

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN SUELOS**



**“METALES EN SUELOS EXPLOTADOS POR LA PEQUEÑA  
MINERÍA AURÍFERA ALUVIAL EN MADRE DE DIOS, PERÚ”**

**Presentada por:**

**MANUEL GABRIEL VELÁSQUEZ RAMIREZ**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER SCIENTIE EN  
SUELOS**

**Lima – Perú**

**2017**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA  
ESCUELA DE POSGRADO**

**“METALES EN SUELOS EXPLOTADOS POR LA PEQUEÑA  
MINERÍA AURÍFERA ALUVIAL EN MADRE DE DIOS, PERÚ”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAGISTER SCIENTIE**

**Presentada por:**

**MANUEL GABRIEL VELÁSQUEZ RAMIREZ**

**Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:**

-----  
Mg.Sc. Victor Miyashiro Kiyan

**PRESIDENTE**

-----  
Mg.Sc. Juan Guerrero Barrantes

**PATROCINADOR**

-----  
Mg.Sc. Rubén Bazán Tapia

**CO – PATROCINADOR**

-----  
Mg.Sc. Julio Nazario Ríos

**MIEMBRO**

-----  
Mg.Sc. Lily Tello Peramás

**MIEMBRO**

**Dedicatoria:**

A mi familia

## **Agradecimientos**

A mi familia, la cual siempre estuvo respaldándome cada paso y emprendimiento.

A la ONG Solidaridad quién creyó en mí y financió la tesis.

A los mineros de la Sociedad Minera Fortuna Milagritos S.R.L. quienes colaboraron en todo momento.

A mi amiga Elizabeth Maribel Minaya Gil por su persistente apoyo en la investigación.

## ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN .....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1	LA MINERÍA ALUVIAL AURÍFERA EN MADRE DE DIOS .....	3
2.2	MÉTODO DE EXPLOTACIÓN DE LA PEQUEÑA MINERÍA AURÍFERA ALUVIAL.....	4
2.3	IMPACTOS AMBIENTALES DE LA MINERÍA AURÍFERA ALUVIAL EN MADRE DE DIOS.....	7
2.4	CALIDAD DEL SUELO .....	8
2.5	METALES EN EL SUELO .....	12
2.6	DETERMINACIÓN DE METALES POR LA ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ATÓMICA DE PLASMA ACOPLADO INDUCTIVAMENTE (ICP-AES).....	27
2.7	MARCO NORMATIVO NACIONAL E INTERNACIONAL .....	29
2.8	ANÁLISIS MULTIVARIADO APLICADA A LA CARACTERIZACIÓN DE METALES EN EL SUELO Y GEOESTADÍSTICA .....	32
III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	35
3.1	UBICACIÓN.....	35
3.2	MATERIALES Y EQUIPOS.....	36
3.3	CARACTERÍSTICAS GENERALES NATURALES.....	36
3.4	EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS METALES EN EL SUELO.....	39
3.5	EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS IMPACTADOS.....	42
3.6	PROCEDIMIENTO DE MUESTREO, PRESERVACIÓN DE LAS MUESTRAS Y MEDIDAS PARA ASEGURAR LA CALIDAD DEL MUESTREO.....	44
3.7	EVALUACIONES .....	46
IV.	RESULTADO Y DISCUSIÓN .....	47
4.1	EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LOS SUELOS IMPACTADOS .....	47
4.2	EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE METALES.....	62
V.	CONCLUSIONES .....	122
VI.	RECOMENDACIONES .....	124
VII.	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA .....	125
VIII.	ANEXO.....	130

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Estándares de Calidad Ambiental para Suelos .....	10
Cuadro 2: Valores guía de calidad de suelo en Canadá .....	11
Cuadro 3: Movilidad relativa y la disponibilidad de metales.....	13
Cuadro 4: Especies de plomo .....	17
Cuadro 5: Especies de Zinc .....	25
Cuadro 6: Coordenadas del área de estudio seleccionada .....	35
Cuadro 7: materiales y equipos .....	36
Cuadro 8: Tipo de área y sub área de potencial interés.....	39
Cuadro 9: Número de puntos de muestreo correspondientes a cada estrato .....	40
Cuadro 10: Parámetros a evaluar en la calidad de suelo .....	40
Cuadro 11: Mapas empleados en la evaluación de las características morfológicas, físicas y químicas de los suelos impactados.....	42
Cuadro 12: Parámetros evaluados en laboratorio.....	43
Cuadro 13: Parámetros de evaluados en las calicatas .....	43
Cuadro 14: Unidad cartográfica y su característica.....	44
Cuadro 15: Condiciones para asegurar la calidad de la muestra.....	44
Cuadro 16: Evaluaciones.....	46
Cuadro 17: Cartilla del suelo en el área recientemente impactada (R) .....	49
Cuadro 18: Cartilla del perfil del suelo en el área impactada hace 6-7 años (T1).....	51
Cuadro 19: Cartilla del perfil del suelo en el área impactada hace 7-8 años (T2).....	53
Cuadro 20: Cartilla del perfil del suelo en el área natural no impactada (N1) .....	55
Cuadro 21: Cartilla del perfil de suelo del área natural no impactada (N2).....	57
Cuadro 22: Cartilla del perfil del suelo del área natural no impactada (N3).....	59
Cuadro 23: Concentración de metales en suelos ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) de áreas impactadas por la minería aurífera aluvial y en suelos del área natural o nivel de fondo .....	62
Cuadro 24: Estadigrama de la concentración metales ( $n=90$ ) en suelos de áreas impactadas por la minería aurífera aluvial .....	62
Cuadro 25: Concentración de metales de suelo de áreas impactadas y el ECA para suelos de Perú y Canadá.....	64
Cuadro 26: Concentración de metales ( $n=3$ ) en suelos del área naturales o nivel de fondo .....	65
Cuadro 27: Prueba de comparación de medianas Mann Whitney.....	65
Cuadro 28: Concentración de metales en el suelo sugeridos por diferentes autores .....	66
Cuadro 29: Contenido de metales en la zona de amortiguamiento de Tambopata.....	66
Cuadro 30: Concentración de metales en el perfil del suelo de áreas naturales o no impactadas ...	68
Cuadro 31: Concentración de metales de suelo y sedimentos en Madre de Dios .....	74

Cuadro 32: Medianas y medias de los metales evaluados.....	77
Cuadro 33: Características variográficas de los metales .....	77
Cuadro 34: Concentración de As y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas.....	81
Cuadro 35: Coeficiente de correlación de la concentración de As con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo.....	81
Cuadro 36: Concentración de Ba y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas.....	85
Cuadro 37: Coeficiente de correlación de la concentración de Ba con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo.....	85
Cuadro 38: Concentración de Cd y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas.....	89
Cuadro 39: Coeficiente de correlación de la concentración de Cd con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo.....	89
Cuadro 40: Concentración de Pb y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas.....	93
Cuadro 41: Coeficiente de correlación de la concentración de Pb con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo.....	93
Cuadro 42: Concentración de Cu y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas.....	97
Cuadro 43: Coeficiente de correlación de la concentración de Cu con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo.....	97
Cuadro 44: Concentración de Cr y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas.....	101
Cuadro 45: Coeficiente de correlación de la concentración de Cr con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo.....	101
Cuadro 46: Concentración de Ni y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas.....	105
Cuadro 47: Coeficiente de correlación de la concentración de Ni con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo.....	105
Cuadro 48: Concentración de V y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas.....	109
Cuadro 49: Coeficiente de correlación de la concentración de V con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo.....	109
Cuadro 50: Concentración de Zn y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas.....	113

Cuadro 51: Coeficiente de correlación de la concentración de Zn con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo.....	113
Cuadro 52: Correlaciones de Pearson de la concentración metales de suelos impactados por la minería aurífera aluvial .....	117
Cuadro 53: Análisis de componentes principales de la concentración metales de suelos impactados por la minería aurífera aluvial .....	117
Cuadro 54: Método de extracción de componentes principales de la concentración metales de suelos impactados por la minería aurífera aluvial .....	117
Cuadro 55: Asociación de metales en suelos de áreas impactadas .....	119

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Precio internacional anual del oro y producción anual de oro a nivel nacional y en Madre de Dios .....	4
Figura 2: Deforestación y extracción de sedimentos.....	6
Figura 3: Disposición de agua a ser empleado en la “traca” .....	6
Figura 4: El agua y los sedimentos pasan por la “Traca” a través de materiales fibrosos que retendrán las gravas auríferas .....	6
Figura 5: Partes del variograma .....	34
Figura 6: Ubicación del área evaluada .....	35
Figura 7: Precipitación pluvial mensual desde el año 2011 al 2015 .....	38
Figura 8: Temperatura máxima y mínima mensual desde el año 2011 al 2015 .....	38
Figura 9: Mapa de ubicación del área de estudio en la asociación minera FORTUMIL .....	41
Figura 10: Mapa Base .....	45
Figura 11: Vegetación de las áreas recientemente impactada (R).....	48
Figura 12: Vegetación del área impactada hace 6-7 años (T1) .....	50
Figura 13: Vegetación del área impactada hace 7-8 años (T2) .....	52
Figura 14: Vegetación del área natural no impactada (N1).....	54
Figura 15: Vegetación del área natural no impactada (N2).....	56
Figura 16: vegetación del área natural no impactada (N3).....	58
Figura 17: Diagrama de cajas de la concentración de metales en suelos de áreas impactadas por la minería aurífera aluvial .....	63
Figura 18: Concentración de metales en el perfil del suelo natural no impactado N1 .....	69
Figura 19: Materia orgánica, arcilla y CIC en el perfil del suelo natural no impactado N1 .....	69
Figura 20: Concentración de metales en el perfil del suelo natural no impactado N2 .....	70
Figura 21: Materia orgánica, arcilla y CIC en el perfil del suelo natural no impactado N2 .....	70
Figura 22: Concentración de metales en el perfil del suelo natural no impactado N3 .....	71

Figura 23: Materia orgánica, arcilla y CIC en el perfil del suelo natural no impactado N3 .....	71
Figura 24: Concentración de metales en el perfil del suelo natural no impactado T1 .....	72
Figura 25: Materia orgánica, arcilla y CIC en el perfil del suelo natural no impactado T1 .....	72
Figura 26: Concentración de metales en el perfil del suelo de áreas impactadas T2 .....	73
Figura 27: Materia orgánica, arcilla y CIC en el perfil del suelo natural no impactado T2 .....	73
Figura 28: Fórmula de la función variograma gaussiana .....	76
Figura 29: Variograma del Ar y Ba .....	78
Figura 30: Variograma del Cd y Pb .....	78
Figura 31: Variograma del Cr y Cu .....	78
Figura 32: Variograma del Ni y V .....	79
Figura 33: Variograma del Zn .....	79
Figura 34: Coeficiente de correlación de la concentración de As con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo .....	81
Figura 35: Concentración de As y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas .....	82
Figura 36: Concentración de arsénico en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera .....	83
Figura 37: Coeficiente de correlación de la concentración de Ba con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo .....	85
Figura 38: Concentración de Ba y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas .....	86
Figura 39: Concentración de bario en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera .	87
Figura 40: Coeficiente de correlación de la concentración de Ba con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo .....	89
Figura 41: Concentración de Cd y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas .....	90
Figura 42: Concentración de cadmio en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera .....	91
Figura 43: Coeficiente de correlación de la concentración de Pb con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo .....	93
Figura 44: Concentración de Pb y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas .....	94
Figura 45: Concentración de plomo en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera	95
Figura 46: Coeficiente de correlación de la concentración de Cu con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo .....	97

Figura 47: Concentración de Cu y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas.....	98
Figura 48: Concentración de cobre en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera.	99
Figura 49: Coeficiente de correlación de la concentración de Cr con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo.....	101
Figura 50: Concentración de Cr y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas.....	102
Figura 51: Concentración de cromo en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera .....	103
Figura 52: Coeficiente de correlación de la concentración de Ni con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo.....	105
Figura 53: Concentración de Ni y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas.....	106
Figura 54: Concentración de níquel en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera .....	107
Figura 55: Coeficiente de correlación de la concentración de V con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo.....	109
Figura 56: Concentración de V y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas.....	110
Figura 57: Concentración de vanadio en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera .....	111
Figura 58: Coeficiente de correlación de la concentración de Zn con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo.....	113
Figura 59: Concentración de Zn y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas.....	114
Figura 60: Concentración de zinc en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera	115
Figura 61: Método de extracción de componentes principales de la concentración metales de suelos impactados por la minería aurífera aluvial .....	118
Figura 62: Dendograma de metales basados en el coeficientes de Pearson .....	119
Figura 63: Hospedaje y herramientas de trabajo .....	130
Figura 64: Reconocimiento del campo.....	131
Figura 65: proceso de elaboración de la calicata.....	132
Figura 66: Evaluación de la calicata .....	132
Figura 67: Muestreo superficial de suelo para la evaluación de la calidad .....	133
Figura 68: Muestreo del perfil del suelo para evaluar las características y propiedades físicas y químicas del suelo .....	133

Figura 69: Muestras rotuladas en bolsas herméticas y listas para el análisis .....	134
Figura 70: Suelo en proceso de secado al ambiente .....	134
Figura 71: Análisis de la materia orgánica del suelo.....	135
Figura 72: Análisis de la textura del suelo .....	135
Figura 73: Análisis del fósforo del suelo .....	136
Figura 74: Proceso de titulación de muestras de suelo.....	136
Figura 75: Certificado de acreditación de laboratorio.....	137

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

ANEXO 1: Fotos.....	130
ANEXO 2: Certificado de acreditación de laboratorio .....	137

## RESUMEN

La región Madre de Dios es considerada la “Capital de la Biodiversidad del Perú”; sin embargo, su riqueza sufre la deforestación, pérdida de suelo y posible contaminación por mercurio a causa de la minería aurífera aluvial. La investigación se realizó en la comunidad de Fortuna en las concesiones de la empresa comunal Sociedad Minera Fortuna Milagritos S.R.L. El objetivo de la investigación fue evaluar el grado de contaminación de suelos por metales pesados en una concesión minera aurífera aluvial y evaluar las características morfológicas, físicas y químicas de los suelos impactados. Se determinó 13 ha de potencial interés con tres tipos de sub áreas: impactada recientemente, impactada hace años (6-7 años) y no impactada. Los suelos impactados son poco fértiles. Sus características químicas están dadas por una fuerte reacción acida (4.24 pH a 5.19 pH), sin problemas de sales (0.03 dS/m a 0.11 dS/m) y carbonatos. Los niveles de materia orgánica (0.03% a 2.08%) , capacidad de intercambio catiónico ( 6.88 Cmol(+) kg<sup>-1</sup> a 23.84 Cmol(+) kg<sup>-1</sup> ) y potasio son bajos (18 mg kg<sup>-1</sup> a 86 mg kg<sup>-1</sup> ), y de fósforo es alto (55 mg kg<sup>-1</sup> a 171 mg kg<sup>-1</sup> ) . La textura del suelo es gruesa y no presenta estructura. Se emplearon análisis multivariados y geoestadísticos que indicaron que el contenido promedio total de As, Ba, Pb, Cu, Cr, Ni, V y Zn fue respectivamente 1.90, 29.80, 4.60, 7.93, 7.95, 12.67, 12.03 y 26.65 mg kg<sup>-1</sup>, sin contaminación de acuerdo a los estándares de calidad ambiental peruano (DS 002-2013 MINAM) y canadiense (CCME, 1997). Ello se debería a la volatilización (Hg), disminución de la capacidad de retención de metales por el bajo contenido de arcilla, de materia orgánica de estos suelos e intensa precipitación pluvial que activa los procesos de lixiviación.

Palabra clave: Suelos, minería aurífera aluvial, metales y fertilidad.

## ABSTRACT

Madre de Dios is the region considered the "Capital of Peruvian Biodiversity"; however, it suffers deforestation, soil erosion and possible mercury contamination caused by the alluvial gold mining. The research was carried out at an alluvial gold mining concession in Fortuna community of Madre de Dios. The main objective were the evaluation of soil contamination degree by heavy metals and the evaluation of morphological, physical and chemical characteristics of impacted soils by the alluvial gold mining. It was determined 13 ha with potential interest. There were three types of sub-areas: recently impacted, impacted (6 to 7 years ago) and non-impacted. The impacted soils fertility is low. Its chemical characteristics are strong acid reaction (4.24 pH to 5.19 pH), without salt problems (0.03 dS / m to 0.11 dS / m) and carbonates. The levels of organic matter (0.03% to 2.08%), cation exchange capacity (6.88 Cmol (+) kg<sup>-1</sup> to 23.84 Cmol (+) kg<sup>-1</sup>) and potassium are low (18 mg kg<sup>-1</sup> to 86 mg kg<sup>-1</sup>), and phosphorus is high (55 mg kg<sup>-1</sup> to 171 mg kg<sup>-1</sup>). There is coarse textured with no structure. It was applied multivariate and geostatistical analyzes which indicated that the total average content of As, Ba, Pb, Cu, Cr, Ni, V and Zn were respectively 1.90, 29.80, 4.60, 7.93, 7.95, 12.67, 12.03 and 26.65 mg kg<sup>-1</sup>, without any contamination according to Peruvian (DS 002-2013 MINAM) and Canadian (CCME, 1997) environmental quality standards. These result might be caused by volatilization (Hg), reduced metal retention capacity due to the low clay content, organic matter of these soils and the intense rainfall that activates leaching processes.

Key words: Soil, alluvial gold mining, metal and fertility

## I. INTRODUCCIÓN

El sector minero e hidrocarburo del país contribuyó al PBI nacional entre 12.1% a 8.4% desde el año 2007 al año 2014 (INEI, 2008). Al año 2013, el oro aportó 4% al PBI (World Gold Council, 2014) y su precio internacional fue \$1,200\$/onz. La minería aurífera aluvial produjo el 17% de la producción de oro del país, del cual 70% provino de la Región de Madre de Dios (USGS, 2007). La principal actividad económica de esta región es la pequeña y mediana minería, la cual representó hasta el 50% de su PBI regional. Se estima que la recuperación del oro es de 28.61 kg/día y aproximadamente 10.3 t/ año (Salinas, 2007).

Las actividades mineras se han expandido de 842 ha en el año 1987 a 32,750 ha en el año 2011 (MINAM 2015). Al año 2009, se deforestaron 18,000 ha de bosque (Alvarez *et al.*, 2011). Se estima que desde 1980 se habrían vertido 3,000 t de mercurio a los ríos amazónicos (Webb, 2004 citado por Álvarez *et al.*, 2011). También se considera que al día son removidos 154,693m<sup>3</sup> de suelos y se pierden 390,508 t año<sup>-1</sup> de suelo, el cual es equivalente a la pérdida de 1.3 t ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> (PROMANU, 2009 citado por Gómez, 2013).

Publicaciones del Ministerio de Energía y Minas (MINEM, 1997), Ministerio de Ambiente (Alvarez *et at*, 2011) organismos relacionados mostraron los impactos sociales y ambientales de la minería aurífera aluvial, principalmente sobre el efecto del mercurio en organismos vivos como peces y la población humana. Hay investigaciones relacionadas a la rehabilitación de áreas deforestadas mediante al revegetación; sin embargo, aún no hay reportes que evidencian la contaminación de suelos.

La presente investigación plantea el estudio del grado de contaminación de suelos por metales como Ba, As, Cd, Hg, Pb, Cu, V, Zn, Ni y Cr en territorios de explotación por la pequeña minería aurífera aluvial de Madre de Dios. Se basó en técnicas de estudio que cumplieran los procedimientos propuestos por los Estándares de Calidad Ambiental para Suelos (MINAM, 2013), Guía de Muestreo de Suelos (MINAM, 2014) y Reglamento de Levantamiento de Suelos (MINAG, 2010).

La investigación se realizó en la comunidad de Fortuna en las concesiones de la empresa comunal Sociedad Minera Fortuna Milagritos S.R.L. (FORTUMIL). Esta empresa se dedica a la pequeña minería y emplea la tecnología llamada “Traca”. Esta empresa como otras, presentan problemas por el incumplimiento del marco legal peruano sobre minería aurífera aluvial por no elaborarse adecuadamente el Instrumento de Gestión Ambiental Correctivo (MINAM, 2012) que permita rehabilitar áreas degradadas. La ONG Solidaridad Network, quien aportó a la presente investigación, viene trabajando en la formalización de mineros para obtener una producción menos degradadora del ambiente y que plantee medidas para rehabilitar las áreas degradadas.

Así, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el grado de contaminación de suelos por los metales (Ba, As, Cd, Hg, Pb, Cu, V, Zn, Ni y Cr) en áreas de explotación por la pequeña minería aurífera aluvial en Madre de Dios. Los objetivos secundarios fueron los siguientes:

- Evaluar la concentración y distribución espacial de los metales Ba, As, Cd, Hg, Pb, Cu, V, Zn, Ni y Cr.
- Evaluar las características morfológicas, físicas y químicas de los suelos impactados

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

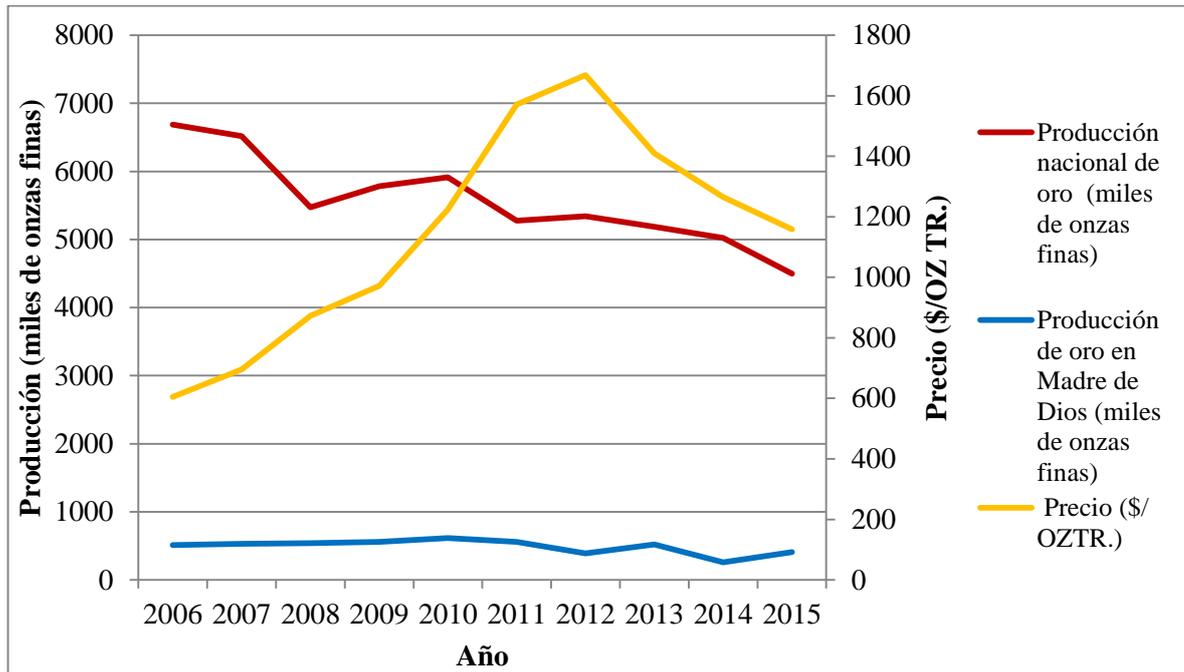
### 2.1 LA MINERÍA ALUVIAL AURÍFERA EN MADRE DE DIOS

La región de Madre de Dios se encuentra ubicada en la parte sur oriental del territorio Nacional y presenta un área de 85,182 km<sup>2</sup> que es el 15% de la Selva peruana. Es la región menos poblada del país, al contar con 109,555 habitantes, representando el 0.4% de la población nacional para el 2007 (INEI, 2008), y presenta una tasas de crecimiento anual de 3.4%. Debido a la inmigración, Madre de Dios tiene una de las tasas más altas de crecimiento del país (Álvarez et. al 2011). La población que presenta al menos una necesidad insatisfecha fue 28.2% de la región (INEI, 2015).

A nivel mundial Perú ocupa el 5° lugar de producción Aurífera, siendo China el 1° con 462 t al año 2014 (World Gold Council, 2015). En el país, el sector minero y servicios conexos aportó al PBI nacional entre 12.1% a 8.4% desde el año 2007 al año 2014 (INEI, 2015); mientras al año 2013, el oro aportó el 4% del PBI (World Gold Council, 2014). Al año 2014, la producción nacional aurífera fue 140 t, de la cual Madre de Dios produjo 5.74% (MINEM, 2015). El mismo año, la pequeña minería fue responsable del 6.92% de la producción aurífera nacional, mientras el resto fue producido por la mediana minería y gran minería (MINEM, 2015). La recuperación promedio de oro es de 28.61 kg día<sup>-1</sup>, extrayéndose aproximadamente 10.3 t año<sup>-1</sup>. Según el INGEMMET en el año 1996, la ley promedio de la región fue 0.31g m<sup>-3</sup> de oro (Salinas, 2007). Por otro lado el precio internacional del oro varió de 445 US\$ /OZ TR a 1,266 US\$ /OZ TR entre el año 2005 al año 2014 (MINEM, 2015)

La actividad minera aurífera representó el 50% del PBI regional (Poveda 2006, citado por Gómez 2013) y de ella solo se percibió solo S/. 42,000 por canon minero, a pesar que se estima el valor del oro extraído a S/. 1,600 millones anuales. Así el estado dejó de percibir entre 50 y 200 millones de soles en impuestos (Álvarez *et al.*, 2011).

En la figura 1 y figura 2 se muestra la producción de oro nacional y en la región de Madre de Dios; también se muestra el precio internacional anual al año 2014.



**Figura 1: Precio internacional anual del oro y producción anual de oro a nivel nacional y en Madre de Dios**

FUENTE: MINEM (2016)

## 2.2 MÉTODO DE EXPLOTACIÓN DE LA PEQUEÑA MINERÍA AURÍFERA ALUVIAL

El proceso de explotación minera aurífera aluvial consiste en: extracción de sedimentos, lavado de sedimentos, recuperación de gravas auríferas, amalgamación, recuperación del mercurio y rehogado de la amalgama (Salinas, 2007).

Actualmente las OMAPE (Organización de Minería Artesanal y de Pequeña Escala) emplean el equipo llamado “traca” que es equipo móvil que extrae sedimentos y selecciona gravas auríferas. Se ubica en una balsa compuesta por una plataforma de madera sobre dos canoas, una manguera de succión con bomba y, en la parte superior, un techo provisto de una zaranda y canaleta. Succiona sedimentos directamente del lecho del río, playas inundables y acantilados a través de mangueras (4”). El material succionado pasa a por un contenedor ubicado en el piso; incluye una zaranda y una canaleta provista de alfombras sobre el que se deposita las gravas auríferas. Las gravas y partículas gruesas no usadas son depositados en el piso llamado “playa” y las

partículas finas, luego de discurrir a lo largo de la canaleta, se dirigen en dirección del curso de agua o cauce de río (Salinas, 2007).

Este método de extracción se emplea en piedemonte y en terrazas de llanura. Se realiza en piso firme y puede ser ejecutado todo el año. Como se aprecia en la figura 2, figura 3 y figura 4, la característica del área de trabajo es la deforestación, empleo del agua local y formación de aberturas irregulares en la superficie que puede alcanzar profundidades de 20m (Álvarez *et al.*, 2011) hasta más de 30 m.

Según Salinas (2007), el proceso de obtención del oro a partir de la grava aurífera es:

- **Recuperación de la arena aurífera:** Se realiza entre la explotación y recuperación metalúrgica del oro. Se emplea bateas, canaletas (con yute) y abundante agua para clasificar y lavar el oro. El oro en “pepita” puede ser recuperados manualmente.
- **Amalgamación:** Se amalgaman las gravas auríferas recién separadas. La proporción en peso utilizada para la recuperación de mercurio llega hasta 10 g de mercurio por 1 g de oro. La mezcla de arena con el mercurio es realizada manualmente.
- **Recuperación del mercurio:** La amalgama de mercurio más el oro se recuperan con bateas y agua, después de mezclarse es exprimido en telas y se obtiene una “perla” o “botón” de amalgama más mercurio. Su proporción es 60% de mercurio y 40% de oro. Esta operación puede efectuarse en las orillas del río, donde por falta de pericia o manipuleo se vierte parte de la amalgama al río (Panez, 2013).
- **Refogado de la amalgama:** La amalgama más mercurio o “perla” es colocada en un recipiente de metal para el refogado. Se realiza colocandola sobre una cocina o soplete obteniendo el oro refogado. Por lo general es realizado en cocinas de campamentos (76%), pero también se realiza al aire libre (24%). Del total volatizado, 50% o 60% es dispersado, el resto se vuelve líquido y cae alrededor del área local (EVAT, 1997 citado por Panez, 2013).



**Figura 2: Deforestación y extracción de sedimentos**

FUENTE: [www.porlatierra.org](http://www.porlatierra.org)



**Figura 3: Disposición de agua a ser empleado en la “traca”**

FUENTE: [www.alertaambiental.pe](http://www.alertaambiental.pe)



**Figura 4: El agua y los sedimentos pasan por la “Traca” a través de materiales fibrosos que retendrán las gravas auríferas**

FUENTE: [observatoriodelsur.wordpress.com](http://observatoriodelsur.wordpress.com)

## 2.3 IMPACTOS AMBIENTALES DE LA MINERÍA AURÍFERA ALUVIAL EN MADRE DE DIOS

Según el MINAM (2015), el área afectadas detectadas por la minería aurífera aluvial pasó de 842 ha en el año 1987 a 32,750 ha en el año 2011. Al inicio la minería se circunscribía a los ríos Madre de Dios, Malinowski medio, y Colorado, pero actualmente se extendió a otras cuencas y tributarios, inclusive en áreas donde crecen los ríos (Álvarez *et al.*, 2011). Se estima que hay entre 300,000 y 400,000 mineros en toda la cuenca amazónica (Webb, 2004 citado por Álvarez *et al.*, 2011).

Hasta el año 2009 se habían deforestado 18,000 ha de bosque. Cada año se destruyen 400 ha adicionales, y si se ejecutaran todos los derechos mineros, se destruirán 400,000 ha adicionales de bosques (Álvarez *et al.*, 2011). Por sectores, según Gonzales *et al.* (2012), en la zona de explotación de Huepetuhe se ha afectado 8,500 ha desde 1986 hasta el año 2011, en la zona de Madre de Dios la velocidad de la actividad minera fue de 750 ha año<sup>-1</sup> en 7 años de estudio y hasta el año 2011 se han afectado 7,500 ha, en la zona de Inambari la velocidad de la actividad minera fue de 890 ha año<sup>-1</sup> en 7 años de estudio y fueron afectadas 4,400 ha hasta el año 2011, y además se confirmó la destrucción 50,000 ha de bosques en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional de Tambopata (MINAM, 2015).

Se deteriora el aire en el proceso de extracción, transporte y cargado de sedimentos. Los vehículos producen emisiones de dióxido de carbono y otros, y en las zonas de amalgamación se contamina con gases de mercurio. Hay generación de polvo durante el tránsito, siendo esto puntual y localizado en la zona de trabajo (Rivera *et al.*, 2000). Además, la operación de retroexcavadoras, cargadores frontales, volquetes, motores y bombas impactan en la fauna por los ruidos y tráfico que generan (Álvarez *et al.*, 2011).

El suelo es degradado por contaminantes (residuos sólidos, gotas de mercurio, combustibles y lubricantes), erosión hídrica y eólica (causadas por la remoción total de la superficie con cobertura vegetal y que conlleva el arrastre de sedimentos a zonas más bajas) y compactación por el tránsito de maquinarias. Se considera que al día son removidos 154,693m<sup>3</sup> de suelos por la actividad minera. Las partículas gruesas se disponen en pilas grandes llamados “canchones” cerca de la zona de trabajo o los

pozos. Los suelos más fértiles donde se realiza actividades agrícola son impactados (Álvarez *et al.*, 2011). Se calcula la pérdida de 390,508 t año<sup>-1</sup> de suelo equivalente a 1.3 t ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> (PROMANU 2009, citado por Gómez, 2013).

El agua es afectada por el cambio del cauce de los ríos y sedimentos que moldean el curso y crecimiento de los ríos. Ello provoca el desvío del recorrido de cursos de agua y amplía el espesor del cuerpo de agua. Se habría alterado el curso de los ríos Huapetuhe, Colorado, Madre de Dios y Malinowski, extrayendo mineral de las orillas de los ríos, desprotegiendo a la cobertura vegetal, ensanchando el cauce y contaminando el río (ANA, 2010). En solo tres años se han destruido completamente las cuencas de los ríos Jayave y Guacamayo, y pudo agravar la inundación de la carretera interoceánica (Pita, 2009).

La calidad del agua puede afectarse por la contaminación con mercurio, sólidos, lubricantes, combustibles y sedimentos, perjudicando la vida acuática. (Rivera *et al.*, 2000). La turbidez natural de los ríos del área es de 100 NTU (Unidad Nefelométrica de Turbiedad), pero en las zonas auríferas llega a 280 y 1,000 NTU (ANA, 2010). Se estima que desde 1980 se habrían vertido 3,000 t de mercurio a los ríos amazónicos (Webb, 2004 citado por Álvarez *et al.*, 2011).

La destrucción de los bosques y del cauce de los ríos altera profundamente el paisaje, lo que impacta en el ecoturismo que es la actividad de mayor desarrollo en el río Tambopata y en el río Bajo Madre de Dios. La presencia de dragas y la alteración de los ríos afecta y hasta destruye los atractivos turísticos (Álvarez *et al.*, 2011).

Al año 2011 se ha definido como áreas restringidas para actividades mineras a 5'460,280 ha correspondientes a áreas protegidas, zonas de amortiguamiento, proyectos especiales, concesiones forestales y la Reserva Territorial de Madre de Dios (Álvarez *et al.*, 2011).

## **2.4 CALIDAD DEL SUELO**

Según la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA, por sus siglas en inglés) la calidad del suelo es la capacidad de un suelo específico para funcionar, bajo unos límites de ecosistemas naturales o manejado, para sostener la productividad de plantas

y animales, mantener y mejorar la calidad del agua y aire, y soportar la salud humana y hábitat (Karlen *et al.*, 1997)

En la industria, el concepto de calidad se asocia al cumplimiento de un conjunto de normas por parte de un producto y el nivel de satisfacción de las necesidades personales (Porta *et al.*, 1990). La calidad del suelo toma conceptos como:

- Importancia del suelo para los ecosistemas y la salud.
- Importancia biológica del suelo.
- Funciones en suelos agrícolas, ambientes, forestales, urbanos y recreativos.
- Indicadores cuantitativos de la calidad física, química, biológica y ecológica.
- Degradación, rehabilitación y sostenibilidad de un suelo.
- Gestión de suelos en la productividad, calidad ambiental, salud y alimentos.
- Necesidad de una legislación y normatividad para preservar la calidad.
- Educación ambiental para hacer conocer el concepto de suelo y su rol en el ambiente.

El suelo se caracteriza por presentar resiliencia. Ella es la elasticidad y capacidad para volver a la forma o posición inicial después de actuar una fuerza o la capacidad de un sistema para volver a un nuevo equilibrio dinámico después de una alteración (Blum y Satalises, 1994 citado por Porta *et al.*, 1999). El suelo tiene la capacidad de conservar o recuperar su calidad o de degradarse al ser sometido a ciertas actuaciones.

La calidad del suelo puede modificarse cuando está sometida a contaminantes. La contaminación es el aporte de un elemento químico desde el exterior que provoca su aumento desde una concentración inicial, produciendo efectos desfavorables, tanto por su acción desactivadora como su aumento excesivo de la actividad. Ella causa la pérdida de calidad y aptitud para el uso o lo hace inutilizable, a no ser que sea tratado. Así, el “suelo contaminado” presenta una o más elementos o productos químicos a elevadas concentraciones (Porta *et al.*, 1999).

Según la RELASC (2016), define al sitio contaminado al terreno o propiedad en cuyo suelo, aguas subterráneas, material de construcción, escombros, estructuras, restos de instalaciones se encuentran sustancias contaminantes. Son, por lo general, producto de

la actividad humana, actual y pasada, como la producción industrial, actividades comerciales y de generación de residuos entre otras. La mayoría son pasivos ambientales resultados de un manejo no adecuado de sustancias y residuos nocivos.

Actualmente, Perú ha determinado “Estándares de Calidad Ambiental para Suelos” el cual determina concentraciones máximas de elementos químicos orgánicos e inorgánicos que no afectarían la salud de las personas y el ambiente. Así se muestra en el cuadro 1 (MINAM, 2014).

**Cuadro 1: Estándares de Calidad Ambiental para Suelos**

<b>Parámetros ( mg kg<sup>-1</sup> MS)</b>	<b>Suelo agrícola</b>	<b>Suelo residencial y parques</b>	<b>Suelo comercial, industrial y extractivo</b>
<b>Orgánico</b>			
Benceno	0.03	0.03	0.03
Tolueno	0.37	0.37	0.37
Etilbenceno	0.082	0.082	0.082
Xileno	11.00	11.00	11.00
Naftaleno	0.10	0.60	22.00
Fracción de Hidrocarburos F1(c5-c10)	200.00	200.00	500.00
Fracción de Hidrocarburos F2(c10-c28)	1,200.00	1,200.00	5,000.00
Fracción de Hidrocarburos F3(c28-c40)	3,000.00	3,000.00	6,000.00
Benzopireno	0.10	0.70	0.70
Bifenilospoliclorados (PCBs)	0.50	1.30	33.00
Aldrín	2.00	4.00	10.00
Endrin	0.01	0.01	0.01
DDT	0.70	0.70	12.00
Heptacloro	0.01	0.01	0.01
<b>Inorgánico</b>			
Cianuro libre	0.90	0.90	8.00
Arsénico total	50.00	50.00	140.00
Bario total	750.00	500.00	2,000.00
Cadmio total	1.40	10.00	22.00
Cromo VI	0.40	0.40	1.40
Mercurio total	6.60	6.60	24.00
Plomo total	70.00	140.00	1,200.00

FUENTE. MINAM (2014)

Por otro lado, en Canadá se emplean los valores guía de calidad de suelo (Canadian Environmental Quality Guidelines). Este se elaboró en base a un protocolo para la derivación ambiental y salud humana de valores guía de calidad de suelo (Protocol for the Derivation of Environmental and Human Health Soil Quality Guidelines). Su objetivo es la protección del ambiente y la salud humana CCME (2007). Como se muestra en el cuadro

2, se presentan valores que dependen de la textura del suelo (gruesa o fina) y, en algunos parámetros, depende de su ubicación como en la superficie o en el subsuelo.

**Cuadro 2: Valores guía de calidad de suelo en Canadá**

Parámetros ( mg kg <sup>-1</sup> MS)		Uso del suelo y textura del suelo							
		Suelo agrícola		Suelo residencial y parques		Suelo Comercial		Suelo industrial	
		textura gruesa	textura fina	textura gruesa	textura fina	textura gruesa	textura fina	textura gruesa	textura fina
<b>Orgánico</b>									
Benceno	superficie <sup>w</sup>	0.030	0.0068	0.030	0.0068	0.030	0.0068	0.030	0.0068
	subsuelo <sup>w</sup>	0.030	0.0068	0.030	0.0068	0.030	0.0068	0.030	0.0068
	superficie <sup>w</sup>	0.0095	0.0068	0.0095	0.0068	0.030	0.0068	0.030	0.0068
	subsuelo <sup>w</sup>	0.011	0.0068	0.011	0.0068	0.030	0.0068	0.030	0.0068
Etilbenceno	superficie	0.082	0.018	0.082	0.018	0.082	0.018	0.082	0.018
	subsuelo	0.082	0.018	0.082	0.018	0.082	0.018	0.082	0.018
Xileno	superficie	11.00	2.40	11.00	2.40	11.00	2.40	11.00	2.40
	subsuelo	11.00	2.40	11.00	2.40	11.00	2.40	11.00	2.40
Benzopireno		0.10		0.70		0.70		0.70	
DDT		0.70		0.70		12.00		12.00	
DIPA		180.00		180.00		180.00		180.00	
Etilenglicol		960.00		960.00		960.00		960.00	
Nonilfenol		5.70		5.70		14.00		14.00	
Pentaclorofenol		7.60		7.60		7.60		7.60	
Fenol		3.80		3.80		3.80		3.80	
Bifenilos policlorados (PCBs)		0.50		1.30		33.00		33.00	
Dibenzo-p-dioxinas policloradas/ dibenzofuranos		4 ng TEQ kg <sup>-1</sup>		4 ng TEQ kg <sup>-1</sup>		4 ng TEQ kg <sup>-1</sup>		4 ng TEQ kg <sup>-1</sup>	
Tolueno	superficie	0.37	0.08	0.37	0.08	0.37	0.08	0.37	0.08
	subsuelo	0.37	0.08	0.37	0.08	0.37	0.08	0.37	0.08
Tricloro etileno		0.01		0.01		0.01		0.01	
Tetracloroetileno		0.10		0.20		0.50		0.60	
Sulfolano		0.80		0.80		0.80		0.80	
<b>Inorgánico</b>									
Cianuro libre		0.90		0.90		8.00		8.00	
Arsénico		12.00		12.00		12.00		12.00	
Bario		750.00		500.00		2,000.00		2,000.00	
Cadmio		1.4.00		10.00		22.00		22.00	
Cromo	Total	64.00		64.00		87.00		87.00	
	IV	0.4.00		0.4.00		1.40		1.40	
Mercurio		6.6.00		6.6.00		24.00		50.00	
Plomo		70.00		140.00		260.00		600.00	
Cobre		63.00		63.00		91.00		91.00	
Niquel		50.00		50.00		50.00		50.00	
Selenio		1.00		1.00		2.90		2.90	
Zinc		200.00		200.00		360.00		360.00	
Vanadio		130.00		130.00		130.00		130.00	
Uranio		23.00		23.00		33.00		300.00	
Talio		1.00		1.00		1.00		1.00	

FUENTE: CCME (2007)

## 2.5 METALES EN EL SUELO

Debido a la industria minera, el destino de los metales en minerales ubicado en la profundidad de la corteza terrestre, que es su último "lugar de descanso", es la superficie de la tierra. Se trata de los residuos y depósitos de roca estéril cerca del área explotada de minería que son la fuente de los metales (Salomons, 1994).

Cuando estos depósitos contienen sulfuros (pirita) y hay acceso de oxígeno, resulta un drenaje ácido de minas (AMD). Dependiendo de la naturaleza de las rocas y depósitos, la reacción ácida podrá contener elevados niveles de metales. Cuando ellos son dispuestos en ríos hay una amplia dispersión de metales en solución y partículas. La clave se encuentra en la predicción de las especies químicas formadas. Saber predecir la AMD es el factor clave en la predicción de la liberación de metales disueltos de las operaciones mineras activas y pasadas (Salomons, 1994).

El parámetro más importante que describe el comportamiento de metales es el pH; normalmente, la adsorción aumenta de cerca de cero a 100% al incrementarse el pH. Otros componentes principales disueltos como materia orgánica disuelta y aniones tales como el cloruro y sulfatos, pueden tornarse en complejos disueltos con los metales y mantenerlos en solución (Salomons, 1993 citado por Salomons, 1994). La forma más tóxica es la iónica. El carbón orgánico derivado de la degradación de los tejidos vegetales y animales tiene grupos funcionales que pueden formar quelatos con metales (Salomons, 1994).

Existen procesos físicos y químicos que ocurren en corrientes de agua que dan lugar, directa o indirectamente, a la atenuación de los contaminantes; los cuatro principales puntos son advección, dilución, dispersión y sedimentación (Salomons, 1994).

La erosión de las zonas mineras activas e inactivas o vertido directo de residuos o desechos de roca introduce metales en forma de partículas a los ambientes acuáticos. Estas partículas son parcialmente degradadas y contienen formas de metales o minerales discretas que son estables solo bajo ciertas condiciones geoquímicas de la mina (Salomons y Forstener, 1980 citados por Salomons, 1994).

En el cuadro 3 se muestra la movilidad relativa y disponibilidad de metales dependiendo de la especie de metal y asociación.

**Cuadro 3: Movilidad relativa y la disponibilidad de metales**

<b>Especie de metal y asociación</b>	<b>Movilidad</b>
Catión intercambiable	Alta, ya que en la mayoría de los cationes pueden liberarse por intercambio.
Componente asociado al metal con hierro e hidróxido de manganeso	Media, causada por cambios en condiciones redox que pueden causar una salida, pero si el sulfuro está presente se formaría metal sulfuro.
Metal enlazado o fijado a sustancias orgánicas	Media, causada por la descomposición de materia orgánica.
Metales asociados como la fase sulfúrica	Fuerte, dependiendo de las condiciones ambientales y que bajo condiciones ricas en oxígeno ocurre la oxidación de sulfuros.
Metales enlazado o fijados en el interior de partículas minerales	Baja, debido al intemperismo ambiental y a la descomposición.

FUENTE: Salomons (1994)

### 2.5.1 Arsénico (As)

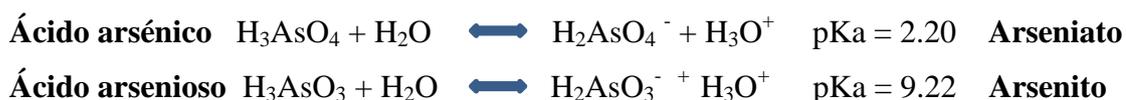
El As un elemento del grupo VA de número atómico y peso atómico igual a 7 y 75 respectivamente y con estados de oxidación de -3, 0, +3 y +5 (Kabata y Pendias, 1990). Proviene de la industria de azufre y fósforo, combustión de carbón, plantas geotérmicas, fertilizantes fosforados y pesticidas (Kabata y Pendias, 2011).

El mineral más común es arsenopirita (FeAsS) y otros que se componen de la mineralización de sulfuros como orpimenta (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), rejalgar (AsS) y enargita (Cu<sub>3</sub>AsS<sub>4</sub>) (Boyle ,1973 citado por Alloway, 1990); 60% comprenden los arseniatos, 20%, sulfuros y sulfosales; el resto, arseniuros, arsenitos, óxidos y As elemental (Onishi 1969 citado por Alloway 1990).

La concentración de As en rocas sedimentarias es de 1 mg kg<sup>-1</sup> a 900 mg kg<sup>-1</sup> (Alloway 1990); en rocas ígneas, 0.5 mg kg<sup>-1</sup> a 2.5 mg kg<sup>-1</sup>. Se asocia a S, Se y Te (Kabata y Pendias, 1990) y también a Fe en minerales goetita (Maneck *et al.*, 1981 citado por Kabata y Pendias, 2011). La concentración promedio de As en el suelo es de 1 mg kg<sup>-1</sup> a 40 mg kg<sup>-1</sup> (Alloway 1990). Suelos enriquecidos con Fe presentan aproximadamente 450 mg kg<sup>-1</sup> de As (Dudas, 1977 citado por Kabata y Pendias,

2011). Bajas concentraciones de As se encuentran en suelos arenosos y de origen granítico; altas concentraciones derivarían de suelos aluviales y enriquecimiento con materia orgánica (Kabata y Pendias, 2011).

El  $\text{As}^{+5}$  se presenta como  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ , mientras  $\text{As}^{+3}$  se presenta como  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  (Kabata y Pendias, 2011). El equilibrio de especies de arsénico  $\text{As}^{+3}$  y  $\text{As}^{+5}$  en la solución suelo se muestra (Alloway, 1990), siendo necesario energía para su realización:



Cuando el valor de Eh disminuye por debajo de +300 mV a un pH de 4 y -100 mV a un pH de 8,  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  se vuelve termodinámicamente estable en la ausencia de especies que forman complejos y organismos que metilizan. Las bacterias que participan en el proceso de oxidación de As asociados a arsenitos o arseniats, están también asociados a la metilación y alcalinización del As (Kabata y Pendias, 2011). Los organismos metilizan en un amplio rango de pH (Alloway, 1990).

La migración del As en el suelo es influenciada por la fuerte reacción con arcillas (90%), geles de fosfato, humus y calcio, en la que existe mayor retención con hierro hidratado y óxido de aluminio (Kabata y Pendias, 2011). La sorción de  $\text{As}^{+5}$  es mayor para hidróxidos de hierro y aluminio que la sorción de  $\text{As}^{+3}$  (Alloway, 1990). Los compuestos  $\text{AsO}_2^-$ ,  $\text{AsO}_4^{+3}$ ,  $\text{HAsO}_4^{+2}$  y  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$  son las formas más móviles de As y son sorbidos a un pH entre 7 y 9 (Kabata y Pendias, 2011).

En suelos contaminados, el 90% del crecimiento de plantas es afectado a  $1,000 \text{ mg kg}^{-1}$  de As. Para reducir la fitotoxicidad es usual precipitar el As con sulfato ferroso, fosfatos y carbonato de calcio (Kabata y Pendias, 2011).

## 2.5.2 Cadmio (Cd)

El Cd es un elemento del grupo IIB de número atómico y peso atómico igual a 48 y 112.4 respectivamente y presenta el estado de oxidación +2. En general se estima que el origen de Cd en el suelo es antropogénico (hidrocarburos y minería no metal); 54 % a 58% proviene de fertilizantes fosfatados ( $10 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cd en fertilizantes); 39 % a

41%, depositaciones atmosféricas; 2 % a 5%, aguas y lodos residuales (3,650 mg kg<sup>-1</sup> de Cd en aguas residuales) (Alloway, 1990).

Las fuentes más abundantes de Cd son minerales como la esfalerita, wurtzita, greenockita (CdS) y minerales secundarios como Smithsonita que contiene entre 0.2 % a 0.4 % de Cd (Aylett 1979 y Rose *et al.*, 1979 citado por, Alloway, 1990 y Porta *et al.*, 1999). Se encuentra asociado a Zn y S (Kabata y Pendias, 2011).

