

Trabajo Fin de Máster

Modelación matemática del riesgo por contaminación de suelos por metales pesados en Ecuador

Intensificación: *ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS*

Autor:

Jennyffer Rebeca Yépez Ramírez

Director:

Dr. Javier Rodrigo Ilarri

Septiembre 2021



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto
Título del TFM en español: Modelación matemática del riesgo por contaminación de suelos por metales pesados en Ecuador
Título del TFM en inglés: Mathematical modeling of the soil contamination risk by heavy metals in Ecuador
Título del TFM en valenciano: Modelització matemàtica del risc per contaminació de sols contaminats per metalls pesats al Ecuador
Alumno: Jennyffer Rebeca Yépez Ramírez
Director: Javier Rodrigo Ilarri
Fecha de Lectura: ----

Resumen
<p>En español:</p> <p>El suelo es considerado el medio natural para crecimiento de plantas y soporte para las actividades humanas orientadas al aprovechamiento de su productividad, a lo largo de los años al suelo se lo ha definido como “el conjunto de unidades naturales que ocupan parte de la superficie terrestre que soportan las plantas, y cuyas propiedades se deben a los efectos combinados del clima y de la materia viva sobre la roca madre, en un periodo de tiempo y en un relieve determinado” (Soil Survey Staff, 1951), es un espacio donde la futura agua potable inicia su trayectoria de purificación natural hacia las aguas subterráneas. Las funciones económicas, sociales y culturales producen la importancia del buen estado del suelo, a menudo es un dominio descuidado de la biodiversidad susceptible a la contaminación.</p> <p>El Estado del Informe Mundial sobre el Recursos Suelo (SWSR) identificó a la contaminación como una de las principales amenazas para el suelo, que afectan los suelos del mundo y los servicios a los ecosistemas que éstos proporcionan, la preocupación por la contaminación y degradación del suelo como consecuencia del desarrollo humano fue puesto en manifiesto mediante la aprobación de la “Carta Europea de Suelo por parte del Consejo de Europa (1972) y la Conferencia de Naciones Unidas referente al Medio Ambiente (1ª Conferencia del PNUMA, Estocolmo 1972)”. Cada vez es más evidente la preocupación y necesidad de proteger el suelo, en la Unión Europea aún no existe legislación cuyo objetivo principal sea la protección del suelo, las políticas más importantes son las del medio ambiente, agricultura, gestión de residuos, entre otras. El sexto Programa de Acción Comunitario referente al medio ambiente insistió en elaborar una estrategia temática de protección de suelos.</p> <p>La Comisión Europea COM (2002) 179 dicta la comunicación “Hacia una estrategia temática para la protección del suelo”, siendo esta la primera en abordar el tema señalando ocho amenazas que afectan a los suelos de la Unión Europea. En España se incluye la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, introduciendo con ella en el ordenamiento jurídico español el concepto de suelo contaminado. La Ley 10/1998 fue derogada por la Ley 22/2011, del 28 de Julio, de residuos y suelos contaminados, la cual tiene por objeto la regulación del régimen jurídico de los suelos contaminados, determinando los sujetos responsables de la contaminación de suelos, regulando también las obligaciones de información a las que están sujetos los titulares de las actividades potencialmente contaminantes del suelo.</p> <p>La legislación en cuanto a suelos contaminados en España ha tenido avances, es así que a principios del 2005 se aprueba la norma relacionada con los suelos: El Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, en el que</p>

se establece la relación de actividades contaminantes del suelo y criterios y estándares para declarar un suelo contaminado, en el artículo 3 se especifica la obligación de remitir al órgano competente las actividades relacionadas especificadas en el anexo I con el alcance y contenido recogido en el anexo II. En el artículo 4 se declarará el suelo como contaminado para ciertos usos descritos en el anexo III, si en los suelos se concurre alguna de las circunstancias mencionadas en el anexo IV se hará una valoración detallada de los riesgos para la salud humana y ecosistema, la valoración de estos riesgos se realizará conforme a los señalados en el anexo VII. El artículo 6 hace alusión a los niveles genéricos de referencia para evaluar las sustancias contaminantes del suelo nombradas en los anexos V y VI, los niveles genéricos de referencia se definen como la concentración de una sustancia contaminante en el suelo, que no conlleva un riesgo superior al máximo aceptable para la salud humana o los ecosistemas y calculado de acuerdo con los criterios recogidos en el anexo VII del Real Decreto 9/2005, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. Cada Comunidad Autónoma tiene la competencia para el establecimiento de los niveles genéricos de referencia de metales en función de criterios del anexo VII del Real Decreto, por último, el anexo VIII indica los contenido mínimos para ejecutar la evaluación de riesgo en suelos contaminados.

La Constitución de la Republica del Ecuador de 1998 declara el interés público para la preservación del medio ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genérico del país. Con la Ley de Gestión Ambiental inician las políticas en cuanto a prevención, control y sanción de las actividades que produzcan contaminación de recursos naturales, en el año 2003 se publicó el Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Medio Ambiente (TULSMA), el TULSMA está conformado por nueve libros, el Libro VI (Calidad Ambiental) esta compuesto por siete anexos. El anexo 2 (Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados) tiene como principal objetivo la conservación de la calidad del recurso suelo para salvaguardar la integridad de los ecosistemas, la norma indica sobre suelos contaminados lo siguiente: Prevención de la contaminación al recurso suelo, actividades que degradan la calidad del suelo, diagnóstico de la contaminación del suelo in situ, remediación del área del suelo contaminado y criterios de calidad de suelo y criterios de remediación.

La contaminación de suelos es unos de los temas con mayor atención y debate en los últimos años, ya que, genera un efecto desfavorable en la salud humana o el medio ambiente. Las Legislaciones de España y Ecuador que se encuentran en vigor son un marco de referencia en el presente documento, en el cual se realiza un análisis de riesgo para contaminación de suelos por metales pesados en emplazamientos del Ecuador, el análisis se lo lleva a cabo por medio del modelo matemático SADA (Spacial Analysis and Decision Assistance). SADA es un software que se encuentra de forma gratuita, conteniendo herramientas de los campos de evaluación ambiental en un entorno eficaz para la resolución de problemas de contaminación. El modelo incorpora módulos integrados para visualización, análisis geoespacial, análisis estadístico, evaluación de riesgos para la salud humana, evaluación de riesgos ecológicos, análisis de costo/beneficio, diseño de muestreo y análisis de decisiones.

En el presente Trabajo Final de Master se efectúa un diagnóstico de suelos contaminados por metales pesados en emplazamientos localizados en Ecuador. La modelización matemática se realiza mediante la aplicación del software de libre distribución SADA, de acuerdo con los actuales criterios vigentes en la legislaciones de España y Ecuador de suelos contaminados.

En valenciano:

El sòl és considerat el medi natural per a creixement de plantes i suport per a les activitats humanes orientades a l'aprofitament de la seua productivitat, s'ha definit tradicionalment com: “el conjunt d'unitats naturals que ocupen parts de la superfície terrestre que suporten les plantes, i les propietats del

qual es deuen als efectes combinats del clima i de la matèria viva sobre la roca mare, en un període de temps i en un relleu determinat” (Soil Survey Staff, 1951), és un espai on la futura aigua potable inicia la seua trajectòria de purificació natural cap a les aigües subterrànies. Les funcions econòmiques, socials i culturals produeixen la importància del bon estat del sòl, sovint és un domini descarat de la biodiversitat susceptible a la contaminació.

L'Estat de l'Informe Mundial sobre Recursos del Sòl (SWSR) va identificar la contaminació com una de les principals amenaces per al sòl que afecten els sòls del món i els serveis als ecosistemes que aquests proporcionen, la preocupació per la contaminació i degradació del sòl a conseqüència del desenvolupament humà va ser posat en manifest mitjançant la Carta Europea dels Sòls, aprovada pel Consell d'Europa en 1972, i la Conferència de les Nacions Unides sobre el Medi Ambient (1a Conferència del PNUMA, Estocolm 1972). Cada vegada és més evident la preocupació i necessitat de protegir el sòl, en la Unió Europea aún no existe legislación cuyo objetivo principal sea la protección del suelo, les polítiques mes importants són les del medi ambient, agricultura, gestió de residus, entre altres. El sisé Programa d'Acció Comunitari referent al medi ambient va insistir a elaborar una estratègia temàtica de protecció de sòls.

La Comissió Europea COM (2002) 179 dicta la comunicació “Hacia una estrategia temática para la protección del suelo”, sent aquesta la primera a abordar aquest tema assenyalant huit amenaces que afecten els sòls de la Unió Europea. A Espanya s'inclou la Llei 10/1998, de 21 d'abril, de Residus, introduint amb ella en l'ordenament jurídic espanyol el concepte de sòl contaminat. La Llei 10/1998 va ser derogada per la Llei 22/2011, del 28 de Juliol, de residus i sòls contaminats té per objecte la regulació del règim jurídic dels sòls contaminats, determinant els subjectes responsables de la contaminació de sòls, regulant també les obligacions d'informació a les quals estan subjectes tant els titulars de les activitats potencialment contaminants del sòl.

La legislació quant a sòls contaminats a Espanya ha tingut avanços, és així que a principis del 2005 s'aprova la norma relacionada amb els sòls: El Reial decret 9/2005, de 14 de gener, en el qual s'estableix la relació d'activitats contaminants del sòl i criteris i estàndards per a declarar un sòl contaminat, en l'article 3 s'especifica l'obligació de remetre a l'òrgan competent les activitats relacionades especificades en l'annex I amb l'abast i contingut recollit en l'annex II. En l'article 4 es declararà el sòl com contaminat per a uns certs usos descrits en l'annex III, si en els sòls es concorre alguna de les circumstàncies esmentades en l'annex IV es farà una valoració detallada dels riscos per a la salut humana i ecosistema, la valoració d'aquests riscos es realitzarà conforme als assenyalats en l'annex VII. L'article 6 fa al·lusió als nivells genèrics de referència per a una avaluació substàncies contaminants del sòl nomenades en els annexos V i VI, els nivells genèrics de referència es defineixen com la concentració d'una substància contaminant en el sòl, que no comporta un risc superior al màxim acceptable per a la salut humana o els ecosistemes i calculat d'acord amb els criteris recollits en l'annex VII del Reial decret 9/2005, de 14 de gener, pel qual s'estableix la relació d'activitats potencialment contaminants del sòl i els criteris i estàndards per a la declaració de sòls contaminats. Cada Comunitat Autònoma té la competència per a l'establiment dels nivells genèrics de referència de metalls en funció de criteris de l'annex VII del Reial decret, finalment, l'annex VIII indica els contingut mínims per a executar l'avaluació de risc en els sòls contaminats.

La Constitució de la Republica de l'Equador de 1998 declara l'interés públic la preservació del medi ambient, conservació dels ecosistemes, la biodiversitat i la integritat del patrimoni genèric del país, amb la Llei de Gestió Ambiental inicien les polítiques quant a la prevenció, control i sanció de les activitats que produeixen contaminació dels recursos naturals. En el 2003 a l'Equador es va publicar el Text Unificat de la Legislació Secundària del Ministeri del medi ambient (TULSMA), el TULSMA està conformat per nou llibres, el Llibre VI (Qualitat Ambiental) aquesta conformat per set annexos, l'annex 2 (Norma de Qualitat Ambiental del Recurs Sòl i Criteris de remediació per a Sòls Contaminats). El principal objectiu de la norma és conservar la qualitat del recurs sòl per a salvaguardar la integritat dels ecosistemes, la norma indica sobre sòls contaminats el següent: Prevenció de la contaminació al recurs

sòl, activitats que degraden la qualitat del sòl, diagnosticar de la contaminació del sòl in situ, remediació de l'àrea i sòl contaminat i criteris de qualitat de sòl i criteris de remediació.

La contaminació de sòls és uns dels temes amb major atenció i debat en els últims anys, ja que, genera un efecte desfavorable en la salut humana o el medi ambient. Les Legislacions d'Espanya i Equador que es troben en vigor són un marc de referència en el present document, en el qual es realitza una anàlisi de risc de contaminació de sòls per metalls pesants en emplaçaments de l'Equador, l'anàlisi se'l fa a terme per mitjà del model matemàtic SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance). SADA és un programari que es troba de forma gratuïta, contenint ferramentes dels camps d'avaluació ambiental en un entorn eficaç per a la resolució de problemes de contaminació ambiental. El model incorpora mòduls integrats per a visualització, anàlisi geoespacial, anàlisi estadístic, avaluació de riscos per a la salut humana, avaluació de riscos ecològics, anàlisi de costo/beneficio, disseny de mostratge i anàlisi de decisions.

En el present Treball Final de Màster s'efectua un diagnòstic de sòls contaminats per metalls pesants en emplaçaments en l'Equador, el programari SADA a causa de les seues capacitats s'empra per a abordar els dits llocs contaminats.

En inglés:

The soil is considered the natural environment for plant growth and support for human activities aimed at taking advantage of their productivity, over the years defined as: “the set of natural units that occupy parts of the earth's surface that support plants, and whose properties are due to the combined effects of climate and of living matter on bedrock, in a period of time and specific relief” (Soil Survey Staff, 1951), it is a space where future drinking water begins its path of natural purifying towards groundwater. The economic, social and cultural functions produce the importance of the good condition of the soil, it is often a neglected domain of biodiversity susceptible to contamination.

The State of the World's Soil Resources Report (SWSR) identified pollution as one of the main threats to soil affecting the world's soils and the ecosystem services that soils provide, the concern about soil contamination and degradation as a consequence of human development was revealed through the “European Soil Charter, approved by the Council of Europe in 1972, and the United Nations Conference on the Environment (1st UNEP Conference, Stockholm 1972)”. The concern and need to protect the soil is increasingly evident, in the European Union there is still no legislation whose main objective is the protection of the soil, the most important policies are those of the environment, agriculture, waste management, among others. The sixth Community Action Program regarding the environment insisted on developing a thematic strategy for soil protection.

The European Commission COM (2002) 179 issues the communication “Towards a thematic strategy for soil protection”, this being the first to address this issue, pointing out eight threats that affect the soils of the European Union. In Spain, Law 10/1998, of April 21, on Waste, introducing with it in the Spanish legal system the concept of contaminated soil. Law 10/1998 was repealed by Law 22/2011, of July 28, on waste and contaminated soils aims to regulate the legal regime of contaminated soils, determining the subjects responsible for soil contamination, also regulating the information obligations to which the owners of potentially soil polluting activities are subject.

Legislation regarding contaminated soils in Spain has made progress, so at the beginning of 2005 the standard relevant to soils was approved: The Royal Decree 9/2005, of January 14, which establishes the list of soil polluting activities and the criteria and standards for the declaration of contaminated soils, in article 3 specifies the obligation to refer to the competent body the related activities specified in annex I with the scope and content contained in annex II. In article 4, the soil will be declared as contaminated

for certain uses described in annex III, if any of the circumstances mentioned in annex IV occur in the soils, a detailed assessment of the risks to human health and the ecosystem will be made, the assessment of these risks it will be carried out in accordance with those indicated in annex VII. The article 6 refers to the reference generic levels for an evaluation of soil polluting substances named in annexes V and VI, the reference generic levels are defined as the concentration of a polluting substance in the soil, that does not entail a risk greater than the maximum acceptable for human health or ecosystems and calculated in accordance with the criteria set out in annex VII of Royal Decree 9/2005, of January 14, by which the relationship is established of potentially polluting activities of the soil and the criteria and standards for the declaration of contaminated soils. Each Autonomous Community has the competence for the establishment of reference generic levels of metals based on criteria of annex VII of the Royal Decree, finally, annex VIII indicates the minimum content to carry out the risk assessment on contaminated soils.

The Constitution of the Republic of Ecuador of 1998 declares the public interest the preservation of the environment, conservation of ecosystems, the biodiversity and the integrity of the country's generic heritage. With the Environmental Management Law prevention policies start, control and sanction of activities that cause contamination of natural resources. In 2003 the Unified Text of the Secondary Legislation of the Ministry of the Environment (TULSMA) was published, the TULSMA is made up of nine books, Book VI (Environmental Quality) it shaped of seven annexes, the annex 2 (Environmental Quality Standard for Soil Resources and Remediation Criteria for Contaminated Soils) has as its main objective the conservation of the quality of the soil resource to safeguard the integrity of the ecosystems, the standard indicates the following on contaminated soils: Prevention of contamination to the soil resource, activities that degrade soil quality, diagnosis of soil contamination in situ, remediation of the contaminated soil area and soil quality criteria and remediation criteria.

Soil contamination is one of the topics with the greatest attention and debate in recent years, since it generates an unfavorable effect on human health or the environment. The laws of Spain and Ecuador that are in force are a frame of reference in this document, in which an analysis of the risk of contamination of soils by heavy metals in sites in Ecuador is carried out, the analysis is carried out by means of the mathematical model SADA (Spacial Analysis and Decision Assistance). SADA is a software that is free of charge, containing tools from the fields of environmental assessment in an effective environment for the resolution of environmental pollution problems. The model incorporates integrated modules for visualization, geospatial analysis, statistical analysis, human health risk assessment, ecological risk assessment, cost / benefit analysis, sampling design, and decision analysis.

In the present Master's Final Project, a diagnosis of soils contaminated by heavy metals in sites in Ecuador is carried out. The freeware software SADA is used, to addressing such contaminated sites following the requirements established by the current Spain legislation on contaminated soils.

Palabras clave español: Suelo, Niveles genericos de referencia, metales pesados, riesgo

Palabras clave valenciano: Sòl, Nivells genèrics de referència, metalls pesants, risc

Palabras clave inglés: Soil, reference generic levels, heavy metals, risk

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	14
2.	EL SUELO COMO ELEMENTO AMBIENTAL	16
2.1.	EL RECURSO SUELO	16
2.2.	CONTAMINANTES QUE AFECTAN AL SUELO	18
2.3.	ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL RECURSO SUELO.....	18
2.3.1.	Fuentes geogénicas naturales.....	18
2.3.2.	Fuentes antropogénicas.....	19
2.3.3.	Contaminación local o también llamada puntual.....	19
2.3.4.	Contaminación no puntual, extensa o difusa	21
2.4.	CATEGORIZACIÓN DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES EN EL SUELO.....	22
2.5.	ELEMENTOS TRAZAS PRESENTES EN EL SUELO	23
2.6.	FUENTES ANTRÓPICAS DE LOS METALES PESADOS	24
2.7.	INSTRUMENTOS DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN EL SUELO	24
2.8.	MOVILIDAD, BIODISPONIBILIDAD Y TOXICIDAD DE CONTAMINANTES	25
2.8.1.	Toxicidad de los contaminantes.....	27
2.9.	EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES METALICOS EN EL SUELO	27
2.9.1.	Efectos de los contaminantes metálicos en plantas.....	27
2.9.2.	Efectos de los contaminantes metálicos en los seres humanos	28
2.10.	PROCESO PARA DECLARACION DE UN SUELO CONTAMINADO	29
2.10.1.	España: Suelo declarado como contaminado.....	30
2.10.2.	Ecuador: Suelo declarado como contaminado.....	30
3.	MARCO JURIDICO.....	31
3.1.	CONCEPTO JURÍDICO DEL SUELO.....	31
3.2.	LEGISLACIÓN SOBRE PROTECCIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS.....	31
3.3.	LEGISLACIÓN EUROPEA.....	32
3.3.1.	Fases regulación del suelo	32

3.4.	LEGISLACIÓN ESPAÑOLA	34
3.5.	LEGISLACIÓN DE LA COMUNIDAD DE VALENCIA	36
3.6.	LEGISLACIÓN DE ECUADOR.....	36
3.7.	COMPARACIÓN DE LA NORMATIVA AMBIENTAL DE SUELOS CONTAMINADOS EN ESPAÑA Y ECUADOR	42
4.	ANÁLISIS DE RIESGOS MEDIOAMBIENTALES	44
4.1.	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGO.....	45
4.1.1.	Realización del modelo conceptual	45
4.1.1.1.	Caracterizar de fuentes contaminantes del suelo	46
4.1.1.2.	Identificar riesgo de contaminación	46
4.1.1.3.	Caracterizar medios de los contaminantes	47
4.1.1.4.	Reconocer rutas de exposición de contaminantes	47
4.1.1.5.	Identificación de los receptores	47
4.1.1.6.	Definición de escenario de análisis	48
4.1.2.	Análisis de toxicidad	48
4.1.3.	Análisis de la exposición	50
4.1.3.1.	Concentración en superficie contaminada.....	50
4.1.3.2.	Determinación de la medida de la exposición.....	50
4.1.3.3.	Métodos de exposición.....	50
4.1.4.	Caracterización del riesgo.....	51
4.1.5.	Análisis de incertidumbre	51
4.1.6.	Conclusiones.....	52
5.	MECANISMOS DE RECUPERACION DE SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS.....	53
5.1.	TÉCNICAS DE DESCONTAMINACIÓN	54
5.1.1.	Tratamiento físico-químico	54
5.1.2.	Tratamientos biológicos.....	54
5.1.3.	Tratamientos térmicos	55
5.2.	TÉCNICAS DE CONTENCIÓN.....	55

5.3.	TÉCNICAS DE CONFINAMIENTO	56
6.	MODELIZACIÓN	57
6.1.	MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO.....	57
6.2.	SADA.....	57
6.2.1.	Diseño de muestras, exploración y visualización de datos	59
6.2.2.	Análisis geoespacial	59
6.2.3.	Capacidades de evaluación de SADA	59
6.3.	ECUACIONES CONSIDERADAS EN SADA	60
6.3.1.	Modelos de exposición por medio de diferentes rutas	60
6.3.2.	Caracterización del riesgo.....	63
6.3.3.	Determinación de la concentración sin efecto	65
7.	ANÁLISIS DE RIEGOS POR CONTAMINACIÓN DE SUELOS EN LAS PROVINCIAS DE AZUAY Y NAPO (ECUADOR).....	67
7.1.	MODELO MATEMÁTICO EMPLEADO.....	67
7.2.	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	67
7.2.1.	Campamento Guarumales.....	67
7.2.2.	Parroquia Papallacta	68
7.2.3.	Características del medio físico	68
7.3.	DISEÑO DE MUESTREO	72
7.4.	NIVELES GENÉRICOS DE REFERENCIA.....	74
7.4.1.	Valores de concentración de los metales pesados analizados en los dos emplazamientos	76
7.5.	METALES PESADOS EN LOS DOS EMPLAZAMIENTOS DE ANÁLISIS.....	77
7.5.1.	El Arsénico	77
7.5.2.	El Cobre.....	77
7.5.3.	El plomo	77
7.6.	ANÁLISIS DE RIESGO PARA LA SALUD HUMANA	78
7.6.1.	Modelo Conceptual.....	78
7.6.2.	Análisis de Toxicidad	81
7.6.3.	Análisis de exposición	81

7.6.4.	Modelo de exposición.....	84
7.6.5.	Caracterización del riesgo.....	84
7.7.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	84
7.7.1.	Análisis del contenido de metales pesados	84
7.7.2.	Resultados del análisis de riesgo para la salud humana	89
7.7.3.	Importancia del análisis de incertidumbre	91
7.7.4.	Discusión	92
8.	CONCLUSIONES GENERALES.....	94
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96
10.	ANEXO	101
10.1.	ANEXO I COMPARACIÓN DE LOS NGR DEL REAL DECRETO 9/2005 CON LOS CONTAMINANTES PRIORITARIOS DE LA EPA.	101
10.2.	ANEXO II: FICHAS TOXICOLÓGICAS DE LOS METALES PESADOS DE ANÁLISIS EN LOS EMPLAZAMIENTOS DE ESTUDIO.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1 Resumen de contaminantes que afectan al suelo en Europa, 2011.....	21
Figura. 2 Identificación de los contaminantes presentes en el suelo. Fuente: (Swartjes, 2011).	22
Figura. 3 Efectos de los metales pesados de varios sistemas de suelo. Fuente: (Kabata-Pendias & B. Mukherjee, 2007).....	25
Figura. 4 Rutas y vías de transferencia de suelos contaminados. Fuente propia.	29
Figura. 5 Componentes del riesgo ambiental.....	44
Figura. 6 Ejemplo de ruta de flujo a través de SADA.	58
Figura. 7 Ubicación del campamento Guarumales.	67
Figura. 8 Ubicación de la parroquia Papallacta.	68
Figura. 9 Mapa geológico Campamento Guarumales – Corporación Hidroeléctrica del Ecuador.	69
Figura. 10 Geología de la provincia de Papallacta. Fuente: (Gobierno Parroquial de Papallacta, 2015). ..	70
Figura. 11 Localización de partículas en Campamento Guarumales.....	72
Figura. 12 Identificación de los puntos muestreados en la parroquia Papallacta.....	73
Figura. 13 Modelo de flujo del modelo conceptual	79
Figura. 14 Análisis de muestras de Cobre obtenidas a una profundidad de 0.20 m. Comparación de los LMP de Ecuador y NGR de Holanda.....	86
Figura. 15 Concentración de Cobre en los puntos de muestreo (SADA, 2021).	86
Figura. 16 Análisis de muestras de Plomo obtenidas a una profundidad de 0.20 m. Comparación de los LMP de Ecuador y NGR de Holanda.....	87
Figura. 17 Concentración de Plomo en los puntos de muestreo (SADA, 2021).....	87
Figura. 18 Análisis de muestras de Arsénico obtenidas a una profundidad de 0.20 m. Comparación de los LMP de Ecuador y NGR de Holanda y la Comunidad de Aragón.	88
Figura. 19 Concentración de Arsénico en los puntos de muestreo (SADA, 2021).....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Esquema mundial del peligro de las funciones del suelo. Fuente: (Pennock, McKenzie, & Montanarella, 2016).....	16
Tabla 2. Cargas de metales pesados (g /ha· año) de varios productos aplicados en suelos agrícolas daneses y de deposición aéreas. Fuente: (Kabata-Pendias & B. Mukherjee, 2007).....	25
Tabla 3. Impacto en la salud humana ocasionada por elementos metálicos. Fuente: (Kabata-Pendias & B. Mukherjee, 2007).....	28
Tabla 4. Síntomas de toxicidad por exceso de metales pesados. Fuente: (Kabata-Pendias & B. Mukherjee, 2007).....	29
Tabla 5. Libro VI: Calidad ambiental del Texto Unificado de Legislación Secundaria Ambiental.	37
Tabla 6. Factores indicativos de contaminación.	41
Tabla 7. Criterios de Calidad de Suelo.	41
Tabla 8. Ministerios encargados del medio ambiente en España y Ecuador.	43
Tabla 9. Resumen de la legislación ambiental de España y Ecuador.	43
Tabla 10. Principales técnicas de recuperación de suelo. Fuente: (Ortiz Bernad et al.2007).	53
Tabla 11. Índice de riesgo.....	64
Tabla 12. Probabilidades de riesgo cancerígeno.....	65
Tabla 13. Tipos de pendientes de zonas contaminadas. Fuente: (MAGAP, 2018).....	69
Tabla 14. Coordenadas (UTM), áreas y perímetro del Campamento Guarumales. Fuente: (Guartatanga Caivinagua & Siguencia Urgiles, 2019).	70
Tabla 15. Coordenadas (UTM) de los puntos de muestreo.....	71
Tabla 16. NGR de los elementos traça analizados (mg/kg) en Holanda.....	75
Tabla 17. NGR de los elementos traça analizados (mg/kg) en la Comunidad de Aragón.	75
Tabla 18. Límites máximos permisibles para los elementos traça analizados (mg/kg).	76
Tabla 19. Concentraciones de Cobre y Plomo en Campamento Guarumales.....	76
Tabla 20. Concentraciones de Arsénico en la Parroquia Papallacta.	76
Tabla 21. Definición de los escenarios para el análisis de riesgo para la salud humana en el Campamento Guarumales.	80
Tabla 22. Definición de los escenarios para la evaluación de riesgo para la salud humana en la parroquia Papallacta.	80

Tabla 23. Parámetro biométrico y patrones de actividad para cada escenario en el campamento Guarumales.	83
Tabla 24. Parámetro biométrico y patrones de actividad para cada escenario en la parroquia Papallacta.	83
Tabla 25. Parámetros estadísticos de la concentración de Cu y Pb en el campamento Guarumales a 0.2 m de profundidad.	84
Tabla 26. Parámetros estadísticos de la concentración de As en la parroquia Papallacta a 0.2 m de profundidad.	85
Tabla 27. Índice de Riesgo para contaminantes cancerígenos (R) y no cancerígenos (HI) para los escenarios 1-2-3.	89
Tabla 28. Índice de Riesgo para contaminantes cancerígenos (R) y no cancerígenos (HI) para los escenarios 1-2-3.	91

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Introducción

Uno de los recursos naturales con que contamos es el suelo, en él se realizan multitud de funciones; entre ellas producir alimentos, servir como soporte para la vida e interactuar con el medio ambiente. El suelo se localiza en la capa superior de la corteza terrestre acogiendo la mayor parte de la biosfera, está conformado por un conjunto de partículas minerales y materia orgánica, agua, aire y un sin número de organismos vivos. El suelo tiene propiedades como: capacidad portante, facilidad de drenaje, permeabilidad, estabilidad, entre otras. Es considerado un recurso no renovable que proporciona servicios vitales para la vida, cumpliendo funciones ambientales, culturales, sociales y económicas.

Generalmente el suelo está conformado por compuestos de metales, no metales, sales y compuestos orgánicos, cuando algunos de estos compuestos presentan excedencia frente a los niveles naturales se produce contaminación del recurso suelo. Muchas actividades como: las industrias, los desechos producidos en los hogares, la ganadería, los municipios, los productos agroquímicos y los obtenidos a base del petróleo; contribuyen a la contaminación de los suelos a través de los químicos generados como subproductos de estas actividades, mismas que tienen origen antropogénico. Los químicos exponen a los ecosistemas a manifestarse derrames petroleros, filtración de vertederos, empleo de fertilizantes y plaguicidas, irrigación con aguas residuales no tratadas o aplicación al suelo de lodos residuales. La deposición atmosférica es otra fuente de contaminación del suelo, en la actualidad existe preocupación acerca de los contaminantes emergentes como son los productos farmacéuticos, interruptores endocrinos, hormonas y toxinas, entre otros. Los contaminantes biológicos también producen perturbación en el suelo, algunos de estos contaminantes son los micro-contaminantes los cuales incluyen bacterias y virus.

La agricultura es una de las actividades de mayor potencial puesto que con el crecimiento de la población mundial es necesario tener áreas más extensas, esta actividad proporciona un sin número de productos como alimentos, fibra y biocombustibles suficientes, con el paso de los años la agricultura nos deja una heredad de contaminación de los recursos naturales. En la producción agrícola es necesario la utilización de insumos como fertilizantes, plaguicidas, antibióticos, etc., estos insumos son los principales contaminantes potenciales en suelos destinados al cultivo y plantean retos especiales debido a los constantes cambios en las fórmulas químicas utilizadas.

Medidas correctoras deben ser implantadas cuando elementos tóxicos presentes en el suelo ponen en riesgo la salud humana o los ecosistemas, por esto, es imprescindible la realización de un análisis de riesgo. Por la necesidad de evaluar el daño que pueda causar la contaminación del recurso suelo al cuerpo humano y al ambiente es útil el empleo de un mecanismo para adquirir una decisión final en cuanto a una supuesta contaminación, para esto se emplea el análisis de riesgo. Herramienta que permite centrar todos los esfuerzos técnicos y económicos al estudio y solución de los emplazamientos que puedan representar un mayor riesgo (Rodrigo Ilarri, 2020). El análisis de riesgo indica la situación en términos de: foco de los contaminantes, configuración de los elementos contaminantes de los recursos naturales, medios para movilizar contaminantes, rutas de exposición y destinatario potencialmente en riesgo (Herrerros Guerra *et al.* 2008).

La matriz suelo está llegando a su límite crítico debido a factores como las presiones humanas, para la disponibilidad del recurso en el futuro es necesario poner su protección en el ámbito de la política. Si existiera una gestión apropiada del recurso los países alcanzarían la disponibilidad del recurso y beneficios como la prosperidad económica. Actualmente los modelos y software han tenido un avance en el tema sobre estudio de afecciones que se presentan en el suelo, lo que es una gran ayuda en la toma de decisiones para disminuir los riesgos ocasionados al medio ambiente y salud humana.

Objetivo

Este documento tiene como objetivo fundamental analizar dos emplazamientos ubicados en Ecuador, uno de los emplazamientos se localiza en la provincia del Azuay aproximadamente a tres horas de la ciudad de Cuenca, exactamente se encuentra en el “Campamento Guarumales”. Si los niveles de referencia de suelo contaminado en Guarumales son superados por la existencia de elementos metálicos como plomo (Pb) y cobre (Cu), se procederá a ejecutar un análisis de riesgo mediante el empleo del software SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance), el mismo procedimiento se desarrollará para el emplazamiento localizado en la parroquia Papallacta debido a la presencia de arsénico (As) en suelo de cultivo. Es importante mencionar que en el presente Trabajo de Fin de Master se hará una comparación entre la legislación de España y la legislación de Ecuador referente a suelos contaminados, con el fin de conocer los avances en las políticas de suelos.

2. EL SUELO COMO ELEMENTO AMBIENTAL

2.1. EL RECURSO SUELO

El suelo es un complejo sistema abierto polifuncional, además de ser un cuerpo natural, tridimensional y dinámico que cubre la superficie de la tierra (Jiménez Ballesta, 2017). La salud del suelo es fundamental para la vida, la seguridad alimentaria y los servicios ecosistémicos que proporciona el suelo. Desde hace muchos años al recurso suelo se lo define como “el conjunto de unidades naturales que ocupan las partes de la superficie terrestre que soportan las plantas, y cuyas propiedades se deben a los efectos combinados del clima y de la materia viva sobre la roca madre, en un periodo de tiempo y en un relieve determinado” (Soil Survey Staff, 1951). Según el documento de la Comisión de la Unión Europea “Hacia una estrategia temática para la protección del suelo” unas de las principales funciones del recurso son:

- Sustento alimenticio y productividad de la biomasa: Las actividades agrícolas y de silvicultura son dependiente del suelo, obteniendo de él agua y nutrientes.
- Almacenaje, filtración y transformación: El suelo es considerado un filtro natural de diversos cuerpos de agua, el cual también almacena minerales y materia orgánica, además de remitir hacia la atmosfera gases.
- Hábitat y reserva genética: Incontables organismos habitan en el suelo y sobre él.
- Entorno físico y cultural para la humanidad: Considerado patrimonio cultural sirviendo como base para las actividades humanas.
- Fuente de materia prima: Recurso que provee arcillas, aranes y minerales entre otras materias primas.

La Comisión de la Unión Europea reconoce ocho amenazas principales para el recurso suelo: “contaminación, pérdida de materia orgánica, erosión, reducción de la biodiversidad del suelo, salinización, sellado del suelo, compactación e inundaciones y deslizamientos de tierras”. Las tres primeras amenazas que se enunciaron se están estudiando en la segunda fase de la modalidad presentada por la Comisión de la Unión Europea (Castillo Sánchez, 2004). La condición y tendencia de diez amenazas que alteran al suelo se muestra en la Tabla 1 excluyendo la Antártida. Se efectuó una evaluación regional cuya conclusión es angustiosa, la mayoría de los suelos de los continentes se encuentran solamente en estado aceptable, pobre o muy pobre (Pennock, McKenzie, & Montanarella, 2016).

Tabla 1. Esquema mundial del peligro de las funciones del suelo. Fuente: (Pennock, McKenzie, & Montanarella, 2016).



