

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Ambiental



TESIS

**Análisis geoestadístico de la calidad de Topsoil destinado para
cierre de un componente principal en una unidad minera**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental.

Elaborado por

Sergio Manuel Torres Jara

 [0000-0003-2335-8382](https://orcid.org/0000-0003-2335-8382)

Asesor

MSc. Clark Hugo Nolasco Segura

 [0000-0002-0819-3105](https://orcid.org/0000-0002-0819-3105)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Torres Jara [1]
Referencia/Reference	[1] S. Torres Jara, " <i>Análisis geoestadístico de la calidad de Topsoil destinado para cierre de un componente principal en una unidad minera</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Torres, 2025)
Referencia/Reference	Torres, S. (2025). <i>Análisis geoestadístico de la calidad de Topsoil destinado para cierre de un componente principal en una unidad minera</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Este trabajo de tesis va dedicado a mis padres Jaide Jara e Hibernon Torres, a mis hermanas Rosmery y Marisol, por el amor incondicional y apoyo que me brindan todos los días de mi vida. A mis padrinos Alexander Torres y Roxana Torres, por su amor incondicional e inspiración en todas las etapas de mi vida. A mis tíos, tías y primos, tanto a quienes me acompañan desde el cielo como a quienes comparten conmigo el día a día; por haberme alentado y acompañado en todo momento.

Agradecimientos

A Dios, por siempre haberme dado señales de su existencia, guiarme en todo momento y darme la oportunidad de disfrutar a mi familia, mi hermosa carrera y permitirme haber desarrollado y culminado la presente tesis.

A mi familia, por su confianza, inspiración, lealtad y por todo su apoyo incondicional para poder llevar a cabo el inicio y conclusión de la presente tesis.

A la gerencia de la unidad minera, por su confianza y apoyo con los permisos para realizar los trabajos de campo.

Al Vicerrectorado de Investigación – UNI, por su confianza en otorgarme el financiamiento económico para la ejecución de la tesis.

Al Ing. Ricardo Baca, por su motivación, recomendaciones y apoyo para iniciar las primeras fases de la tesis.

A mi asesor Clark Nolasco, por haber aceptado esta asesoría, por todo su apoyo y retroalimentación.

Resumen

La presente tesis evalúa la calidad del *topsoil* que fue retirado y almacenado para ser reutilizado como cobertura orgánica, en un futuro, durante las etapas de cierre progresivo y final. Si bien se encontraron operativos todos los controles de calidad del depósito de *topsoil* evaluado, también se observó que a 10 m se ubicaba un acceso no pavimentado, de material sulfurado. Se delimitó un área de estudio de 0,61 ha (85,3 % del área del depósito de *topsoil* evaluado), en donde se propusieron 24 estaciones de muestreo para obtener el potencial de hidrógeno y la concentración de metales pesados como arsénico, cadmio, manganeso y plomo (relacionados a la geología del acceso). Luego se realizó un análisis exploratorio de los resultados obtenidos del laboratorio; mediante el software Past, para generar variogramas teóricos, que sirvieron de base para la interpolación de *kriging* ordinario, mediante el software SGeMS. Los resultados mostraron que el 80,3 % del área evaluada presenta *topsoil* de calidad ideal para ser usado como cobertura de cierre, mientras que el 19,7 % requeriría de un tratamiento previo (encalado); además, los patrones espaciales de la distribución de la concentración de los metales pesados evaluados y del potencial de hidrógeno indicaron que el acceso no pavimentado podría ser una fuente potencial de contaminación. Con base en ello, se sugiere que se realicen muestreos complementarios de metales pesados, en el acceso no pavimentado, para verificar si efectivamente es una fuente de contaminación para el depósito de *topsoil* evaluado.

Palabras clave — Calidad de *topsoil*, geoestadística, software SGeMS, variograma, *kriging* ordinario y unidad minera.

Abstract

This thesis evaluates the quality of topsoil that was removed and stored for future reuse as organic cover during the progressive and final closure stages. While all quality controls for the evaluated topsoil deposit were found to be operational, an unpaved access road of sulfide material was observed 10 m away. A study area of 0,61 ha (85,3 % of the evaluated topsoil deposit area) was delimited, within which 24 sampling stations were proposed to obtain the hydrogen potential and the concentration of heavy metals such as arsenic, cadmium, manganese, and lead (related to the geology of the access road). An exploratory analysis of the laboratory results was then performed using PAST software to generate theoretical variograms, which served as the basis for ordinary kriging interpolation using SGeMS software. The results showed that 80,3 % of the evaluated area contained topsoil of ideal quality for use as a capping layer, while 19,7 % would require pretreatment (liming). Furthermore, the spatial patterns of the concentration distribution of the evaluated heavy metals and the pH indicated that the unpaved access road could be a potential source of contamination. Based on this, it is suggested that additional heavy metal sampling be carried out on the unpaved access road to verify whether it is indeed a source of contamination for the evaluated topsoil deposit.

Keywords — Topsoil quality, Geostatistics, SGeMS software, variogram, ordinary kriging, mining unit.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Introducción.....	xiv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	2
1.2.1 Problema general.....	4
1.2.2 Problemas específicos.....	4
1.3 Justificación.....	5
1.3.1 Justificación teórica.....	5
1.3.2 Justificación práctica.....	5
1.4 Objetivos del estudio.....	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
1.5 Hipótesis del estudio.....	6
1.5.1 Hipótesis general.....	6
1.5.2 Hipótesis específicas.....	6
1.6 Antecedentes investigativos.....	7
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	16
2.1 Marco teórico.....	16
2.1.1 El suelo y sus factores formadores.....	16
2.1.2 Parámetros de caracterización del suelo.....	18
2.1.3 Características y calidad del topsoil.....	24
2.1.4 Contaminación de suelo.....	27
2.1.5 Estadística univariada para el análisis de exploración de datos.....	30

2.1.6 Geoestadística	34
2.1.7 Cierre de minas y actividades involucradas	43
2.2 Marco conceptual	45
2.3 Marco legal.....	49
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	51
3.1 Funcionalidad de los controles aplicados en el depósito de <i>topsoil</i>	51
3.2 Definición de los parámetros críticos de la calidad del <i>topsoil</i> evaluado	54
3.3 Definición del área de estudio	55
3.4 Etapa de gabinete pre - campo	55
3.4.1 Definición de la distribución de estaciones de muestreo.....	56
3.4.2 Definición de la cantidad de estaciones de muestreo	57
3.4.3 Preparación de equipos y materiales.....	58
3.5 Etapa de campo	58
3.5.1 Toma de muestra de suelos	58
3.5.2 Cierre de actividades de muestreo	61
3.5.3 Preparación de muestras para traslado al laboratorio.....	61
3.5.4 Ingreso de muestras de suelo al laboratorio	61
3.6 Etapa de gabinete – post campo	62
3.6.1 Análisis exploratorio de los datos	66
3.6.2 Análisis de normalidad	72
3.6.3 Normalización.....	72
3.6.4 Preparación de datos para el ingreso al software	76
3.6.5 Ingreso al software SGeMS.....	77
3.6.6 Creación de grillado	79
3.6.7 Generación de variograma teórico y experimental.....	80
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados.....	87
4.1 Modelización de la distribución espacial	87
4.1.1 Arsénico (As).....	87