La concentración de Cd en rocas ígneas y magmáticas no excede 0.3 mg kg<sup>-1</sup> (Page y Bingham, 1973). En el suelo, su concentración se estima entre 0.06 mg kg<sup>-1</sup> a 1.1 mg kg<sup>-1</sup> (Page y Bingham 1973). En la solución suelo su concentración es de 0.2 ug l<sup>-1</sup> a 6 ug l<sup>-1</sup> de Cd (Tiller *et al.* 1979 citado por (Kabata y Pendias, 2011).

Durante el intemperismo de rocas, el Cd se dirige rápidamente en la solución como Cd<sup>+2</sup>, forma en la que es adsorbida a superficies de coloides (Alloway, 1990), pudiendo formar iones complejos (CdCl<sup>+</sup>, CdOH<sup>+</sup>, CdHCO<sub>3</sub><sup>+</sup>, CdCl<sub>3</sub><sup>-</sup>, CdCl<sub>4</sub><sup>-2</sup>, Cd(OH)<sub>3</sub><sup>-</sup> y Cd(OH)<sub>4</sub><sup>-2</sup>) y quelatos orgánicos (Kabata y Pendias, 2011). El uso del software GEOCHEN determinó más especies de Cd en condiciones oxidantes de la solución suelo como Cd<sup>+2</sup>, CdSO<sub>4</sub>, CdCl<sup>+</sup> en suelos ácidos y Cd<sup>+2</sup>, CdCl<sup>+</sup>, CdSO<sub>4</sub> y CdHCO<sub>3</sub><sup>+</sup> en suelos alcalinos (Furr *et al.*, 1984 citado por Alloway, 1990). En suelos predomina el Cd<sup>+2</sup> con especies neutrales como CdSO<sub>4</sub> y CdCl<sub>2</sub> presentes en cantidades altas donde el pH es superior a 6.5 (Mahler *et al.*, 1980 citado por Alloway, 1990). La forma más estable de Cd libre en el ambiente es Cd<sup>+2</sup> (Kabata y Pendias, 2011).

Los factores que controlan más la distribución de Cd en el suelo son la fracción arcilla, saturación de bases, presencia de Fe y Mn y, en menor importancia, el pH (Kabata y Pendias, 2011).

En suelos ácidos, la materia orgánica y sesquióxidos controlarían la solubilidad y la movilidad aumentaría desde el pH 4.5. Al incrementarse el pH, la concentración de la solución suelo de Cd decrece debido al incremento de hidrólisis, densidad de adsorción (se incrementó por un factor de 3 cada vez que aumentaba el pH en una unidad) y cargas dependientes del pH; con pH entre 6 y 7 con altos contenidos de materia orgánica o hidróxidos de hierro adsorben Cd más que arcillas del tipo 2:1

(Pickering, 1980, Garcia-Miragaya y Page, 1978 y Christensen, 1987 citados por Alloway, 1990). Ya en condiciones alcalinas, la precipitación inmovilizaría de Cd ( $\text{CdCO}_3$ , y  $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ ) y mantendrían el equilibrio (Kabata y Pendias, 2011 y Benes y Pabianova, 1986 citado por Kabata y Pendias, 2011). La competencia por la adsorción se puede dar con otros iones metal como Ca, Co, Cr, Cu, Ni y Pb.

Altas concentraciones de Cd en el suelo provienen de la actividad minería de Pb y Zn, especialmente de la refinería (Kabata y Pendias, 2011 y Alloway, 1990). Por otro lado, reportes de contaminación de suelos aluviales provienen de materiales como cuarzos piritizados y andesita piritizada alterada hidrotérmicamente, con concentraciones que superaban  $200 \text{ mg kg}^{-1}$ , como es en caso de la superficie en Slobackia (Curlik y Forgae, 1996 citado por (Kabata y Pendias, 2011). Entre las medidas para remediar áreas contaminadas con Cd están lavados de ácidos o quelatos, encalado a pH 7 para reducir la biodisponibilidad, incremento de la adsorción a la materia orgánica y la inundación para crear ambientes reductores. El Cd tiende a ser móvil en suelos siendo de mayor disponibilidad para las plantas a comparación de otros metales pesados, incluyendo al Pb y Cu (Alloway, 1990).

### 2.5.3 Plomo (Pb)

El plomo es un elemento del grupo IV A, de número atómico y peso atómico igual 82 y 207 respectivamente y presenta el estado de oxidación +2 y +4 (Kabata y Pendias, 2011).

El Pb proviene de minerales en formación y alteraciones radiogénicas de U y Th (Kabata y Pendias, 2011), como la galena ( $\text{PbS}$ ) (Porta *et al*, 1990). La concentración de Pb en las rocas ígneas y sedimentarias arcillosas es  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $14 \text{ mg kg}^{-1}$  respectivamente (Alloway, 1990). En el suelo su concentración se estima entre  $3 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $189 \text{ mg kg}^{-1}$  de Pb (Davies, 1977), mientras en la solución es suelo es aproximadamente  $10^{-8} \text{ M}$  (Davies, 1983 citado por Alloway, 1990). Kabata y Pendias (2011) reportaron en suelos contaminados concentraciones de Pb hasta 2 % o  $20,000 \text{ mg kg}^{-1}$ .

Durante el intemperismo, el sulfuro de plomo se oxida y forma carbonatos, óxidos de hierro y manganeso e hidróxidos de hierro y aluminio, y es incorporado a minerales

arcilla y materia orgánica (Riffaldi, 1976 citado por Kabata y Pendias, 2011). El Pb es un metal poco móvil (Kabata y Pendias, 2011); si se deseara disminuir en 10 % su concentración en suelos forestales deberían pasar 200 años (Alloway, 1990). A altos niveles de pH precipita como hidróxidos, fosfatos o carbonatos y también puede promover la formación de complejos orgánicos que son estables. A pH ácido disminuye su solubilidad. Su movilidad disminuye cuando el suelo es rico en materia orgánica (Kabata y Pendias, 2011) ya que el humus lo inmoviliza al formar enlaces coordinados (Shaw, 1986 citado por Alloway, 1990).

En el suelo, la forma insoluble del Pb se presenta como  $Pb^{+2}$  y  $Pb^{+4}$ . En el cuadro 4 se muestra que la biodisponibilidad de Pb en sistemas naturales es controlada por medios ácidos y neutros por la presencia de  $PO_4^{-3}$  que dan origen a minerales altamente insolubles:

**Cuadro 4: Especies de plomo**

Especie mineral	Fórmula	Log $K_{ps}$	Detalle
Cloropiromorfita	$Pb_3(PO_4)_3Cl$	-84.4	Requieren energía para disolverse
Fluoropiromorfita	$Pb_3(PO_4)_3F$	-76.8	
Hidroxipiromorfita	$Pb_3(PO_4)_3OH$	-82.3	

FUENTE: Nriagu (1974) citado por Porta *et al.*(1999)

#### 2.5.4 Bario (Ba)

El Ba es un elemento del grupo IIA, de número atómico y peso atómico igual a 56 y 137 respectivamente y presenta la valencia 2. Las rocas ígneas de la corteza presentan concentraciones de Ba entre 400 mg kg<sup>-1</sup> a 12,100 mg kg<sup>-1</sup>. En el suelo su concentración es de 19 mg kg<sup>-1</sup> a 2,368 mg kg<sup>-1</sup>; mientras en la solución suelo su concentración es de 43 ug l<sup>-1</sup> a 307 ug l<sup>-1</sup>. El Ba no es muy móvil ya que precipita fácilmente con sulfatos y carbonatos, es fuertemente adsorbida a arcillas, se concentra en concreciones de Mn y P, y es sorbido a óxidos e hidróxidos. La forma móvil de Ba es la hollandita ( $Ba_2Mn_8O_{16}$ ) la cual es fácilmente disponible por las plantas. Es usual relacionarlo al K, feldespatos y biotita. (Kabata y Pendias, 2011).

#### 2.5.5 Mercurio (Hg)

El mercurio es un elemento del grupo IIB con peso atómico y número atómico igual 200.59 y 80 respectivamente (Alloway, 1990). Las fuentes antropogénicas que emiten mercurio al suelo y agua son la minería y refinería de minerales de Cu y Zn,

combustión de hidrocarburos, producto de procesos industriales de mercurio, fertilizantes ( $50 \text{ ng g}^{-1}$  de Hg) y la minería aurífera (Alloway, 1990).

Alrededor de 20 minerales contienen Hg especialmente el cinabrio ( $\text{HgS}$ ) que es un mineral resistente e insoluble en agua (Nriagu, 1979 citado por Alloway, 1990 y Kabata y Pendias, 2011). La concentración de Hg en rocas es 40 ppb a 400 ppb (Kabata y Pendias, 2011) y en rocas ígneas es  $10 \text{ ng g}^{-1}$  (McNeal y Rose, 1974 citado por Alloway, 1990). La concentración de Hg en la superficie del suelo es 400 ppb y en suelos agrícolas o uso forestal es 130 ppb a 500 ppb (Kabata y Pendias, 2011). Es usual que en suelos orgánicos haya más Hg que en suelos minerales (John *et al.*, 1975 citado por Alloway 1990). El agua de la precipitación pluvial presenta concentraciones de Hg de 2 a  $10 \text{ ng l}^{-1}$ , pero en áreas muy contaminados aumentaría hasta 5 veces (Anderson, 1979 citado por Alloway, 1990).

Las especies de Hg en el ciclo geoquímico pueden clasificarse como componentes volátiles ( $\text{Hg}$ ,  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ ), especies reactivas ( $\text{Hg}^{+2}$ ,  $\text{HgX}_2$ ,  $\text{HgX}_3^-$  y  $\text{HgX}_4^{-2}$  con  $\text{X} = \text{OH}^-$  o  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Br}^-$ ,  $\text{HgO}$  en partículas de aerosol y  $\text{Hg}^{+2}$  acompañado con ácidos orgánicos) y especies no reactivas o complejo orgánicos ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ,  $\text{CH}_3\text{HgCl}$ ,  $\text{CH}_3\text{HgOH}$ ,  $\text{Hg}(\text{CN})_2$ ,  $\text{HgS}$  y  $\text{Hg}^{+2}$  enlazado a átomos de S en materia húmica). Dependiendo de las condiciones redox, el Hg puede aparecer con tres diferentes estados de oxidación como  $\text{Hg}^0$ ,  $\text{Hg}_2^{+2}$  y  $\text{Hg}^{+2}$ , de los cuales  $\text{Hg}^0$  y  $\text{Hg}^{+2}$  son las formas más representativas en el suelo (Alloway, 1990).

La volatilización de Hg en el suelo y agua se realiza en especies como  $\text{Hg}_{(g)}$  y  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$  (metil mercurio) que pueden ser ambos formados por procesos bioquímicos (Lindquist, 1984 citado por Alloway, 1990) y biológicos por bacterias y hongos que reducen el catión  $\text{Hg}^{+2}$  al estado elemental  $\text{Hg}^0$ .

La adsorción de Hg depende de las especies químicas, el tamaño de partículas, la naturaleza, cantidad del coloide orgánico e inorgánico, el pH del suelo y el potencial redox. Puede estar fuertemente enlazados a hidroxilandos de sesquióxidos y sustancias húmicas (Alloway 1990). La secuencia de retención de Hg en condición neutras del suelo es  $\text{Al}(\text{OH})_3 < \text{kaolinita} < \text{montmorillonita} < \text{illita} < \text{suelo orgánico} < \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Por debajo de pH 5.5, donde predomina  $\text{HgCl}_2^0$ , en la solución, la materia

orgánica será la principal responsable de la sorción (Andersson, 1979 citado por Alloway, 1990).

En suelos con baja materia orgánica y arcilla, se vaporiza más Hg desde suelos neutrales que suelos ácidos. En suelos ácidos, la alta cantidad de materia orgánica inhibirían la vaporización de Hg; a bajas concentraciones de Hg, el humus exhibiría suficiente capacidad acomplejante para permitir poco Hg en la solución suelo disponible para la reducción y volatilización. Su movilidad disminuiría a pH <3 y >12 debido a la extrema capacidad buffer de los ácidos húmicos (Kabata y Pendias, 2011). El Hg<sup>2+</sup> es retenido por el suelo principalmente como órgano complejos (Kabata y Pendias, 2011), especialmente como complejos estables con ácidos húmicos (Alloway, 1990).

Una pequeña parte del Hg en el suelo contaminado podría ser movilizado por el agua y el resto quedaría en forma de complejos enlazados a ácidos húmicos (Wallsachlager *et al.*, 1996 citado por Kabata y Pendias, 2011). La lixiviación de Hg en suelos ácidos se realizaría en asociación con compuestos orgánicos, pero en suelos alcalinos o neutros la lixiviación se realizaría junto a fracciones activas inorgánicas (Kabata y Pendias, 2011). La acumulación de Mercurio se realizaría principalmente por el efecto acomplejante de la materia orgánica (Kabata y Pendias 2011); además, la retención de mercurio Hg<sup>+2</sup> se realizaría a baja solubilidad, en precipitados y con partículas de sulfuros (Alloway, 1990).

### **2.5.6 Vanadio (V)**

El vanadio es un metal de transición del grupo VB de la tabla periódica con número atómico 23 y peso atómico 50.9 respectivamente y presenta el estado de oxidación +5, +4, +3 y +2 (Kabata y Pendias, 2011). La mayor fuente de V en el suelo es la combustión de hidrocarburos (50 mg/kg de V en petróleo) y los residuos de su proceso (Wallace 1977 y Bertine y Goldberg, 1971 citado por Alloway, 1990)

Usualmente no constituye su propio mineral sino está presente al reemplazar a otros elementos en minerales (Kabata Pendias, 2001). Se encuentra en 60 minerales conocidas como polisulfuros, partronita asociado a azufre y sulfuros de níquel y hierro. Durante la formación de minerales cristalinos el V<sup>+3</sup> es oxidado a V<sup>+5</sup>

(Vinogradov, 1959 citado por Alloway, 1990). Cuando está presente Pb, Zn y Cu la precipitación de V ocurre como vanadita ( $\text{Pb}_2\text{Cl}(\text{VO}_4)_3$ ) y mottramita ( $\text{Pb}(\text{Cu,Zn})(\text{OH})(\text{VO}_4)$ ). En suelos se estima  $18 \text{ mg kg}^{-1}$  para histosoles y  $115 \text{ mg kg}^{-1}$  para rendzinas (Kabata y Pendias, 2011).

El rol del mineral arcilla al igual que ácidos orgánicos podrían ser más significantes que la fracción de V adsorbido a óxidos de hierro. El V forma complejos catiónicos, óxido aniónicos y óxidos hidróxidos. El catión  $\text{VO}^{+2}$  podría ser una forma importante de V en suelos y resultaría de la reducción del anión  $\text{VO}^{-3}$  (Kabata y Pendias, 2011).

Considerable V del suelo, principalmente el catión  $\text{VO}^{+2}$ , es movilizado como complejo de ácido húmico. Formas aniónicas de  $\text{V}^{+5}$  ( $\text{VO}_4^{-3}$  y  $\text{VO}_3^-$ ) son conocidas por movilizarse en el suelo en un amplio rango de pH a diferencia del  $\text{V}^{+3}$  que formas hidróxidos insolubles a pH bajo (Goodman y Cheshire, 1975 y Bloomfield, 1981 citado por Kabata y Pendias, 2011). Se postula que el V puede moverse como complejo de vanadio en algunos suelos especialmente cuando están asociados a óxidos de hierro. Oxianiones de  $\text{V}^{+5}$  son solubles en un rango de pH amplio y son considerados fácilmente móviles en el suelo (Alloway, 1990).

Las condiciones para una posible precipitación de V son presencia de agentes reductores (como ácido húmicos), concentración local de elementos de formación insolubles como vanadatos, presencia de uranilo ( $\text{UO}_2$ )<sup>+2</sup> y presencia de iones de aluminio o hierro (Alloway, 1990 y Kabata y Pendias, 2011).

### 2.5.7 Cromo (Cr)

El cromo es un elemento que pertenece al grupo de metales de transición del grupo VIB de la tabla periódica, su número atómico y su peso atómico es 24 y 51 respectivamente. En el suelo los estados de oxidación más comunes son +3 y +6 pero también se encuentra como +2, donde el  $\text{Cr}^{+3}$  o Cr (III) es el más estable que el  $\text{Cr}^{+6}$  Cr (VI). Es empleado en aleaciones de acero por su alto poder resistivo a la oxidación y en diversas industrias. Los fertilizantes fosfatados contienen más Cr que Ni. Se encuentra también en la atmósfera debido a las actividades de industrias metalúrgicas (Alloway, 1990).

El Cr procede del mineral resistente llamado cromita que es una mezcla de óxidos con  $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$  que también contiene cantidades variables de Mg y Al (Papp, 1986 citado por Alloway, 1990). La composición en minerales varía de 42 a 56 % de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  y 10 a 26% de FeO con cantidades variables de MgO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2$ . El cromo (III) reemplaza al  $\text{Fe}^{+3}$  y  $\text{Al}^{+3}$  en varios minerales resultando en turmalinas de Cr (Alloway, 1990). Las rocas de la corteza presentan  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cr; rocas máficas y ultramáficas,  $3,600 \text{ mg kg}^{-1}$ ; rocas serpentinas, de  $2,000 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $4,000\%$  (Alloway, 1990) En la superficie del suelo se encuentra  $54 \text{ mg kg}^{-1}$  (Kabata y Pendias, 2011).

El cromo forma complejos aniónicos y catiónicos ( $\text{Cr}(\text{OH})^{+2}$ ,  $\text{CrO}_4^{-2}$  y  $\text{CrO}_3^{-3}$ ). El Cr (VI) existe como cation, es fácilmente extraíble desde suelos y sedimentos y a la vez es considerado como la especie más tóxica. Generalmente en la mayoría de los suelos predomina el Cr (III), siendo relativamente insoluble y poco móvil como hidróxidos y óxidos (Alloway, 1990).

La relación Cr (III)/ Cr (VI), junto al Mn y materia orgánica del suelo son indicadores del estado del Cr, donde el pH es la variable maestra que ayuda a determinar la reactividad oxidativa de óxidos de Manganeseo y las propiedades reductoras de la materia orgánica (James *et al.*, 1997 citado por Kabata y Pendias, 2011).

El pH y potencial redox determinan el comportamiento de Cr. Bajo una misma condición redox de 500mV, el  $\text{Cr}^{+3}$  o Cr (III) predomina a pH5. El  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  se forma a partir del pH 5 y 7, y  $\text{CrO}_4^-$  se forma por encima del pH 7 (Kabata y Pendias, 2011). El Cr (VI) depende del equilibrio del pH presentándose en formas como cromato  $\text{HCrO}_4^-$  y dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$ ) y otras formas predominando en pH superiores a pH6. La oxidación de Cr (III) es considerada una ocurrencia en suelos con un pH superior al 5 y rico en óxidos de Manganeseo (Alloway, 1990).

En condiciones progresivas de oxidación, la forma de Cr como cromato hace que esté rápidamente móvil y fácilmente sorbido a arcillas y óxidos hidratados. Desde que el Cr (III) es ligeramente móvil solo en un pH ácido, su solubilidad decrece debajo del pH 4 y a pH 5.5 es completamente precipitado, sus componentes son considerados estables en suelos. En cambio el Cr (VI) es poco estable y fácilmente movilizado en pH ácido y básico (Alloway, 1990); es fuertemente oxidado y su presencia con materia

orgánica del suelo hace que sea reducido a Cr (III) (Bartlett y kimble, 1976 citado por Alloway, 1990). Esta reducción es más fácil en medio ácido que alcalino. Actividades como el encalado, aplicación de P y aplicación de materia orgánica son medidas conocidas para reducir la toxicidad de Cr en suelos contaminados. Se encontraron hasta 10,000 mg kg<sup>-1</sup> de Cr en suelos contaminados (Kabata y Pendias, 2011).

### 2.5.8 Níquel (Ni)

El Níquel es un elemento que pertenece a los metales de transición del grupo VIII de la tabla periódica, su número atómico y peso atómico igual a 28 y 58 respectivamente y su valencia es 2 y 3. Presenta un radio atómico de 0.065 nm (semejante a Fe, Mg, Cd y Zn). Presenta distintos estados de oxidación pero solo el Ni (II) es estable en un rango de pH y condiciones redox particulares. Las fuentes de Ni provienen de emisiones del procesamiento de metales, combustión de carbón e hidrocarburos y también fertilizantes fosfatados (Alloway, 1990).

El Ni es un metal proveniente de minerales sulfuros y óxidos. Los más importantes son Oxido lateríticos y pentandlita ((Ni,Fe)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>) y garnierita (Ni,Mg)<sub>6</sub> Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>. Aparece asociado a sulfuros (Milerita, NiS), Arseniuros (Niccolita, NiAs) y antimoniuros (*breithauptite*, NiSb) y también en ferromagnesianos asociados al Fe. El Ni<sup>+2</sup> reemplaza al Mg<sup>+2</sup> en minerales magnesianos mientras substituye al Fe en la formación de otros sulfuros como piritita. Las rocas de la corteza terrestre presentan una concentración promedio de 75 mg kg<sup>-1</sup> de Ni (Alloway, 1990) y las rocas sedimentarias contienen entre 5 mg kg<sup>-1</sup> a 9 mg kg<sup>-1</sup> (Kabata y Pendias, 2011). Se estima que la concentración de Ni en el suelo se encuentra entre 0.2 mg kg<sup>-1</sup> a 450 mg kg<sup>-1</sup>, pero en suelos que proceden de serpentinas se espera 100 mg kg<sup>-1</sup> a 7,000 mg kg<sup>-1</sup> (Alloway, 1990).

En condición ácidas el Ni se presenta como Ni<sup>+2</sup>, NiSO<sub>4</sub>, NiHPO<sub>4</sub>, NiHCO<sub>3</sub><sup>+</sup> y complejos orgánicos. En suelos alcalinos se presenta como NiCO<sub>3</sub>, NiHCO<sub>3</sub><sup>+</sup>, Ni<sup>+2</sup> y NiB(OH)<sup>+4</sup> (Alloway, 1990). Su movilidad aumenta cuando el pH disminuye así como la CIC (Willaert y Verloo 1988 citado por Alloway 1990). El sulfuro de Ni en condiciones acidez y reducidas controlan la concentración de Ni la solución del suelo (Alloway, 1990). Las especies en la solución suelo son Ni<sup>+2</sup>, NiOH<sup>+</sup>, HNiO<sub>2</sub><sup>-</sup> y Ni

(OH)<sub>3</sub><sup>-</sup> cuando el Ni no está completamente quelatado (Kabata y Pendias, 2011). La concentración en la solución suelo varía entre 3 ug l<sup>-1</sup> a 25 ug l<sup>-1</sup>.

La distribución en el perfil del suelo depende del pH, materia orgánica, óxidos amorfos y la fracción arcilla (Kabata y Pendias, 2011). Cerca del 50% de Ni en suelos pueden asociarse a fracciones residuales (HF y HClO<sub>4</sub>); el 20%, fracciones de óxidos de hierro y manganeso; el resto, fracciones de carbonatos; un relativa proporción, formas intercambiables en fracciones orgánicas (Hickey y Kittrick, 1984 citado por Alloway, 1990). El Ni <sup>+2</sup> es relativamente estable en soluciones acuosas y es capaz de migrar largas distancias (Kabata y Pendias, 2011).

Secuencias selectivas con respecto a la arcilla (caolinita y montmorillonita) y óxidos (goetita) de hierro indican que el Ni es uno de el último iones enlazados o sorbidos en la secuencia de Ni<Cd<Zn. (Bruemmer 1987 citado por Alloway, 1990).

En la superficie parece estar enlazada a la materia orgánica constituyendo quelatos (Bloomfield 1980 (Kabata y Pendias, 2011). La materia orgánica se caracteriza por movilizar el Ni de carbonatos, óxidos y arcillas. Por otro lado, tratamientos sobre el suelo contaminado con Ni aplican de cal, fosfatos y materia orgánica (Alloway, 1990).

### **2.5.9 Zinc (Zn)**

Es un elemento del grupo IIB, de número atómico y peso atómico igual a 30 y 65.39 respectivamente y con valencia 2. Las fuentes de Zn son depositaciones atmosféricas (combustión de combustibles y la industria de metal), fertilizantes y pesticidas (Kabata y Pendias, 2011).

Uno de los minerales más importantes es la esfalerita (ZnS) (Porta *et al.*, 1999). El contenido en rocas ácidas varía de 40 mg kg<sup>-1</sup> a 100 mg kg<sup>-1</sup> en rocas basálticas; mientras que en rocas sedimentarias se encuentran entre 80 mg kg<sup>-1</sup> a 120 mg kg<sup>-1</sup>. El contenido aproximado en el suelo es 64 mg kg<sup>-1</sup>; en suelos arenosos, 33 mg kg<sup>-1</sup>; en suelos franco, 52 mg kg<sup>-1</sup>; franco arcillosos, 80 mg kg<sup>-1</sup>. En la solución suelo la concentración de Zn es de 4 ug l<sup>-1</sup> a 270 ug l<sup>-1</sup> (Alloway, 1990 y Kabata y Pendias, 2011).

El Zn del suelo está asociado principalmente con óxidos de hierro y aluminio (14 % al 38% del Zn total), mineral arcilla (24 % al 63%), y también a formas móviles (1 % al 20%) y complejos orgánicos (1.5 % a 2.3%) (Zirin *et al.* 1977 citado por Kabata y Pendias, 2011). La arcilla, óxidos hidruros y el pH son los principales factores que controlan la solubilidad del Zn en suelos, mientras los complejos orgánicos y precipitación de Zn como hidróxidos, carbonatos y sulfuros tienen menor importancia.

El Zn es relativamente más soluble que otros metales (Kabata y Pendias, 2011). La solubilidad de diferentes minerales decrece en el siguiente orden  $Zn(OH)_2$  (amorfo) >  $\alpha$ - $Zn(OH)_2$  >  $\beta$ - $Zn(OH)_2$  >  $\gamma$ - $Zn(OH)_2$  >  $\epsilon$ - $Zn(OH)_2$  >  $ZnCO_3$  (smithsonita) >  $ZnO$  (zincita) >  $Zn_2SiO_4$  (willemita) > Zn-suelo >  $ZnFe_2O_4$  (franklinita) (Alloway 1990).

La solubilidad se incrementa cuando disminuye el pH en el suelo (Lindsay 1972 citado por Alloway 1990). A pH menores de 7.7 predomina el  $Zn^{+2}$ , mientras a pH alto la forma de Zn es  $ZnOH^+$ ; a pH superior a 9 la especie neutral es  $Zn(OH)_2$ . (Alloway 1990). El Zn es más móvil y disponible en suelos ligeramente ácidos (Kabata y Pendias 2011). A alto pH, mientras se incrementa los componentes orgánicos en solución, los complejos de orgánicos de zinc pueden propiciar su solubilidad; en suelos arenosos ácidos, la materia orgánica es un importante componente de enlace del Zn, mientras óxidos e hidróxidos de aluminio, hierro y manganeso parecen ser de menor importancia (Mc Bride y Blasiak, 1979 citado por Kabata y Pendias, 2011).

Hay dos mecanismos de adsorción del Zn, uno en medio ácido relacionado a sitio de intercambio de cationes y el otro en medio alcalino que es considerado quimisorción, muy influenciado por ligandos orgánicos (Lindsay 1972 citado por Kabata y Pendias, 2011). Hay gran afinidad y selectividad del Zn para óxidos de hierro, halloysita, alofano, imogolita y menor en montmorilonita. (Kabata y Pendias, 2011).

Con la materia orgánica se forma complejos de estabilidad relativa, con el cual forma varios enlaces (Kabata y Pendias, 2011). Los ácidos fúlvicos forman quelatos con el Zn en un amplio rango de pH incrementando la movilidad y solubilidad del Zn. Suelos con alto contenido de minerales o materia orgánica presentan alta capacidad de adsorción de Zn. (Shuman 1975 citado por Alloway 1990).

En el cuadro 5 se muestra la biodisponibilidad de Zn en sistemas naturales. Esta es controlada en medios ácidos y neutros por la presencia de  $\text{PO}_4^{3-}$  que da origen a minerales altamente insolubles como:

**Cuadro 5: Especies de Zinc**

Especie mineral	Fórmula	Log $K_{ps}$	Detalle
Hopeita	$\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-35.3	Requieren energía para su disolución
Tarbulita	-	-26.6	

FUENTE: Porta *et al.* (1999)

Se estima que en suelos contaminados por  $2,210 \text{ mg kg}^{-1}$  de Zn, la concentración decrece a la mitad después de 70 a 81 años (Kitagishi y Yamame, 1981 citado por Kabata y Pendias, 2011).

### 2.5.10 Cobre (Cu)

El Cu es un elemento metal de transición de número atómico y peso atómico igual a 29 y 63.5 respectivamente. El origen antropogénico del Cu en el suelo es producto del manejo agrícola por la aplicación de fertilizantes ricos en Cu ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) y también por el aporte de estiércol líquido de cerdo con  $1990 \text{ mg kg}^{-1}$ . También se originaría a partir de depósitos atmosféricos como lluvia próxima a la industria de Cu (Alloway, 1990).

Los minerales que contienen Cu son Cu metal (100% Cu e insoluble), tenorita ( $\text{CuO}$ , 75%Cu e insoluble), covalita ( $\text{CuS}$ , 66% Cu e insoluble), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ , 35%Cu e insoluble), cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ , 89% de Cu e insoluble), malaquita ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{CuCO}_3$ , 57% Cu e insoluble), azurita ( $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ , 55% de Cu e insoluble), crisocola ( $\text{CuSiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), atacamite ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ) y brocanita ( $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$ ). Se forman fuerte enlace entre el  $\text{Cu}^+$  y sulfuro ( $\text{S}^{2-}$ ) (Alloway, 1990). Se estima  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  en un rango de 2 a  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cu en suelos y  $0.01\text{-}0.6 \text{ uM}$  en la solución suelo, siendo niveles de 1.5 a  $4.5 \text{ uM}$  dañinos para las raíces (Alloway, 1990 y Kabata y Pendias, 2011).

El Cu se puede presentar como iones solubles, complejos orgánicos o inorgánicos en solución, ión intercambiable, complejo estable orgánicos en humus, adsorbido por óxidos hidróxidos de manganeso, hierro y aluminio; adsorbido a arcillas y humus y ocluido en minerales (Alloway, 1990). Por otro lado, los parámetros que describen

principalmente su comportamiento en el suelo son la fracción arcilla, capacidad e intercambio catiónico, saturación de bases, óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso y materia orgánica, pero en menor medida el pH (Kabata y Pendias, 2011).

Para sólidos cristalinos de Cu y formas de minerales, el orden decreciente de solubilidad en el suelo es  $\text{CuCO}_3 > \text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$  (azurita)  $> \text{Cu}(\text{OH})_2 > \text{Cu}(\text{OH})_2 > \text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$  (malaquita)  $> \text{CuO}$  (tenorita)  $> \text{CuFe}_2\text{O}_4$  en el suelo. Varios minerales que contienen Cu son muy solubles para controlar la baja actividad de  $\text{Cu}^{+2}$  en la solución suelo; McBride concluyó que la precipitación simple de Cu como  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ , CuO o  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$  no es generalmente responsable para la adsorción de  $\text{Cu}^{2+}$  adicionado al suelo (Alloway, 1990).

El Cu se presenta como  $\text{Cu}^{+1}$  y  $\text{Cu}^{+2}$ , pero en término de energía libre de gibs es usual la forma de  $\text{Cu}^{+2}$  ( $\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6^{+2}$ ). Sin embargo, en condiciones de anegamiento se puede presentar en formas  $\text{Cu}^{+1}$  y  $\text{Cu}^0$ . A un pH ligeramente neutro y ácido la forma relevante de Cu es  $\text{Cu}^{+2}$ , también pueden encontrarse como  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CuCO}_3$ ,  $\text{CuCl}$ ,  $\text{Cu}(\text{Cl}_2)^-$  y varios complejos orgánicos. Según Lindsay la actividad de  $\text{Cu}^{+2}$  en el suelo fue estimado en  $\log \text{Cu}^{+2} = 2.8 - 2\text{pH}$ . Para la solución suelo con pCu igual a 6, el pH del suelo puede ser 4.4 y con pCu igual a 14 el pH se estima en 8.4 (Alloway, 1990). Los productos de la hidrólisis de Cu ( $\text{CuOH}^+$  y  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2^{+2}$ ) son las especies más importante debajo de un pH 7, mientras sobre el pH 8 complejos hidróxidos de Cu se vuelven importantes (Kabata y Pendias, 2011).

Desde que el Cu se puede encontrar en 20 a 30  $\text{mg kg}^{-1}$  este puede existir como  $\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6^{+2}$  adsorbido a superficie de minerales, ocluido o coprecipitado por arcillas silicatadas o no silicatadas y como complejos orgánicos. La adsorción de  $\text{Cu}^{+2}$  por el peso arcillas está en el orden de caolinita > illita > esmectita; esta relación indica que la adsorción o fijación se incrementa así como disminuye la relación sílice/sesquióxidos. En suelos con óxidos de hierro y aluminio con alta superficie específica, el  $\text{Cu}^{+2}$  puede ser quimiosorbido y ocluido. En suelos agrícolas, a un pH de 5.5 el Cu puede presentarse como iones adsorbidos específicamente y complejos. La adsorción específica no depende directamente de la capacidad de intercambio catiónico pero sí directamente del pH (Alloway, 1990). En base a diferentes estudios, grandes

cantidades de Cu adsorbidos fueron encontrados relacionados a óxido e hidróxidos de hierro y manganeso y arcillas (Kabata y Pendias, 2011).

La quelatación y la formación de complejos son parámetros que determinan el comportamiento de Cu en suelos orgánicos (Kabata y Pendias, 2011). El grupo funcional COO- forma complejos estables en la fase líquida y sólida. Así, en suelo orgánico se esperaría deficiencia de Cu en la planta y disminución de su toxicidad (Alloway, 1990). Alrededor del 80% de las formas solubles de Cu fueron estimados en ser quelatos orgánicos. Se estimó hasta 3500 mg kg<sup>-1</sup> de Cu en suelos contaminados por la industria y 1500 mg kg<sup>-1</sup> en suelos agrícolas (Kabata y Pendias, 2011).

## **2.6 DETERMINACIÓN DE METALES POR LA ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ATÓMICA DE PLASMA ACOPLADO INDUCTIVAMENTE (ICP-AES)**

Los metales en los suelos pueden estar presentes en varias fases geoquímicas diferentes que actúan como reservorios o sumideros de elementos traza en el medio (Kramer y Allen, 1988). Estas fases incluyen las siguientes categorías generales: intercambiable; adsorbido a superficies; carbonato; óxidos de hierro y óxidos de manganeso; materia orgánica; y constituyente mineral (Beckett, 1988).

La Espectrometría de Emisión Atómica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES) se utiliza para determinar los metales y no metales en solución. Este método es una consolidación de los métodos existentes para el agua, aguas residuales y residuos sólidos. Es aplicable a los siguientes analitos como Al, Sb, As, Ba, Be, B, Cd, Ca, Cr, Co, Cu, Fe, Pb, Li, Mg, Mn, Hg, Mo, Ni, P, K, SE, SI O y Ag. Se puede utilizar para determinar analitos disueltos en muestras acuosas después de la filtración adecuada y la preservación de ácido. Para reducir las interferencias potenciales, los sólidos disueltos deben ser <0,2% (w v<sup>-1</sup>). Para la determinación del total de analitos recuperables en muestras acuosas y sólidas se requiere una digestión o extracción antes del análisis cuando los elementos no están en solución (por ejemplo, suelos, lodos, sedimentos y muestras acuosas que pueden contener partículas y sólidos suspendidos). Muestras acuosas que contienen materiales suspendidos o particulados de 1% (w v<sup>-1</sup>) debe ser extraído como una muestra de tipo sólido (EPA, 1994).

El método EPA 200.7 (1994) (Determination of Metals and trace Elements in Water and Wates by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry. 1994) presenta un procedimiento particular. Parte de la alícuota de una muestra acuosa o sólida bien mezclada y homogénea se pesa o mide para el procesamiento de la muestra con precisión. Para el análisis total recuperable de un sólido o una muestra acuosa que contiene el material no disuelto, los analitos se solubilizan primero por calentamiento a reflujos suave con ácidos nítrico y clorhídrico. Después de enfriar, la muestra se completa hasta el volumen, se mezcla y se centrifuga o se deja sedimentar durante la noche antes del análisis. Para la determinación de analitos disueltos en una alícuota de muestra acuosa filtrada o para el "análisis directo" determinación total recuperable de analitos, en el agua potable donde turbidez de la muestra es  $<1$  NTU, la muestra se prepara para su análisis por la adición apropiada de ácido nítrico, y después se diluye a un volumen predeterminado y se mezclan antes del análisis.

El análisis que se describe en este método implica determinaciones multielementales por ICP-AES utilizando instrumentos secuencial o simultánea. Los instrumentos miden características atómicas como los espectros de emisión mediante la espectrometría óptica. Las muestras se nebulizan y el aerosol resultante se transporta a la antorcha de plasma. Los espectros mostrados por la emisión específica se producen por una radiofrecuencia de plasma acoplado inductivamente. Los espectros se dispersan por un espectrómetro de rejilla, y las intensidades de los espectros de línea se controlan en longitudes de onda específicas por un dispositivo fotosensible. Fotocorrientes desde el dispositivo fotosensible se procesan y son controlados por un sistema informático. Se requiere una técnica de corrección de fondo para compensar la contribución del fondo variable para la determinación de los analitos.

Según el EPA 200.7 (1994) es posible poder hallar el mercurio total (Hg) con ciertas consideraciones. El procedimiento de digestión de la muestra total recuperable dada en este método no es adecuado para la determinación de compuestos orgánicos de mercurio volátiles. Sin embargo, si no se requiere la digestión (turbidez  $<1$  NTU), las concentraciones combinadas de inorgánica y organo-mercurio en solución pueden ser determinados por "análisis directo" nebulización neumática proporcionó la solución de

la muestra se ajusta para contener el mismo ácido mixto ( $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ ) de la matriz como el total de los estándares de calibración recuperable y soluciones en blanco.

Un esquema de extracción química secuencial de cinco pasos, originalmente diseñado para el análisis de los sedimentos por la Espectroscopia de Absorción Atómica de Llama (FAAS), ha sido desarrollado para el análisis de varios elementos de los suelos por Espectrometría de Emisión Atómica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES). Cada una de las fracciones químicas evaluadas está operacionalmente definido de la siguiente manera: intercambiable; unido a carbonatos o específicamente adsorbido; unido a Fe-Mn-óxidos; unida a la materia orgánica y sulfuros; y residual (Li *et al.*, 1994).

## **2.7 MARCO NORMATIVO NACIONAL E INTERNACIONAL**

La investigación se basa en marco normativo de la Ley General del Ambiente (Ley N° 28,611) que en el artículo I establece que toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, y el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, asegurando particularmente la salud de las personas en forma individual y colectiva, la conservación de la diversidad biológica, el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y el desarrollo sostenible del país (Congreso de la República, 2009). Se muestra las normas empleadas en la investigación.

### **2.7.1 Instrumento de Gestión Ambiental Correctivo (IGAC) (DS N° 004-2012-MINAM)**

El decreto regula la formalización de actividades de pequeña minería y minería artesanal en curso. Tiene como objetivo adecuar las obligaciones legales ambientales vigentes, adoptando las medidas ambientales para prevenir, controlar, mitigar y remediar los impactos ambientales de su actividad. Contiene metas graduales, cronograma de inversiones, y resultados ambientales los que son objeto de fiscalización y sanción. Describe los impactos ambientales ocasionados por la actividad en el agua, suelo, flora y fauna, así como en el paisaje, identificando y evaluando cada uno de los impactos ambientales generados por cada etapa de la operación y procesos. A la vez, determina acción de prevención y mitigación ambiental, monitoreo ambiental, acción

de contingencia y acción de cierre y post cierre de minas. Expresamente contempla la protección o remoción de infraestructura, descontaminación del suelo, nivelación y revegetación del área afectada, control de deslizamientos y escorrentías, monitoreo y otras (MINAM, 2012).

### **2.7.2 Estándares de Calidad Ambiental para Suelos (D.S.N°002.2013 MINAM)**

Los Estándares de Calidad Ambiental para el compartimento suelo establecen concentraciones máximas de elementos, sustancias químicas o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el suelo en su condición de cuerpo receptor, que no presenta riesgos significativos para la salud de las personas ni el ambiente. Ella es aplicable a todo proyecto o actividad cuyo desarrollo dentro del territorio nacional genere riesgos de contaminación del suelo. Determina la formulación de Planes de Descontaminación de Suelos al igual de Guía para el Muestreo de Suelo. A partir de ella se diseñan y establecen la aplicación de todo tipo de políticas e Instrumentos de Gestión Ambientales. La Autoridad Ambiental Nacional, en coordinación con los sectores correspondientes, dispondrá la aprobación y registrará la aplicación de estándares internacionales o de nivel internacional en los casos que no existan ECA o LMP equivalentes aprobados en el país (MINAM, 2013).

### **2.7.3 Guía para el muestreo de suelos (R.M. N° 085-2014)**

Guía que permite realizar adecuados planes de muestreo, técnicas adecuadas para el muestreo, manejo de muestras, medidas de seguridad ocupacional durante el muestreo y determinación adecuada de los puntos de muestreo. En función del objetivo, la guía establece el método y tipo de muestreo además del tipo de muestras a tomar. Determina el muestreo adecuado para determinar la existencia de contaminación en el suelo, la dimensión (extensión horizontal y vertical) de la contaminación, las concentraciones de nivel de fondo y verifica si las acciones de remediación lograron reducir la concentración de los contaminantes en suelo (MINAM, 2014).

#### **2.7.4 Reglamento para la ejecución de levantamiento de suelos (D.S. N° 013-2010-AG)**

Es un reglamento que establece métodos y procedimientos para la ejecución, presentación, revisión y aprobación de los levantamientos de suelos. Homogeniza los criterios técnicos utilizados, por los especialistas aplicables en los diferentes niveles de levantamiento de suelos. Promueve el uso y aplicación de la información obtenida en los estudios de levantamiento de suelos de modo tal, que constituya una herramienta obligatoria en la elaboración de los diferentes estudios ambientales (Estudios de Impacto Ambiental, Evaluaciones Ambientales Preliminares, Planes de Cierre de Minas o de alguna otra actividad, Vulnerabilidad Física, Zonificación Ecológica Económica, Zonificación Ecológica, Zonificación Agroecológica, entre otros), así como para la planificación del uso y, del manejo de cultivos silvoagropecuarios. Establece estudio de suelo a nivel muy detallado, detallado, semidetallado, reconocimiento y exploratorio. Para cada tipo de estudio determina el material de teledetección, material cartográfico, unidad fisiográfica, unidad cartográfica, mapa base de trabajo, tamaño mínimo de la unidad del mapa, procedimientos de campo, método de mapeo, intensidad de observaciones y escala del mapa de suelos. Finalmente, incorpora el concepto de Tierra como un ambiente físico que incluye al clima, relieve, suelo, hidrología y vegetación, al grado que influyen el potencial de uso de la tierra (MINAG, 2013).

#### **2.7.5 Valores guía de calidad de suelos para la protección de la salud humana y del ambiente de Canadá**

La guía de calidad del suelo canadiense se dedica a la protección de los receptores ecológicos en el medio ambiente y/o protección de la salud humana asociados con los usos de la tierra. Emplea los términos “guías” como límites numéricos o declaraciones narrativas recomendadas para apoyar y mantener los usos designados del ambiente del suelo; “objetivos” como los límites numéricos o declaraciones narrativas establecidas para proteger y mantener los usos designados del ambiente del suelo en un sitio particular; “estándares” como guías y objetivos reconocidos en las leyes de control ambiental exigibles en el gobierno. Las guías se desarrollan en base a sustancias específicas ya que se requiere, después de una revisión exhaustiva, las características físico/químicas, los niveles de fondo en los suelos canadienses, la toxicidad y el destino ambiental y el comportamiento de cada sustancia. Las guías se emplean para

proteger a los receptores humanos y ecológicos clave que sustentan las actividades normales en las cuatro categorías de uso de la tierra: agrícola, residencial/parques, comerciales e industriales; se basa en función a cómo se usa la tierra y de lo sensible y dependiente de la actividad en la tierra. El protocolo de la guía reconoce que el destino y transporte de contaminantes, así como la biodisponibilidad, dependen en mayor o menor grado de la textura del suelo, contenido de humedad y otros factores. Para minimizar la incertidumbre por la variabilidad del suelo, el protocolo considera dos tipos genéricos de suelo: suelos de textura gruesa (arena y grava) y los suelos de textura fina. Los valores guías de calidad de suelos para cada tipo de uso de la tierra se elaboraron en base a la naturaleza de los contaminantes como dosis de riesgo, peso, concentración de fondo y comportamiento en el suelo, y también a su relativa absorción a órganos del cuerpo humano y nivel de exposición (CCME, 2007).

## **2.8 ANÁLISIS MULTIVARIADO APLICADA A LA CARACTERIZACIÓN DE METALES EN EL SUELO Y GEOESTADÍSTICA**

El conocimiento de la variabilidad regional, los valores de fondo y de la antrópico versus el origen natural para los elementos potencialmente dañinos en los suelos es de importancia crítica para evaluar el impacto humano y para determinar valores guía y estándares de calidad. Estudios de caracterización espacial de metales presentan objetivos como determinar las concentraciones promedio de algunos metales, determinar su variabilidad a gran escala; determinar su origen natural o artificial; e identificar posibles fuentes no puntuales de contaminación. Aquí se aplica la estadística con análisis multivariados (Análisis de Componentes Principales y Análisis de Conglomerados) que adopta diferentes datos con diferentes parámetros, permitiendo que el identificación de factores que controlan la variabilidad de metales en los suelos (Facchinelli *et al.*, 2001).

El Análisis de componentes principales (ACP) trata de explicar la estructura de la variancia y covariancia de un conjunto de variables mediante unas combinaciones lineales, llamadas componentes principales. Estos componentes principales no están correlacionados entre sí, y cada uno maximiza su variancia. El ACP aspira a reducir o simplificar los datos y facilitar su análisis e interpretación. La reducción o simplificación es posible porque frecuentemente mucha de la variabilidad de los datos se puede explicar por un número pequeño de componentes principales que es mucho

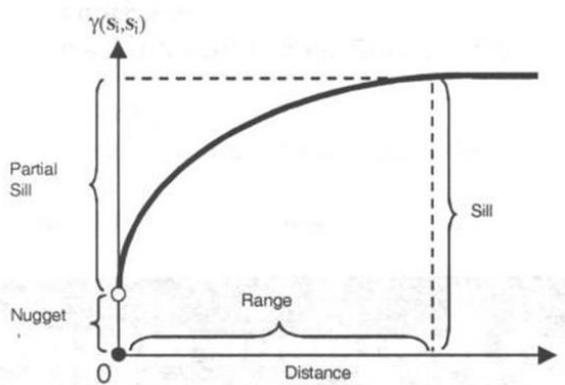
menor al número de variables. De esta manera el conjunto original se reducirá a mediciones y variables a concentrarse en determinados componentes. El investigador puede tomar los componentes determinados y descubrir dimensiones o rasgos más interesantes o informativos para fines descriptivos o interpretaciones. La reducción puede ser útil como un primera etapa de análisis y proseguir a técnicas multivariadas de regresión, análisis de variancia, agrupamiento y otras (Hernández, 1998).

El Análisis de Conglomerados, conocido como Análisis Cluster, agrupa elementos (o variables) tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos. El Análisis de Conglomerados tiene una importante tradición de aplicación en muchas áreas de investigación. Es una técnica descriptiva, teórica y no inferencial. No tiene bases estadísticas sobre las que deducir inferencias estadísticas para una población a partir de una muestra, es un método basado en criterios geométricos y se utiliza fundamentalmente como una técnica exploratoria, descriptiva pero no explicativa. Las soluciones no son únicas, en la medida en que la pertenencia al conglomerado para cualquier número de soluciones depende de muchos elementos del procedimiento elegido. Por otra parte, la solución de conglomerados depende totalmente de las variables utilizadas, la adición o destrucción de variables relevantes puede tener un impacto substancial sobre la solución resultante (De la Fuente, 2011).

La geoestadística se basa en expresar la distribución de metales para compararse con el uso geológico y terrestre en base de datos regionales utilizando software SIG geográficos mediante el método kriging (variogramas). Los elementos críticos que limitan la precisión de la cartografía son altos valores esporádicos (hot-spots) y una resolución relativamente gruesa de los mapas de entrada. La automatización de la cartografía geoestadística y el uso de capas espaciales auxiliares permite desarrollar sistemas de mapeo que pueden actualizar automáticamente las salidas mediante la inclusión de nuevas observaciones de campo y mapas auxiliares de mayor calidad (Rodríguez *et al.*, 2008).

La geoestadística se basa en variogramas (figura 6). Ellos permiten conocer y analizar el comportamiento espacial de un variables y otras en una determinada área. Su función es la varianza y su variable independiente es la distancia. En su proceso,

primero se define un variograma experimental que refleja la distancia máxima (Rango), con una varianza constante (sill) hasta llegar a un estado donde no hay dependencia espacial o no existe correlación entre los puntos; además permite observar la forma que se originaría con los puntos evaluados gracias a la influencia de un punto sobre otro a diferentes distancias. Luego, se realiza un modelo matemático que modele mejor al variograma experimental, lo cual dará origen a un variograma teórico. Este es usado para definir el ponderador que se aplica a cada una de las muestras encontradas al momento de asignar un valor al punto buscado, también es llamado como krigeaje (Montero y Larraz, 2008 y Gallardo, 2006). Este último es un método estadístico multivariante o univariante basada en variogramas, que permite mejorar la precisión de las interpolaciones ya que la varianza teórica de krigeaje indica la precisión de la estimación y permite identificar zonas en las que la estimación es poco fiable (Bourelhier y Berthelin, 1998 citado por Porta *et al.*, 1999).