Amenaza en función del suelo	Condición y Tendencia				
	Muy Pobre	Pobre	Justa	Buena	Muy Buena
Erosión del Suelo	↘ NENA	↘ A ↘ LAC ↘ SSA	↗ E ↗ NA ↗ SP		
Cambio de Carbono Orgánico		↗↘ A ↗↘ E ↘ LAC ↘ NENA ↘ SSA	↗ NA ↗↘ SP		
Desequilibrio de Nutrientes		↘ A ↗↘ E ↘ LAC ↘ SSA ↘ NA	↘ SP	↗↘ NENA	
Salinización y Sodificación		↗↘ A ↘ E ↘ LAC	↘ NENA ↗↘ SSA	↗ NA ↗↘ SP	
Sellado de Suelo y Ocupación del Territorio	↘ NENA	↘ A ↘ E	↗↘ LAC ↘ NA	= SSA ↘ SP	
Pérdida de la biodiversidad del suelo		↘ LAC ↘ NENA	↗↘ A ↘ E ↘ SSA	↗↘ NA ↗↘ SP	
Contaminación	↘ NENA	↘ A ↗ E	↗↘ LAC	↘ SSA ↗ NA ↘ SP	
Acidificación		↘ A ↗↘ E ↗ SSA ↘ NA	↗↘ LAC ↘ SP	↗↘ NENA	
Compactación		↘ A ↘ LAC ↘ NENA	↗↘ E ↗↘ NA ↗↘ SP	= SSA	
Anegamiento			↘ A ↗↘ E = LAC	↗↘ NENA = SSA ↗↘ NA ↗↘ SP	

Stable = Variable ↗↘ En amélioration ↗ En détérioration ↘

El suelo al recibir más de los que puede amortiguar superar los límites de su capacidad autodepuradora, es decir, el suelo pasa a situación de contaminación. Los productos químicos de fuentes industriales, urbanas y agrícolas ocasionan la contaminación del suelo, tema en el que se enfocara el presente Trabajo de Fin de Master. Las principales causa directas de contaminación de la superficie son las actividades que se efectúan sobre el terreno; tales actividades pueden ser de origen: industriales, agrícola, comercial o recreacional; en países desarrollados estas actividades son principales. En el continente europeo el territorio que sufre contaminación de suelos es cerca de 2.5 millones de emplazamientos, de esta cantidad se estima que 342.000 efectivamente se encuentran con algún grado de contaminación. Aproximadamente un tercio de estos han sido identificados, y más de 50,000 sitios habían sido remediados con éxito hasta el año 2014 (Ñaupari, 2019).

2.2. CONTAMINANTES QUE AFECTAN AL SUELO

Según (Pennock, McKenzie, & Montanarella, 2016) “la contaminación del suelo es la adición de productos químicos o materiales al suelo que tienen un efecto adverso significativo sobre cualquier organismo o en las funciones del suelo. Un contaminante puede ser definido como cualquier químico o material fuera de lugar, o presente en concentraciones más altas que las normales”. El progreso de la industria en muchos países ha ocasionado contaminación de la matriz suelo al no contar con ciertas medidas preventivas en cuanto a contaminación del suelo. Puede entenderse a la contaminación de suelo como degradación química ocasionando pérdida de productividad, proceso que ocurre cuando al suelo se le añade concentración de sustancias tóxicas que sobrepasan la capacidad de autodepuración.

Se entiende que en un suelo contaminado debe verificarse:

- Existencia de materiales de aspecto amenazante
- Que las actividades humanas hayan ocasionado compuestos de carácter peligroso
- Que los compuestos químicos encontrados en el suelo susciten un riesgo inaceptable

Los países deben proporcionar leyes eficaces para proteger el suelo de la amenaza de contaminación, es decir, una base legal para prevenir y manejar la contaminación del suelo. De acuerdo con (Van Liedekerke *et al.* 2018) “la gestión de suelo contaminado incluye tareas como la creación de un inventario, investigaciones, evaluación de riesgos y remediación, por último, establecer recomendaciones sobre el uso del suelo (restricciones)”. Las leyes y regulaciones deben ser respaldadas por un marco de gestión claro con el fin de orientar a los involucrados en cuanto a: suelos contaminados, gestión de suelos contaminados heredados y la remediación futura de suelos contaminados.

La contaminación del suelo en algunos continentes es considerada una amenaza potencial, en Europa la función que desempeñan los suelos es la tercera amenaza de peligro, en África del Norte la actuación del recuso se ubica en el cuarto lugar referente a amenazas, en Asia ocupa el quinto puesto, en el Pacífico Noroeste disminuye hasta la séptima posición, Norteamérica llega hasta la octava en posición y novena en África Sub-Sahariana y Latinoamérica. En esta última década la importancia de la contaminación de los suelos ha sido relevante, es así como, en la Quinta Asamblea Plenaria de la Alianza Mundial por el Suelo el tema principal a tratarse fue la contaminación de suelos (Rodríguez Eugenio , McLaughlin, & Pennock, 2019).

2.3. ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL RECURSO SUELO

Cuando un contaminante ingresa al suelo puede ser neutralizado, degradado, adsorbido, complejoado o precipitado, en tanto, la salida del contaminante puede realizarse por volatilización, extracción en las cosechas, drenaje o erosión. De este modo el suelo actúa como sumidero o fuente de contaminante (Jiménez Ballesta, 2017), como fuentes de contaminantes del suelo se mencionan las fuentes geogénicas y las fuentes antropogénicas (Rodríguez Eugenio , McLaughlin, & Pennock, 2019).

2.3.1. Fuentes geogénicas naturales

El contenido natural geogénico esta señalado por el valor de fondo y el contenido real de los metales en cualquier zona de un ecosistema esta denotado por un valor inicial. Un origen natural de metales es la materia parental adjunta al suelo, existen también elementos que liberan radiación ocasionando riesgo para

la salud humana y los ecosistemas a concentraciones elevadas de metales pesados. En el mundo una de las preocupaciones ambientales por contaminación lo produce la presencia de arsénico en el suelo.

2.3.2. Fuentes antropogénicas

Los productos químicos se consideran la principal fuente antropogénica de contaminación del suelo, productos empleados o producidos en desechos municipales o domésticos, actividades industriales, productos derivados del petróleo entre otros, la liberación accidental de estos químicos ocasiona contaminación al suelo.

- Funciones de las industriales
- Minería
- Infraestructuras urbanas y de transportes
- Producción y eliminación de desechos y aguas residuales
- Actuaciones militares y de guerras
- Actividades agrícolas y ganaderas

Existen actividades históricas de contaminación que en la actualidad han cesado, pero con efectos evidentes. La contaminación edáfica se distingue de fuentes claramente delimitadas llamada contaminación local o puntual y la provocada por fuentes difusas. La contaminación de los suelos puede afectar en grandes áreas extensiva o áreas localizadas (Alloway, 2012).

2.3.3. Contaminación local o también llamada puntual

Identifica la fuente de contaminación, relacionada predominantemente con actividades industriales, esta contaminación directamente afecta a una ubicación específica. Una de las fuentes de contaminación local o puntual puede ser la operatividad o suspensión de las industrias, el territorio europeo tiene extensas zonas afectadas por contaminación. Los principales sectores industriales y comerciales son los responsables de la contaminación local del suelo, según (Van Liedekerke *et al.* 2014) en países de Europa las categorías se mencionan a continuación:

- Sector Productivo: Producción de energía; industria: de aceite, química, metalmecánica, electrónica, de vidrio, de cerámica, de piedra, de suelo, de textil, de cuero, de madera, de papel, de alimentos y de procesamiento de productos orgánicos.
- Sector de Servicios: Estaciones petrolíferas, estaciones de servicio de automóviles, limpieza en seco, impresoras.
- Minería y otros: Sitios mineros, campos de tiro.

Dentro del grupo de las actividades relacionadas a las fuentes de contaminación local tenemos las siguientes:

Agricultura y Horticultura

Abono de ganado: Los abonos de ganado contienen una cantidad considerable de metales pesados, aplicado a largo plazo el estiércol animal al suelo puede ocasionar concentraciones elevadas de metales que, posteriormente dañan a los cultivos y causan perjuicio en la salud humana debido a la ingesta de alimentos.

Lodos de depuradora: Los elementos metálicos son el resultado de insumos de excremento humano, aguas grises domésticas, aguas de duchas y lavavajillas, agua de escorrentía de techos y carreteras, aguas

residuales industriales vertidas en el alcantarillado y procesadas en instalaciones destinadas al tratamiento de las aguas residuales. Debido a su contenido de N, P y materia orgánica usualmente los lodos de depuradora son empleados en áreas agrícolas.

Fertilizantes inorgánicos: Los fertilizantes son elaborados a base de compuestos inorgánicos, los macronutrientes contienen concentraciones elevadas de elementos como son los metales pesados. Las plantas absorben macronutrientes comúnmente empleados para mejorar el crecimiento y rendimiento: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S).

Productos químicos agrícolas: En áreas de cultivos son empleados compuestos organometálicos como son los fungicidas e insecticidas, los cuales contienen altas cantidades de metales pesados.

Sólidos Urbanos

En suelos urbanos las concentraciones de metales pesados con frecuencia son más altas que en suelos rurales o agrícolas, los contaminantes urbanos característicos incluyen Pb, Cd, Zn, Ba, Sb, Ti, As, Cu y Hg, aunque en algunas ciudades varían. Las áreas urbanas contienen fuentes de contaminantes de metales pesados como:

- Deposición de partículas de polvo y aerosoles
- Corrosión de estructuras metálicas, incluidos techos y cercas galvanizados
- Contaminantes antiguos de uso agrícola u hortícola de la tierra
- Fertilizantes y composts utilizados en huertos urbanos
- Deposición de desechos sólidos o líquidos en el suelo
- Pinturas y otros materiales decorativos
- Hogueras, incendios accidentales y bombardeos en tiempos de guerra

Materiales tecnogénicos

Fuentes de contaminación en áreas urbanas e industriales, posiblemente en el pasado estos materiales hayan sido vertidos o transportados en el suelo en grandes cantidades y posteriormente utilizados para cimientos de edificios, para nivelar sitios o construir carreteras.

Contaminación industrial

El crecimiento industrial desmedido ha producido una grave preocupación en el tema de contaminación de suelos debido a: la materia prima empleada en las diferentes industrias, a las cenizas de combustibles sólidos o líquidos, residuos industriales, accidentes o incendios, emisiones de procesos de combustión, entre otros.

Minería y fundición de metales no ferrosos

En esta actividad se extraen y se procesan minerales metálicos y minerales de ganga, los cuales tienen ciertos elementos metálicos en concentraciones elevadas.

Actividad militar y tiro deportivo

En áreas de entrenamiento militar, campos de batalla y ciudades bombardeadas son sitios de gran contaminación por metales pesados. Las fuentes de estas actividades son proyectiles, balas y bombas, minas sin detonar, casquillos de cartuchos, vehículos dañados, fugas de combustible y edificios en llamas.

2.3.4. Contaminación no puntual, extensa o difusa

Contaminación propagada en grandes áreas acumulándose en el suelo, el resultado de fuentes no específicas; los recursos: agua, aire y suelo son considerados sistemas por los cuales los contaminantes se transportan. Al estar contaminadas grandes áreas resulta complejo el análisis de la contaminación no puntual y la demarcación espacial de la contaminación. Básicamente esta contaminación se relaciona con: actividades agrícolas, deposición atmosférica, inadecuado manejo de lodos producidos en la depuradora y de aguas grises.

Los contaminantes tienen diferentes efectos dependiendo de sus características como de sus propiedades, por ejemplo: su potencial de dispersión, su solubilidad en agua o grasas, su biodisponibilidad, carcinogenicidad, etc. (Van Liedekerke *et al.* 2014). Algunos contaminantes que afectan a la matriz del suelo son:

- Hidrocarburos clorados (CHC)
- Aceite mineral
- Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH)
- Metales pesados
- Fenoles
- Cianuros
- Hidrocarburos aromáticos (BTEX)

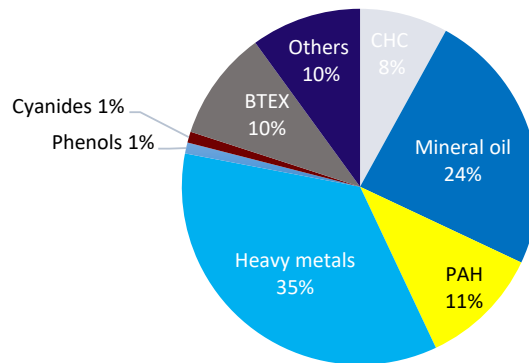


Figura. 1 Resumen de contaminantes que afectan al suelo en Europa, 2011.

Deposición atmosférica

Forma más extensa de contaminación debido al transporte de partículas a larga distancia. Fuentes de metales incluyen: Estaciones generadoras de electricidad alimentadas con carbón y petróleo, emisiones industriales de fundiciones, fundiciones y otras industrias pirometalúrgicas, vehículos de motor, emisiones de escape del motor y polvo del desgaste de los neumáticos y de los forros de freno, humo y otras emisiones de calefacción industrial y doméstica, incendios accidentales, hogueras y corrosión de infraestructuras a base de metales.

Inundaciones y deposición de sedimentos

Las partículas de metales pesados se transportan en suspensión en ríos, cuando los suelos se inundan gran parte del sedimento en suspensión en el agua se depositará en suelos aluviales. Los sedimentos son

partículas de mineral finamente molidas, ganga minerales y roca de campo que se separaron de la mayor parte del mineral metálico durante el procesamiento del material extraído de las minas. Estas finas partículas de los desechos de la mina se conocen como "relaves" y en el pasado a menudo se descargaban directamente en arroyos y ríos. La actividad minera se remonta posiblemente a 200 años o más.

2.4. CATEGORIZACIÓN DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES EN EL SUELO

Empleando criterios de procesos de producción, tipo de aplicación, caracterización química o física. La Figura 2. muestra una clasificación popular relacionada con las políticas que se basa parcialmente en caracterización química o física y, por tanto, propiedades químicas. Esto da como resultado las siguientes clases de contaminantes (Swartjes, 2011):

- Elementos metálicos y no metálicos
- Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)
- Contaminantes aromáticos monocíclicos
- Contaminantes orgánicos persistentes (COP)
- Contaminantes orgánicos volátiles (COV)
- Hidrocarburos de petróleo
- Asbesto

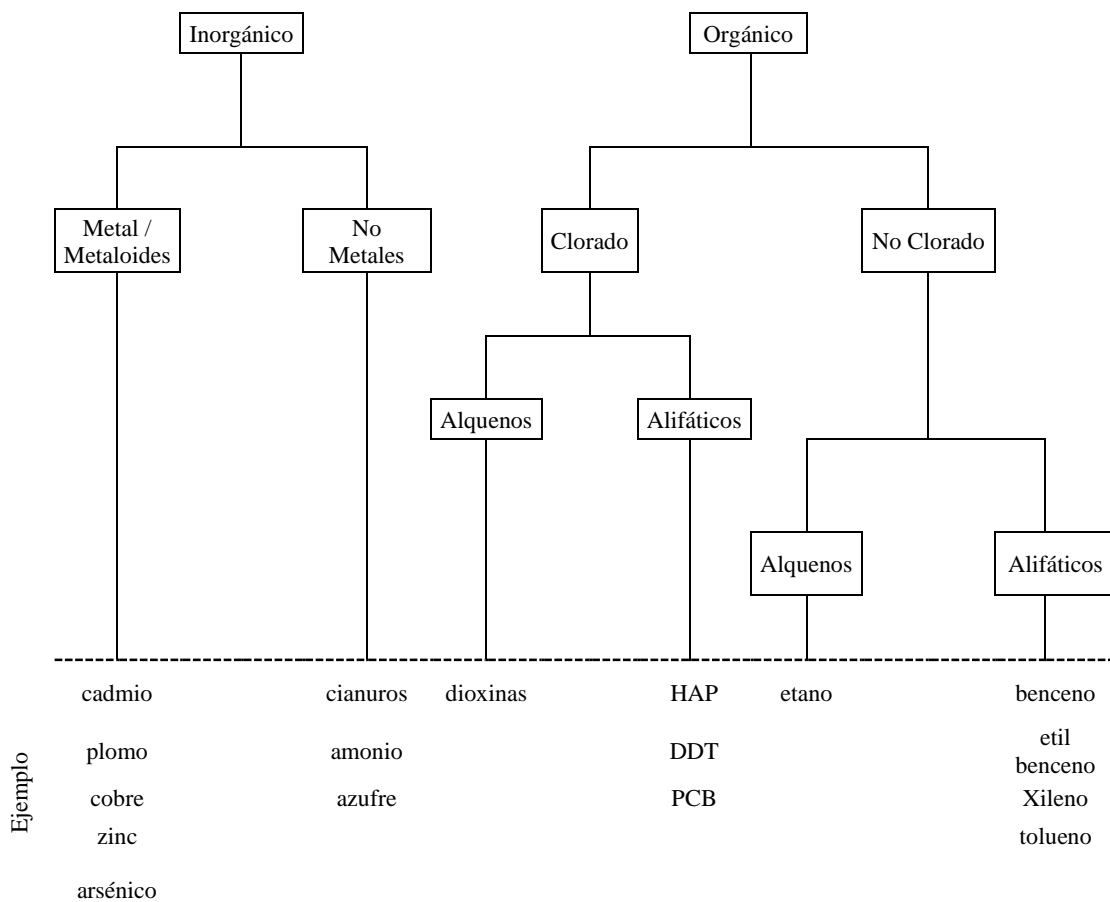


Figura. 2 Identificación de los contaminantes presentes en el suelo. Fuente: (Swartjes, 2011).

2.5. ELEMENTOS TRAZAS PRESENTES EN EL SUELO

El suelo funciona como un sistema de filtrado, amortiguación, almacenamiento y transformación, el recurso es eficaz en estas funciones solo mientras se conserven su capacidad de intercambio catiónico y su actividad biológica. El suelo es la principal fuente de elementos traza para la vegetación, también es una procedencia directa para los humanos debido a la ingestión de alimentos que contienen estos elementos (Kabata-Pendias & B. Mukherjee, 2007). Estos elementos pueden considerarse esenciales en los seres vivos, sirviendo en el periodo de crecimiento y desarrollo en los animales y el hombre.

Para describir categorías de elementos trazas se emplean dos términos como son los micronutrientes y metales pesados, los micronutrientes son indispensables para los organismos, se especifica que varios de los elementos trazas no son considerados micronutrientes. Los elementos con peso atómico mayor que el hierro (55.8 g/mol) o con una densidad mayor que 5.0 g/cm³ se los denomina metales pesado excluyendo así a muchos elementos trazas.

Los metales pesados en el suelo propician una gran preocupación al significar una peligrosidad a los organismos y ecosistema, los metales pesados son elementos que pertenecen en gran parte al grupo de transición de la tabla periódica. El organismo requiere pequeñas cantidades de metales, pero en el suelo pueden alcanzar niveles que producen toxicidad por diversas vías de exposición como: contacto directo, ingestión, inhalación, adsorción, entre otros. Algunos de los más tóxicos para los organismos del suelo, animales y seres humanos son: Hg, Cd y Pb, para las plantas son particularmente tóxicos el Cr, Ni, Co (de Vries *et al.* 2002).

Los suelos contienen elementos trazas de diversos orígenes:

- Litogénicos: Heredados de la litosfera (material parental).
- Pedogénicos: De fuentes litogénicas pero formas cambiadas debido a procesos de formación del suelo.
- Antropogénicas: Las actividades humanas en el suelo promueven la deposición de este tipo de elementos.

Los metales pesados se han empleado por muchos años en diversas áreas, uno de los metales más presentes en el suelo es el plomo. El plomo se ha utilizado durante al menos 5000 años, el metal ha sido utilizado en la construcción como un material, la pigmentación que adquieren las cerámicas y las tuberías que transportan agua es a base de plomo. El mercurio fue empleado como remedio para la sífilis. A mediados del siglo XIX Claude Monet usó pigmentos de cadmio, aunque la salud humana se conoce que es deteriorada con la exposición de los metales, la exposición a ellos continúa e incluso está aumentando en algunas zonas del mundo (Omari Ngodhe & Achieng Odhiambo, 2018).

De acuerdo con la actividad biológica los elementos trazas se dividen en dos grupos (Aguilar Ruizet *et al.* 1999):

- Oligoelementos o micronutrientes: Necesarios para completar el ciclo vital de los organismos, pasados de determinado umbral presentan toxicidad. Algunos de los metales que conforman este grupo son: Arsénico, boro, cobalto, cromo, cobre, molibdeno, manganeso, níquel, selenio y zinc.
- Elementos sin función biológica conocida: Con alta toxicidad y acumulación el organismos vivos: Bario, bismuto, cadmio, mercurio, plomo, talio y antimonio.

2.6. FUENTES ANTRÓPICAS DE LOS METALES PESADOS

Las actividades humanas son responsables de la contaminación de suelo, contaminación que se da principalmente por metales pesados, algunas fuentes antropogénicas son las actividades mencionadas a continuación (Aguilar Ruiz *et al.* 1999):

- Agricultura: Los suelos necesitan del riego y de fertilizantes, mismos que han producido aumento de los niveles de concentración de los metales pesados.
- Minería y fundición: Las áreas donde se realizan o se han realizado estas actividades contienen en la capa superior del suelo evidencian altas concentraciones de metales como: Co, Ni, As, Se, Fe y Cd.
- Electricidad: La fuente principal de deposición de metales en el suelo es la combustión de carbón y petróleo, siendo fuentes de Pb, Ni y Va.
- Industria: Se ha evidenciado que en las áreas donde se asientan las diversas industrias tienen presencia de As, Cd, Cr, Fe, Ni, Pb, Hg y Zn en sus áreas.
- Desechos domésticos: Los metales en los residuos provenientes de las actividades domésticas ocupan alrededor del 10% de la basura producida. El procedimiento actual para eliminar basura es incineración, biodigestores o relleno sanitario. Los organismos encargados de los desechos sólidos tienen un problema principal el cual es la gestión de los desechos sólidos, existen dos opciones de gestión los cuales son incineración y el entierro de los desechos, los procedimientos tienen desventajas en su aplicación como son la contaminación de aire, suelo y agua.

2.7. INSTRUMENTOS DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN EL SUELO

Para producirse contaminación por metales pesados en el suelo, estos metales deben transportarse de una fuente al suelo en un lugar particular. Los mecanismos principales de transporte son (Alloway, 2012):

- Corrientes de aire en movimiento y deposición de polvo, partículas del tamaño de aerosoles (<30 mm) y formas gaseosas de metales (por ejemplo, Hg).
- Agua en movimiento (escorrentía y/o inundación de ríos) seguida de la deposición de metal que contiene suelo cuesta abajo o en suelo aluvial en caso de inundación ríos.
- Movimiento cuesta abajo de roca rica en metales y material mineral contaminado o suelo por gravedad.
- Colocación intencional por tractores, pulverizadores, esparcidores de estiércol, camiones y excavadoras de materiales que contienen metales pesados.

Es insignificante la deposición atmosférica de metales pesados de fuentes naturales al compararla con cargas de productos empleados para la mejora del suelo Tabla 2. Las mayores cantidades de metales pesados son agregadas a suelos agrícolas con la aplicación de lodos de depuradora, compost con biosólidos y cenizas volantes, esto puede cambiar dependiendo del sistema de suelo y sobre factores variables de los elementos presentes en la superficie Figura 3.

Tabla 2. Cargas de metales pesados (g /ha· año) de varios productos aplicados en suelos agrícolas daneses y de deposición aéreas. Fuente: (Kabata-Pendias & B. Mukherjee, 2007).

Fuentes	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Lodos de depuradora	2	65	390	2.4	50	96	1900
Fertilizantes (P2O5)	0.25	3.3	67	<< 0.01	0.61	0.26	4.3
Estiércol, vaca + cerdo	1.9	11	630	< 0.4	21	3.8	820
Compost	3.2	53	320	0.66	89	140	970
Compost, MSW	3.8	98	320	1.2	150	350	1200
Encalado	0.6	< 1	3	0.003	4	< 3	13
Irrigación	0.04	0.6	1.2	0.008	3.3	1	21
Emisiones desde tractores	0.009	0.009	0.043	0.0004	2.7	0.13	0.11
Deposición atmosférica	0.15	10	7	0.07	7	12	4

MSW: Municipal Soil Waste (residuos de suelo municipal)

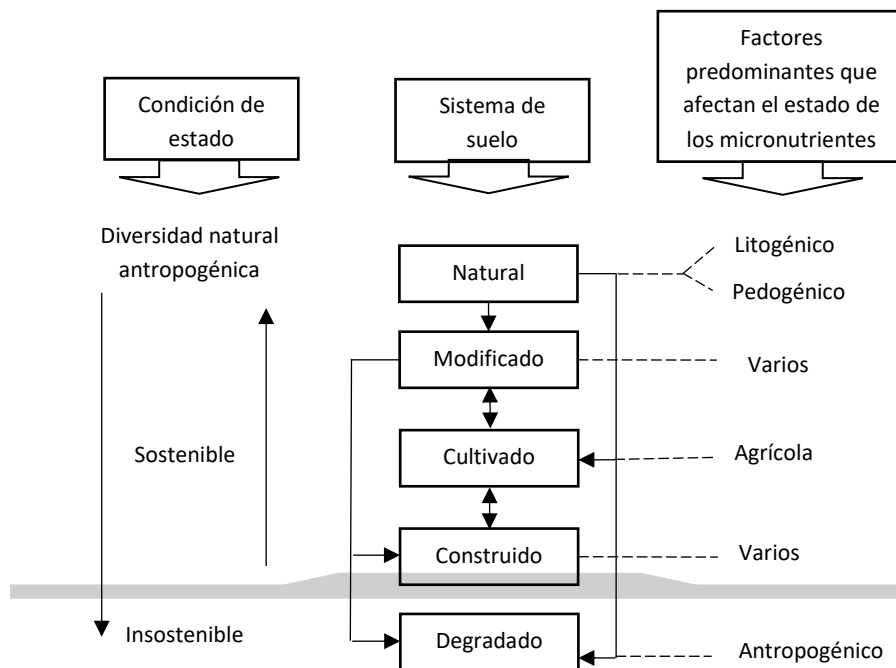


Figura. 3 Efectos de los metales pesados de varios sistemas de suelo. Fuente: (Kabata-Pendias & B. Mukherjee, 2007).

2.8. MOVILIDAD, BIODISPONIBILIDAD Y TOXICIDAD DE CONTAMINANTES

Los metales pesados en los ecosistemas dependen de su concentración total y de su asociación con la fase sólida a la que están unidos, asociaciones que se rigen por una gama de diferentes procesos físico-químicos tales como: sorción/desorción, precipitación/disolución, pH del suelo, capacidad para el intercambio catiónico, disposición de sales, etc. La movilidad, biodisponibilidad y toxicidad de metales están influenciadas por interacciones con filosilicatos, materia orgánica, minerales de carga variable, y microorganismos. Los riesgos que plantea la movilidad de los elementos metálicos dependen en gran

medida de las vías que sigan los metales tóxicos, estos se pueden subdividir en vías suelo-planta y suelo-agua (Acosta *et al.* 2011).

La movilización de los elementos está influenciada por las características del suelo, como la materia orgánica, los óxidos, así como la estructura del suelo y el desarrollo del perfil. El tipo de suelo, la vegetación, la hidrología, el uso de la tierra y la actividad biológica juegan un papel clave en los patrones a largo plazo de la movilidad de los metales. Algunos de los factores mencionados en (Sherene, 2010) que intervienen en la movilidad y adsorción de los metales en la matriz suelo son:

pH: Factor esencial para aumentar la movilidad de los metales pesados, los metales: arsénico, molibdeno, selenio, cromo a pH alcalino alcanzan mayor movimiento en el suelo, aunque la mayoría tienden a estar libre con pH ácido.

Materia orgánica (MO): Importante para la retención de metales por los sólidos del suelo, por la complejación de los metales por la MO soluble. La incorporación de MO puede ocasionar liberación de metales de los sólidos a la solución del suelo. La MO absorbe metales, un ejemplo es el Cu el cual no se considera en disponibilidad para la vegetación.

Textura: La distribución del tamaño de las partículas es reflejo de la textura y, por lo tanto, el contenido de partículas finas como óxidos y arcilla, estos compuestos son importantes medios de adsorción de metales pesados en suelos, los metales en suelos arenosos no poseen la capacidad de fijación.

Mineralogía de las arcillas: Las arcillas adsorben metales cuando mayor es la superficie activa, las especies minerales tienen valores de superficie específica y descompensación eléctrica. En suelos con gran cantidad de MO la importancia de la mineralogía de las arcillas es secundaria.

Capacidad de cambio: Guarda relación con el contenido de MO y arcillas, la capacidad para adherirse al suelo de elementos es proporcional a la capacidad de cambio catiónico.

Condiciones redox: Los metales en la naturaleza se pueden manifestar en estado oxidado o en estado reducido dependiendo del potencial de oxidación-reducción. Los metales poseen condiciones de estabilidad, condición que se muestra mediante los diagramas Eh-pH; los diagramas también brindan la capacidad de predicción del comportamiento de los metales cuando el ambiente presenta cambios donde se encuentran presentes (Aguilar Ruiz *et al.* 1999).

Óxidos e hidróxidos de Fe y Mn: Los metales se ven afectados por estos compuestos ya que cuentan elevada capacidad de fijación e inmovilización. La adsorción de metales divalentes como plomo, cobre, zinc, cobalto, cromo, molibdeno y níquel es una capacidad de los suelos con contenido de Fe y Mn.

Carbonatos: El alto valor constante de pH es garantizado por los carbonatos, los carbonatos interfieren en el proceso de precipitación de los metales pesados; el cadmio es un ejemplo de ello, este metal al igual que muchos otros tiende a ser adsorbido por los carbonatos.

Salinidad: El estado de movilidad y retención de los metales se ve en aumento al incrementar la salinidad. Las sales proporcionan compuestos alcalinos, los cationes asociados con las sales (Na, K) pueden reemplazar a metales pesados en lugares de intercambio catiónico mientras que los aniones de cloruro pueden formar complejos solubles estables con metales pesados tales como: cadmio, zinc y mercurio (Aguilar Ruiz *et al.* 1999).

2.8.1. Toxicidad de los contaminantes

La concentración, especiación o forma de presentación, biodisponibilidad o facilidad para pasar a la solución y de ella a la cadena trófica y los componentes del suelo son factores dependientes de la toxicidad de los metales pesados. La concentración es un factor condicionado a aportes exógenos de elementos, cuyas fuentes de emisión son varias, los metales son considerados esenciales en procesos bioquímicos (Co, Cu, Zn, etc.) a altas concentraciones terminan siendo tóxicos (Gonzalez *et al.* 2000).

Los problemas de toxicidad son ocasionados por contaminantes metálicos, la toxicidad se define como el daño causado por la capacidad intrínseca, el daño se manifiesta como efectos potencialmente carcinógenos, mutagénicos y teratogénicos, dependiendo en gran medida la dosis o las cantidades de las que se trate, ya que existen elementos esenciales que en grandes dosis resultan tóxicos. La toxicidad de los elementos es variable dependiente de la disposición en que se encuentren estos en el ambiente y del grado de toxicidad en el que se encuentren los metales, la disposición de los elementos puede ser en estados disueltos, adsorbidos, ligados o precipitados (Aguilar Ruiz *et al.* 1999).

2.9. EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES METÁLICOS EN EL SUELO

El ambiente al igual que la salud humana son amenazados por la incorporación de los metales pesados en el suelo, dependiendo de la concentración los metales pueden llegar a ser tóxicos. Con el consumo de alimentos los seres humanos y animales ingieren metales, la toxicidad principalmente se da por la ingestión de Cd-Pb-As-Cr-Hg-Cu. En las grandes ciudades los materiales de los desechos son variados en comparación con las pequeñas ciudades, esta es una buena explicación del porque el compost producido en ciudades grandes presenta mayor concentraciones de metales.

2.9.1. Efectos de los contaminantes metálicos en plantas

La vegetación modifica la calidad del suelo, las altas concentraciones de elementos metálicos en el suelo producen efectos adversos sobre parámetros que guardan relación con las plantas como su rendimiento, calidad, cambios de tamaño, composición y actividad de la comunidad microbiana. El Pb, Cd, As y Hg no se consideran sustanciales para el crecimiento de plantas, mientras que Fe, Mn, Co, Cu, Ni, Mo y Zn son primordiales para el periodo de crecimiento de las plantas, así como para su metabolismo (Jiwan & Ajay S., 2011). En las plantas los metales se consiguen caracterizar con ciertos procesos básicos: absorción (captación), transporte dentro de las plantas – concentración – especiación, procesos metabólicos, deficiencia y toxicidad, y competencia e interacción iónicas. Los metales reciben respuestas de parte de las plantas lo cual es objeto de estudio por parte de sistemas particulares.

La absorción de metales por las plantas en altas concentraciones puede resultar un gran riesgo para la salud humana, una de las rutas de entrada de metales pesados en la cadena alimenticia es la absorción por las raíces de las plantas. El uso de compost en tierras cultivadas es una práctica común en todo el mundo, estos materiales se obtienen de la descomposición de residuos orgánicos y mejoran la productividad de las plantas, la materia prima para el proceso del compost es: estiércol animal, lodos de depuradora, corteza de árboles y turba. (Jordao *et al.* 2005).

Los metales se movilizan al ser capturados por las células de la raíz de las partículas del suelo, unidas por la pared celular y luego transferidas a través de la membrana plasmática, en las plantas los efectos de los contaminantes metálicos son diversos en las diferentes etapas de crecimiento de las plantas (Cheng, 2003).

La absorción foliar es representativa al aplicar fertilizantes a las plantas, y se puede evaluar por medio de relación entre la concentración tanto del metal en las plantas como la del metal en el suelo, a esta relación se suele denominar coeficiente de absorción biológica, índice de bioacumulación o factor de transferencia (Kabata-Pendias & B. Mukherjee, 2007).

Las plantas se adaptan al exceso de metales pesados, pero a elementos puntuales suelen ser sensibles. El crecimiento de las plantas bajo impacto de altos contenidos de metales pesados es limitado, al cultivar plantas en suelos contaminados la morfología resulta afectada pues se altera y se evidencia excreción de sal en las puntas de las hojas. Una de las parte de las plantas acuáticas como lo es la raíz, así como los microorganismos del suelo se consideran buenos bioindicadores de contaminación de un área específica, también las enzimas que son inhibidas por el exceso de metales pesados, particularmente por Cd, Cr, Cu y Zn, se conocen como buenos indicadores (Kabata-Pendias & B. Mukherjee, 2007).

2.9.2. Efectos de los contaminantes metálicos en los seres humanos

Para una buena salud el equilibrio homeostático de elementos químicos en los organismos es el requerimiento primordial, el desarrollo y salud de los organismos están sujetos a funciones fisiológicas vitales de los elementos traza. El contenido de metales pesados de los cultivos es influenciado por las anomalías geoquímicas del lecho rocoso, la variabilidad de los datos del suelo, las actividades agrícolas y la contaminación antropogénica, lo que resulta en una ingesta dietética de elementos. El desequilibrio de los elementos en los organismos puede variar produciendo deficiencias o excesos de elementos trazas esenciales, en la Tabla 3 se enuncian algunos elementos con sus respectivas deficiencias y exceso, mientras que en la Tabla 4 se enuncian síntomas tóxicos por concentraciones altas de metales (Kabata-Pendias & B. Mukherjee, 2007).

Tabla 3. Impacto en la salud humana ocasionada por elementos metálicos. Fuente: (Kabata-Pendias & B. Mukherjee, 2007).