4.1.2 Cadmio (Cd).....	88
4.1.3 Manganeso (Mn)	89
4.1.4 Plomo (Pb)	91
4.1.5 Potencial de hidrógeno (pH).....	92
4.2 Prueba de hipótesis.....	93
Conclusiones.....	95
Recomendaciones.....	97
Referencias bibliográficas	99
Anexos	106

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Clasificación de textura	19
Tabla 2: Clasificación de grupo textural	20
Tabla 3: Interpretación de los colores de suelo	20
Tabla 4: Clasificación de acidez o alcalinidad del suelo	21
Tabla 5: Clasificación de suelos salinos o alcalinos	23
Tabla 6: Clasificación de fragmentos rocosos	23
Tabla 7: Categorías de la calidad del <i>topsoil</i> según características fisicoquímicas	26
Tabla 8: Niveles aceptables de nutrientes en <i>topsoil</i>	26
Tabla 9: Movilidad de elementos traza activos en función del pH	29
Tabla 10: Estatus de los controles aplicados en el depósito de <i>topsoil</i> TS.....	52
Tabla 11: Estaciones de muestreo.....	57
Tabla 12: Resultados de pH y metales pesados proveniente del laboratorio.....	64
Tabla 13: Transformación logarítmica de las concentraciones de arsénico y plomo	73
Tabla 14: Resultados de la prueba de normalidad de los resultados transformados	76
Tabla 15: Resultados de la prueba de hipótesis.....	93

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Formación de suelo de acuerdo con la vegetación superficial.....	18
Figura 2: Diagrama triangular para determinar la clase textural	19
Figura 3: Ejemplo de los colores presentados en un perfil edáfico.....	21
Figura 4: Influencia del pH en el crecimiento de la vegetación	22
Figura 5: Ejemplo de los colores presentados en un perfil edáfico.....	24
Figura 6: Ejemplo del diseño de un histograma	31
Figura 7: Composición de un diagrama de cajas y bigotes	32
Figura 8: Representación gráfica de una distribución normal.....	33
Figura 9: Variogramas con meseta (izquierda) y sin meseta (derecha).....	37
Figura 10: Ejemplo de variograma experimental para un conjunto de datos	38
Figura 11: Modelo del efecto pepita puro	38
Figura 12: Función de variograma para el modelo esférico.....	39
Figura 13: Función de variograma para el modelo exponencial	39
Figura 14: Representación gráfica de un variograma experimental y teórico	41
Figura 15: Resultados de una interpolación con el método de kriging ordinario	42
Figura 16: Ejemplo de una cobertura para el cierre de un componente minero.....	44
Figura 17: Depósito de desmonte en revegetación (mina Almadén - España	45
Figura 18: Sistema de drenaje superficial en el depósito de <i>topsoil</i> TS.....	53
Figura 19: Acceso ubicado a 10 m al noroeste del depósito de <i>topsoil</i> TS.....	53
Figura 20: Área del depósito de <i>topsoil</i> evaluado y área de estudio.....	55
Figura 21: Patrón de muestreo uniforme de rejillas regulares	56
Figura 22: Patrón de muestreo aleatorio sobre rejillas regulares.....	56
Figura 23: Ubicación de las estaciones de muestreo de calidad de suelos	57
Figura 24: Barreno del tipo Reverside adquirido para los muestreos de suelos	58
Figura 25: Cuadrilátero establecido para extraer la muestra compuesta.....	59

Figura 26: Pasos seguidos para la extracción de la muestra de suelos con el barreno ...	59
Figura 27: Partición de muestras para obtener una muestra compuesta.....	60
Figura 28: Limpieza del barreno con agua destilada	60
Figura 29: Muestras de suelos en sus envases etiquetados junto a los ice packs.....	61
Figura 30: Entrega de muestras al laboratorio SGS	62
Figura 31: Histograma de los resultados de arsénico.....	66
Figura 32: Diagrama de cajas resultados de arsénico.....	67
Figura 33: Histograma de los resultados de cadmio.....	67
Figura 34: Diagrama de cajas resultados de cadmio.....	68
Figura 35: Histograma de los resultados de manganeso.....	68
Figura 36: Diagrama de cajas resultados de manganeso.....	69
Figura 37: Histograma de los resultados de plomo	69
Figura 38: Diagrama de cajas resultados de plomo (mg/kg)	70
Figura 39: Histograma de los resultados de potencial de hidrógeno	71
Figura 40: Diagrama de cajas resultados de potencial de hidrógeno	71
Figura 41: Histograma de los resultados de arsénico transformados	74
Figura 42: Histograma de los resultados de manganeso transformados	75
Figura 43: Histograma de los resultados de plomo transformados.....	76
Figura 44: Base de datos en formato txt	77
Figura 45: Ingreso del Object al software SGeMS.....	78
Figura 46: Ingreso de información en la ventana Dialog	78
Figura 47: Ingreso de información para crear una nueva grilla.....	79
Figura 48: Área de visualización con la nueva grilla creada	80
Figura 49: Configuración del variograma experimental del arsénico	81
Figura 50: Generación del variograma experimental y teórico del arsénico.....	82
Figura 51: Configuración del variograma experimental del cadmio	82
Figura 52: Generación del variograma experimental y teórico del cadmio	83
Figura 53: Generación del variograma experimental y teórico del manganeso	84

Figura 54: Configuración del variograma experimental del plomo	84
Figura 55: Generación del variograma experimental y teórico del plomo	85
Figura 56: Configuración de variograma experimental del pH	86
Figura 57: Generación del variograma experimental y teórico del pH	86
Figura 58: Distribución espacial de las concentraciones transformadas de arsénico	87
Figura 59: Estimación de incertidumbre de la distribución espacial del arsénico.....	88
Figura 60: Distribución espacial de las concentraciones de cadmio	88
Figura 61: Estimación de incertidumbre de la distribución espacial del cadmio.....	89
Figura 62: Distribución espacial de las concentraciones transformadas de manganeso .	90
Figura 63: Estimación de incertidumbre de la distribución espacial del manganeso.....	90
Figura 64: Distribución espacial de las concentraciones transformadas de plomo	91
Figura 65: Estimación de incertidumbre de la distribución espacial del plomo	91
Figura 66: Distribución espacial del potencial de hidrógeno	92
Figura 67: Estimación de incertidumbre – potencial de hidrógeno (pH).....	93

Introducción

Durante las etapas de cierre progresivo y cierre final de una unidad minera, se ejecutan diversas actividades operativas para el cierre de los componentes mineros principales y auxiliares, tales como la demolición y desmantelamiento de infraestructuras, la estabilización física de estructuras, revegetación, entre otras. Si bien, la revegetación no es el único método para cierre de componentes mineros, es el más utilizado como parte de los compromisos descritos en los Planes de Cierre presentados por las unidades mineras en el Perú. La cobertura orgánica utilizada para la revegetación es acopiada y almacenada por las propias unidades mineras, desde su raspado inicial (durante la etapa de construcción) hasta su acondicionamiento en un depósito exclusivo que permitan mantener todas las propiedades fisicoquímicas y biológicas del *topsoil*, durante el periodo de almacenamiento (que se puede extender por algunos años e incluso décadas). En ese sentido, la planificación y diseño del almacenamiento se orienta a minimizar la exposición del material a fuentes potenciales de contaminación, como el ingreso de aguas de contacto o la deposición de partículas en suspensión dentro del depósito.