**Figura 5: Partes del variograma**

FUENTE: Montero y Larraz (2008)

Leyenda:

Rango: distancia a la cual el variograma se estabiliza.

Sill: Valor constante que toma el variograma en distancias mayores que el rango.

Nugget: Valor constante inicial del variograma cuando toma valor inicial el rango.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 UBICACIÓN

La investigación se realizó en la concesión minera de la Sociedad Minera Fortuna Milagritos S.R.L, la cual se dedicada a la pequeña minería aurífera aluvial empleando el equipo llamado “traca”. Se ubica en el centro poblado de Fortuna, de la provincia de Tambopata, en la Región de Madre de Dios y a 202 msnm. El área comprende 100 ha que incluye áreas impactadas y no impactadas. Las coordenadas y su ubicación se muestran en el cuadro 6 y figura 6.

**Cuadro 6: Coordenadas del área de estudio seleccionada**

vértice	Coordenadas UTM		
A	19 L	428,673 m	8'596,673 m
B	19 L	428,669 m	8'597,410 m
C	19 L	430,046 m	8'597,436 m
D	19 L	430,023 m	8'596,723 m

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 6: Ubicación del área evaluada**

FUENTE: Google earth (2013)

## 3.2 MATERIALES Y EQUIPOS

Los materiales y equipos empleados en la investigación se muestran en el cuadro 7:

**Cuadro 7: materiales y equipos**

<b>Campo</b>	<b>Laboratorio</b>	<b>Software</b>
Cuaderno de notas	Varios reactivos	R versión 3.2.2
Lápices	Equipos de Espectrofotómetro	(estadística)
Marcadores	de emisión atómica de plasma	ArcGis versión 10.1
Bolsas herméticas	acoplado inductivamente	(SIG)
Flexómetro	(ICP - AES)	
Picota	Potenciómetro	
Pala	Agitador eléctrico	
Pico	Equipo colorimétrico	
Frascos herméticos	Balanza analítica	
GPS	Agitador de laboratorio	
Cámara fotográfica	Mechero bunsen	
Balanza de mano	Conductímetro	

FUENTE: Elaboración propia, 2016

## 3.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES NATURALES

### 3.3.1 Geología y geomorfología

La geomorfología regional es una llanura ubicada el sureste peruano en el cauce del río Madre de Dios. Está conformada por terrazas (5 m de altura), áreas inundables, agujales y meandros. El relieve presenta una depresión que influye en el drenaje de tierras, originando una napa freática muy alta. Se calcula que el 20% está conformado por placeres auríferos (Palacios *et al.*, 1996).

La estratigrafía del área de estudio se encuentra sobre depósitos cuaternarios. Ellos están constituidos por gravas, arenas y arcillas que conforman la sobrecarga, los cuales incluyen al oro aluvial en las gravas. Las llanuras se componen por arenas y limo, y los meandros se componen de limos, arcillas y arenas con importantes contenidos auríferos. Las partículas más finas están en las áreas inundables y las menos finas están a lo largo del canal. La arena es cuarzo feldespático (ferromagnésico) que por oxidación es de color ocre rojiza (Palacios *et al.*, 1996).

La geología estructural del área de estudio se llama Llanura de Madre de Dios. Presenta una superficie ligeramente ondulada sobre la que discurren ríos sinuosos. Los depósitos cuaternarios forman terrazas y llanuras aluviales con canales abandonados. La edad de los depósitos se encuentra entre 40,000 años a 176,000 años (Kalliolla y Danjoy, 1993 citados por Palacios *et al.*, 1996).

### 3.3.2 Hidrología

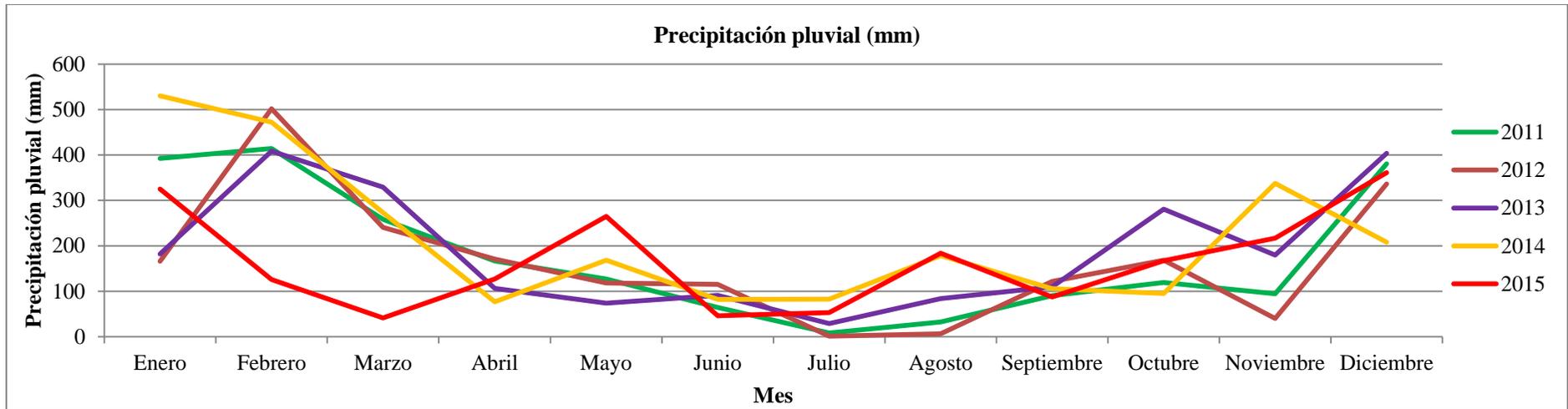
El área de estudio corresponde a la cuenca hidrográfica del río Madre de Dios que tienen como tributarios a los ríos Colorado, Inambari y Tambopata por la margen derecha y ríos Amigos y Heath por la margen izquierda. Se origina en la parte alta con los ríos Inambari y Colorado en las alturas del Manu y Alto Madre de Dios. En su recorrido forma una sucesión de curvas que conforman los meandros compuestos por arenas inundables. Este río tiene un recorrido longitudinal de aproximadamente 400 km (Palacios *et al.*, 1996).

### 3.3.3 Cobertura Vegetal

La cobertura vegetal está representada por un bosque siempre verde, alto y tupido. Los árboles más altos, llamados emergentes, alcanzan un dosel de 35 m y con un diámetro de 1 m. Los árboles emergentes son heliófilos como los géneros *Erythrina*, *Tabebuia* y *Jacaranda*. La cantidad de Arecáceas (palmeras) es menor que en las zonas de vida más húmedas y cálidas. En general, la cubierta vegetal está conformada por tornillo (*Cedrelinga catenaeformis*), moena blanca, amarilla y negra (Laureaceae), congona (*Brosimum* sp.), nogal (*Juglans neotropica*), cedro de altura (*Cedrela* sp.), los géneros *Cordia*, *Tabebuia*, *Sapium*, *Croton*, *Aspidosperma*, *Schizolobium*, *Pithecolobium*, *Cecropia*, *Chorisia*, *Calophyllum*, *Matisia*, *Hura*, *Guazuma*, y palmeras de los géneros *Socratea*, *Iriarte*, *Jessenia*, *Phytelephas*, *Sheelea* y *Astrocaryum* (GEMA, 2006).

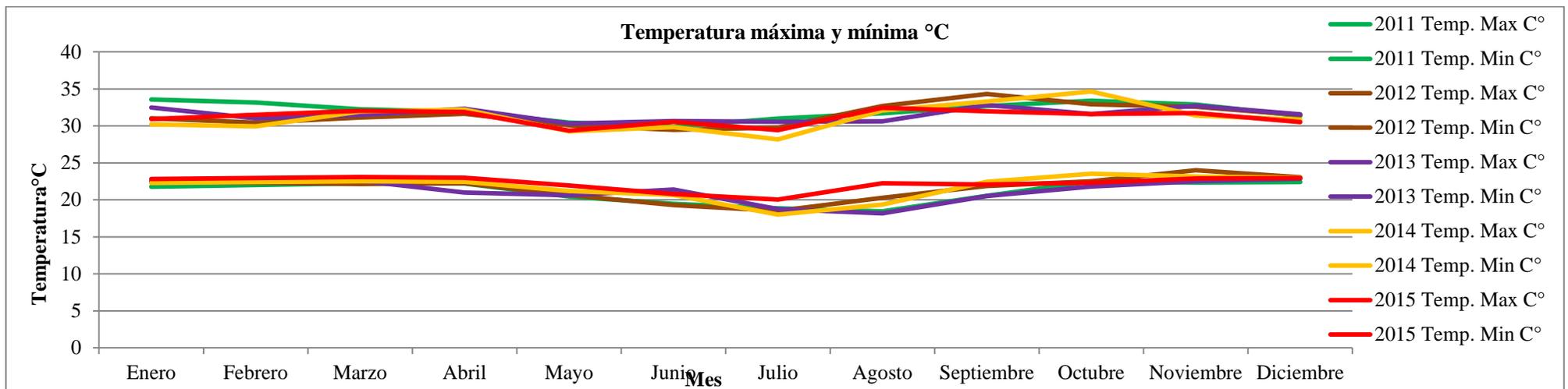
### 3.3.4 Clima y Zona de Vida

Según la clasificación propuesta por Thornthwaite el clima de la zona evaluada es un clima húmedo cálido (ANA, 2010). Los datos registrados como humedad relativa, temperatura y precipitación se basan en mediciones realizadas por las estaciones meteorológicas Malinowsky y Puerto Maldonado desde el año 2011 al 2015. La humedad relativa en el año de estudio se encuentra entre 87 a 97 %. La precipitación pluvial se caracteriza por ser alternado, presentando valores medios anuales que oscilan entre un 2,000 mm a 2,610 mm. La temperatura mínima oscila entre 18 a 24 °C y la temperatura máxima entre 35 y 30°C. En base al análisis de los parámetros de clima (precipitación, temperatura y humedad), así como la presencia de los friajes y los elementos florísticos particulares, se ha establecido la zona de vida llamada bosque húmedo sub tropical (bh – S) (GEMA, 2006). La precipitación pluvial y la temperatura del área de estudio se muestran en la figura 7 y figura 8:



**Figura 7: Precipitación pluvial mensual desde el año 2011 al 2015**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 8: Temperatura máxima y mínima mensual desde el año 2011 al 2015**

FUENTE: Elaboración propia, 2016

### 3.4 EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS METALES EN EL SUELO

La evaluación de la concentración y distribución espacial de los metales permitió conocer la concentración de metales en el área de explotación minera. Se basó en la Guía para el Muestreo de Suelos (R.M. N° 085-2014) y Estándares de Calidad Ambiental para Suelos (D.S.N°002-2013-MINAM) de uso agrícola y comercial, industrial y/o extractivo.

#### 3.4.1 Delimitación del área de potencial interés para el muestreo de calidad de suelos

De las 100 ha seleccionadas se determinaron 13 ha de potencial interés para evaluar los metales en el suelo. El área de potencial interés se subdividió en 3 áreas de acuerdo con su tipo de cobertura vegetal. A la vez, cada área se subdividió en 3 sub áreas de acuerdo con los años desde la última actividad minera. En el cuadro 8 se muestra el tipo del área y sub área de potencial interés y en la figura 9 se muestra la ubicación del área de potencial interés:

**Cuadro 8: Tipo de área y sub área de potencial interés**

Área		Sub área		Área (ha)
Recientemente Intervenido (R)	Arbustos	R	1 Impactada hace 2-3 años	5
			2 Impactada hace 4 años	2
			3 Impactada hace 4-5 años	1
			4 Impactada hace 0-1.5 años	3
Intervenido hace un tiempo (T)	Bosque secundario o purma	T	1 Impactada hace 6-7 años	1
			2 Impactada hace 7-8 años	1
No intervenida (N)	Bosque primario	N	Natural no impactada	-

FUENTE: Elaboración propia, 2016

#### 3.4.2 Diseño de muestreo

El diseño de muestreo se basó en un criterio probabilístico que incluye selecciones aleatorias de las unidades de muestreo.

#### 3.4.3 Tipo de muestreo

El tipo de muestreo fue de identificación según la Guía de muestreo de suelo (R.M. N° 085-2014), la cual determinó la posible contaminación del suelo. Las muestras pertenecieron a las áreas impactadas por la actividad minera. También se realizó un muestreo de nivel de fondo que permitió determinar la concentración de los químicos en sitios aledaños no impactados por la actividad minera. Su origen puede ser natural o antropogénico (ajena a la actividad minera).

### 3.4.4 Patrones de muestreo

El patrón de muestreo tuvo un criterio estadístico probabilístico. El muestreo fue aleatorio estratificado de acuerdo a cada área y sub área determinada previamente. El patrón de muestreo fue de distribución heterogénea aleatoria.

### 3.4.5 Número de puntos de muestreo

En cada sub área se determinó el número mínimo de puntos de muestreo en base a la Guía de muestreo de suelo (R.M. N° 085-2014) como se muestra en el cuadro 9:

**Cuadro 9: Número de puntos de muestreo correspondientes a cada estrato**

Sub área		Área (ha)	Puntos de muestreo
R1	Área impactada hace 2-3 años	5	23
R2	Área impactada hace 4 años	2	15
R3	Área impactada hace 4-5 años	1	20
R4	Área impactada hace 0-1.5 años	3	13
T1	Área impactada hace 6-7 años	1	10
T2	Área impactada hace 7-8 años	1	9
N	Área natural no impactada (nivel de fondo)	-	3

FUENTE: MINAM (2014)

### 3.4.6 Profundidad y tipo de muestra

Cada punto de muestreo tuvo una profundidad de 10 cm determinado para el suelo de tipo comercial, industrial y extractivo según los Estándares de Calidad Ambiental para Suelos (D.S.N°002-2013-MINAM). El tipo de muestra en todos los casos fue simple.

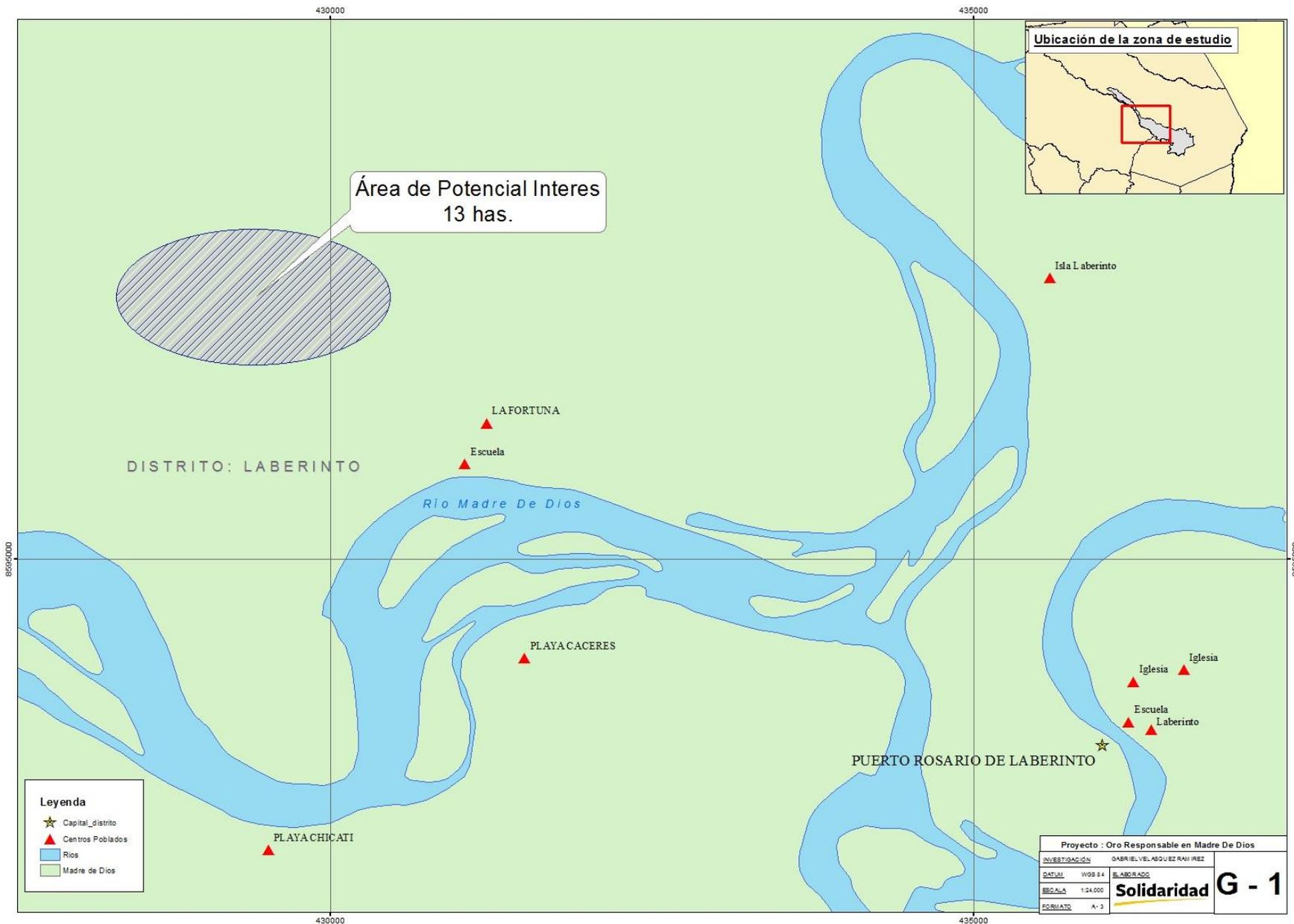
### 3.4.7 Parámetros de calidad a evaluar y métodos de análisis

Los parámetros evaluados en la calidad de suelo se muestran en el cuadro 10:

**Cuadro 10: Parámetros a evaluar en la calidad de suelo**

Parámetros	Unidad	Métodos de análisis empleado
Arsénico (As)	mg/kg MS	EPA Method 200.7, Rev.4.4. EMMC Version. Determination of Metals and trace Elements in Water and Wates by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry. 1994 (acreditado)
Bario (Ba)	mg/kg MS	
Cadmio (Cd)	mg/kg MS	
Plomo (Pb)	mg/kg MS	
Mercurio (Hg)	mg/kg MS	
Cobre (Cu)	mg/kg MS	
Cromo (Cr)	mg/kg MS	
Niquel (Ni)	mg/kg MS	
Vanadio (V)	mg/kg MS	
Zinc (Zn)	mg/kg MS	

FUENTE: Laboratorio Servicios Analíticos Generales S.A.G



**Figura 9: Mapa de ubicación del área de estudio en la asociación minera FORTUMIL**

FUENTE: Solidaridad (2016)

### 3.5 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS IMPACTADOS

Sobre el área de evaluación de 100 ha, que incluye a las 13 ha de área potencial interés para evaluar metales en el suelo, se evaluaron las características morfológicas, físicas y químicas de los suelos impactados y no impactados por la actividad minera. Esta evaluación se basó en el Reglamento para la Ejecución de Levantamiento de Suelos (D.S. N° 013-2010-AG) a un nivel de estudio semi detallado.

#### 3.5.1 Material de teledetección, unidad fisiográfica y unidad taxonómica

Se emplearon imágenes de satelitales de acceso libre como se muestra en el cuadro 11:

**Cuadro 11: Mapas empleados en la evaluación de las características morfológicas, físicas y químicas de los suelos impactados**

Mapa	Escala	FUENTE
Mapa geológico del cuadrángulo Laberinto	1: 100 000	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET)
Carta nacional correspondiente a Inambari	1: 100 000	Instituto geográfico Nacional (IGN)
Mapa ecológico del Perú	1: 1000 000	Oficina nacional de evaluación de recursos naturales (ONERN)

FUENTE: Elaboración propia, 2016

El estudio se realizó sobre terrazas bajas y se estudió el suelo hasta sub grupos.

#### 3.5.2 Procedimiento de campo

Los suelos fueron identificados por observación directa en el campo y se tomó muestras en puntos que representen variabilidad edáfica del área de estudio.

#### 3.5.3 Método de mapeo

El levantamiento de campo se realizó mediante travesía en el área muestra.

#### 3.5.4 Parámetros evaluados

A continuación en el cuadro 12 y cuadro 13 se presentan los parámetros para evaluar las características morfológicas, físicas y químicas del suelo.

**Cuadro 12: Parámetros evaluados en laboratorio**

<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>
<b>pH</b>	Medición en la solución del suelo en la relación suelo/agua de 1/1
<b>C.E. dS/m</b>	Medición en el extracto acuoso en la relación suelo/agua de 1/1
<b>Materia orgánica o Mo %</b>	Método Walkley y Black
<b>P total mg kg<sup>-1</sup></b>	Método Bray
<b>K total mg kg<sup>-1</sup></b>	Extracto con Acetato de amonio
<b>Textura</b>	Método del hidrómetro
<b>CIC Cmol (+)/kg</b>	Saturación con Acetato de amonio a pH7
<b>Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup> Intercambiables Cmol (+)/kg</b>	Cuantificación por absorción atómica
<b>Al<sup>+++</sup> y H<sup>+</sup> Cmol (+)/kg</b>	Método Yuan

FUENTE: Laboratorio de análisis de suelo, plantas, agua y fertilizantes UNALM

**Cuadro 13: Parámetros de evaluados en las calicatas**

<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>
<b>Paisaje</b>	Inspección presencial
<b>Relieve</b>	Inspección presencial
<b>Material madre</b>	Inspección presencial
<b>Erosión</b>	Inspección presencial
<b>Pedregosidad superficial (%)</b>	Inspección presencial
<b>Drenaje</b>	Inspección presencial
<b>Permeabilidad</b>	Inspección presencial
<b>Presencia de napa freática (cm)</b>	Inspección presencial
<b>Color</b>	Empleo de la tabla Munsell
<b>Moteado (%)</b>	Inspección presencial
<b>Profundidad (cm)</b>	Medición con cinta métrica
<b>Estructura</b>	Prueba manual
<b>Consistencia</b>	Prueba manual
<b>Fragmentos gruesos (%)</b>	Inspección presencial
<b>Límite</b>	Inspección presencial

FUENTE: Reglamento de levantamiento de suelos (MINAG,2010) y Soil Survey Manual (1993)

### 3.5.6 Mapa Base

El área evaluada se encuentra en un Bosque húmedo sub tropical (bh-s), sobre depósitos aluviales recientes del cuaternario, en terrazas bajas y con pendiente aproximada menor de 2 %. Se identificó la consociación “Fortuna” con una sola

unidad geomorfopedológica. El mapa base se muestra en la figura 10 y la unidad cartográfica y su característica se muestran en el cuadro 14:

**Cuadro 14: Unidad cartográfica y su característica**

Consociación	Zona de vida	Geología	Fisiografía	Pendiente	Hectárea
<b>Fortuna</b>	Bosque húmedo sub tropical	Depósitos aluviales del cuaternario	Terraza baja	0-2%	100
<b>Fo</b>	bh-S	Qh-al	Tb	A	bh-S/Qh-al/Tb/A

FUENTE: Elaboración propia, 2016

### 3.5.7 Intensidad de observaciones

Se elaboraron 3 calicatas representativas pertenecientes al sub área natural no intervenida (N), además se incluyeron 2 calicatas en sub áreas ya intervenidas con purma o bosque secundario (T1, T2). También, sobre las áreas recientemente intervenidas (R) se tomaron muestras superficiales de suelo. En esta última las muestras fueron superficiales dado que la presencia de la napa freática era evidente.

## 3.6 PROCEDIMIENTO DE MUESTREO, PRESERVACIÓN DE LAS MUESTRAS Y MEDIDAS PARA ASEGURAR LA CALIDAD DEL MUESTREO

El procedimiento para la toma de muestras fue el siguiente:

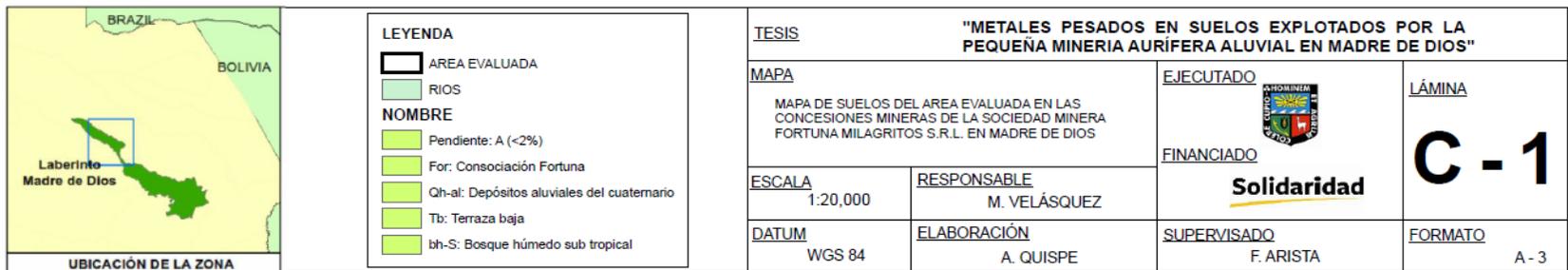
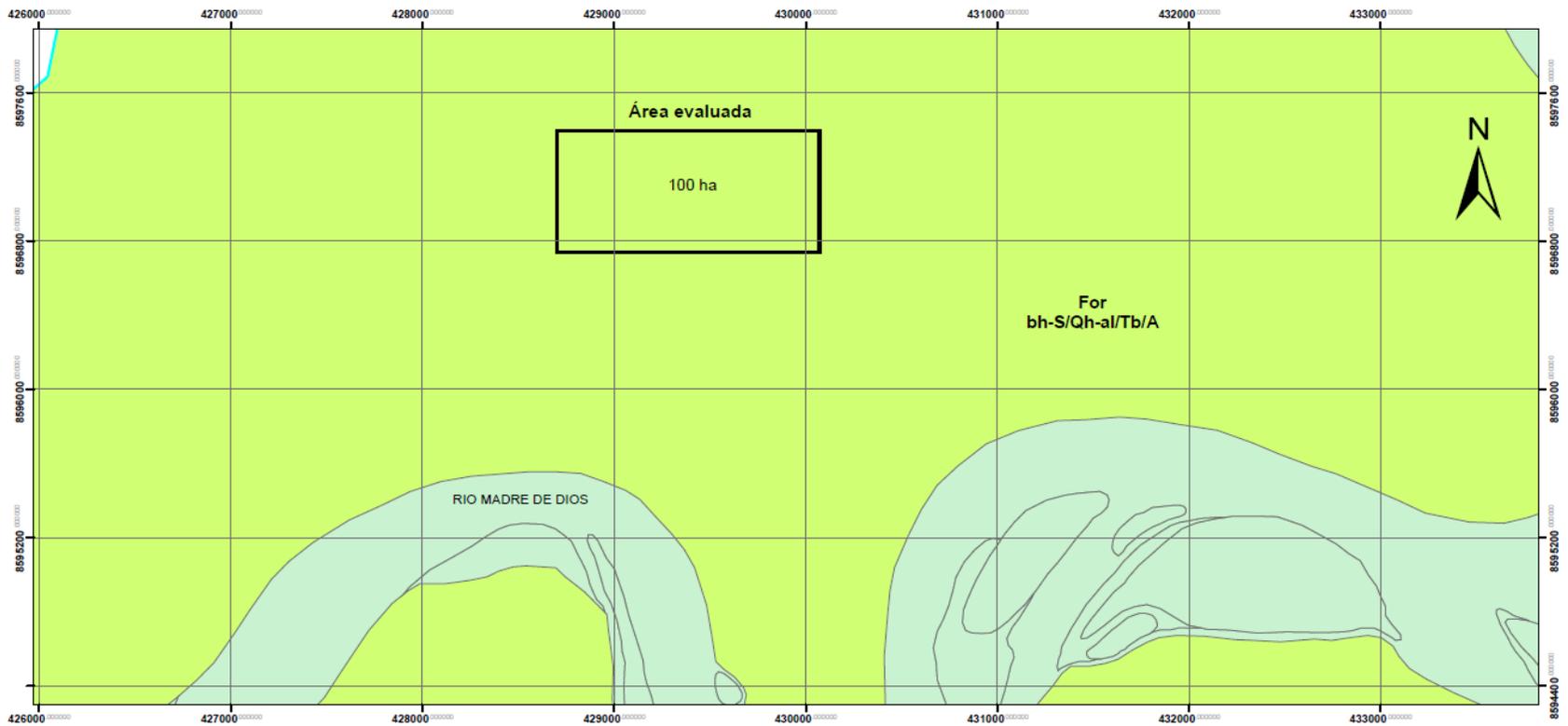
- Se excavó con pala, pico y barreta en la zona determinada. Este espacio se determinó de acuerdo al con el relieve, actividad, movimiento de fluidos, incidentes previos de contaminación, y accesibilidad.
- Se tomaron las muestras con cuidado para no alterar su estado. Se empleó el equipo necesario como bolsas herméticas, guantes de látex y mascarillas de seguridad.
- Se registró la información en la cadena de custodia, donde se anotó la fecha de muestreo, análisis a realizar, identificación de la muestra, fecha y hora de muestreo.

Se muestra en el cuadro 15 las condiciones de almacenamiento para mantener la calidad de las muestras.

**Cuadro 15: Condiciones para asegurar la calidad de la muestra**

Parámetro	Recipiente	Peso de muestra	Preservación	Tiempo de conservación
pH, CE, CIC, Textura, Carbonatos, N, P, K y Materia orgánica,	Bolsa plástica hermética	300 g	No requiere	1 mes
Metales	Bolsa plástica hermética	300 g	4 ± 2 ° C	No especifica

FUENTE: Laboratorio Servicios Analíticos Generales S.A.G.



**Figura 10: Mapa Base**  
FUENTE: Solidaridad, 2016

### 3.7 EVALUACIONES

En el cuadro 16 se muestra el criterio para realizar la evaluación espacial del grado de contaminación de suelos por metales y evaluar las características morfológicas, físicas y químicas de los suelos impactados y no impactados por la actividad minera aluvial.

**Cuadro 16: Evaluaciones**

Evaluación	Parámetro	Diseño estadístico	Área evaluada	Sub área	Muestras	Número de muestras
<b>Evaluación de la concentración y distribución espacial de metales en los suelos impactados (Ba, As, Cd, Hg, Pb, Cu, V, Zn, Ni y Cr)</b>	Concentración de Ba, As, Cd, Hg, Pb, Cu, V, Zn, Ni y Cr ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Análisis de componentes principales (ACP), análisis cluster (AC), análisis kriging y comparación de medias.	Impactadas recientemente (R)	R1	Superficial	23
				R2		15
				R3		20
				R4		13
			Impactadas hace un tiempo (T)	T1		10
				T2		9
			Áreas Naturales o nivel de fondo (N)	N1		1
				N2		1
				N3		1
			<b>Evaluación de las características morfológicas, físicas y químicas de los suelos impactados y no impactados</b>	Pedregosidad superficial (%), drenaje, permeabilidad, napa freática, color, moteado, profundidad, estructura, consistencia, fragmentos gruesos, pH, CE ( $\text{dS m}^{-1}$ ), Mo (%), P ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), K ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), CIC ( $\text{Cmol (+) kg}^{-1}$ ) Cationes cambiables ( $\text{Cmol (+) kg}^{-1}$ ), Saturación de bases (%)		Comparación de resultados
R2	1					
R3	1					
R4	1					
Impactadas hace un tiempo (T)	T1	4				
	T2	5				
Áreas Naturales o nivel de fondo (N)	N1	4				
	N2	5				
	N3	5				

FUENTE: Elaboración propia, 2016

## IV. RESULTADO Y DISCUSIÓN

### 4.1 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LOS SUELOS IMPACTADOS

En la evaluación de las características morfológicas físicas y químicas de los suelos impactados por la minería aurífera aluvial se realizaron análisis de suelos en campo y laboratorio. Se estudió el perfil del suelo de 3 calicatas en el área natural o no impactada y 2 calicatas en el área impactada hace un tiempo, también se incluyeron 4 muestras superficiales correspondientes al área impactada recientemente. El levantamiento de suelo se realizó en base al Soil survey manual (1993).

#### 4.1.1 Evaluación de las características morfológicas físicoquímicas de los suelos en el área recientemente impactada (R)

El suelo se distribuye dentro de un paisaje terraza baja con material madre aluvial, caracterizada por una permeabilidad rápida, drenaje excesivo, pendientes menores a 2%, erosión ligera y pedregosidad extrema. Sus características químicas están dadas por una fuerte reacción ácida, sin problemas de sales y el contenido nulo de carbonatos. Los niveles de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y potasio son bajos, y de fósforo es alto. La textura del suelo es gruesa y no presenta estructura. Así se muestra en el cuadro 17.

Las especies vegetales predominantes fueron arbustos de la familia Phabaceae como *Sclerolobium paniculatum*; Melastomataceae como *Tococa guianensis*, *Clidemia capitellata* *Tibouchina sp.*; Clusiaceae como *Clusia sp.*; Poaceae como *Gynerium sagittatum*. y Helechos como *Lycopodium cernuum*. También abundaron arbustos de la familia Ziperaceas. Se muestra en la figura 11 algunas especies vegetales.



**Figura 11: Vegetación de las áreas recientemente impactada (R)**  
FUENTE: Elaboración propia, 2016

**Cuadro 17: Cartilla del suelo en el área recientemente impactada (R)**

Características del ambiente				Paisaje	
Localidad	Fortuna - Madre de Dios	Altitud (msnm)	208		
Paisaje	terrazza baja	Relieve	plano		
Zona de vida	bosque húmedo subtropical	Precipitación (mm)	2,000		
Materia l parental	aluvial reciente	Pedregosidad superficial	extrema		
Permeabilidad	muy rápida	Drenaje	excesivo		
Vegetación	arbustos	Pendiente (%)	0		
Napa freática (cm)	50	Erosión	ligera		
Régimen de temperatura	hiper térmico	Régimen de humedad	údicó		
Uso actual		minería aurífera aluvial			
Características físicas					Suelo
Áreas	R1	R2	R3	R4	
Profundidad (cm)	0-30	0-30	0-30	0-30	
Color Munsel	Húmedo	2.5Y 5/3	2.5Y 5/3	2.5Y 5/3	
	Seco	2.5Y 3/3	2.5Y 3/3	2.5Y 3/3	
Moteado (%)	0.00	30.00	40.00	45.00	
Clase textural	Arena	Arena	Arena	arena	
Granulometría	arena (%)	90.56	90.56	90.56	
	limo (%)	6.00	6.00	6.00	
	arcilla (%)	3.44	3.44	3.44	
Fragmentos gruesos (%)	no hay (0)	no hay (0)	no hay (0)	no hay (0)	
Estructura	Granular	grano simple	grano simple	grano simple	
Raíces	no hay	no hay	no hay	no hay	
Límite	no hay	no hay	no hay	no hay	
Características químicas					
pH	4.82	4.24	4.67	5.19	
Carbonatos (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	
C.E. (dS m <sup>-1</sup> )	0.03	0.05	0.11	0.04	
Materia orgánica (%)	0.24	0.03	0.17	0.48	
Carbono orgánico (%)	0.13	0.01	0.09	0.26	
P (mg kg <sup>-1</sup> ) – Bray I	125.54	55.80	74.82	54.53	
K((mg kg <sup>-1</sup> ) – NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac	18.00	38.00	42.00	15.00	
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac	8.20	8.45	9.25	7.82	
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) – efectiva	3.36	2.66	2.65	2.01	
Cationes cambiables (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Ca <sup>++</sup>	1.93	1.42	1.49	
	Mg <sup>++</sup>	0.73	0.48	0.45	
	K <sup>+</sup>	0.06	0.13	0.10	
	Na <sup>+</sup>	0.14	.15	0.16	
	Al <sup>+++</sup> + H <sup>+</sup>	0.50	0.48	0.46	
Saturación de bases (%)	33.93	25.85	23.72	21.38	
PSI (%)	1.70	1.75	1.69	1.78	

FUENTE: Elaboración propia, 2016

#### 4.1.2 Evaluación de las características morfológicas físicoquímicas de los suelos en el área impactada hace años (T)

- **Caracterización del suelo en el área impactada hace 6-7 años (T1)**

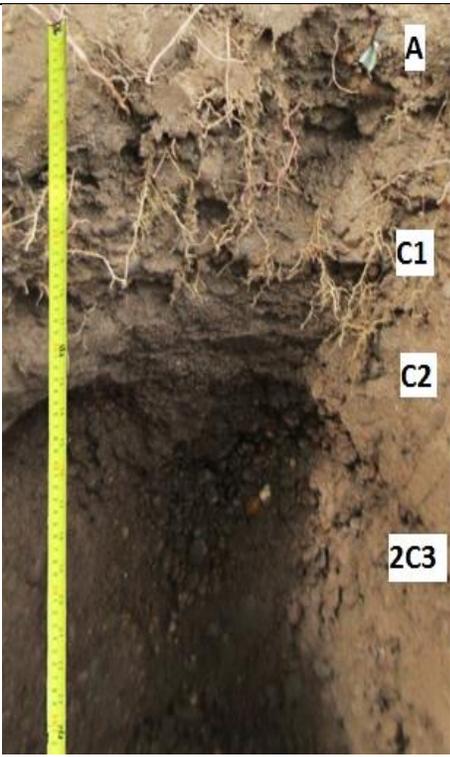
El suelo se distribuye dentro de un paisaje terraza baja con material madre aluvial, caracterizada por una permeabilidad rápida, drenaje excesivo, pendientes menores a 2%, erosión ligera, pedregosidad extrema y con presencia de napa freática a 1.5m de profundidad. Sus características químicas están dadas por una fuerte reacción acida, sin problemas de sales y el contenido nulo de carbonatos. Los niveles de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y potasio son bajos, y de fósforo es alto. La textura del suelo es gruesa y no presenta estructura. El suelo pertenece al subgrupo Anthropic Udorthents. Así se muestra en el cuadro 18.

Las especies vegetales predominantes fueron árboles de la familia Fabaceae como *Inga sp.*; Melastomataceae como *Graffenrieda limbata* y *Miconia tomentosa*; Rubiaceae como *Cinchonia pubescens*, Bignoniaceae como *Jacaranda glabra*; Urticaceae como *Cecropia sp.*; Hypericaceae como *Vismia baccifera*; Euphorbiaceae como *Alchornea triplinervia*; Malvaceae como *Ochroma pyramidale* (Topa Topa); Arecaceae como *Attalea phalerata*. Se muestra en la figura 12 algunas especies vegetales.



**Figura 12: Vegetación del área impactada hace 6-7 años (T1)**  
FUENTE: Elaboración propia, 2016

**Cuadro 18: Cartilla del perfil del suelo en el área impactada hace 6-7 años (T1)**

Características del Ambiente						Paisaje	
Coordenada UTM WGS 84		19 L 429,998mE 8'597,422mS		Altitud (msnm)	199		
Zona de vida	bosque húmedo subtropical	Paisaje	terrazza baja	Uso actual	minería aurífera		
Material parental	aluvial reciente	Relieve	Plano	Pendiente (%)	0		
Pedregosidad superficial	Extrema	Napa Freática (cm)	No	Profundidad (cm)	150		
Permeabilidad	muy rápida	Drenaje	Excesivo	Precipitación (mm)	2,000		
Régimen de humedad	Údico	Régimen de temperatura	hiper térmico	Erosión	ligera		
Epipedón	Mollico	Horizonte sub superficial	no aplica	Característica de diagnóstico	no hay		
Capacidad de uso mayor (2009)		pastos P3s	Soil Taxonomy (2014)	Anthropotic Udorthents			
Características físicas						Perfil de suelo	
Profundidad (cm)		0-10	10 - 25	25-42	>42		
Horizonte genético		A	C1	C2	2C3		
Color Munsel	Húmedo	2.5Y 3/3	2.5Y 3/3	2.5Y 3/3	2.5Y 4/3		
	Seco	2.5Y 5/3	2.5Y 5/3	2.5Y 5/3	2.5Y 5/4		
Moteado (%)		0.00	0.00	0.00	0.00		
Clase textural		arena	arena	Arena	Arena		
Granulometría	arena (%)	86.56	92.56	94.56	92.56		
	limo (%)	12.00	6.00	4.00	6.00		
	arcilla (%)	1.44	1.44	1.44	1.44		
Fragmentos gruesos (%)		medio(10)	grueso(30)	medio(10)	grueso(50)		
Estructura		granular	grano simple	grano simple	grano simple		
Raíces		fina	fina	no hay	no hay		
Límite		gradual	difuso	Difuso			
Características químicas							
pH		5.13	4.78	5.26	4.63		
Carbonatos (%)		0.00	0.00	0.00	0.00		
C.E. (dS/m)		0.05	0.04	0.04	0.04		
Materia orgánica (%)		0.17	0.20	0.48	0.14		
Carbono orgánico (%)		0.10	0.12	0.28	0.08		
P (mg kg <sup>-1</sup> ) - Bray I		92.57	87.5	81.16	110.32		
K(mg kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac		22.00	24.00	25.00	27.00		
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac		6.88	14.88	9.28	15.2		
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - efectiva		3.32	2.19	3.16	2.83		
Cationes cambiables (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Ca <sup>++</sup>	1.95	1.1	1.75	1.45		
	Mg <sup>++</sup>	0.82	0.35	0.55	0.48		
	K <sup>+</sup>	0.1	0.06	0.09	0.33		
	Na <sup>+</sup>	0.21	0.16	0.17	0.17		
	Al <sup>+++</sup> + H <sup>+</sup>	0.24	0.52	0.6	0.4		
Saturación de bases (%)		44.77	11.21	27.50	16.02		
PSI (%)		3.05	0.97	1.83	1.12		

FUENTE: Elaboración propia, 2016

- **Caracterización del suelo en el área impactada hace 7-8 años (T2)**

El suelo se distribuye dentro de un paisaje terraza baja con material madre aluvial, caracterizada por una permeabilidad rápida, drenaje excesivo, pendientes menores a 2%, erosión ligera, pedregosidad extrema y con presencia de napa freática a 1.5m de profundidad. Sus características químicas están dadas por una fuerte reacción acida, sin problemas de sales y el contenido nulo de carbonatos. Los niveles de materia orgánica (mayor a T1 en la superficie), capacidad de intercambio catiónico y potasio (mayor a T1) son bajos, y de fósforo es alto (mayor a T1). La textura del suelo es moderadamente gruesa (menos gruesa a T1) y no presenta estructura. El suelo pertenece al sub grupo Anthroportic Udorthents. Así se muestra en el cuadro 19.

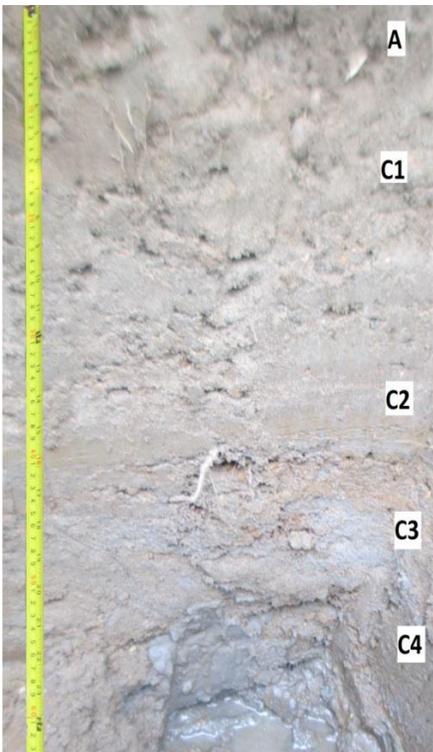
Las especies vegetales predominantes fueron árboles de la familia Phabaceae como; *Inga sp.*; Melastomataceae como *Graffenrieda limbata* y *Miconia tomentosa*; Rubiaceae como *Cinchonia pubescens*, Bignoniaceae como *Jacaranda glabra*; Urticaceae como *Cecropia sp.*; Hypericaceae como *Vismia baccifera*; Euphorbiaceae como *Alchornea triplinervia*; Malvaceae como *Ochroma pyramidale* (Topa Topa); Arecaceae como *Attalea phalerata*. Se muestra en la figura 13 algunas especies vegetales.



**Figura 13: Vegetación del área impactada hace 7-8 años (T2)**

FUENTE: Elaboración propia, 2016

**Cuadro 19: Cartilla del perfil del suelo en el área impactada hace 7-8 años (T2)**

Características del ambiente						Paisaje	
Coordenada UTM WGS 84		19 L 429,374mE 8°597,083mS		Altitud (msnm)	197		
Zona de vida	bosque húmedo subtropical	Paisaje	terrazza baja	Uso actual	minería aurífera		
Material parental	aluvial reciente	Relieve	plano	Pendiente (%)	0.00		
Pedregosidad superficial	Pedregoso	Napa freática (cm)	si a 84.00	Profundidad (cm)	84		
Permeabilidad	Rápida	Drenaje	imperfecto	Precipitación (mm)	2,000		
Régimen de humedad	Údico	Régimen de temperatura	hiper térmico	Erosión	ligera		
Epipedón	Ócrico	Horizonte subsuperficial	No hay	Característica de diagnóstico	redoximórficas		
Capacidad de uso mayor (2009)		pastos p3s	Soil Taxonomy (2014)		Anthroportic Udorthents		
Características físicas							Perfil del suelo
Profundidad (cm)		0-7	7-40	40-48	48-77	>77	
Horizonte genético		A	C1	C2	C3	C4	
Color Munsel	Húmedo	2.5Y 4/3	2.5Y 3/3	2.5Y 4/4	2.5Y 3/3	2.5Y 3/3	
	Seco	2.5Y 5/4	2.5Y 5/3	2.5Y 6/4	2.5Y 5/6	2.5Y 5/4	
Moteado (%)		0	0	35.00	60.00	80.00	
Clase textural		fran. arc. arenosa	arenosa	franco	arenosa	arena franca	
Granulometría	arena (%)	52.56	92.56	38.56	92.56	78.56	
	limo (%)	26.00	4.00	52.00	6.00	18.00	
	arcilla (%)	21.44	3.44	9.44	1.44	3.44	
Fragmentos gruesos (%)		medio (5)	no hay (0)	no hay (0)	no hay (0)	no hay (0)	
Estructura		granular	grano simple	grano simple	grano simple	grano simple	
Raíces		muy fina	muy fina	fina	gruesa	no hay	
Límite		claro	difuso	difuso	difuso		
Características químicas							
pH		4.88	4.69	4.77	4.36		4.60
Carbonatos (%)		0.00	0.00	0.00	0.00		0.00
C.E. (dS/m)		0.08	0.03	0.05	0.04		0.04
Materia orgánica (%)		2.08	0.17	0.31	0.17		0.34
Carbono orgánico (%)		1.21	0.10	0.18	0.10		0.20
P (mg kg <sup>-1</sup> ) - Bray I		171.19	120.47	102.71	95.11		173.73
K (mg kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac		86.00	28.00	40.00	17.00		35.00
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac		19.04	19.52	21.44	22.40		23.84
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - efectiva		8.91	2.78	4.33	2.17		3.86
Cationes cambiables (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Ca <sup>++</sup>	6.40	1.68	2.68	1.18		2.06
	Mg <sup>++</sup>	1.62	0.52	0.95	0.40		0.73
	K <sup>+</sup>	0.25	0.08	0.09	0.07		0.10
	Na <sup>+</sup>	0.19	0.16	0.17	0.16		0.45
	Al <sup>+++</sup> + H <sup>+</sup>	0.45	0.34	0.44	0.36	0.52	
Saturación de bases (%)		44.43	12.50	18.14	8.05	14.02	
PSI (%)		1.00	0.82	0.79	0.70	1.90	

FUENTE: Elaboración propia, 2016

#### 4.1.3 Evaluación de las características morfológicas físicoquímicas de los suelos no impactados (N)

- **Caracterización del suelo en el área natural no impactada (N1)**

El suelo se distribuye dentro de un paisaje terraza baja con material madre aluvial, caracterizada por una permeabilidad moderadamente lenta, drenaje moderado, pendientes menores a 2%, erosión ligera, pedregosidad ligera, con presencia de moteado y napa freática a 0.68m de profundidad. Sus características químicas están dadas por una fuerte reacción acida, sin problemas de sales y el contenido nulo de carbonatos. Los niveles de materia orgánica (mayor a las áreas impactadas) y potasio (ligeramente superior a las áreas impactadas) son bajos, la capacidad de intercambio catiónico es media (mayor a las áreas impactadas), el nivel de fósforo es alto (mayor a las áreas impactadas), La textura del suelo es moderadamente fina. El suelo pertenece al sub grupo Aquic Udifluvents. Así se muestra en el cuadro 20.

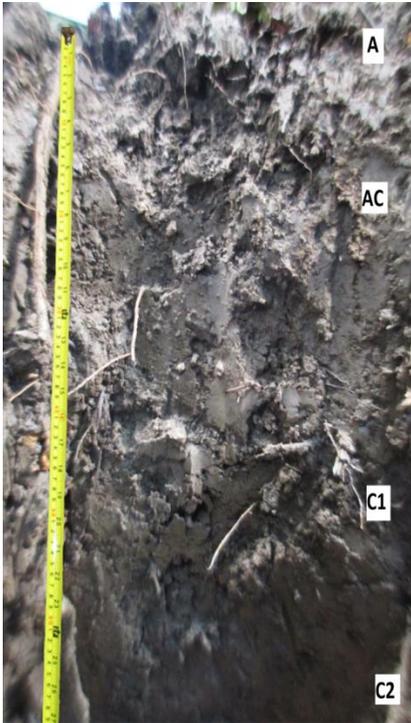
En el suelo predominan especies vegetales arbóreas de la familia Phabaceae como *Inga oerstediana* (shimbillo), *Cedrelinga cateniformis* (tornillo) y *Psidium guajava* (guayaba); Annonaceae como *Rollinia* sp; Moraceae como *Brosimum* sp.; Juglandaceae como *Juglans neotropica* (nogal); Meliaceae *Cedrela* sp. (cedro de altura). Se muestra en la figura 14 algunas especies vegetales. Se muestra en la figura 15 algunas especies vegetales.