Elemento	Deficiencia	Exceso
Co	Anemia, anorexia	Cardiomiopatía, defectos de la médula ósea, exceso de glóbulos rojos
Cu	Anemia y defectos en tejidos	Hepatitis necrótica, hemólisis, hiperglucemia
Cr	Metabolismo defectuoso de la glucosa, hiperlipidemia	Lesiones en piel, mucosa intestinal, edema pulmonar y cáncer de pulmón
F	Caries dentales y retraso de crecimiento	Fluorosis - efectos variables, moteado del esmalte de dientes
Fe	Anemia	Siderosis, hemocromatosis, insuficiencia cardíaca
I	Función neurológica alterada	Hipertiroidismo
Li	Depresión	Deterioro del sistema nervioso central, efectos cardiovasculares y renales
Mo	Defectos en la queratosis, retraso de crecimiento	Molibdenosis, defecto en el metabolismo del Cu, diarrea
Mn	Deformidad esquelética y cartilaginosa	Manganismo, trastornos neurológicos, cirrosis hepática
Se	Miocardiopatía, osteoartropatía, mal funcionamiento de la membrana	Selenosis, daño hepático y renal
V	Defectos dentales	Alteraciones nerviosas
Zn	Anorexia, anemia, queratosis deteriorada, efectos teratogénicos	Anemia, defectos en tejidos

Tabla 4. Síntomas de toxicidad por exceso de metales pesados. Fuente: ((Kabata-Pendias & B. Mukherjee, 2007).

Elemento	Síntomas de toxicidad
Al	Osteomalacia, neurotoxicidad, demencia, posible agente de la enfermedad de Alzheimer
As	Trastornos variables que incluyen sistema nervioso, insuficiencia hepática y renal, malestar del tracto intestinal, anemia, cáncer de piel
Be	Beriliosis, neumonitis, cáncer
Cd	Miocardopatía, daño hepático y renal, gastroenteritis, neumonitis, osteomalacia, cáncer
Hg	Trastorno del sistema nervioso y gástrico, daño renal y pulmonar, un potente teratógeno
Pb	Trastorno del sistema nervioso, efectos hematológicos, enfermedad renal, malestar del tracto intestinal, hipertensión
Ni	Defectos gástricos, hepáticos y renales, efectos neurológicos, enfisema y cáncer de pulmón

Personas con cáncer pulmonar poseen cantidades elevadas de As, Cd y Ni, cabe mencionar que no existe evidencia del desarrollo del cáncer de pulmón por la presencia de los metales señalados. La población ingiere metales por vías de adsorción: El tracto encargado de la digestión (alimentos, agua, medicamentos, suelo y aerosoles), tracto respiratorio (aerosoles y gases) y epidermis (suelo, agua, aerosoles, gases y otros). Las rutas de exposición posibles de los metales pesados desde el suelo hacia los humanos se detallan en la Figura 4.

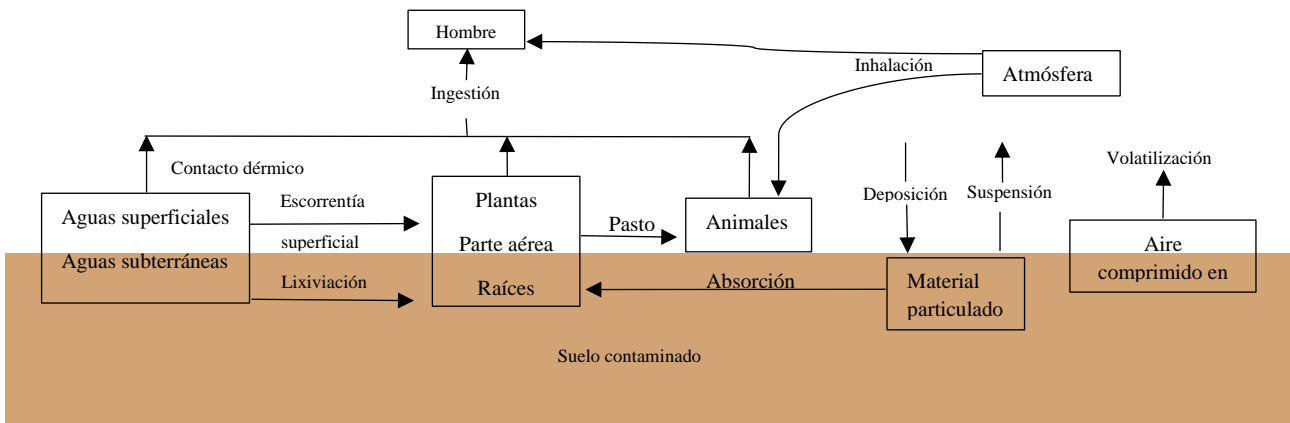


Figura. 4 Rutas y vías de transferencia de suelos contaminados. Fuente propia.

2.10. PROCESO PARA DECLARACION DE UN SUELO CONTAMINADO

Jurídicamente para que un recurso como el suelo sea calificado como contaminado, es necesario que la autoridad competente lo haya declarado por medio de una resolución expresa como contaminado.

2.10.1. España: Suelo declarado como contaminado

El **Real Decreto 9/2005** indica que el suelo se considera contaminado cuando las características se han modificado de manera negativa por la presencia de elementos químicos peligrosos, el cual signifique un potencial riesgo para la naturaleza y la salud humana.

2.10.2. Ecuador: Suelo declarado como contaminado

El **Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA)** proporciona normas y criterios de remediación de los suelos considerados contaminados en el ámbito ambiental de la matriz, en el texto se menciona también normas generales para la aplicación del suelo según sea su uso. El TULSMA impone como principal objetivo la preservación de la integridad de los individuos y la conservación de la calidad del recurso.

3. MARCO JURIDICO

3.1. CONCEPTO JURÍDICO DEL SUELO

La conservación y deterioro del suelo dependen, de las condiciones en las que se efectúan las actividades humanas, el uso inapropiado del recurso suelo ocasiona las alteraciones de sus características dando lugar a la degradación. En América Latina la degradación del suelo se expande de manera acelerada, entre los años 1982 y 2002 los recursos deteriorados fueron alrededor del 16,4% solo teniendo en cuenta al suelo en Paraguay, en Perú el deterioro de la matriz suelo fue de 15,3% , en Ecuador de 14,2% , Guatemala causa preocupación debido al porcentaje de suelo en deterioro presenta la mayor proporción de tierras degradadas alrededor del 58,9% de su territorio, en Honduras ha llegado a un 38,4% y en Costa Rica 29,5%, según (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.).

En América los países en vía de desarrollo la Legislación Ambiental en términos generales aún es deficiente, la legislación referente al suelo suele limitarse a determinadas actividades como deforestación y agricultura. Las políticas ambientales tienen su inicio en los años 1960s debido a la preocupación sobre el medio ambiente, la contaminación del suelo no ha tenido relevancia en comparación con la contaminación de otros recursos, el suelo un receptor sensible y vulnerable se lo debe atender eficientemente.

La Comunidad Europea identifica al suelo como un recurso ilimitado, en 1972 mediante la “Carta Europea de Suelos” se enuncia que los Gobiernos deben ser los encargados de proteger al recurso declarando medidas específicas de administración y planificación. Las políticas de suelo presentan diferencias entre países, es así como Ecuador en 1999 inició la Ley de Gestión Ambiental incluyendo al suelo como parte de esta legislación.

3.2. LEGISLACIÓN SOBRE PROTECCIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

En el año de 1912 se celebró en Brasil “La Cumbre de Río de Janeiro en 1992” en la que se pactó la protección del medio ambiente, en cuanto a la conservación y sostenibilidad de la diversidad biológica y los componentes que lo conforman. El suelo es considerado uno de los componentes del ambiente por las actividades que en él se realizan y las formas de vida que este proporcionan (Herrerros Guerra *et al.* 2008). Las políticas que conciernen a los suelos contaminados se han desarrollado hace algunos siglos en países como Estados Unidos, Canadá y Holanda, estas políticas son cambiantes en ciertos países. Por lo general el objetivo es la búsqueda de prevención o recuperación de los suelos contaminados.

En Europa la legislación de suelos depende de los sistemas políticos y legales, algunos países disponen de políticas integradas. España con la Ley 10/1998 de Residuos efectuada el 21 de abril inicia jurídicamente el tema de suelo contaminado. La declaración, delimitación y realización de inventarios de los posibles suelos contaminados le corresponde a cada Comunidad Autónoma. El apartado 3.4 detalla las políticas que rigen dentro del territorio español como sobre las Comunidad Autónoma.

El Ecuador desde 1999 ha alcanzado un avance en políticas de uso y protección ambiental, las políticas detallan que los suelos que presentan contaminación deberán tener un tratamiento de remediación de cualquier tipo aprobado por una Autoridad Competente según la norma vigente de suelos (TULSMA, Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente., 2017).

3.3. LEGISLACIÓN EUROPEA

Al agua y aire en los años 1970s se les prestaba mucha atención no así al recurso suelo, la Carta de Europa referente a suelos fue aprobada por el Consejo de Europa en Estrasburgo en 1972 y por la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, la Carta hace alusión jurídica al recurso suelo y su protección por primera vez, declarando que: “El suelo es limitado, siendo este un recurso vital”, esta es la razón por la que las autoridades deben prestar atención a la forma de dar un adecuado manejo racional garantizando un beneficio, capacidad de producción y una conservación a corto y largo plazo.

La conferencia de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en 1981 se estableció la Carta Mundial de los Suelos, la carta solicita un acuerdo entre gobiernos y organizaciones internacionales con la finalidad de conservar y rehabilitar al recurso. Señalando también la importancia de redactar políticas y leyes para aprovechamiento del recurso, una política mundial del suelo debe buscar el uso óptimo no solo del suelo sino también de la situación del clima y de la superficie en la que se encuentra dicho recurso.

3.3.1. Fases regulación del suelo

Hoy en día en la Unión Europea no hay normativa vigente que disponga directrices para un procedimiento de declaración de un suelo contaminado. La protección de los suelos por parte de la UE acuerda en tres fases:

- Con la prórroga de aprobación del Acta Única Europea 1986 inicia la primera fase. En la política agraria y en la primera política ambiental no se brindaba atención al suelo desde la posición comunitaria.
- Se inician normas ambientales propias, sobre competencias en la segunda fase, teniendo en cuenta facetas particulares de protección del suelo, tuvieron papel protagónico las política: agraria, investigación y ambiental.
- Elaborar estrategias para proteger al suelo es uno de los objetivos que se plantea con la aprobación en el año 2002 del sexto programa de acción ambiental. El 22 de septiembre del 2006 se concretó en la Comisión Europea una propuesta de Directiva para conseguir un marco de ordenación de la protección del suelo.

Protección del suelo propuesta por la Directiva Marco

- La protección de los suelos es una necesidad urgente propuesta directamente en el año 2001 por la Comunidad Europea. En materia del medio ambiente el programa VI indica el lema “Medio Ambiente 2010: nuestro futuro nuestra elección”, el objetivo principal del programa se centra en la conservación de los suelos de daños que se le puedan ocasionar como erosión y contaminación. Además, cuatro son los puntos de atención para tener en cuenta en la toma de decisión son: salud humana y medio ambiente, biodiversidad de especies y naturaleza, variación del clima, gestión de desechos y sostenibilidad de los recursos naturales. Entre los objetivos de las actuaciones de biodiversidad de especies y naturaleza como de medio ambiente y salud se determina el cuidado del recurso suelo de las actividades eruptivas y contaminantes (De la Varga Pastor, 2009).

- Con base en la Comunicación de la Comisión al Consejo, el Parlamento Europeo y el Comité económico y social de las regiones “Hacia una estrategia temática para la protección del suelo” abrió camino hacia la Directiva Marco.

La **DIRECTIVA 2004/35/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO** de 21 de abril de 2004 referente a responsabilidades ambientales en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales, la directiva dicta tres tipos de daños al medio ambiente: daño a los organismos y hábitats naturales protegidos, daño a los recursos aguas y suelo (Novelli, 2012). A más de mencionarse las mediadas a llevarse a cabo para reparación de daños al suelo en el II apartado de la Directiva no se incluye dentro de la normativa ningún apartado con referencia a la contaminación de suelos.

En las definiciones que se presentan en la Directiva se entiende por daño al suelo a “cualquier contaminación del suelo que suponga un riesgo significativo de que se produzcan efectos adversos para la salud humana debidos a la introducción directa o indirecta de sustancias, preparados, organismos o microorganismos en el suelo o el subsuelo” (DIRECTIVA 2004/35/CE , 2004).

Debido a la falta de una específica legislación sobre protección del suelo, los ciudadanos europeos y organizaciones se han interesado por la prevención, mitigación del deterioro del recurso en Europa, por ello se establece un marco común para proteger el suelo, la propuesta de **Estrategia Temática para la protección del suelo. Bruselas 22/9/2006** se asienta bajo principios de cautela, acción preventiva y corrección a los atentados al medio ambiente modificándose la **Directiva 2004/35/CE**. En países que no poseen una política de suelo establecida, un marco acorde y pretencioso por parte de la Comunidad Europea permitirá un conocimiento más amplio y una mejor gestión del suelo.

Proteger del suelo es la propuesta central de la Directiva; así como prevenir, mitigar o restaurar los impactos que generan los suelos con determinado grado de degradación. La Directiva busca también integrar políticas sectoriales que hagan frente al problema de suelos contaminados, granizando una actuación pertinente. Los estados miembros están en facultad de actuar en busca de las mejores medidas de actuación según su región y administración Este enfoque es crucial para asegurar que las peculiaridades regionales y locales, en lo que se refiere a variabilidad del suelo, uso del suelo, condiciones climatológicas y aspectos socioeconómicos locales, pueden tenerse en cuenta de la manera más adecuada (Comisión de las Comunidades Europeas, 2006).

La **DIRECTIVA 2008/98/CE** del parlamento europeo y del consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. Directiva conocida como Directiva Marco de Residuo, no incluye un artículo especial sobre contaminación de suelos (Vázquez García, 2011). En esta Directiva se incluyen medidas de protección del medio ambiente y salud humana, así también la Directiva en el Art. 2 apenas hace referencia al suelo cuando se mencionan las exclusiones del ámbito de aplicación en los incisos b y c del primer apartado. En el Art. 13 se indica que la gestión de residuos se efectúa sin perjudicar a los receptores o al medio ambiente, sin crear riesgo en el recurso suelo especificado en el inciso a.

También se mencionará algunos instrumentos de políticas de la Unión Europea en las cuales se trata de alguna forma al recurso suelo como son:

Plan de acción de la UE para la economía circular COM / 2015/0614, proporciona un marco general para tomar medidas sobre el desperdicio y un mejor uso de los recursos, es relevante para la protección del

suelo ya que contiene propuestas de legislación sobre residuos y directrices adicionales sobre cómo mejorar la gestión de residuos, lo que podría contribuir a reducir la contaminación del suelo.

La **Decisión nº 1386/2013 / UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de noviembre de 2013**, sobre un programa de acción medioambiental "Vivir bien, dentro de los límites de nuestro planeta" reconoce la necesidad de actuar sobre una serie de amenazas y funciones del suelo de la UE (directa e indirectamente) para 2020 a través de: la implementación de la legislación sectorial actual de la UE y el examen de una legislación vinculante marco de acción sobre el suelo.

Directrices sobre las mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo (SWD (2012) 101 final / 2), las Directrices son directamente relevantes para el suelo, ya que están destinadas a ser multifuncionales para limitación, mitigación o compensación del sellado del recurso. Al poner en marcha las medidas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo, los Estados miembros tienen cierto grado de flexibilidad en la aplicación de determinados tipos de medidas y nivel adecuado de gobernanza.

La **Directiva 2011/92 / UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de diciembre de 2011**, sobre la evaluación de los efectos de determinados proyectos públicos y privados en el medio ambiente y **Directiva 2014/52 / UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de abril de 2014**, por la que se modifica la Directiva 2011/92 / UE sobre la evaluación de los efectos de determinados proyectos públicos y privados en el medio ambiente, establece que antes de otorgarle consentimiento para el desarrollo a un proyecto que posiblemente tenga un impacto ambiental tendrá que realizarse un análisis del impacto ambiental, incluida la provisión de información sobre los probables impactos sobre el suelo y prácticas alternativas, impactos que pueden ser de gran amenaza: compactación, contaminación, erosión, inundaciones/ deslizamientos de tierra, biodiversidad perdida del suelo, pérdida de materia orgánica del suelo o sellado. También puede contribuir indirectamente a la protección de varias funciones del suelo (Frelih-Larsen *et al.* 2017).

3.4. LEGISLACIÓN ESPAÑOLA

España no contaba con un marco legislativo referente a las actividades contaminantes y recursos deteriorados. El **Real Decreto 9/2005, de 4 de enero**, fija nexo entre las actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. El Art. 27 de la **Ley 10/1998, de 21 de abril de residuo** es desarrollado por el Real Decreto encargado de regular tres aspectos: obligaciones de información a la administración, declaración y recuperación de suelos contaminados, y publicidad de suelos contaminados que debe hacer entrega el Registro de la Propiedad. El Art. 27 de Real Decreto es el encargado de examinar estos tres aspectos, con mayor énfasis el de recuperación de suelos contaminados y el de las obligaciones sobre las actividades potencialmente contaminantes del suelo.

La obligaciones de suministrar información es necesaria para las Administraciones Públicas, en un plazo menor a dos años se debe consignar a la Comunidad Autónoma las actividades que produzcan contaminación. En el Anexo II del Real Decreto se indica lo que debe contener el informe preliminar, el Art. 3.3 menciona que la Comunidad Autónoma afectada evaluara mediante información recabada el grado de contaminación del suelo siguiendo los criterios y estándares del Real Decreto y teniendo en consideración el Anexo VIII, este anexo también indica la valoración de riesgo que en cada caso se debe realizar.

Aparece también el Art. 3.4 indicando que se debe remitir al organismo competente informes de la situación periódicamente, mientras en el apartado 3.5 infiere que en suelos donde se haya presentado contaminación en el pasado obligatoriamente se debe presentar información de la situación cuando se requiera alguna licencia o autorización para cambio de uso de suelo. Para declarar a un suelo contaminado se toma como referencia el Anexo III, dependiendo de las sustancias contaminantes indicadas en los Anexos V y VI.

Según el Art. 4 del Real Decreto respecto a la base de información recibida, cada Comunidad Autónoma declarará si un suelo está contaminado debido a los “correspondientes usos” de acuerdo con el Anexo III. Las siguientes reglas para declaración de un suelo contaminado como parte de la valoración del suelo son:

- Art. 4.2 El órgano competente de la comunidad autónoma delimitará aquellos suelos en los que se considere prioritaria la protección del ecosistema del que forman parte. En cada uno de estos casos, dicho órgano competente determinará qué grupo o grupos de organismos deben ser objeto de protección (BOE, 2005).
- Art. 6.1 Los niveles genéricos de referencia que se utilizarán para la evaluación de la contaminación del suelo por determinadas sustancias vienen recogidos en el Anexo V y en el anexo VI (BOE, 2005).
- Art. 6.2 El órgano competente de cada comunidad autónoma determinará qué niveles genéricos de referencia se aplican en cada caso, teniendo en cuenta el uso actual y futuro de los suelos considerados contaminados (BOE, 2005).
- Art. 6.3 Del mismo modo, los responsables de las comunidades autónomas podrán decidir, justificadamente, sobre qué sustancias incluidas en los Anexos V y VI deben centrarse los trabajos de caracterización química de los suelos, tomando en consideración las actividades anteriores que hayan podido contaminar el suelo. Igualmente, podrán, de modo justificado extender el alcance de los trabajos de caracterización a otras sustancias no incluidas en estos Anexos.

Incluido en el Real Decreto se encuentra el Art. 2 el cual especifica ciertas definiciones de términos que se emplearan, algunas de estas definiciones son:

- Suelo: Conocido como la cobertura que gobierna la corteza terrestre, localizado en el lecho rocoso y la superficie, al recurso lo componen cientos de partículas de materia: mineral, orgánica, agua, aire y seres vivos. Interrelaciona a otros dos recursos como son el agua y aire, esto permite el desempeño de múltiples funciones para su respectivo uso y conservación natural. En esta definición no entran aquellos suelos que están cubiertos para agua de origen superficial (BOE, 2005).
- Acciones que desarrollan grados de contaminación en el suelo: Toda actividad se está de tipo: industrial o comercial que por su desempeño manipulando sustancias peligrosas y/o generación de residuos ocasionen contaminación al recurso. A efectos el Real Decreto, tendrá en consideración las actividades incluidas en los epígrafes de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas según el Real Decreto 1560/1992, de 18 de diciembre, por el que se aprueba la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE-93), modificado por el Real Decreto 330/2003, de 14 de marzo, mencionadas en el anexo I, o en alguno de los supuestos del Art. 3.2 (BOE, 2005).

3.5. LEGISLACIÓN DE LA COMUNIDAD DE VALENCIA

La Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de Residuos de la Comunidad Valenciana, incorpora por primera ocasión una definición de suelo contaminado como “... todo aquél cuyas características físicas, químicas o biológicas han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes de carácter peligroso de origen humano en concentración tal que comprenda un riesgo para la salud humana o el medio ambiente, de acuerdo con los criterios y estándares que se determinen reglamentariamente” (Calidad Ambiental, 2015).

El Art. 64 de los suelos contaminados es la base para la evaluación de riesgo, tema principal en el que se enfoca este Trabajo de Fin de Master (TFM). La regulación de suelos contaminados en la Comunidad Valenciana está determinada en el Título IV de la Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de Residuos, en la Ley se integran disposiciones específicas:

- Se evaluará los riesgos que presenten los suelos potencialmente contaminados por la Conselleria correspondiente en la Comunidad de Valencia, con los resultados se efectuará una lista de prioridades de actuación, declarando la contaminación del recurso suelo por contaminantes de alto riesgo. Así mismo, el suelo descontaminado por Decreto del Gobierno Valenciano solo será destinado a usos posteriores por medio de autorización de Conselleria.
- Por Decreto del Gobierno Valenciano se resuelve la declaración de suelo contaminado, la resolución definitiva cuenta con: operaciones de limpieza y recuperación, delimitación del suelo y usos presentes y futuros del suelo.
- El causante de la contaminación es el requerido para realizar limpieza y recuperación.
- En determinada fase de procedimiento existirá la posibilidad de acoger medidas provisionales.

Para la valoración del riesgo del proceso de gestión de un suelo contaminado se evalúa el grado de afección del suelo en base a los Niveles Genéricos de Referencia (NGR) de metales pesados, la Comunidad de Valencia no dispone de NGR establecidos en el Real Decreto 9/2005, los cuales se calculan en base a los niveles de fondo de metales pesados de cada territorio. En los anexos V y VI se encuentran listados de contaminantes y niveles genéricos de referencia para protección de la salud humana en función del uso del suelo y el listado de contaminantes y niveles genéricos de referencia para protección de los ecosistemas respectivamente. Cabe mencionar que los listados de contaminantes no están completos en el Real Decreto si se compara con los listados de contaminantes prioritarios incluidos por la EPA (EPA, 2014).

3.6. LEGISLACIÓN DE ECUADOR

El Ministerio del Medio Ambiente de 1996 es el ente oficial nacional ambiental y constituye un marco general de desarrollo y aprobación de las normas ambientales, dispuestos en la **Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo**, corroborado en la **Constitución Política de la República**.

En la **Constitución Política de la República del Ecuador de 1998** en el Capítulo 5 sección segunda reconoce “a las personas el derecho a vivir en un ambiente sano, ecológicamente equilibrado y libre de contaminación; declara de interés público la preservación del medio ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país; establece un sistema nacional de áreas naturales protegidas y de esta manera garantiza un desarrollo sustentable” (Ley de Gestión Ambiental, 1999).

La **Ley de Gestión Ambiental** de 1999 decreta las directrices políticas ambientales en el país en cuanto a la prevención, control y sanción de todas las actividades que constituyen la contaminación de los recursos naturales, establece principios y directrices de política ambiental señalando; los límites permisibles, controles y sanciones. En el Art. 5 de Ley de Gestión Ambiental establece al Sistema de Gestión Ambiental como un mecanismo de coordinación transectorial, de interacción y cooperación entre los distintos ámbitos, sistemas y subsistemas de manejo ambiental y de gestión de recursos naturales.

En el Art. 9 del Capítulo II de Autoridad Ambiental se dispone que le corresponde al Ministerio de Medio Ambiente coordinar con los organismos competentes, sistemas de control para la verificación del cumplimiento de las normas de calidad ambiental referentes al aire, agua, suelo, ruido, desechos y agentes contaminantes (Ley de Gestión Ambiental, 1999).

Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental es un instrumento legal reglamentario de la legislación vinculado al asunto ambiental, impacto ambientales, régimen forestal entre otros. El objetivo primordial de la Ley es el control y protección de la contaminación ambiental del suelo, aire y agua. En el capítulo III de la presente Ley se menciona la prevención y control de la contaminación de los suelos, desde el Art. 10 hasta el Art. 17 se conceden disposiciones de esta Ley.

El TULSMA (**Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente**) se aprobó por el Decreto Ejecutivo N° 3.399 del 28 de noviembre del 2002, con publicación en el Registro Oficial No. 725 de 16 de diciembre de 2002. Con la derogatoria de varias normas el TULSMA Decreto N° 3.516, el Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente se publicó con fecha 31 de marzo del 2003 con vigencia y aplicable en Ecuador, tipificando la legislación ambiental secundaria con el fin de que la ciudadanía tenga acceso a las normas allí expuestas. El texto posee la normativa ecuatoriana vigente en la Ley de Gestión Ambiental, además, con ella entra en vigor la Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental.

El Libro VI en el Capítulo VIII – Sección III del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente del 2003 manifiesta que “La Autoridad Ambiental Competente y las entidades del Sistema Nacional Descentralizado de Gestión Ambiental en el marco de sus competencias, realizarán el control de la calidad del suelo de conformidad con las normas técnicas expedidas para el efecto. Constituyen normas de calidad del suelo, características físico-químicas y biológicas que establecen la composición del suelo y lo hacen aceptable para garantizar el equilibrio ecológico, la salud humana y el bienestar de la población” (TULSMA, 2003).

El TULSMA se conforma por nueve libros, entre ellos el **Libro VI: Calidad ambiental** conformado de la siguiente manera:

Tabla 5. Libro VI: Calidad ambiental del Texto Unificado de Legislación Secundaria Ambiental.

TITULOS DEL LIBRO VI	ANEXOS DEL LIBRO VI
Título I Sistema Único de Manejo Ambiental SUMA	Anexo 1 Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua
Título II	Anexo 2

Políticas Nacionales: Residuos Sólidos	Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados
Título III Del Comité de Coordinación y Cooperación Interinstitucional para la Gestión de Residuos	Anexo 3 Norma de Emisiones al aire desde Fuentes Fijas de Combustión
Título IV Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental	Anexo 4 Norma de Calidad del Aire Ambiente
Título V Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación por Desechos Peligrosos	Anexo 5 Límites Permisibles de Niveles de Ruido Ambiente para Fuentes Fijas y Fuentes Móviles, y para Vibraciones
Título VI Reforma al Régimen Nacional para la Gestión de Productos Químicos Peligrosos	Anexo 6 Norma de Calidad Ambiental para el Manejo y Disposición Final de Desechos Sólidos No Peligrosos
Título VII Del Cambio Climático	Anexo 7 Listado Nacional de Productos Químicos Prohibidos, Peligrosos y de Uso Severamente Restringido que se utilicen en el Ecuador

En la Ley de Gestión Ambiental en los artículos del 19 al 24 del TULSMA se integra al Sistema Único de Manejo Ambiental (SUMA), el sistema consta de principios, de normativas, de mecanismos y procedimientos. Los mecanismos y procedimientos señalados en el SUMA son de: programas de control; gestión administrativa y ejecución de los daños al ambiente; diagnóstico de riesgos ambientales; planes de: manejo ambiental, de riesgos, de monitoreo por sistemas, de mitigación y contingencia y de abandono; desarrollo de auditorías ambientales. Los mecanismos para controlar, regularizar y dar seguimiento a los daños causados al ambiente tienen que aplicarse por una determinada Autoridad Ambiental Nacional y organismos acreditados (TULSMA, 2003).

El Libro VI del TULSMA está compuesto por el Anexo 2, mismo que trata sobre la: **Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados**, esta norma menciona: La ley de Gestión Ambiental junto a la Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental amparan la norma técnica ambiental sometiendo a las disposiciones de las dos leyes mencionadas, regulada obligatoriamente en todo el territorio nacional.

La Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados establece los criterios de remediación de suelos contaminados. La preservación o conservación de la calidad del suelo es el primordial objetivo de la presente norma, con el fin de salvaguardar la integridad de las personas de las interacciones que se producen en el medio ambiente, realizándose bajo la Norma Técnica Ambiental (LIBRO VI: DE LA CALIDAD AMBIENTAL, 2003). La norma presenta el siguiente contenido:

1. Uso de la norma para utilizarla de forma general

En la normativa se indica que a los suelos se los puede utilizar para diversas actividades entre ellas encontramos: actividades de agricultura; producción pecuaria; aprovechamiento forestal; actividades en zonas urbanas; actividad minera; actividades recreativas; actividades de conservación, industriales y comerciales. Los suelos contaminados deben tener acciones de recuperación, restauración o restablecer las condiciones iniciales del suelo.

2. Prevenir que los suelos se encuentren contaminados

El uso de prácticas adecuadas en los procedimientos productivos apoya a la prevención de que el suelo se encuentre en estado contaminado.

3. Deterioro de la calidad del recurso por actividades realizadas

Las personas de cualquier naturaleza legal adoptaran medidas que garanticen que el uso de la materia prima, los aportes de insumos, la comercialización y la oportuna gestión no ocasionan ningún peligro al ambiente ni a la salud, sean daños a las propiedades físicas, químicas o biológicas de los suelos.

3.1. El suelo como recurso natural potencialmente contaminado

- a. Las personas que ocasionen contaminación del suelo por determinado acto o descuido como consecuencia de: derrames, vertidos, fugas, almacenamiento o abandono de productos o desechos peligrosos, infecciosos o hidrocarbúricos, deberán proceder a la remediación de la zona afectada considerando para el efecto los criterios de remediación de suelos contaminados que se encuentran en la presente norma.
- b. El ente encargado del control del medio ambiente obligara al o los causantes de contaminación que procedan a la remediación inmediata de la superficie afectada con la respectiva monitorización de la acción impuesta, este proceso se efectuara hasta obtener los valores de referencia encontrados en la respectiva norma.
- c. Existen suelos que no se consideran contaminados, estos suelos pueden contar con: elevadas cantidades de sales solubles de sodio; elementos tóxicos para la flora, fauna, ecosistemas y sus respectivas interrelaciones, baja fertilidad química nativa, capa de agua alta o suspendida que anule o disminuya muy notoriamente el crecimiento radicular de las plantas, lo cuales requieren de riego constante o suplementario, de desmonte o desmalezado.
- d. Por escrito se debe notificar al ente ambiental dentro de 24 horas siguientes al día de un suceso de contaminación ya sea por: de derrames, infiltraciones, descargas o vertidos de residuos o productos peligrosos de forma accidental sobre el suelo, áreas protegidas o ecológicamente sensibles. La persona o entidad encargada del proyecto entregara un documento donde se especifique el acontecimiento, incluyendo apartados señalados a continuación:
 - Ubicación del domicilio y teléfonos del individuo que actúe como representante legal o gestor de residuos sean o no peligrosos.
 - Identificación y caracterización de la superficie contaminada con coordenadas en sistema WGS84.
 - Obtención de las acciones causantes de contaminación de la matriz suelo.
 - Especificación de características físico-químicas, biológicas, toxicológicas y cantidades residuales de compuestos peligrosos: vertidos, infiltrados o descargados al suelo.
 - Medidas de contención aplicadas.

- Considerar la probabilidad de generar daño en los ecosistemas y en la salud debido a la exposición de contaminantes en el suelo.
 - Adquirir acciones encaminadas a remediar y descontaminar las superficies afectada por contaminación.
 - Si el Ente Ambiental con competencia lo necesite se requerirá los siguientes documentos: diagnóstico y cuantificación de la situación del área afectada siguiendo las pautas impuestas en la norma ambiental aplicada.
- e. Las directrices citadas a continuación son adoptadas por el o los causantes responsables de la contaminación del suelo, para la elaboración del informe exigido:
- Delimitar la zona con incidencia directa
 - Especificar los focos contaminantes
 - Evaluar la contaminación dl recurso in situ
 - Métodos para la de toma de muestra de suelo
 - Estudio de las muestras obtenidas
 - Remediación del área donde se originó la contaminación
 - Plan de monitorización

4. Parámetro de calidad de suelo y su posible remediación

- a. Especificación de la situación inicial del suelo: En un análisis de impacto ambiental el estado inicial del suelo indicado por el solicitante es un parámetro para referenciación, con este parámetro se estima la existencia de contaminación del suelo haciendo alusión a los parámetros expuestos en la Tabla 6. Se infiere que la procedencia antropogénica da resultados mayores a los valores indicados en la Tabla 6, el ente ambiental con competencia obliga al responsable de la contaminación recurrir a la fase de remediación; sin afectar los procedimientos del área legal y administrativa. La Tabla 7. indica cuales son los valores para cumplir en la etapa de remediación de un suelo afectado, teniendo en cuenta la acción que se está realizando en la superficie.
- b. Criterios de la condición del suelo: La condición en que se encuentra el suelo debe cumplir con determinados criterios, los cuales permiten reconocer la presencia de un contaminante mediante los valores de fondo o también conocido como límites de análisis. Los niveles representativos de una sustancia que perjudican al suelo se denomina valores de fondo, la Tabla 6 muestra ciertos criterios para el suelo.
- c. Las personas de cualquier naturaleza jurídica de un determinado territorio que afecte al recurso suelo al emplearlo para realizar algún tipo de acción sobre él, queda obligado a presentar ante el ente encargado un documento de monitorización de las características y propiedades del suelo. En el documento se especificará los parámetros conforme a la Tabla 6 y según lo que el ente ambiental especifique. Un proyecto con grado de contaminación del suelo debe tener un plan de manejo ambiental en el que se especifique el plan de monitoreo y su periodicidad de ejecución conforme lo requiera en ente ambiental competente.
- d. Criterios para remediar suelos contaminados: El uso del suelo es la clave para fijar los criterios de remediación del suelo, esta fase tiene como finalidad el establecimiento de los niveles máximos en que se presenta la concentración de las sustancias contaminantes una vez se haya efectuado las

actividades de remediación. Las concentraciones de los criterios de calidad del suelo se muestran en la Tabla 7 (TULSMA, 2003).

Tabla 6. Factores indicativos de contaminación.

Factor de contaminación (Concentración presente/valor de fondo)	Grado de perturbación	Denominación
< 1.5	0	Cero o perturbación insignificante
1.5 - 3.0	1	Perturbación evidente
3.0 - 10.0	2	Perturbación severa
> 10.0	3	Perturbación muy severa

Tabla 7. Criterios de Calidad de Suelo.

Sustancia	Unidades (Concentración en Peso Seco)	Suelo
Parámetros Generales		
Conductividad	mmhos/cm	2
pH		6 a 8
Relación de Adsorción de Sodio (Índice SAR)		4*
Parámetros inorgánicos		
Arsénico (inorgánico)	mg/kg	5
Azufre (elemental)	mg/kg	250
Bario	mg/kg	200
Boro (soluble en agua caliente)	mg/kg	1
Cadmio	mg/kg	0.5
Cobalto	mg/kg	10
Cobre	mg/kg	30
Cromo total	mg/kg	20
Cromo VI	mg/kg	2.5
Cianuro (libre)	mg/kg	0.25
Estaño	mg/kg	5
Flúor (total)	mg/kg	200
Mercurio	mg/kg	0.1
Molibdeno	mg/kg	2
Níquel	mg/kg	20
Plomo	mg/kg	25
Selenio	mg/kg	1
Vanadio	mg/kg	25
Zinc	mg/kg	60
Parámetros Orgánicos		
Benceno	mg/kg	0.05
Clorobenceno	mg/kg	0.1
Etilbenceno	mg/kg	0.1
Estireno	mg/kg	0.1
Tolueno	mg/kg	0.1
Xileno	mg/kg	0.1

PCBs	mg/kg	0.1
Clorinados Alifáticos (cada tipo)	mg/kg	0.1
Clorobencenos (cada tipo)	mg/kg	0.05
Hexaclorobenceno	mg/kg	0.1
Hexaclorociclohexano	mg/kg	0.01
Fenólicos no clorinados (cada tipo)	mg/kg	0.1
Clorofenoles (cada tipo)	mg/kg	0.05
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) cada tipo	mg/kg	0.1

*: El valor numérico del Índice de Adsorción de Sodio (SAR) es la concentración requerida para que un suelo produzca todo tipo de cultivos.