Durante la etapa de operación de este depósito, es importante implementar un monitoreo periódico de la calidad del *topsoil*, que permita detectar oportunamente posibles anomalías durante su almacenamiento, con la finalidad de implementar mejoras en el acondicionamiento del depósito. En esa línea, cabe precisar que también es importante estimar su calidad en todo el espacio ocupado por el depósito, ya que, si se llegase a identificar alguna zona con una calidad que no sea la ideal, se requerirán que todos los esfuerzos se concentren en ese tratamiento preliminar; y ya no sería necesario que la unidad minera incurra en gastos innecesarios para el tratamiento *topsoil* que sí tenga una calidad ideal para la revegetación. El manejo diferenciado del *topsoil* es una estrategia que representa una ventaja operativa y económica significativa para la unidad minera, ya que permite priorizar el uso de insumo (como por ejemplo la cal), que es usada generalmente para elevar la concentración del potencial de hidrógeno del *topsoil*; y a la vez, esta

información permite reducir el volumen de material orgánico que se tenga que movilizar para su tratamiento previo.

Para ello, la geoestadística representa una herramienta ideal para modelar la continuidad espacial de parámetros críticos que definan la calidad del *topsoil*, generando mapas de estimación que permiten representar zonas con una calidad ideal, aceptable o inaceptable. Es así como, la presente tesis se ha enfocado en el análisis geoestadístico de la calidad de *topsoil* acopiado en una zona llamada “depósito de *topsoil* TS” para fines prácticos, el cual será utilizado como cobertura orgánica para el cierre de un componente principal a futuro, cuando la unidad minera entre en etapa de cierre progresivo y final. La investigación se llevó a cabo con la autorización de la unidad minera, que facilitó el acceso y otorgó los permisos necesarios para la ejecución de los muestreos de suelos en el depósito de *topsoil* TS, para que luego sea posible determinar la distribución espacial de la calidad del *topsoil* en toda el área de estudio que se definió previamente.

La estructura de la tesis se organiza en cuatro capítulos, seguidas de secciones de conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos. El primer capítulo desarrolla el planteamiento del problema de investigación, objetivos, hipótesis y los antecedentes investigativos. El segundo capítulo presenta el marco teórico, conceptual y legal. En el tercer capítulo se describe el área de estudio, así como la metodología aplicada en las etapas de campo y de gabinete. Por otro lado, el cuarto capítulo expone los resultados de los ensayos del laboratorio, del análisis exploratorio, del análisis de normalidad de cada parámetro, y del modelamiento geoestadístico de la calidad de *topsoil*. Finalmente, se describen las conclusiones y recomendaciones de la tesis, siendo estas generadas exclusivamente como producto de los resultados del presente trabajo de tesis; así como también se incluyen las referencias bibliográficas y los anexos correspondientes.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

En el Perú, el cierre de minas constituye una etapa crítica dentro del ciclo de vida de los proyectos mineros, ya que implica la rehabilitación progresiva o final de los componentes principales y auxiliares construidos, con el objetivo de prevenir riesgos ambientales, proteger la salud pública y restablecer la funcionalidad ecológica de la zona. En los últimos años, la normativa ambiental nacional ha sido cada vez más exigente en una planificación más rigurosa del cierre desde las etapas iniciales del proyecto, incorporando medidas de control, monitoreo y restauración ambiental a largo plazo.

Generalmente, una de las acciones fundamentales en este proceso es la implementación de coberturas orgánicas sobre componentes cerrados, especialmente aquellas que utilizan *topsoil* como capa superficial para facilitar la revegetación. Este material, al contener buenos niveles de materia orgánica, nutrientes y microorganismos, resulta esencial para reactivar los procesos biológicos del suelo y permitir el establecimiento de una cobertura orgánica que estabilice el terreno y minimice procesos erosivos o de dispersión de contaminantes. En la práctica, el *topsoil* que es retirado durante las fases constructivas, luego es almacenado bajo condiciones adecuadas para su posterior uso como cobertura en el cierre de los componentes mineros. No obstante, el acondicionamiento del depósito presenta desafíos técnicos y operativos en muchas unidades mineras del país; debido a que el almacenamiento prolongado del *topsoil* puede verse afectado por factores como la infiltración de aguas contaminadas, la acumulación de material particulado, y la exposición a fuentes externas que alteran su calidad fisicoquímica y biomasa microbiana. En zonas altoandinas, donde se desarrolla gran parte de la minería metálica en el Perú, las condiciones climáticas extremas y la presencia de accesos no pavimentados aumentan el riesgo de que el *topsoil* almacenado se vea comprometido por el arrastre de sedimentos con metales pesados. Estos elementos, al acumularse en el suelo, modifican parámetros fundamentales como el potencial de hidrógeno (pH) y la

disponibilidad de nutrientes, limitando su funcionalidad ecológica y su efectividad como sustrato para revegetación. A pesar de ello, existen pocos estudios a nivel nacional que evalúen la calidad del *topsoil* almacenado en operaciones mineras, que permitan identificar áreas afectadas de forma espacial; lo que pone en evidencia, la necesidad de generar esta información, que permita tomar decisiones adecuadas sobre la reutilización del *topsoil* en procesos de revegetación.

1.2 Descripción del problema de investigación

A nivel mundial, es común que las operaciones mineras, durante la construcción de sus componentes mineros, realicen trabajos de raspado de *topsoil* (*stripping*) y luego almacenen este material para su uso posterior en las actividades de revegetación durante la etapa de cierre. Sin embargo, este almacenamiento puede alterar significativamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que compromete su capacidad para sustentar la revegetación. Por ejemplo, Ledesma et al. (2025) realizó un estudio de la calidad de un *topsoil* acopiado con una profundidad de 30 m por un periodo de 14 años, por una compañía minera que produce cobre ubicada en el estado de Arizona (EE. UU.). En donde registró valores de pH entre 6 y 9, que disminuían en zonas con mayor contenido de materia orgánica; además, en zonas más profundas (con condiciones anaeróbicas), el pH tendió a neutralizarse (de alcalino a neutro), lo que favorecía la movilidad de ciertos metales como el manganeso. Además, se observó que las concentraciones de metales pesados como el manganeso y hierro aumentaban hasta en 12 y 5 veces respecto a las capas superficiales, en capas profundas con alto contenido de materia orgánica (mayor a 1 %), bajos valores de pH y en condiciones reductoras.

Fischer et al. (2022) realizó una evaluación de la calidad del *topsoil* que almacenaban dos compañías mineras llamadas New Afton, que almacenó *topsoil* por 6 años a una profundidad de 15 m y QR Mill, que almacenó *topsoil* por 20 años a una profundidad de 6 m; ambas se encuentran ubicadas en Columbia (Canadá). Respecto a los valores de pH evaluados, del *topsoil* de New Afton, se registraron valores alcalinos de pH en el todo el perfil del depósito, con valores entre 8 y 8,3 unidades de pH, que no

variaron significativamente con la profundidad; sin embargo, esta condición limitó la disponibilidad de nutrientes como el fósforo e indica presencia de suelos calizos y condiciones sódicas. En el caso del *topsoil* de QR Mill, se registraron valores de pH ácido a neutro (entre 5,4 y 7,3), en donde tampoco se registró una variación significativa del pH respecto a la profundidad. Por otro lado, en ambos *topsoil* se registraron concentraciones de metales pesados (Cu, Zn, Fe y Mn) que superaron umbrales de toxicidad para plantas y microorganismos, y estas iban incrementándose a una profundidad cada vez mayor.