**Figura 14: Vegetación del área natural no impactada (N1)**

FUENTE: Elaboración propia, 2016

**Cuadro 20: Cartilla del perfil del suelo en el área natural no impactada (N1)**

Características del ambiente						Paisaje	
Coordenada UTM WGS 84		19 L 429,279mE 8°597,249mS		Altitud (msnm)	208		
Zona de vida	bosque húmedo subtropical	Paisaje	terrazza baja	Uso actual	Bosque natural		
Material parental	aluvial reciente	Relieve	plano	Pendiente (%)	0.00		
Pedregosidad superficial	ligeramente pedregoso	Napa freática (cm)	si a 68.00	Profundidad (cm)	68		
Permeabilidad	moderadamente lenta	Drenaje	imperfecto	Precipitación (mm)	2,000		
Régimen de humedad	Údico	Régimen de temperatura	hipertérmico	Erosión	ligera		
Epipedón	Ócrico	Horizonte subsuperficial.	no hay	Característica de diagnóstico	redoximórficas		
Capacidad de uso mayor (2009)		Pastos p3s	Soil Taxonomy (2010)		Aquic Udifluvents		
Características físicas							
Profundidad (cm)		0-7	7-40	40-68	>68		
Horizonte genético		A	AC	C1	C2		
Color Munsel	Húmedo	2.5Y 4/3	2.5Y 4/4	2.5Y 4/4	2.5Y 4/4		
	Seco	2.5Y 5/4	2.5Y 6/4	2.5Y 6/4	2.5Y 6/4		
Moteado (%)		0.00	0.00	10.00	30.00		
Clase textural		arcillo limosa	arcillo limosa	Franca	franca		
Granulometría	arena (%)	12.56	14.56	26.56	50.56		
	limo (%)	46.00	44.00	48.00	34.00		
	arcilla (%)	41.44	41.44	25.44	15.44		
Fragmentos gruesos (%)		no hay (0)	no hay (0)	no hay (0)	no hay (0)		
Estructura		Granular	granular	Masivo	masivo		
Raíces		muy fina	fina	Media	media		
Límite		Claro	difuso	Difuso			
Características químicas							
pH		5.16	5.28	4.76	4.65		
Carbonatos (%)		0.00	0.00	0.00	0.00		
C.E. (dS m <sup>-1</sup> )		0.34	0.13	0.04	0.04		
Materia orgánica (%)		2.80	1.50	0.75	0.48		
Carbono orgánico (%)		1.62	0.87	0.44	0.28		
P (mg kg <sup>-1</sup> ) – Bray I		109.05	187.67	161.04	43.11		
K(mg kg <sup>-1</sup> ) – NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac		105.00	74.00	55.00	45.00		
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac		34.72	20.64	19.84	24.8		
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - efectiva		17.43	14.36	8.71	7.36		
Cationes cambiabiles (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Ca <sup>++</sup>	13.4	10.8	5.64	4.19		
	Mg <sup>++</sup>	3.10	2.67	2.12	1.9		
	K <sup>+</sup>	0.29	0.18	0.11	0.11		
	Na <sup>+</sup>	0.30	0.27	0.28	0.28		
	Al <sup>+++</sup> + H <sup>+</sup>	0.34	0.44	0.56	0.88		
Saturación de bases (%)		49.22	67.44	41.08	26.13		
PSI (%)		0.86	1.31	1.41	1.13		

FUENTE: Elaboración propia, 2016

- **Caracterización del suelo en el área natural no impactada (N2)**

El suelo se distribuye dentro de un paisaje terraza baja con material madre aluvial, caracterizada por una permeabilidad moderadamente lenta, drenaje moderado, pendientes menores a 2%, erosión ligera, pedregosidad ligera y con napa freática a 0.75m de profundidad. Sus características químicas están dadas por una fuerte reacción acida, sin problemas de sales y el contenido nulo de carbonatos. Los niveles de materia orgánica (mayor a las áreas impactadas) y potasio (ligeramente superior a las áreas impactadas) son bajos, la capacidad de intercambio catiónico es media (mayor a las áreas impactadas), el nivel de fósforo es alto (mayor a las áreas impactadas), La textura del suelo es moderadamente fina. El suelo pertenece al sub grupo Aquic Udifluvents. Así se muestra en el cuadro 21.

En el suelo predominan especies vegetales arbóreas de la familia Phabaceae como *Inga oerstediana* (shimbillo), *Cedrelinga cateniformis* (tornillo) y *Psidium guajava* (guayaba); Annonaceae como *Rollinia* sp; Moraceae como *Brosimum* sp.; Juglandaceae como *Juglans neotropica* (nogal); Meliaceae *Cedrela* sp. (cedro de altura). Se muestra en la figura 15 algunas especies vegetales.



**Figura 15: Vegetación del área natural no impactada (N2)**

FUENTE: Elaboración propia, 2016

**Cuadro 21: Cartilla del perfil de suelo del área natural no impactada (N2)**

Características del ambiente						Paisaje	
Coordenada UTM WGS 84		19 L 429,279mE 8'597,249mS		Altitud (msnm)	208		
Zona de vida	bosque húmedo subtropical	Paisaje	terrazza baja	Uso actual	bosque natural		
Material parental	aluvial reciente	Relieve	plano	Pendiente (%)	0.00		
Pedregosidad superficial	ligeramente pedregoso	Napa Freática (cm)	si a 75.00	Profundidad(cm)	75		
Permeabilidad	moderadamente lenta	Drenaje	moderado	Precipitación (mm)	2,000		
Régimen de humedad	Údico	Régimen de temperatura	hiper térmico	Erosión	ligera		
Epipedón	Ócrico	Horizonte subsuperficial	no hay	Característica de diagnóstico	redoximórficas		
Capacidad de uso mayor (2009)		pastos p3s	SoilTaxonomy (2014)		Aquic Udifluvents		
Características físicas							Perfil del suelo
Profundidad (cm)		0-10	10-21	21--42	42-65		
Horizonte genético		A	AC	C1	C2	2C3	
Color Munsell	Húmedo	2.5Y 4/3	2.5Y 4/4	2.5Y 4/4	2.5Y 4/4	2.5Y 4/4	
	Seco	2.5Y 5/4	2.5Y 6/4	2.5Y 6/4	2.5Y 6/4	2.5Y 6/4	
Moteado (%)		0.00	0.00	0.00	0.00	20.00	
Clase textural		fran. arc. limoso	arc. limoso	fran. arc. limoso	arc. Limoso	fran.limoso	
Granulometría	arena (%)	10.56	8.56	10.56	8.56	18.56	
	limo (%)	56.00	50.00	58.00	50.00	58.00	
	arcilla (%)	33.44	41.44	31.44	41.44	23.44	
Fragmentos gruesos (%)		no hay (0)	no hay (0)	no hay (0)	no hay (0)	no hay (0)	
Estructura		granular	granular	masivo	Masivo	masivo	
Raíces		muy fina	fina	media	Gruesa	no hay	
Límite		gradual	gradual	gradual	Gradual		
Características químicas							
pH		5.18	5.18	5.10	5.15	5.22	
Carbonatos (%)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
C.E. (dS m <sup>-1</sup> )		0.21	0.08	0.16	0.10	0.50	
Materia orgánica (%)		3.21	1.06	3.28	1.09	0.20	
Carbono orgánico (%)		1.86	0.61	1.90	0.63	0.12	
P (mg kg <sup>-1</sup> ) – Bray I		127.9	151.99	375.35	153.44	211.77	
K(mg kg <sup>-1</sup> ) – NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac		93.00	80.00	96.00	83.00	78.00	
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac		26.93	21.6	30.08	32.64	13.33	
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) – efectiva		13.88	10.64	11.41	14.46	9.22	
Cationes cambiables (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Ca <sup>++</sup>	10.8	7.38	8.73	10.9	5.66	
	Mg <sup>++</sup>	2.33	2.42	1.95	2.73	2.72	
	K <sup>+</sup>	0.22	0.18	0.19	0.15	0.13	
	Na <sup>+</sup>	0.25	0.24	0.2	0.22	0.23	
	Al <sup>+++</sup> + H <sup>+</sup>	0.28	0.42	0.34	0.46	0.48	
Saturación de bases (%)		50.50	47.31	36.80	42.91	65.57	
PSI (%)		0.93	1.13	0.66	0.67	1.70	

FUENTE: Elaboración propia, 2016

- **Caracterización del suelo en el área natural no impactada (N3)**

El suelo se distribuye dentro de un paisaje terraza baja con material madre aluvial, caracterizada por una permeabilidad moderadamente lenta, drenaje moderado, pendientes menores a 2%, erosión ligera, pedregosidad ligera y con napa freática a 0.90m de profundidad. Sus características químicas están dadas por una fuerte reacción acida, sin problemas de sales y el contenido nulo de carbonatos. Los niveles de materia orgánica (mayor a las áreas impactadas) y potasio (ligeramente superior a las áreas impactadas) son bajos, la capacidad de intercambio catiónico es media (mayor a las áreas impactadas), el nivel de fósforo es alto (mayor a las áreas impactadas), La textura del suelo es moderadamente fina. El suelo pertenece al sub grupo Aquic Udifluvents. Así se muestra en el cuadro 22.

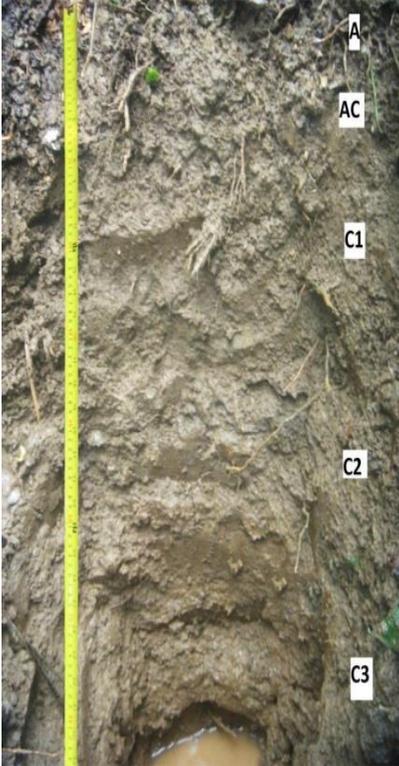
En el suelo predominan especies vegetales arbóreas de la familia Phabaceae como *Inga oerstediana* (shimbillo), *Cedrelinga cateniformis* (tornillo) y *Psidium guajava* (guayaba); Annonaceae como *Rollinia* sp; Moraceae como *Brosimum* sp.; Juglandaceae como *Juglans neotropica* (nogal); Meliaceae como *Cedrela* sp. (cedro de altura); Malvaceae como *Ceiba pentandra* (lupuna). Se muestra en la figura 17 algunas especies vegetales.



**Figura 16: vegetación del área natural no impactada (N3)**

FUENTE: Elaboración propia, 2016

**Cuadro 22: Cartilla del perfil del suelo del área natural no impactada (N3)**

Características del ambiente y suelo						Paisaje	
<b>Coordenada UTM WGS 84</b>		19 L 429,984mE 8°597,334mS		<b>Altitud (msnm)</b>	188		
<b>Zona de vida</b>	bosque húmedo subtropical	<b>Paisaje</b>	Terraza baja	<b>Uso actual</b>	bosque natural		
<b>Material parental</b>	aluvial reciente	<b>Relieve</b>	plano	<b>Pendiente (%)</b>	0		
<b>Pedregosidad superficial</b>	ligeramente pedregoso	<b>Napa freática (cm)</b>	Si a 90.00	<b>Profundidad (cm)</b>	90		
<b>Permeabilidad</b>	moderadamente lenta	<b>Drenaje</b>	moderado	<b>Precipitación (mm)</b>	2,000		
<b>Régimen de humedad</b>	Údico	<b>Régimen de temperatura</b>	hipertérmico	<b>Erosión</b>	ligera		
<b>Epipedón</b>	Ócrico	<b>Horizonte subsuperficial</b>	no hay	<b>Característica de diagnóstico</b>	redoximórficas		
<b>Capacidad de uso mayor (2009)</b>		pastos p3s	<b>SoilTaxonomy (2010)</b>	Aquic Udifluvents			
<b>Características físicas</b>							
<b>Profundidad (cm)</b>		0-12	12-15	15-48	48-70	>70	
<b>Horizonte genético</b>		A	AC	C1	C2	C3	
<b>Color Munsel</b>	<b>Húmedo</b>	2.5Y 4/3	2.5Y 4/4	2.5Y 4/4	2.5Y 4/4	2.5Y 4/4	
	<b>Seco</b>	2.5Y 5/4	2.5Y 6/4	2.5Y 6/4	2.5Y 6/4	2.5Y 6/4	
<b>Moteado (%)</b>		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
<b>Clase textural</b>		Arc. limoso	Fran. arc. limoso	Fran. arc. Limoso	Fran. arc. limoso	Fran. arc. limoso	
<b>Granulometría</b>	<b>arena (%)</b>	18.56	10.56	12.56	16.56	12.56	
	<b>limo (%)</b>	40.00	62.00	48.00	52.00	58.00	
	<b>arcilla (%)</b>	41.44	27.44	39.44	31.44	29.44	
<b>Fragmentos gruesos (%)</b>		no hay (0)	no hay (0)	no hay (0)	no hay (0)	no hay (0)	
<b>Estructura</b>		granular	granular	Masivo	masivo	masivo	
<b>Raíces</b>		media	muy fina	muy fina	fina	gruesa	
<b>Límite</b>		gradual	abrupto	Difuso	difuso		
<b>Características químicas</b>							
<b>pH</b>		5.60	4.64	4.70	5.15	5.21	
<b>Carbonatos (%)</b>		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
<b>C.E. (dS m<sup>-1</sup>)</b>		0.24	0.07	0.06	0.06	0.06	
<b>Materia orgánica (%)</b>		4.01	1.09	0.85	0.41	0.61	
<b>Carbono orgánico (%)</b>		2.33	0.63	0.49	0.24	0.35	
<b>P (mg kg<sup>-1</sup>) – Bray I</b>		183.69	149.63	100.18	69.74	91.3	
<b>K(mg kg<sup>-1</sup>) – NH<sub>4</sub><sup>+</sup> Ac</b>		141.00	101.00	106.00	80.00	47.00	
<b>CIC (Cmol (+) kg<sup>-1</sup>) - NH<sub>4</sub><sup>+</sup> Ac</b>		44.80	31.68	14.40	23.20	15.36	
<b>CIC (Cmol (+) kg<sup>-1</sup>) – efectiva</b>		17.82	7.5	11.26	9.47	9.89	
<b>Cationes cambiables (Cmol (+)/kg)</b>	<b>Ca<sup>++</sup></b>	14.2	4.39	6.35	5.89	6.45	
	<b>Mg<sup>++</sup></b>	2.72	1.45	2.83	2.58	2.63	
	<b>K<sup>+</sup></b>	0.30	0.19	0.2	0.16	0.13	
	<b>Na<sup>+</sup></b>	0.20	0.23	0.34	0.24	0.23	
	<b>Al<sup>+++</sup> + H<sup>+</sup></b>	0.40	1.24	1.54	0.6	0.45	
<b>Saturación de bases (%)</b>		38.88	19.76	67.50	38.23	61.46	
<b>PSI (%)</b>		0.45	0.73	2.36	1.03	1.50	

FUENTE: Elaboración propia, 2016

Los impactos identificados sobre el suelo causados por la minería aurífera aluvial son la pérdida de superficie y modificación del perfil de suelo alterándose significativamente sus características físicas y químicas. Ellas también fueron citados por Álvarez *et al.* (2011) y Gómez (2013).

Como se muestra en el cuadro 17, de las áreas impactadas los suelos del área R (impactado recientemente) son los de menor fertilidad, cantidad de nutrientes, capacidad de retener humedad y consistencia. La cantidad de materia orgánica es 0.03% a 0.48%; contenido de potasio, 18 mg kg<sup>-1</sup> a 42 mg kg<sup>-1</sup>; contenido de fósforo, 125 mg kg<sup>-1</sup> a 55 mg kg<sup>-1</sup>; Capacidad de intercambio catiónico, 9.25 Cmol(+) kg<sup>-1</sup> a 7.82 Cmol(+) kg<sup>-1</sup>; clase textural, arena; pedregosidad, extrema; permeabilidad, muy rápida; drenaje, excesivo.

Entre las áreas impactadas T se encuentran diferencias importantes. En el perfil de suelo del área T1 (impactada hace 6-7 años), como se muestra en el cuadro 18, la cantidad de materia orgánica es 0.17% a 0.48%; contenido de potasio, 22 mg kg<sup>-1</sup> a 27 mg kg<sup>-1</sup>; contenido de fósforo, 87 mg kg<sup>-1</sup> a 110 mg kg<sup>-1</sup>; capacidad de intercambio catiónico, 6.88 cmol(+) kg<sup>-1</sup> a 14.88 Cmol(+) kg<sup>-1</sup>; clase textural, arena; pedregosidad, extrema; permeabilidad, muy rápida; Drenaje, imperfecto. Este suelo presenta estas características ya que proviene del campo de gravas y guijarros llamados “canchones”. Mientras el suelo de área T2 (impactada hace 7-8 años), como se muestra en el cuadro 18, se presenta mayor cantidad de nutrientes, fertilidad potencial (CIC), retención de humedad y consistencia; la cantidad de materia orgánica es 2.08% a 0.17%; contenido de potasio, 28 mg kg<sup>-1</sup> a 86 mg kg<sup>-1</sup>; contenido de fósforo, 171 mg kg<sup>-1</sup> a 95 mg kg<sup>-1</sup>; Capacidad de intercambio catiónico, 19.09 Cmol(+) kg<sup>-1</sup> a 23.84 Cmol(+) kg<sup>-1</sup>; clase textural, franco arcillo arenosa a arenosa; permeabilidad, rápida; drenaje, imperfecto; pedregoso. Este suelo presenta estas características ya que proviene del campo donde se acumuló el suelo de textura fina superficial llamado “lamas”.

Por otro lado, los suelos de las áreas no impactadas o naturales (N), como se muestran en el cuadro 19, cuadro 20 y cuadro 21, son las de mayor fertilidad, cantidad de nutrientes, capacidad de retener humedad y consistencia. En el perfil de suelo, la

cantidad de materia orgánica es 5.18% a 4.65%; contenido de potasio, 141 mg kg<sup>-1</sup> a 45 mg kg<sup>-1</sup>; contenido de fósforo, 211 mg kg<sup>-1</sup> a 43 mg kg<sup>-1</sup>; Capacidad de intercambio catiónico, 44.80 Cmol(+) kg<sup>-1</sup> a 14.40 Cmol(+) kg<sup>-1</sup>; clase textural, arcillo limosa; permeabilidad, moderadamente lenta; drenaje, moderado a imperfecto; ligeramente pedregoso.

La recuperación de la fertilidad del suelo impactado por la minería aurífera aluvial, se debería a la influencia de la vegetación, disponibilidad de agua por precipitación pluvial y napa freática y estabilidad de sedimentos por inundaciones. El crecimiento y desarrollo de vegetación de arbustos y árboles (algunos distintos a las abundantes a las áreas naturales) aportan materia orgánica el suelo por la caída de hojarascas, sus raíces estructuran y dan consistencia a la superficie del suelo y se permite la realización de ciclos de nutrientes como N y P por parte de microorganismos en la rizósfera. La disponibilidad de agua en el año permitiría el crecimiento adecuado de las plantas; inundaciones causadas por la precipitación pluvial permitirían redistribuir los suelos y fragmentos gruesos (gravas y guijarros) y estabilizar las superficies para permitir el crecimiento y desarrollo de plantas y mejorar la fertilidad del suelo. El desarrollo de la vegetación motiva la aparición de artrópodos y animales superiores permitiendo el aporte de materia orgánica. Así, con condiciones adecuadas, según lo postulado por Bernard y Richard (1999), se desarrollaría la sucesión ecológica secundaria con una transición ordenada de comunidad biótica que modifica poco a poco el ambiente, brindando condiciones favorables para el crecimiento de otras especies, en dirección hacia una situación climática estable.

Resultados semejantes fueron citados por el Consorcio Madre de Dios (2014) que explica la característica principales de suelos degradados por la minería como tener baja CIC (2.3 Cmol (+) kg<sup>-1</sup> o 4 veces menor contenido que las áreas naturales) y materia orgánica (0.3% o 5 veces menor contenido que las áreas naturales) y presentar textura gruesa de poca fertilidad., limitando el crecimiento de plantas. El Consorcio expone que el impacto consiste en la extracción del suelo de textura fina en la superficie y arenas y gravas de capas inferiores que serían empleados para a la extracción de oro. Los depósitos o pasivos ambientales compuestos por la acumulación de suelo y grava en “canchones” y “lamas”, estarían dispersos, pero por

acción de la intensa precipitación, inundaciones, dispersión de semillas y crecimiento de plantas poco a poco mejoran la fertilidad de los suelos.

## 4.2 EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE METALES

### 4.2.1 Descripción de la concentración de metales en suelos de áreas impactadas y no impactadas

En el cuadro 23 y cuadro 24 se muestra la concentración y estadigramas de metales como As, Ba, Cd, Pb, Ni, Zn, Cr, Cu y V en las áreas impactadas. La concentración de mercurio fue imperceptible o no detectado con el equipo ICP – AES.

**Cuadro 23: Concentración de metales en suelos ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) de áreas impactadas por la minería aurífera aluvial y en suelos del área natural o nivel de fondo**

Parámetro ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Área impactada						Promedio de Área impactada
	R1	R2	R3	R4	T1	T2	
As	0.80	1.40	2.05	2.10	3.10	2.60	1.90
Ba	28.80	23.30	30.15	31.00	35.55	37.80	29.80
Cd	1.92	1.83	2.35	2.68	3.42	2.91	2.22
Pb	4.66	3.61	4.66	4.43	5.65	5.38	4.60
Hg	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado
Cu	7.81	10.68	12.20	13.52	18.90	16.51	12.67
Cr	6.86	6.96	8.20	8.90	10.98	10.78	7.95
Ni	7.61	5.93	7.93	9.11	10.51	10.07	7.93
V	11.13	10.26	13.14	13.41	15.83	16.62	12.03
Zn	22.10	21.80	26.15	30.50	45.75	36.10	26.65

FUENTE: Elaboración propia, 2016

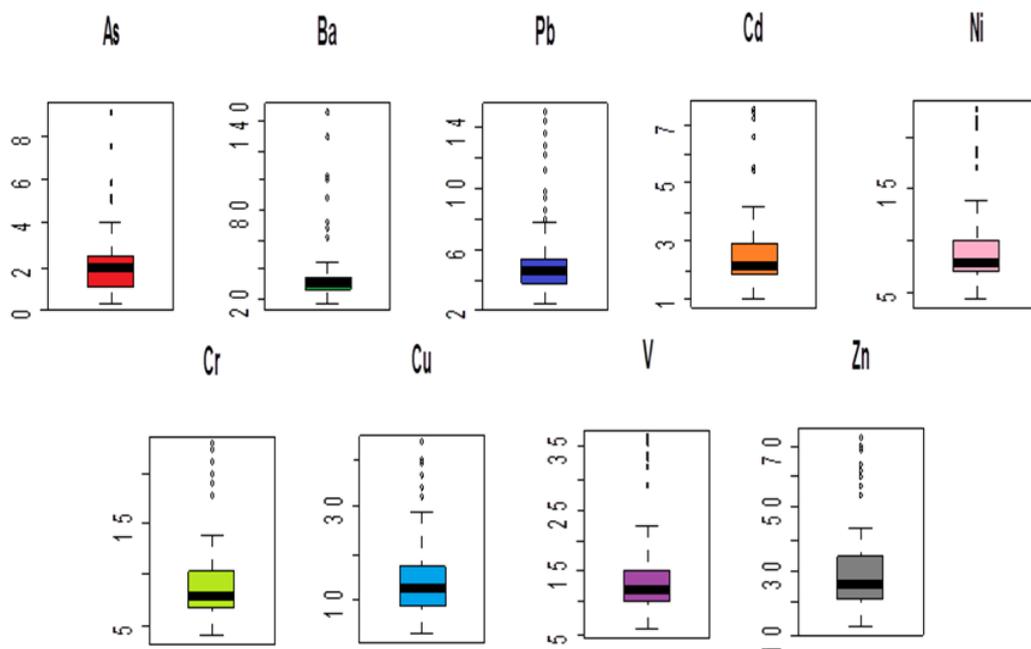
**Cuadro 24: Estadigrama de la concentración metales (n=90) en suelos de áreas impactadas por la minería aurífera aluvial**

Parámetro ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Media	Mediana	Min	Max	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Curtosis (Ku)	Coefficiente de asimetría (Skp)
As	2.07	1.90	0.30	9.10	1.51	73.00	7.68	2.43
Ba	35.86	29.80	1.51	16.60	22.87	63.78	9.61	2.99
Cd	2.61	2.22	1.01	7.61	1.33	50.93	5.24	2.21
Pb	5.21	4.60	2.46	15.00	2.55	48.90	5.26	2.30
Cu	13.98	12.67	2.94	43.43	8.13	58.21	3.20	1.66
Cr	9.14	7.95	3.96	22.76	3.98	43.57	4.23	2.05
Ni	8.99	7.93	4.17	22.81	3.89	43.27	3.89	1.94
V	14.09	12.03	5.80	36.54	6.62	47.00	4.15	2.05
Zn	30.54	26.65	12.20	73.20	13.53	44.32	2.25	1.58

FUENTE: Elaboración propia, 2016

La concentración de metales es muy variable (Calzada 1970) con un coeficiente de variabilidad superior a 25% como se muestra en el cuadro 24. La distribución de los metales es leptocúrtica o muy dispersos con respecto a la media ( $Ku > 0.25$ ). La distribución es asimétrica positiva o muy asimétrica ( $SKp > 0$ ). A la vez, mediante la prueba Shapiro-wilk, con un nivel de significancia de 0.05, las concentraciones de metales en suelo de áreas impactadas no fueron normales. Mediante la comparación de la simétrica de la concentración de metales en suelos de áreas impactadas al 50% central se muestra el siguiente orden de mayor a menor asimetría  $Ba > As > Pb > Cd > V = Cr > Ni > Cu > Zn$ . A la vez, en el cuadro 28, el diagrama de cajas de la concentración de metales en suelos de áreas impactadas evidencia que los suelos impactados son heterogéneos presentando distintas concentraciones de metales que incluso llegan a ser atípicas.

La distribución de los metales es variable y asimétrico debido a que las áreas fueron heterogéneas. Como se evaluó anteriormente, las áreas se diferencian por las características físicas, químicas y morfológicas de los suelos influenciados principalmente por la vegetación, precipitación pluvial y el tiempo. Entre las características del suelo que determinan la distribución de los metales estudiados están la materia orgánica, pH y fracción arcilla (Kabata y pendías 2001 y Alloway 1990).



**Figura 17: Diagrama de cajas de la concentración de metales en suelos de áreas impactadas por la minería aurífera aluvial**

FUENTE: Elaboración propia, 2016

#### 4.2.2 Calidad de los suelos

- Concentración de metales y estándares de calidad ambiental para el suelo**

La interpretación de la concentración de metales se ha realizado considerando los Estándares de Calidad Ambiental para suelos de Perú (D.S.N°002.2013 MINAM) y el Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health de Canadá (CCME,1997) para los metales en el suelo.

Como se aprecia en el cuadro 25, ningún parámetro de la concentración de metales en el suelo de áreas impactadas superó a los estándares de calidad de suelos. Sin embargo, el Cd superó el estándar de calidad ambiental del suelo para el suelo del tipo agrícola según la norma peruana y canadiense.

Ya que la distribución de las concentraciones de metales en los suelos de áreas impactadas no presentaron normalidad no fue posible realizar pruebas paramétricas. Se realizó una comparación descriptiva empleando la mediana de la concentración de metales de los suelos de áreas impactadas con los Estándares de Calidad Ambiental (Perú y Canadá) para suelo industrial y agrícola.

**Cuadro 25: Concentración de metales de suelo de áreas impactadas y el ECA para suelos de Perú y Canadá**

Parámetro (mg kg <sup>-1</sup> )	Mediana del área impactada	Perú		Canadá	
		Suelo industrial	Suelo agrícola	Suelo industrial	Suelo agrícola
<b>As</b>	1.90	140.00	50.00	12.00 <sup>1</sup>	12.00 <sup>1</sup>
<b>Ba</b>	29.80	2000.00	750.00	2000.00	750.00
<b>Cd</b>	2.22	22.00	1.40	22.00	1.40
<b>Pb</b>	4.60	1,200.00	70.00	600.00	70.00
<b>Hg</b>	No detectado	24.00	6.60	50.00 <sup>2</sup>	6.60 <sup>2</sup>
<b>Cu</b>	12.67			91.00	63.00
<b>Cr</b>	7.95	0.40 <sup>3</sup>	1.40 <sup>3</sup>	0.40 <sup>3</sup>	1.40 <sup>3</sup>
<b>Ni</b>	7.93			50.00	50.00
<b>V</b>	12.03			130.00	130.00
<b>Zn</b>	26.65			360.00	200.00

1 El estándar sugerido por Canadá para el As el inorgánico.

2 El estándar sugerido por Canadá para el Hg el inorgánico.

3 El estándar sugerido por Canadá y Perú para el Cr IV.

FUENTE: Elaboración propia, 2016

- Concentración de metales en suelos del área impactada y suelos del área natural**

Se muestra en el cuadro 26 el estadigrama de la concentración de metales como As, Ba, Cd, Pb, Ni, Zn, Cr, Cu y V en suelos del área natural o nivel de fondo.

**Cuadro 26: Concentración de metales (n=3) en suelos del área naturales o nivel de fondo**

Parámetro (mg kg <sup>-1</sup> )	Media	Mediana	Min	Max
<b>As</b>	3.56	4.60	1.40	4.70
<b>Ba</b>	177.63	156.300	126.30	250.30
<b>Cd</b>	6.64	6.52	6.30	7.12
<b>Pb</b>	13.67	13.51	13.25	14.26
<b>Cu</b>	34.87	33.87	31.66	39.09
<b>Cr</b>	21.14	20.83	19.57	23.20
<b>Ni</b>	22.58	21.93	21.72	24.10
<b>V</b>	33.78	33.69	31.43	36.22
<b>Zn</b>	69.30	68.90	64.70	74.30

FUENTE: Elaboración propia, 2016

Como se muestra en el cuadro 27, mediante la prueba de Mann Whitney (comparación de medianas), con un nivel de significancia de 0.05 las concentraciones de metales en suelos del área natural o nivel de fondo fueron mayores a las áreas impactadas.

**Cuadro 27: Prueba de comparación de medianas Mann Whitney**

Parámetro (mg kg <sup>-1</sup> )	Mediana del área impactada	Mediana del área Natural	Significancia asintótica	Significancia exacta
<b>As</b>	1.90	4.60	0.177	0.192
<b>Ba</b>	29.80	156.30	0.004	0.000
<b>Cd</b>	2.22	6.52	0.007	0.001
<b>Pb</b>	4.60	13.51	0.006	0.001
<b>Cu</b>	12.67	33.87	0.008	0.002
<b>Cr</b>	7.95	20.83	0.006	0.001
<b>Ni</b>	7.93	21.93	0.005	0.000
<b>V</b>	12.03	33.69	0.007	0.001
<b>Zn</b>	26.65	68.90	0.005	0.001

FUENTE: Elaboración propia, 2016

Según Palacios *et al.* (1996), el área de estudio se encuentra sobre terrazas bajas producto de sedimentos del cuaternario. La concentración de metales no tendría un origen parental ya que los sedimentos llegan hasta 20 m de profundidad, sin embargo si corresponderían a los sedimentos o fuentes antropogénicas como la actividad minera.

Como referencia se muestra en el cuadro 28 las concentraciones promedio de metales en el suelo sugeridas por distintos autores. La concentración de metales en suelos de áreas impactadas y no impactadas se encuentra dentro de los intervalos sugeridos.

**Cuadro 28: Concentración de metales en el suelo sugeridos por diferentes autores**

Parámetro (mg kg <sup>-1</sup> )	Mediana del área impactada	Mediana del área Natural	Promedio sugerido (mg kg <sup>-1</sup> )	
As	1.90	4.60	1.00 – 40.00	Berrow y Reaves (1984)
Ba	29.80	156.30	19.00 – 2,368.00	Kabata y Pendias (2001)
Cd	2.22	6.52	0.06 - 1.10	Page y Bingham (1973)
Pb	4.60	13.51	3.00 – 189.00	Davies (1977)
Hg	no detectado	no detectado	0.13- 0.50	Kabata y Pendias (2001)
Cu	7.93	21.93	2.00 -100.00	Baker and Chesnin (1975)
Cr	7.95	20.83	54.00	Kabata y Pendias (2001)
Ni	12.67	33.87	0.20 – 450.00	Alloway (1990)
V	12.03	33.69	18.00 – 115.00	Kabata y Pendias (2001)
Zn	26.65	68.90	33.00 – 88.00	Kabata y Pendias (2001)

FUENTE: Elaboración propia, 2016

Como se muestra en el cuadro 29, Huayllani *et al.* (2015) realizaron una investigación similar en la zona de amortiguamiento de Tambopata. También se mostró que las concentraciones de metales en el suelo no fueron superiores a los estándares de calidad ambiental para suelos de Perú y Canadá.

**Cuadro 29: Contenido de metales en la zona de amortiguamiento de Tambopata**

Parámetro (mg kg <sup>-1</sup> )	media	Perú		Canadá	
		Suelo industrial	Suelo agrícola	Suelo industrial	Suelo agrícola
As	0.58	140.00	50.00	12.00 <sup>1</sup>	12.00 <sup>1</sup>
Cd	0.67	22.00	1.40	22.00	1.40
Pb	3.55	1,200.00	70.00	600.00	70.00
Hg	no detectado	24.00	6.60	50.00 <sup>2</sup>	6.60 <sup>2</sup>

1 El estándar sugerido por Canadá para el As el inorgánico.

2 El estándar sugerido por Canadá para el Hg el inorgánico.

FUENTE: Huayllani *et al.* (2015)

El impacto de la minería aurífera aluvial que modificando el perfil del suelo, con suelos de textura gruesa (menor porcentaje de arcilla) e intensa precipitación pluvial afectarían lixiviando metales de los suelos.

- **Distribución de metales en el perfil de suelos del área natural no impactada y suelos del área impactada (T)**

En el cuadro 30 se muestra la distribución de la concentración de metales en el perfil de suelo de áreas impactadas por la minería aurífera aluvial y el perfil del suelo del área natural o no impactada comparados a los Estándares de Calidad de Suelos para Perú y Canadá. En el perfil de los suelos el único parámetro que fue superior a los estándares de calidad fue el Cd; siendo menor en las áreas impactadas (T) que el área natural (N).

De la figura 18 a la figura 27 se muestran las distintas concentraciones de metales en el perfil de los suelos impactados (T1 y T2) y no impactados (N1, N2 Y N3) relacionado al pH, CIC (Cmol (+) kg<sup>-1</sup> - NH<sub>4</sub><sup>+</sup> Ac ), arcilla (%) y materia orgánica (%) del suelo. En suelos no impactados estas características presentan un patrón de distribución desde la superficie a la profundidad; en cambio, en suelos impactados la distribución es errática y se debe al impacto de la minería aurífera aluvial al alterar el perfil de los suelos, disponiendo las partículas más gruesas en la superficie los cuales serán modelados y reacomodados por la precipitación pluvial e inundaciones.

El comportamiento de los metales en el suelo es influenciada por la fracción arcilla, saturación de bases, la presencia de Fe y Mn y pH. Los metales se presentarían en forma de catión intercambiable con una alta movilidad; asociado al metal con hierro e hidróxido de manganeso con media movilidad; metal enlazado o fijado a sustancias orgánicas también con media movilidad o metales enlazado o fijados en el interior de partículas minerales con baja movilidad (Salomons, 1994).

Así, los suelos estudiados presentaron condiciones de alta acidez, bajo contenido de materia orgánica y bajo contenido de arcilla determinando menor Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo. Los metales se presentaron en formas iónicas o complejos fácilmente lixiviables por la precipitación con menor capacidad de ser adsorbidos por el suelo. Los suelos de las áreas impactadas (T) presentaron menor cantidad de metales pesados a comparación de los suelos de las áreas naturales. En ambas áreas la concentración de metales es directamente proporcional al porcentaje de materia orgánica y arcilla, y es mayor en la superficie pero menor en la profundidad.

**Cuadro 30: Concentración de metales en el perfil del suelo de áreas naturales o no impactadas**

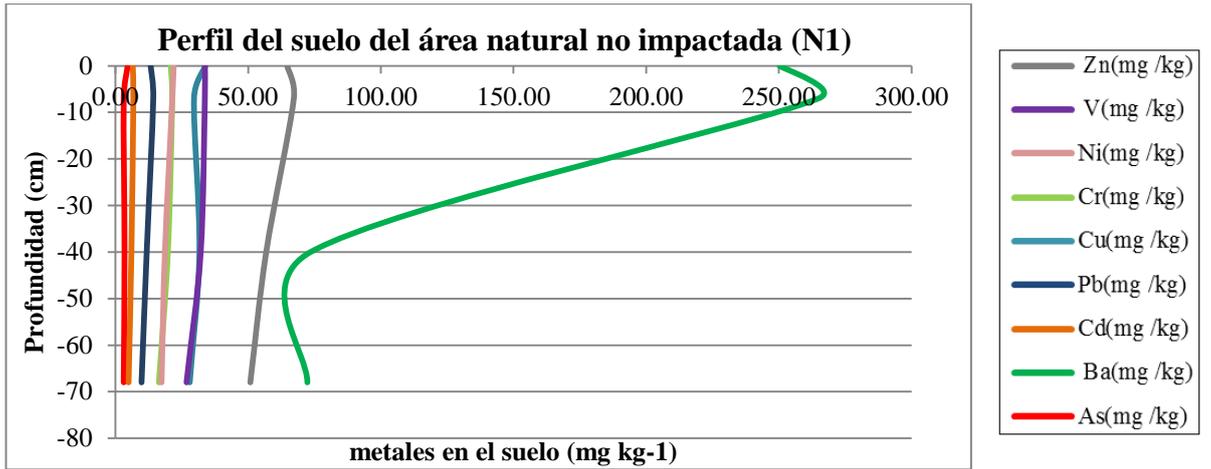
Parámetro (mg kg <sup>-1</sup> )		As	Ba	Cd	Pb	Hg	Cu	Cr	Ni	V	Zn
Canadá	Suelo industrial	12.00 <sup>1</sup>	2000.00	22.00	600.00	50.00 <sup>2</sup>	91.00	0.40 <sup>3</sup>	50.00	130.00	360.00
	Suelo agrícola	12.00 <sup>1</sup>	750.00	1.40	70.00	6.60 <sup>2</sup>	63.00	1.40 <sup>3</sup>	50.00	130.00	200.00
Perú	Suelo industrial	140.00	2000.00	22.00	1,200.00	24.00		0.40 <sup>3</sup>			
	Suelo agrícola	50.00	750.00	1.40	70.00	6.60		1.40 <sup>3</sup>			
<b>Sustrato</b>		<b>Perfil del suelos de área natural o no impactada N1</b>									
	<b>1</b>	4.60	250.30	<b>6.52</b>	13.25	No detectado	33.87	20.83	21.93	33.69	64.70
	<b>2</b>	3.10	265.00	<b>6.73</b>	14.24	No detectado	29.60	21.37	21.42	33.67	67.20
	<b>3</b>	3.40	73.50	<b>5.99</b>	11.76	No detectado	31.63	19.74	18.63	32.11	56.80
	<b>4</b>	3.10	72.30	<b>4.92</b>	9.81	No detectado	27.97	16.36	17.35	26.77	50.80
<b>Sustrato</b>		<b>Perfil del suelos de área natural o no impactada N2</b>									
	<b>1</b>	4.70	126.30	<b>7.12</b>	14.26	No detectado	39.09	23.02	24.10	36.22	74.30
	<b>2</b>	5.20	138.90	<b>7.09</b>	14.65	No detectado	38.73	22.54	22.58	33.90	74.20
	<b>3</b>	2.90	142.80	<b>6.86</b>	14.24	No detectado	38.20	23.20	22.84	35.57	76.50
	<b>4</b>	3.50	138.30	<b>6.22</b>	13.33	No detectado	39.25	21.57	21.06	32.35	68.40
	<b>5</b>	4.70	90.50	<b>6.39</b>	12.78	No detectado	36.95	20.90	21.18	36.09	66.10
<b>Sustrato</b>		<b>Perfil del suelos de área natural o no impactada N3</b>									
	<b>1</b>	1.40	156.30	<b>6.30</b>	13.51	No detectado	31.66	19.57	21.72	31.43	68.90
	<b>2</b>	3.70	94.70	<b>6.82</b>	13.01	No detectado	34.34	22.00	20.80	34.11	71.50
	<b>3</b>	2.50	119.30	<b>6.70</b>	13.54	No detectado	30.02	21.15	20.62	34.02	68.50
	<b>4</b>	3.70	109.60	<b>6.66</b>	13.06	No detectado	34.49	21.13	21.38	34.19	66.60
	<b>5</b>	3.00	111.70	<b>6.33</b>	13.28	No detectado	33.94	21.29	20.31	32.74	67.40
<b>Capa</b>		<b>Perfil del suelo del área impactada T1</b>									
	<b>1</b>	2.00	35.60	<b>2.44</b>	5.14	No detectado	14.22	8.76	8.59	13.18	28.10
	<b>2</b>	2.40	37.10	<b>2.82</b>	5.76	No detectado	9.86	10.15	10.08	15.95	29.40
	<b>3</b>	1.70	26.90	<b>1.83</b>	3.62	No detectado	5.27	6.28	6.78	9.49	18.90
	<b>4</b>	2.80	52.90	<b>3.36</b>	6.83	No detectado	16.18	10.91	10.84	17.27	34.20
<b>Capa</b>		<b>Perfil del suelo del área impactada T2</b>									
	<b>1</b>	2.70	67.50	<b>3.96</b>	8.07	No detectado	26.13	13.43	13.66	21.02	43.60
	<b>2</b>	1.60	28.80	<b>2.22</b>	4.43	No detectado	7.72	7.40	7.72	11.31	22.60
	<b>3</b>	3.20	80.80	<b>5.26</b>	10.36	<b>0.27</b>	26.71	19.93	18.07	30.37	57.00
	<b>4</b>	1.90	32.40	<b>2.90</b>	5.15	No detectado	9.89	9.51	9.74	13.64	28.60
	<b>5</b>	2.00	56.30	<b>3.81</b>	7.77	<b>0.13</b>	21.83	14.51	13.68	22.98	44.60

1 El estándar sugerido por Canadá para el As el inorgánico.

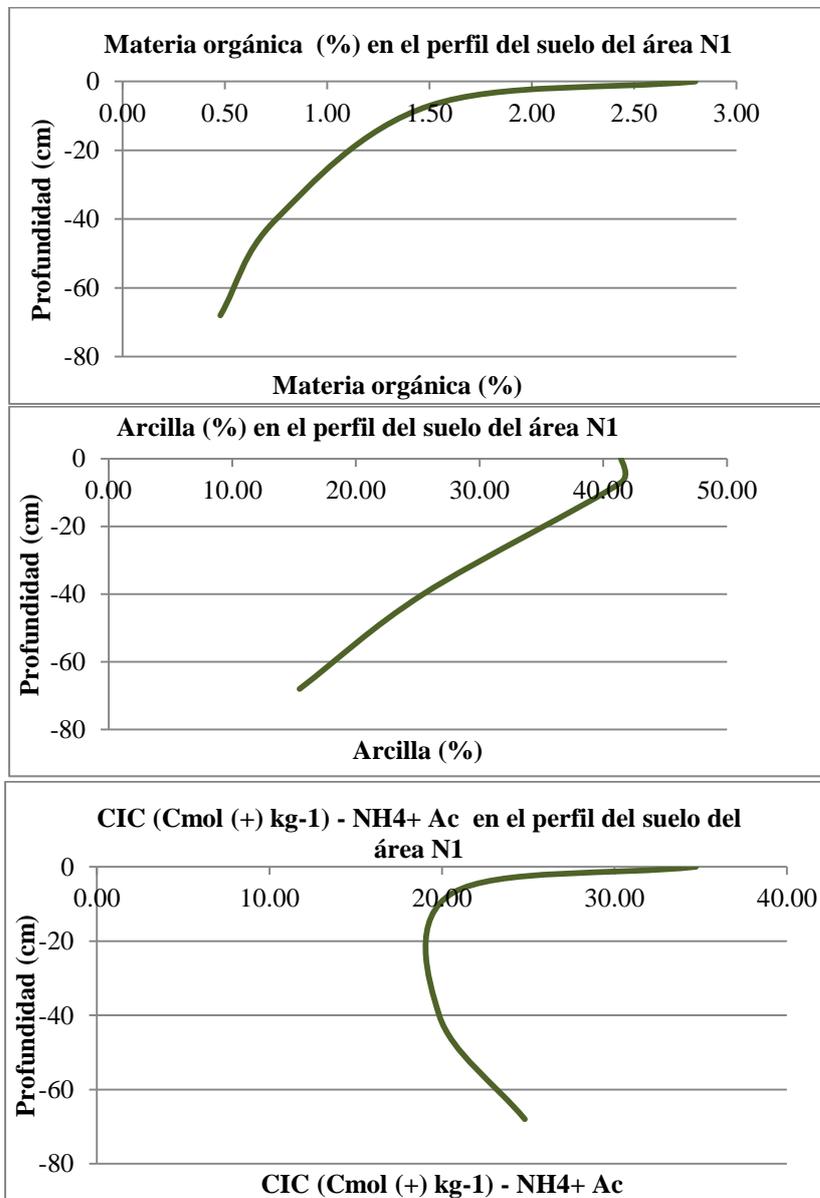
2 El estándar sugerido por Canadá para el Hg el inorgánico.