5. Muestreo y análisis del suelo

El muestreo de la superficie que se intuye con cierto grado de contaminación se lo efectúa en dos fases, la primera fase consta de la toma de muestras superficiales, mientras que en la segunda fase se lo realiza en los perfiles del suelo.

6. De los Métodos Analíticos

Dependiendo de las características propias de cada caso de contaminación; el proceso para remediar el suelo requiere de tecnología para asegurar la recuperación y el constante mantenimiento al buscar la mejor solución para actuar frente a un suelo contaminado. Se ha concluido que las mejores tecnologías aplicadas son las que se realizan in situ, existen casos donde es necesario debido al grado de contaminación aplicar las tecnologías ex situ, esta tecnología se aplica con autorización del ente ambiental competente. Los métodos analíticos emplean: criterios destinados a remediar el suelo y valores máximos permisibles para conocer los límites de remediación de la superficie afectada según la normativa a aplicarse en un determinado proyecto (Ministerio del Ambiente , 2015).

7. Remediación de suelos

El sujeto responsable legalmente proporciona un documento de la situación del suelo catalogado como contaminado, en el cual mediante las muestras analizadas en el laboratorio se confirma que los valores de los parámetros del suelo no superan los límites máximos permisibles o los niveles genéricos de referencia según sea la legislación aplicada, notificándose al ente ambiental competente. Pero si los valores de los parámetros superan a los de referencia el sujeto queda obligado a cumplir con las obligaciones requeridas, esto puede deberse a que en la fase de remediación los valores del suelo superen a los límites máximos permisibles, debido a razones técnicas, ambientales o de otra índole apropiadamente justificadas. El ente ambiental tendrá la facultad de aprobar soluciones que permitan la reducción de la exposición de las sustancias contaminantes al medio ambiente y salud humana, para lo cual se pondrán en práctica ciertas medidas de: contención o confinamiento (Ministerio del Ambiente , 2015).

3.7. COMPARACIÓN DE LA NORMATIVA AMBIENTAL DE SUELOS CONTAMINADOS EN ESPAÑA Y ECUADOR

Al comparar las leyes ambientales que rigen en España y Ecuador referente a los recursos que sufren contaminación, se encontró que en 1996 ambos países crearon sus respectivos ministerios encargados del

medio ambiente señalado en la Tabla 8. Para mejor comprensión la Tabla 9 indica una breve síntesis de las leyes ambientales que han regido en los países mencionados.

Tabla 8. Ministerios encargados del medio ambiente en España y Ecuador.

País	Órgano rector ambiental	Año de creación	Sitio web
España	Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente	1996	http://www.mapama.gob.es/es/
Ecuador	Ministerio del Medio Ambiente	1996	http://www.ambiente.gob.ec/

Tabla 9. Resumen de la legislación ambiental de España y Ecuador.

País	Título	Objeto
España	Real Decreto 9/2005, de 14 de enero	Establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.
	Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados	Regular el régimen jurídico de los suelos contaminados incluyendo las actividades potencialmente contaminantes y los procesos para declarar un suelo como contaminado además de los sujetos responsables de descontaminarlos y recuperar dichos suelos.
Ecuador	Ley N° 37/1999, de Gestión Ambiental. RO 245, 30 de julio de 1999	Decretar directrices políticas ambientales en el país en cuanto a la prevención, control y sanción de todas las actividades que constituyen la contaminación de los recursos naturales, establece principios y directrices de política ambiental señalando; los límites permisibles, controles y sanciones.
	Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, 2004 (Decreto Supremo No. 374)	Controlar y proteger de la contaminación ambiental al suelo, aire y agua.
	Texto Unificado de Legislación Secundaria Ambiental (TULSMA). Decreto Ejecutivo N° 3.399 del 28 de noviembre del 2002	Facilitar a los ciudadanos el acceso a la normativa requerida. Constituye un texto reglamentario bastante amplio de la normativa ecuatoriana vigente en la Ley de Gestión Ambiental y con lo que queda en vigor de la Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental.

4. ANALISIS DE RIESGOS MEDIOAMBIENTALES

Los riesgos ambientales se han convertido en un componente cada vez más central de formulación de políticas con respecto a la salud, la seguridad y la calidad ambiental. Los métodos modernos y cuantitativos de evaluación de riesgos contemporáneos surgieron a mediados de la década de 1970 y se han aplicado a una amplia variedad de cuestiones reglamentarias, incluidos los residuos de plaguicidas; aditivos alimentarios; agentes farmacéuticos; contaminantes en el agua potable, suelo, aire, etc. (Borouh, 1998).

Pueden estar presente uno o más elementos que producen contaminación a una determinada área, cada elemento tiene sus propias características físico-químicas, lo cual produce un comportamiento de distintas formas en el medio ambiente. El concepto de análisis de riesgo es la determinación de la calidad y cantidad en que se presenta un riesgo por presencia de cualquier elemento contaminante que afecte al cuerpo humano y ecosistema. Al intuir que un suelo se encuentra contaminado se identifica: el grado de contaminación, el elemento contaminante y la distribución de este en la superficie afectada. El análisis de riesgo es un proceso metódico, el cual comprende el estudio de la relación de aspectos enunciados a continuación:

- Fuentes de Contaminante: Procedencia de elementos contaminantes que no se considera parte del suelo o con concentración superior a la aceptable por el recurso, capaz de causar daño para la salud y el ecosistema.
- Rutas y vías de exposición: Recorrido de un elemento con grado de contaminación tiene en la matriz suelo hasta crear contacto con algún receptor.
- Receptor: Organismo expuesto a contaminantes.



Figura. 5 Componentes del riesgo ambiental.

El análisis de riesgos sirve para:

- Evaluar e identificar las problemáticas del ambiente y cuerpo humano ocasionadas por el desempeño de acciones consideradas de peligro o la manipulación de sustancias tóxicas.
- Comparar tecnologías nuevas y tradicionales que se usan en la determinación de la efectividad de los diferentes controles y técnicas de mitigación diseñadas para reducir riesgos.
- Ubicación de infraestructuras con cierto grado de peligrosidad.
- Selección de prioridades entre las posibles alternativas de acción para establecer secuencias de ejecución de acciones correctivas y/o de elaboración de reglamentos ambientales.

El instrumento de estimación de la probabilidad y magnitud del efecto de las sustancias contaminantes al entrar en contacto con la matriz se lo denomina análisis de riesgo, además el análisis viabiliza la decisión a aplicar para el desarrollo de una adecuada gestión. La contaminación de la matriz suelo implica riesgo para el ambiente y la salud de la humanidad al entrar en contacto el contaminante con determinado receptor, lo cual supone efectos adversos; es por ello, la importancia de valorizar los daños que puede producir los contaminantes al recurso suelo.

En el año de 1992 la Royal Society definió “riesgo” como “la combinación de la probabilidad o frecuencia de ocurrencia de un peligro determinado con la magnitud de las consecuencias de ocurrencia de tal suceso”.

$$“Riesgo = Probabilidad \times Consecuencia”$$

Existen diferentes tipos de riesgo: los riesgos repercuten en los ecosistemas y en el cuerpo humano, además de ocasionar daño a las infraestructuras y a los bienes y recursos. Los riesgos para la salud humana mencionan afectos adversos que pueden presentar determinada población expuesta a suelos contaminados o a otros recursos naturales. En cuanto a los riesgos para los ecosistemas se considera todo efecto adverso, que genera alteración a los niveles de organización de los ecosistemas susceptibles a contaminación del suelo.

Los softwares aplicados para la evaluación los riesgos que ocasionan los contaminantes en cualquier recurso permiten valorar el recorrido mediante la aplicación de modelos de transporte.

4.1. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGO

Según (Herrerros Guerra et al., 2008) el procedimiento para el análisis de riesgo consiste en las etapas enunciadas seguidamente:

- Elaboración del modelo conceptual
- Análisis de toxicidad
- Análisis de exposición
- Caracterización del riesgo
- Análisis de incertidumbre
- Conclusiones

4.1.1. Realización del modelo conceptual

El modelo conceptual del sitio es una herramienta iterativa que se desarrolla y perfecciona conforme se obtiene información durante la revisión del historial del sitio, el objetivo es proporcionar una descripción de las características relevantes y las condiciones del suelo para entender el alcance de los contaminantes que se estudian y el riesgo que supone para los receptores (SRWMP, 2019). El modelo conceptual facilita información de contaminantes, vías y receptores; además, destaca áreas claves de incertidumbre.

La elaboración del modelo conceptual ayudará a identificar áreas dentro del sitio donde aún existe una incertidumbre significativa, usualmente consta de imágenes, diagramas, mapas, tablas y texto. Por lo regular incluye: planos de secciones transversales del sitio, diagramas de bloques u ocasionalmente modelos matemáticos. Se presenta en un formato tabular y/o gráfico identificando: los focos de contaminación, los

instrumentos de liberación de contaminantes, las rutas de traslado de los elementos, las vías de intervención y los receptores potencialmente expuestos (Büyüker, 2009).

Se puede presentar una intervención urgente en la etapa encargada de mitigar los riesgos en suelos contaminados debido al impacto que puede generar en receptores, es por ello por lo que en un modelo conceptual esta intervención debe ser adoptada urgentemente. Se deja en claro que antes de poner en práctica alguna medida correctora la situación del emplazamiento debe ser referida en el modelo conceptual. Conforme a los sistemas “contaminante-ruta y vías-receptor”, el modelo conceptual toma en consideración los siguientes puntos establecidos (Kaifer Brasero *et al.* 2006):

4.1.1.1. Caracterizar de fuentes contaminantes del suelo

La caracterización de las fuentes de riesgo proporciona la base para completar la investigación del sitio, se debe caracterizar la fuente y estimar la extensión de los contaminantes de interés. A medida que avanza la caracterización de la fuente, el modelo conceptual del sitio debe refinarse al empleo de parámetros de las muestras de suelo específicas del sitio, así como los datos históricos que se adquieran durante la investigación.

Con los datos resultantes del estudio y con la precisa caracterización se pueden fijar las propiedades básicas de las fuentes contaminantes. Los aspectos más relevantes de caracterización de fuentes de contaminación son los siguientes (Kaifer Brasero *et al.* 2006):

- Difusión del contaminante espacialmente: dimensiones transversales y perpendiculares de la afectación ocasionada al recurso.
- Recursos perjudicados: suelo, aguas subterráneas y superficiales, atmósfera, biota.
- Sustancias existentes en el recurso: precisar a los contaminantes, así como su concentración en el medio.
- Detectar peligros añadidos: incertidumbre de las propiedades del suelo, amenaza de incendio o explosión.
- Desarrollo eventual de los contaminantes: acciones presentes y anteriores, reformas, estudios investigativos o de rehabilitación.
- Grado de control en las superficies: cerrar el perímetro del área afectada, sistemas de: recolección de aguas y lixiviados, de identificación de fugas, de control y seguimiento, lucha contra incendios, etc.

Los organismos se exponen a los contaminantes de tres formas usualmente:

- Por inhalación (partículas o vapores de contaminantes)
- Por exposición dérmica (absorción de contaminantes por la piel)
- Por exposición oral (ingiriendo por boca llegando al tracto digestivo)

4.1.1.2. Identificar riesgo de contaminación

En esta etapa interviene el riesgo que produce un elemento contaminante a un receptor específico, se establece el peligro de acuerdo con los parámetros de epidemiología y toxicología de que se disponga. Las sustancias contaminantes en un emplazamiento presentan diversos efectos en el cuerpo humano y medio receptor. En el modelo conceptual es recomendable reconocer los contaminantes presentes en el área afectada.

Algunos de los contaminantes significativos según (Kaifer Brasero *et al.* 2006) son mencionados a continuación:

- Concentraciones de los contaminantes en cada medio afectado y distribución espacial, niveles de detección de los métodos analíticos utilizados y niveles de fondo en la zona.
- Periodicidad de localización.
- Datos tóxicos y ecotóxicos: efectos agudos, subcrónicos y crónicos; efectos cancerígenos, mutagénicos, teratogénicos, neurotóxicos, disrupción endocrina, etc.; dosis/concentraciones de referencia y factores pendiente; bioensayos de ecotoxicidad; concentraciones previstas sin efecto (PNEC) en cada medio.
- Potencial de bioacumulación y biomagnificación.
- Movilización en cada medio considerado, teniendo en cuenta las propiedades físico-químicas relevantes.
- Persistencia en cada medio considerado (tiempos de residencia).
- Potencial de inflamabilidad y explosividad.

4.1.1.3. Caracterizar medios de los contaminantes

La evaluación del medio físico donde se localiza el emplazamiento se integra en un modelo conceptual, valorando la movilización de los contaminantes desde la fuente contaminante hasta los receptores e influyendo en los procesos de transportación, traslado entre las vías y modificación de las sustancias peligrosas. Los medios para tener en cuenta son el suelo, las aguas superficiales y subterráneas, el aire y los ecosistemas.

Los puntos de análisis de caracterización de los medios en el emplazamiento de acuerdo con (Kaifer Brasero *et al.* 2006) son: climatología, geología, hidrogeología, hidrología, empleo de presente y posterior del recurso en la superficie y su escenario ambiental y/o en aguas superficiales y subterráneas, aprovechamiento de recursos variados, parámetros de suelo a analizar, relación potencial entre ecosistemas.

4.1.1.4. Reconocer rutas de exposición de contaminantes

Se entiende por “ruta de exposición de contaminante” como la vía por la que se transporta un elemento químico en los recursos disponibles, iniciando su recorrido en el foco de contaminación hasta alcanzar a un determinado receptor, siendo este un individuo o una población. Todos los caminos que sirven de exposición de contaminantes deben atenderse en un modelo conceptual, pues generan riesgo a receptores. Conocer las sustancias contaminantes que intervienen el procedimiento de movilizar a los contaminantes es esencial para el manifiesto de mecanismos de exposición directa e indirecta. Básicamente las vías que sirven para exponer sustancias contaminantes están formadas por: fuentes contaminantes, recursos que sirven para dar movilidad a los contaminantes, mecanismos de migración, puntos de exposición, vías de exposición.

4.1.1.5. Identificación de los receptores

En un modelo conceptual los receptores potenciales de contaminación pueden ser expuestos bien en las fuentes de contaminación como en su entorno, la identificación de los receptores describe características de los individuos, organismos o poblaciones expuestas a contaminación, los receptores humanos y ecológicos incluyen aquellos que se ven afectados o amenazados por los contaminantes de interés, ubicados dentro del área de investigación o presentes a lo largo de una ruta de migración identificada. El uso futuro

del sitio puede afectar el escenario de exposición; por lo tanto, el modelo conceptual debe identificar cuando sea posible el uso futuro del sitio y tomar en consideración las exposiciones futuras de todos los receptores. El análisis de riesgo para la salud humana y medio ambiente expone diferencias considerables, es por esto por lo que la identificación de los receptores condiciona los objetivos concretos de protección.

Los receptores humanos son sensibles a los elementos metálicos dependiendo de ciertos factores, como los enunciados más adelante:

- Grados de exposición por ciertas vías (propiedades biométricas del receptor).
- Costumbres que presenten los receptores con similares patrones característicos.
- La posición inicial de receptores de un grupo perjudicado por los elementos contaminantes.

Los receptores ambientales de contaminantes tienen criterios señalados a continuación:

- Posición que el receptor tiene en estructura y función del ecosistema (relevancia ecológica).
- El potencial de exposición de receptores a contaminantes.
- Los receptores susceptibles en ocasiones no son tolerantes a compuestos tóxicos (vulnerabilidad).
- Importancia económica y social.

4.1.1.6. Definición de escenario de análisis

Al realizar debidamente todas las fases antes mencionadas se está con la capacidad de efectuar la presente fase, misma que engloba una evaluación detallada de todas las fases de riesgos. En este punto se debe contemplar aquellas combinaciones “contaminante-ruta-receptor” que, desde un punto de vista realista pueden traducirse en efectos adversos significativos para los receptores. Los escenarios que se seleccionaron indican la situación en la que se encuentran los receptores al estar expuestos a los contaminantes de los recursos analizados. Parámetros como “receptor tipo, patrón de actividad y medios de contacto” sirven para darles definición a los escenarios a analizar. Se recomienda destinar los escenarios de análisis a un receptor tipo al cual se refiere.

4.1.2. Análisis de toxicidad

El grado de toxicidad que producen sustancias contaminantes en el recurso afectado indica el riesgo al que están expuestos los receptores y la cantidad y condiciones en las que el contaminante entra en contacto con un organismo en concreto. Recabar parámetros que indiquen la cualidad y cantidad acerca del impacto negativo que ocasionan las sustancias a las cuales los organismos están expuestos es la base para el análisis de toxicidad, esta fase brinda datos de cuantía y respuesta tóxica en el nivel de exposición de las sustancias (Peña *et al.* 2001).

La cuantía y magnitud del contaminante que produce toxicidad se define como “relación dosis/respuesta o dosis/efecto”, en el análisis toxicológico dicha relación es uno de los conceptos centrales de toxicología. La medición de la relación puede hacerse a diferentes niveles: molecular, celular, órgano, organismo, pero independientemente del nivel, el efecto debe ser medible. El periodo en que un contaminante está expuesto determina la cuantía y el y el efecto negativo para los receptores (Anaconda B & Rhim S, 2004). Existen dos tipos de receptores expuestos a contaminantes tóxicos: receptores humanos y receptores ecológicos. En organismos los efectos adversos producidos en presencia de contaminantes en dosis mayores o a cualquier dosis se pueden dividir en efectos con umbral (efectos no cancerígenos) y en aquellos sin umbral (efectos cancerígenos).

En el análisis toxicológico para receptores humanos se debe considerar lo siguiente: los elementos o sustancias de atención que producen impactos negativos para el cuerpo humano y las conexiones entre “magnitud de la exposición - efectos adversos - incertidumbre relacionadas a químicos”. El perfil toxicológico resume las consideraciones citadas anteriormente de los compuestos de preocupación, dando detalle de criterios tóxicos accesibles para cualquier componente químico que no cancerígenos, las dosis de referencia por ingestión, contacto dermal e inhalación, separadas de los cancerígenos utilizando el Factor de Pendiente de Cáncer (FPC).

- Para receptores humanos con efectos no cancerígenos: En Estados Unidos la Agencia de Protección Ambiental planteo la dosis de referencia como índice de toxicidad para estimar riesgos por presencia de sustancias no cancerígenas. Según las vías de entrada de la sustancia toxica, tiempo de exposición analizado y el efecto agudo presentado se pueden calcular más de un valor de dosis de referencia.
- Para receptores humanos con efectos cancerígenos: La repercusión cancerígena emplea indicadores tóxicos entre los que destacamos el peso (o fuerza) de la evidencia (“weight of evidence”) y el factor de pendiente. El peso de la evidencia se refiere al estudio y análisis de la información recopilada de estudios científicos basados en humanos (estudios epidemiológicos, ensayos con animales, pruebas in vitro) para determinar si existe suficiente evidencia como para considerar que una sustancia es cancerígena para humanos.
- El factor pendiente indica el cambio de riesgo para contraer cáncer en relación con el cambio de la dosis, la determinación del factor es mediante extrapolación de la curva “dosis-respuesta”, el factor varía de acuerdo con la vía de exposición.

Existen varios parámetros ecotoxicológicos para receptores ecológicos como: NOAEL, LOAEL, LC50, LD50, etc. para el análisis de toxicidad. Entre los organismos que se ven afectados por las sustancias toxicas están los organismos terrestres y acuáticos, el proceso de análisis se realiza por medio de las siguientes etapas:

- Descripción toxica de los elementos o sustancias: Adquirir información de propiedades toxicológicas para cada receptor y vía de exposición.
- Cálculo de las concentraciones sin efecto (PNEC): Determinación del límite máximo de concentración de la sustancia perjudicial para que no se produzcan efectos negativos en los medios.

El tiempo de exhibición de un contaminante se distingue entre (ATSDR 200916):

- Crónico: Relación que una sustancia presenta con el receptor en un tiempo mayor a un año.
- Agudo: Vínculo entre la sustancia y el medio de contacto aproximadamente se presenta una vez o hasta catorce días.
- Subagudo: Intervención de un químico a lo largo de un mes o menos.

Se indican ciertos aspectos a documentar en un análisis de toxicidad debido a los efectos que pueden presentar los compuestos tóxicos en el cuerpo humano y medioambiente:

- Vías de exposición
- Órganos afectados
- Biodisponibilidad y capacidad de bioacumulación
- Potencial mutagénico, neurotóxico, teratogénico, de disrupción endocrina
- Efectos interactivos entre sustancias (sinergias y antagonismos)

En indicar para cada contaminante el origen de información de los datos toxicológicos usados, los datos de fiabilidad.

4.1.3. Análisis de la exposición

Una sustancia contaminante supone una amenaza para los individuos expuestos y ecosistemas según su toxicidad y al grado de exposición que los organismos presentan a dicho contaminante, si no existe exposición a una determinada sustancia, no existirá riesgo. El proceso por el cual un receptor tiene contacto con uno o varios contaminantes se denomina exposición (Ize Lema, Zuk, & Rojas-Bracho, 2010).

El análisis de exposición detalla la intensidad, frecuencia y duración del contacto de un contaminante presente en el organismo a través de ruta de exposición (EPA, 1992), describe el medio ambiente, el comportamiento de los agentes en el medio ambiente, las características y actividades de los receptores humanos y los procesos que conducen al contacto y absorción de agentes por parte de los seres humanos. La exposición de un receptor a contaminantes puede ser analizado según su concentración, bien sea en el medio de contacto o ingesta/dosis del contaminante referido. La referencia toxicológica es notable al elegir los parámetros de análisis, es importante tenerla en consideración sea esta expresada en concentración o dosis.

4.1.3.1. Concentración en superficie contaminada

La determinación de la concentración de una sustancia en ciertos medios de contacto y puntos de exposición se lleva a cabo por: cuantificación directa en el medio y punto de exposición o estimación a partir de modelos. La evolución del contaminante con el tiempo no presenta información con una medición directa, pero tal medición es significativa al instante de realizarla con un grado de incertidumbre bajo. La simulación de los contaminantes en los medios desde la fuente es un punto importante al escoger el modelo matemático, el cual reproduzca de forma eficaz como migran los contaminantes (Kaifer Brasero *et al.* 2006).

4.1.3.2. Determinación de la medida de la exposición

El escenario de análisis de la cuantía de exposición para los receptores se puede configurar como la concentración del contaminante o ingesta/dosis de este. Los criterios con los que se puede implementar las concentraciones de exposición son:

- Empleo de concentración media permitiendo la obtención de un valor de riesgo estimado para una intervención crónica.
- Derivación de concentración representativa de la exposición mediante concentraciones existentes de la actual situación para contaminantes persistentes.
- Para conseguir el rango de riesgo potencial se emplea concentraciones máximas y medias

El contacto de un receptor con un contaminante por vías de exposición, por unidad del tiempo y peso del receptor es propuesto en términos de ingesta /dosis, para análisis de exposición se precisan características biométricas del receptor y de sus hábitos o patrones de actividades (Kaifer Brasero *et al.* 2006).

4.1.3.3. Métodos de exposición

El análisis de exposición se puede efectuarse por métodos de medición directos e indirectos:

Métodos directos: Miden exposición de contaminante tóxico al receptor, aplicando monitores personales o biomarcadores.

Métodos indirectos: Combinación de información de concentración del contaminante en matrices de los recursos, con información sobre patrones de actividades de organismos de interés teniendo en cuenta las rutas de exposición. La combinación de los datos obtenidos permite la estimación de exposición haciendo uso de modelos matemáticos y estadísticos.

4.1.4. Caracterización del riesgo

Los factores de las fases anteriores son integradas al caracterización del riesgo, integra información de los componentes anteriores de la evaluación del riesgo y sintetiza una conclusión general sobre el riesgo que es completa, informativa y útil para los tomadores de decisiones. En esencia, una caracterización de riesgos transmite el juicio del evaluador de riesgos en cuanto a la naturaleza y existencia o falta de riesgos ecológicos o para la salud humana (Fowle III & Dearfield, 2000c).

En esta fase se cumple la cuantificación y evaluación de niveles de riesgo, a los cuales los receptores están expuestos, así como la integración de fases anteriores. El objetivo de este parte del análisis es el cálculo de los índices de riesgo, para contrastarlos con los criterios de evaluación dispuestos. La naturaleza y el alcance de los riesgos frente a contaminantes son obtenidos a través de la caracterización del riesgo.

Las caracterizaciones llevan adelante los hallazgos clave, suposiciones, fortalezas y limitaciones, etc. para cada sección y proporcionan un conjunto fundamental de información utilizada en un análisis integrador que debe incluirse en la caracterización global del riesgo final. Una buena caracterización del riesgo reafirma el alcance de la evaluación, expresar los resultados con claridad, articular los principales supuestos e incertidumbres, identificar interpretaciones alternativas razonables y separa las conclusiones científicas de los juicios políticos. La política de caracterización de riesgos exige que la explicación de las elecciones tomadas sea altamente visible (Fowle III & Dearfield, 2000c).

4.1.5. Análisis de incertidumbre

Se define a la incertidumbre como “una falta de conocimiento preciso en cuanto a lo que es verdadero, sea cuantitativo o cualitativo”, o como “la ausencia de información, información que puede obtenerse o no” (Ize Lema, Zuk, & Rojas-Bracho, 2010). El proceso donde se identifican las fuentes de incertidumbre se denomina análisis de incertidumbre; es decir, los resultados obtenidos en la elaboración de un análisis de riesgo están propensos a cierto grado de incertidumbre. Existen diversas fuentes que propician incertidumbre como: sistema, modelos matemáticos aplicados, parámetros del modelo, variabilidad natural de las variables medidas, errores de medición y sesgos en el muestreo y seguimiento (Avila , 2015).

En un análisis de riesgo el proceso de análisis de incertidumbre se efectúa antes de emitir las respectivas conclusiones, se recomienda valorar cuantitativamente las incertidumbres y efectuar una síntesis de resultados en tablas o cuadros donde se plasmen las variables de análisis, con el propósito de identificar aquellos factores que aportan valores altos de incertidumbre. Las principales fuentes de incertidumbre son:

- Del modelo conceptual
- Asociadas a la caracterización del emplazamiento
- De efectos de los contaminantes
- Relativas al análisis de la exposición

4.1.6. Conclusiones

El proceso de análisis de riesgo da como resultado las conclusiones referente a la magnitud, incertidumbre y naturaleza de los riesgos en el emplazamiento para la posterior toma de decisión sobre gestión de riesgo. Se evidencia con claridad valores de riesgos, mismos que superan los límites establecidos por las leyes que rigen en el sitio afectado.

Los resultados conseguidos en cada fase del análisis de riesgo reflejan (Kaifer Brasero *et al.* 2006):

- En cada fase del análisis la identificación y valorización de los elementos críticos.
- El criterio de aceptación de los niveles de riesgo proporcionados en la evaluación del impacto.
- La determinación de sustancias cuyos riesgos al contacto con un medio son inaceptables.
- La veracidad de los parámetros accesibles y la consideración de obtener datos adicionales para reducir el grado de incertidumbre.

5. MECANISMOS DE RECUPERACION DE SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS

La recuperación de suelos contaminados es uno de los temas más tratados en los últimos años, actualmente se dispone de una gama de tecnologías de recuperación, algunas de aplicación habitual y otras aún en fase experimental. Las tecnologías son diseñadas para aislar o destruir sustancias contaminantes alterando su estructura química por medio de procesos: químicos, térmicos o biológicos. La aplicación de las técnicas depende de (Ortiz Bernad *et al.* 2007): las características del suelo y contaminante, la eficacia esperada en cada tratamiento, la viabilidad económica y tiempo estimado para el desarrollo.

Los tratamientos que aplican las técnicas de recuperación se pueden ejecutar *in situ* (actuación sobre contaminantes en el lugar donde se localizan) o *ex situ* (excavación previa del suelo para posterior tratamiento, sea en el mismo lugar o en instalaciones externas) (Ortiz Bernad *et al.* 2007). En función de los objetivos las técnicas se clasifican en (Kaifer Brasero *et al.* 2006):

- Técnicas de contención: Se aísla en el interior del suelo el contaminante sin ninguna actuación sobre él, aplicando barreras físicas en el suelo.
- Técnicas de confinamiento: Reducen la movilidad de los contaminantes en el suelo para evitar su migración, actuando directamente sobre las condiciones físico-químicas bajo las que se encuentran los contaminantes.
- Técnicas de descontaminación: Disminuyen la concentración de contaminantes en el suelo.

En la Tabla 10 se enuncian los tipos de tratamientos de recuperación de suelo y su respectiva aplicación:

Tabla 10. Principales técnicas de recuperación de suelo. Fuente: (Ortiz Bernad *et al.* 2007).

Tipo de Tratamiento	Tratamiento	Aplicación	
Descontaminación	Físico – Químico	Extracción	In situ
		Lavado	Ex situ
		Flushing	In situ
		Electrocinética	In situ
		Adición de enmiendas	In situ
		Barreras permeables activas	In situ
		Inyección de aire comprimido	In situ
		Pozos de recirculación	In situ
		Oxidación ultravioleta	Ex situ
		Biológico	Biológico
Biotransformación de metales	In situ		
Fitorrecuperación	In situ		
Bioventing	In situ		
Landfarming	Ex situ		
Biopilas	Ex situ		
Compostaje	Ex situ		
Lodos biológicos	Ex situ		
Térmico	Térmico	Incineración	Ex situ
		Desorción térmica	Ex situ
Mixto	Mixto	Extracción multifase	In situ

	Atenuación natural	In situ
Contención	Barreras verticales	In situ
	Barreras horizontales	In situ
	Barreras de suelo seco	In situ
	Sellado profundo	In situ
	Barreras hidráulicas	In situ
Confinamiento	Estabilización físico-química	Ex situ
	Inyección de solidificantes	In situ
	Vitrificación	Ex situ - In situ

5.1. TÉCNICAS DE DESCONTAMINACIÓN

5.1.1. Tratamiento físico-químico

Extracción: Separan los contaminantes del suelo para tratamiento depurador posterior, los requerimientos de esta técnica son: suelos permeables y sustancias contaminantes con movilidad suficiente. Se puede realizar extracción de aire, agua, de fase libre, fases densas, disolventes y ácidos.

Lavado: El suelo excavado se separa por: tamizado físico, densidad o gravedad para eliminar las partículas de grava más gruesas, con poca capacidad de adsorción, de la fracción fina y seguidamente lavado con extractantes químicos que permitan desorber y solubilizar los contaminantes. Luego del tratamiento químico el suelo se lava con agua para eliminación de contaminantes y agentes extractantes residuales, posteriormente se devuelve al lugar de origen (Ortiz Bernad *et al.* 2007).

Flushing: Se anega los suelos contaminados con determinada solución de transporte de contaminante a zonas localizadas donde permita su eliminación. Son extraídos del suelo los contaminantes por agua u otras soluciones acuosas, por sistemas de inyección o infiltración. Esta técnica se aplica a cualquier tipo de contaminante, se suele combinar con la biodegradación y el pump&treat.

Electrocinética: Se aplica en el suelo contaminado corriente eléctrica de baja intensidad. Los contaminantes pueden ser transportados por: electromigración, electroósmosis, electrolisis y electroforesis. En suelos de baja permeabilidad hidráulica esta técnica es eficaz.

5.1.2. Tratamientos biológicos

Biorrecuperación: Degradan contaminantes orgánicos o disminuyen la toxicidad de otros contaminantes inorgánicos. Esta técnica emplea bacterias, hongos y plantas para detoxificar las sustancias de riesgo para el hombre y el medio ambiente. El interés que se ha supuesto para esta técnica es creciente debido a que prometen tecnologías más sencillas, más baratas y respetuosas con el medio ambiente que otros tratamientos en los que los contaminantes son simplemente extraídos y transportados a otros lugares (Ortiz Bernad *et al.* 2007).

Fitorrecuperación: Técnica emergente que emplea capacidad de ciertas especies vegetales para extraer, acumular, inmovilizar o transformar los contaminantes del suelo. La selección de especies vegetales es el punto de partida del éxito de esta técnica para recuperar un suelo contaminado. La fitorremediación se considera un tratamiento natural, limpio y económico; procedimiento que no perturba el suelo en gran

medida, aunque es un proceso lento, limitado a suelo poco profundo. Se diferencian cinco procesos básicos de contención o eliminación de contaminantes: fitoestabilización, fitoextracción, fitodegradación, fitovolatilización y rizofiltración.

Lodos biológicos: Tratamiento de biodegradación, el suelo contaminado es excavado y tamizado. También, pueden actuar mecanismos de adsorción/desorción, disolución/precipitación, intercambio iónico, complejación, transferencia de oxígeno, volatilización y reducción del tamaño de las partículas (Ortiz Bernad *et al.* 2007).

5.1.3. *Tratamientos térmicos*

Incineración: Con temperaturas elevadas se destruyen los contaminantes del suelo, ocasionando oxidación y volatilización de los compuestos orgánicos contaminantes. Es indicado para la recuperación de recursos con alto grado de contaminación por presencia de explosivos o desechos peligrosos como son los hidrocarburos clorados, PCBs y dioxinas. Esta técnica destruye la estructura del suelo, lo cual limita su utilización posterior.

Desorción térmica: Las temperaturas que se emplean en los suelos contaminados permiten la volatilización de contaminantes orgánicos, pero no la oxidación de dichos contaminantes.

5.2. TÉCNICAS DE CONTENCIÓN

Barreras verticales: El objetivo de la técnica es reducir movimientos laterales de los contaminantes, sea por medio de lixiviados o por disolución en aguas subterráneas. La técnica integra instalación de muros pantalla, mismos que necesita excavación de zanjas de hasta 100m en el suelo para luego rellenarlo de material aislante como, por ejemplo: mezclas de cemento y bentonita u hormigón; inyección vertical a presión de lechada de cemento o cemento-bentonita, usualmente hasta 50 m de profundidad; tablestacado metálico, se coloca no más allá de 30 m de profundidad. Se emplea geomembranas de polietileno de alta densidad para mejorar las propiedades de esta técnica.

Bloques horizontales: Técnica con aplicación en desarrollo, son zanjas o sondeos horizontales rellenos de material sellante, aún no se demuestra si esta técnica es efectiva. Puede ser de utilidad al no necesitar excavación del terreno para restringir el movimiento vertical de contaminantes metálicos.

Barreras de suelo seco: Contiene la contaminación en ambientes subsuperficiales donde otras técnicas no son viables económicamente. Imposibilita la migración de contaminantes hacia los reservorios de aguas subterráneas, basándose en la desecación del suelo para aumentar su capacidad de retención de sustancias contaminantes líquidas.

Sellado superficial: Evita la exposición directa del suelo a la contaminación, limita la infiltración de aguas lluvias en el suelo contaminado y controla la volatilización de algunos contaminantes a la atmosfera. Permite el sellado con materiales naturales que reducen la permeabilidad.

Sellado profundo: Disminuye la permeabilidad y controla el avance de la contaminación en profundidad alterando la estructura del suelo contaminado. No es recomendable llegar al nivel freático en esta técnica al realizar la inyección de materiales plastificantes por perforaciones verticales, empleada en suelos con alta permeabilidad y textura gruesa.