Por otro lado, en México se ubica la Unidad Minera Cerro de San Pedro que se encuentra en etapa de post cierre y es una de las primeras minas en ejecutar actividades de cierre a gran escala, en este país. Según Minera San Xavier (2011), la Unidad Minera Cerro de San Pedro recuperó el *topsoil* removido durante la construcción de sus componentes, para luego trasladarlo hacia un depósito para su almacenamiento. Uno de los aspectos críticos era la posibilidad de que exista el contacto entre el *topsoil* almacenado y los escurrimientos pluviales del entorno, ya que estos podrían alterar su calidad y comprometer seriamente las actividades de revegetación durante la etapa de cierre e incluso el periodo de estabilidad geoquímica. Por ello, han previsto que los depósitos requerirán todos los controles necesarios e incluso darle una pendiente adecuada al depósito, como parte de los controles de erosión.

La unidad minera que autorizó el desarrollo de las actividades de campo de la presente tesis acopió *topsoil* durante la ejecución de las actividades constructivas de sus componentes principales y auxiliares y los distribuyó en distintos depósitos, de acuerdo con su origen; con el objetivo de conservar su funcionalidad durante el periodo que se encuentre almacenado. En uno de estos depósitos de *topsoil*, llamado con fines prácticos para la presente tesis como “depósito de *topsoil* TS”, se ha almacenado a una profundidad de 3 m aproximadamente, y principalmente, se encontraba ubicado en un sitio con presencia de dos fuentes potenciales de contaminación en el entorno. Entre estas fuentes, estaba la escorrentía de agua de contacto proveniente de la interacción de agua de lluvia con el material rocoso expuesto en accesos (construidos por la unidad minera), ubicados

aguas arriba del depósito de *topsoil* TS. Mientras que, la otra fuente provenía del acceso no pavimentado ubicado a 10 m del depósito de *topsoil* TS, en donde se generaba material particulado suspendido, que provenía del tránsito constante de camionetas, camiones furgón y buses. Tanto el agua de contacto como el material particulado suspendido actúan como un medio de transporte de metales pesados que tienen el potencial de alterar la calidad del *topsoil*, y esto podría traer como consecuencia que el *topsoil* pueda llegar a estar inhabilitado para su uso como cobertura en las actividades de revegetación, y que tenga que destinar un mayor recurso económico y de personal, para la ejecución de estas actividades. Si bien la unidad minera caracterizó los nutrientes de este *topsoil*, no contaba con información sobre la distribución espacial del potencial de hidrógeno y el contenido de metales pesados que le permitirían tener un panorama completo del comportamiento de la calidad del *topsoil* almacenado. Bajo este escenario, la presente tesis pretende determinar la calidad del *topsoil* del depósito de *topsoil* TS mediante técnicas geoestadísticas usando el software SGeMS, en un área representativa ubicada dentro de este depósito para ver si existen zonas homogéneas o heterogéneas en cuanto su calidad.

En ese sentido, se ha planteado el siguiente problema general y específicos presentados a continuación.

1.2.1 Problema general

¿Cuál es calidad del *topsoil* destinado para el cierre de un componente principal de una unidad minera?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Se encuentran operativos los controles aplicados en el depósito de *topsoil* para conservar su calidad a lo largo del tiempo?
- ¿Cuáles serían los parámetros críticos que definan la calidad del *topsoil* del depósito evaluado?
- ¿Cuántas estaciones de muestreo se requieren dentro del área de estudio definida?
- ¿Cómo se distribuyen las concentraciones de los parámetros críticos, que definen la calidad del *topsoil* dentro del área de estudio?

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación teórica

Si bien existen estudios a nivel nacional e internacional que se han realizado con la finalidad de investigar cómo varía la calidad del *topsoil* almacenado en una unidad minera, según su profundidad y periodo de almacenamiento, no existen muchos estudios que clasifiquen la calidad del *topsoil* de acuerdo con parámetros fisicoquímicos con la finalidad de optimizar recursos económicos y humanos durante las actividades de cierre progresivo y final de una mina. La presente tesis pretende aportar a la comunidad científica cómo se puede aplicar la geoestadística para definir la calidad del *topsoil* espacialmente en una unidad minera que ha destinado este material para el cierre de unos de sus componentes principales.

1.3.2 Justificación práctica

La presente tesis pretende aplicar métodos geoestadísticos para poder estimar espacialmente la calidad de *topsoil* que requiere un tratamiento previo a su uso como cobertura de cierre, que le servirá a la unidad minera para que pueda tomar decisiones al respecto. Además, el análisis de metales pesados servirá para poder verificar la presencia de alguna fuente potencial de contaminación en el entorno del depósito de *topsoil* evaluado, cuya información será de vital importancia para la unidad minera, ya que también le permitirá tomar acciones correctivas, dependiendo de los resultados que se puedan obtener.

1.4 Objetivos del estudio

1.4.1 Objetivo general

Analizar con geoestadística la calidad del *topsoil* destinado para el cierre de un componente principal de una unidad minera.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar la funcionalidad de los controles aplicados en el depósito de *topsoil* evaluado.
- Seleccionar los parámetros críticos que caracterizan la calidad del *topsoil* evaluado.

- Definir el área de estudio y la cantidad de estaciones de muestreo dentro del área de estudio.
- Determinar con geoestadística la distribución espacial de las concentraciones de los parámetros críticos, que definen la calidad del *topsoil* dentro del área de estudio.

1.5 Hipótesis del estudio

1.5.1 Hipótesis general

Se observa una heterogeneidad en la calidad del *topsoil* dentro del área de estudio, debido a la influencia del acceso no pavimentado. Esta fuente impacta las concentraciones de pH y metales pesados, generando una disminución en la calidad del *topsoil* en las zonas más cercanas a esta fuente potencial de contaminación, mientras que dicha calidad tiende a mejorar conforme aumenta la distancia respecto al acceso no pavimentado.

1.5.2 Hipótesis específicas

- El depósito de *topsoil* cuenta con controles operativos, para la conservación de la calidad del *topsoil* en un largo periodo. Uno de estos controles consistiría en la implementación de un sistema de drenaje superficial, el cual limita el ingreso de agua de contacto hacia el depósito y con ello contribuye a preservar la calidad del *topsoil*.
- El parámetro de pH influye directamente en la calidad del *topsoil* almacenado, ya que determinan su aptitud para la revegetación. Además, la evaluación espacial del pH y de los metales pesados como el arsénico, cadmio y plomo, permitirá identificar si la vía de acceso no pavimentada cercana posiblemente actúa como fuente potencial de contaminación, afectando las propiedades del *topsoil*.
- Se definen como mínimo 15 estaciones de muestreo dentro del área de estudio proximidad al acceso no pavimentado, que permite evaluar con mayor precisión la posible influencia espacial de la fuente potencial de contaminación sobre la calidad del *topsoil*; al garantizar representatividad estadística y confiabilidad en el análisis geoestadístico.

