 4.
- [12] «BOE.es - DOUE-L-1998-80770 Directiva 98/24/CE del Consejo, de 7 de abril de 1998, relativa a la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo (decimocuarta Directiva específica con arreglo al apartado 1 del artículo 16 de la Directiva 89/391/CEE).» <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-1998-80770> (accedido jul. 19, 2021).
- [13] New Jersey Department of Health, «Hoja Informativa sobre Sustancias Peligrosas». abr. 2017. Accedido: jun. 03, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1096sp.pdf>

- [14] *Real Decreto 717/1987, de 27 de mayo, por el que se modifica parcialmente el Decreto 833/1975, de 6 de febrero, y se establecen nuevas normas de calidad del aire en lo referente a contaminación por dióxido de nitrógeno y plomo*, vol. BOE-A-1987-13418. 1987, pp. 17046-17048. Accedido: ago. 30, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/1987/05/27/717>
- [15] «BOE.es - DOUE-L-1999-81189 Directiva 1999/30/CE del Consejo, de 22 de abril de 1999, relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente.» <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-1999-81189> (accedido ago. 30, 2021).
- [16] «BOE.es - DOUE-L-2008-81053 Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa». <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2008-81053> (accedido jul. 19, 2021).
- [17] ATSDR, «Resumen de Salud Pública: Plomo (Lead) | PHS | ATSDR», mar. 17, 2021. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs13.html (accedido ago. 29, 2021).
- [18] Y. Sun, X. Hu, J. Wu, H. Lian, y Y. Chen, «Fractionation and health risks of atmospheric particle-bound As and heavy metals in summer and winter», *Science of The Total Environment*, vol. 493, pp. 487-494, sep. 2014, doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.06.017.
- [19] A. Mutlu y B.-K. Lee, «Airborne lead levels in the Korean peninsula: characterization of temporal and spatial patterns and cancer risk analysis», *Environ Sci Pollut Res*, vol. 19, n.º 6, pp. 2125-2137, jul. 2012, doi: 10.1007/s11356-011-0712-0.
- [20] G. S. Barrón y M. Á. C. Martínez, «ECOTOXICOLOGÍA DEL CADMIO», *Trabajo Fin de Grado, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Farmacia*, p. 23, jun. 2016.
- [21] «LENNTech», *Cadmio (Cd) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente*. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cd.htm> (accedido abr. 22, 2021).
- [22] P. G. C. Campbell, «Cadmium—A Priority Pollutant», *Environ. Chem.*, vol. 3, n.º 6, p. 387, 2006, doi: 10.1071/EN06075.
- [23] R. A. Wuana y F. E. Okieimen, «Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation», *ISRN Ecology*, vol. 2011, pp. 1-20, oct. 2011, doi: 10.5402/2011/402647.
- [24] US EPA, «Cadmium CASRN 7440-43-9 | DTXSID1023940 | IRIS | US EPA, ORD». https://cfpub.epa.gov/ncea/iris2/chemicalLanding.cfm?substance_nmbr=141 (accedido abr. 26, 2021).
- [25] ATSDR, «Minimal Risk Levels for Hazardous Substances | ATSDR». <https://wwwn.cdc.gov/TSP/MRLS/mrlsListing.aspx> (accedido abr. 26, 2021).
- [26] «BOE.es - DOUE-L-2005-80075 Directiva 2004/107/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de diciembre de 2004, relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente.» <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2005-80075> (accedido jun. 20, 2021).

- [27] *Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire*, vol. BOE-A-2011-1645. 2011, pp. 9574-9626. Accedido: ago. 30, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2011/01/28/102>
- [28] «Cartagena (España)», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. jun. 20, 2021. Accedido: jun. 22, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Cartagena_\(Espa%C3%B1a\)&oldid=136460568](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Cartagena_(Espa%C3%B1a)&oldid=136460568)
- [29] L. Cirera *et al.*, «Effects of public health interventions on industrial emissions and ambient air in Cartagena, Spain», *Environ Sci Pollut Res*, vol. 16, n.º 2, pp. 152-161, mar. 2009, doi: 10.1007/s11356-008-0091-3.
- [30] C. G. García, «Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la sierra de Cartagena-La Unión (Murcia-España)», p. 460, nov. 2004.
- [31] M. J. M. García *et al.*, «Distribution of the metals lead, cadmium, copper and zinc in the top soil of Cartagena, Spain», *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 131, pp. 329-347, 2001.
- [32] B. Keshavarzi, Z. Tazarvi, M. A. Rajabzadeh, y A. Najmeddin, «Chemical speciation, human health risk assessment and pollution level of selected heavy metals in urban street dust of Shiraz, Iran», *Atmospheric Environment*, vol. 119, pp. 1-10, oct. 2015, doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.08.001.
- [33] «Historia olvidada de la mayor catástrofe ambiental del Mediterráneo», *Ethic*, nov. 27, 2020. <http://ethic.es/2020/11/portman-historia-olvidada-de-la-mayor-catastrofe-ambiental-del-mediterraneo/> (accedido ago. 30, 2021).
- [34] L. E. Olcese y B. M. Toselli, «Some aspects of air pollution in Córdoba, Argentina», *Atmospheric Environment*, vol. 36, n.º 2, pp. 299-306, ene. 2002, doi: 10.1016/S1352-2310(01)00336-3.
- [35] F. Ballester *et al.*, «Relación a corto plazo de la contaminación atmosférica y la mortalidad en 13 ciudades españolas», p. 6, 2003.
- [36] N. Ali *et al.*, «Arsenic and lead in the indoor residential settings of different socio-economic status; assessment of human health risk via dust exposure», *Environ Sci Pollut Res*, vol. 28, n.º 11, pp. 13288-13299, mar. 2021, doi: 10.1007/s11356-020-11546-w.
- [37] X. Xiao *et al.*, «Distribution and health risk assessment of potentially toxic elements in soils around coal industrial areas: A global meta-analysis», *Science of The Total Environment*, vol. 713, p. 135292, abr. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135292.
- [38] S. Moreno-Grau *et al.*, «Relationships between levels of lead, cadmium, zinc and copper in soil and settleable particulate matter in Cartagena (Spain)», *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 137, pp. 365-383, 2002.
- [39] L. Weerasundara, D. N. Magana-Arachchi, A. M. Ziyath, A. Goonetilleke, y M. Vithanage, «Health risk assessment of heavy metals in atmospheric deposition in a congested city environment in a developing country: Kandy City, Sri Lanka», *Journal of Environmental Management*, vol. 220, pp. 198-206, ago. 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.04.036.