Barreras hidráulicas: Extrae aguas subterráneas junto a las zonas contaminadas o aguas arriba para evitar la contaminación y la migración de la contaminación aguas abajo (Kaifer Brasero *et al.* 2006).

5.3. TÉCNICAS DE CONFINAMIENTO

Estabilización físico-química: Disminuye la movilidad de contaminantes por reacciones químicas que reducen su solubilidad en el suelo y su lixiviado. Técnica que trata compuestos inorgánicos, limita su eficacia para sustancias orgánicas y pesticidas.

Inyección de solidificantes: Agentes estabilizantes inorgánicos son inyectados en suelos contaminados por pozos similares a los utilizados en el sellado profundo, limita la eficacia para compuestos orgánicos semivolátiles o pesticidas.

Vitrificación: Técnica de estabilización establecida en el calentamiento de un material vítreo estable, indicada para tratar contaminaciones poco profundas y a gran escala. Se han conseguido resultados excelentes para confinar tanto contaminantes orgánicos como inorgánicos (Ortiz Bernad *et al.* 2007).

6. MODELIZACIÓN

6.1. MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO

En la actualidad con la rápida industrialización y el desarrollo económico del mundo, se continúan introduciendo elementos metálicos en los suelos y sedimentos por varias vías, incluida la fertilización, el riego, los ríos, la escorrentía y la deposición atmosférica. Los suelos suelen considerarse el sumidero definitivo de los metales pesados vertidos al medio ambiente, ocasionando un problema ambiental grave y de inmediata actuación para su conservación.

Es de gran importancia seleccionar métodos adecuados para evaluar la calidad del suelo y los procesos de rehabilitación de sitios contaminados, para ello se requieren herramientas y prácticas de gestión inteligentes, rentables y sostenibles que eviten un mayor aumento de los impactos ambientales y los costos socioeconómicos. Además, debido al reconocimiento de nuevos sitios contaminados y/o nuevos tipos de contaminantes, existe una gran demanda de proponer procesos de toma de decisiones rentables e implementar enfoques de gestión sostenible de la tierra (Steza *et al.* 2013).

Una variedad de herramientas de gestión como respaldo al tomar decisiones para la evaluación de sitios contaminados se han desarrollado y se utilizan actualmente en todo el mundo, con el fin de tener un análisis más estructurado y definir posibles opciones de intervención en cuanto a la clasificación de sitios potencialmente contaminados, caracterización de sitios, valoración de riesgos, selección y comparación de mecanismos para remediar el suelo, comparación y evaluación de escenarios de remediación. Algunas de estas herramientas son citadas a continuación:

- SADA: Análisis espacial y asistencia en la toma de decisiones.
- RBCA: Acción correctiva basada en riesgos.
- DESYRE: Sistema para apoyar las decisiones tomadas en la recalificación de sitios contaminados.
- RAAS: Sistema de evaluación de acciones correctivas.
- REC: Reducción de riesgos, Mérito ambiental, Costos.
- WELCOME IMS: Estrategia de Gestión Integrada.
- SYRIADE: Sistema de apoyo a la decisión espacial para la Evaluación Regional de Riesgos de Tierras Degradadas.
- SMARTe: Enfoques de gestión sostenible y herramientas de revitalización.
- DARTS: Ayuda para la toma de decisiones para la selección de tecnologías de remediación.
- EVS-PRO: Sistema de visualización ambiental.
- ROAM: Modelo de evaluación de opciones de recuperación.

ERA-MANIA, NORISC, SitePro, ArcView GIS, Sampling FX, Groundwater FX, API-DSS, BIOPLUME III, BIOSCREEN, DQO-PRO, ELIPGRID-PC, MNAtoolbox, y otros. Una gran mayoría de los programas son modelos comerciales lo cual significa que requieren licencia pagada para su utilización, pero existen software de dominio gratuito como es el caso de SADA.

6.2. SADA

El Instituto de Modelado Ambiental de la Universidad de Tennessee con fondos de la Comisión Reguladora Nuclear de EE. UU., Agencia de Protección Ambiental y el Departamento de Energía desarrolló SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance), SADA es un software gratuito desde 1998, dirigido a personas

que realizan evaluaciones ambientales en apoyo para la toma de decisiones, el objetivo original era: “herramientas que integraran la evaluación de la salud humana y de riesgos ecológicos con procesos geospaciales de una manera que podría afectar directamente las decisiones de restauración ambiental” (Stewart, Welsh, & Purucker, 2009), según la documentación de SADA, se puede descargar una copia gratuita del software desde <http://www.tiem.utk.edu/~sada/>.

Este software incorpora herramientas que incluyen módulos integrados para: visualización, análisis geoespacial, análisis estadístico, evaluación de riesgos para la salud humana, evaluación de riesgos ecológicos, análisis de costo/beneficio, diseño de muestreo y análisis de decisiones; en un entorno dinámico e interactivo, cada uno de estos módulos se puede utilizar de forma independiente o integrada para abordar las inquietudes específicas del sitio en el diseño de caracterización y acción correctiva. Además, se basa principalmente en algoritmos de estadísticas y geoestadísticas con el fin de cuantificar la naturaleza y el alcance de las incertidumbres en los datos ambientales y varios métodos de costo-riesgo, para proporcionar una orientación objetiva sobre necesidades claves de análisis de decisiones (Stewart, 2016).

Para la creación del software se tuvo cuatro aspectos en consideración:

- Encontrar con facilidad un objetivo de estudio.
- Mostrar solo conjuntos de herramientas relevantes y no saturar el entorno de trabajo.
- Proporcionar una guía abierta y flexible a través de cualquier paso intermedio que pueda ser necesario.
- Parecer coherente en todos los objetivos.

Con los aspectos mencionados se creó una interfaz altamente escalable que encapsuló los objetivos existentes y permitió la adición de numerosos objetivos sin aumentar la complejidad del software para todos los usuarios.

El conjunto de herramientas básicas de SADA se presenta dentro del lenguaje de caracterización ambiental, SADA proporciona herramientas para muchas áreas importantes de evaluación, la Figura 6 muestra una forma típica en la que estas herramientas pueden organizarse para facilitar las decisiones que se requieran desde las primeras fases de la investigación. Este tipo de diseño dirige el muestreo tanto inicialmente como a medida que se dispone de información.

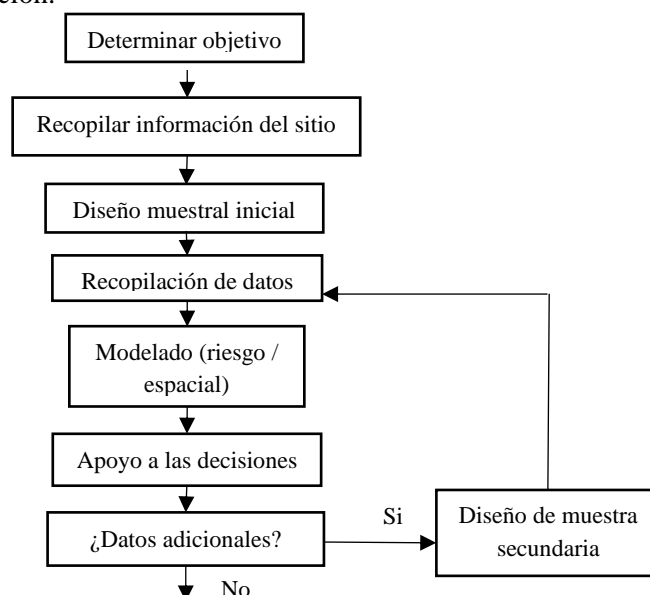


Figura. 6 Ejemplo de ruta de flujo a través de SADA.

SADA proporciona una serie de métodos para la exploración de datos espaciales en dos o tres dimensiones, la información bidimensional se presenta como diagramas xy simples o como mapeos en SIG, en tanto, la información tridimensional se presenta de dos formas: por cortes 2-D (capas) o por volumen 3-D. El modelo SADA configura el área de estudio por límites horizontales y verticales mediante un conjunto de herramientas, para modelado y visualización al subsuelo se lo divide en capas. Una de las ventajas de SADA es que permite importar capas GIS de paquetes de software externos como es el caso de ARCGIS y mostrarlas para proporcionar contexto adicional para el sitio.

6.2.1. *Diseño de muestras, exploración y visualización de datos*

La interfaz dispone de dos categorías principales de diseños de muestras iniciales como son: aleatorios y cuadrículados, también se puede agregar manualmente nuevas muestras de diseño. En el área de interés los diseños aleatorio dispersan al azar las ubicaciones de las muestras, mientras que en los diseños cuadrículados las ubicaciones de las muestras pueden ser uniforme. Existen diseños específicos que demandan previa información del sitio, estos diseños muestrean áreas donde el riesgo de valores elevados es alto. SADA consiente la visualización de 2-D y 3-D de los resultados una vez recolectadas e importadas las muestras. El software facilita un conjunto significativo de estadísticas resumidas para ayudar a los usuarios a cuantificar lo que está ocurriendo en el sitio de estudio.

6.2.2. *Análisis geoespacial*

En SADA la interpolación permite predecir valores de concentración en áreas sin muestrear, en la interfaz se proporcionan cinco métodos de interpolación: vecino más cercano, vecino natural, distancia inversa, kriging ordinario y kriging indicador. La relación espacial entre datos de muestreo es asumida por los métodos de interpolación, los cuales son responsables de un análisis geoespacial completo. Antes de modelar los datos en SADA se reconocen y se abordan las tendencias espaciales y temporales, los métodos de interpolación como el vecino más cercano, el vecino natural y la distancia inversa se conocen como métodos deterministas, los mismos que suponen una distancia simple o un posicionamiento relativo de los datos cercanos con el fin de estimar el valor de una ubicación sin muestrear, esto da como resultado una única estimación para cada ubicación.

Los gráficos de semivariogramas, mapas de variogramas, modelos de correlación y función de ajuste automático son proporcionados por herramientas incluidas en SADA para medir y modelar. La geostatística concede el modelado de incertidumbre sobre la concentración, estas distribuciones permiten el cálculo de probabilidad en cada punto de la muestra, trazando los valores de probabilidad se puede generar mapas de probabilidad. Los mapas forman un marco para discutir la incertidumbre en el resultado de la decisión y cómo eso podría afectar el diseño, el volumen y el costo de la remediación. El valor del umbral de decisión puede provenir de fuentes externas o de los modelos internos de evaluación de riesgos.

6.2.3. *Capacidades de evaluación de SADA*

Riesgo para la salud humana

SADA proporciona al usuario un módulo completo de evaluación de riesgos para el cuerpo humano y bases de datos asociadas. Los modelos de riesgo siguen la Guía de evaluación de riesgos de la EPA para Superfund (EPA 1989) y se pueden personalizar para adaptarse a las condiciones de exposición específicas del sitio. Las bases de datos toxicológicas actualizadas y los parámetros de escenarios predeterminados se pueden descargar de la web directamente desde SADA. Para contaminantes radiactivos y no radiactivos,

SADA simula cinco escenarios de uso del suelo: residencial, industrial, agrícola, recreativo y excavación, y cinco vías de exposición: ingestión, inhalación, contacto dérmico, externo (radiación) y consumo de alimentos (Sullivan *et al.* 2000).

Análisis geoespacial

En SADA este tipo de análisis proporciona varias herramientas las cuales añaden métodos para medir la correlación espacial entre datos, modelar la correlación espacial y producir mapas de concentración, riesgo, probabilidad, varianza y limpieza. Entre estas herramientas se encuentran cuatro interpoladores geoespaciales: kriging ordinario, kriging indicador, distancia inversa y vecino más cercano. El análisis geoespacial permite al usuario generar mapas de contorno de concentración, probabilidad, riesgo y diseño correctivo (Sullivan *et al.* 2000).

Análisis de decisión

Al optar por una resolución SADA incorpora el análisis de costo-beneficio, definición de áreas de interés y optimización de muestreo. SADA produce curvas de costo-beneficio que demuestran la relación entre el objetivo de limpieza (basado en concentración o riesgo) y el costo de reparación. Estas áreas de interés pueden entonces servir como base para el diseño de acciones correctivas. Dependiendo del interpolador geoespacial elegido, están disponibles las siguientes cinco estrategias: relleno adaptativo, rango estimado, rango de varianza, rango percentil y rango de incertidumbre (Sullivan *et al.* 2000).

6.3. ECUACIONES CONSIDERADAS EN SADA

Los suelos contaminados cuentan con distintos modelos estandarizados para calcular la exhibición de los contaminantes y niveles que producen riesgo en la salud y medio ambiente. Algunos de los más conocidos son: RBCA tool kit (Estados Unidos), CLEA (Reino Unido), INERIS (Francia), ROME (Italia), modelo desarrollado por la EPA sueca (Suecia), CETOX-human (Dinamarca), Risk Human (Holanda), CSOIL, SUS, HESP, SADA. Los modelos son construidos con base en hipótesis distintas de sus elementos básicos (valores por defecto, vías de exposición y medios de contacto, parámetros definatorios de exposición, etc.), al incorporar valores específicos de los emplazamientos de estudio en la entrada de datos cada modelo tiene su grado de flexibilidad. El modelo por emplearse debe contener características que se ajusten a las necesidades del caso.

6.3.1. Modelos de exposición por medio de diferentes rutas

Los modelos empleados para analizar el riesgo de un contaminante según el procedimiento señalado en la EPA contienen ecuaciones que determinan la dosis diaria de exposición para cada contaminante en los de emplazamiento de estudio, los contaminantes van a estar expuestos a los receptores tipos por determinadas vías de exposición. La magnitud de exposición es expresada en unidades de masa del contaminante por unidad de masa corporal del receptor tipo y día de exposición, la magnitud será una medida de la dosis diaria.

La dosis diaria en los modelos matemáticos es estimada por diferentes rutas según la concentración de los metales pesados encontrados en la matriz suelo. Los modelos de exposición por ingestión de suelo e inhalación de partículas detallados a continuación consideran que los metales son absorbidos en un 100% por las diferentes vías de exposición. No todos los metales presentes en la corteza terrestre pueden ser

absorbidos por los receptores en su totalidad por las vías antes mencionadas, existen técnicas disponibles para obtener en laboratorios factores de biodisponibilidad estándar, estos factores no se encuentran disponibles lo cual imposibilita su aplicación en este estudio en el ámbito teórico. Es decir, la ingestión e inhalación de suelo contaminado producen un riesgo que está sobrestimado, este suceso se debe tener en consideración al interpretar los resultados del análisis de riesgo. Si se cuenta con el factor de biodisponibilidad para estimar la dosis por ingestión de vegetales y contacto dérmico, lo cual hace posible que los resultados del análisis de riesgo se igualen a la realidad.

El análisis de riesgo se estudiará en función a las concentraciones de metales de la capa superior del suelo contaminado hasta 1.2 m de profundidad. La concentración es expresada como C_m y es representativa para cuantificar el riesgo por ingestión, inhalación o contacto dérmico. Para el cálculo de percentiles el número total de datos disponibles no son fiables, por tal motivo se emplea una concentración media previamente determinada. Un receptor estará expuesto a un valor aproximado de estimación de la concentración durante un tiempo prolongado como el tiempo a evaluarse, se enuncia a continuación las diferentes rutas de exposición que se mencionan en el presente trabajo con sus respectivas ecuaciones.

Ingesta de suelo

La dosis que un receptor tipo recibe mediante la ingestión de suelo se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$D_{\text{ingestión del suelo}} = \frac{C_m \times TI \times ED \times EF}{BW \times AT}$$

Ecuación 1.

Donde:

$D_{\text{ingestión del suelo}}$	Dosis diaria promedio	mg/kg·d
C_m	Concentración en el suelo	mg/kg
TI	Tasa de ingestión	mg/d
ED	Duración de la exposición	Años
EF	Frecuencia de la exposición	d/años
BW	Peso corporal del receptor	kg
AT	Intervalo de tiempo sobre el que se promedia la exposición	d

Inhalación de partículas

El suelo contaminado puede ingresar al organismo por inhalación de determinadas partículas resuspendidas, es considerada una entrada de tóxicos al receptor, la existencia del parámetro factor de emisión de partículas permite estimar la concentración de contaminantes. El mercurio, es un metal sometido a una presión de vapor que en condiciones ambientales se aprecia, por ello la inhalación de vapor es aplicable para el metal. En los emplazamientos de análisis el Hg no excede los niveles genéricos de referencia o límites máximos admisibles, por lo tanto, no se hará un análisis para este metal. La ecuación 2 permite el cálculo de la dosis que un receptor recibe por la ruta de exposición inhalatoria.

$$D_{\text{inhalación de partículas}} = \frac{C_m \times \frac{FI}{PEF} \times ED \times EF}{BW \times AT}$$

Ecuación 2.

Donde:

D inhalación de partículas	Concentración de exposición por inhalación	mg/kg·d
C _m	Concentración en el suelo	mg/kg
FI	Fracción inhalable	m ³ /d
PEF	Fracción de emisión de partículas	m ³ /kg
ED	Duración para exposición	años
EF	Frecuencia para exposición	d/años
BW	Peso corporal del receptor	kg
AT	Intervalo de tiempo sobre el que se promedia la exposición	d

La emisión de partículas es indicada por el factor PER, indicando referencia a la inhalación de partículas adsorbidas por las partículas respiratorias (PM10) como a la relación entre concentraciones de partículas respirable con la concentración de un contaminante encontrado en el suelo. El factor de emisión de partículas es dependiente de variables externas como la concentración de partículas de la superficie a analizar, la velocidad del viento, la cobertura vegetal, entre otras (Man *et al.* 2013). El parámetro tiene un valor asumido de 1.36109 m³/kg.

Contacto dérmico

El contaminante del suelo se adhiere en la epidermis de los humanos, otro ingreso del suelo es mediante absorción por medio de la piel se lo conoce como contacto dérmico, la piel tiene capacidad de absorber cantidades considerables de contaminantes, cuya ruta de transferencia es hacia el flujo sanguíneo hasta llegar a los órganos del cuerpo humano. La dosis recibida por el receptor a través del contacto dérmico se calcula con la ecuación 3.

$$D_{\text{contacto dérmico}} = \frac{C_m \times FA \times SA \times ED \times EF \times ABS}{BW \times AT}$$

Ecuación 3.

Donde:

D contacto dérmico	Dosis absorbida por vía dérmica	mg/kg·d
C _m	Concentración de contaminante en el suelo	mg/kg _{suelo}
FA	Factor de adherencia del suelo en la piel	mg _{suelo} /cm ²
SA	Superficie de piel disponible para el contacto	cm ²
ED	Duración de la exposición	años
EF	Frecuencia de la exposición	d/años
ABS	Fracción de dosis absorbida por la ruta dérmica	
BW	Peso corporal del receptor	kg

AT Intervalo de tiempo sobre el que se promedia la exposición d

El parámetro ABS se refiere a la dosis absorbida por vía dérmica, representando la absorción por el receptor de fracción de contaminante administrado, siendo un factor adimensional se incluye en cada ficha de los metales pesados presentes en los emplazamientos de análisis mostrados en las fichas toxicológicas del anexo 2.

Ingesta de frutas y verduras contaminadas

Dependiendo del cultivo en la superficie de suelo contaminado la concentración de sustancias contaminantes en los alimentos es asumida, calculada por multiplicación de la concentración en el suelo y un factor de bioconcentración de metales del suelo a la planta. El termino MLF supone la fracción del suelo depositado sobre la superficie de la planta, al ingerir la planta se puede ingerir también la fracción de suelo contaminado.

$$D_{\text{ingestión de frutas y verduras}} = \frac{C_s \times (\sum(BV \times IDV)) \times fVC \times ED \times EF}{BW \times AT}$$

Ecuación 4.

Donde:

D ingestión de frutas y verduras	Cantidad promedio de contaminante presente en productos vegetales ingeridos diariamente	mg/kg·d
C _s	Concentración de contaminante en el suelo	mgC/kg
BV	Factor bioconcentración suelo-planta	
IDV	Ingesta diaria promedio de legumbres, hortalizas y tubérculos	kg/d
fVC	Porcentaje de autoconsumo de alimentos	
ED	Duración de exposición	Años
EF	Frecuencia de exposición	d/años
BW	Peso corporal del receptor	kg
AT	Intervalo de tiempo sobre el que se promedia la exposición	D

6.3.2. Caracterización del riesgo

Los receptores de suelo contaminado están sometidos a ciertos niveles de riesgos, los cuales se aspira cuantificar al lograr una caracterización de los índices de riesgo. En esta fase se introducen los parámetros adquiridos en una evaluación toxica y expositiva, para proceder al cálculo de los índices de riesgo de los contaminantes presentes en los emplazamientos y las vías de exposición, así como, la determinación del índice de riesgo global que produce la exposición simultanea de los contaminantes y vías analizadas.

Caracterización del riesgo para contaminantes no cancerígenos

Los contaminantes no cancerígenos o sistémicos emplean al índice de peligro (HI) este índice es empleado para obtener el peligro de las sustancias que producen daño, el índice relaciona la dosis de exposición y la dosis de referencia (RfDi) para el periodo y ruta de exposición. El índice de peligro es considerado un potencial de riesgo, a mayor cociente mayor riesgo. La ecuación expresada a continuación caracteriza el índice de riesgo:

$$HI_{ij} = \frac{D_{ij}}{RfD_{ij}}$$

Ecuación 5.

Donde:

HI _{ij}	Índice de peligro resultante de la exposición al contaminante (i) mediante vía (j)	mg/kg·d
D _{ij}	Dosis diaria de exposición al contaminante (i) mediante vía (j)	mg/kg·d
RfD _{ij}	Dosis de referencia al contaminante (i) mediante vía (j)	

Los efectos sobre la salud humana se presentan cuando la dosis es superior a la referencia toxicológica, al ser superior a la unidad de HI el riesgo se considera inaceptable, pero al ser inferior a la unidad es considerado aceptable Tabla 11.

Tabla 11. Índice de riesgo

Índice de riesgo	Riesgo
HI > 1	Inaceptable
HI < 1	Aceptable

Caracterización del riesgo para contaminantes cancerígenos

Para contaminantes cancerígenos se emplea el método de riesgo en el cálculo para caracterizar el riesgo. Se denota como riesgo a la probabilidad de contraer cáncer a lo largo de la vida de un receptor, calculado a partir de la ecuación 6.

$$R_{ij} = D_{ij} \times SF_{ij}$$

Ecuación 6.

Donde:

R _{ij}	Probabilidad de desarrollar un cáncer a lo largo de una vida por la exposición al contaminante (i) mediante vía (j)	
D _{ij}	Dosis diaria de exposición al contaminante (i) mediante vía (j)	mg/kg·d
SF _{ij}	Factor pendiente del contaminante (i) mediante vía (j)	mg/kg·d

El valor establecido para el criterio de aceptabilidad del riesgo es de 10^{-5} , el valor indica que un individuo de cada 100.0000 va a contraer cáncer, dicho enfoque se puede utilizar simultáneamente para varios contaminantes y vías de exposición. En la tabla 12 se enuncia los límites de las probabilidades de riesgo para la salud humana.

Tabla 12. Probabilidades de riesgo cancerígeno

Probabilidad de riesgo (R)	Riesgo
$R > 10^{-5}$	Inaceptable
$R \leq 10^{-5}$	Aceptable

Para contaminantes cancerígenos y no cancerígenos en las diferentes vías de exposición se determinan los índices de riesgos anteriormente citados, para el cálculo se considera la inexistencia de interacción entre los metales pesados del suelo, así como los receptores expuestos a los efectos de cada contaminante son proporcionales a la suma de las dosis respectivas. El riesgo integrado de los contaminantes cancerígenos y no cancerígenos será la suma de los riesgos determinados en los emplazamientos de análisis para las vías de exposición.

6.3.3. Determinación de la concentración sin efecto

Se procederá a realizar un análisis inverso para el cálculo de concentración de elementos metálicos en el medio de contacto ser inaceptable el resultado en la caracterización de riesgo, según parámetros determinados en el análisis de exposición y toxicidad; es decir, los índices de riesgo son superados no teniendo efecto sobre la salud humana.

Contaminantes no cancerígenos

La concentración sin efecto de los contaminantes no cancerígenos se determina mediante la ecuación 7:

$$HI_{tot} = C_m \times \left[\left(\frac{Exp_{ing\ suelo}}{RfD_o} \right) + \left(\frac{Exp_{inh}}{RfD_{inh}} \right) + \left(\frac{Exp_{d\acute{e}rmico}}{RfD_{d\acute{e}rmico}} \right) + \left(\frac{Exp_{ing\ fruta\ y\ v.}}{RfD_{ing\ frutas\ y\ v.}} \right) \right] \leq 1$$

Ecuación 7.

El término RfDi hace referencia a las dosis crónicas en vías de ingestión, inhalación y dérmica; termino calculado por medio de las siguientes ecuaciones:

$$Exp_{ing\ suelo} = \frac{TI \times ED \times EF}{BW \times AT}$$

Ecuación 8.

$$Exp_{inh} = \frac{FI}{PEF} \times \frac{ED \times EF}{BW \times AT}$$

Ecuación 9.

$$Exp_{d\acute{e}rmico} = \frac{FA \times SA \times ED \times EF \times ABS}{BW \times AT}$$

Ecuación 10.

$$Exp_{ing\ frutas\ y\ v.} = \frac{BV \times IDV \times fVC \times EF \times DE}{BW \times AT}$$

Ecuación 11.

Contaminantes cancerígenos

La concentración sin efecto de los contaminantes que tienden a ocasionar cáncer se determina al emplear la siguiente ecuación:

$$R_{tot} = C_m \times [(Exp_{ing\ suel.} \times SF_o) + (Exp_{inh} \times SF_{inh}) + (Exp_{dér} \times SF_{dér}) + (Exp_{ing\ frutas\ y\ v.} \times SF_o)] \leq 10^{-5}$$

Ecuación 12.

El término SF_i se refiere a los factores pendientes para las vías: oral, inhalatoria y dérmica. La descontaminación de suelos afectados por metales tiene por objetivo obtener las menores concentraciones de los metales pesados de los emplazamientos de análisis C_m (mg/kg). Si los resultados al realizar los cálculos para los valores de concentraciones son inferiores a los NGR considerados según la legislación aplicable en el presente trabajo, se empleará en valor menor, debido a que el cálculo se realizó en base a los niveles de fondo; concentración que se encuentra de forma natural en el suelo de análisis.

7. ANÁLISIS DE RIEGOS POR CONTAMINACIÓN DE SUELOS EN LAS PROVINCIAS DE AZUAY Y NAPO (ECUADOR)

7.1. MODELO MATEMÁTICO EMPLEADO

El software Análisis Espacial y Asistencia en la Decisión SADA, versión 5.0.78 detallado en el apartado 6.2 será dispuesto tanto para el análisis de datos de concentración de los elementos metálicos presentes en el emplazamiento de análisis, así como para el análisis de riesgo.

7.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En el presente trabajo se analiza la contaminación de la matriz suelo dos provincias, en Azuay y Napo, localizadas en el Ecuador.

7.2.1. Campamento Guarumales

En la provincia del Azuay se ubica el campamento Guarumales – Corporación Hidroeléctrica del Ecuador, CELEC EP-Unidad de negocio Hidropaute, a tres horas de la ciudad de Cuenca. En el campamento habitan aproximadamente 500 individuos, cuenta con una infraestructura como la de una pequeña ciudad; además, de tener servicios básicos. Se delimitaron cuatro áreas para el análisis de la calidad del suelo. Delimitadas con coordenadas (777783,5775; 9714749.2217). Las áreas que conforman el estudio del suelo son:

- A1G: Expendido de combustible
- A2TC: Taller de carpintería
- A3CH: Chatarrera
- A4TM: Taller mecánico

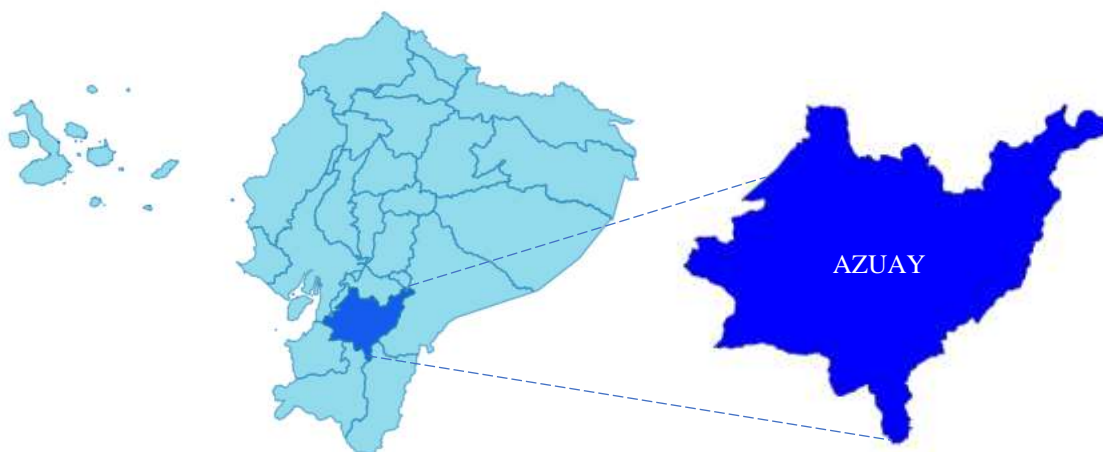


Figura. 7 Ubicación del campamento Guarumales.

7.2.2. Parroquia Papallacta

Papallacta se ubica en la provincia del Napo a unos 67 Km de la capital del Ecuador, los suelos agrícolas de la región son regados con aguas superficiales con altas concentraciones de arsénico, lo cual produce un aumento de concentración del metal en el suelo.

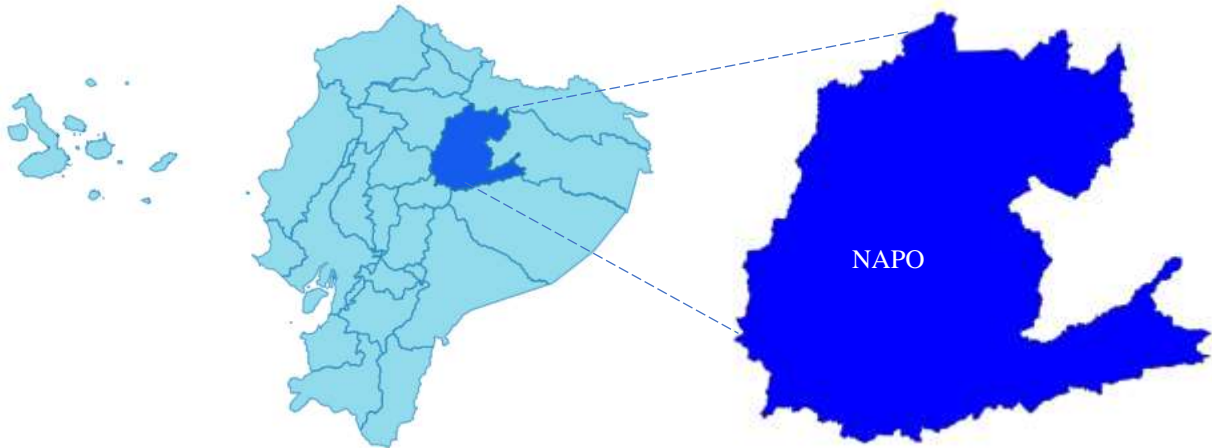


Figura. 8 Ubicación de la parroquia Papallacta.

7.2.3. Características del medio físico

Campamento Guarumales – Corporación Hidroeléctrica del Ecuador

Geología

El campamento Guarumales se ubica en los andes orientales a 110 Km de la ciudad de Cuenca, el Ecuador posee una alteración en su geología debido a que la cordillera de los Andes ha evolucionado por combinación de eventos como: compresión, levantamiento, intrusión, engrosamiento de la corteza y vulcanismo. Según (Jiménez Ordoñez & Torres Sánchez , 2020) en la zona de Guarumales la geología está conformada por:

- a) En el Paleozoico: Terreno Loja: Unidad Agoyán y Unidad Chiguinda.
- b) En el Triásico Superior: Terreno Loja: Granito Tres Lagunas.
- c) Jurásico a Cretácico Inferior: Terreno Salado: Unidad Cerro Hermoso y Unidad Upano; Terreno Alao: Unidad Manguazo, Unidad Alao-Paute y Unidad El Pan.
- d) Cretácico: Formación Yunguilla, Formación Napo y Formación Hollín.
- e) Terciario: Volcánicos continentales, Granodiorita y Pórfido.

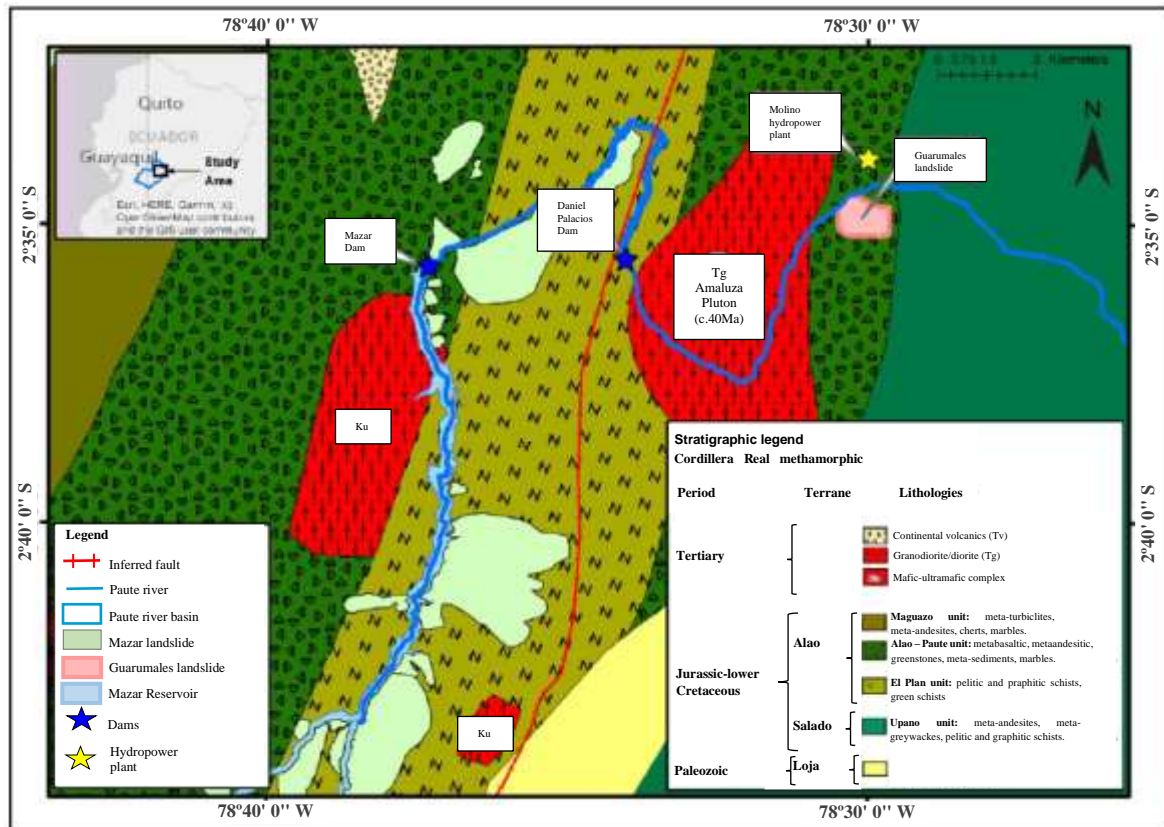


Figura. 9 Mapa geológico Campamento Guarumales – Corporación Hidroeléctrica del Ecuador.