- La calidad del *topsoil* no es homogénea en todo el área de estudio, por ende, no solamente se identificará *topsoil* de calidad aceptable, sino también se encontrará *topsoil* de calidad ideal alejado de la fuente de contaminación (acceso).

1.6 Antecedentes investigativos

Ledesma et al. (2025) evaluaron los cambios biogeoquímicos y microbianos en un almacenamiento prolongado de *topsoil* en un entorno semiárido, en un depósito de *topsoil* de 30 metros de profundidad y 14 años de antigüedad, que pertenece a una mina de cobre en el estado de Arizona (EE. UU.). Se extrajeron muestras a lo largo de dos perforaciones profundas (al norte y sur del depósito), en donde, se extrajeron 38 muestras a lo largo de los 30 m perforados en la zona norte y se extrajeron 26 muestras a lo largo de los 20 m perforados en la zona sur; para el análisis de parámetros como pH, nitrógeno, fósforo, hierro y manganeso disponibles, entre otros. Por otro lado, para el análisis de biomasa microbiana, se extrajeron 114 muestras a lo largo de los 30 m perforados en la zona norte y 78 muestras, en la zona sur. Los resultados demostraron que en entornos semiáridos es viable construir depósitos de *topsoil* de hasta 15 m de profundidad sin que ocurran alteraciones críticas en sus propiedades, siempre que el contenido de materia orgánica se mantenga por debajo del 1 %. Sin embargo, cuando el suelo contiene altos niveles de materia orgánica, las condiciones anaeróbicas pueden aparecer desde los 4 metros, lo que significa que requeriría de tratamiento previo para que el *topsoil* sea usado como cobertura de cierre.

Agbeshie et al. (2024) realizaron un estudio para evaluar el impacto del almacenamiento prolongado de *topsoil* en una operación minera aurífera ubicada en Ghana. Para ello, se compararon suelos almacenados por 3, 8, 13 y 18 años, tomando como referencia a un bosque nativo de la zona. Se analizaron propiedades físicas, químicas y biológicas que incluían carbono orgánico, nitrógeno (total, nítrico y amoniacal), cationes intercambiables, pH, biomasa microbiana y población de bacterias, hongos y lombrices, complementando el análisis con la concentración de metales pesados como Fe, Pb, Cd, Cu y Zn. Los resultados evidenciaron que el almacenamiento superior a tres años

provocó un deterioro considerable de la calidad del suelo, relacionado a la disminución de indicadores como la biomasa y actividad microbiana. Asimismo, se observaron acumulaciones significativas de metales pesados, especialmente de Fe, Zn, Cu y Pb; además, el análisis de componentes principales reveló que los indicadores biológicos son los más sensibles al almacenamiento y que existe una correlación negativa entre la presencia de actividad microbiana y metales pesados, lo que sugiere la aplicación de medidas de remediación antes del uso de *topsoil* como material de cobertura en el proceso de cierre.

Fischer et al. (2022) determinaron cómo varía la calidad del *topsoil* con la profundidad en pilas de almacenamiento y qué implicancias tiene esto para los procesos de restauración ecológica post minería; en dos operaciones mineras ubicadas en la Columbia Británica, Canadá. Para ello, se realizaron muestreos en dos depósitos de *topsoil* de distintas características: uno de 15 m de altura y seis años de almacenamiento, y otro de 6 m de altura con veinte años de almacenamiento. Las muestras fueron recolectadas a diferentes profundidades mediante perforaciones y calicatas, en donde se analizaron parámetros como nitrógeno, fósforo, materia orgánica, metales pesados, pH y conductividad eléctrica. Los resultados mostraron una acumulación de amonio (NH_4^+), zinc (Zn) y manganeso (Mn), y una disminución del fósforo disponible y de la materia orgánica en las capas más profundas. Estas alteraciones sugirieron la aparición de condiciones anaeróbicas que afectan la funcionalidad del suelo para la revegetación. Además, se registraron niveles elevados de cobre (Cu) por encima de los valores guía para suelos agrícolas en casi todos los niveles evaluados. El estudio concluyó que la altura del depósito de *topsoil* es un factor determinante para preservar su calidad y recomendó que la profundidad del *topsoil* no supere los 6 m, ya que en ese rango el *topsoil* aún preserva sus propiedades.

Velásquez et al. (2021) evaluaron las concentraciones de mercurio en suelos ubicados tanto en proximidad a residuos de antiguas operaciones de minería aurífera aluvial como en zonas de bosque intacto, dentro de la región de Madre de Dios, Perú. Para

ello, se recolectaron un total de 127 muestras de suelos potencialmente afectados y 35 muestras correspondientes a áreas no intervenidas, abarcando un área total de 250 hectáreas. Luego realizaron un análisis geoestadístico usando el software SGeMS beta v.2.5b (Stanford Geostatistical Modeling Software) para generar variogramas experimentales que permitieron caracterizar la dependencia espacial de las concentraciones de Hg; y en base en esos modelos, se aplicó *kriging* ordinario (OK) utilizando variogramas gaussianos para interpolar la distribución continua del Hg en el área de estudio. Luego, estos resultados se integraron en un entorno SIG (ArcGIS 10.6) para producir mapas espaciales continuos que reflejan las zonas con mayor y menor concentración de Hg en los suelos evaluados. Además, se complementó el análisis con Análisis de Componentes Principales (PCA) para identificar las relaciones multivariadas entre el Hg y otras variables edáficas (pH, materia orgánica, textura, etc.). Finalmente, se concluyó en que los niveles de Hg no excedieron los estándares ambientales y que su presencia en ambientes no perturbados se debía principalmente a que la cobertura orgánica y el contenido de materia orgánica son determinantes para la retención del Hg en suelos degradados; por ende, áreas con mayor cobertura tendían a presentar concentraciones más altas de Hg que posiblemente estén inmovilizados por complejos orgánicos.

Świdwa-Urbańska y Battle-Sales (2021) realizaron una evaluación de acumulación de metales pesados (Cd, Cu, Pb y Zn) en suelos con uso potencial para actividades recreativas, en el entorno del parque urbano Krowoderski en Cracovia, Polonia. Se recolectaron 46 muestras dentro de un área de 372 km², cuyas concentraciones de contaminantes fueron analizadas mediante herramientas geoestadísticas con el fin de identificar patrones espaciales y valorar el riesgo asociado para la salud humana. El estudio requirió del uso del software SGeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software) para la elaboración de modelos de variograma, que fueron fundamentales en la caracterización de la dependencia espacial de las variables analizadas. De los elementos evaluados, solo el cadmio (Cd) presentó una clara autocorrelación espacial con anisotropía marcada, lo que

permitió aplicar *kriging* ordinario y simulación gaussiana secuencial (SGS) para generar mapas continuos de su distribución. Para el resto de los metales (Pb, Cu y Zn), que no mostraron autocorrelación espacial significativa, se empleó interpolación por distancia inversa ponderada (IDW). Los resultados mostraron que, aunque las concentraciones de metales se mantenían por debajo de los límites legales de este país (excepto un punto para Pb), los índices de contaminación evidenciaron una alteración de calidad de suelo considerable a extrema, especialmente en zonas adyacentes a carreteras y estaciones de servicio, que sugiere la influencia del tráfico vehicular como fuente potencial de contaminación.