3 El estándar sugerido por Canadá y Perú para el Cr IV.

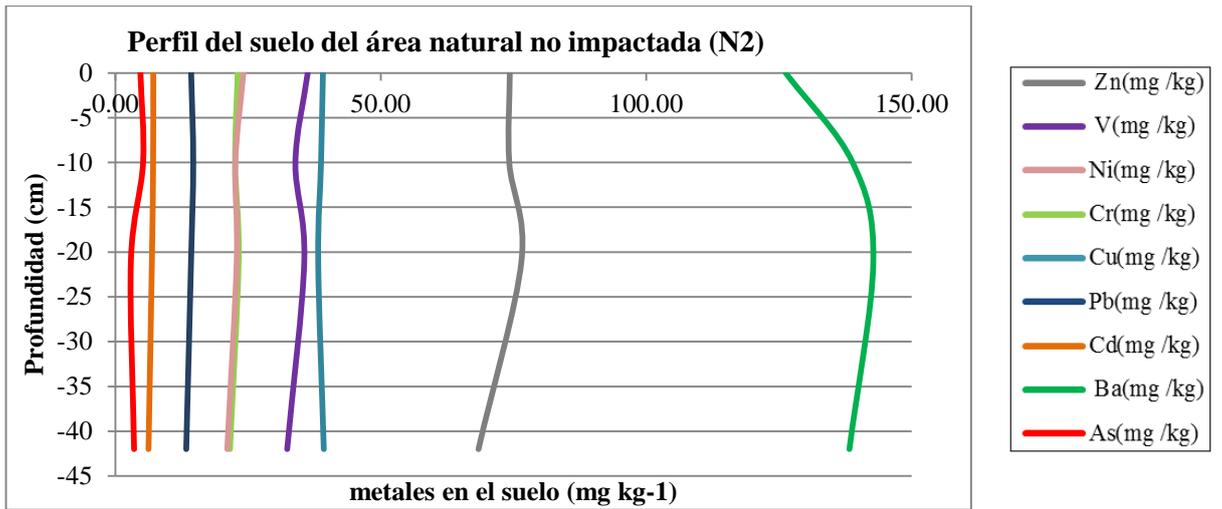
FUENTE: Elaboración propia, 2016



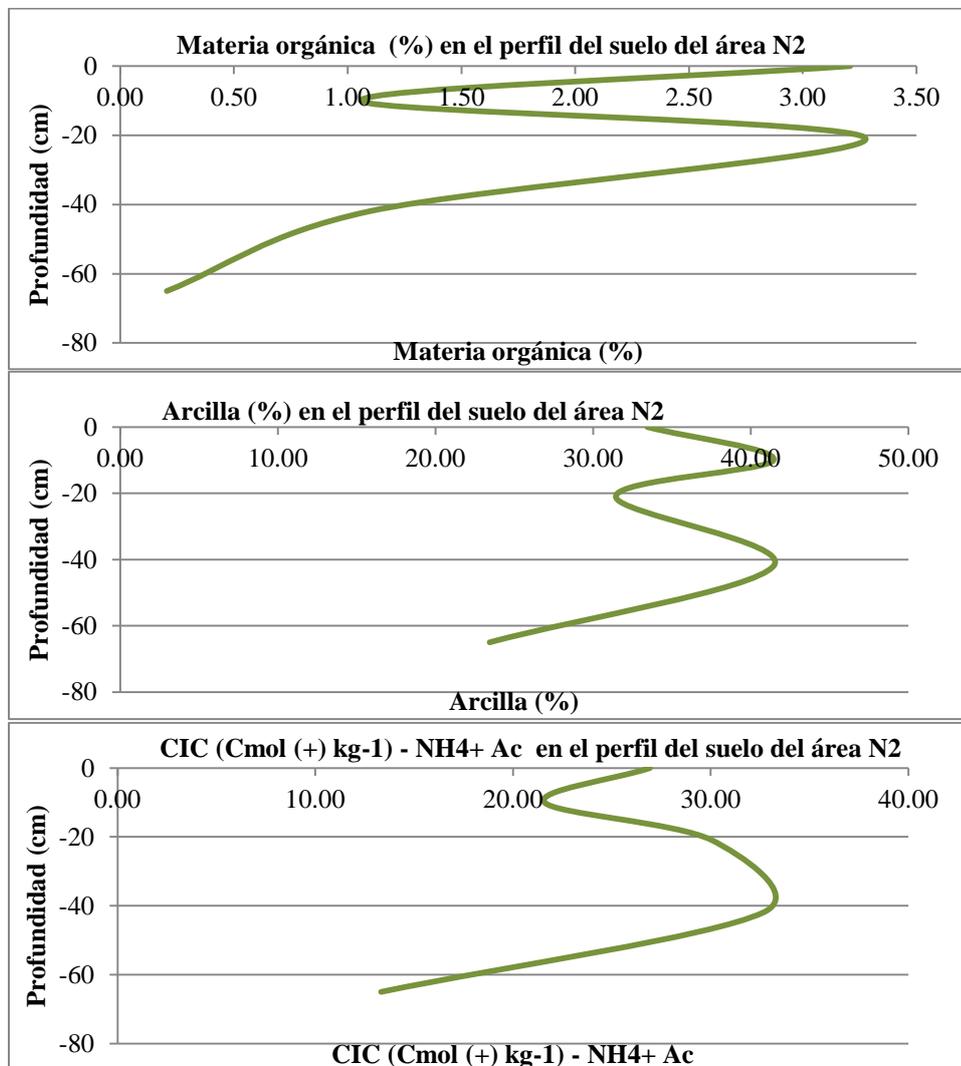
**Figura 18: Concentración de metales en el perfil del suelo natural no impactado N1**  
 FUENTE: Elaboración propia, 2016



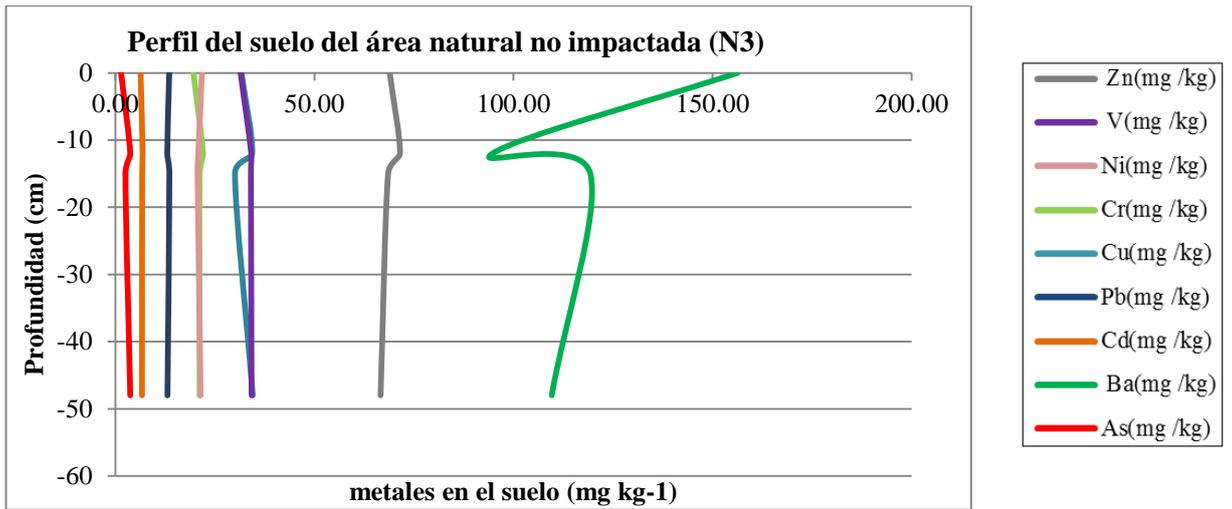
**Figura 19: Materia orgánica, arcilla y CIC en el perfil del suelo natural no impactado N1**  
 FUENTE: Elaboración propia, 2016



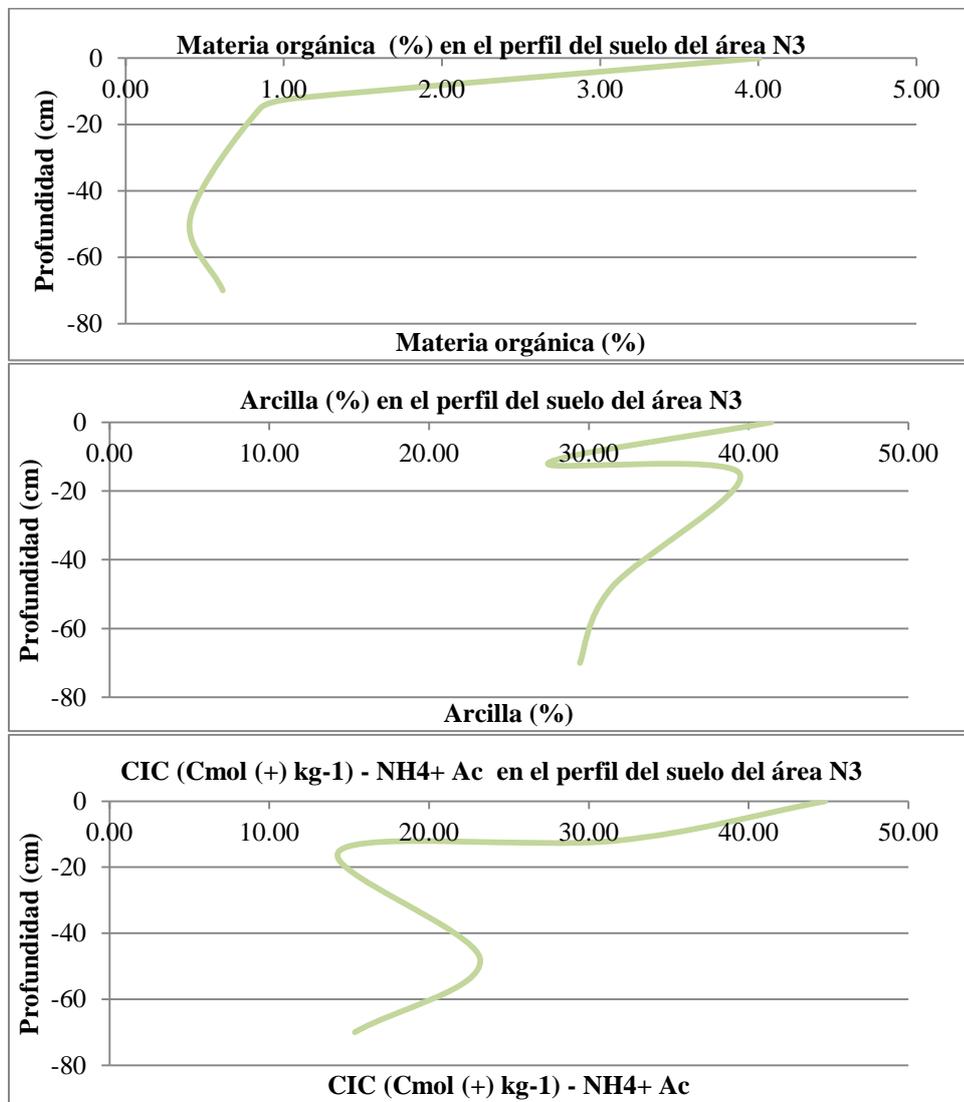
**Figura 20: Concentración de metales en el perfil del suelo natural no impactado N2**  
 FUENTE: Elaboración propia, 2016



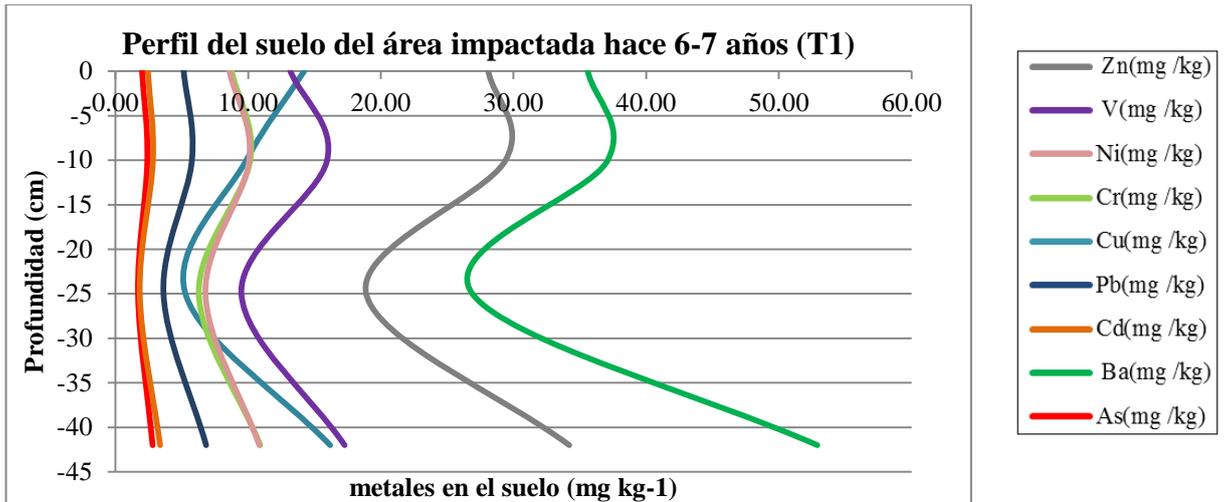
**Figura 21: Materia orgánica, arcilla y CIC en el perfil del suelo natural no impactado N2**  
 FUENTE: Elaboración propia, 2016



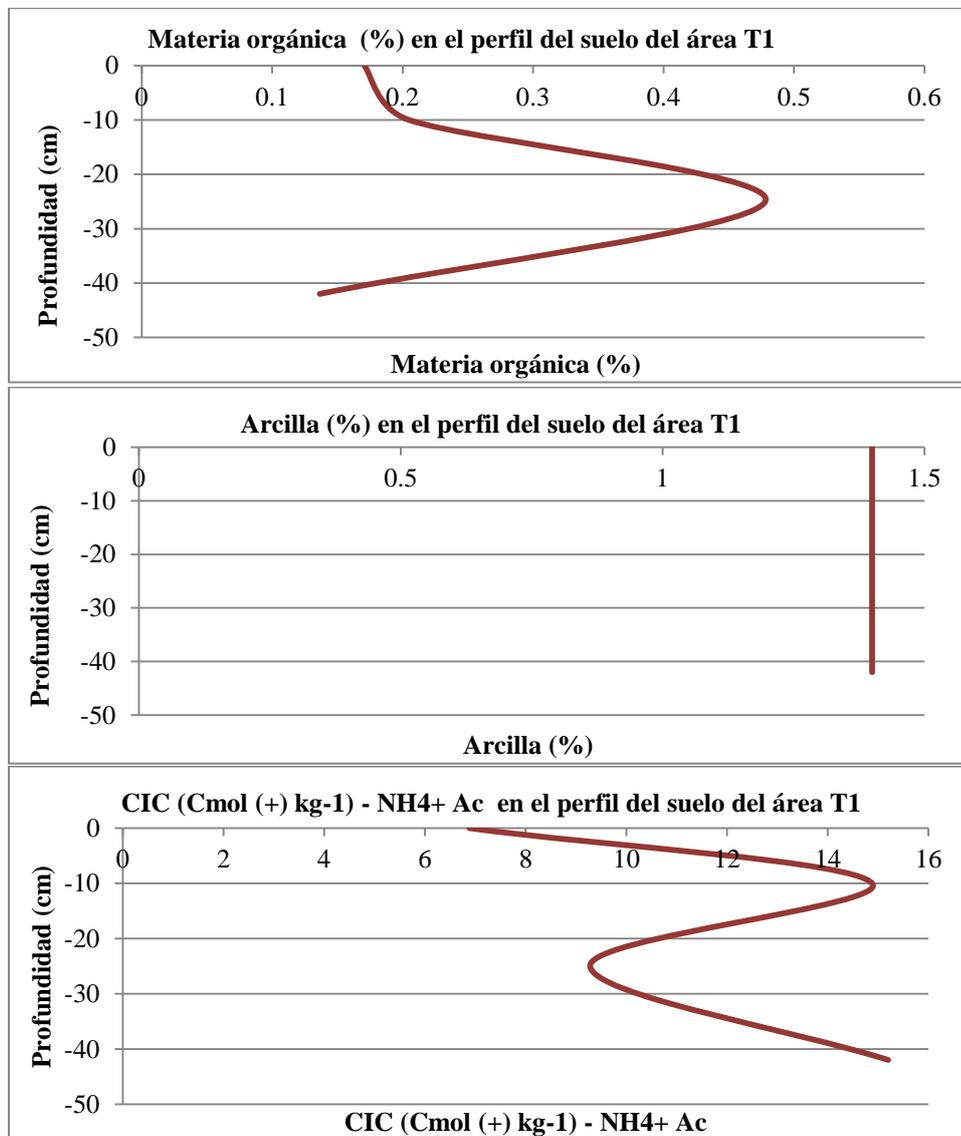
**Figura 22: Concentración de metales en el perfil del suelo natural no impactado N3**  
 FUENTE: Elaboración propia, 2016



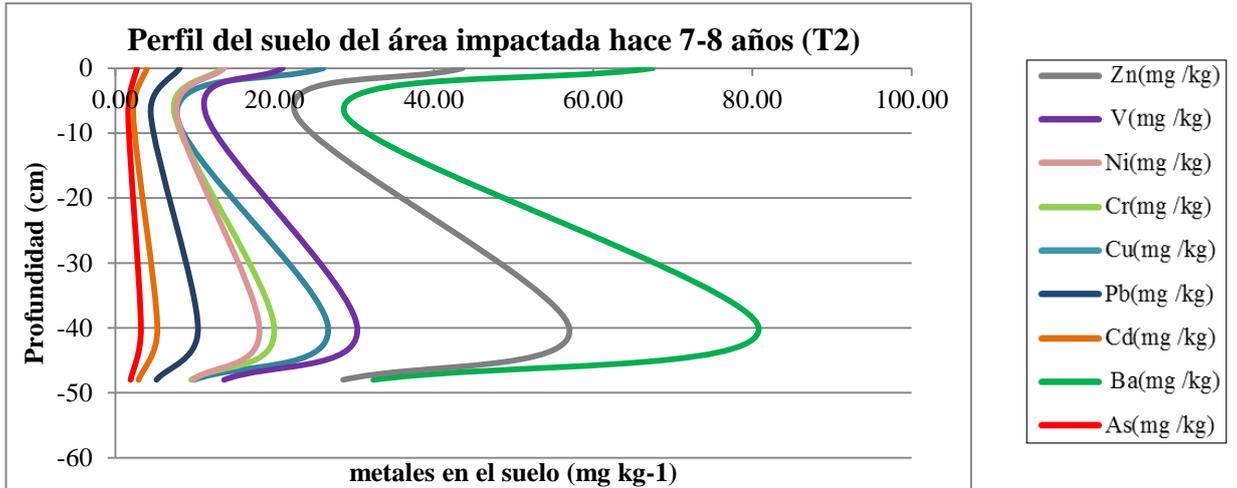
**Figura 23: Materia orgánica, arcilla y CIC en el perfil del suelo natural no impactado N3**  
 FUENTE: Elaboración propia, 2016



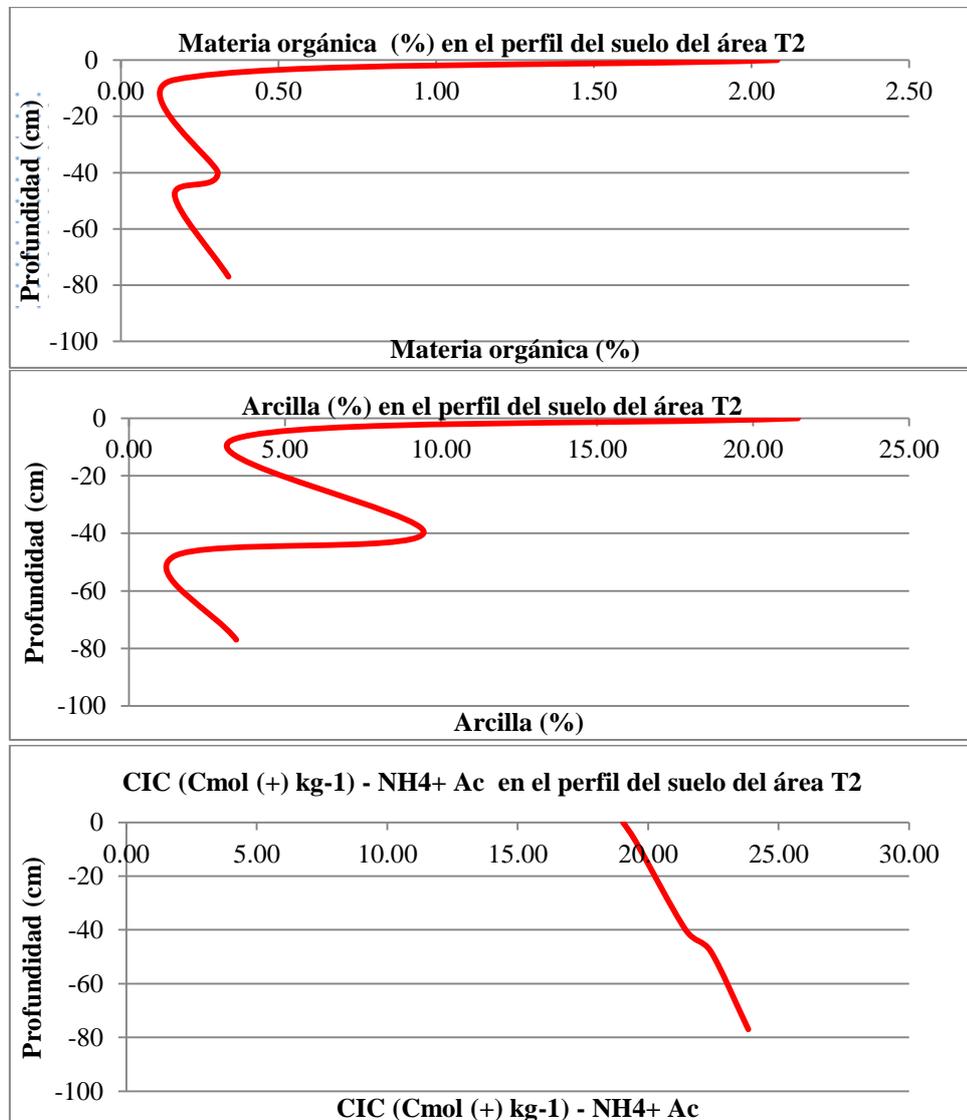
**Figura 24: Concentración de metales en el perfil del suelo natural no impactado T1**  
 FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 25: Materia orgánica, arcilla y CIC en el perfil del suelo natural no impactado T1**  
 FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 26: Concentración de metales en el perfil del suelo de áreas impactadas T2**  
 FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 27: Materia orgánica, arcilla y CIC en el perfil del suelo natural no impactado T2**  
 FUENTE: Elaboración propia, 2016

**Cuadro 31: Concentración de metales de suelo y sedimentos en Madre de Dios**

Parámetro (mg kg <sup>-1</sup> )	Mediana del área impactada	Suelo laberinto (mg kg <sup>-1</sup> )	Sedimento rio Madre de Dios (mg kg <sup>-1</sup> )	Suelo Inambari (mg kg <sup>-1</sup> )	Sedimento rio Tambopata (mg kg <sup>-1</sup> )	Calidad Ambiental de suelo Perú		Canadá	
		MINEM (1997)	MINEM (1997)	MINEM (1997)	Patilla <i>et al.</i> (2015)	Suelo industrial	Suelo agrícola	Suelo industrial	Suelo agrícola
<b>As</b>	1.90	1.49	3.22	3.82	0.05	140.00	50.00	12.00 <sup>1</sup>	12.00 <sup>1</sup>
<b>Ba</b>	29.80	-	-	-	-	2000.00	750.00	2000.00	750.00
<b>Cd</b>	2.22	2.00	1.00	1.00	no detectado	22.00	1.40	22.00	1.40
<b>Pb</b>	4.60	35.00	13.50	18.50	0.02	1,200.00	70.00	600.00	70.00
<b>Hg</b>	no detectado	0.20	0.20	0.23	no detectado	24.00	6.60	50.00 <sup>2</sup>	6.60 <sup>2</sup>
<b>Cu</b>	7.93	33.00	9.50	8.50	10.46			91.00	63.00
<b>Cr</b>	7.95	9.80	6.91	11.00	no detectado	0.40 <sup>3</sup>	1.40 <sup>3</sup>	0.40 <sup>3</sup>	1.40 <sup>3</sup>
<b>Ni</b>	12.67	-	-	-	-			50.00	50.00
<b>V</b>	12.03	-	-	-	-			130.00	130.00
<b>Zn</b>	26.65	8.50	75.50	47.50	45.79			360.00	200.00

1 El estándar sugerido por Canadá para el As el inorgánico.

2 El estándar sugerido por Canadá para el Hg el inorgánico.

3 El estándar sugerido por Canadá y Perú para el Cr IV.

FUENTE: Elaboración propia, 2016

Una cantidad significativa de contaminantes procedentes de diferentes fuentes pueden ingresar al suelo cada año, por lo que el suelo sirve como disipador geoquímico de diversos contaminantes (Alloway, 1995); sin embargo, la intensa precipitación pluvial sugeriría la lixiviación de metales, como el mercurio, hacia los ríos.

Como se muestra en el cuadro 31, según el MINEM (1997), Patilla *et al.* (2015) y la presente, la concentración de metales en suelos de actividad minera son menores después de año de actividad, pero en los suelos cercanos a ríos y sedimentos es mayor. Por ejemplo, la concentración de metales en suelos impactados por la minería aurífera aluvial presente fue menor al suelo ubicado en la zona de Laberinto y sedimentos del Río de Madre de Dios (río aledaño al área de estudio) en los metales As, Pb, Hg, Cu, Cr y Zn. Por otro lado, el suelo de la zona de Inambari y el sedimento del río Tambopata, no presentaron cantidades superiores al ECA para suelos de Perú, sugiriendo que la concentración del Cadmio no sería igual en región.

Por otro lado, en base al estudio de Lechler *et al.* (2000) en Brasil, se puede explicar que la concentración de metales también está influenciada por los ríos y su capacidad transportadora, siendo mayor el contenido en la parte superior que la inferior. El estudio explicó los impactos regionales de Hg en los ecosistemas acuáticos mediante el examen de sus concentraciones en agua, sedimentos, suelos, y el pescado a lo largo de 900 kilómetros de distancia del río Madeira, que se extiende desde su confluencia con el Amazonas aguas arriba a Porto Velho. Se realizó en terrazas aluviales con suelos oxisoles enriquecidas en hierro y aluminio. La concentración de Hg se midió en muestras de nueve lugares diferentes a lo largo del Río Madeira. Las concentraciones variaron desde 232 ng g<sup>-1</sup> a 406 ng g<sup>-1</sup> aguas abajo y 245 ng g<sup>-1</sup> a 439 ng g<sup>-1</sup> aguas arriba en las inmediaciones de Porto Velho (Lechler *et al.* 2000).

También, Forseberg *et al.* (1999) encontró que en los suelos distantes de los sitios de amalgamación, se exhibieron concentraciones de Hg hasta 340 ng g<sup>-1</sup> aguas arriba y 212 ng g<sup>-1</sup> aguas abajo. Además, en un núcleo de llanura de inundación recogidos a lo largo del afluente del río Jamari se evidenció que aumenta el Hg con la profundidad, que van desde 56 ng g<sup>-1</sup> en la superficie a 122 ng g<sup>-1</sup> a aproximadamente 25 cm de profundidad.

Así, los sedimentos y agua con metales se caracterizan por disminuir sistemáticamente aguas abajo de las zonas de origen (wertz, 1949; Payne, 1971; Lewin y Macklin, 1987; Macklin 1996 citados por Lechler *et al.* 2000) debido a:

- Mezcla y dilución con materias no contaminadas aguas abajo de las fuentes puntuales.
  - Almacenamiento de sedimentos y aguas a lo largo del canal y la llanura aluvial contaminada.
  - Transporte selectivo de los sedimentos contaminados con las partículas más pesadas restantes más cerca de los sitios de minas por períodos de tiempo.
- **Distribución espacial de metales en suelos del área impactada**

Para poder representar la distribución espacial de la concentración de metales en suelos de áreas impactadas se empleó el método de Krigeaje en base a variogramas univariados. El modelo de variograma empleado es el gaussiano y se empleó con el Software R como se muestra en la figura 28. Este se empleó ajustando los datos de la variable en estudio (bines), encontrando la distancia máxima (h max) y rango, con su determinada varianza constante (sill) determinando el modelo teórico Gaussiano.

$$\gamma(h) = s \left( 1 - \exp \left( - \frac{|h|^2}{a^2} \right) \right)$$

Siendo las constantes:

h: distancia

a: alcance

s: valor constante que toma el variograma en distancias mayores que el rango

**Figura 28: Fórmula de la función variograma gaussiana**

FUENTE: Montero y Larraz, 2008

En el desarrollo del variograma se aplicó logaritmo (en base 10) a los datos si no cumplían con una distribución normal para todos los metales evaluados. Después se realizaron cuadros estadístico descriptivos de los datos de los metales mediante el Software R donde se explique la mediana y media del logaritmo de la concentración

de metales, como se muestra en el siguiente cuadro 32. En él se observa que los valores de las medias y medianas son similares, demostrando que son buenos indicadores para aproximarse a una distribución normal.

**Cuadro 32: Medianas y medias de los metales evaluados**

Parámetro ( $\log_{10}$ )	Media	Mediana
As	0.22	0.27
Ba	1.50	1.47
Cd	0.37	0.34
Pb	0.68	0.66
Cu	1.08	1.10
Cr	0.93	0.90
Ni	0.92	0.89
V	1.11	1.08
Zn	1.45	1.42

FUENTE: Elaboración propia, 2016

Finalmente se procede a elaborar los variogramas con el Software R, ingresando las coordenadas y concentraciones de cada metal (transformadas con el logaritmo), para obtener los siguientes resultados y respectivas figuras de variogramas.

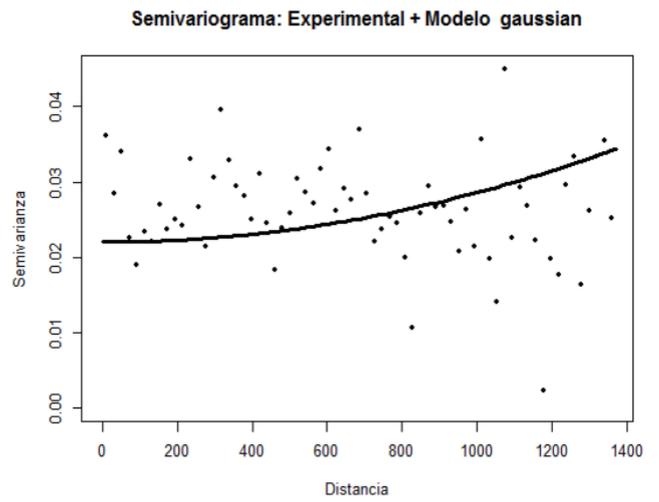
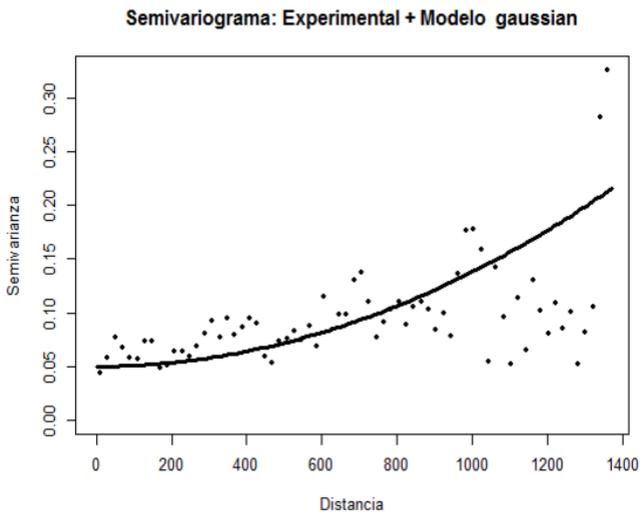
**Cuadro 33: Características variográficas de los metales**

Detalles del variograma	Parámetros								
	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
<b>Bines</b>	69	58	72	50	57	42	67	63	51
<b>Sill</b>	5,500	80,000	70,000	60,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>Rango</b>	250,000	2'500,000	2'500,000	200,000	1'900,000	4,000,000	3'900,000	4'000,000	3'000,000
<b>Nugget</b>	0.05	0.03	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02
<b>Modelo</b>	gaussiano								

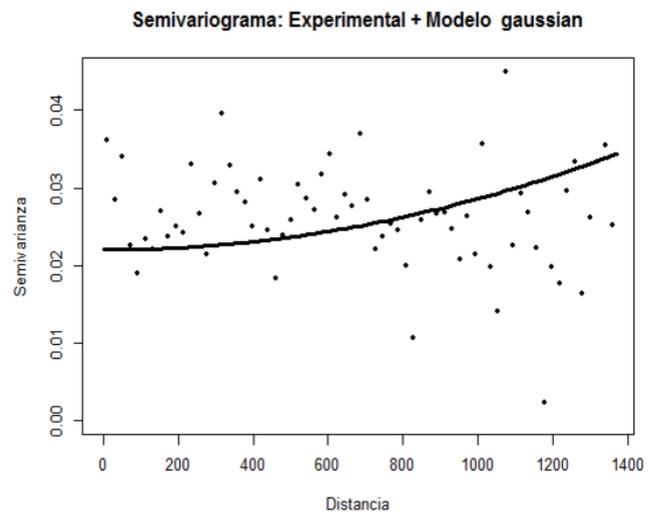
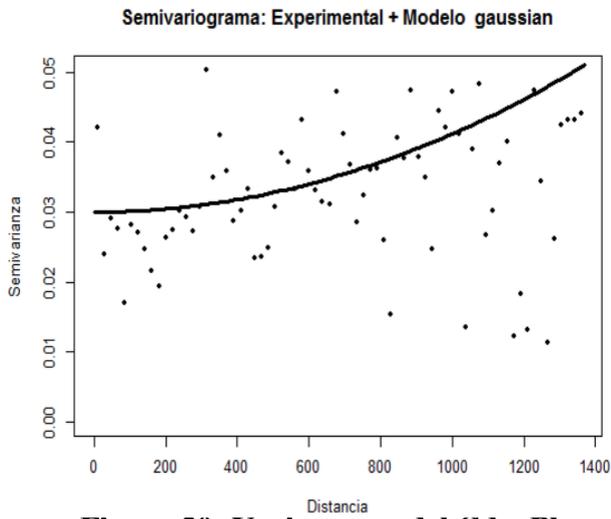
FUENTE: Elaboración propia, 2016

En el cuadro 33 se observa que el porcentaje de datos usados (bines) se realizó manualmente con el software en un intervalo del 50 al 69%, con lo que se obtuvo el variograma experimental. Luego, indicando los valores del sill ,range y nugget con respecto al comportamiento experimental de los datos, se obtuvo los respectivos variogramas teóricos para cada metal. En este caso todos los metales se ajustan al modelo teórico gaussiano. Así, se puede realizar la estimación de concentraciones de metales en aquellos lugares donde no se conoce su concentración (krigeado).

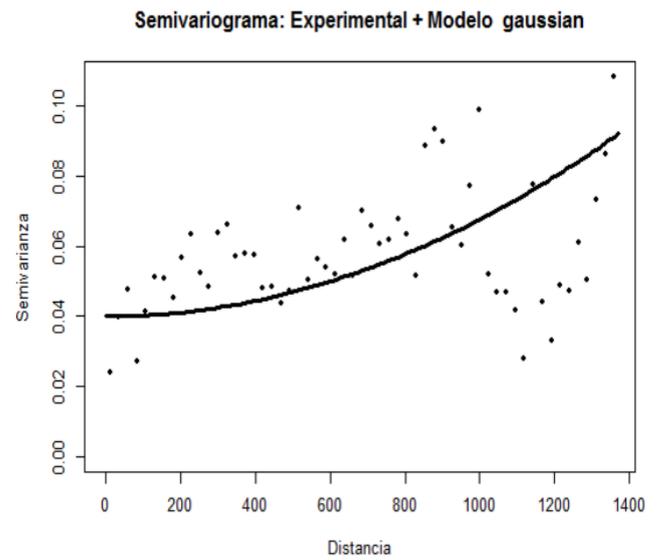
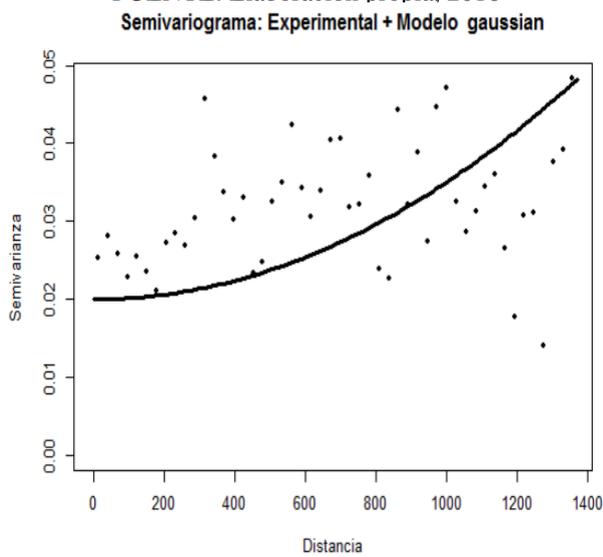
Los variogramas correspondientes a cada metales evaluado en las áreas impactadas se muestran entre la figura 30 y figura 34:



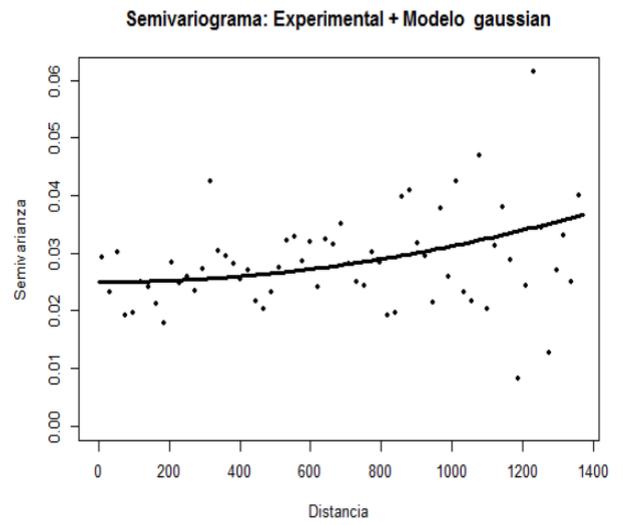
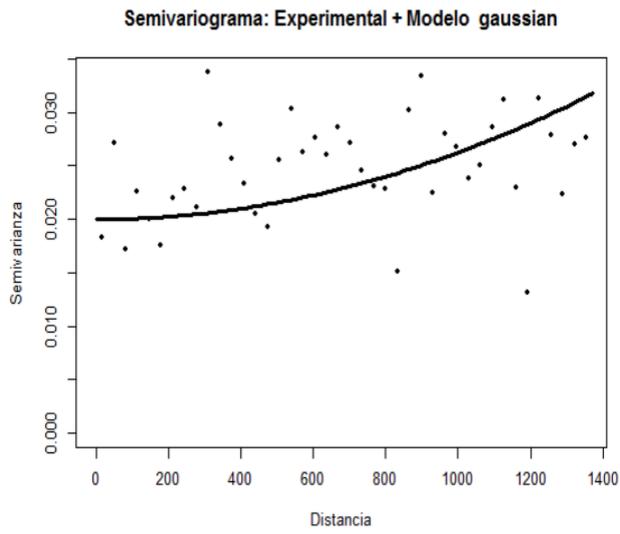
**Figura 29: Variograma del Ar y Ba**  
FUENTE: Elaboración propia, 2016



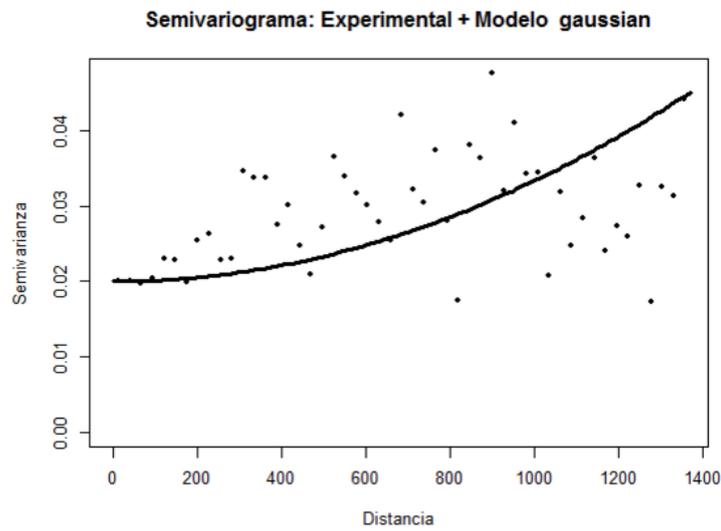
**Figura 30: Variograma del Cd y Pb**  
FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 31: Variograma del Cr y Cu**  
FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 32: Variograma del Ni y V**  
 FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 33: Variograma del Zn**  
 FUENTE: Elaboración propia, 2016

### **Arsénico (As)**

Las formas iónicas son las más móviles de As y son sorbidos a un pH entre 7 y 9. En condiciones ácidas el As enlazado a compuestos como óxido hierro y aluminio solubiliza (Alloway, 1990). En cambio, en un pH entre 7 y 9 el As se encuentra en formas  $\text{AsO}_2^-$ ,  $\text{AsO}_4^{+3}$ ,  $\text{HAsO}_4^{+2}$  y  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$  y són fácilmente sorbidos a la fracción arcilla. Según Lindsay (1979), las formas de As como ácido arsénico, para disolverse necesitarían energía y la reacción no sería espontánea.

En el cuadro 34 se muestra que en las condiciones ácidas del suelo impactado evaluado (4.4 a 5.19 pH) el As presentaría bajas concentraciones ya que no estaría adsorbido a arcillas y materia orgánica, como se aprecia en todas las áreas impactadas (R1, R2, R3, R4, T1 Y T2). En cambio al aumentar el pH, como en el área T2, las formas solubles e iónicas de As son capaces de ser adsorbido a arcillas y materia orgánica y presentarse en mayor concentración; Ello se evidencia mejor en el área natural o no impactada (N). A mayor pH (no ácido), el As puede presentarse como arseniato, caracterizado por reaccionar fuertemente con arcillas, geles de fosfato, humus y calcio y tendría una activa retención con hierro hidratado y óxido de aluminio (Kabata y Pendias, 2011).

Como se muestra en el cuadro 35, figura 34 y figura 35 la correlación univariada mediante el coeficiente de Pearson muestra que la variabilidad de la concentración de As es explicada por el pH en un 43% a comparación de la CIC, arcilla (%) y materia orgánica del suelo (%). Además, la correlación multivariante mediante el coeficiente de dependencia efectiva muestra que el pH, CIC, arcilla (%) y materia orgánica (%) del suelo explican el 82% de la variabilidad de la concentración de As.

La concentración de As en los suelos de las áreas impactadas variaron de  $0.80 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $3.10 \text{ mg kg}^{-1}$ , con una media igual  $2.70 \text{ mg kg}^{-1}$  y mediana igual a  $1.90 \text{ mg kg}^{-1}$ , siendo los valores permitidos por el ECA de Perú para suelo industrial y agrícola igual a  $140 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  respectivamente. Así se muestra en la figura 36 la concentración espacial de As en el área de estudio.

**Cuadro 34: Concentración de As y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

Parámetros	Áreas impactadas						Área natural
	R1	R2	R3	R4	T1	T2	N
As (mg kg <sup>-1</sup> )	0.80	1.40	2.05	2.10	2.60	3.10	3.56
Clase textural	arenosa	arenosa	Arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	Arc. limoso
Arcilla (%)	3.44	3.44	3.44	3.44	1.44	21.44	39.23
pH	4.82	4.24	4.67	5.19	4.92	4.72	5.43
Materia orgánica (%)	0.24	0.03	0.17	0.48	0.18	0.5	2.40
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac	8.2	8.45	9.25	7.82	11.68	19.43	29.86

FUENTE: Elaboración propia, 2016

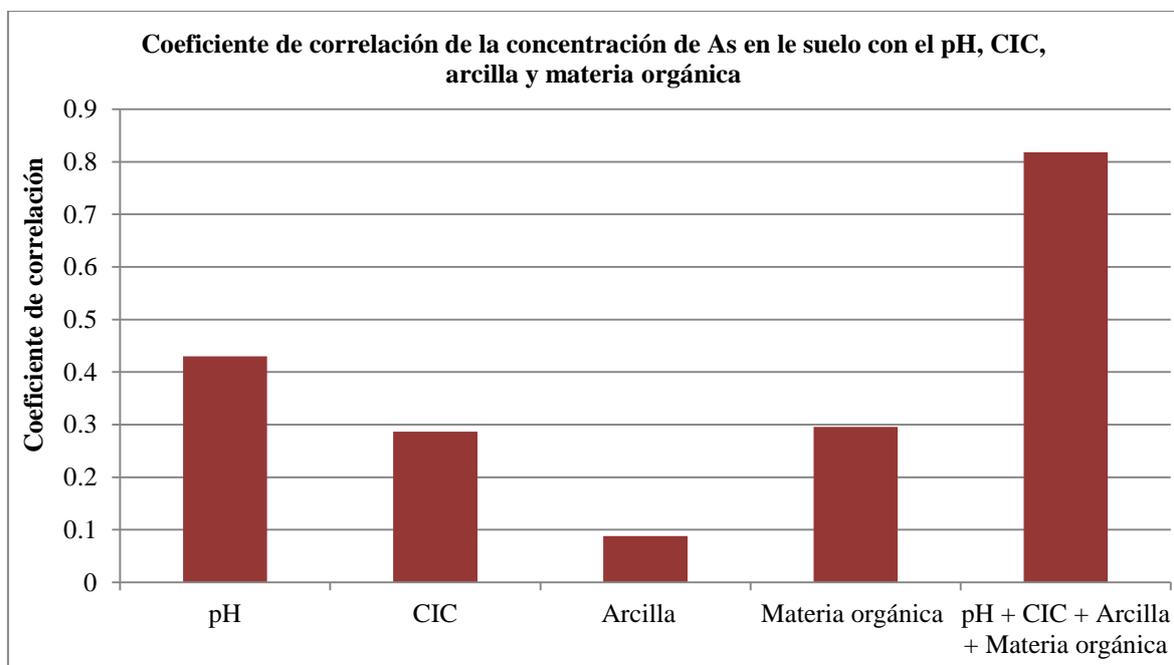
**Cuadro 35: Coeficiente de correlación de la concentración de As con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

As	pH	CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Arcilla (%)	Materia orgánica (%)	pH + CIC + Arcilla + Materia orgánica
<b>Coefficiente de correlación</b>	0.43 <sup>1</sup>	0.28 <sup>a</sup>	0.08 <sup>a</sup>	0.29 <sup>a</sup>	0.82 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Coeficiente de Pearson - univariada

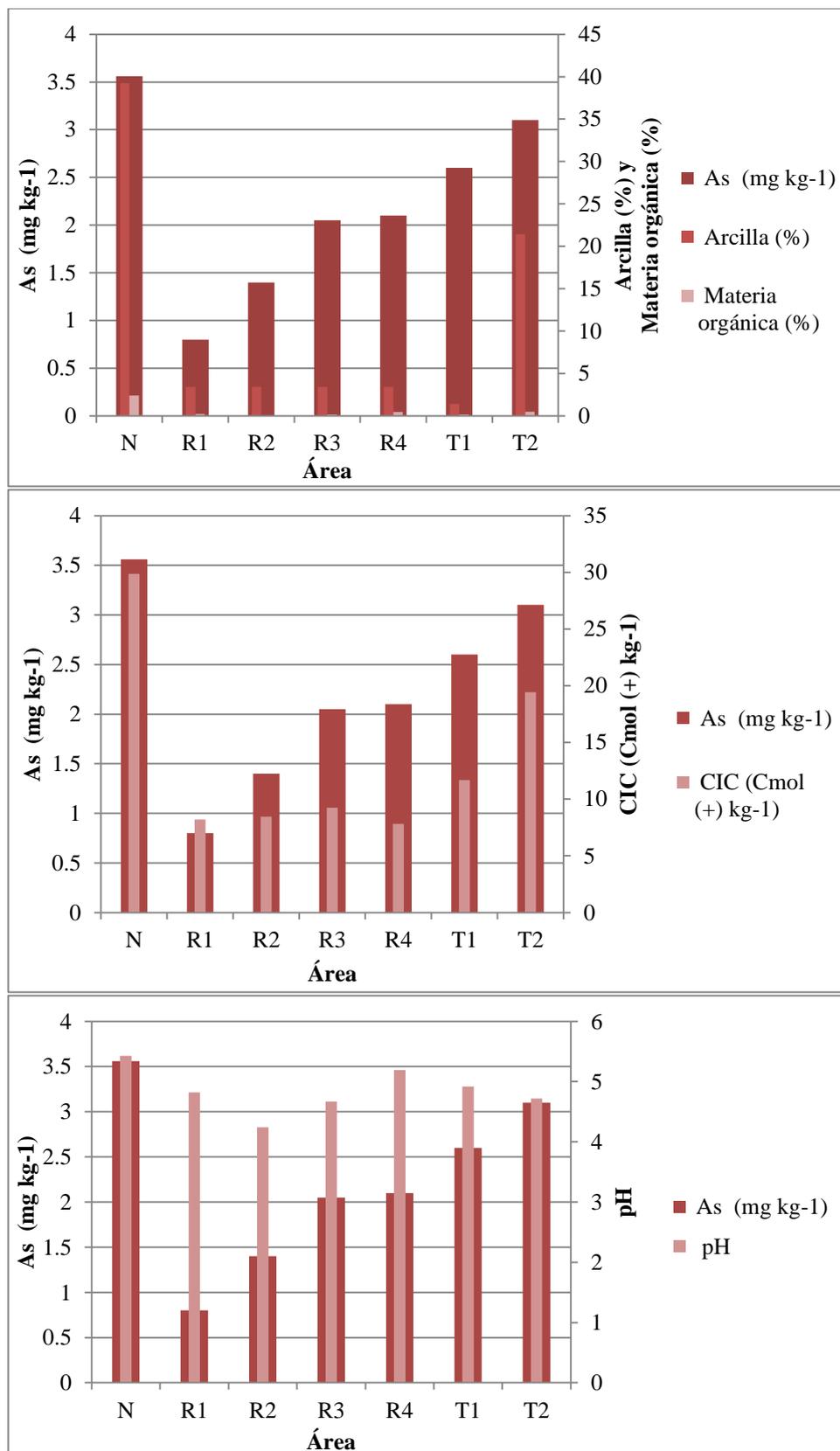
<sup>b</sup> Coeficiente de dependencia - multivariada

FUENTE: Elaboración propia, 2016



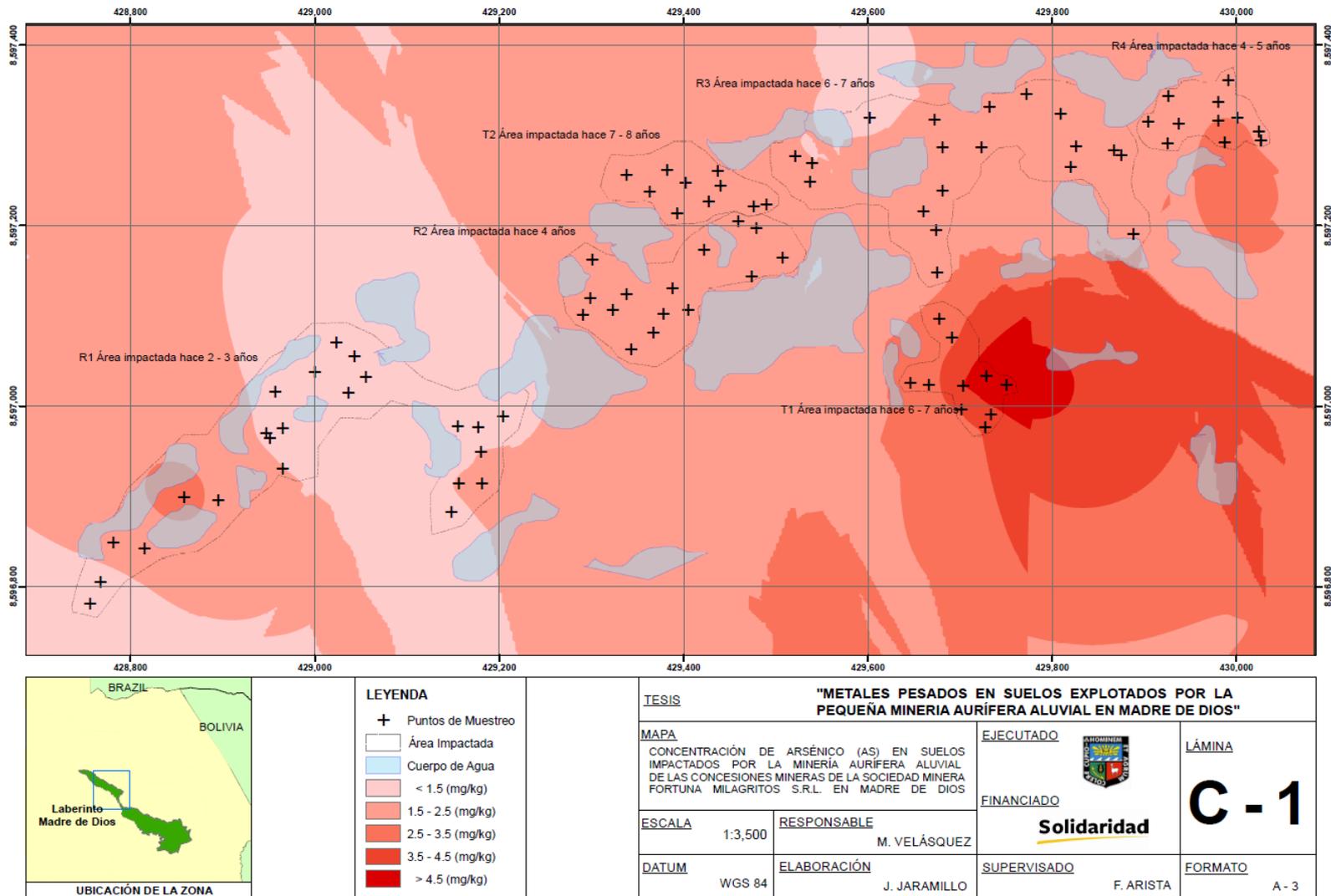
**Figura 34: Coeficiente de correlación de la concentración de As con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 35: Concentración de As y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 36: Concentración de arsénico en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera**  
 FUENTE: Solidaridad (2016)

## **Bario (Ba)**

El Ba es un elemento caracterizado por su baja movilidad, precipita con sulfatos y carbonatos, es fuertemente adsorbida a arcillas, se concentra junto a concreciones de Mn y P, y a la vez es específicamente sorbido a óxidos e hidróxidos.