Meteorología

El campamento cuenta con una estación meteorológica llamada Campbell Scientific, misma que proporciona datos de precipitación y temperatura. En el sector la temperatura promedio rodea los valores entre 14 – 19 °C, desde el año 1998 hasta el 2008 el registro promedio de lluvia anual es de 2900 (mm/año), siendo abril, mayo, junio y julio los meses con mayor precipitación.

Geomorfología

Las pendientes de las áreas seleccionadas para el análisis de contaminación del suelo se detallan en la Tabla 13, pendientes que oscilan entre 0° y 63.74°.

Tabla 13. Tipos de pendientes de zonas contaminadas. Fuente: (MAGAP, 2018).

Área de estudio	Porcentaje	Tipo de pendiente
A1G	0 - 40,45	Colinado
A2TC	0 - 40,45	Colinado
A3CH	40,45 - 63,74	Colinado - Escarpado
A4TM	40,45 - 63,74	Colinado - Escarpado

Topografía

La altitud del campamento de Guarumales varía de 1300 a 1700 msnm, las áreas por intervenir están descritas en la Tabla 14, mediante GPS y cinta se obtuvieron las dimensiones.

Tabla 14. Coordenadas (UTM), áreas y perímetro del Campamento Guarumales. Fuente: (Guartatanga Caivinagua & Sigüencia Urgiles, 2019).

ID	A1G		A2TC		A3CH		A4TM	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	777763.18	9714721.81	777511.28	9714647.02	777556.47	9714739.91	777475.76	9714596.05
2	777765.87	9714726.11	777515.30	9714647.16	777552.69	9714744.01	777473.90	9714600.47
3	777760.20	9714730.23	777514.20	9714652.67	777546.72	9714737.25	777468.98	9714597.66
4	777755.88	9714727.70	777512.09	9714652.57	777548.85	9714735.11	777470.18	9714593.82
Área (m ²)	39.63		16.93		38.23		24.34	
Perímetro (m)	26.45		17.34		26.61		20.24	

Parroquia Papallacta

Geología

Los movimientos tectónicos y erupciones volcánicas caracterizan a esta región, constituida por la formación geológica del Chalcana, la formación es una gran y socavada estufa volcánica existente desde el Plioceno y es uno de los mayores centros volcánicos de los Andes del norte. Dispone de una longitud en sentido N – S de 32 Km y en sentido E – O entre 18 y 24 Km, dando un área total aproximada de 672 Km² (Gobierno Parroquial de Papallacta, 2015). El suelo está conformado por cenizas volcánicas, limos arenosos y material piroclástico. En la parroquia se encuentran los siguientes tipos de suelo: Histosol, Inceptisol, Mollisol + Inceptisol.

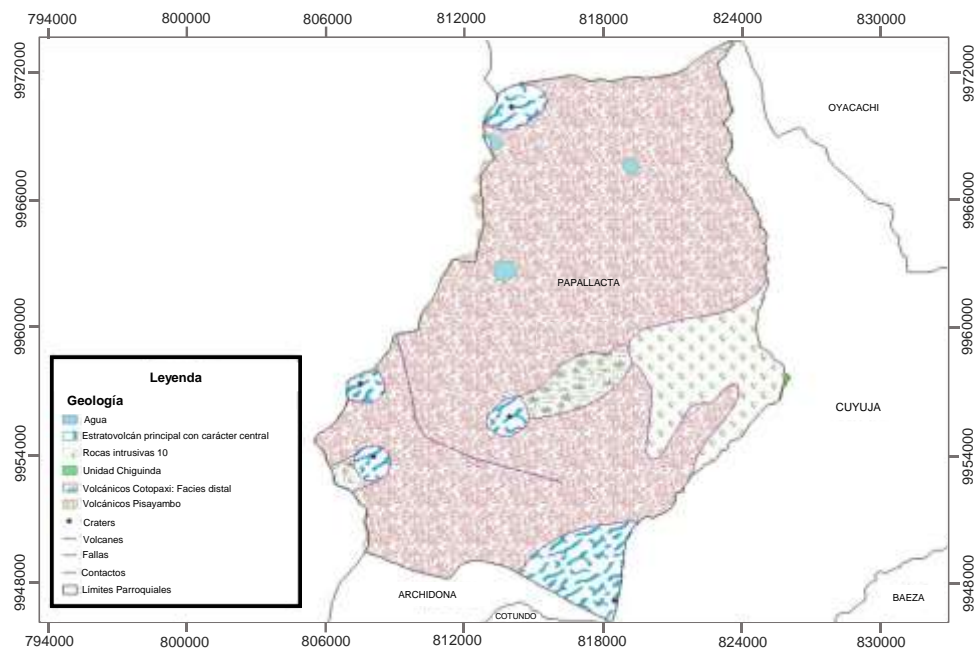


Figura. 10 Geología de la provincia de Papallacta. Fuente: (Gobierno Parroquial de Papallacta, 2015).

Meteorología

El INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) indica que en zonas altas (4440 msnm) la temperatura media anual es de 2°C, mientras que en zonas bajas (3200 msnm) la temperatura media anual esta entre 10 – 12°C. La temperatura promedio en el corredor céntrico poblado está dentro del rango de 8 a 10°C. Papallacta cuenta anualmente con una precipitación media de 1446 mm.

Geomorfología

Las pendientes de la parroquia Papallacta se determina mediante las curvas de nivel, llegando a conocer que la zona tiene suelos irregulares con pendientes aproximadas entre el 40 a 70%, asociadas a zonas escarpadas en pendientes superiores al 70% y pequeñas áreas planas de pendientes entre el 2 al 7%. La geomorfología de Papallacta describe las siguientes características:

- Pendientes superiores al 70%: Colinas medias y altas de cimas agudas con rocas volcánicas andesíticas del cretácico.
- Pendientes entre 25 y 50%: Colinas bajas redondeadas de origen de material morrénico

Topografía

Los puntos de muestreo están descritos en la Tabla 15.

Tabla 15. Coordenadas (UTM) de los puntos de muestreo.

ID	Coordenadas	
	UTMX	UTMY
M1	818143	9958093
M2	818101	9957924
M3	818101	9957925
M5	818458	9957537
M6	818311	9957712
M8	818635	9958107
M9	818472	9958262
M16	817301	9957990
B1	817628	9959304
B3	817467	9960070
B4	817584	9959685
B5	817853	9959534
C1	821598	9959073
C2	819556	9957861
C3	821266	9958761
C4	820670	9958714
T1-1	812266	9958142
T1	812974	9958387
T2	813479	9958371
T3	813556	9957936

7.3. DISEÑO DE MUESTREO

Para el análisis de contaminación del recurso suelo es necesario obtener muestras con la finalidad de conseguir información útil para el estudio, la información básicamente es sobre parámetros de contaminación de elementos presentes en las áreas contaminadas a analizar. De acuerdo con el (TULSMA, 2017) la obtención de muestras al azar se utiliza cuando la superficie a analizar se considera pequeña ocupando toda la zona de análisis.

En el Campamento Guarumales se analizarán 9 muestras de suelo, se colectaron a 20 cm de profundidad y fueron depositadas en fundas de polietileno para ser transportadas en un cooler de espuma Flex hacia el laboratorio para su respectivo análisis. En la Figura 11 se muestran los respectivos puntos de muestreo en el emplazamiento contaminado, los metales pesados presentes en el suelo fueron cobre y plomo. En el apartado 7.1.4 se indican las concentraciones de los metales pesados en casa punto de muestreo.

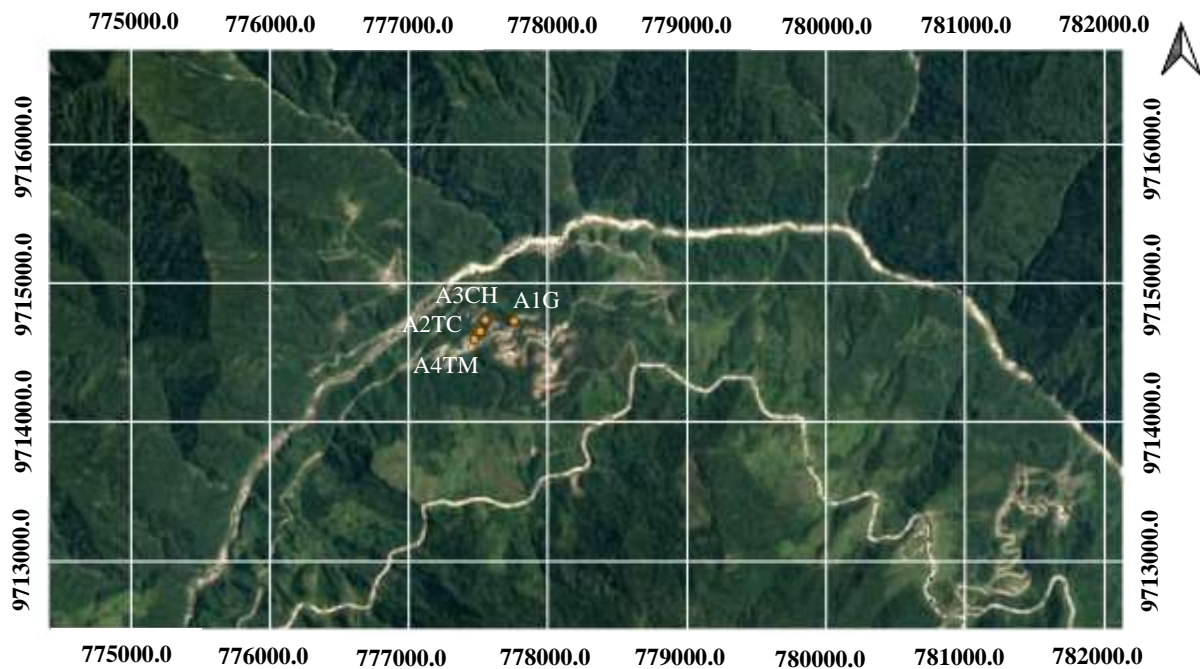


Figura. 11 Localización de partículas en Campamento Guarumales.

En la parroquia Papallacta el muestreo de suelo se efectuó en un emplazamientos destinados a la agricultura y pastoreo, entre los productos principalmente cultivables se encuentran: papas, habas, maíz y hortalizas. Las muestras de suelo fueron tomadas a una profundidad aproximada de 15 a 35 cm con un peso de 450 gr, las muestras fueron secadas a una temperatura de 18°C en el laboratorio. En el emplazamiento de análisis está presente Arsénico como metal pesado provocando contaminación del suelo.

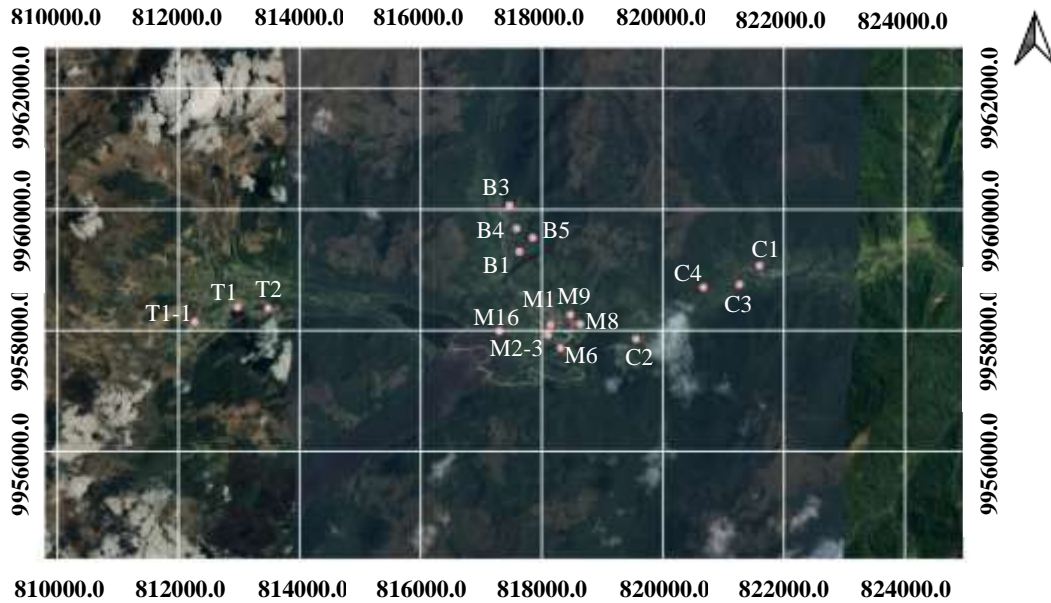


Figura. 12 Identificación de los puntos muestreados en la parroquia Papallacta.

Para caracterizar los valores de los metales pesados de los emplazamientos en sus respectivos puntos de muestreo se determina parámetros estadísticos como: la media, desviación estándar, coeficiente de variación, máximo y mínimo. En el software SADA agrega un módulo para obtener los parámetros mencionados.

Media

La media de un conjunto de datos de n muestras es la suma de las muestras dividida por el número de muestras.

$$\bar{x} = \frac{\sum n_i * x_i}{N}$$

Mediana

La mediana de un conjunto de n muestras, de mayor a menor ordenadas, es un valor tal que la mitad de las muestras son menores o iguales que tal valor y la mitad de las muestras son mayores o iguales que ese valor.

$$M_e = e_i + \frac{\frac{N}{2} - N_{i+1}}{n_i} * a_i$$

Desviación típica

Medida de dispersión de las muestras a la media. Es un promedio de la distancia de las muestras a la media.

$$s = \sigma = \sqrt{\text{varianza}} = \sqrt{\frac{\sum n_t * x_t^2}{N} - \bar{x}^2}$$

Coefficiente de variación

Medida de variación relativa, expresada como porcentaje de la media, por lo tanto, no viene expresado en unidades.

$$CV = \frac{\sigma_x}{x} * 100$$

7.4. NIVELES GENÉRICOS DE REFERENCIA

Las acciones humanas han añadido al suelo elementos metálicos, se han adheridos al recurso por las acciones humanas descontroladas, al superar los límites permisibles (LPM) estos elementos pueden causar efectos negativos en los ecosistemas y salud humana. El problema de la presencia de los elementos metálicos en el suelo es regulado en los diferentes países según su marco legislativo, mismo que describe procesos de manejo de suelos contaminados y de límites permisibles o niveles genéricos de referencia, estos documentos asignan NGR para sustancias y escenarios de exposición.

Se definen a los niveles genéricos de referencia como “la concentración de una sustancia contaminante en el suelo que no provoca un riesgo mayor que el máximo aceptable para la salud humana” (Real Decreto 9/2005, 2005). En Estados Unidos la Agencia de Protección Ambiental propuso ecuaciones para la fácil obtención de los “niveles genéricos de referencia” (NGR), vías de exposición, tipos de contaminantes y efectos toxicológicos. Los parámetros empleados para el cálculo es importante que sean de origen local para que los resultados se ajusten a la realidad del emplazamiento de un determinado país.

En los países como Estados Unidos, Holanda, Suiza y España se han fijado niveles genéricos de referencia en su marco legislativo, de acuerdo con los cálculos de los parámetros realizados por agencias reguladoras de cada país. Una realidad diferente vive los países en vías de desarrollo, estos países adoptan generalmente metodología o valores publicados por otros países. En Holanda desde 1991 la Ley de Protección de Suelos designa a los niveles genéricos de referencia como Valores de Intervención, con los cuales se interviene para adoptar decisiones sobre la remediación del recurso contaminado (Gonzaga Aguilar, 2017).

El Real Decreto 9/2005 publicado en el 2005 por parte del gobierno de España menciona las acciones potencialmente contaminantes, criterios y estándares para declarar a un suelo como contaminado. Desde el 2007 públicamente se cuenta con la Guía Técnica de aplicación del Real Decreto 9/2005 cuyo propósito es encaminar a la utilización de la metodología aplicada para el cálculo de los NGR de sustancias contaminantes (Gonzaga Aguilar, 2017). En el artículo 6 del RD 9/2005 sobre los niveles genéricos de referencia se menciona que, se emplearan para efectuar una evaluación de contaminación del suelo por sustancias expuestas en el anexo V y VI.

El ente cualificado de las comunidades autónomas de España será encargado de determinar que NGR será aplicado en cada caso de contaminación del recurso, tomando en cuenta los usos de suelos actuales y futuros; así como, la variabilidad geológica del país. Para hacer los cálculos existen criterios de cálculo de los NGR en el anexo VII del RD 9/2005. En el anexo VII del mismo Decreto se exponen los criterios para el cálculo de niveles de referencia, tanto para la salud humana como para los ecosistemas. La primera metodología indica la determinación de los valores umbrales toxicológicos, según el uso del suelo. La segunda metodología inicia con la obtención de los niveles de fondo para posteriormente determinar los NGR, los niveles de fondo indican las concentraciones de metales pesados que se encuentran en el recurso

suelo de forma natural. Además, el anexo VII menciona que, si las metodologías uno y dos no son aplicables, cada comunidad autónoma que no tengan NGR podrán adoptar los resultantes de sumar a la concentración media el doble de la desviación típica de las concentraciones existentes en suelos de zonas próximas no contaminadas y con sustratos geológicos de similares características (Real Decreto 9/2005, 2005).

La Comunidad Valenciana no cuenta con valores de niveles genéricos de referencia en su normativa, por esta razón en el presente Trabajo de Fin de Master se tomará como referencia los valores que se establecen en la legislación holandesa denominada “Ley de Protección de Suelos del Ministerio de Vivienda, Planificación del Territorio y Medio Ambiente”, en el documento se citan cuatro anexos (A, B, C y D) sobre valores objetivo y valores de intervención para la remediación de suelos contaminados. El anexo C proporciona datos para la determinar la remediación de suelos contaminados, en el aludido anexo se aporta la Tabla 16 indicando los metales pesados, asignándoles un valor de intervención. En la legislación de Holanda los niveles de referencia se los denomina Human MPR-values, los valores fueron establecidos por el Van Hall Instituut. La Tabla 16 se resumen los elementos traza analizados en este Trabajo de Fin de Master.

Tabla 16. NGR de los elementos traza analizados (mg/kg) en Holanda.

	As	Cu	Pb
NGR	2.1	140	3.6

El Instituto Geológico y Minero de España junto con la Consejería de Agricultura de la Comunidad Autónoma de Aragón especifican los niveles genéricos de referencia ilustrados en la Tabla 17 para la comunidad mencionada, indicando cuatro usos de suelo: industrial, recreativo, urbano y otros usos.

Tabla 17. NGR de los elementos traza analizados (mg/kg) en la Comunidad de Aragón.

Elemento	Uso de suelo			
	Industrial	Área de juego infantil	Urbano	Otros usos
Arsénico	260	26	26	26
Cobre	2800	280	280	28
Plomo	2700	270	270	45

En cuanto a Ecuador, el país cuenta con el TULSMA como normativa legislativa sobre calidad ambiental de recurso suelo, así como criterios de remediación para suelos contaminados. En el Libro VI anexo 2 del TULSMA se indica que según el uso del suelo (agrícola, comercial, residencial e industrial) se establecen los criterios de remediación o restauración, en la Tabla 18 se muestran los valores máximos permitidos para cada metal presente en los emplazamientos analizados en este trabajo.

Tabla 18. Límites máximos permisibles para los elementos traza analizados (mg/kg).

Sustancia	Uso de suelo			
	Agrícola	Residencial	Comercial	Industrial
Arsénico	12	15	15	15
Cobre	63	63	91	91
Plomo	100	100	150	150

7.4.1. Valores de concentración de los metales pesados analizados en los dos emplazamientos

Las Tablas 19 reflejan los resultados de las muestras obtenidas, las concentraciones de los metales pesados de las zonas de estudio están expresadas en (mg/kg). Los valores cuyas casillas son de color gris superan los valores permisibles según la legislación ecuatoriana, lo cual indica que las concentraciones podrían ocasionar daños a la salud humana, razón por la cual se efectuara un estudio de los posibles riesgos sobre la salud a través del software SADA.

Tabla 19. Concentraciones de Cobre y Plomo en Campamento Guarumales.

Áreas	Cobre (mg/kg)	Plomo (mg/kg)
A1G	199	207
A2TC	151.39	94.9
A3CH	104.75	63.2
A4TM	316.53	1698.5

Tabla 20. Concentraciones de Arsénico en la Parroquia Papallacta.

Puntos de muestreo	As (mg/kg)
M1	16.5
M2	23.24
M3	26.78
M6	15.47
M8	14.39
M9	29.75
M16	14.79
B1	23.64
B3	16.09
B4	13.67
B5	21.48
C1	11.74
C2	19.96
C3	35.21
C4	14.58
T1-1	45.21
T1	15.44
T2	32.86

7.5. METALES PESADOS EN LOS DOS EMPLAZAMIENTOS DE ANÁLISIS

7.5.1. *El Arsénico*

El As es un metaloide distribuido ampliamente en la naturaleza, aproximadamente el 5×10^{-4} % de la corteza terrestre es ocupado por el elemento ubicado en el grupo V de la tabla periódica, número atómico 33, peso atómico 74,922. El origen del As en el medio ambiente se da por procesos geológicos o actividades antrópicas, con niveles variados y presencia en diversos recursos naturales como en el agua, aire y suelo. En muchas zonas geográficas del planeta la exposición del hombre frente al As produce un problema para la salud humana, la dispersión de dicho contaminante en el medio ambiente se produjo básicamente en el siglo XX por la utilización de pesticidas y herbicidas, así como la minería.

La toxicidad del arsénico puede presentarse en forma aguda o crónica afectando a los sistemas respiratorio, gastrointestinal, cardiovascular, nervioso y hematopoyético. El arsénico es cancerígeno y puede causar cáncer de pulmón, cáncer de vejiga, cáncer de hígado, cáncer de riñón y cáncer de piel. Según el tipo y cantidad de componentes adsorbentes en el suelo, el valor del pH y el potencial redox ocurre la movilidad del arsénico (Bissen & Frimmel, 2003).

7.5.2. *El Cobre*

El Cu es un metal dúctil con número atómico 29; peso atómico 63.54 g/mol, en la corteza terrestre esta entre el 20-30mg de cobre por kg de suelo. El cobre es un metal pesado potencialmente tóxico, actividades mineras, industriales y de agricultura han producido aumento de presencia del elemento en el suelo, la concentración de los niveles de mencionado metal ha ocasionado la prohibición de su uso en varios países.

La salud humana y el medio ambiente están siendo vulnerables a riesgos por la presencia de Cu en los recursos naturales, en el caso del suelo el proceso de remediación por altas concentraciones de Cu se puede efectuar por métodos físicos y químicos. La ingestión en cantidades del orden de gramos del metal ocasiona náuseas, vómitos, diarrea, sudoración, hemólisis intravascular y posible fallo renal; en raras ocasiones, se observan también convulsiones, coma y la muerte. Además, fragmentos de cobre se pueden alojar en los ojos produciendo uveítis, abscesos o pérdida de los ojos (Nordberg, 2012).

7.5.3. *El plomo*

Por muchos años el plomo se ha utilizado debido a su resistencia a la corrosión, ductibilidad, maleabilidad y facilidad para formar aleaciones. Un rápido aumento de los niveles de Pb en el ambiente se ha producido en los últimos años, este aumento se ha dado por actividades antrópicas como: la fundición, la minería, la fabricación de pinturas, la combustión de gasolina y el reciclaje de baterías ácidas. La salud humana y la animal se pueden ver afectada por los niveles elevados de Pb, el grado de movilidad o biodisponibilidad del plomo no se presenta de igual forma en el suelo, su distribución química en el suelo depende del pH, mineralogía, textura, contenido de materia orgánica (Cala & Kunimine, 2003).

El plomo tiene tendencia a distribuirse en distintos órganos, tejidos, huesos y dientes; este metal con el paso del tiempo se acumula en el cuerpo humano, la edad de los individuos es un factor determinante para la intoxicación y el nivel de exposición (Reyes *et al.* 2016). El riesgo principal del metal en el cuerpo humano es su toxicidad, la toxicidad leve por exposición del Pb son: mialgia o parestesia, fatiga leve, irritabilidad, letargo y molestias abdominales ocasionales; en cuanto a la toxicidad moderada se manifiesta con signos y síntomas como los siguientes: artralgia, fatiga general, dificultad para concentrarse, agotamiento muscular, temblor, cefalea, dolor abdominal difuso, vómitos, pérdida de peso y estreñimiento. Si la toxicidad es grave

ante la exposición del plomo los síntomas y signos se anuncian a continuación: paresis o parálisis; encefalopatía, que puede producir de forma repentina convulsiones; alteraciones de la consciencia; coma y la muerte; ribete azul (gris azulado) en las encías y cólicos (intermitentes o cólicos abdominales graves) (Nordberg, 2012).

7.6. ANÁLISIS DE RIESGO PARA LA SALUD HUMANA

La metodología empleada para efectuar el análisis de riesgo para la salud humana es la proporcionada por la EPA (United States Environmental Protection Agency) denominada “Marco para la evaluación de riesgos para la salud humana para informar la toma de decisiones”. El software SADA añade para el análisis de riesgo un módulo donde se cuenta con modelos y algoritmos para estimación del riesgo.

7.6.1. Modelo Conceptual

El primer emplazamiento es el Campamento Guarumales, zona donde se efectúa la operación y mantenimiento del proyecto hidroeléctrico más grande del Ecuador, en este lugar existe un deterioro permanente en la calidad de suelo por presencia de percolación de hidrocarburos y metales pesados. El campamento alberga aproximadamente a 350 personas; además, tiene en sus instalaciones: oficinas, viviendas, comedor, escuela, centro médico, talleres, un pequeño mercado, bodega, estación de bomberos, gasolinera, planta de tratamiento de aguas, relleno sanitario y áreas recreacionales. En el análisis de suelos se comprueba que en las zonas de: expendido de combustible, taller de carpintería, chatarrera y taller mecánico existen altas concentraciones de metales pesados como es el caso de plomo y cobre; metales que exceden los límites permisibles según normativa ecuatoriana.

La Corporación Eléctrica del Ecuador CELEP EP tiene funcionando al departamento de gestión ambiental y social, el cual ha implementado el programa de monitoreo y seguimiento ambiental para monitorear el recurso suelo debido a su grado de contaminación y preocupación. El deterioro de las instalaciones de los tanques subterráneos de almacenamiento de gasolina se presenta por la contaminación del suelo, produciendo así percolación de la sustancia hacia la superficie del sitio. Los ríos cercanos a áreas contaminadas están expuestos a contaminación de sus aguas por arrastre de los metales desde las áreas que contengan grandes concentraciones de elementos metálicos.

El segundo emplazamiento de análisis se localiza en la parroquia Papallacta, en la parroquia la concentración de arsénico en los suelos supera los límites permisibles indicados en la legislación ecuatoriana, según el análisis de muestras tomadas en las áreas afectadas. La población presente en Papallacta de acuerdo el censo del año 2010 es aproximadamente de 1000 personas, considerada 100% rural con requerimiento de comida y agua, recursos producidos en fuente locales. El uso de suelo es principalmente destinado a actividades agrícolas, en estos suelos se cultivan papas, habas, maíz, hortaliza y se realizan actividades de pastoreo para suplir las necesidades humanas, otro problema puede ocurrir al infiltrarse los metales pesados hasta alcanzar el nivel freático.

En Papallacta no se evidencia actividades antrópicas como minería u otra actividad que contribuya a la contaminación del suelo. El Arsénico en Papallacta tiene su origen por la desorción de óxidos e hidróxidos de Fe; además, de los procesos de meteorización de rocas volcánicas presentes en la zona, las rocas están compuestas por mencionado metal. La importancia de los recursos suelo y agua para actividades agrícolas y consumo humano respectivamente indica un peligro potencial para la salud humana en presencia de

Arsénico. Ante una ingestión prolongada del metal los riesgos para la salud humana pueden ser tóxicos y cancerígenos. Como en el emplazamiento existe captación de agua para consumo humano, se considera vía de acceso del metal al organismo.

La Figura 13 muestra el diagrama conceptual, señalando: focos, vías de exposición, así como receptores tipos tomados en consideración en este trabajo.

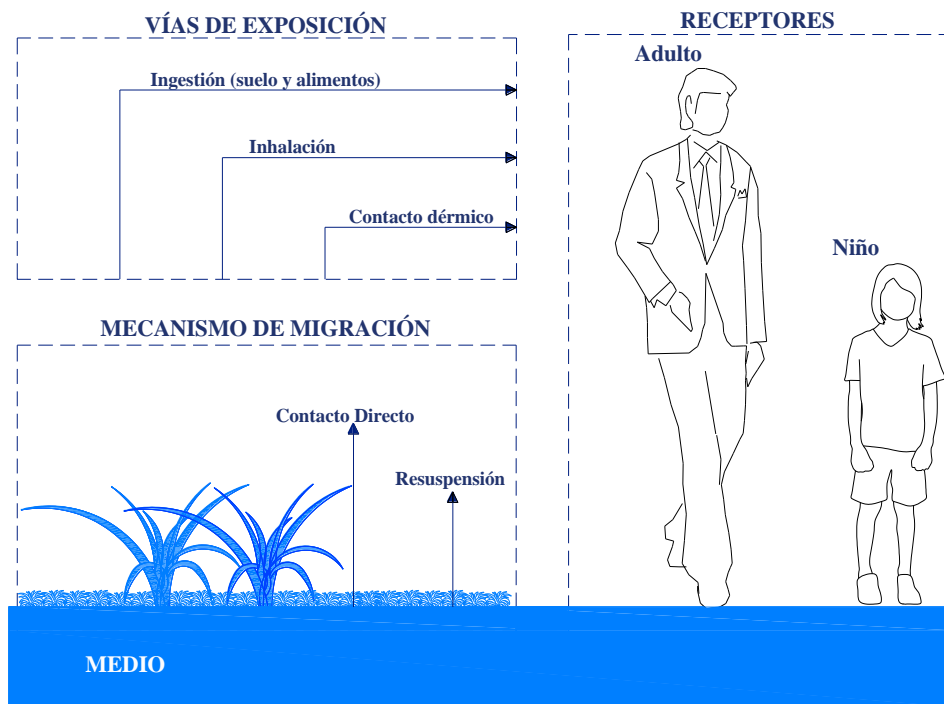


Figura. 13 Modelo de flujo del modelo conceptual

Para realizar el análisis de riesgos ambientales y así poder determinar si los dos emplazamientos de estudio, con los niveles de concentraciones de metales pesados obtenidos resultan viables para continuar con las actividades que actualmente se realizan; para ello se plantean tres escenarios posibles a continuación, los cuales se detallan a continuación:

Escenario 1

Para el emplazamiento del campamento de Guarumales el receptor expuesto es un adulto trabajador en las zonas de expendido de combustible, taller de carpintería, chatarrera y taller mecánico, al efectuar sus labores de trabajo está expuesto a: inhalación de partículas de metales pesados debido al polvo, las partículas se pueden adherir a la piel, es decir, también existe exposición mediante contacto dérmico.

En el emplazamiento de la parroquia Papallacta el receptor expuesto es un adulto, el cual desarrollando actividades agrícolas está expuesto a los metales pesados por; ingesta accidental del suelo e ingesta de alimentos cultivados, inhalación de partículas y por contacto dérmico.

Escenario 2

En los dos emplazamientos el receptor tipo es un niño, el cual al acompañar al adulto citado en el escenario 1 está expuesto a las zonas contaminadas del campamento Guarumales y de la parroquia Papallacta por metales pesados, el niño está propenso a los metales a través de: contacto dérmico, ingesta del suelo de manera accidental; además, para el emplazamiento de Papallacta el niño está propenso también a la ingesta de frutas y verduras cultivadas en las zonas contaminadas.

Escenario 3

Este escenario es el más desfavorable siendo el receptor tipo para ambos desplazamientos un niño, en el emplazamiento del campamento de Guarumales el niño acompaña al adulto mencionado en el escenario 1. El receptor tipo está expuesto a: ingesta accidental de suelo, inhalación por presencia de polvo en áreas contaminadas y contacto dérmico.

En el segundo emplazamiento se ubica en la parroquia Papallacta, el receptor tipo acompaña al receptor del escenario 1, el niño está expuesto: ingestión de frutas y verduras cultivadas en el área afectada, ingestión accidental de suelo, inhalación de partículas suspendidas del suelo y contacto dérmico.

Tabla 21. Definición de los escenarios para el análisis de riesgo para la salud humana en el Campamento Guarumales.

Escenario	Receptor	Puntos de exposición	Uso del suelo	Vía de exposición	Medio de contacto	
					Suelo	Aire
1	Adulto	Expendido de combustible, taller de carpintería, chatarrera y taller mecánico	Varios	Ingestión Inhalación Contacto dérmico	x	x
2	Niño	Expendido de combustible, taller de carpintería, chatarrera y taller mecánico	Recreativo	Ingestión Inhalación Contacto dérmico	x	-
3	Niño	Expendido de combustible, taller de carpintería, chatarrera y taller mecánico	Recreativo	Ingestión Inhalación Contacto dérmico	x	x

Tabla 22. Definición de los escenarios para la evaluación de riesgo para la salud humana en la parroquia Papallacta.

Escenario	Receptor	Puntos de exposición	Uso del suelo	Vía de exposición	Medio de contacto		
					Suelo	Aire	Alimento
1	Adulto	Parcela	Agrícola	Ingestión Inhalación Contacto dérmico	x	x	x
2	Niño	Parcela	Recreativo	Ingestión Inhalación Contacto dérmico	x	x	-
3	Niño	Parcela	Recreativo	Ingestión Inhalación Contacto dérmico	x	x	x

7.6.2. *Análisis de Toxicidad*

El anexo II muestra las fichas de los metales pesados presentes en los dos emplazamientos de estudio, en las fichas se detalla una descripción de los parámetros toxicológicos para caracterizar el riesgo sobre la salud humana, así como sus efectos frente a la exposición de los contaminantes por las diversas vías de ingreso.

Las fichas donde se denotan los parámetros toxicológicos se han consultado en RAIS (Risk Assessment Information System), datos desarrollados por el Departamento de Energía de EE.UU. (DOE) y por la base de datos de IRIS (Integrated Risk Information System) y HEAST (Health Effects Assessment Summary Table), datos desarrollados por la Agencia Medioambiental (USEPA). Las últimas bases de datos investigadas fueron WHO, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y IARC (International Agency for Research on Cancer).

Los datos toxicológicos de cada uno de los metales pesados contenidos en las fichas detallan lo siguiente:

- RfD (Dosis de referencia crónica): Índice de toxicidad más empleado en el análisis de riesgos ambientales para sustancias no cancerígenas, haciendo referencia al nivel de exposición diaria que no ocasiona riesgo apreciables sobre seres humanos. Este índice está incluido en los contaminantes As y Cu mediante las siguientes vías de exposición: inhalación, ingestión y contacto dérmico.
- Sf (Valor de factor pendiente): A sustancias señaladas como cancerígenas para el ser humano se les incluye el valor de factor pendiente, el factor representa el límite superior de confianza percentil 95 de que la probabilidad de una respuesta por unidad de dosis suministrada por todo el período vital sea igual o menor a la respuesta estimada e indica la cantidad con que se incrementa las posibilidades de desarrollar cáncer, al exponerse a las sustancias el receptor.

7.6.3. *Análisis de exposición*

En esta fase los datos empleados serán datos estadísticos, debido a la complejidad para la obtención de datos específicos de receptores potencialmente expuestos a los contaminantes. Para el estudio del análisis de exposición se tomará como soporte los valores referidos en la guía de análisis de riesgos para la salud humana y los ecosistemas de La Comunidad de Madrid (Kaifer Brasero *et al.* 2006), otra fuente que contiene valores orientados para el análisis de exposición se establece en las guías metodológicas de la agencia del medio ambiente de EE.UU.