Tumy (2019) llevó a cabo un análisis geoestadístico con el objetivo de estimar las concentraciones de arsénico (As) y mercurio (Hg) en suelos impactados por actividades de minería artesanal, en el poblado de Mollehuanca – Arequipa. Para ello extrajeron 35 muestras de suelo, utilizando un mallado irregular para distribuir la ubicación de las muestras dentro del área de estudio de 40 ha aproximadamente. Posteriormente, realizaron un análisis estadístico exploratorio de los datos incluyó pruebas de normalidad y transformaciones logarítmicas, que permitieron ajustar las variables a distribuciones más adecuadas para su modelamiento espacial en el software SGeMS. Los resultados permitieron identificar zonas con niveles elevados de contaminación, especialmente en sectores cercanos a zonas de descarga de residuos mineros, donde las concentraciones de As y Hg superaban los Estándares de Calidad Ambiental para suelos, aprobado por D.S. N° 011-2017-MINAM. Además, el análisis de correlación espacial mostró una relación positiva significativa entre ambos metales, lo cual sugiere una fuente común de emisión, probablemente asociada a relaves abandonados.

Pla et al. (2018) evaluaron los efectos académicos, en un alumno de Universidad de Almería, de introducir el análisis geoestadístico con el SGeMS en la materia de descontaminación de suelos. La metodología consistió en el diseño de material docente específico que guiara al estudiante en el manejo de SGeMS, desde la preparación de los datos de entrada hasta la generación de mapas de distribución de contaminantes. Las

prácticas incluyeron análisis estadístico exploratorio, construcción de variogramas experimentales, interpolación mediante *kriging* ordinario y simulaciones condicionales. A partir de estas herramientas, el alumnado pudo estimar zonas potenciales de contaminación, calcular volúmenes de suelo impactado y proponer estrategias de remediación adecuadas al grado de afectación estimado. La experiencia demostró no solo la aplicabilidad del software en entornos académicos, sino también su potencial como herramienta profesional en estudios de impacto ambiental, geología, ingeniería y remediación de suelos. El uso de SGeMS facilitó el aprendizaje autónomo, promovió el pensamiento crítico y permitió una mejor comprensión del comportamiento espacial de variables ambientales.

Ersoy e Yünel (2018) evaluaron la presencia de metales pesados en suelos de una región agrícola e industrial del sureste de Turquía, empleando técnicas geoestadísticas. Para ello, se recolectaron 652 muestras de suelo superficial distribuidas en una malla regular con intervalos de 100, 200 y 400 metros. Dado que los datos originales no presentaban una distribución normal, fue necesario aplicar transformaciones estadísticas para su análisis. El variograma experimental direccional de Cu y Ni mostró que existen anisotropía geométrica y zonal. En cambio, los metales Pb, Zn, Cr y Ba fueron calificados con variogramas experimentales omnidireccionales. Finalmente se obtuvo mapas que mostraban áreas contaminadas y no contaminadas, estos revelaron que el 23, 27 y el 24 % del área de estudio con una probabilidad del 60 % estaban contaminados por metales pesados incluidos Cu, Cr y Ni.

Liao et al. (2018) compararon la eficiencia de los siguientes seis modelos de interpolación: *kriging* de área y punto (AAPK), ponderación de distancia inversa (IDW), interpolación polinomial local (LP), *kriging* ordinario (OK), *kriging* simple (SK) y *spline* de placa fina (TPS) evaluando metales pesados en suelo. Como parte de la metodología de comparación se realizó una validación cruzada donde sus indicadores fueron el error relativo medio y el factor de determinación, además en los métodos OK, SK, IDW, TPS y LP se usó el software R 3.2.5. y en el método AAPK se utilizó el software SGeMS. Los

resultados demuestran que, con el aumento del porcentaje de muestreo, también aumenta gradualmente la precisión de los diferentes modelos de interpolación y que el modelo AAPK es una excelente herramienta para realizar predicciones sobre características del suelo en un área determinada. Se evidenció que modelos como el *kriging* ordinario y SK presentaban un buen desempeño cuando la autocorrelación espacial era alta y el tamaño de muestra superaba el 10 %, que sugiere 10 estaciones de muestreo por hectárea como mínimo.

Arce (2017) en una tesis de maestría realizó un análisis geoestadístico de la presencia de plomo en el suelo de la zona urbana de la Oroya para averiguar si afectaba directamente a la calidad del río Mantaro. Para su ejecución, Arce delimitó un área de estudio de 10 hectáreas, donde escogió 15 puntos de muestreo con un duplicado de cada uno, teniendo un total de 30 resultados de muestreo de suelo. Además, escogió tres estaciones de muestreo para medir su calidad (aguas arriba, zona impactada y aguas abajo) en el río Mantaro. Para el análisis espacial, el estudio incorporó herramientas geoestadísticas, utilizando el software SGeMS, a través del modelamiento de variogramas y la aplicación de *kriging* ordinario, se generaron mapas de interpolación que permitieron visualizar con mayor precisión la distribución del plomo en el suelo, identificar patrones espaciales de acumulación y estimar concentraciones en zonas no muestreadas. La interpolación reveló zonas de alta concentración, especialmente en áreas cercanas a la carretera central y al complejo industrial, con valores que en muchos casos superaban los límites establecidos por normas internacionales para suelos residenciales y agrícolas.

Qu et al. (2014) llevaron a cabo una investigación aplicada en un área de transición urbano-rural de la ciudad de Wuhan, China, con el propósito de analizar los posibles riesgos ecológicos asociados a la presencia de metales pesados en el suelo. Para ello, se recolectaron 130 muestras superficiales distribuidas en un área de 150 km², donde se analizaron las concentraciones de cinco metales: cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn). La principal innovación del estudio fue la integración de la simulación gaussiana secuencial (SGS) con el cálculo del índice de riesgo ecológico

(PERI), lo que permitió una evaluación conjunta de la distribución espacial de los contaminantes y de la incertidumbre asociada a su estimación. A través de la SGS, implementada en el software SGeMS, se generaron 500 realizaciones simuladas para cada metal, representando posibles escenarios de distribución espacial sin el efecto de suavizado propio del *kriging*. Estas realizaciones permitieron modelar tanto la variabilidad como la incertidumbre espacial de las concentraciones, y fueron posteriormente utilizadas como insumo en el cálculo del PERI individual y total, incorporando factores toxicológicos y valores de fondo de referencia. Los resultados mostraron que, aunque los riesgos ecológicos de Cr, Cu, Pb y Zn fueron bajos en general, el Cd presentó valores preocupantes, alcanzando categorías de riesgo alto y muy alto en sectores del área central y norte del parque tecnológico estudiado. Además, se construyeron mapas probabilísticos para visualizar la frecuencia de aparición de cada nivel de riesgo ecológico del Cd, y se identificaron áreas prioritarias para la intervención ambiental. Esta metodología permitió no solo generar mapas precisos de distribución de contaminantes, sino también cuantificar el grado de incertidumbre en la estimación del riesgo ecológico, aportando insumos para la toma de decisiones en planes de remediación y monitoreo.