En el cuadro 36 se muestra la afinidad del Ba para ser sorbido por arcillas y óxidos de Fe en el suelo; estos habrían determinado principalmente su distribución en las áreas impactadas. La concentración de Ba en las áreas impactadas (R1, R2, R3, R4, T1 y T2) fue de 28.80 mg kg<sup>-1</sup> a 35 mg kg<sup>-1</sup> con un porcentaje de arcilla entre 1.44% a 3.44% mientras en el área natural o no impactada (N) el Ba fue mayor con 156.30 mg kg<sup>-1</sup> con un porcentaje de arcilla alto igual a 39.23%.

Como se muestra en el cuadro 37, figura 37 y figura 38, la correlación univariada mediante el coeficiente de Pearson muestra que la variabilidad de la concentración de Ba es explicada por la CIC y pH en un 41% y 39% respectivamente, a comparación de arcilla (%) y materia orgánica del suelo (%). Además, la correlación multivariante mediante el coeficiente de dependencia efectiva muestra que el pH, CIC, arcilla (%) y materia orgánica (%) del suelo explican el 90% de la variabilidad de la concentración de Ba.

La concentración de Ba en los suelos de las áreas impactadas variaron de 28.80 mg kg<sup>-1</sup> a 35.55 mg kg<sup>-1</sup>, con una media igual 35.86 mg kg<sup>-1</sup> y mediana igual a 29.80 mg kg<sup>-1</sup>, siendo los valores permitidos por el ECA para suelo industrial y agrícola igual a 2000.00 mg kg<sup>-1</sup> y 750.00 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente. Así se muestra en la figura 39 la concentración espacial de Ba en el área de estudio.

**Cuadro 36: Concentración de Ba y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

Parámetros	Áreas impactadas						Área natural
	R1	R2	R3	R4	T1	T2	N
Ba (mg kg <sup>-1</sup> )	28.80	23.30	30.15	31.00	37.80	35.55	156.30
Clase textural	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	Arc. limoso
Arcilla (%)	3.44	3.44	3.44	3.44	1.44	21.44	39.23
pH	4.82	4.24	4.67	5.19	4.92	4.72	5.43
Materia orgánica (%)	0.24	0.03	0.17	0.48	0.18	0.5	2.40
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac	8.2	8.45	9.25	7.82	11.68	19.43	29.86

FUENTE: Elaboración propia, 2016

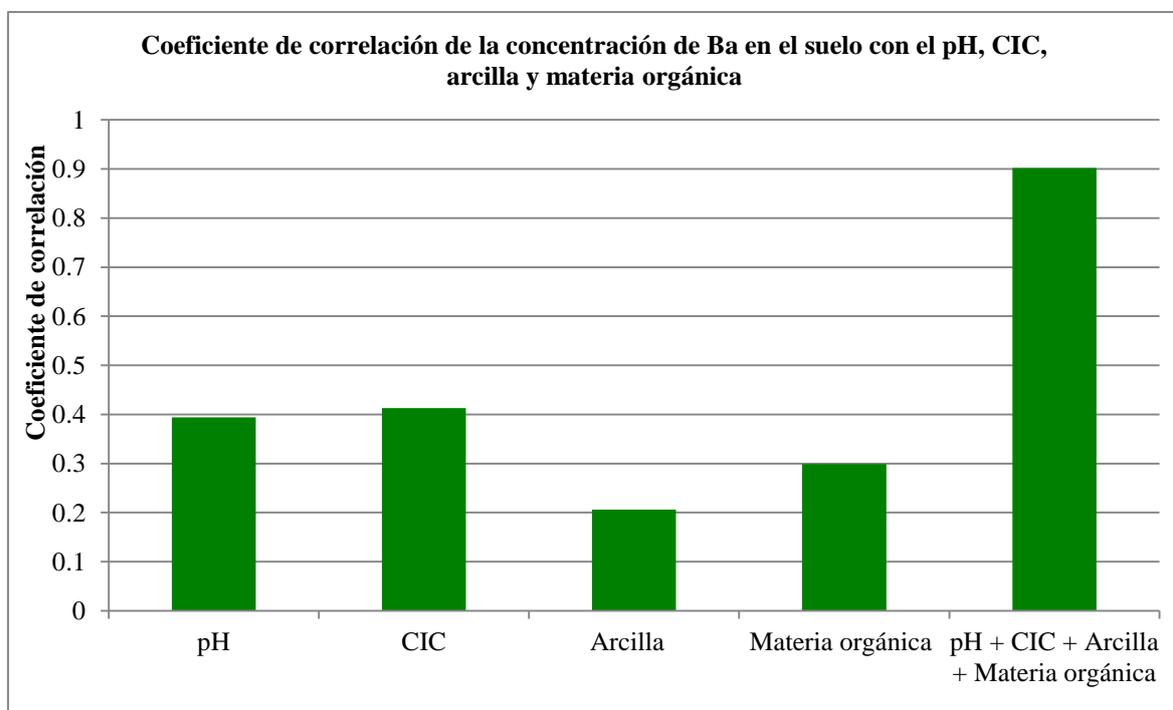
**Cuadro 37: Coeficiente de correlación de la concentración de Ba con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

Ba	pH	CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Arcilla (%)	Materia orgánica (%)	pH + CIC + Arcilla + Materia orgánica
<b>Coeficiente de correlación</b>	0.39 <sup>1</sup>	0.41 <sup>1</sup>	0.20 <sup>1</sup>	0.29 <sup>1</sup>	0.90 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Coeficiente de Pearson

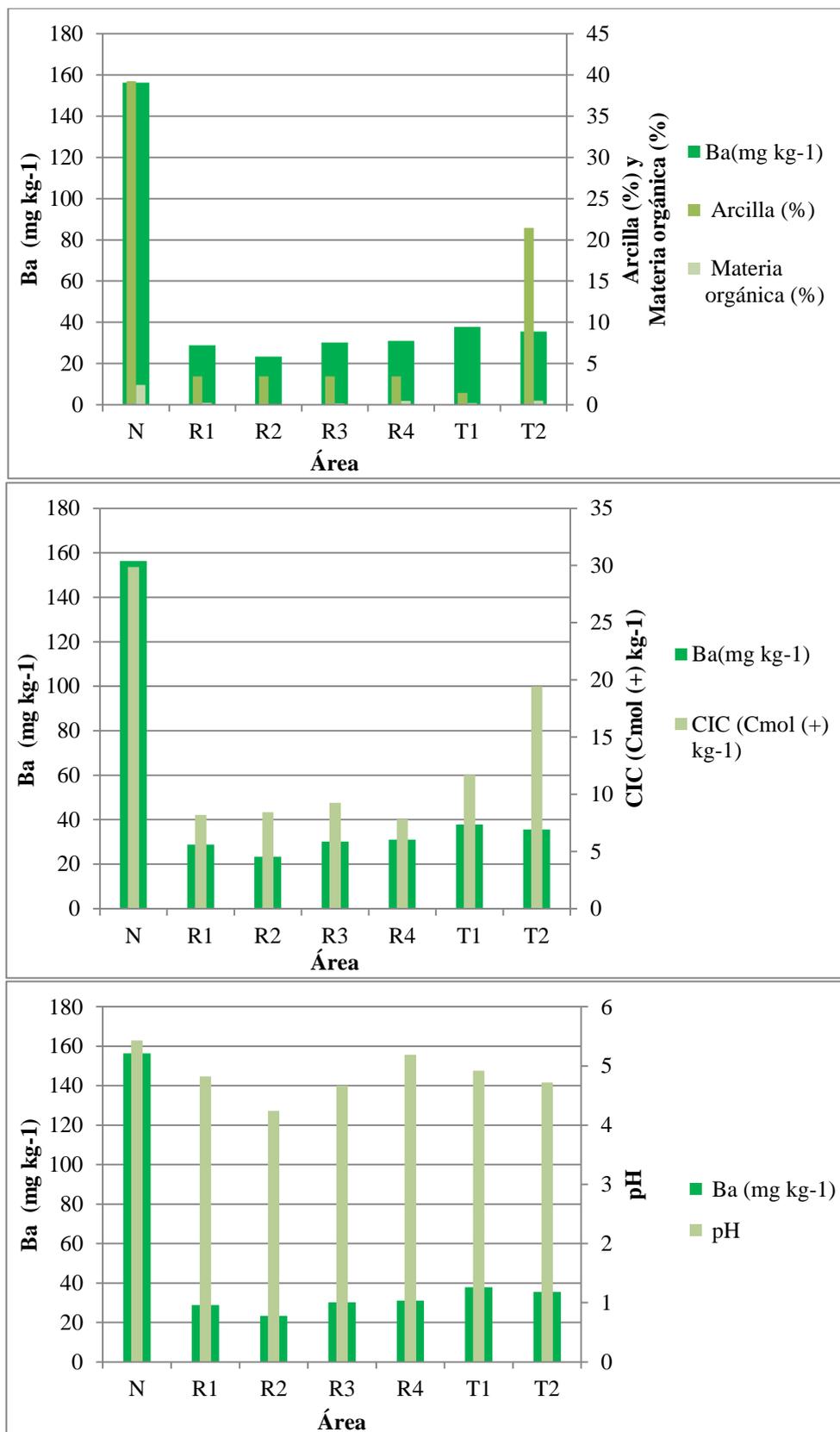
<sup>2</sup> Coeficiente de dependencia

FUENTE: Elaboración propia, 2016



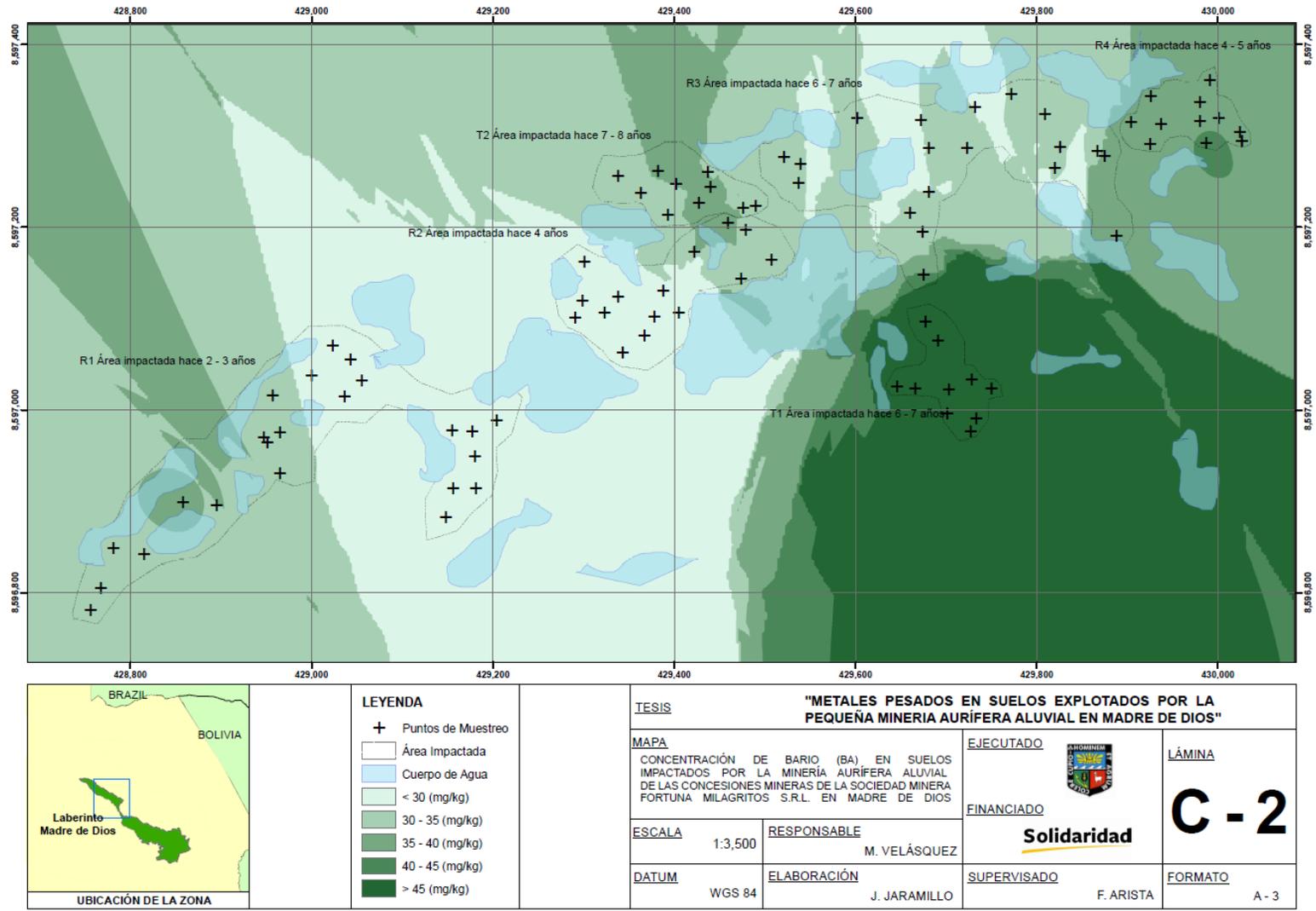
**Figura 37: Coeficiente de correlación de la concentración de Ba con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 38: Concentración de Ba y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 39: Concentración de bario en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera**  
 FUENTE: Solidaridad (2016)

## **Cadmio (Cd)**

Durante el intemperismo de rocas y minerales, el Cd se libera en forma de  $\text{Cd}^{+2}$ , que es la forma más adsorbida a superficies de coloides y estable (Alloway, 1990). En condiciones oxidantes de suelos ácidos el Cd se encontraría como  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{CdSO}_4$ ,  $\text{CdCl}^+$ , mientras en condiciones alcalinas se encontraría como  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{CdCl}^+$ ,  $\text{CdSO}_4$  y  $\text{CdHCO}_3^+$  (Furr *et al.*, 1984 citado por Alloway, 1990).

En suelos ácidos la sorción a la materia orgánica y sesquióxidos controlarían la solubilidad de Cd y en suelo alcalinos la precipitación de Cd mantendrían el equilibrio (Kabata y Pendias, 2011). Se estimó que la acidez crítica de Cd se encuentra a 4 y 4.5 de pH y que al disminuir el pH en 0.2 unidades se incrementa la concentración de Cd en 3 veces en la solución del suelo (Benes y Pabianova, 1986 citado por Kabata y Pendias, 2011 y); por lo contrario en condiciones alcalinas el Cd en solución disminuye por la precipitación con carbonatos y fosfatos (Street *et al* 1977 citado por Alloway, 1990), incremento de hidrólisis, densidad de adsorción y cargas dependientes del pH (Pickering, 1980 citado por Alloway, 1990).

En el cuadro 38 se muestra la condición ácida de los suelos impactados (R1, R2, R3, R4, T1 y T2) que va entre 4.4 a 5.19 de pH, el Cd de las áreas impactadas estaría en forma soluble en baja concentración de  $1.92 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $3.42 \text{ mg kg}^{-1}$ ; a diferencia del área no impactada (N) que con un pH de 5.43 disminuiría la solubilidad de Cd ya que sería más sorbido por la arcilla (39.23%) y materia orgánica (2.40%).

En las condiciones del suelo evaluado, las reacciones de formación de  $\text{Cd}^{+2}$  a partir de rocas y minerales serían termodinámicamente instantáneas bajo condiciones estándar ( $25^\circ\text{C}$  de temperatura y 1 Atm de presión), siendo la forma en la cual sería sorbido y soluble en el suelo. No habría la formación de precipitados con carbonatos y fosfatos ya que la reacción no es espontánea y requeriría energía (Lindsay, 1979).

Como se muestra en el cuadro 39, figura 40 y figura 41, la correlación univariada mediante el coeficiente de Pearson muestra que la variabilidad de la concentración de Cd es explicada por el pH en un 48%, a comparación de la CIC, arcilla (%) y materia orgánica del suelo (%). Además, la correlación multivariante mediante el coeficiente

de dependencia efectiva muestra que el pH, CIC, arcilla (%) y materia orgánica (%) del suelo explican el 85% de la variabilidad de la concentración de Cd.

La concentración de Cd en los suelos de las áreas impactadas variaron de 1.92 mg kg<sup>-1</sup> a 3.42 mg kg<sup>-1</sup>, con una media igual 2.61 mg kg<sup>-1</sup> y mediana igual a 2.22 mg kg<sup>-1</sup>, siendo los valores permitidos por el ECA para suelo industrial y agrícola igual a 22.00 mg kg<sup>-1</sup> y 1.40 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente. Así se muestra en la figura 42 la concentración espacial de Cd.

**Cuadro 38: Concentración de Cd y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

Parámetros	Áreas impactadas						Área natural
	R1	R2	R3	R4	T1	T2	N
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )	1.92	1.83	2.35	2.68	3.42	2.91	6.64
Clase textural	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	Arc. limoso
arcilla (%)	3.44	3.44	3.44	3.44	1.44	21.44	39.23
pH	4.82	4.24	4.67	5.19	4.92	4.72	5.43
Materia orgánica (%)	0.24	0.03	0.17	0.48	0.18	0.5	2.40
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac	8.2	8.45	9.25	7.82	11.68	19.43	29.86

FUENTE: Elaboración propia, 2016

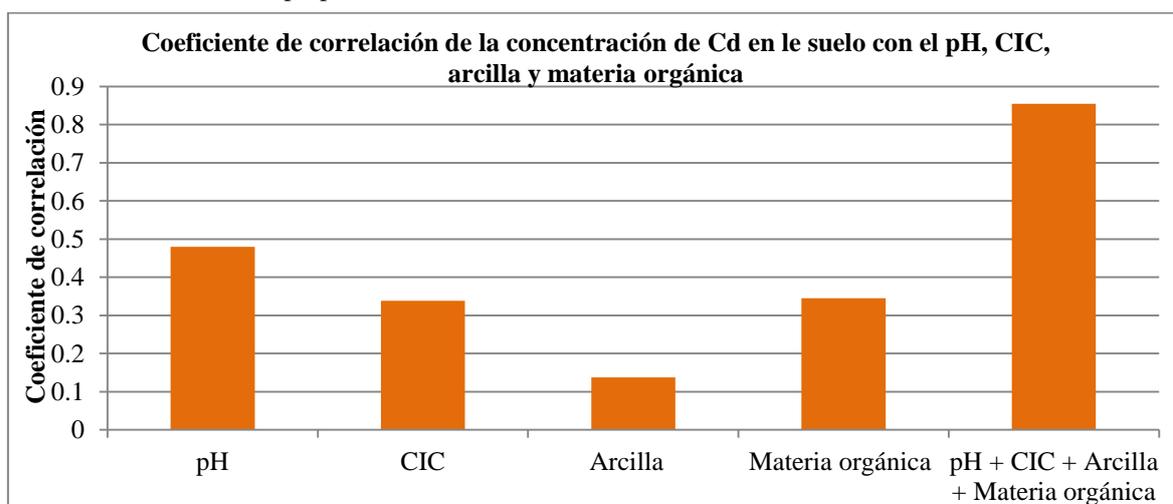
**Cuadro 39: Coeficiente de correlación de la concentración de Cd con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

Cd	pH	CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Arcilla (%)	Materia orgánica (%)	pH + CIC + Arcilla + Materia orgánica
<b>Coefficiente de correlación</b>	0.48 <sup>1</sup>	0.39 <sup>1</sup>	0.14 <sup>1</sup>	0.34 <sup>1</sup>	0.85 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Coeficiente de Pearson

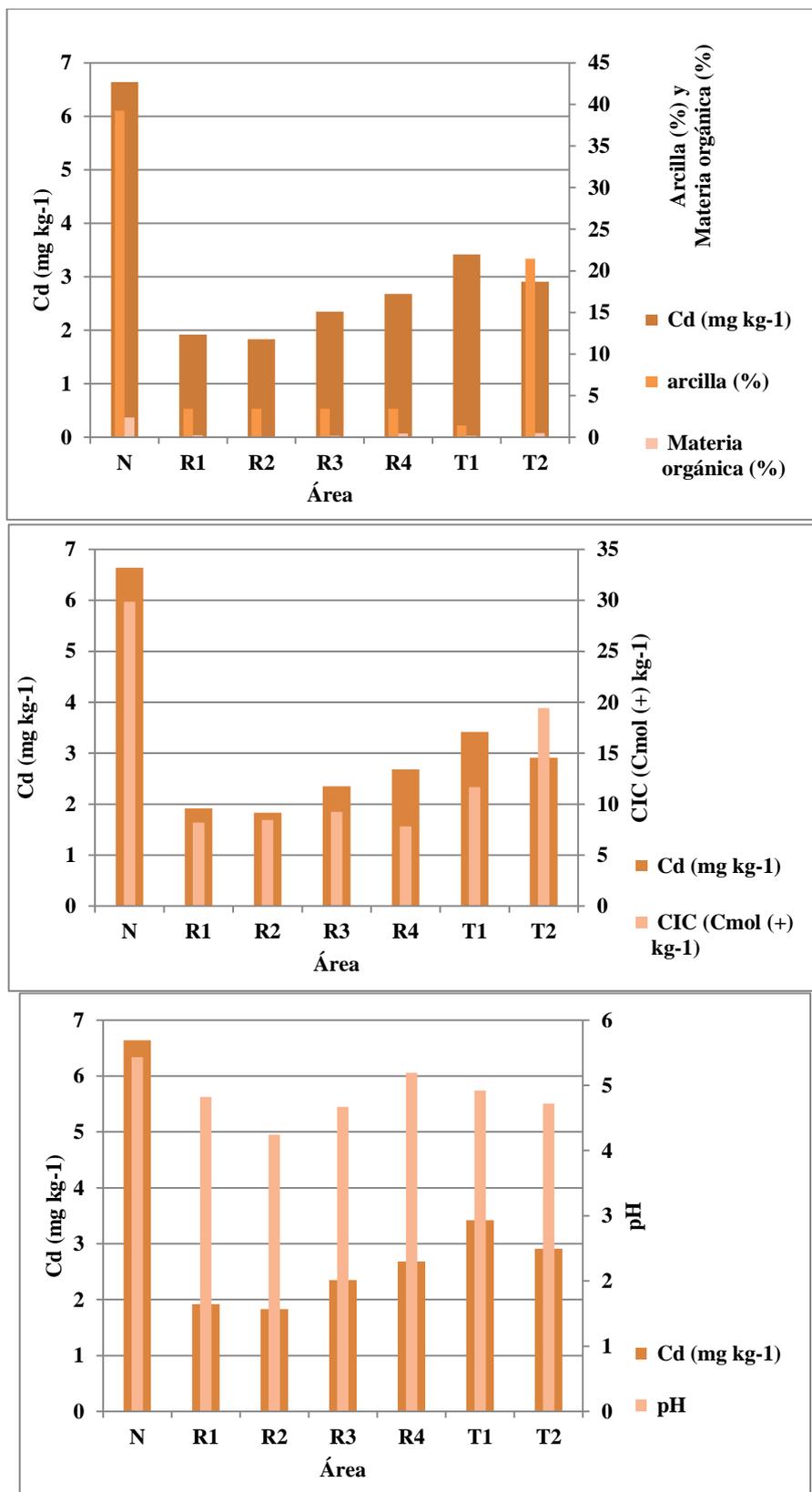
<sup>2</sup> Coeficiente de dependencia

FUENTE: Elaboración propia, 2016



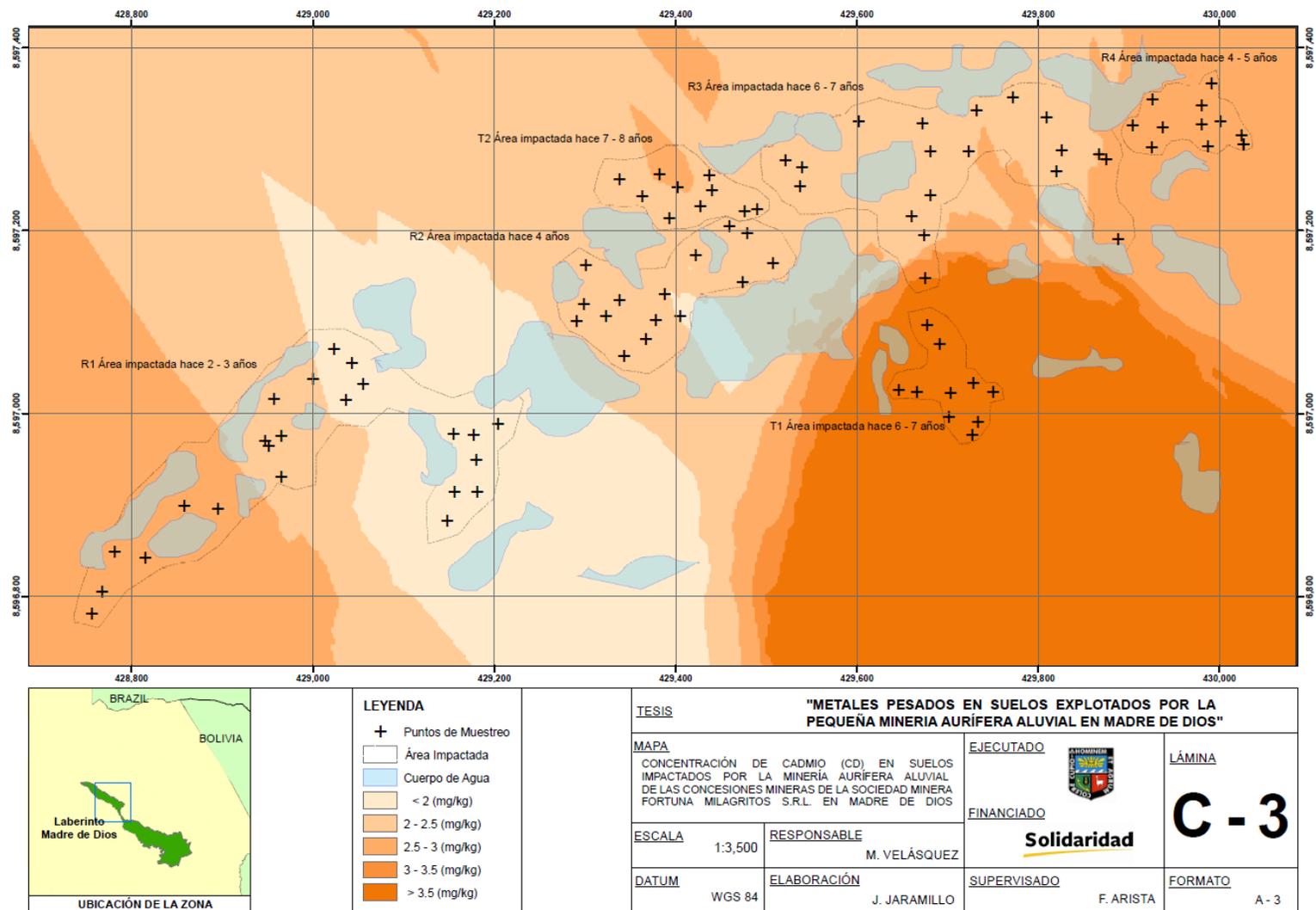
**Figura 40: Coeficiente de correlación de la concentración de Ba con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 41: Concentración de Cd y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 42: Concentración de cadmio en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera**  
FUENTE: Solidaridad (2016)

## **Plomo (Pb)**

El plomo es un elemento muy reactivo. A altos niveles de pH pueden precipitar como hidróxidos, fosfatos o carbonatos y también puede promover la formación de complejos orgánicos estables. En condiciones ácidas disminuye su solubilidad; la velocidad de movilidad resulta inferior a la acumulación en suelos ricos en materia orgánica, con la cual tiene alta afinidad (Shaw, 1986 citado por Alloway, 1990 y Kabata y Pendias, 2011).

La biodisponibilidad de Pb en sistemas naturales viene controlada en medios ácidos y neutros por la presencia de  $\text{PO}_4^{3-}$  que da origen a minerales altamente insolubles (requieren energía para su disolución en condiciones estándar como 25°C de temperatura y 1 Atm de presión) como Cloropirromorfita y otros (Nriagu, 1974 citado por Porta *et al.*, 1999). Además, el Pb presenta alta afinidad (reacción espontánea sin requerir energía en condiciones estándar) para estar sorbido al suelo como a superficies de arcilla y materia orgánica (Lindsay, 1979).

El Pb en las áreas impactadas (R1, R2, R3, R4, T1 y T2), por el producto del intemperismo algunas rocas y minerales, espontáneamente liberarían Pb en la solución suelo; allí el Pb sería fácilmente sorbido a arcillas y materia orgánica por su gran afinidad. En el cuadro 40 se muestra la concentración de Pb en el área impactada fue bajo, entre 3.61 mg kg<sup>-1</sup> a 5.65 mg kg<sup>-1</sup>, con porcentaje de arcilla entre 1.44 a 21.44% y baja materia orgánica entre 0.03% y 0.5%, mientras en el área no impactada (N) su concentración de Pb fue 13.67 mg kg<sup>-1</sup> relacionado con altas cantidades de arcilla y materia orgánica iguales a 39.23 % y 2.40% respectivamente.

Como se muestra en el cuadro 41, figura 43 y figura 44, la correlación univariada mediante el coeficiente de Pearson muestra que la variabilidad de la concentración de Pb es explicada por la CIC en un 64%, a comparación del pH, arcilla (%) y materia orgánica (%) del suelo. Además, la correlación multivariante mediante el coeficiente de dependencia efectiva muestra que el pH, CIC, arcilla (%) y materia orgánica (%) del suelo explican el 99% de la variabilidad de la concentración de Pb.

La concentración de Pb en los suelos de las áreas impactadas variaron de 3.61 mg kg<sup>-1</sup> a 5.65 mg kg<sup>-1</sup>, con una media igual 5.21 mg kg<sup>-1</sup> y mediana igual a 4.60 mg kg<sup>-1</sup>,

siendo los valores permitidos por el ECA para suelo industrial y agrícola igual a 1200.00 mg kg<sup>-1</sup> y 70.00 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente. Así se muestra en la figura 45 la concentración espacial de Pb.

**Cuadro 40: Concentración de Pb y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

Parámetros	Áreas impactadas						Área natural
	R1	R2	R3	R4	T1	T2	N
Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	4.66	3.61	4.66	4.43	5.65	5.38	13.67
Clase textural	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	Arc. limoso
Arcilla (%)	3.44	3.44	3.44	3.44	1.44	21.44	39.23
pH	4.82	4.24	4.67	5.19	4.92	4.72	5.43
Materia orgánica (%)	0.24	0.03	0.17	0.48	0.18	0.5	2.40
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac	8.2	8.45	9.25	7.82	11.68	19.43	29.86

Elaboración propia, 2016

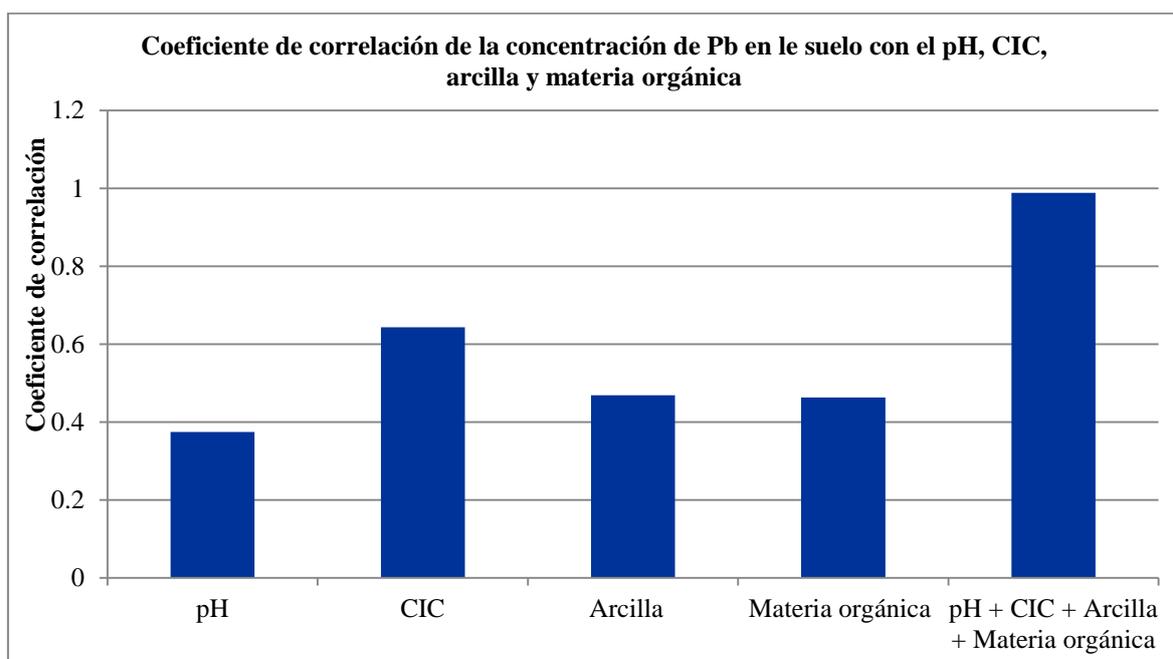
**Cuadro 41: Coeficiente de correlación de la concentración de Pb con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

Pb	pH	CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Arcilla (%)	Materia orgánica (%)	pH + CIC + Arcilla + Materia orgánica
<b>Coefficiente de correlación</b>	0.37 <sup>1</sup>	0.64 <sup>1</sup>	0.47 <sup>1</sup>	0.46 <sup>1</sup>	0.99 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Coeficiente de Pearson

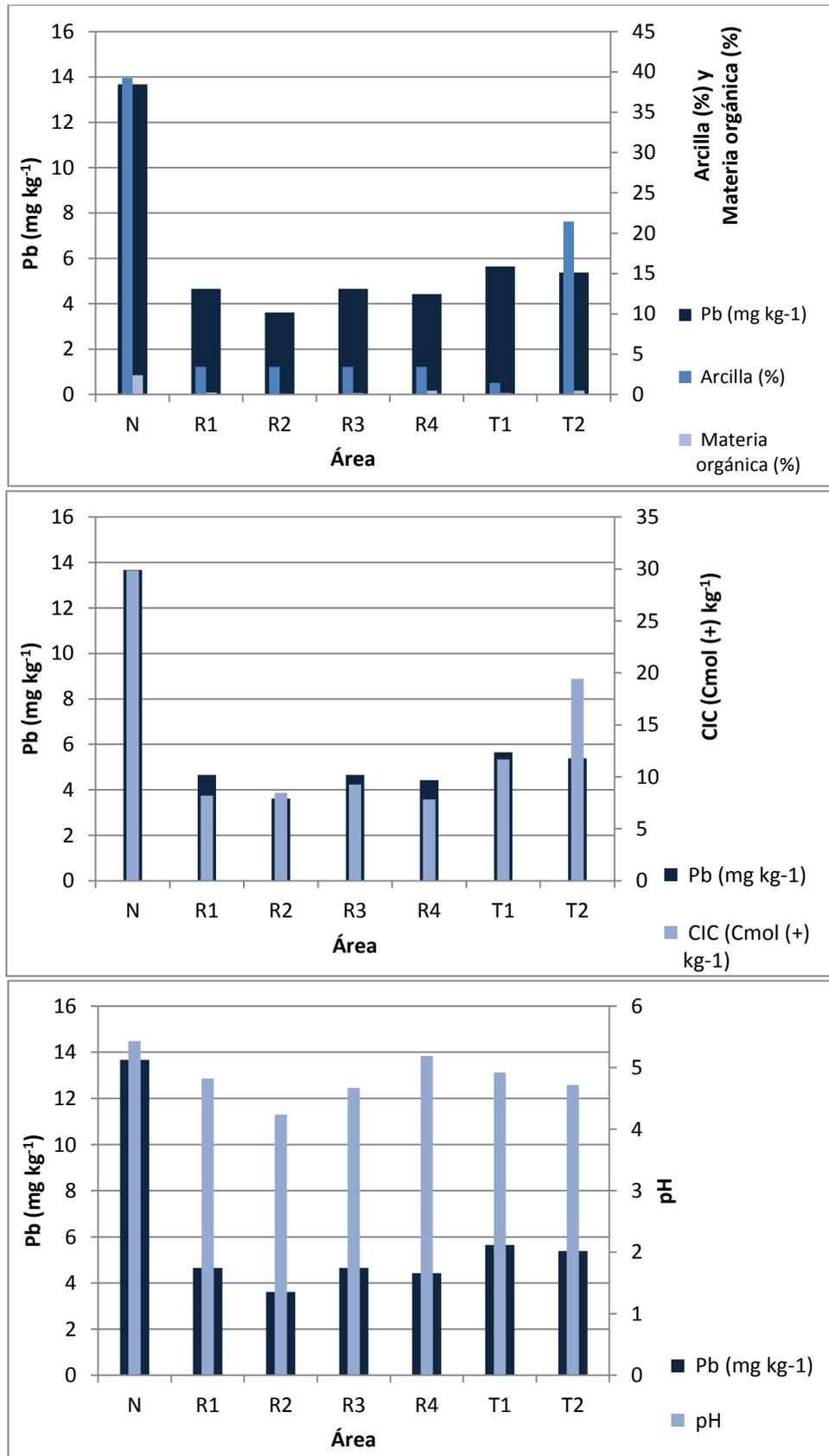
<sup>2</sup> Coeficiente de dependencia

FUENTE: Elaboración propia, 2016

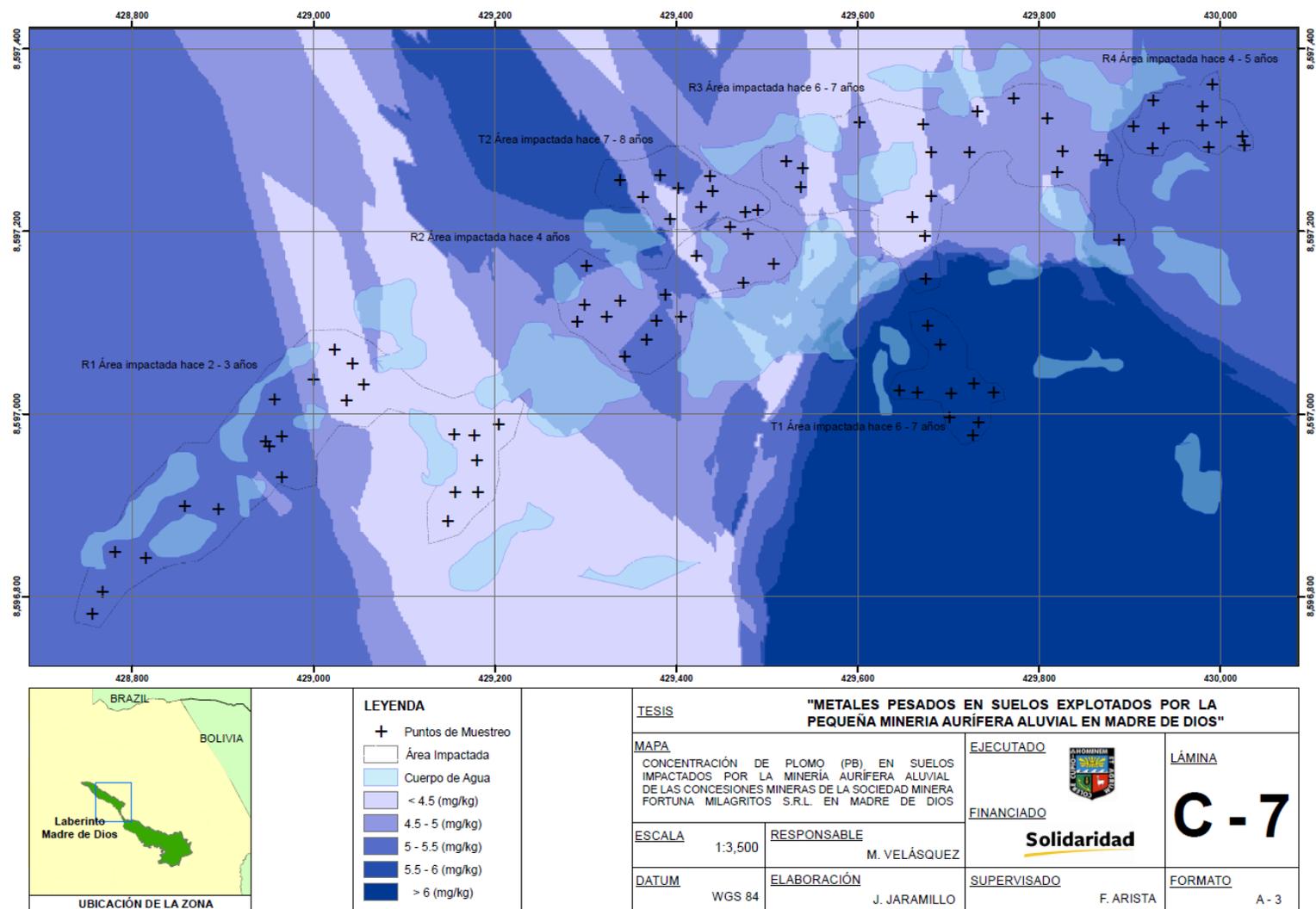


**Figura 43: Coeficiente de correlación de la concentración de Pb con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 44: Concentración de Pb y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**  
 FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 45: Concentración de plomo en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera**  
FUENTE: Solidaridad (2016)

## Cobre (Cu)

A un pH ligeramente neutro y ácido, la forma de Cu es  $\text{Cu}^{+2}$  y también se encuentran productos de la hidrólisis como  $\text{CuOH}^+$  y  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2^{+2}$  (Kabata y Pendias, 2011). La liberación de Cu a partir de minerales es espontánea; el orden decreciente de solubilidad es  $\text{CuCO}_3 > \text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$  (azurita)  $> \text{Cu}(\text{OH})_2 > \text{Cu}(\text{OH})_2 > \text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$  (malaquita)  $> \text{CuO}$  (tenorita)  $> \text{CuFe}_2\text{O}_4$ ; así varios minerales que contienen Cu son muy solubles para controlar la baja actividad de  $\text{Cu}^{+2}$ . Los precipitados  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CuCO}_3$ ,  $\text{CuCl}^+$ ,  $\text{Cu}(\text{Cl}_3)^-$  y varios complejos orgánicos proceden de reacciones que requerirían energía y no son espontáneas en condición estándar. La adsorción de  $\text{Cu}^{+2}$  por arcillas se encuentra en el orden de caolinita  $>$  illita  $>$  esmectita. Puede ser quimiosorbido y ocluido en suelos con óxidos de hierro y aluminio con alta superficie específica. En suelos orgánicos, el grupo funcional COO-forma complejos estables en la fase líquida y sólida (Alloway, 1990).

La concentración de Cu en suelos de áreas impactadas (R1, R2, R3, R4, T1 y T2) en condiciones ácidas se presentaría principalmente en la solución del suelo, pero también estaría adsorbido a la superficie de arcillas como la caolinita y ocluido a óxidos de hierro y aluminio. Ya que se presentaría en solución, en los suelos de áreas impactadas, la textura del suelo arena haría que el Cu en solución sea fácilmente lixiviado por la precipitación pluvial con concentraciones entre  $7.81 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $18.90 \text{ mg kg}^{-1}$ . El aumento de fracciones de arcilla y materia orgánica haría que el Cu tienda a ser retenido en los espacios de cambios superficiales, como se muestra en áreas degradadas T1 y T2 con cantidades mayores de arcillas y materia orgánica hasta 21.44% y 0.5% respectivamente. Los suelos no impactados o naturales (N) presentaron hasta  $34.87 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cu y su concentración se explicaría por el mayor contenido de arcillas y materia orgánica igual a 39.23% y 2.40 respectivamente, que además disminuirían el efecto lixivante de la intensa precipitación pluvial. La concentración de Cu, características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas se muestran en el cuadro 42.

Como se muestra en el cuadro 43, figura 46 y figura 47, la correlación univariada mediante el coeficiente de Pearson muestra que la variabilidad de la concentración de Cu es explicada por la CIC en un 50%, a comparación del pH, arcilla (%) y materia orgánica (%) del suelo. Además, la correlación multivariante mediante el coeficiente

de dependencia efectiva muestra que el pH, CIC, arcilla (%) y materia orgánica (%) del suelo explican el 87% de la variabilidad de la concentración de Cu.

La concentración de Cu en los suelos de las áreas impactadas variaron de 7.81 mg kg<sup>-1</sup> a 18.90 mg kg<sup>-1</sup>, con una media igual 13.98 mg kg<sup>-1</sup> y mediana igual a 12.67 mg kg<sup>-1</sup>, siendo los valores permitidos por el ECA para suelo industrial y agrícola igual a 91.00 mg kg<sup>-1</sup> y 63.00 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente. Así se muestra en la figura 48 la concentración espacial de Cu.