Para la cuantificación de la exposición se requiere de parámetros biométricos y de hábitos o patrones de actividad, los cuales son explicados a continuación:

Parámetros biométricos

Para un análisis es necesario contar con parámetros biométricos para la caracterización de los escenarios de exposición establecidos en el apartado 7.6.1 los receptores tipos de la población potencialmente expuesta a los contaminantes del suelo son dos tipos de individuos: adulto y niño. Para el receptor tipo “adulto” se considera un peso medio de 70 kg, mientras que para el receptor tipo “niño” de hasta 6 años el peso medio es de 15 kg. Se especifica que los receptores tipos son considerados aplicables a ambos sexos para el grupo de población de análisis.

Otra característica por incluir a los receptores tipos es el peso corporal, enfocándose en: manos, antebrazos y pies. El peso corporal es fundamental en cuanto a la estimación de dosis por contacto dérmico con el recurso suelo o por la presencia de polvo en el ambiente. La superficie de exposición de los receptores tipos es 0,5 m² para adultos y 0.182 m² para niños.

Hábitos o patrones de actividad

Para contaminantes no cancerígenos (Cu y Pb) del emplazamiento del campamento Guarumales y cancerígenos (As) en la parroquia Papallacta la duración de exposición será de 2 años en el escenario 1. En el escenario 2 el receptor tipo es un niño para los dos emplazamientos de estudio, en el campamento Guarumales la duración de exposición se establecerá en 6 años; debido a la presencia de contaminantes no cancerígenos, no así para el emplazamiento de Papallacta en donde el contaminante es cancerígeno por ello la duración de exposición será de 30 años; estos años son justificados de acuerdo con los 6 años en que el receptor sea un niño y los 24 años que sea un adulto. Para el escenario 3, ambos emplazamientos con contaminantes cancerígenos y no cancerígenos la duración será de 30 años.

En el campamento Guarumales el receptor tipo (trabajador) recibe una frecuencia de exposición de 2 años para el escenario 1, se asume que el trabajador acude a su labor diaria 5 días a la semana durante dos años, restando un mes de vacaciones por cada año; es decir, los días totales de trabajo serán 230 días/año. En la parroquia Papallacta se realizan actividades agrícolas de sembrío de productos transitorios, pues los productos permanentes no son posible debido a las condiciones climáticas, el trabajador efectúa sus labores cinco días a la semana durante seis meses cada año. Se estima una frecuencia de exposición del receptor tipo en Papallacta de 115 días/año por dos años.

En el escenario 2 el receptor tipo es un niño en ambos emplazamientos, el receptor va a jugar en la superficie contaminada con una frecuencia de exposición de 3 días a la semana. En el campamento Guarumales la exposición será de 156 días/año durante seis años, mientras que en la parroquia Papallacta el tiempo de exposición será de 78 días/año durante treinta años. Para el escenario 3 se sume que el receptor está expuesto 5 días a la semana durante treinta años restando el mes de vacaciones por año; es decir, en Guarumales la frecuencia de exposición será de 230 días/año durante los treinta años y en la parroquia Papallacta el tiempo de exposición será de 115 días/año durante los treinta años.

La exposición de contaminantes se promedia sobre el tiempo equivalente en días del tiempo de duración de la exposición prevista. Para contaminantes con efectos cancerígenos, el tiempo sobre el cual se promedia la exposición concuerda con la duración de toda la vida del receptor (70 años) (Kaifer Brasero *et al.* 2006).

El uso recreativo del suelo por un niño menor de 6 años puede incidir en una accidental tasa de ingestión aproximada de 200 mg/día, el uso de suelo para labores diarias y actividades agrícolas por un adulto tiene una tasa de ingestión accidental de 100 mg/día. Al estar sobre la superficie contaminada se puede presentar una tasa de inalación de aire, siendo de 5 m³/hora para un adulto expuesto al realizar una moderada actividad laboral y para un niño que hace uso recreativo de la superficie contaminada es de 3 m³/hora.

El suelo tiende a adherirse a la piel lo cual se especifica en La Guía de Suelos Contaminados de la Comunidad de Madrid como factor de adherencia, para el campamento Guarumales al no contener cubierta vegetal el factor tendrá un valor de 10 mg/cm² en los tres escenarios expuestos para ambos tipos de receptores. La parroquia Papallacta cuya actividad de uso de suelo es destinado a la agricultura el valor

asignado para el factor de adherencia es de 1.45 mg/cm² para los tres escenarios y para los dos receptores tipos.

La ingesta media de productos obtenidos de las actividades agrícolas en la parroquia Papallacta se consideran en el análisis, los valores para la tasa de ingestión será tomados de la Guía Metodológica de la Comunidad de Madrid. Estos valores se consideran desde un punto de vista conservador, asumiendo que todos los productos alimentarios son producidos en el suelo de la parroquia Papallacta. En las Tablas 23 y 24 se hace un breve resumen de los parámetros a considerar en el análisis de exposición:

Tabla 23. Parámetro biométrico y patrones de actividad para cada escenario en el campamento Guarumales.

Parámetro		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Peso medio del receptor tipo	BW	70	15	15
Duración de la exposición (años)	ED no cancerígenos	2	6	30
Frecuencia de la exposición (d/año)	EF	230	156	230
Tiempo promedio de exposición (d)	Sustancia no cancerígena AT	730	2190	10950
Ingestión de suelo (mg/día)	TI_s	100	200	200
Tasa de inhalación (m ³ /día)	Fi	5	3	3
Superficie de la piel expuesta (cm ²)	SA	5000	1820	1820
Factor de adherencia del suelo a la piel (mg/cm ² d)	FA	10	10	10

Tabla 24. Parámetro biométrico y patrones de actividad para cada escenario en la parroquia Papallacta.

Parámetro		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Peso medio del receptor tipo	BW	70	15	15
Duración de la exposición (años)	ED cancerígenos	2	6 + 24	30
Frecuencia de la exposición (d/año)	EF	115	78	115
Tiempo promedio de exposición (d)	Sustancia cancerígena AT	25550	25550	25550
Ingestión de suelo (mg/día)	TI_s	100	200	200
+ Tasa de inhalación (m ³ /día)	Fi	5	3	3
Superficie de la piel expuesta (cm ²)	SA	5000	1820	1820
Factor de adherencia del suelo a la piel (mg/cm ² d)	FA	1.45	1.45	1.45
Ingestión de vegetales de raíces (g/día)	IR_r	75	----	27
Ingestión de vegetales de hoja (g/día)	IR_h	105	-	33
Ingestión total (g/día)	IR	180	-	60

7.6.4. Modelo de exposición

La exposición de los metales pesados en los emplazamientos de estudio es el análisis para realizar luego de determinarse el modelo conceptual, en esta fase se emplean ecuaciones las cuales se indican en el apartado 6.3.1. Las ecuaciones se presentan según las cuatro vías de exposición: ingesta de suelo y frutas-verduras, inhalación de partículas resuspendidas y contacto con la epidermis. El modelo matemático SADA contara con datos requeridos para la ejecución del modelo de exposición encontrados en las fichas toxicológicas del anexo II.

7.6.5. Caracterización del riesgo

El inciso 6.3.2. señala las ecuaciones del modelo con la finalidad de obtener resultados del análisis de exposición y toxicidad, con el cálculo se obtienen los índices de riesgo y vías de exposición para cada contaminante de los emplazamientos, para los contaminantes no cancerígenos el riesgo se expresa como índice de peligro (HI: tabla 11) y para contaminantes cancerígenos el riesgo se expresa como probabilidad incremental para desarrollar cáncer (R: tabla 12). Se conoce si el riesgo es aceptable o inaceptable para los emplazamientos al terminar determinar los índices de riesgo; de acuerdo con los tres escenarios definidos.

7.7. RESULTADOS Y DISCUSIONES

7.7.1. Análisis del contenido de metales pesados

La determinación analítica de las propiedades fisicoquímicas de los metales pesados proporciona las concentraciones totales que contienen los suelos de los emplazamientos, lo cual no representa una información completa de los valores de las concentraciones. Las tablas 19 y 20 indican las concentraciones de los metales pesados en los emplazamientos del campamento Guarumales y la parroquia Papallacta respectivamente, los valores que superan los NGR o límites máximos permisibles conforme a la legislación aplicable se encuentran de color gris.

Las características fisicoquímicas están condicionadas a factores y procesos edafogénicos, en el campamento Guarumales el pH de las áreas analizadas se detallan a continuación: A1G (Expendido de combustible) es de 7.29, A2TC (Taller de carpintería) es de 6.70, A3CH (Chatarrera) es de 5.81 y A4TM (Taller mecánico) es de 8.15; lo cual indica que la movilización de los metales es variable en este emplazamiento, en cuanto a la parroquia Papallacta los suelos poseen un color pardo amarillento debido a la presencia de óxido de Fe, la textura de los suelos mayormente está compuesta de arenas y limos. El pH tiene un rango entre 5 y 6,6 lo cual indica que los suelos son poco ácidos, con las variables mencionadas la movilidad del arsénico es baja en los suelos de Papallacta.

Para caracterizar la contaminación de los emplazamientos se procede a determinar parámetros de diferentes estadísticos con los resultados de las muestras de los dos emplazamientos obtenidos previamente, en las Tablas 25 y 26 se detallan los resultados de los parámetros.

Tabla 25. Parámetros estadísticos de la concentración de Cu y Pb en el campamento Guarumales a 0.2 m de profundidad.

Parámetro	Cu	Pb
X	192.84	515.93
M	175	151

Ds	90.94	1.53
CV	0.47	790.8
Min	104.75	63.2
Max	316.53	1698.5

Tabla 26. Parámetros estadísticos de la concentración de As en la parroquia Papallacta a 0.2 m de profundidad.

Parámetro	As
X	21.71
M	18.23
Ds	9.11
CV	0.42
Min	11.74
Max	45.21

Donde:

X	Media aritmética
M	Mediana
Ds	Desviación estándar
CV	Coefficiente de variación
Min	Valor mínimo
Max	Valor máximo

Como se muestra en las Tablas 25 y 26 el coeficiente de variación de los metales pesados presentes en los suelos del campamento Guarumales y de la parroquia Papallacta indica una heterogeneidad de las muestras analizadas. Se puede observar que la concentración mínima y máxima del plomo tiene una notable variación, siendo el valor mínimo de 63.2 mg/kg y un valor máximo de 1698.5 mg/kg, lo cual confirma una heterogeneidad de la concentración de los metales pesados. Cabe mencionar que el suelo en el área del taller mecánico ubicado en el campamento Guarumales contiene una elevada concentraciones de cobre y plomo.

Las legislaciones de Ecuador, España y la de Holanda empleada debido a la falta de NGR establecidos para la Comunidad de Valencia, consideran los límites máximos permisibles y niveles genéricos de referencia respectivamente enunciados en el apartado 7.4, con ayuda de las gráficas de cada elemento traza de los emplazamientos mostradas a continuación se comentan los resultados obtenidos.

El límite máximo permisible para el cobre en la legislación del Ecuador es de 91 mg/kg; es decir, con este valor todas las muestras en el campamento Guarumales superan los límites de concentración de cobre. Los NGR establecidos en la legislación holandesa para el cobre son más permisibles con un valor de 140 mg/kg, según esta legislación la concentración en tres puntos de muestreos supera los niveles genéricos de referencia. La legislación que de la Comunidad de Aragón no se toma como referencia en este emplazamiento debido a que según los NGR ninguno de los puntos de muestreo supera los NGR con el valor de 2800 mg/kg. Con el software SADA se muestran las concentraciones de cobre en las áreas de muestreo.

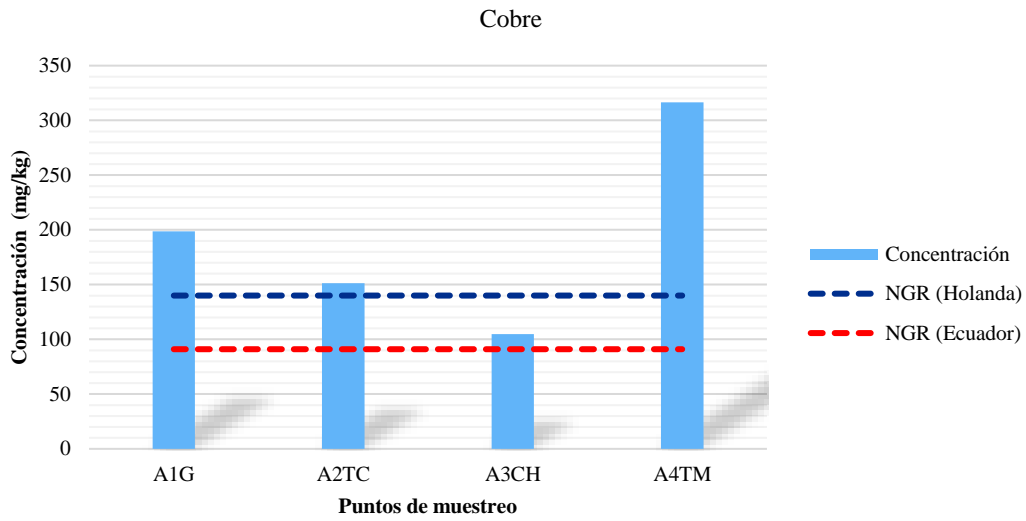


Figura. 14 Análisis de muestras de Cobre obtenidas a una profundidad de 0.20 m. Comparación de los LMP de Ecuador y NGR de Holanda.

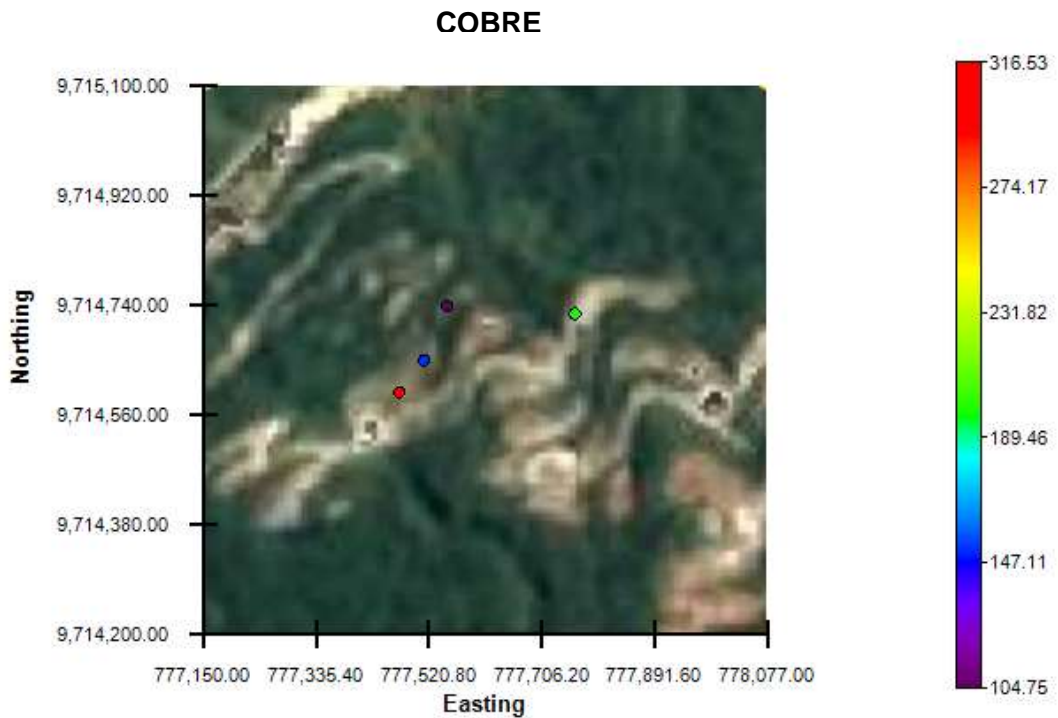


Figura. 15 Concentración de Cobre en los puntos de muestreo (SADA, 2021).

El valor de los NGR en la legislación de Holanda es de 3.6 mg/kg para el plomo, con este valor las concentraciones en los cuatro puntos de muestreo superan los NGR. La legislación ecuatoriana presente un valor de límite máximo permisible para plomo de 150 mg/kg, señalando solo dos puntos de muestreo de concentraciones que superan los límites máximos permisibles, como son los puntos de las áreas A1G y A4TM. La figura 17 ilustra las concentraciones de plomo mediante la utilización del software SADA.

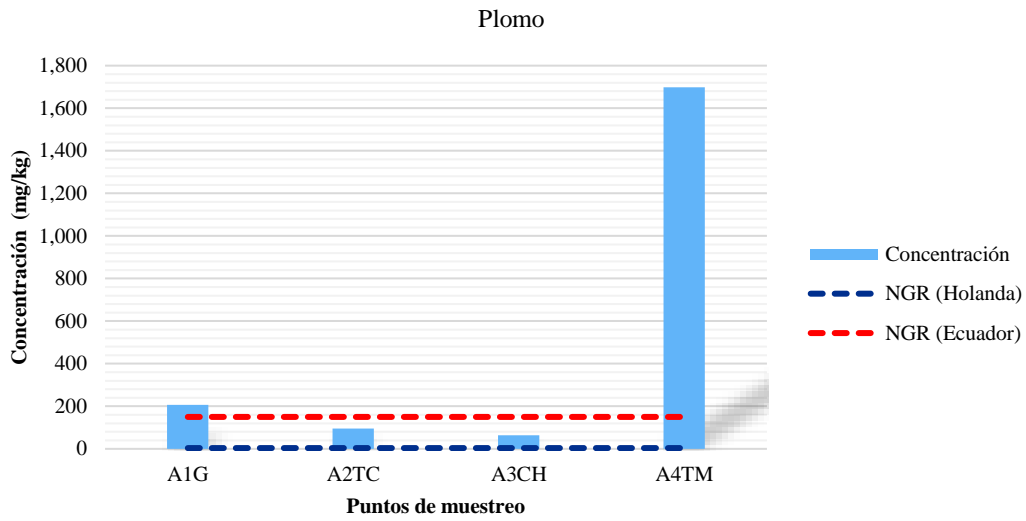


Figura. 16 Análisis de muestras de Plomo obtenidas a una profundidad de 0.20 m. Comparación de los LMP de Ecuador y NGR de Holanda.

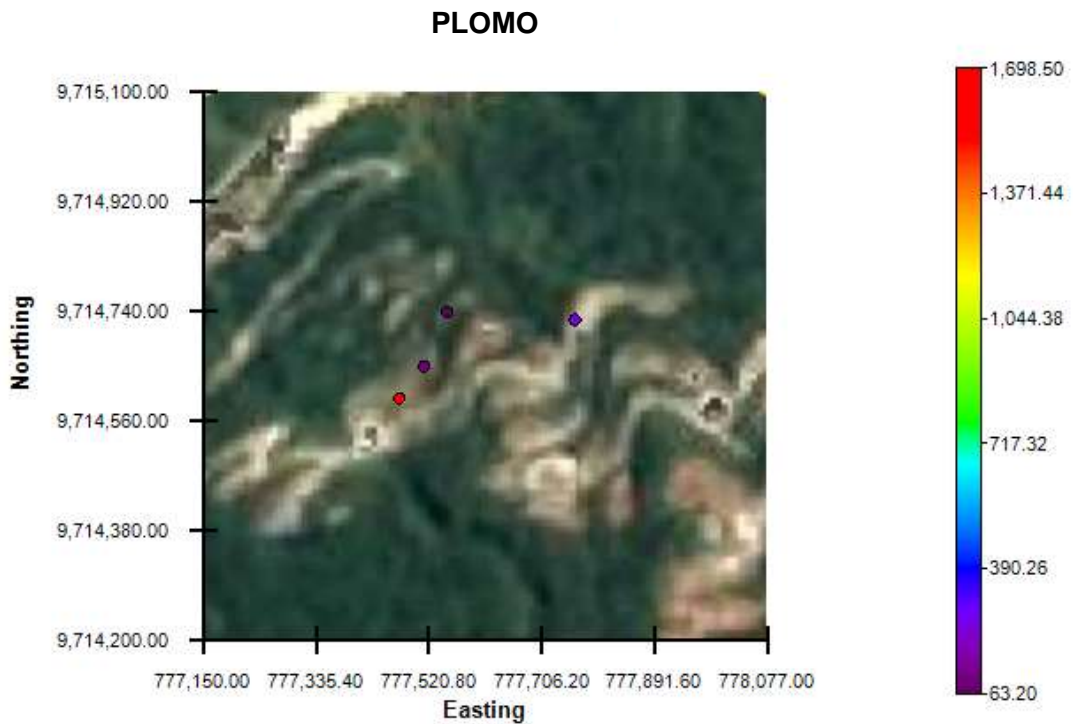


Figura. 17 Concentración de Plomo en los puntos de muestreo (SADA, 2021).

En el emplazamiento de la parroquia Papallacta se analiza la concentración de arsénico As, las concentraciones excepto en el punto de muestreo C1 según la legislación ecuatoriana superan los límites máximos permisibles establecidos. En cuanto a la legislación holandesa la concentración del As supera los niveles genéricos de referencia en todos los puntos de muestreo ampliamente; por último, la legislación de

la Comunidad de Aragón establece los NGR con valores muchos más permisibles en comparación con las legislaciones antes mencionadas, lo cual indica que solo los puntos M3 – M9 – C3 – T1-1 – T2 superan los valores de los NGR. En la figura 18 se observa la concentración del As analizado en Papallacta, la figura 19 fue obtenidas mediante el empleo del software SADA.

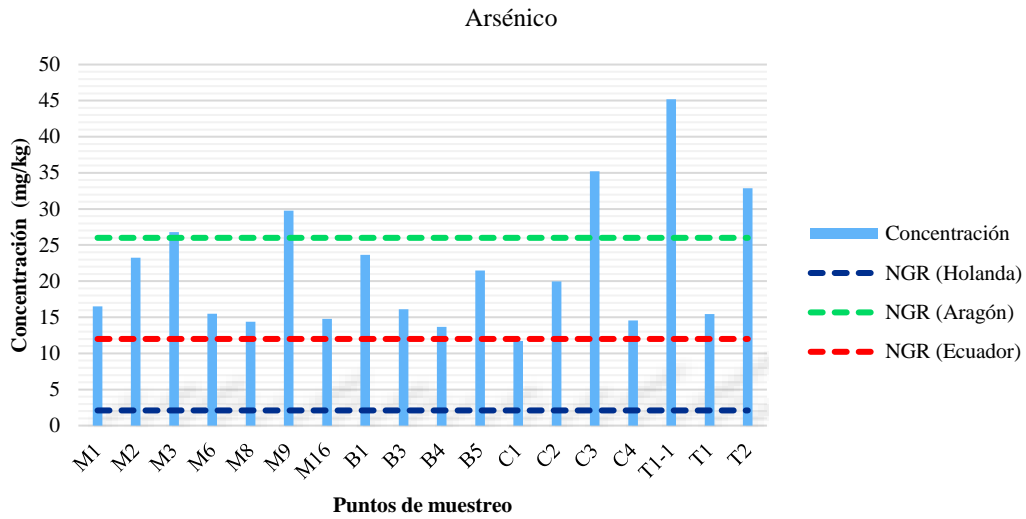


Figura. 18 Análisis de muestras de Arsénico obtenidas a una profundidad de 0.20 m. Comparación de los LMP de Ecuador y NGR de Holanda y la Comunidad de Aragón.

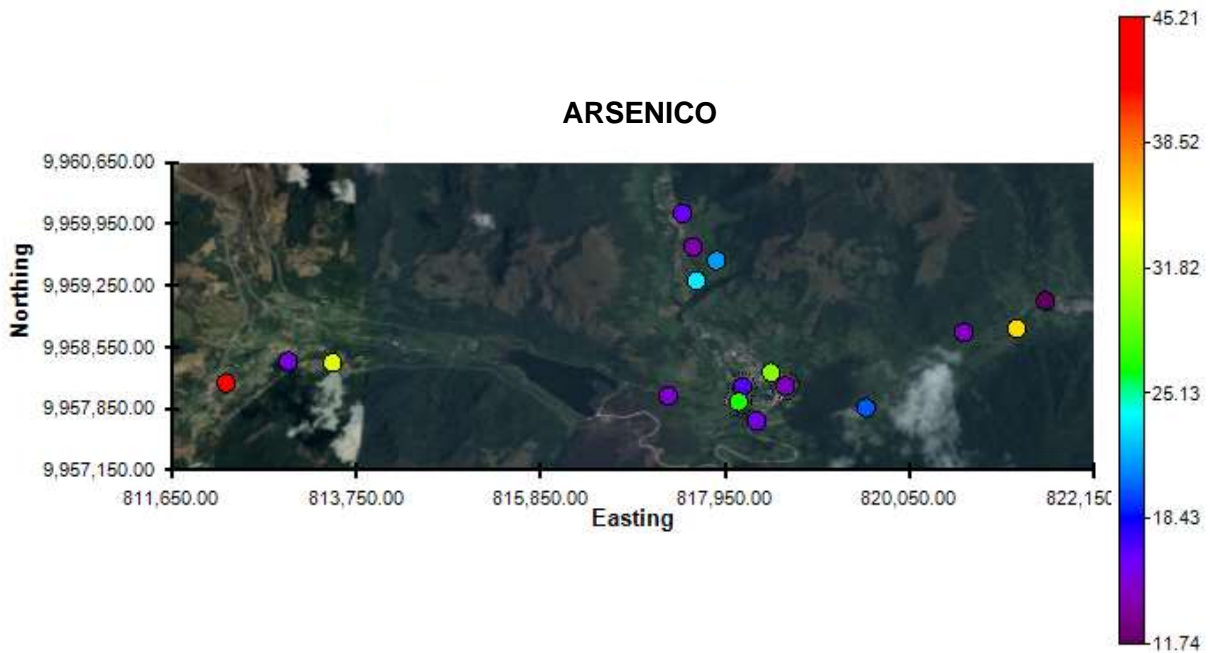


Figura. 19 Concentración de Arsénico en los puntos de muestreo (SADA, 2021).

7.7.2. Resultados del análisis de riesgo para la salud humana

En esta fase de riesgo se obtuvieron los índices de riesgo de los contaminantes cancerígenos y no cancerígenos para los dos emplazamientos en cada escenario expuesto. Los índices de riesgo están determinados para los tres escenarios anteriormente propuestos y se han determinado mediante la dosis diaria en mg de contaminante/ kg de peso corporal del receptor tipo, los dos parámetros mencionados son estimados tomando como base los modelos de exposición. Las concentraciones de los elementos contaminantes de las superficies analizadas están contenidas en los modelos de exposición, concentraciones obtenidas por medio de métodos analíticos para cada punto de muestreo en la profundidad establecida.

En el análisis de resultado la concentración media es el parámetro empleado para conseguir los índices de riesgo, el valor del parámetro se acerca a la estimación más probable de concentración a la que un receptor tipo está expuesto por un periodo de tiempo prolongado, el tiempo para los escenarios en cada emplazamiento se establece en las Tablas 23 y 24 (Parámetros biométricos), el anexo II contiene índices calculados para el análisis. El apartado 6.3.2 menciona los criterios fijados al efectuar la caracterización de riesgo, como son el índice de peligrosidad (HI) y la probabilidad de desarrollar cáncer (R). Ambos criterios infieren en la determinación del rango de valores para conocer si el riesgo aceptable o inaceptable, los valores para tener en cuenta están especificados en las Tabla 11 y 12.

Para el emplazamiento ubicado en el campamento Guarumales se indican a continuación:

Escenario 1

- Uso: Industrial
- Receptor: Adulto
- Vía de exposición: Inhalación de partículas en suspensión del suelo y contacto dérmico

Escenario 2

- Uso: Recreativo
- Receptor: Niño
- Vía de exposición: Ingestión accidental de suelo y contacto dérmico

Escenario 3

- Uso: Recreativo
- Receptor: Niño
- Vía de exposición: Ingesta accidental de suelo, inhalación en suspensión de suelo y contacto dérmico.

Tabla 27. Índice de Riesgo para contaminantes cancerígenos (R) y no cancerígenos (HI) para los escenarios 1-2-3.

Elemento	Escenario	Ingestión de suelo		Inhalación de partículas		Contacto dérmico		Total Elemento	
		HI	R	HI	R	HI	R	Σ HI	Σ R
Cobre	1	4.34E+03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.06E+03	0.00E+00	5.40E+03	0.00E+00
	2	2.75E+04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.34E+03	0.00E+00	3.58E+04	0.00E+00
	3	4.05E+04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.23E+04	0.00E+00	5.28E+04	0.00E+00

Plomo	1	0.00E+00	7.79E+00	0.00E+00	2.05E-08	0.00E+00	2.88E-01	0.00E+00	8.08E+00
	2	0.00E+00	2.50E+01	0.00E+00	3.89E-08	0.00E+00	2.27E+00	0.00E+00	2.73E+01
	3	0.00E+00	3.68E+01	0.00E+00	5.74E-08	0.00E+00	3.35E+00	0.00E+00	4.02E+01
	Total en vía	7.23E+04	6.96E+01	0.00E+00	1.17E-07	2.17E+04	5.92E+00	9.40E+04	7.55E+01

Los valores de riesgo que superan tanto a los índice de peligrosidad (HI) como a la probabilidad de desarrollar cáncer (R) en los tres escenarios y en las vías de exposición seleccionadas se exhiben en la tabla 27 con color amarillo. Haciendo un análisis de las vías de exposición se determina que la inhalación de partículas en suspensión del suelo es la única vía donde el riesgo para el cobre y plomo en los tres escenarios se considera aceptable para los criterios de (HI) y (R); es decir, para los receptores tipos de cada escenario en las vías de ingestión de suelo y contacto dérmico sería inaceptable.

Se llevará a cabo un análisis de riesgo individual para los contaminante en los escenarios 1-2-3 y para cada una de las vías de exposición mencionadas en la Tabla 27, para el caso del cobre en las vías de ingestión de suelo y contacto dérmico supera los criterios del índice de peligrosidad, ya que el valor calculado para este criterio es de $9.40E+04$, es decir, el criterio es inaceptable debido a que supera la unidad. El plomo en las vías de ingestión de suelo y contacto dérmico presenta valores inaceptables, el criterio de probabilidad para desarrollar cáncer para ser aceptable debe tener valores menores a 10^{-5} , como este no es el caso ya que el valor calculado es de $7.55E+01$ dicho criterio es inaceptable. Al efectuar un análisis de riesgo total de los elementos considerados contaminantes del suelo se evalúa que el riesgo es inaceptable para los dos criterios. Con los datos adquiridos se infiere que el uso industrial y recreativo del suelo inaceptable debido al riesgo para la salud humana.

Para el emplazamiento localizado en la parroquia Papallacta los escenarios escogidos se detallan a continuación:

Escenario 1

- Uso: Agrícola
- Receptor: Adulto
- Vía de exposición: Ingestión accidental de suelo, ingestión de frutas y verduras, inhalación de partículas en suspensión y contacto dérmico

Escenario 2

- Uso: Recreativo
- Receptor: Niño
- Vía de exposición: Ingestión accidental de suelo, ingestión de frutas y verduras, y contacto dérmico

Escenario 3

- Uso: Recreativo
- Receptor: Niño

- Vía de exposición: Ingestión accidental de suelo, ingestión de frutas y verduras, inhalación de partículas en suspensión y contacto dérmico

Tabla 28. Índice de Riesgo para contaminantes cancerígenos (R) y no cancerígenos (HI) para los escenarios 1-2-3.

Elemento	Escenario	Ingestión de suelo		Inhalación de partículas		Contacto dérmico		Ingestión de frutas y verduras		Total Elemento	
		HI	R	HI	R	HI	R	HI	R	Σ HI	Σ R
Arsénico	1	9.31E+00	4.19E-01	6.84E-10	4.41E-09	1.65E-02	7.41E-02	1.21E+03	5.43E+01	1.22E+03	5.48E+01
	2	8.84E+02	3.98E+01	1.95E-08	1.26E-07	2.84E-01	1.28E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.84E+02	4.10E+01
	3	1.30E+03	5.86E+01	2.87E-08	1.85E-07	4.19E-01	1.89E+00	2.81E+04	1.27E+03	2.94E+04	1.33E+03
	Total en Vía	2.20E+03	9.88E+01	4.89E-08	3.16E-07	7.20E-01	3.24E+00	2.93E+04	1.32E+03	3.15E+04	1.42E+03

Los resultados de la evaluación de riesgo para el cuerpo humano efectuado en el emplazamiento ubicado en la parroquia Papallacta se visualiza en la Tabla 28, en las casillas amarillas se encuentran valores que superan los criterios de índices de peligrosidad y de probabilidad de desarrollar cáncer. Efectuando un análisis de riesgo total para As en los tres escenarios se puede mencionar que el índice de peligrosidad total no es aceptable ya que supera el valor de la unidad siendo este de 3.15E+04, el valor obtenido en el análisis de probabilidad a desarrollar cáncer es de 1.42E+03, dicho valor es superado al 10^{-5} indicando así un riesgo inaceptable.

La vía de inhalación de partículas en suspensión de suelo es aceptable para los criterios antes mencionados en los tres escenarios analizados según los valores de referencia de los criterios, además, el contacto dérmico en los tres escenarios analizados presenta el criterio de peligrosidad aceptable al tener valores menores a la unidad. Es importante destacar que en el escenario 2 mediante vía de ingestión de frutas y verduras, donde el receptor tipo es un niño los criterios de peligrosidad y de probabilidad a desarrollar cáncer se consideran aceptable al cumplir con los valores menores a la unidad y menores a 10^{-5} respectivamente. Con los resultados adquiridos, el uso agrícola y recreativo del suelo quedaría descartado debido a la presencia de arsénico, el cual proporciona un riesgo para la salud.

7.7.3. Importancia del análisis de incertidumbre

La fuentes de incertidumbres son varias, generando afectación en la fiabilidad de los resultados y alterando la toma de decisión final.

- Con los resultados obtenidos del análisis por medio de las muestras disponibles se ha procedido a la estimación del riesgo. En el tiempo promedio de exposición las concentraciones determinadas permanecerán constantes para el modelo propuesto.
- En el campamento Guarumales se han considerado 4 puntos de muestreo y para la parroquia Papallacta fueron considerados 18 puntos, estos puntos de muestreo suponen la totalidad de los emplazamientos de análisis, si se seleccionan otros puntos de muestreo para los emplazamientos estos influirían en la alteración de los resultados del análisis de riesgo realizado teniendo en cuenta la baja movilización de los elementos metálicos.

- Se deja en claro que los receptores tipos en cada escenario estarán expuestos solo a contaminación a través del recurso suelo. El modelo propuesto no considera la concentración de fondo a partir de otras vías de exposición.
- Se han tomado en el cálculo parámetros estándar para la exposición de contaminación del suelo, los parámetros para los emplazamientos de estudio no son específicos, fueron adquiridos de estudios e informes reconocidos.
- Los parámetros toxicológicos y las dosis diarias son estimados para cada elemento de forma aislada; es decir, no existe interacción entre elementos.
- La exposición crónica es la única en consideración para los elementos de análisis, los efectos agudos producidos por exposición a largo plazo no se consideran.
- Para la vía de ingestión de frutas y verduras cultivadas en el emplazamiento de estudios se presentan factores de bioacumulación, estos factores no son específicos para cada especie cultivada lo que puede acarrear un riesgo sobrestimado. La dieta de los receptores tipos procede totalmente de la zona cultivada, por esta razón se puede producir una sobrestimación de la ingesta diaria de frutas y verduras.
- Se asume que el organismo humano absorbe el cien por ciento del metal ingerido e inhalado, por esto la bioaccesibilidad de los elementos no es tomada en cuenta en el presente análisis, lo que causa una sobrestimación de la dosis diaria a la que están expuestos los receptores tipos.
- En las fichas toxicológicas de los tres elementos contaminantes que se muestran en el anexo II indican el potencial de afectación el cual es diferente para cada elemento, por esto en la caracterización los contaminantes cancerígenos sobrestiman el riesgo en el cálculo de un índice integrado.

7.7.4. Discusión

En el estudio efectuado se generan conclusiones generales y específicas del análisis de riesgo de los emplazamientos seleccionados.