Benito (2012) realizó un modelamiento geoestadístico con el software SGeMS para determinar la distribución de Cesio-137 en un área de 538 km² de la península Ibérica en España. Para este proyecto se utilizaron 30 puntos de muestreos ubicados en un mallado uniforme del área en celdas de 150 x 150 km. El interés en este isótopo se debe a su prolongada vida media y su incorporación al ambiente tanto por ensayos nucleares como por accidentes como el de Chernóbil. Dado que el muestreo intensivo de todo el territorio sería inviable por razones logísticas, se adoptó un enfoque basado en herramientas de interpolación geoestadística para generar estimaciones continuas a partir de datos puntuales. Se aplicaron modelos con y sin transformación logarítmica de los datos, y por incorporar variogramas generados a través del software SGeMS con el fin de optimizar la representación de la variabilidad espacial y reducir errores asociados a la no normalidad de los datos. Esta estrategia permitió modelar de forma más realista los patrones

espaciales de actividad del Cesio-137 y evaluar su relación con variables ambientales como la precipitación. Se concluyó que existía una correlación entre las intensidades altas de precipitación con concentraciones elevadas de Cesio-137, además también se pudo correlacionar las ubicaciones de pruebas de armamento nuclear con las concentraciones modeladas de Cesio-137. Sin embargo, dada la variedad en los resultados obtenidos el autor recomienda que se deben utilizar una mayor cantidad de estaciones de muestreo en el área de estudio escogido.

Meerschman et al. (2011) desarrollaron una investigación sobre la distribución de cromo, cobre, mercurio, cadmio, arsénico, níquel, zinc y plomo en un área que había sido impactada durante la Primera Guerra Mundial en Bélgica, para evaluar el nivel de impacto ambiental al cuál había estado expuesto esa área. La metodología que siguieron incluyó la recopilación de 731 muestras de suelo para 640 km² de área de estudio. Además, se utilizó el método del *kriging* ordinario en el software SGeMS para realizar el modelamiento de esta distribución y concentración de metales. Los resultados revelaron que, aunque no existía contaminación generalizada a escala regional, sí se identificaron zonas localizadas con concentraciones elevadas de Cu, Pb y Zn, superando los umbrales legales de saneamiento en múltiples sitios. Estas áreas coincidieron espacialmente con las líneas de batalla más intensas, como el saliente de Ypres, y no se relacionaron con actividades industriales actuales, lo que refuerza la hipótesis de una fuente de contaminación histórica vinculada al uso de municiones metálicas durante el conflicto. La aplicación de análisis de geoestadístico también mostró que los metales de cobre, plomo y zinc compartían estructuras espaciales similares, a diferencia de níquel y cromo, cuya distribución estuvo más influenciada por la textura del suelo.

Kerin y Hsing (2010) realizaron una evaluación integral sobre los riesgos ambientales y sanitarios derivados de la exposición a metales pesados en el entorno de la mina Red Dog, una operación a tajo abierto de plomo y zinc ubicada en el norte de Alaska. La investigación se centró en el impacto del polvo fugitivo generado por los camiones que transportan concentrados de minerales a lo largo de una carretera no pavimentada de 84

km, entre la mina y el puerto logístico en el mar de Chukotka. Este polvo, rico en partículas metálicas finas como plomo, zinc y cadmio, representa una fuente de contaminación relevante tanto para el ambiente como para las comunidades indígenas cercanas que dependen del área para actividades de subsistencia. Los autores analizaron múltiples vías de exposición: inhalación directa, contacto dérmico con suelos contaminados, contaminación doméstica por trabajadores y consumo de alimentos recolectados en la zona. Se documentaron concentraciones superficiales de plomo en suelos de hasta 5 000 mg/kg, y estudios con musgos (*Hylocomium splendens*) mostraron una acumulación metálica significativa hasta 1 800 m de distancia de la vía, con niveles de plomo 4 a 7 veces mayores que los observados en otras zonas industriales de Alaska y comparables a áreas contaminadas de Europa central. Asimismo, se identificó un gradiente de deposición decreciente con la distancia al camino, confirmando el papel del tránsito de camiones como principal vector de dispersión. Aunque los estudios epidemiológicos en comunidades cercanas no mostraron niveles promedio de plomo en sangre por encima del umbral de preocupación de 10 µg/dL, se detectaron casos individuales con niveles elevados, especialmente en niños. En fauna local, se observaron aumentos notables de plomo en tejidos de roedores y caribúes cercanos a la carretera, aunque sin evidencia de daño orgánico severo.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *El suelo y sus factores formadores*

El término suelo ha recibido diferentes definiciones de acuerdo con los ámbitos científicos de aplicación, a continuación, se presentan las definiciones que se encuentran acordes a la presente investigación:

Porta et al. (2019) precisa que el suelo es un cuerpo natural desarrollado en la superficie terrestre como resultado de la descomposición de rocas y material orgánico, el cual está conformado por minerales (menores o iguales a 2 mm), biota y materia orgánica. Este cuerpo tiene espacios porosos que contiene líquidos, organismos vivos y gases. Debido a que el proceso de formación del suelo ocurre a lo largo de cientos o incluso miles de años, su renovación es extremadamente lenta, por lo que se le considera un recurso natural no renovable; de ahí la importancia de proteger su calidad frente a un potencial degradación o cambio de uso de suelo.

Por otro lado, Weil y Brady (2017) definen al suelo como un cuerpo natural conformado por minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos, que actúa como medio de soporte para el desarrollo vegetal. Sus propiedades físicas resultan de la interacción entre factores como el clima, los organismos biológicos, el material parental, la topografía y el tiempo, los cuales actúan de forma conjunta durante su proceso de formación.

Según Galán y Romero (2008), el suelo se forma como resultado de la interacción dinámica entre los sistemas de la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera actuando sobre la superficie de la geosfera. Su desarrollo está asociado a procesos de meteorización física y química del material rocoso, complementados por la acción de microorganismos y otros agentes biológicos que transforman los componentes minerales y orgánicos del sustrato. Esta meteorización está fundamentalmente regulada por el clima, material parental y propiedades intrínsecas del suelo tales como su permeabilidad y susceptibilidad a la

erosión. Bajo condiciones climáticas estables y tras un proceso prolongado, el suelo puede alcanzar un estado de equilibrio. Sin embargo, este equilibrio es frágil y puede ser alterado por cambios en las condiciones ambientales o por la intervención humana a través de actividades como la agricultura, la minería, la industria o la ganadería. Estas acciones suelen generar impactos negativos en las propiedades del suelo, fenómeno que se conoce comúnmente como degradación del suelo.