**Cuadro 42: Concentración de Cu y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

Parámetros	Áreas impactadas						Área natural
	R1	R2	R3	R4	T1	T2	N
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	7.81	10.68	12.20	13.52	18.90	16.51	34.87
Clase textural	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	Arc. Limoso
arcilla (%)	3.44	3.44	3.44	3.44	1.44	21.44	39.23
pH	4.82	4.24	4.67	5.19	4.92	4.72	5.43
Materia orgánica (%)	0.24	0.03	0.17	0.48	0.18	0.5	2.40
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac	8.2	8.45	9.25	7.82	11.68	19.43	29.86

Elaboración propia, 2016

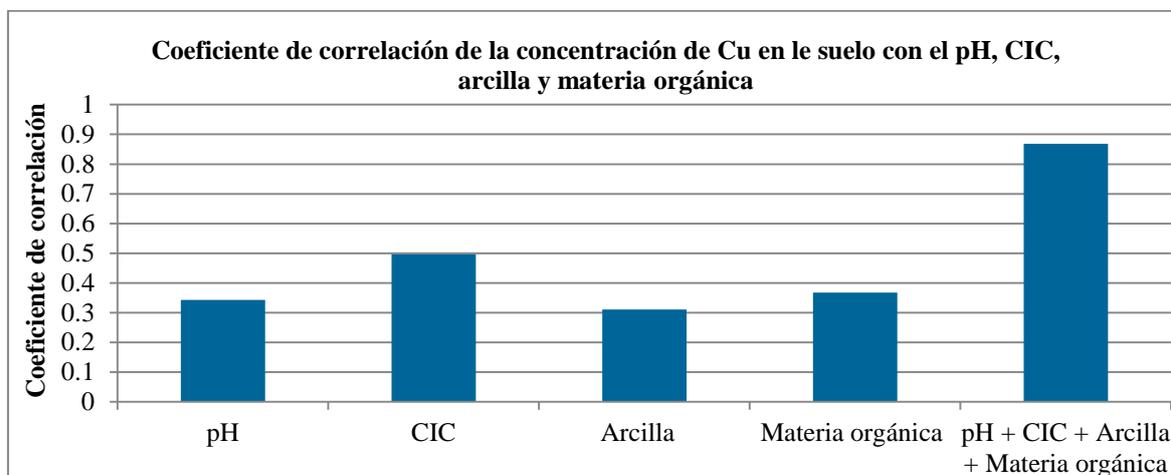
**Cuadro 43: Coeficiente de correlación de la concentración de Cu con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

Cu	pH	CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Arcilla (%)	Materia orgánica (%)	pH + CIC + Arcilla + Materia orgánica
<b>Coefficiente de correlación</b>	0.34 <sup>1</sup>	0.50 <sup>1</sup>	0.31 <sup>1</sup>	0.37 <sup>1</sup>	0.87 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Coeficiente de Pearson

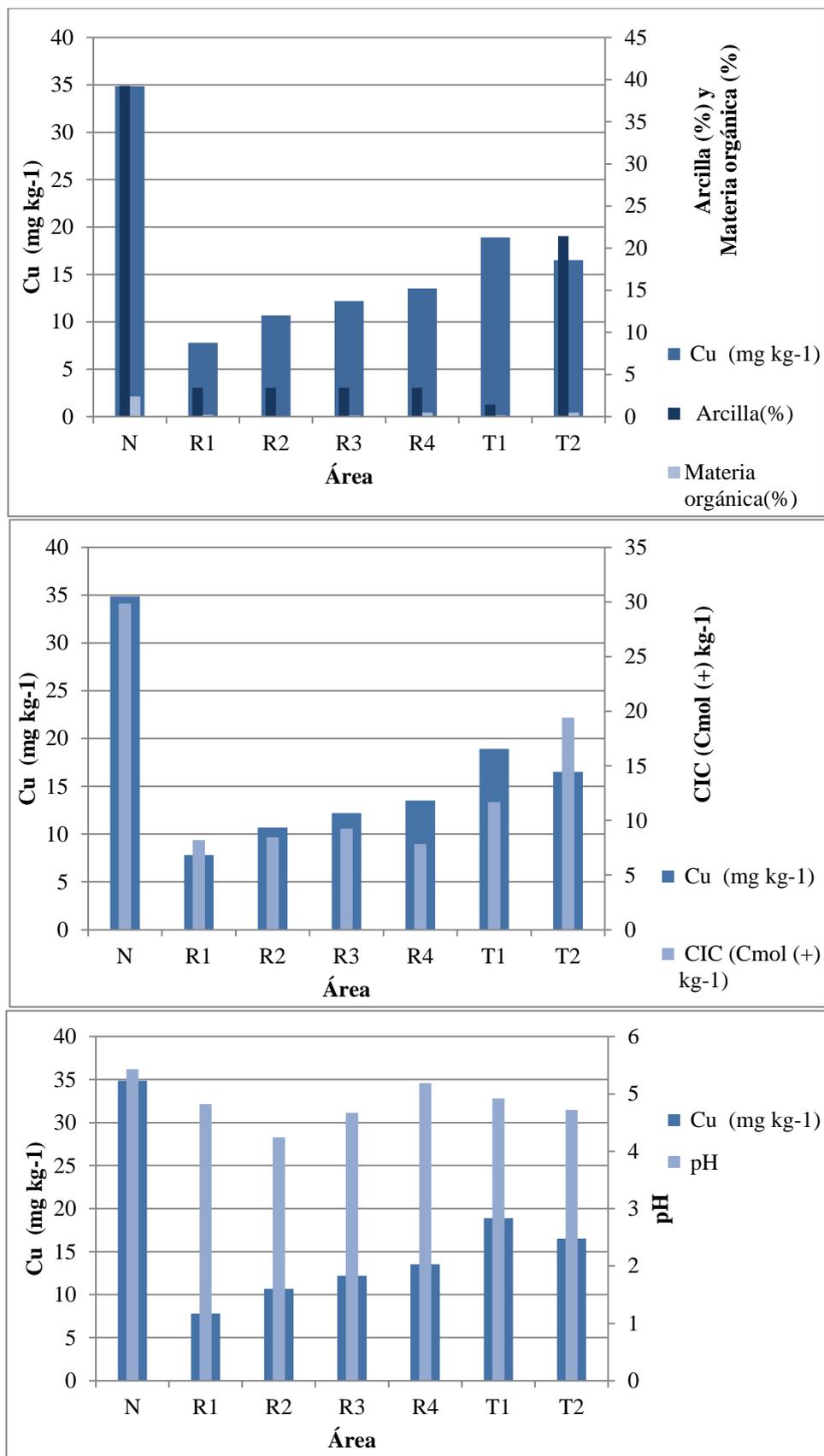
<sup>2</sup> Coeficiente de dependencia

FUENTE: Elaboración propia, 2016



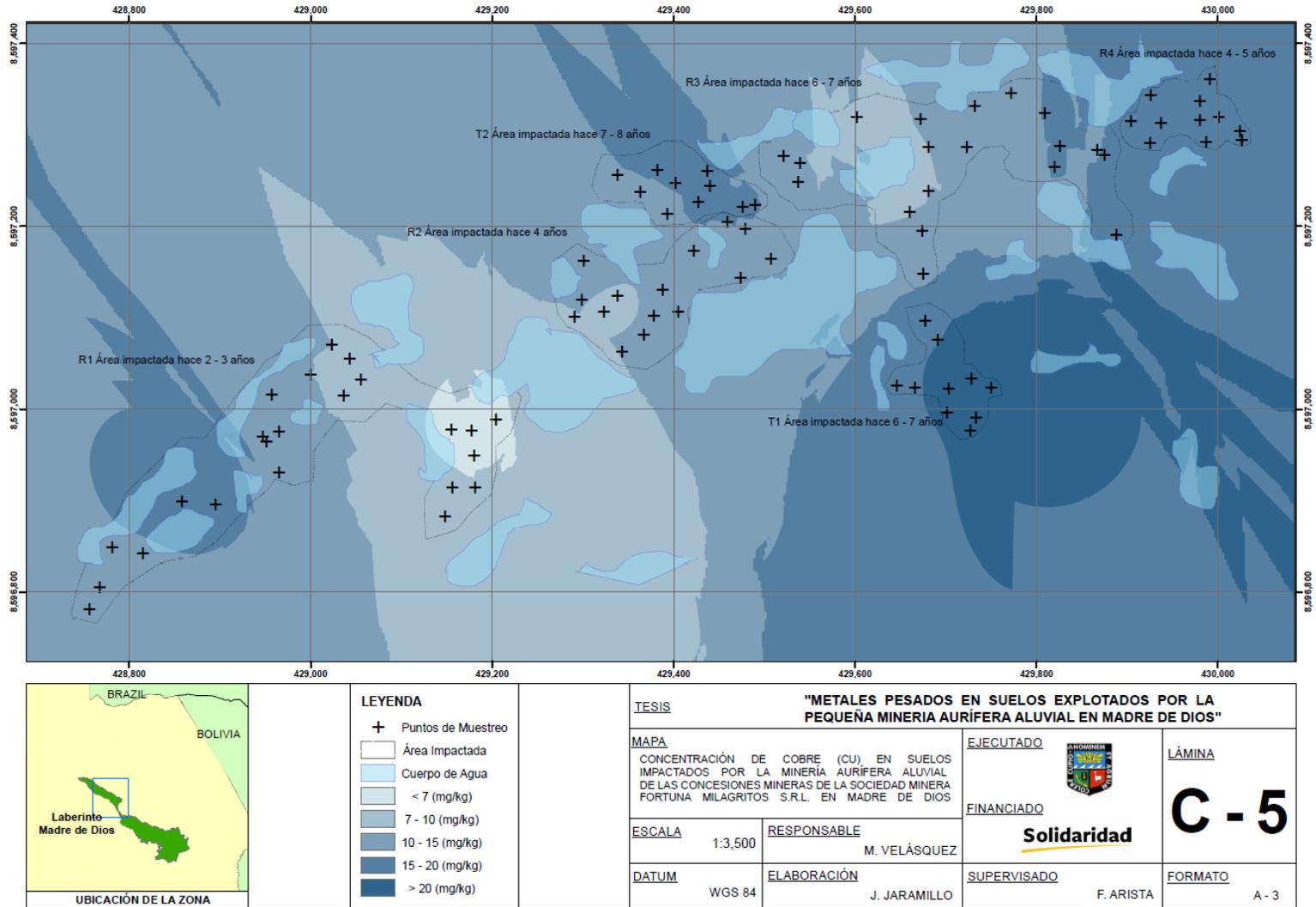
**Figura 46: Coeficiente de correlación de la concentración de Cu con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 47: Concentración de Cu y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 48: Concentración de cobre en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera**  
 FUENTE: Solidaridad (2016)

## **Cromo (Cr)**

El Cr es un elemento que en el suelo se presenta con estados de oxidación de +6 y +3. El Cr<sup>+6</sup> es la forma más tóxica y soluble mientras el Cr<sup>+3</sup> es la más estable e insoluble como hidróxido y óxidos. Forma complejos aniónicos y catiónicos (Cr(OH)<sup>+2</sup>, CrO<sub>4</sub><sup>-2</sup> y CrO<sub>3</sub><sup>-3</sup>) y también se la encuentra como anión en el suelo (Alloway, 1990). En condiciones progresivas de oxidación, el Cr como cromato (+6) es móvil y fácilmente sorbido a arcillas y óxidos hidratados; es móvil en condiciones ácidas y básicas. El Cr<sup>+3</sup> disminuye su solubilidad debajo del pH 4 y a pH 5.5 es completamente precipitado y estable. Con la materia orgánica, el Cr<sup>+6</sup> es reducido a Cr<sup>+3</sup>, siendo significativo en condiciones ácidas (Bartlett y kimble, 1976 citado por Alloway, 1990).

En el suelo ácido de las áreas impactadas (R1, R2, R3, R4, T1 y T2) se esperaría mayor cantidad de Cr<sup>+6</sup> en la solución y adsorbido a arcillas, mientras el Cr<sup>+3</sup> se presentaría en menor cantidad en solución y otra parte estaría ocluido con óxidos e hidróxidos. La concentración de Cr en el suelo de las áreas impactadas fue baja entre 6.86 mg kg<sup>-1</sup> a 10.98 mg kg<sup>-1</sup> a comparación del área no impactada con 21.14 mg kg<sup>-1</sup>. Ello se debería a que la textura arena del suelo de áreas impactadas facilita la lixiviación de Cr por la precipitación pluvial y parte del Cr en forma de óxidos e hidróxidos se haya lixiviado junto a los suelos de textura fina en los curso de río. La concentración de Cu, características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas se muestran en el cuadro 44.

Como se muestra en el cuadro 45, figura 49 y figura 50, la correlación univariada mediante el coeficiente de Pearson muestra que la variabilidad de la concentración de Cr es explicada por el pH y CIC en un 41% y 46% respectivamente, a comparación de la arcilla (%) y materia orgánica (%) del suelo. Además, la correlación multivariante mediante el coeficiente de dependencia efectiva muestra que el pH, CIC, arcilla (%) y materia orgánica (%) del suelo explican el 85% de la variabilidad de la concentración de Cr.

La concentración de Cr en los suelos de las áreas impactadas variaron de 6.86 mg kg<sup>-1</sup> a 10.78 mg kg<sup>-1</sup>, con una media igual 9.14 mg kg<sup>-1</sup> y mediana igual a 7.95 mg kg<sup>-1</sup>, siendo los valores permitidos por el ECA para suelo industrial y agrícola igual a 87.00

mg kg<sup>-1</sup> y 64.00 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente. Así se muestra en la figura 51 la concentración espacial de Cr.

**Cuadro 44: Concentración de Cr y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

Parámetros	Áreas impactadas						Área natural
	R1	R2	R3	R4	T1	T2	N
Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	6.86	6.96	8.20	8.90	10.98	10.78	21.14
Clase textural	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	Arc. limoso
arcilla (%)	3.44	3.44	3.44	3.44	1.44	21.44	39.23
pH	4.82	4.24	4.67	5.19	4.92	4.72	5.43
Materia orgánica (%)	0.24	0.03	0.17	0.48	0.18	0.5	2.40
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac	8.2	8.45	9.25	7.82	11.68	19.43	29.86

FUENTE: Elaboración propia, 2016

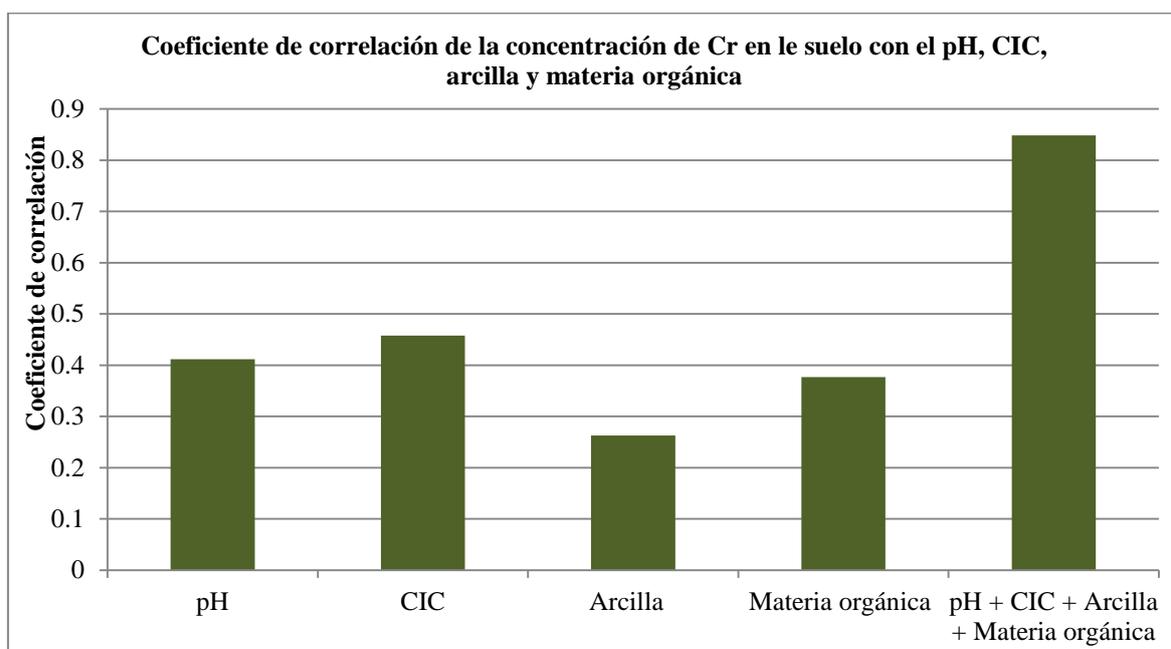
**Cuadro 45: Coeficiente de correlación de la concentración de Cr con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

Cr	pH	CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Arcilla (%)	Materia orgánica (%)	pH + CIC + Arcilla + Materia orgánica
Coeficiente de correlación	0.41 <sup>1</sup>	0.46 <sup>1</sup>	0.26 <sup>1</sup>	0.38 <sup>1</sup>	0.85 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Coeficiente de Pearson

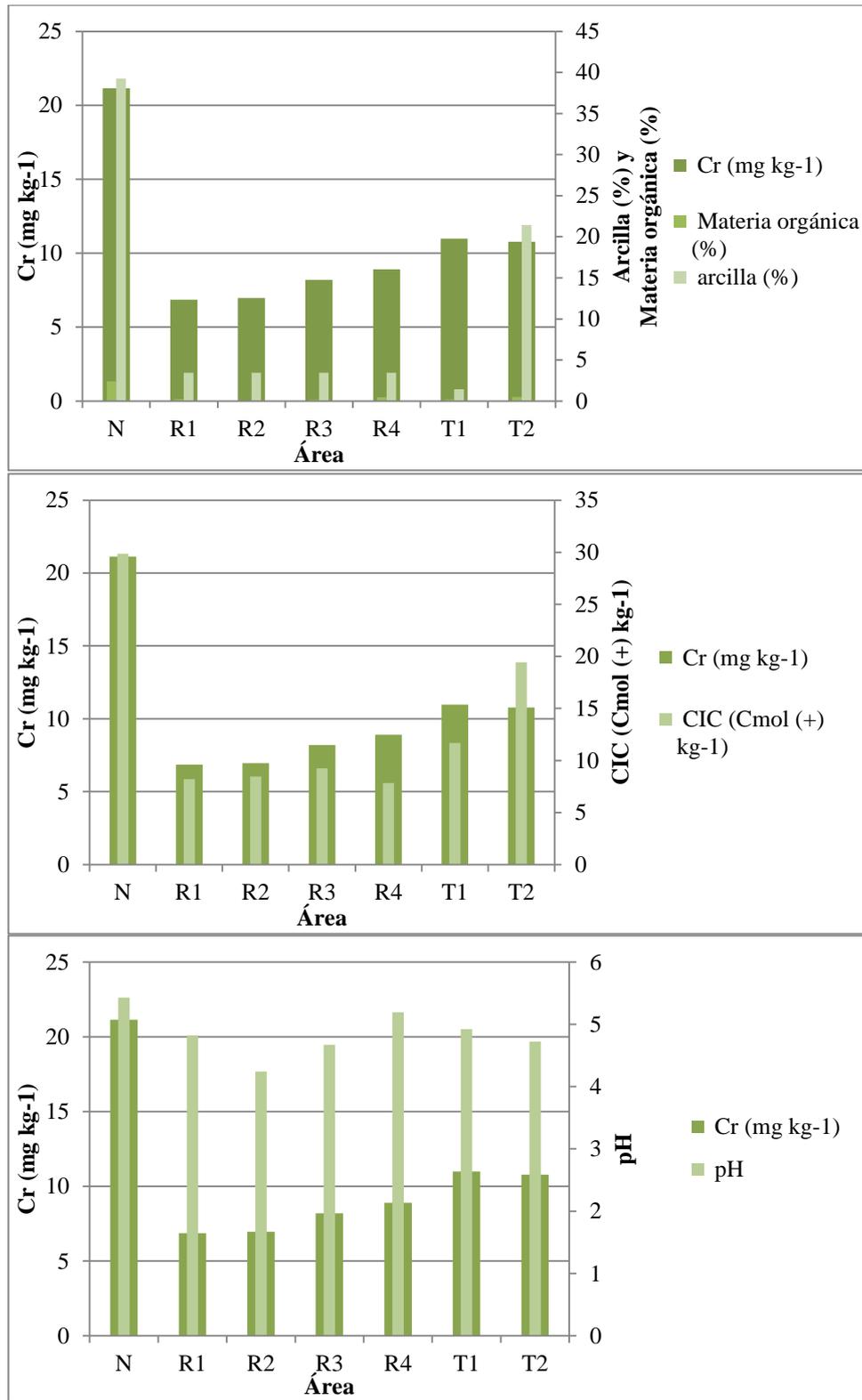
<sup>2</sup> Coeficiente de dependencia

FUENTE: Elaboración propia, 2016



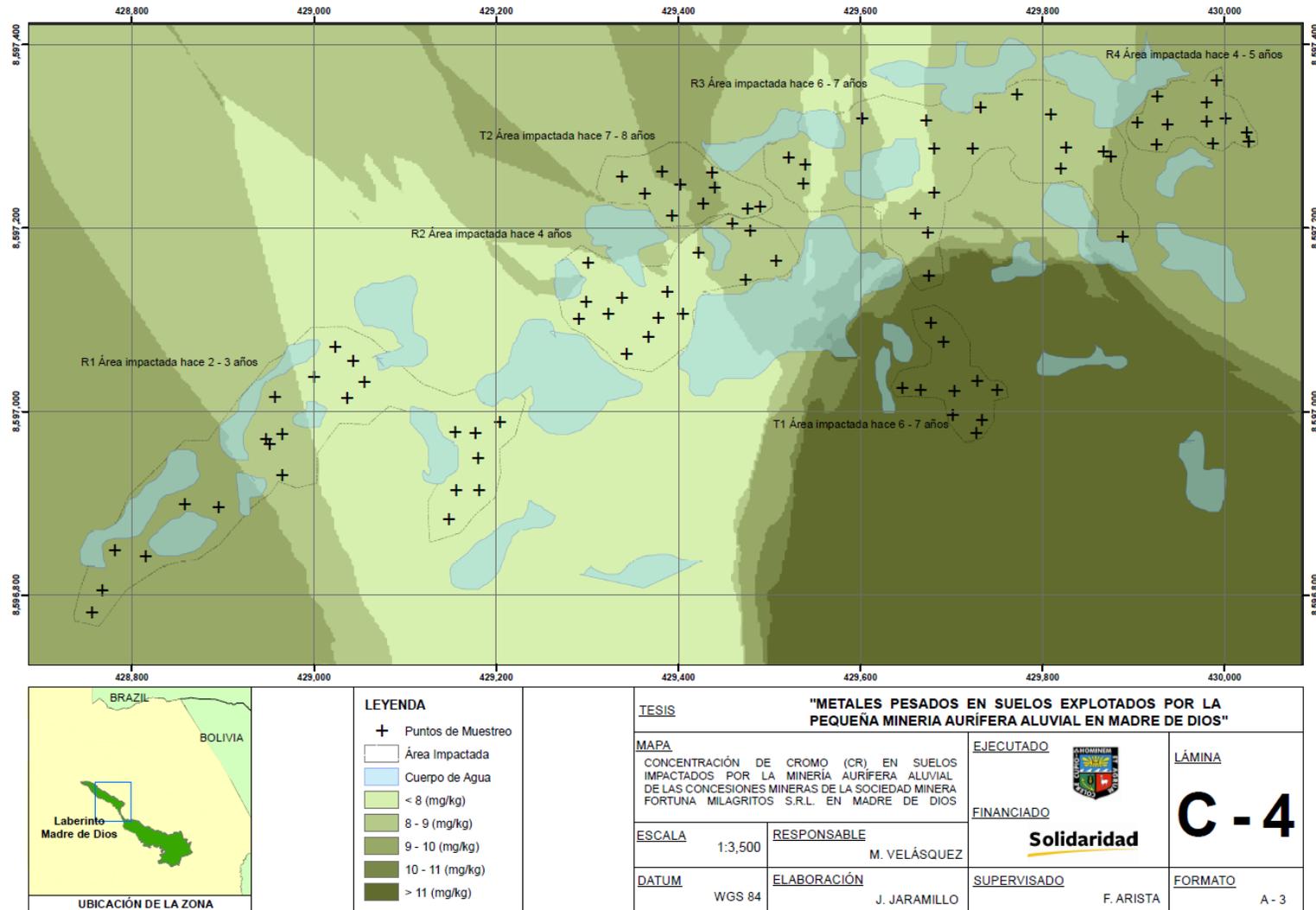
**Figura 49: Coeficiente de correlación de la concentración de Cr con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 50: Concentración de Cr y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 51: Concentración de cromo en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera**  
FUENTE: Solidaridad (2016)

## Níquel (Ni)

El Ni es un elemento que puede presentarse como  $\text{Ni}^{+2}$ , que es una forma relativamente estable en soluciones acuosas y es capaz de migrar largas distancia. En condición ácidas se presenta en formas de  $\text{Ni}^{+2}$ ,  $\text{NiSO}_4$ ,  $\text{NiHPO}_4$ ,  $\text{NiHCO}_3^+$  y complejos orgánicos, mientras en suelos alcalinos se presenta como  $\text{NiCO}_3$ ,  $\text{NiHCO}_3^+$ ,  $\text{Ni}^{+2}$  y  $\text{NiB(OH)}^{+4}$  (Alloway, 1990).

La distribución en el perfil depende del pH, materia orgánica, óxidos amorfos y la fracción arcilla (Kabata y Pendias, 2011). Cerca del 50% de Ni en suelos pueden asociarse a fracciones residuales ( $\text{HF}$  y  $\text{HClO}_4$ ); el 20%, fracciones de óxidos de hierro y manganeso; el resto, fracciones de carbonatos; un relativa proporción, formas intercambiables en fracciones orgánicas (Hickey y Kittrick, 1984 citado por Alloway, 1990). En secuencias selectivas de arcilla (caolinita y montmorillonita) y óxidos de hierro (goetita), el Ni sería el último ión enlazados o sorbidos en la secuencia de  $\text{Ni} < \text{Cd} < \text{Zn}$ . (Bruemmer 1987 citado por Alloway, 1990). Su movilidad aumenta cuando el pH y CIC disminuyen (Willaert y Verloo 1988 citado por Alloway 1990).

En el cuadro 46, la concentración de Ni de los suelos de áreas impactadas (R1, R2, R3, R4, T1 y T2) se presentó entre  $7.61 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $10.51 \text{ mg kg}^{-1}$  mientras en el área natural no impactada se encontraría en  $22.58 \text{ mg kg}^{-1}$ . La condición ácida del suelo permitiría aumentar la solubilidad y lixiviación del elemento por la intensa precipitación pluvial; además, la cantidad baja de Ni sorbida a superficies se causaría por al bajo porcentaje de arcilla entre 1.44% a 3.44% y menor preferencia de adsorción a arcilla (caolinita y montmorillonita) y óxidos de hierro (goetita). Así conforme aumenta la cantidad de arcilla y el pH habría mayor cantidad de Ni adsorbido en el suelo como se aprecia en el área degradada T2 con mayor cantidad de arcilla 21.44% con  $10.07 \text{ mg kg}^{-1}$ .

Como se muestra en el cuadro 47, figura 52 y figura 53, la correlación univariada mediante el coeficiente de Pearson muestra que la variabilidad de la concentración de Ni es explicada por el pH, CIC y arcilla (%) en un 53%, 43% y 45% respectivamente. Además, la correlación multivariante mediante el coeficiente de dependencia efectiva muestra que el pH, CIC, arcilla (%) y materia orgánica (%) del suelo explican el 89% de la variabilidad de la concentración de Ni.

La concentración de Ni en los suelos de las áreas impactadas variaron de 5.93 mg kg<sup>-1</sup> a 10.51 mg kg<sup>-1</sup>, con una media igual 8.99 mg kg<sup>-1</sup> y mediana igual a 7.93 mg kg<sup>-1</sup>, siendo los valores permitidos por el ECA para suelo industrial y agrícola igual a 50.00 mg kg<sup>-1</sup> y 50.00 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente. Así se muestra en la figura 54 la concentración espacial de Ni.

**Cuadro 46: Concentración de Ni y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

Parámetros	Áreas impactadas						Área natural
	R1	R2	R3	R4	T1	T2	N
Ni (mg kg <sup>-1</sup> )	7.61	5.93	7.93	9.11	10.51	10.07	22.58
Clase textural	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	Arc. limoso
arcilla (%)	3.44	3.44	3.44	3.44	1.44	21.44	39.23
pH	4.82	4.24	4.67	5.19	4.92	4.72	5.43
Materia orgánica (%)	0.24	0.03	0.17	0.48	0.18	0.5	2.40
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac	8.2	8.45	9.25	7.82	11.68	19.43	29.86

FUENTE: Elaboración propia, 2016

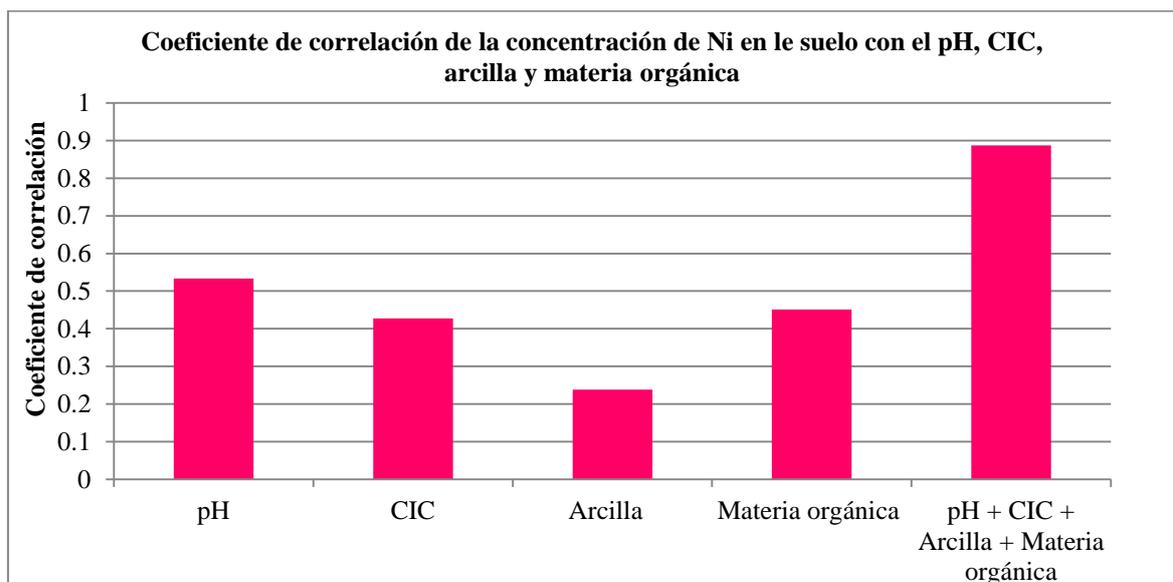
**Cuadro 47: Coeficiente de correlación de la concentración de Ni con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

Ni	pH	CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Arcilla (%)	Materia orgánica (%)	pH + CIC + Arcilla + Materia orgánica
<b>Coeficiente de correlación</b>	0.53 <sup>1</sup>	0.43 <sup>1</sup>	0.24 <sup>1</sup>	0.45 <sup>1</sup>	0.89 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Coeficiente de Pearson

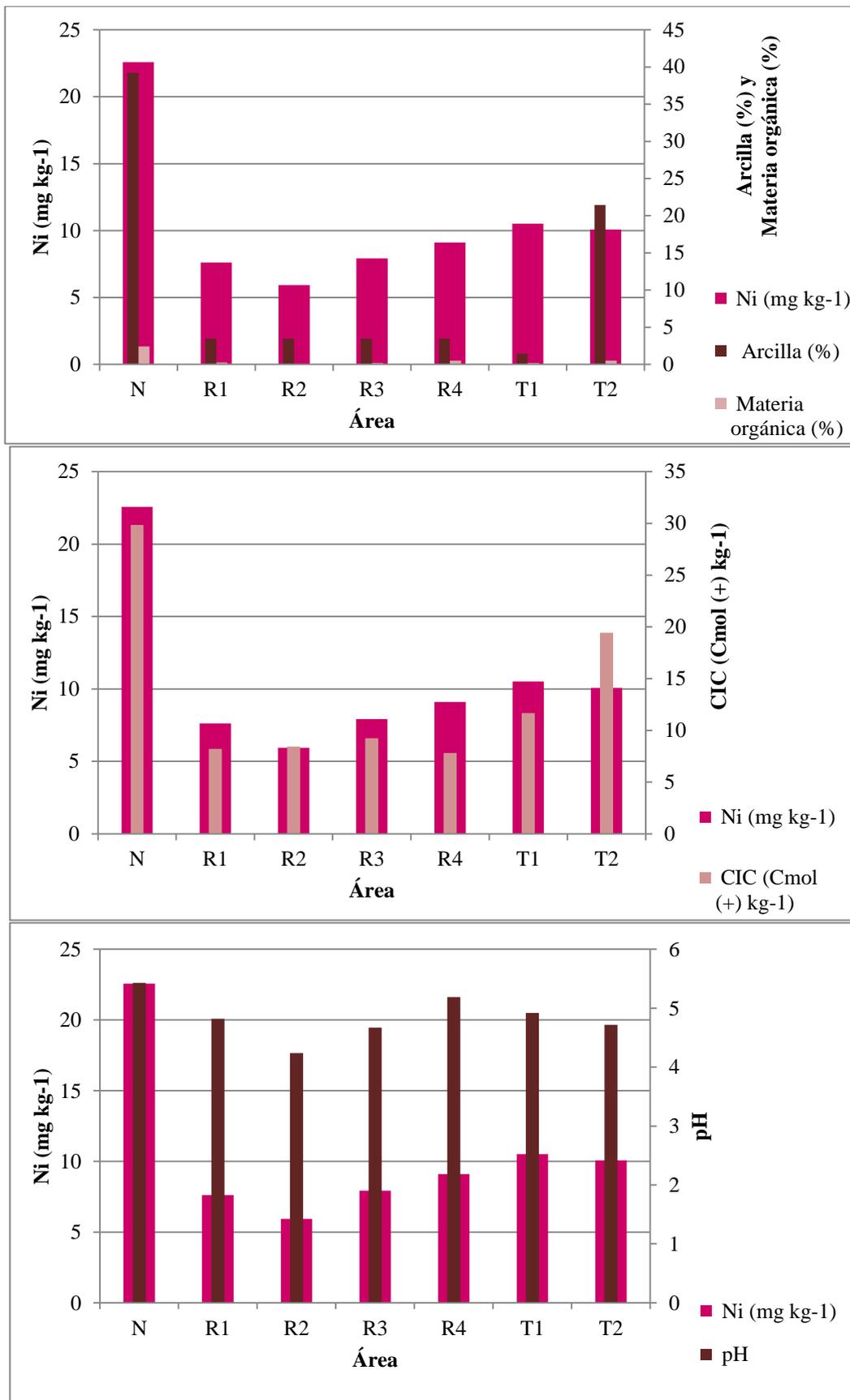
<sup>2</sup> Coeficiente de dependencia

FUENTE: Elaboración propia, 2016



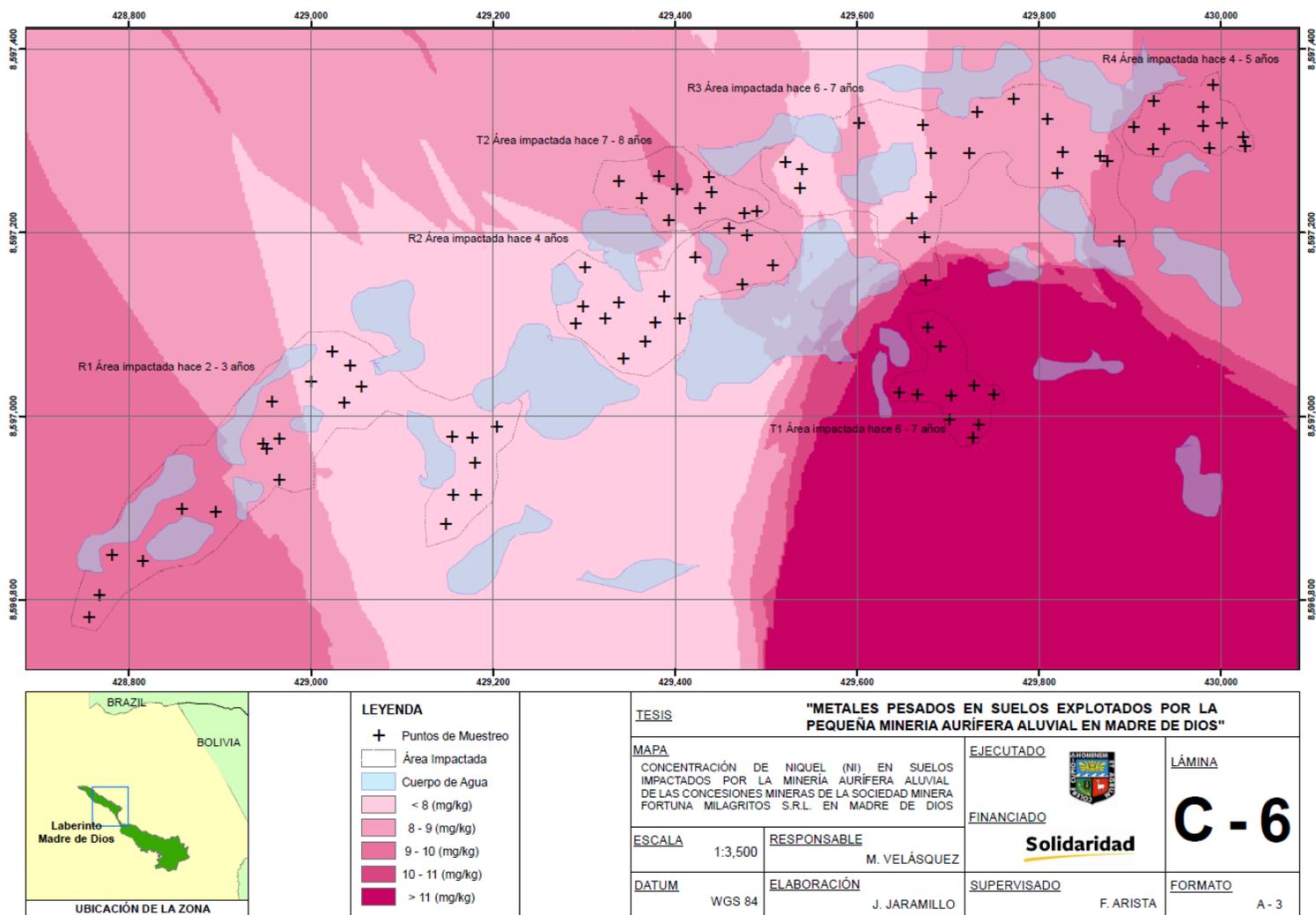
**Figura 52: Coeficiente de correlación de la concentración de Ni con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 53: Concentración de Ni y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 54: Concentración de níquel en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera**  
 FUENTE: Solidaridad (2016)

## Vanadio (V)

El vanadio es un elemento que en minerales presenta distintos estados de oxidación; en minerales, +3, +4 y +5; en solución, +5; complejos orgánicos, +4 y +5; complejo móvil, +4. El catión  $\text{VO}^{+2}$  es movilizado como complejo de ácido húmico, formas aniónicas de  $\text{V}^{+5}$  ( $\text{VO}_4^{-3}$  y  $\text{VO}_3^-$ ) se movilizan por el suelo en un amplio rango de pH y el  $\text{V}^{+3}$  forma hidróxidos insolubles a pH bajo (Goodman y Cheshire, 1975 y Bloomfield, 1981 citado por Kabata y Pendias, 2011).

El V puede moverse como complejo de vanadio en algunos suelos especialmente cuando están asociados óxidos de hierro (Alloway, 1990). Oxianiones de  $\text{V}^{+5}$  son solubles en un rango de pH amplio y son considerados fácilmente móviles en el suelo (Alloway, 1990). Las condiciones para una posible precipitación de V son presencia de agentes reductores (como ácido húmicos), concentración local de elementos de formación insolubles como vanadatos, uranilo ( $\text{UO}_2$ )<sup>+2</sup> e iones de aluminio o hierro.

En el cuadro 48 se muestra que la concentración de V en el suelo de áreas impactadas (R1, R2, R3, R4, T1 y T2) es baja entre  $11.13 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $16.62 \text{ mg kg}^{-1}$ , mientras en el área no impactada o naturales (N) sería  $33.78 \text{ mg kg}^{-1}$ . Ello se debería a que la textura arena del suelo impactado, permite lixiviar fácilmente el V del suelo en solución; habría limitaciones para la formación de precipitados debido pocos agentes reductores como ácidos húmicos (0.24 % a 0.5% de materia orgánica en áreas degradadas) y energía. En cambio, en suelos no impactados o natural (N) se encuentra  $33.78 \text{ mg kg}^{-1}$  de V debido a que presenta una clase textural arcillo limosa y 39.23% de arcilla que indicaría limitaciones para la lixiviación de V; además podría formarse complejos orgánicos o precipitados con aluminios y hierro.

Como se muestra en el cuadro 49, figura 55 y figura 56, la correlación univariada mediante el coeficiente de Pearson muestra que la variabilidad de la concentración de V es explicada por el pH, CIC y materia orgánica (%) del suelo en un 45%, 48% y 43% respectivamente. Además, la correlación multivariante mediante el coeficiente de dependencia efectiva muestra que el pH, CIC, arcilla (%) y del suelo explican el 87% de la variabilidad de la concentración de V.

La concentración de V en los suelos de las áreas impactadas variaron de 10.26 mg kg<sup>-1</sup> a 16.62 mg kg<sup>-1</sup>, con una media igual 14.09 mg kg<sup>-1</sup> y mediana igual a 12.03 mg kg<sup>-1</sup>, siendo los valores permitidos por el ECA para suelo industrial y agrícola igual a 130.00 mg kg<sup>-1</sup> y 130.00 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente. Así se muestra en la figura 57 la concentración espacial de V.

**Cuadro 48: Concentración de V y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

Parámetros	Áreas impactadas						Área natural
	R1	R2	R3	R4	T1	T2	N
V (mg kg <sup>-1</sup> )	11.13	10.26	13.14	13.41	15.83	16.62	33.78
Clase textural	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	Arc. limoso
arcilla (%)	3.44	3.44	3.44	3.44	1.44	21.44	39.23
pH	4.82	4.24	4.67	5.19	4.92	4.72	5.43
Materia orgánica (%)	0.24	0.03	0.17	0.48	0.18	0.5	2.40
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac	8.2	8.45	9.25	7.82	11.68	19.43	29.86

FUENTE: Elaboración propia, 2016

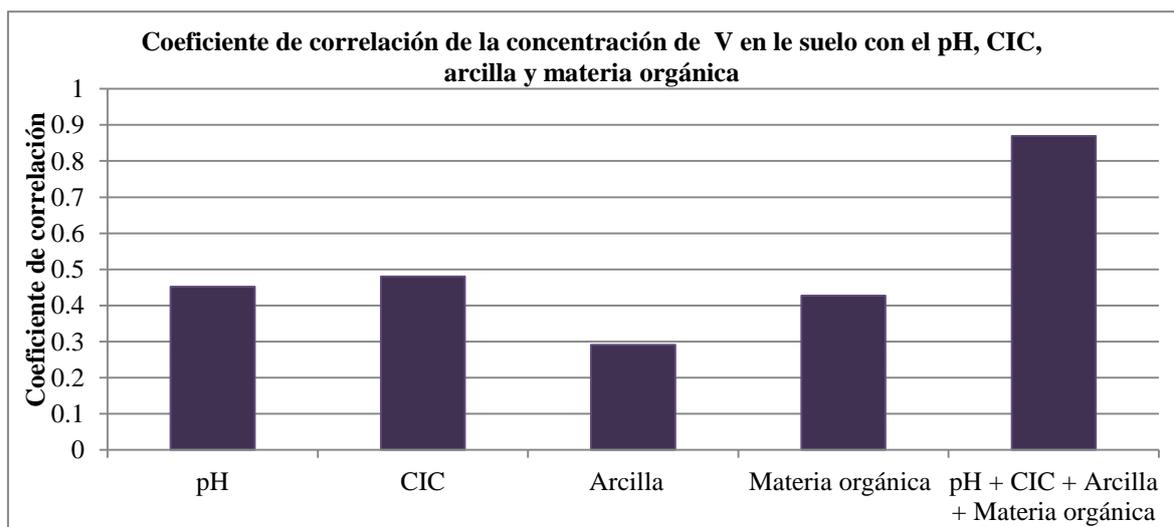
**Cuadro 49: Coeficiente de correlación de la concentración de V con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

V	pH	CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Arcilla (%)	Materia orgánica (%)	pH + CIC + Arcilla + Materia orgánica
Coeficiente de correlación	0.45 <sup>1</sup>	0.48 <sup>1</sup>	0.29 <sup>1</sup>	0.43 <sup>1</sup>	0.87 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Coeficiente de Pearson

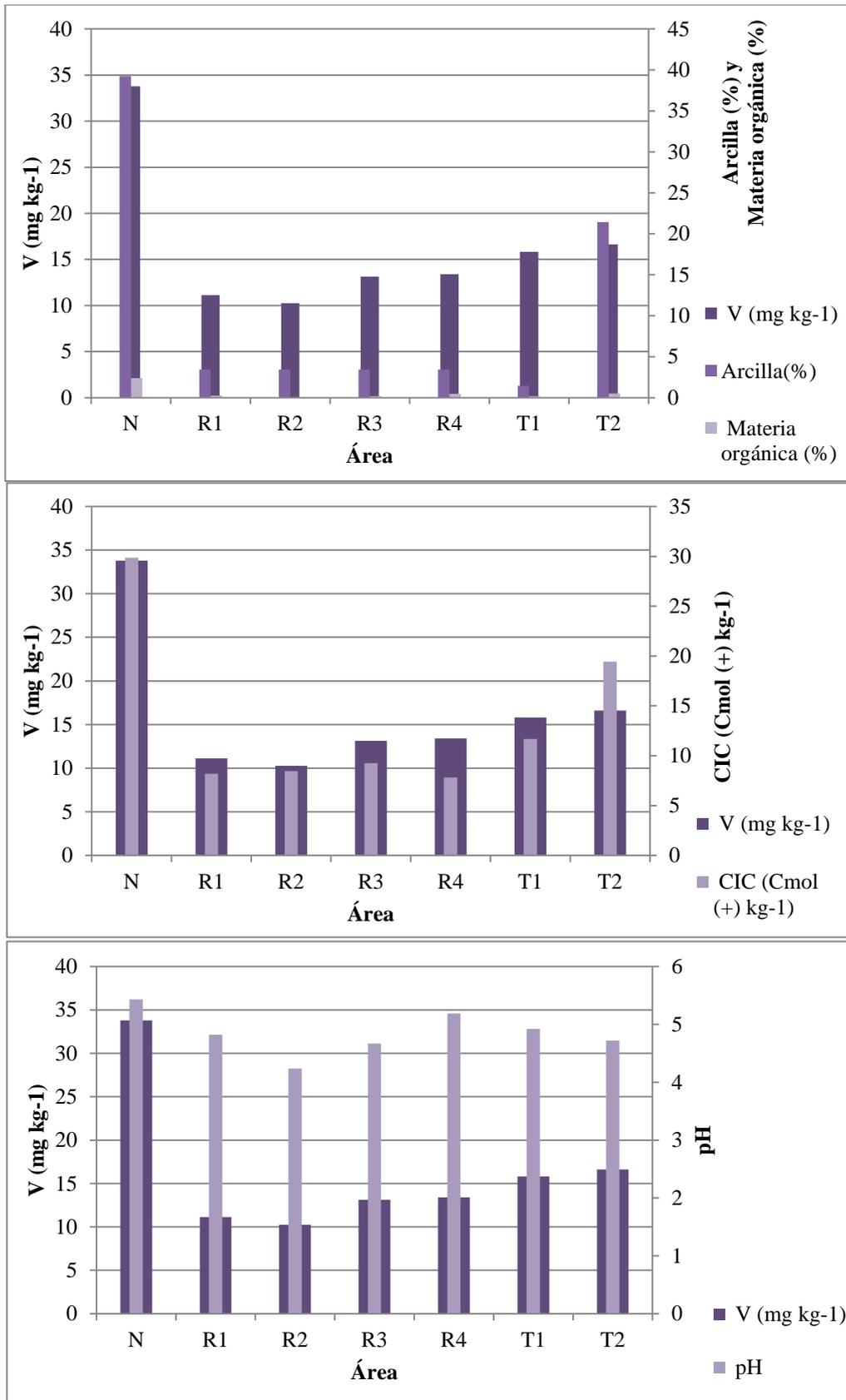
<sup>2</sup> Coeficiente de dependencia

FUENTE: Elaboración propia, 2016



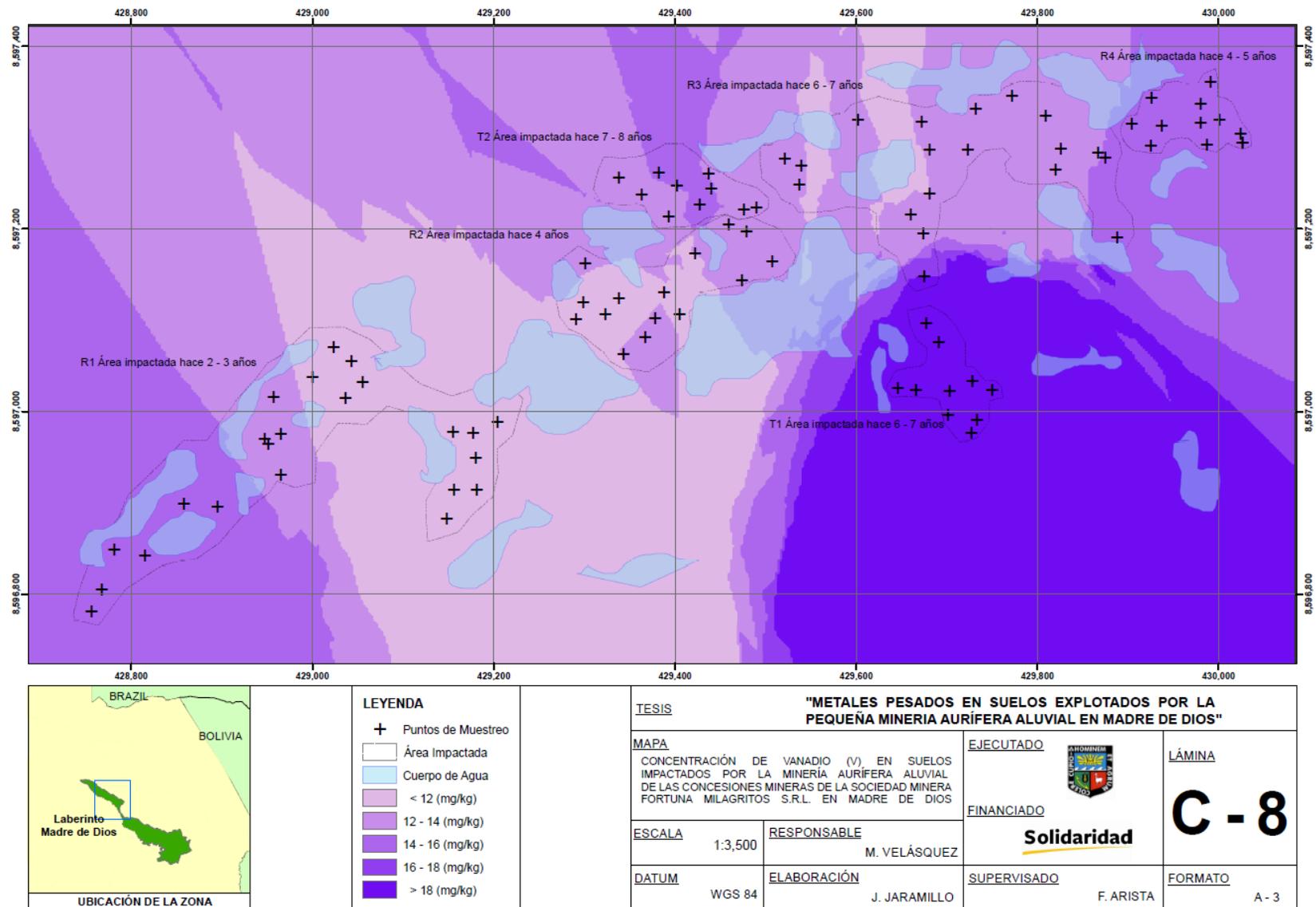
**Figura 55: Coeficiente de correlación de la concentración de V con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 56: Concentración de V y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 57: Concentración de vanadio en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera**  
 FUENTE: Solidaridad (2016)

## Zinc (Zn)

El Zn del suelo está asociado principalmente con óxidos de hierro y aluminio (14 % al 38%), mineral arcilla (24 % al 63%), y también a formas móviles (1 % al 20%) y complejos orgánicos (1.5 % a 2.3%) (Zirin *et al.* 1977 citado por Kabata y Pendias, 2011). En el suelo se le encuentra como  $Zn^{+2}$ . Es considerado relativamente más soluble que otros metales (Kabata y Pendias, 2011), y se incrementaría cuando disminuye el pH en el suelo (Lindsay 1972 citado por Alloway 1990). Al observar la solubilidad de diferentes especies de Zn a pH menores de 7.7 es predominante presentarse como  $Zn^{+2}$ , mientras a pH mayores la forma de Zn es  $ZnOH^+$  (Alloway 1990).