- Las concentraciones de los metales pesados presentes en los emplazamientos sobrepasan los límites máximos permisibles de las concentraciones de contaminantes en la legislación del Ecuador y los NGR de las concentraciones de elementos contaminantes tomados de la legislación de Holanda. Para los efectos cancerígenos y no cancerígenos los dos emplazamientos de análisis se encuentran en estado contaminado, la contaminación ocasionada por los elementos es heterogénea.
- El modelo SADA proporciona resultados al efectuar el análisis de riesgo para los tres escenarios seleccionados.
- En el emplazamiento del campamento Guarumales se analizó el riesgo para los dos receptores tipos (adulto y niño) teniendo en cuenta la frecuencia y vías de exposición (ingesta de suelo, inhalación

de partículas y contacto dérmico), concluyendo la importancia de realizar labores de descontaminación debido al riesgo potencial para la salud humana en presencia de los metales pesados en el suelo luego de aplicar los criterios establecidos.

- En la parroquia Papallacta el riesgo se analizó para los dos receptores tipos (adulto y niño) considerando la frecuencia y vías de exposición (ingesta de suelo, inhalación de partículas, contacto dérmico e ingestión de frutas y verduras), resultando inaceptable el riesgo potencial para la salud humana en presencia de metales pesados al plantear los criterios establecidos.
- Se puede concluir que es vital la descontaminación del suelo para continuar con el uso agrícola y recreativo del suelo sin causar riesgo potencial a la salud humana. Los criterios referidos precisan el riesgo que causan los elementos no cancerígenos con el índice de peligrosidad (HI) y los elementos cancerígenos con la probabilidad de desarrollar cáncer (R).
- El índice de peligrosidad para los elementos no cancerígenos en el caso del cobre en las vías de ingestión de suelo y contacto dérmico en Guarumales es inaceptable en los tres escenarios. Para el plomo contenido en el suelo en Guarumales la probabilidad de desarrollar cáncer es inaceptable para los receptores tipos expuestos en los tres escenarios y en las vías de ingestión de suelo y contacto dérmico.
- En la parroquia Papallacta los índices de peligrosidad y probabilidad de desarrollar cáncer son inaceptables en las vías de ingestión de suelo e ingestión de frutas y verduras en los tres escenarios y en los dos receptores tipos, para la vía de contacto dérmico la probabilidad de desarrollar cáncer es inaceptable en los dos receptores tipos indicados en los tres escenarios.
- La vía de inhalación de partículas en suspensión del suelo en los dos emplazamientos es aceptable para los receptores tipos en los escenarios analizados.
- La concentración de los metales pesados de los emplazamientos fue obtenida en 4 puntos de muestreo en Guarumales y 13 en Papallacta. Estas concentraciones permanecen constantes en el tiempo siendo la vía de transmisión el recurso suelo.
- Los factores de bioacumulación para las especies cultivadas en Papallacta no son específicos para cada uno de ellos, la bioaccesibilidad de los metales no se ha tomado en consideración en el organismo humano, pues se asume que el organismo absorbe totalmente los metales.
- Las dosis diarias y los parámetros de toxicidad fueron seleccionados de fuentes reconocidas, es decir, los valores para las superficies de estudio no son específicos. Todas estas consideraciones producen grandes incertidumbres en la modelización ejecutada, provocando que la confiabilidad de los resultados al igual que la toma de decisiones sea afectada.

8. CONCLUSIONES GENERALES

Tras la realización de la modelación mostrada anteriormente, a continuación, se presentan las conclusiones generales referente al trabajo efectuado, así como conclusiones específicas del análisis de riesgo en los emplazamientos de estudio.

- El presente trabajo se concreta con la comparación de las normativas de suelos contaminados que rigen en Ecuador y España, en Ecuador se establecen criterios como son los límites máximos permisibles en cuanto a suelos contaminados, ayudando así a realizar un análisis de riesgo para los emplazamientos en Guarumales y Papallacta. En España cada comunidad autónoma establece los criterios de niveles genéricos de referencia, las comunidades pueden tener valores diferentes para el parámetro. La Comunidad de Valencia no cuenta con normativa en materia de suelos contaminados por lo que se empleó otra fuente como lo es la Ley Holandesa, la cual introduce una incertidumbre alta en los resultados.
- Para la toma de decisiones con referencia en la gestión de suelos contaminados se aplica una herramienta sencilla conocida como análisis de riesgo. Existen diversas metodologías y variables toxicológicas implementadas en el análisis de riesgo que introducen en los resultados factores de incertidumbre.
- La baja movilidad de los metales en los emplazamientos es un punto de partida en el empleo del software SADA para el caso de estudio, SADA es utilizado al no tener necesidad de modelos más complejos de transporte entre fases ni de modelos transitorios; además, al ser gratuito es una gran elección para emplear.
- Los valores de los resultados obtenidos en el análisis de riesgo indican que los emplazamientos se encuentran contaminados por metales, esta conclusión se logra a partir de la superación de los valores de contaminación de los límites máximos permisibles enunciados en la legislación ecuatoriana y de los NGR indicados en la legislación holandesa. El análisis de riesgo arroja un resultado inaceptable para los criterios de peligrosidad por contaminantes no cancerígenos y para probabilidad de desarrollar cáncer por contaminantes cancerígeno, puesto que, los valores de estos criterios superan en el análisis a los valores establecidos.
- En el campamento Guarumales y en la parroquia Papallacta los suelos tienden a provocar riesgos potenciales en la salud humana en las vías de exposición analizadas, indicando que los usos de suelos actuales necesitan aplicación de medidas de descontaminación.
- En Guarumales existe riesgo potencial para la salud humana en las vías de ingestión de suelo y contacto dérmico para los receptores (adulto y niño) en los tres escenarios de exposición, para seguir haciendo uso industrial y recreativo del emplazamiento es imprescindible efectuar mediadas de descontaminación. El arsénico ingerido mediante la ingestión de frutas y verduras cultivadas en la parroquia Papallacta para los receptores tipos en los escenarios determinados presenten los valores más altos constituyendo el mayor riesgo potencial para la salud humana. Esto se produce en contaminantes cancerígenos y no cancerígenos. Los valores elevados de arsénico del suelo imposibilitan la descontaminación in situ del suelo, recomendando aplicación de técnicas en plantas de tratamiento lo cual eleva los costes económicos al requerir procedimientos energéticos y operacionales.

- Buscar soluciones ante algún acontecimiento de contaminación tiene su importancia para seguir haciendo uso de los suelos. En el campamento Guarumales se ha valorado determinadas técnicas de recuperación de suelo como: bioestimulación, bioacumulación y fitoremediación, cada una de las técnicas con sus respectivos requerimientos de aplicación. Las técnicas de bioestimulación y bioacumulación se efectuaron en las áreas A1G y A2TC, en las áreas A3CH Y A4TM se empleó la técnica de fitoremediación. Tras la aplicación de las técnicas en el emplazamiento se notó que las concentraciones iniciales vs las concentraciones finales tuvieron una disminución significativa en sus valores.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Steza, I. C., Pizzol, L., Critto, A., Ozunu, A., & Marcomini, A. (2013). Comparison of risk-based decision-support systems for brownfield site rehabilitation: DESYRE and SADA applied to a Romanian case study.
- [2]. Acosta, J. A., Jansen, B., Kalbitz, K., Faz, A., & Martínez-Martínez, S. (2011). Salinity increases mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere*, 85(8), 1318–1324.
- [3]. Adelinet, M., Fortin, J., d’Ozouville, N., & Violette, S. (2007). The relationship between hydrodynamic properties and weathering of soils derived from volcanic rocks, Galapagos Islands (Ecuador). Université Pierre et Marie Curie, Laboratoire de Géologie, Paris, France.
- [4]. Aguilar Ruiz, J., Dorronsoro Fernández, C., Gómez Ariza, J., & Galán Huertos, E. (1999). “Los criterios y estándares para declarar un suelo contaminado en Andalucía y la metodología y técnicas de toma de muestra y análisis para su investigación”. Consejería del Medio Ambiente de la junta de Andalucía. Obtenido de <https://www.juntadeandalucia.es/>
- [5]. Alloway, B. J. (2012). *Sources of Heavy Metals and Metalloids in Soils* (Vol. 22).
- [6]. Anaconda B, C., & Rhim S, A. (2004). *Riesgos Ambientales Asociados a Sitios Contaminados*. Proyecto FDI.
- [7]. Apostolis Sambanis. (2012). *Assessment of Spatial Analysis and Decision Assistance (SADA) Potential for Clean Up*. B.S. University of Illinois at Chicago, Illinois at Chicago.
- [8]. Avila, R. (2015). *Uncertainty Analysis and Risk Assessment*. Sweden: C. Walther, D.K. Gupta (eds.), *Radionuclides in the Environment*.
- [9]. Bissen, M., & Frimmel, F. (2003). *Arsenic – a Review Part I: Occurrence, Toxicity, Speciation, Mobility*. Universität Karlsruhe (TH), Engler-Bunte-Institut, Karlsruhe, Germany.
- [10]. BOE. (2005). Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. Ministerio de la Presidencia. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/pdf/2005/BOE-A-2005-895-consolidado.pdf>
- [11]. Boroush, M. (1998). *Understanding Risk Analysis*. American Chemical Society y RFF.
- [12]. Büyüker, B. (2009). *A decision support tool for conceptual site model development at contaminated sites*.
- [13]. Cala, V., & Kunimine, Y. (2003). Distribución de plomo en suelos contaminados en el entorno de una planta de reciclaje de baterías ácidas. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 19 (3) 109-115, 7.
- [14]. *Calidad Ambiental*. (2015). *Plan Integral de Residuos de la C.V. (PIRCV)*. Generalitat Valenciana, Valencia. Obtenido de <https://agroambient.gva.es/es/web/calidad-ambiental/memoria-de-justificacion>
- [15]. Castillo Sánchez, V. M. (enero de 2004). La Estrategia Temática para la Protección del Suelo: un instrumento para el uso sostenible de los suelos en Europa. *Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, 59,60,61.
- [16]. Cheng, S. (2003). Effects of Heavy Metals on Plants and Resistance Mechanisms. *Environmental*

- Science and Pollution Research, 10(4), 256–264.
- [17]. Comisión de las Comunidades Europeas. (2006). Directiva del parlamento europeo y del consejo. Bruselas.
- [18]. De la Varga Pastor, A. (2009). El Régimen Jurídico de los suelos contaminados desde la perspectiva europea y su regulación en Alemania. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco (UPV/EHU).
- [19]. de Vries, W.; Römkens, P.F.A.M.; van Leeuwen, T.; Bronswijk, J.J.B.; (2002). Agriculture, Hydrology and Water Quality, Institute of Grassland and Environmental Research, North Wyke Research Station, Devon, UK. (P. H. Jarvis, Ed.) Bilthoven, The Netherlands.
- [20]. DIRECTIVA 2004/35/CE . (2004). Directiva 2004/35/CE Del parlamento europeo y del consejo de 21 de abril de 2004. Diario Oficial de la Unión Europea.
- [21]. EPA. (1992). Guidelines for Exposure Assessment. Risk Assessment Forum, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- [22]. EPA. (2014). Priority Pollutant List. United States Environmental Protection Agency. Obtenido de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/priority-pollutant-list-epa.pdf>
- [23]. Fowle III, J., & Dearfield, K. (2000c). Risk Characterization Handbook. . U.S. Environmental Protection Agency, Office of Science Policy, Office of Research and Development, U.S. EPA., Washington, D.C.
- [24]. Freluh-Larsen, A, Bowyer, C., Albrecht, S., Keenleyside, C., Kemper, M., . . . Vidaurre, R. (2017). Updated Inventory and Assessment of Soil Protection Policy Instruments in EU Member States. Ecologic Institute, Berlin.
- [25]. Gobierno Parroquial de Papallacta. (2015). Actualización “Plan de desarrollo y ordenamiento territorial Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de Papallacta”.
- [26]. Gonzaga Aguilar, J. C. (2017). Niveles Genéricos de Referencia (NGR) de compuestos orgánicos en suelo ajustados a parámetros de exposición locales en Ecuador. Trabajo de Fin de Master, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, Madrid, España.
- [27]. Gonzalez , J., Moreno , A., Pérez , L., Larrea , M., Prieto , P., de la Rosa , C., & Mosso, A. (2000). Nivel de contaminación en suelos por elementos traza. Impacto sobre las comunidades microbianas. Edafología. Centro de Espectrometría Atómica. F.C. Geológicas.
- [28]. Guartatanga Caivinagua, E. S., & Siguencia Urgiles, K. G. (2019). Recuperación de suelo contaminado con cobre y plomo mediante métodos biológicos al interior del campamento Guarumales-Corporación Hidroeléctrica del Ecuador, CELEC EP - Unidad de negocio hidropaute. Tesis, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cauenca, Cuenca - Ecuador.
- [29]. Herreros Guerra, F., de Fresno Cerezo, Á., Laguna Vela, J., Perucha Atienza, C., & Sainz Gutiérrez, R. (2008). Guía de Planes de Control y Seguimiento del Suelo de Actividades Potencialmente Contaminantes. Consejería de Medio Ambiente Vivienda y Ordenación del Territorio, Dirección General de Medio Ambiente, Madrid.
- [30]. Ilarri, J. R. (2020). Modelos Matemáticos sobre Evaluación de Riesgo en Suelos Contaminados. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- [31]. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014.). Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part B: Regional Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth

- Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107415386
- [32]. Ize Lema, I., Zuk, M., & Rojas-Bracho, L. (2010). *Introducción al Análisis de Riesgos Ambientales*. Instituto Nacional de Ecología, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- [33]. Jiménez Ballesta, R. (2017). *Introducción a la contaminación de los suelos*. (I. Hernández Úbeda, Ed.) Madrid, España: Mundi-Prensa.
- [34]. Jiménez Ordoñez, A. M., & Torres Sánchez, J. L. (2020). *Influencia de las actividades desarrolladas en el campamento Guarumales sobre la calidad del agua superficial*. Universidad de Cuenca, Cuenca - Ecuador.
- [35]. Jiwan, S., & Ajay S., K. (2011). *Effects of Heavy Metals on Soil, Plants, Human Health and Aquatic Life*. International Journal of Research in Chemistry and Environment, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Guwahati, Guwahati, INDIA.
- [36]. Jordao, C. P., Nascentes, C. C., Cecon, P. R., F. Fontes, R. L., & Pereira, J. L. (2005). *Heavy Metal Availability in Soil Amended with Composted Urban Solidwastes*. Environmental Monitoring and Assessment (2006) 112: 309–326, Universidade Federal de Vic,osa, Vic,osa, Minas Gerais, Brasil.
- [37]. Kabata-Pendias, A., & B. Mukherjee, A. (2007). *Trace Elements From Soil to Human*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [38]. Kaifer Brasero, M., Aguilar Peña, A., Arana Jiménez, E., Baleriola Sánchez, G., Castillo de Casas, E., Torá Mouvet, I., . . . Lud, D. (2006). *Guía de Análisis de Riesgo para la Salud Humana y los Ecosistemas*. Plan Regional de Actuaciones en Materia de Suelos Contaminados de la Comunidad de Madrid, Consejería del Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.
- [39]. Kaifer Brasero, M., Aguilar Peña, A., Arana Jiménez, E., Balseiro Bonillo, C., Torá Mouvet, I., Caleyá Sánchez, J., & Pijls, C. (2006). *Guía de Tecnologías de Recuperación de Suelos Contaminados*. Comunidad de Madrid, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Madrid.
- [40]. Ley de Gestión Ambiental. (30 de Julio de 1999). LEY N° 37/1999, De gestión ambiental. Obtenido de <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2008/6618.pdf>
- [41]. LIBRO VI: De la calidad ambiental. (2003). Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente. Obtenido de <http://ecuadorforestal.org/wp-content/uploads/2010/05/Libro-VI.pdf>
- [42]. MAG. (2020). *Resumen Ejecutivo de los Diagnósticos Territoriales del Sector Agrario*, Ministerio de Agricultura y Ganadería, Coordinación General de Planificación y Gestión Estratégica, Quito-Ecuador.
- [43]. Man, Y. B., Kang, Y., Wang, H. S., Lau, W., Li, H., Lin Su, X., . . . Wong, M. H. (febrero de 2013). *Cancer risk assessments of Hong Kong soils contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons*. Journal of Hazardous Materials.
- [44]. Ministerio del Ambiente. (2015). *Registro Oficial*. Quito, Ecuador. Obtenido de https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_Registro-Oficial-No-387-04-noviembre-2015_0.pdf
- [45]. Nordberg, G. (2012). *Metales: Propiedad químicas y toxicidad*. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo, Productos químicos.
- [46]. Novelli, M. (abril de 2012). *Consideraciones acerca de la directiva 2004/35/CE Sobre*

- responsabilidad medioambiental. *Revista Jurídica Cognitio Juris*(4), 12.
- [47]. Ñaupari, J. (2019). Land and Soil. En *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People* (págs. 200 - 233). Cambridge: Cambridge University Press.: In UN Environment (Ed.). doi:10.1017/9781108627146.014
- [48]. Omari Ngodhe, S., & Achieng Odhiambo, E. (October de 2018). Effects of Sludge on the Concentration of Heavy Metals in Soil and Plants in Obunga Slum, Kisumu County, Kenya. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*. Kenya. doi:10.19080/IJESNR.2018.15.555907
- [49]. Ortiz Bernad, I., Sanz García, J., Dorado Valiño, M., & Villar Fernández, S. (2007). Técnicas de recuperación de suelos contaminados. informe de vigilancia tecnológica, Comunidad de Madrid.
- [50]. Páya Pérez , A., & Rogríguez Eugenio, N. (2018). Status of local soil contamination in Europe: Revision of the indicator “Progress in the management Contaminated Sites in Europe”. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2760/093804
- [51]. Pennock, D., McKenzie, N., & Montanarella, L. (2016). *Estado Mundial del Recurso Suelo*. Organizacion de Naciones Unidas para la Alimentaci[on y la Agricultura, FAO. Roma: Preparado por el Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo.
- [52]. Peña, C., Carter, D., & Ayala-Fierro, F. (2001). *Toxicología Ambiental*. Southwest Hazardous Waste Program, The University of Arizona, Instituto Nacional de Ciencias de la Salud Ambiental del Gobierno.
- [53]. Plan Galápagos. (2015 - 2020). *Plan de Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Régimen Especial de Galápagos*. Consejo de Gobierno del Régimen Especial de Galápagos , Puerto Baquerizo Moreno, Galápagos, Ecuador.
- [54]. Real Decreto 9/2005. (2005). por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. Ministerio de la Presidencia.
- [55]. Reyes, Y., Vergara , I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, Vol. 16 N° 2.
- [56]. Rodrigo Ilarri, J. (2020). *Modelos Matematicos sobre evaluación de riesgos de suelos contaminados*. Universidad Politécnica de Valencia.
- [57]. Rodriguez Eugenio , N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: Una realidad oculta*. Organización de la naciones unidas para la alimentación y la agricultura, FAO, Roma.
- [58]. Sherene, T. (2010). Mobility and transport of heavy metals in polluted soil environment. *An International Journal, Biological Forum*.
- [59]. Soil Survey Staff. (1951). U.S. Dept. of Agriculture. Soil Conservation Service. Dept. of Agric. Washington, DC: Govt. Print. Off.
- [60]. SRWMP. (2019). *Technical Guidance for Preparation and Submission of a Conceptual Site Model*. New Jersey Department of Environmental Protection.
- [61]. Stewart, R. (2016). *Updates to the Spatial Analysis and Decision Assistance (SADA) Freeware Tool - 16583*. Phoenix, Arizona, USA.

- [62]. Stewart, R., Welsh, C., & Purucker, T. (2009). An Introduction to Spatial Analysis and Decision Assistance (SADA). Environmental Applications for Version 5.
- [63]. Sullivan , T., Armstrong, A., Dindal, A., Jenkins, R., Osleeb, J., & Koglin , E. (2000). Spatial Analysis and Decision Assistance (SADA). Environmental Technology Verification Report , University of Tennessee Research Corporation.
- [64]. Swartjes, F. A. (2011). Dealing with Contaminated Sites. Obtenido de <http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-9757-6>
- [65]. TULSMA. (2003). Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>
- [66]. TULSMA. (29 de marzo de 2017). Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente.
- [67]. Van Liedekerke, M., Masson, J., Paya Perez, A., Jones, A., Geissen, V., Baritz , R., . . . Yang, X. (2018). Regional status of soil pollution: Europe. PROCEEDINGS OF THE GLOBAL SYMPOSIUM ON SOIL POLLUTION, Food and Agriculture Organización of the United Nations (FAO), Roma, Italia.
- [68]. Van Liedekerke, M., Prokop, G., Rabl-Berger, S., Kibblewhite, M., & Louwagie, G. (2014). Progress in the management of Contaminated Sites in Europe. Institute for Environment and Sustainability. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2788/4658
- [69]. Vázquez García, D. (2011). Algunos apuntes sobre la nueva ley de residuos y suelos contaminados. 74-78.

10. ANEXO

10.1. ANEXO I COMPARACIÓN DE LOS NGR DEL REAL DECRETO 9/2005 CON LOS CONTAMINANTES PRIORITARIOS DE LA EPA.

Contaminantes Prioritarios EPA (inglés)	Contaminantes Prioritarios EPA (español)	NGR RD 9 /2005 Protección de salud humana	NGR RD 9/2005 Protección de ecosistemas
Acenaphthene	Acenafteno	✓	✓
Acrolein	Acroleína	X	X
Acrylonitrile	Acrilonitrilo	X	X
Benzene	Benceno	✓	✓
Benzidine	Bencidina	X	X
Carbon tetrachloride	Tetracloruro de carbono	✓	✓
Chlorobenzene	Clorobenceno	✓	✓
1,2,4 - trichlorobenzene	1,2,4 - triclorobenceno	✓	✓
Hexachlorobenzene	Hexacloorobenceno	✓	✓
1,2 - dichloroethane	1,2 - dicloroetano	✓	✓
1,1,1 - trichloroethane	1,1,1 - tricloroetano	✓	✓
Hexachloroethane	Hexacloroetano	✓	✓
1,2 - dochloroethane	1,2 - dicloroetano	✓	✓
1,1,1 - trichloroethane	1,1,1 - tricloroetano	X	X
Hexachloroethane	Hezacloroetano	✓	✓
1,1 - dichloroethane	1,1 - dicloroetano	✓	✓
1,1,2 - trichloethane	1,1,2 - tricloroetano	✓	✓
1,1,2,2 - tetrachloroethane	1,1,2,2 - tetracloroetano	✓	✓
Chloroethane	Cloroetano	X	X
Bis(2 - chloroethyl) ether	Bis (2 - cloroetil) éter	X	X
2 - chloroethyl vinyl ethers	2 - cloroetil vinyl éteres	X	X
2 - chloronaphthalene	2 - cloronaftaleno	X	X
2,4,6 - trichlorophenol	2,4,6 - triclorofenol	✓	✓
Parachlorometa cresol	P Cloro Meta Cresol	X	X
Chloroform	Cloroformo	✓	✓
2 - clorophenol	2 - clorofenol	✓	✓
1,2 - dichlorobenzene	1,2 - diclorobenceno	✓	✓
1,3 - dichlorobenzene	1,3 - diclorobenceno	X	X
1,4 - dichlorobenzene	1,4 - diclorobenceno	✓	✓
3,3 - dichloronenzidine	3,3 - diclorobencidina	X	X
1,1 - dichloroethylene	1,1 - dicloroetileno	✓	X
1,2 - trans - dichloroethylene	1,2 - trans - dicloroetileno	X	X

2,4 - dichlorophenol	2,4 - diclorofenoñ	✓	✓
1,2 - dichloropropane	1,2 - dicloropropano	✓	✓
1,3 - dichloropylene	1,3 - dicloropropileno	X	X
2,4 - dimethylphenol	2,4 - dimetilfenol	X	X
2,4 - dinitrotoluene	2,4 - dinitrotolueno	X	X
2,6 - dinitrotoluene	2,6 - dinitrotolueno	X	X
1,2 - diphenylhydrazine	1,2 - difenilhidracina	X	X
Ethylbenzene	Etilbenceno	✓	✓
Fluoranthene	Fluoranteno	✓	✓
4 - chlorophenyl phenyl ether	4 - clorofenil fenil éter	X	X
4 - bromophenyl phenyl ether	4 - bromofenil fenil éter	X	X
Bis (2 - chloroisopropyl) ether	Bis (2 - cloroisopropyl) éter	X	X
Bis (2 - chloroethoxy) methane	Bis (2 - cloroetoxi) metano	X	X
Methylene chloride	Cloruro de metileno	X	X
Methyl chloride	Cloruro de metilo	X	X
Methyl bromide	Bromuro de metilo	X	X
Bromoform	Bromoformo	X	X
Dichlorobromomethane	Diclorobromometano	X	X
Chlorodibromomethane	Clorodibromometano	X	X
Hexachlorobutadiene	Hexacloro butadieno	✓	✓
Hexachlorocyclopentadiene	Hexaclorociclopentadieno	X	X
Isophorone	Isoforona	X	X
Naphthalene	Naftalina	✓	✓
Nitrobenzene	Nitronenceno	X	X
2 - nitrophenol	2 - nitrofenol	X	X
4 - nitrophenol	4 - nitrofenol	X	X
2,4 - dinitrophenol	2,4 - dinitrofenol	X	X
4,6 - dinitro - o - cresol	4,6 - dinitro - o - cresol	X	X
N - nitrosodimethylamine	N - nitrosodimetilamina	X	X
N - nitrosodiphenylamine	N - nitrosodifenilamina	X	X
N - nitrosodi - n - propylamine	N - nitrosodi - n - propilamina	X	X
Pentachlorophenol	Pentaclorofenol	✓	✓
Phenol	Fenol	✓	✓
Bis (2 - ethylhexyl) phthalate	Bis (2 - etilhexil) ftalato	X	X
Butyl nezy l phthalate	Butil bencil ftalato	X	X
Di - N - Butyl phthalate	Ftalato de Di - N - Butilo	X	X
Di - n - octyl phthalate	Di - n - octil ftalato	X	X
Diethyl Phthalate	Ftalato de dietilo	X	X
Dimethyl Phthalate	Dimetil Ftalato	X	X
Benze (a) anthracene	Benzo(a) antraceno	✓	✓
Benzo(a) pyrene	Benzo(a) pireno	✓	✓
Benzo(b) fluoranthene	Benzo(b) fluoranteno	✓	✓

Benzo(k) fluotanthene	Benzo(k) fluoranteno	✓	✓
Chrysene	Criseno	✓	✓
Acenaphthylene	Acenaftileno	X	X
Anthracene	Antraceno	✓	✓
Benzo(ghi) perylene	Benzo(ghi) perileno	X	X
Fluorene	Fluoreno	✓	✓
Phenanthrene	Fenantreno	X	X
Dibenzo(a,h) anthracene	Dibenzo(a,h) antraceno	✓	✓
Indeno (1,2,3 - cd) pyrene	Indeno (1,2,3 - cd) pireno	✓	✓
Pyrene	Pireno	✓	✓
Tetrachloroethylene	Tetracloroetileni	✓	✓
Toluene	Tolueno	✓	✓
Trichloroethylene	Tricloroetileno	✓	✓
Vinyl chloride	Cloruro de vinilo	✓	X
Aldrin	Aldrin	✓	✓
Dieldrin	Dieldrin	✓	✓
Chlordane	Clordano	✓	✓
4,4 - DDT	4,4 - DDT	✓	✓
4,4 - DDE	4,4 - DDE	✓	✓
4,4 - DDD	4,4 - DDD	✓	X
Alpha - endosulfan	Alpha - endosulfán	X	X
Beta - endosulfan	Beta - endosulfán	X	X
Endosulfan sulfate	Sulfato de endosulfán	X	X
Endrin	Endrin	✓	✓
Endrin aldehyde	Aldehído de endrina	X	X
Heptachlor	Heptacloro	X	X
Heptachlor epoxide	Epóxido de Heptacloro	X	X
Alpha - BHC	Alpha - BHC	✓	✓
Beta - BHC	Beta - BHC	✓	✓
Gamma - BHC	Gamma - BHC	✓	✓
Delta - BHC	Delta - BHC	X	X
PCB - 1242 (Arochlo 1242)	PCB - 1242 (Aroclor 1242)	X	X
PCB - 1254 (Arochlor 1254)	PCB - 1254 (Aroclor 1254)	X	X
PCB - 1221 (Arochlor 1221)	PCB - 1221 (Aroclor 1221)	X	X
PCB - 1232 (Arochlor 1232)	PCB - 1232 (Aroclor 1232)	X	X
PCB - 1248 (Arochlor 1248)	PCB - 1248 (Aroclor 1248)	X	X
PCB - 1260 (Arochlor 1260)	PCB - 1260 (Aroclor 1260)	X	X
PCB - 1016 (Arochlor 1016)	PCB - 1016 (Aroclor 1016)	X	X
Toxaphene	Toxafeno	X	X
Antimony	Antimonio	X	X
Arsenic	Arsénico	X	X
Asbestos	Amianto	X	X
Beryllium	Berilio	X	X

Cadmium	Cadmio	X	X
Chromium	Cromo	X	X
Copper	Cobre	X	X
Cyanide, Total	Cianuro, Total	X	X
Lead	Plomo	X	X
Mercury	Mercurio	X	X
Nickel	Níquel	X	X
Selenium	Selenio	X	X
Silver	Plata	X	X
Thalliom	Talio	X	X
Zinc	Zinc	X	X
2,3,7,8 - TCDD	2,3,7,8 - TCDD	X	X

Los metales pesados que se muestran en la U.S. Environmental Protection Agency (EPA) no se consideran contaminantes prioritarios en el Real Decreto 9/2005 pues no se cuenta con valores de NGR.

10.2. ANEXO II: FICHAS TOXICOLÓGICAS DE LOS METALES PESADOS DE ANÁLISIS EN LOS EMPLAZAMIENTOS DE ESTUDIO.

ARSÉNICO (As)		CASRN 7440-38-2
Parámetros físicos - químicos		
ABS	Adim.	1.00E-03
PEF	(m ³ /kg)	1.36E+07
Parámetros Toxicológicos		
	Dosis de referencia vía oral	RfD _o (mg/kg·d) 3.00E-02
	Dosis de referencia vía dérmica	RfD _d (mg/kg·d) 1.23E+00
	Dosis de referencia vía inhalatoria	RfD _i (mg/kg·d) 1.50E+00
	Factor pendiente vía oral	SF _o (mg/kg·d) ⁻¹ 1.50E+00
	Factor pendiente vía dérmica	SF _d (mg/kg·d) ⁻¹ 3.66E+00
	Factor pendiente vía inhalatoria	SF _i (mg/kg·d) ⁻¹ 4.30E+00
Efectos para la salud humana		
Vías de exposición:	inhalación, ingestión y penetración cutánea	
Síntomas:	Dolor abdominal y epigástrico, calambres musculares, pérdida de apetito, náuseas, vómito, diarrea, debilidad y pérdida de conocimiento, pérdida de cabello, pérdida de peso y trastornos mentales.	
Efectos de exposición a corta duración		
Afectación al tracto gastrointestinal, provocando gastroenteritis grave, pérdida de fluidos y electrolitos, alteraciones cardíacas y convulsiones. Los efectos no se pueden presentar de forma inmediata.		
Efectos de exposición prolongada o repetida		
El metal puede ocasionar afectación a las membranas mucosas, piel, sistema nervioso periférico, hígado y médula ósea, produciendo desordenes en la pigmentación, anemia y alteraciones hepáticas. Así como, trastornos cutáneos y vasculares, neuropatía, gastroenteritis, hepatotoxicidad y anomalías hematológicas. Este elemento es considerado cancerígenos para los seres humanos.		
Inhalación del metal		
Puede producir el daño de las membranas mucosas, causar rinitis, faringitis y laringitis, rinofaringitis, traqueobronquitis, dermatitis, hiperpigmentación e hiperqueratosis, leucopenia, disfunción del nervio periférico, hemólisis, hemoglobinuria, ictericia, anemia hemolítica y necrosis.		
Ingestión del metal		
Al ingerir este metal se puede producir diversos tipos de cáncer: piel, hígado, vejiga, tracto respiratorio y gastrointestinal. Las exposiciones severas pueden resultar en encefalopatía aguda, insuficiencia cardíaca congestiva, estupor, convulsiones, parálisis, coma y muerte		

Metal clasificado por la IARC como grupo 1 (Carcinógeno en Humanos)

COBRE (Cu) CASRN 7440-50-8

Parámetros físicos - químicos

ABS	Adim.	1.00E-03
BVtub	Adim.	0.2
BVhor	Adim.	0.2
BVleg	Adim.	0.2
PEF	(m ³ /kg)	1.36E+07

Parámetros Toxicológicos

Dosis de referencia vía oral	RfD _o (mg/kg-d)	4.00E-02
Dosis de referencia vía dérmica	RfDd(mg/kg-d)	1.20E-02

Efectos para la salud humana

Vias de exposición: inhalación, ingestión y penetración cutánea
 Síntomas: Tos, dolor de cabeza, jadeo, dolor de garganta al inhalar el metal, enrojecimiento de piel y ojos, dolor abdominal, náuseas y vómito al ingerir el metal.

Efectos de exposición a corta duración

Ocasiona fiebre al inhalar humo metálico

Efectos de exposición prolongada o repetida

Este tipo de efecto puede producir sensibilización de piel.

Inhalación del metal

La inhalación de polvo, humos o nieblas de sales de Cu puede causar congestión nasal y úlceras con perforación del tabique nasal

Ingestión del metal

Al ingerir grandes cantidades puede producir muerte del individuo
 Al tener contacto el metal con el agua puede producir irritación de tracto gastrointestinal

Efectos en ecosistemas

No se encuentra disponible datos ecotóxicos

La EPA clasifica al cobre como Grupo D mientras que, por la AIRC se lo clasifica como Grupo 3, ambas instituciones designan al Cu como no cancerígenos para seres humanos.

PLOMO (Pb) CASRN 7439-92-1

Parámetros físicos - químicos

ABS	Adim.	1.00E-03
BVtub	Adim.	0.17
BVhor	Adim.	0.17
BVleg	Adim.	0.17
PEF	(m ³ /kg)	1.36E+07

Parámetros Toxicológicos

Factor pendiente vía oral	SFo(mg/kg-d) ⁻¹	8.50E-03
Factor pendiente vía dérmica	SFd(mg/kg-d) ⁻¹	8.50E-03
Factor pendiente vía inhalatoria	SFi(mg/kg-d) ⁻¹	1.20E-02

Efectos para la salud humana

Vías de exposición: inhalación, ingestión y penetración cutánea

Síntomas:

El plomo es un tóxico multidireccional que causa efectos en el tracto gastrointestinal, el sistema hematopoyético, el sistema cardiovascular, los sistemas nerviosos central y periférico, los riñones, el sistema inmunológico y el sistema reproductivo, subencefalopáticos del sistema nervioso central.

Efectos de exposición prolongada o repetida

El metal al acumularse en el tejido óseo afecta a la médula ósea, también afecta al sistema nervioso central, sistema nervioso periférico y riñón, produciendo anemia, encefalopatía, alteraciones del sistema nervioso periférico, calambres abdominales y afecciones renal.

Ingestión del metal

La ingestión del metal prolongada es absorbida por la sangre y no se elimina en la orina, ciertas cantidades se depositan en el hígado, riñones, huesos entre otros tejidos. Provocando posible deterioro mental y conducta agresiva, parálisis de los músculos de las manos y pies.

Efectos en ecosistemas

Los efectos producidos por el metal son muy tóxicos, siendo altamente tóxico en medio acuático y terrestre.

Metal clasificado por la IARC como Grupo 2B (Posible carcinógeno para el hombre).