Hay gran afinidad y selectividad del Zn para óxidos de hierro, halloysita, alofano, imogolita y menor en montmorilonita. (Kabata y Pendias, 2011). La adsorción del  $Zn^{+2}$  en medio ácido se relacionaría al sitio de intercambio de cationes (Lindsay 1972 citado por Kabata y Pendias, 2011) y puede ser reducida a  $pH < 7$  por competencia de cationes. Con la materia orgánica, los ácidos fúlvico forman quelatos con el Zn en un amplio rango de pH incrementando la movilidad y solubilidad del Zn, particularmente a alto pH (Shuman 1975 citado por Alloway 1990).

El Zn en el suelo ácido de áreas impactadas (R1, R2, R3, R4, T1 y T2) sería soluble y tendría cierta afinidad con óxidos de hierro, halloysita, alofano, imogolita y arcillas; sin embargo, en condiciones ácidas la adsorción es baja. La concentración de Zn en las áreas impactadas es baja entre  $21.80 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $45.75 \text{ mg kg}^{-1}$  debido a que la textura arenosa indicaría la fácil lixiviación del Zn por la precipitación pluvial y el menor contenido de arcilla y competencia de por los sitios de cambio. En cambio el contenido de Zn en el suelo no impactado o natural (N) fue mayor con  $69.63 \text{ mg kg}^{-1}$  debido a la capacidad de limitar la lixiviación por presentar una textura franco limosa, un mayor pH (5.43) y contenido de arcilla (39.23%) y otro como óxidos de hierro que sorberían más Zn. La concentración de Zn, características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas se muestran en el cuadro 50.

Como se muestra en el cuadro 51, figura 58 y figura 59, la correlación univariada mediante el coeficiente de Pearson muestra que la variabilidad de la concentración de Zn es explicada por el pH, CIC y materia orgánica (%) del suelo en un 51%, 39% y 44% respectivamente. Además, la correlación multivariante mediante el coeficiente de

dependencia efectiva muestra que el pH, CIC, arcilla (%) y del suelo explican el 85% de la variabilidad de la concentración de Zn.

La concentración de Zn en los suelos de las áreas impactadas variaron de 21.80 mg kg<sup>-1</sup> a 45.75 mg kg<sup>-1</sup>, con una media igual 30.54 mg kg<sup>-1</sup> y mediana igual a 26.65 mg kg<sup>-1</sup>, siendo los valores permitidos por el ECA para suelo industrial y agrícola igual a 360.00 mg kg<sup>-1</sup> y 200.00 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente. Así se muestra en la figura 60 la concentración espacial de Zn.

**Cuadro 50: Concentración de Zn y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

Parámetros	Áreas impactadas						Área natural
	R1	R2	R3	R4	T1	T2	N
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	22.10	21.80	26.15	30.50	45.75	36.10	69.30
Clase textural	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	arenosa	Arc. limoso
arcilla (%)	3.44	3.44	3.44	3.44	1.44	21.44	39.23
pH	4.82	4.24	4.67	5.19	4.92	4.72	5.43
Materia orgánica (%)	0.24	0.03	0.17	0.48	0.18	0.5	2.40
CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> ) - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Ac	8.2	8.45	9.25	7.82	11.68	19.43	29.86

FUENTE: Elaboración propia, 2016

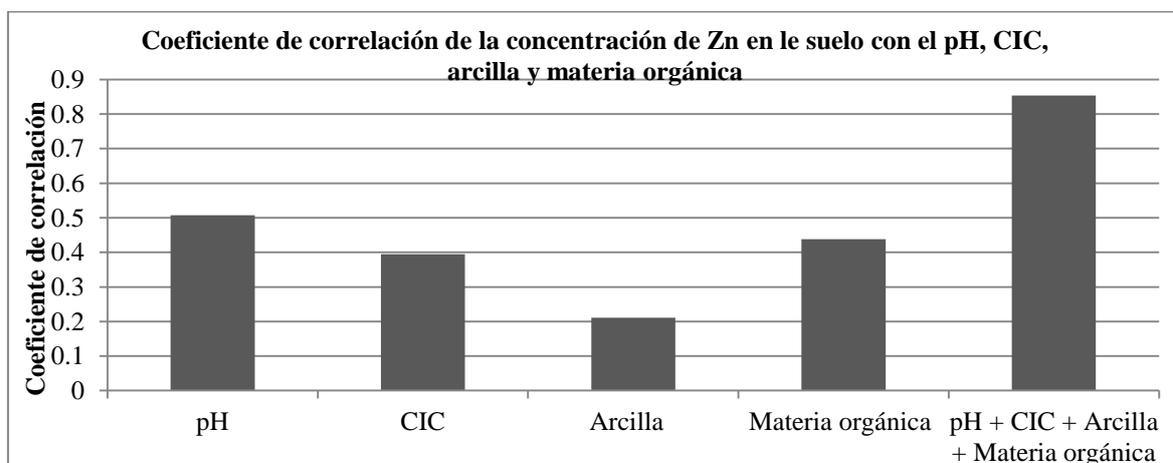
**Cuadro 51: Coeficiente de correlación de la concentración de Zn con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

Zn	pH	CIC (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Arcilla (%)	Materia orgánica (%)	pH + CIC + Arcilla + Materia orgánica
<b>Coeficiente de correlación</b>	0.51 <sup>1</sup>	0.39 <sup>1</sup>	0.21 <sup>1</sup>	0.44 <sup>1</sup>	0.85 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Coeficiente de Pearson

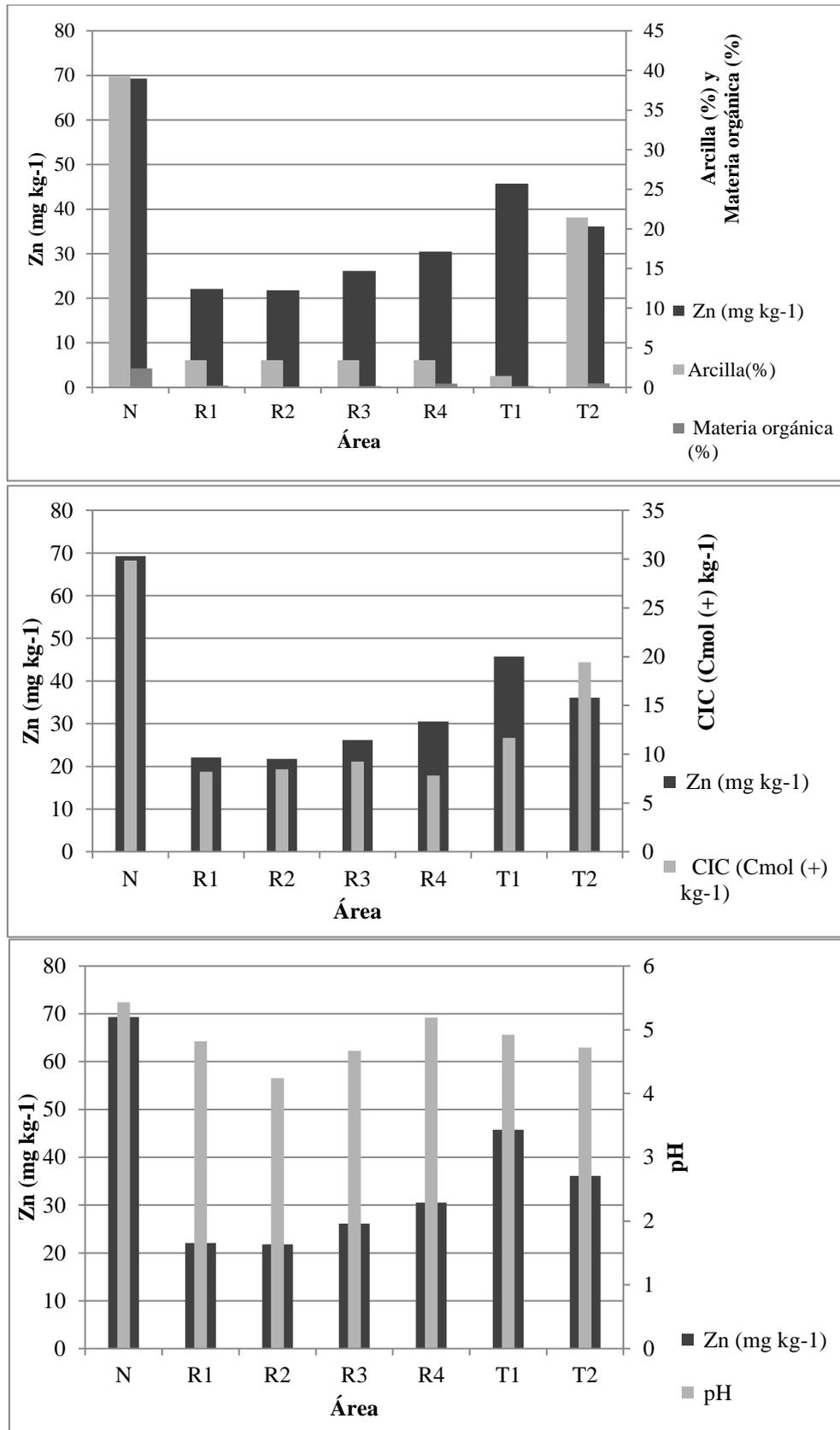
<sup>2</sup> Coeficiente de dependencia

FUENTE: Elaboración propia, 2016



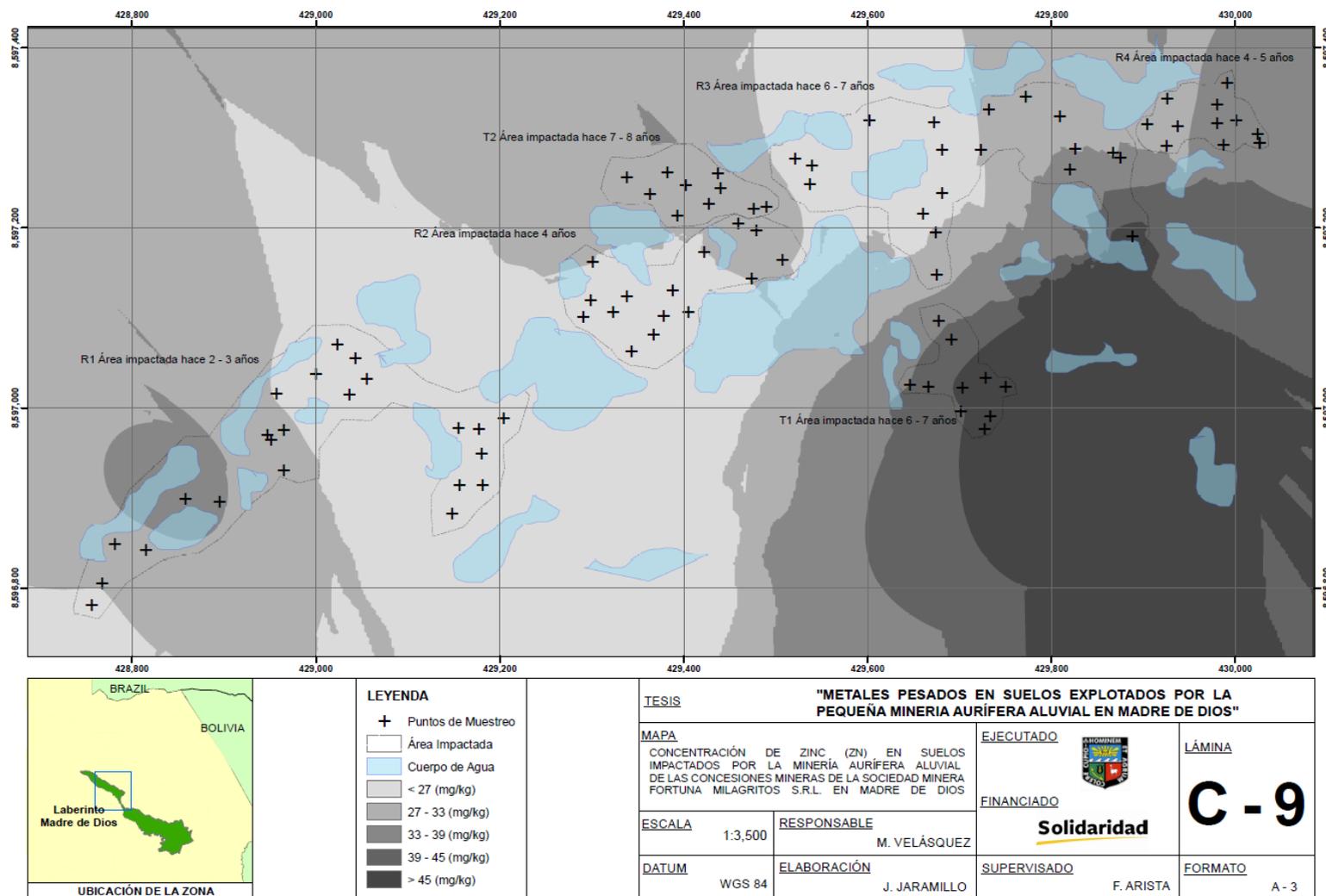
**Figura 58: Coeficiente de correlación de la concentración de Zn con el pH, CIC, arcilla y materia orgánica del suelo**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 59: Concentración de Zn y características y propiedades del suelo en áreas impactadas y no impactadas**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 60: Concentración de zinc en suelos impactados por la pequeña minería aluvial aurífera**  
FUENTE: Solidaridad (2016)

## Mercurio (Hg)

Tanto en las áreas no impactadas como las impactadas, el mercurio no fue detectado debido a la intensa volatilización y lixiviación como complejos orgánicos estables causada por la precipitación pluvial. Si bien la transformación de mercurio líquido en gas requiere energía, especies como  $\text{Hg}_{(g)}$  y  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$  (metil mercurio) pueden ser catalizados por procesos bioquímicos (Lindquist, 1984 citado por Alloway, 1990) gracias a bacterias y hongos que reducen el catión  $\text{Hg}^{+2}$  al estado elemental  $\text{Hg}^0$ .

La adsorción puede realizarse por intercambio de iones fuertemente enlazados a hidroxilo ligandos de sesquióxidos y sustancias húmicas (Alloway 1990); especialmente debajo de pH 5.5, donde predomina  $\text{HgCl}_2^0$ , en la solución, la materia orgánica será la principal responsable de la sorción (Andersson, 1979 citado por Alloway, 1990). Como el contenido de materia orgánica en las áreas impactadas es bajo, de entre 0.17% a 0.5%, la cantidad de complejos enlazados a ácidos húmicos sería bajo (Wallsachlager *et al.*, 1996 citado por Kabata y Pendias, 2011); así, el resto sería movilizado intensamente por el agua en épocas de lluvia.

En todas las áreas (impactadas y no impactadas) no fue detectado el mercurio. Entonces se puede postular que el mercurio empleado por la actividad minera después de su uso, con el paso del tiempo, pudo dispersarse por la lixiviación de lluvias y volatilización en el ambiente.

### 4.2.3 Análisis multivariado de la concentración de metales en suelos de áreas impactadas

- **Análisis de Componentes Principales (ACP)**

El ACP requirió cumplir el supuesto de no identidad y correlación de concentración de metales de los suelos impactados. Con un nivel de significancia de 0.05 no habría identidad de acuerdo a la prueba de esfericidad. A la vez, hubo altas correlaciones medidas por el coeficiente de Pearson con un nivel de significancia de 0.05. El coeficiente de dependencia fue 0.943, lo que explicaría la dependencia lineal del 94.3% de la variabilidad de las concentraciones de metales de los suelos impactados. Además, la variabilidad de la concentración de metales en suelos de áreas impactadas se explicaría por 2 componentes principales al 98%. Así se muestra en el cuadro 52 y 53.

**Cuadro 52: Correlaciones de Pearson de la concentración metales de suelos impactados por la minería aurífera aluvial**

Parámetro	As	Ba	Pb	V	Cu	Cr	Ni	Cd	Zn
As	1.00								
Ba	0.83*	1.00							
Pb	0.71*	0.84*	1.00						
V	0.84*	0.94*	0.85*	1.00					
Cu	0.84*	0.89*	0.81*	0.93*	1.00				
Cr	0.86*	0.93*	0.84*	0.99*	0.94*	1.00			
Ni	0.83*	0.94*	0.84*	0.99*	0.93*	0.98*	1.00		
Cd	0.89*	0.94*	0.85*	0.98*	0.94*	0.99*	0.98*	1.00	
Zn	0.80*	0.85*	0.75*	0.89*	0.90*	0.91*	0.90*	0.91*	1.00

Significancia de correlaciones a \*\* 0.05

FUENTE: Elaboración propia, 2016

**Cuadro 53: Análisis de componentes principales de la concentración metales de suelos impactados por la minería aurífera aluvial**

Detalle	Comp.1	Comp. 2
Desviación estándar	28.17	6.38
Proporción de variancia	0.93	0.04
Proporción acumulativa	0.93	0.98

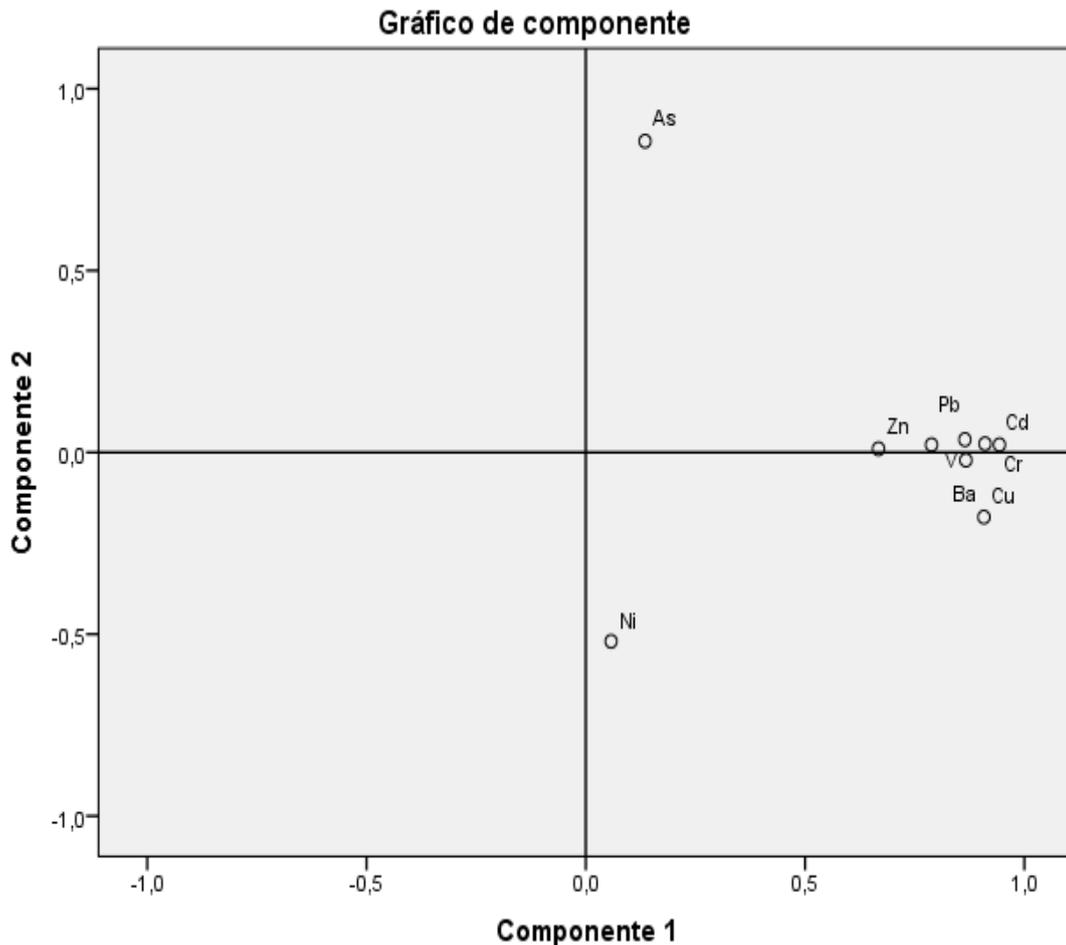
FUENTE: Elaboración propia, 2016

Mediante el método de extracción de componentes principales se muestra la alta asociación de Ba, Pb, V, Cu, Cr, Ni, Cd y Zn, mientras y As se presentaría en el segundo componente. A la vez, la representación del método de extracción de componentes principales muestra que también Zn, Pb, Cd, V, Cr, Ba y Cu se encuentran muy relacionados mientras que el As y Ni se incluyen en el segundo componente. Así se muestra en el cuadro 54 y figura 61.

**Cuadro 54: Método de extracción de componentes principales de la concentración metales de suelos impactados por la minería aurífera aluvial**

Parámetro	Componente 1	Componente 2
As	0.14	0.86
Ba	0.87	-0.02
Cd	0.94	0.02
Pb	0.79	0.02
Cu	0.90	0.17
Cr	0.91	0.02
Ni	0.58	-0.52
V	0.87	0.04
Zn	0.67	0.01

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 61: Método de extracción de componentes principales de la concentración metales de suelos impactados por la minería aurífera aluvial**  
 FUENTE: Elaboración propia, 2016

En los suelos de áreas impactadas el comportamiento de los metales fueron influenciados por condiciones de acidez, bajo contenido de materia orgánica y bajo contenido de arcilla determinando menor Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo. Estos metales se presentaron en formas iónicas o complejos fácilmente lixiviables por la precipitación con menor capacidad a ser adsorbidos por el suelo.

Como se aprecia en la figura 61 del método de extracción de componentes principales, se permitió diferenciar el comportamiento de los metales. El Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, V y Zn presentaron un mismo comportamiento, como el ya descrito; sin embargo, el As (Kabata y Pendias, 2011), y principalmente el Ni (Bruemmer 1987 citado por Alloway, 1990) fueron distintos ya que ambos se caracterizan por presentar alta solubilidad en condiciones ácidas y menor afinidad a ser sorbidos a arcillas, especialmente el Ni.

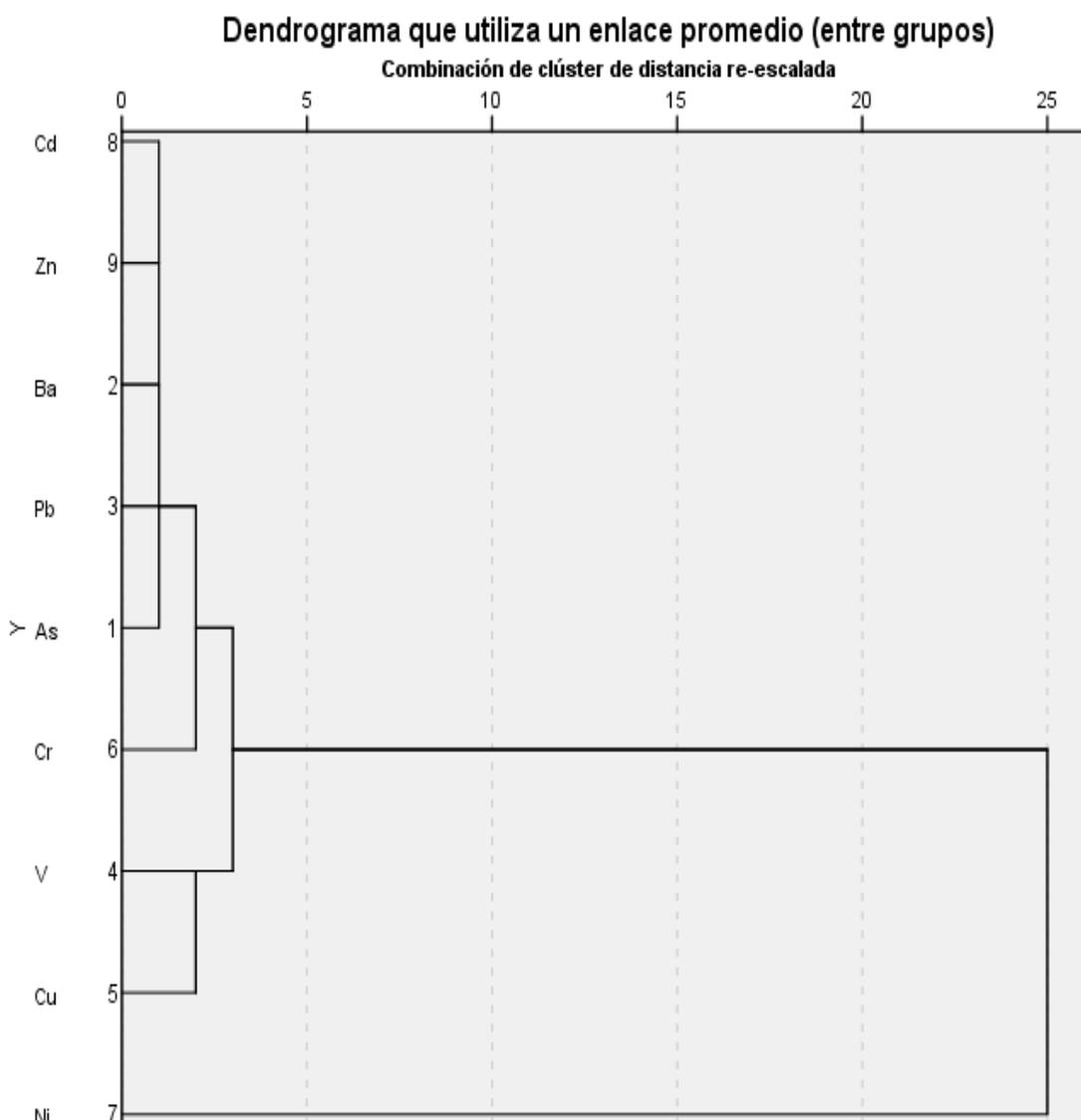
- **Análisis de Conglomerados**

El agrupamiento de los metales mediante el análisis de conglomerados muestra el siguiente dendograma que describe el grado de asociación de los metales en todos los suelos de áreas impactadas evaluadas. Así se muestra en el cuadro 55 y figura 63.

**Cuadro 55: Asociación de metales en suelos de áreas impactadas**

Grupo	Parámetro	Categoría de asociación
1	Cd, Zn, Ba, Pb y As	1°
2	Pb y Cr	2°
3	V y Cu	2°
4	Pb, Cr, y V	3°
5	Pb, Cr, V y Ni	4

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 62: Dendograma de metales basados en el coeficientes de Pearson**

FUENTE: Elaboración propia, 2016

Así, de acuerdo al análisis de conglomerados hubo un estrecho agrupamiento de todos los metales de las áreas impactadas (R1, R2, R3, R4, T1 y R2), excepto por el Ni. El estrecho agrupamiento se debería a que el suelo, por ser de origen aluvial, como lo demuestra la geología (Palacios *et al.*, 1996), serían producto de la mezcla y acumulación de distintos suelos y partículas gruesas, haciendo que los metales tiendan a acumularse y presentar una semejante distribución (como se apreció en las figuras de la distribución espacial de los metales); sin embargo el Ni (Bruemmer 1987 citado por Alloway, 1990) es el metal que presentaría menor afinidad de sorción a arcillas, explicando su distanciamiento del grupo de los otros metales estudiados.

En otras investigaciones, se muestra la importancia del empleo del análisis multivariado de ACP y AC. Wei *et al.* (2009) mostraron la estrecha distribución de metales con los contaminantes de origen por las mineras en Shuikoushan (China). La concentración de As varió de 2.4 mg kg<sup>-1</sup> a 422 mg kg<sup>-1</sup>; Cd, 1.09 mg kg<sup>-1</sup> a 219.90 mg kg<sup>-1</sup>; Cr, 11.43 mg kg<sup>-1</sup> a 103.90 mg kg<sup>-1</sup>; Cu, 11.46 mg kg<sup>-1</sup> a 841.00 mg kg<sup>-1</sup>; Pb, 71.60 mg kg<sup>-1</sup> a 4,501.00 mg kg<sup>-1</sup>; Zn, 87.35 mg kg<sup>-1</sup> a 5,528.00 mg kg<sup>-1</sup>. El ACP mostró dos grupos de elementos, uno con As, Cd, Pb, Zn y otro con Cr y Cu, ocupando el 93% que explicaría la varianza. La matriz de componentes indicó que As y Pb aparecieron en el primer componente, Cd y Zn fueron encontradas en la segunda, y Cu y Cr aparecieron en los componentes tercero y cuarto, respectivamente. El patrón de dispersión fue muy similar (Semivariogramas) para As y Pb, que coinciden con los espacios fundición. El Cd se extendió por partículas en el aire y agua residual de fundiciones.

Parveen *et al.* (2012) realizó un estudio en Faisalabad (Pakistán), en suelos de origen calcáreo de depósitos aluviales. La ciudad es propensa a la contaminación por metales de origen industrial. La concentración de metales en el suelo para Zn fue 25.02 mg kg<sup>-1</sup> a 111.15 mg kg<sup>-1</sup>; Cu, 13.83 mg kg<sup>-1</sup> a 53.23 mg kg<sup>-1</sup>; Ni, 9.30 mg kg<sup>-1</sup> a 26.00 mg kg<sup>-1</sup>; Pb, 0.01 mg kg<sup>-1</sup> a 18.93 mg kg<sup>-1</sup>. En base al AC, los metales Zn y Cu son muy semejantes al 95.78, el Zn y Cu junto al Pb fueron semejantes al 92.19 y finalmente al 72.8 el Ni era similar al resto de metales. Aquí también se observó que el Ni es menos similar.

Al igual, Rodríguez *et al.* 2008 mostró la alta correlación de ocho metales críticos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn) en capas arables usando 1,588 muestras georeferenciadas

de la base de datos del Foro de Servicios Geológicos Europeos de 26 países europeos. Esta base de datos es adecuada para los análisis geoestadísticos: los predictores explican a partir de 21% (Cr) a 35% (Pb) de la variabilidad. El ACP mostró que varios metales están correlacionados como Cr y Ni ( $r = 0.85$ ), Cu y Ni ( $r = 0.75$ ), Pb y Zn ( $r = 0.74$ ), Cd y Zn ( $r = 0.69$ ) y Pb y Hg ( $r = 0.69$ ).

Facchinelli *et al.* 2000 en un estudio evaluó la variabilidad de metales en suelos contaminados de Piemonte (Italia). La concentración de metales en el suelo vario, en Co fue de  $10.0 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $34.65 \text{ mg kg}^{-1}$  de Co; Cr,  $9.30 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $192.50 \text{ mg kg}^{-1}$ ; Cu,  $12.70 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $354.00 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cu; Ni,  $13.30 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $246.4 \text{ mg kg}^{-1}$  de Ni ; Pb,  $4.20 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $46.20 \text{ mg kg}^{-1}$ ; Zn,  $4.00 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $135.50 \text{ mg kg}^{-1}$ . En base al AC, el Cr y el Ni fueron muy correlacionados que forman un grupo con el Co, mientras en un segundo grupo se muestra el Cu y Zn, asociado al Pb. Este resultado confirmaría las características de los metales en tres componentes principales. Aquí, el origen de Cr, Co y Ni estaría relacionado al material parental como rocas ultramáficas que contienen estos metales en altas concentraciones y es común en Piemonte. Por el lado de Cu y Zn tendría un origen parental y particularmente el Cu se derivaría de pesticidas de campos de cultivo. Este metal al igual con el Pb tendrían un origen antropogénico como refinerías, estiércol y otros.

## V. CONCLUSIONES

- De acuerdo con los Estándares de Calidad Ambiental para suelos (ECA) de Perú y Canadá no hubo contaminación por los metales As, Ba, Pb, Cu, Cr, Ni, V y Zn en el área de potencial interés que fue impactada por la minería aurífera aluvial. La concentración promedio total fue 1.90, 29.80, 4.60, 7.93, 7.95, 12.67, 12.03 y 26.65 mg kg<sup>-1</sup> para As, Ba, Pb, Cu, Cr, Ni, V y Zn mg kg<sup>-1</sup> respectivamente. La concentración estuvo por debajo del límite establecido para suelo industrial que es 140, 2000, 1200, 91, 87, 50, 130 y 360 mg kg<sup>-1</sup> para As, Ba, Pb, Cu, Cr, Ni, V y Zn respectivamente; también la concentración estuvo por debajo del límite establecido para suelo agrícola que es 50, 750, 70, 63, 64, 50, 130 y 200 mg kg<sup>-1</sup> para As, Ba, Pb, Cu, Cr, Ni, V y Zn respectivamente.
- La concentración promedio de Cd en suelos de áreas impactadas fue 2.22 mg kg<sup>-1</sup>. De acuerdo con el ECA de Perú y Canadá no hubo contaminación para el suelo tipo industrial que tiene como límite 22 mg kg<sup>-1</sup>, pero sí para el suelo agrícola que es 1.40 mg kg<sup>-1</sup>. El origen del Cd sería propio del área geográfica y, descriptivamente, no correspondería a la actividad minera aurífera aluvial.
- La concentración de Hg en todas las áreas evaluadas, incluso en el área no impactada por la minería aurífera aluvial, no fue detectada. El Hg no fue detectado debido a la intensa volatilización y lixiviación por la precipitación pluvial. No se excedió el límite establecido por los ECA para suelo de Perú y Canadá para suelo industrial que es 24 mg kg<sup>-1</sup> y suelo agrícola que es 6.6 mg kg<sup>-1</sup>.
- Descriptivamente la distribución espacial de As, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Ni, V y Zn, a 30 cm de profundidad, en suelos de áreas impactadas, se mostró un comportamiento muy parecido debido a que son suelos aluviales y producto de la acumulación de materiales. Sin embargo, el As y Ni tuvieron un comportamiento diferente por sus

características como alta solubilidad y menor afinidad a ser sorbido por arcillas. La distribución espacial de los metales fue influenciada por las características y propiedades del suelo de áreas impactadas como materia orgánica (0.03 % a 0.24%), contenido de arcilla (1.44% a 21.44%), capacidad de Intercambio catiónico (7.82 Cmol (+) kg<sup>-1</sup> a 19.43 Cmol (+) kg<sup>-1</sup>) y sobre todo el pH (4.24 a 5.19).

- De acuerdo al presente estudio no habría contaminación por metales como As, Ba, Pb, Cu, Cr, Ni, V, Cd, Hg y Zn, salvo por el Cd ya explicado anteriormente, en el área potencial determinada a una profundidad de 30 cm de acuerdo al ECA de Perú y Canadá. Ello es el resultado de un monitoreo en una estación posterior a la precipitación pluvial.
- La determinación que no habría contaminación por metales causada por la minería aurífera aluvial requeriría realizar estudios posteriores en otras áreas, a diferentes profundidades del suelo, en relación a los cursos de agua y en diferentes estaciones.
- De acuerdo al estudio del perfil del suelo en áreas impactadas por la minería aurífera aluvial, los principales impactos son la pérdida de superficie y modificación del perfil de suelo alterándose significativamente sus características físicas y químicas. Los suelos de las áreas impactadas se caracterizan por su menor fertilidad, cantidad de nutrientes, capacidad de retener humedad y consistencia. La cantidad de materia orgánica es 0.03% a 2.08%; contenido de potasio, 18 mg kg<sup>-1</sup> a 86 mg kg<sup>-1</sup>; contenido de fósforo, 171 mg kg<sup>-1</sup> a 55 mg kg<sup>-1</sup>; Capacidad de intercambio catiónico, 23.84 Cmol(+) kg<sup>-1</sup> a 7.82 Cmol(+) kg<sup>-1</sup>; clase textural, arena; pedregosidad, extrema; permeabilidad, muy rápida; drenaje, excesivo. Por otro lado, los suelos de las áreas no impactadas o naturales (N) son las de mayor fertilidad, cantidad de nutrientes, capacidad de retener humedad y consistencia. En el perfil de suelo, la cantidad de materia orgánica es 5.18% a 4.65%; contenido de potasio, 141 mg kg<sup>-1</sup> a 45 mg kg<sup>-1</sup>; contenido de fósforo, 211 mg kg<sup>-1</sup> a 43 mg kg<sup>-1</sup>; Capacidad de intercambio catiónico, 44.80 Cmol(+) kg<sup>-1</sup> a 14.40 Cmol(+) kg<sup>-1</sup>; clase textural, arcillo limosa; permeabilidad, moderadamente lenta; drenaje, moderado a imperfecto; ligeramente pedregoso.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Realizar evaluaciones adicionales de la calidad de los suelos, sedimentos y agua a orillas del Rìo Madre de Dios cercanas al àrea estudiada para así compararlos con los resultados mostrados en esta investigación y con los Estàndares de Calidad Ambiental peruano y canadiense.
- Realizar un estudio geològico sobre el origen de los depòsitos aluviales en el àrea estudiada para explicar mejor la presencia de Cd en estos suelos.
- Estudiar a detalle la fertilidad de los suelos impactados por la minería aurífera aluvial para así recomendar medidas adecuadas para la rehabilitación de estos suelos.

## VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- **Alloway J. 1990. Heavy Metal in Soil. Wiley, New York.**
- **Alvarez, J; Solano, V; Brack, a; Ipenza, C. 2011.** Minería Aurífera en Madre de Dios y Contaminación con Mercurio. Lima. Perú. MINAM.
- **Autoridad Nacional del Agua (ANA, Pe). 2010.** Estudio Diagnóstico hidrológico de la cuenca de Madre de Dios. MINAG. Perú.
- **Baker,D y Chesnin,L 1975.** Adv in Agron. 27(1975),305-374
- **Beckett, P.H. 1988.**The use of extractants in studies on the trace metals in soils, sewages ludges and sludge-treatedsoils. Adv. SoftSci., 9: 144.
- **Bernard, N y Richard, W. 1999** Ciencias ambientales. Ecología y desarrollo sostenible. Pearson Educación. México
- **Berrow, M y Reaves, G. 1984.** In Proc. Int. Symp. On environmental contamination, London (1984), 333
- **Calzada, J. 1970.** Métodos Estadísticos para la Investigación. UNALM. Perú.
- **Canadian Council of Ministers of the Environment. (CCME, Ca) 2007.** Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Summary tables. Excerpt from Publication No. 1299; ISBN 1-896997-34-1.
- **Canadian Council of Ministers of the Environment. (CCME, Ca) 2007.** Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Summary of A Protocol for the Derivation of Environmental and Human Health Soil Quality Guidelines. Excerpt from Publication No. 1299; ISBN 1-896997-34-1
- **Congreso de la República 2009.** Ley N° 28611. Ley General del Ambiente. Perú.
- **Consortio Madre de Dios. 2014.** Recuperación de áreas degradadas por minería en Madre de Dios. Estudio sobre el nivel de degradación de los suelos. Research brief N°1 Madre de Dios.
- **Davies, B. 1977.** Heavy metal pollution in British agricultural soils with special reference to the role of lead and cooper mining, in Proc. Int. Semin. On Soil Environment and Fertility Management in Intensive Agriculture, Tokyo, 1977,394.
- **De la Fuente S. 2011.** Geoestadística lineal. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid. España.

- **Environmental Protection Agency (EPA, USA). 1994.** METHOD 200.7 Determination of metals and trace elements in water and wastes. USA.
- **Facchinelli, A; Sacchie, L; Mallen, L. 2001.** Multivariat estatistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environmental Pollution* 114 (2001) 313±324.
- **Forsberg, B; Jardim, W; Zeidemann, V; Fadini, P; Carneiro, A; Padovani, C; Silva-Forsberg, M; Roulet, M; Lucotte, M; Nakazono, E; Martins, A; Chagas, E. 1999** The biogeochemistry of mercury in the Negro River basin \_Brazilian Amazon.. *Proceedings of the 5th International Conference on Mercury as a Global Pollutant Rio de Janeiro 1999*:153.
- **Gallardo, A. 2006.** Geoestadística. *Revista Ecosistemas*. España.
- **Gómez, C. 2013.** Evaluación de escenarios alternativos en sistemas social ecológico afectados por la minería aluvial en Madre de Dios. Tesis Mg. Sc Ecología Aplicada. UNALM. Perú
- **Gonzales, K; Casas, J; Zarate, H; Rivera, D y Rodriguez, I. 2012** Teledetección Satelital óptica en el seguimiento de las actividades mineras en Madre de Dios. INGEMMET.
- **Hernandez, O. 1998.** Temas de análisis multivariado. Editorial La universidad de Costa Rica. Costa Rica.
- **Huaylani, M; Vásquez, T; Rodrigués, L y Roman, F. 2015** Metales tóxicos en tejidos de cuatro especies forestales desarrolladas en áreas disturbadas por minería aurífera. 2° II Foro mercurio y salud pública en Madre de Dios 2015.
- **Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, Pe). 2008.** Censos Nacionales 2007:XI Población y VI Vivienda. Lima. Perú
- **Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, Pe). 2015.** Sistema de información económica. Consultado 20 de En 2016. Disponible en <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/economia/>
- **Kabata, A y Pendias, H. 2011.** **Trace Elements in Soils and Plants. London 4<sup>th</sup>** ed. London, New York.
- **Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E. 1997.** Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61, 4– 10.

- **Kramer, J y Allen, H. 1988.** Metal Speciation: Theory, Analysis and Application. Lewis, Chelsea, Mich., 320 pp.
- **Lechler, P; Miller, J; Lacerda, L; Vinson, D; Bonzongo, C; Lyons, D; Warwick, J. 2000.** Elevated mercury concentrations in soils, sediments, water, and fish of the Madeira River basin, Brazilian Amazon: a function of natural enrichments?. The Science of the Total Environment 260 (2000) 87-96.
- **Li, X; Coles, B; Ramsey, M; Thornton, IA. 1994.** Sequential extraction of soils for multi element analysis. Chemical Geology 124 (1995) 109-123.
- Lindsay W L 1979 Chemical equilibria in soils. John Wiley & Sons, New York, USA, 449 p.
- **Ministerio de Agricultura (MINAG, Pe). 2010.** Reglamento para la ejecución de levantamiento de suelos (D.S. N° 013-2010-AG). MINAG. Perú.
- **Ministerio del Ambiente (MINAM, Pe). 2012.** Disposiciones complementarias para el instrumento de gestión ambiental correctivo (IGAC), para la formalización de actividades de pequeña minería y minería artesanal en curso. Decreto Supremo N° 004-2012-MINAM. Perú.
- **Ministerio del Ambiente (MINAM, Pe). 2013.** Propuesta técnica. Pasos previos a la recuperación de áreas degradadas. GIZ. Perú.
- **Ministerio del Ambiente (MINAM, Pe). 2013** Estándares de Calidad Ambiental para Suelos D.S.N°002.2013 MINAM. Perú.
- **Ministerio del Ambiente (MINAM, Pe). 2014.** Disposiciones complementarias para la aplicación del estándar de calidad para suelos D.S. N° 002-2014-MINAM. Perú.
- **Ministerio del Ambiente (MINAM, Pe). 2014.** Guía para el muestreo de suelos R.M. N° 085-2014. MINAM. Perú.
- **Ministerio del Ambiente (MINAM, Pe. 2015).** El avance de la minería ilegal en Madre de Dios desde 1987. Consultado 24 de Nov 2015. Disponible en <http://www.minam.gob.pe/mineriailegal/el-avance-de-la-mineria-ilegal-en-madre-de-dios-desde-1987/>
- **Ministerio de Energía y Minas (MINEM, Pe). 1997.** Evaluación ambiental territorial de la Cuenca de Madre de Dios. DGAM. Perú.
- **Ministerio de Energía y Minas (MINEM, Pe). 2016.** Anuario Minero del 2014. Perú.

- **Montero, J y Larraz, B. 2008.** Introducción a la Geoestadística lineal. Editorial Netbiblo, España.
- **Page, A y Bingham, F. 1973.** Residue Rev. 48 (1973), 1-43
- **Panez, M. 2013.** Propuesta para la restauración de suelos contaminados por metales pesados afectados por la actividad minera mediante el uso de la fitoremediación. Tesis Biol. UNALM. Perú.
- **Palacios O; Molina O; Galloso A y Reyna C. 1996** Geología de los cuadrángulos de Puerto Luz, Colorado, Laberinto, Puerto Maldonado, Quincemial, Masuco, Atilero y Tambopata. Carta Geológica Nacional Boletín N°81. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico INGEMMET. Perú.
- **Parveen, N; Ghaffar, A; Shirazi, S; Bhalli, M. 2012.** A gis based assessment of heavy metals contamination in surface soil of urban parks: a case study of faisalabad city-pakistan. Mondal, J Geogr Nat Disast 2012, 2:1
- **Patilla, B; Peña, J y Román, F. 2015** Calidad del agua y sedimentos del río tambopata, Departamento Madre de Dios. 2° II Foro mercurio y salud pública en Madre de Dios 2015
- **Pita, A. 2009.**El caso de la Minería Aurífera en Madre de Dios. Gobierno Regional de Madre de Dios, 7 pp.
- **Porta, J; Lopez, M; Roquero, C. 1999.** Edafología para la agricultura y el medioambiente. Mundi Prensa Madrid España.
- **Red Latinoamericana sobre Prevención y Remediación de Sitios Contaminados (RELASC). 2016.** Concepto de sitios contaminados. Consultado 09 May 2016. Disponible en <http://relasc.org/relasc2/index.php/faq-espanol/95-1-caracteristicas-generales/141-11-que-es-un-sitio-contaminado>
- **Rivera, D; Zumarán, J; Pinto, X. 2000.** Impactos ambientales de una concesión minera aurífera aluvial mecanizada en la cuenca del río Caychive, provincia de Manu, Departamento de Madre de Dios Trabajo de investigación UNALM. Perú.
- **Rodríguez, L; Tomislav, H; Hannes, R. 2008** Heavy metals in European soils: A geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. Geoderma 148 (2008) 189–199
- **Salinas, M. 2007.** Impactos económicos y ambientales de la pequeña minería artesanal en el departamento de Madre de Dios. Tesis Lic. Econ. UNALM. Perú.

- **Salomons, W. 1994.** Environmental impact of metals derived from mining activities: Processes, predictions, prevention. *Journal of Geochemical Exploration* 52 ( 19Y5) 5-23.
- **Salomons W, 1995.** Environmental-impact of metals derived from mining activities – processes, predictions, prevention. *Journal of Geochemical Exploration*, 52(1-2): 5–23.
- **Servicios Geográficos y Medio Ambiente SAC. (GEMA, Pe). 2006.** Estudio de Impacto Ambiental y Prospección Sísmica 2D, Lotes 111 y 113. Madre de Dios. Perú.
- **Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI, Pe). 2015.** Datos Histórico. Consultado 30 Dic 2015. Disponible en [http://www.senamhi.gob.pe/main\\_mapa.php?t=dHi](http://www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi)
- **Soil Survey Manual. 1993.** Agricultural Handbook. Washington DC.
- **Soil Survey Staff. 2014.** Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC
- **United States Geological Survey (USGS, USA. 2007).** Peru Mercury Intentory 2006. Open File Report 2007, US Dept. of Interior. USGS, 49 pp.
- **Wei, C; Wang, Cheng; Yang, L. 2009.** Characterizing spatial distribution and sources of heavy metals in the soils from mining-smelting activities in Shuikoushan, Hunan Province, China. *Journal of Environmental Sciences* 21(2009) 1230–1236
- **World Gold Council.** 2014 Responsible gold mining and value distribution.

## VIII. ANEXO

### ANEXO 1: Fotos

#### 8.1.1 Toma de muestras en campo



**Figura 63: Hospedaje y herramientas de trabajo**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 64: Reconocimiento del campo**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 65: proceso de elaboración de la calicata**  
FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 66: Evaluación de la calicata**  
FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 67: Muestreo superficial de suelo para la evaluación de la calidad**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 68: Muestreo del perfil del suelo para evaluar las características y propiedades físicas y químicas del suelo**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 69: Muestras rotuladas en bolsas herméticas y listas para el análisis**  
FUENTE: Elaboración propia, 2016

### 8.1.2 Análisis de muestras



**Figura 70: Suelo en proceso de secado al ambiente**  
FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 71: Análisis de la materia orgánica del suelo**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 72: Análisis de la textura del suelo**

FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 73: Análisis del fósforo del suelo**  
FUENTE: Elaboración propia, 2016



**Figura 74: Proceso de titulación de muestras de suelo**  
FUENTE: Elaboración propia, 2016

## ANEXO 2: Certificado de acreditación de laboratorio

**Certificado**

 **INACAL**  
Instituto Nacional  
de Calidad  
Acreditación

La Dirección de Acreditación del Instituto Nacional de Calidad – INACAL, en ejercicio de las atribuciones conferidas por Ley N° 30224, Ley de Creación del INACAL, y conforme al Reglamento de Organización y Funciones del INACAL, aprobado por DS N° 004-2015-PRODUCE y modificado por DS N° 008-2015-PRODUCE, **OTORGA** la presente Renovación de la Acreditación a:

**SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.**

En su calidad de **Laboratorio de Ensayo**

Con base en el cumplimiento de los requisitos establecidos en la norma NTP-ISO/IEC 17025:2006 Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración, para el alcance de la acreditación contenido en el formato DA-acr-05P-17F, facultándolo a emitir Informes de Ensayo con Valor Oficial.

**Sede Acreditada:** Av. Naciones Unidas N° 1565, Urb. Chacra Ríos Norte, distrito de Cercado de Lima, provincia de Lima y departamento de Lima.

Fecha de Renovación: 16 de junio del 2012  
Fecha de Vencimiento: 16 de junio del 2016

Registro N° LE – 047  
Fecha de emisión: 07 de setiembre de 2015  
DA-acr-01P-02M Ver. 00

  
**Augusto Mello Romero**  
Director - Dirección de Acreditación



**Figura 75: Certificado de acreditación de laboratorio**

FUENTE: MINAM (2013) y Laboratorio Servicios Analíticos Generales S.A.G