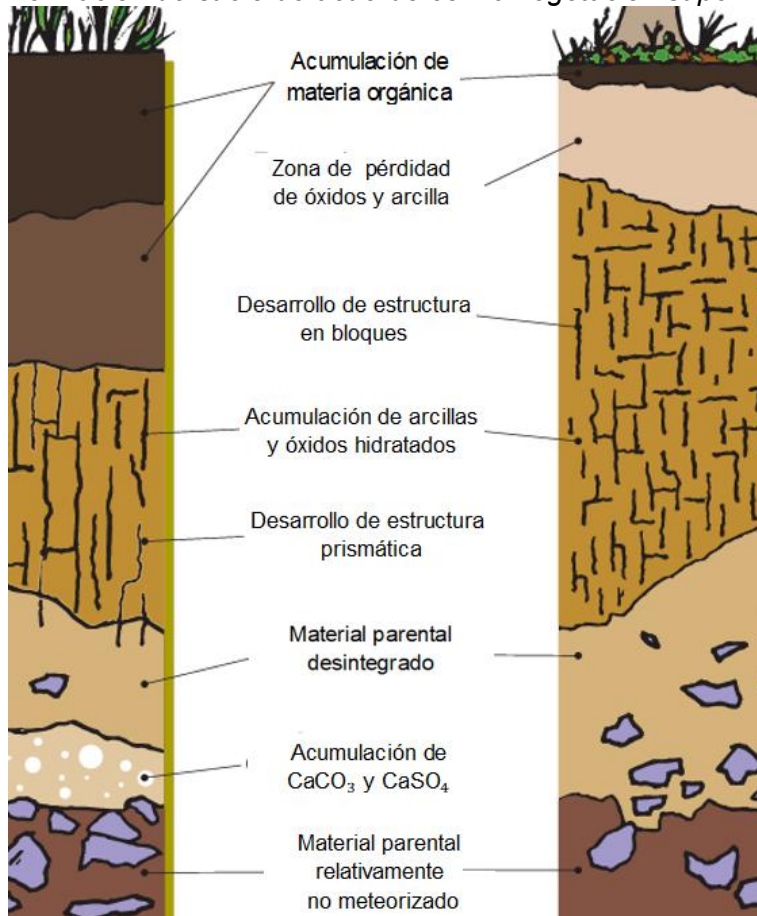
Según Sanzano (2019), el suelo ha sido formado por cinco factores: clima, organismos vivos, relieve, materia orgánica y tiempo, los cuales él ha definido de la siguiente manera:

- **Material parental:** El material originario o parental es el material del sistema suelo en su tiempo cero de formación, en donde, conforme avanza el tiempo inicia un proceso de meteorización y esto tarda de acuerdo con el tipo de material originario que se tenga.
- **Clima:** Este factor influye directamente sobre el material parental y condiciona la intensidad del proceso de meteorización, dependiendo principalmente de los valores de temperatura y la precipitación efectiva.
- **Organismos vivos:** Las principales evidencias de la presencia de la actividad biológica en el suelo son la descomposición biológica, reciclaje de nutrientes y el mantenimiento de la estabilidad de la estructura del suelo.
- **Relieve:** La topografía incide directamente en el equilibrio entre infiltración y escorrentía, lo que a su vez influye en el potencial de erosión del suelo.
- **Tiempo:** El tiempo es una variable totalmente independiente, que empieza a ser tomado en cuenta cuando un movimiento de tierras ocasionado por desastres naturales expone a una roca nueva al ambiente en la superficie o cuando un desborde fluvial deposita nuevos sedimentos sobre una llanura de inundación.

Según Weil y Brady (2017), la cobertura orgánica nos puede dar información sobre el perfil del suelo que eventualmente se formó a partir de un material parental dado, tal como se puede observar en la Figura 1.

Figura 1

Formación de suelo de acuerdo con la vegetación superficial



Nota: Adaptado de (Weil y Brady, 2017).

En donde el perfil de un suelo con una mayor densidad de cobertura orgánica suele presentar un horizonte con material orgánico con mayor profundidad con diferente grado de descomposición, debido a que es importante que el suelo le proporcione suficiente espacio a las raíces para que puedan aprovechar los nutrientes del suelo; esto es una consideración fundamental en los trabajos de revegetación.

2.1.2 Parámetros de caracterización del suelo

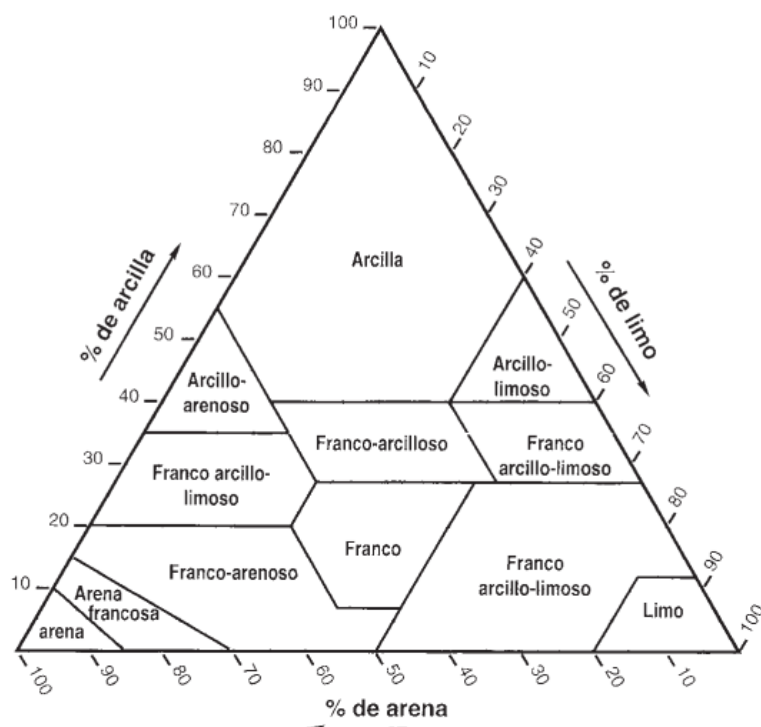
Textura y su clasificación

Según Rucks et al. (2004), la textura es el porcentaje que se encuentra en tres fracciones minerales tales como arena, limo y arcilla; en donde la roca madre influye directamente para que el suelo sea más arenoso, limoso o arcilloso. En la Figura 2 se muestra un diagrama triangular que se suele utilizar para determinar la clase textural a

partir de los porcentajes de arena, limo o arcilla del suelo, que se obtengan en el laboratorio, en donde suelen utilizar el método de Bouyoucos.

Figura 2

Diagrama triangular para determinar la clase textural



Nota: Adaptado de (Schoeneberger et al., 2012).

Según Jordán (2006) existen dos clasificaciones texturales principales: las establecidas por la Sociedad Internacional de la Ciencia del suelo y Departamento de Agricultura de U.S.A. En la Tabla 1, se presentan los criterios de clasificación, de acuerdo con el tamaño de partícula, para ambos sistemas de clasificación.

Tabla 1

Clasificación de textura

Fracciones	Sistema de Departamento de agricultura de EE. UU. (diámetro límites en mm)	Sistema Internacional (diámetros límites en mm)
Arena muy gruesa	2,00 – 1,00	-
Arena gruesa	1,00 – 0,50	2,00 – 0,20
Arena media	0,50 – 0,25	-
Arena fina	0,25 – 0,10	0,20 – 0,002
Arena muy fina	0,10 – 0,05	-
Limos	0,05 – 0,002	0,02 – 0,002
Arcilla	Menos de 0,002	Menos de 0,002

Nota: Adaptado de (Rucks et al., 2004).

Cabe precisar que, el Ministerio de Agricultura del Perú, MIDAGRI (2022), en el anexo V del D.S. N°005-2022-MIDAGRI, menciona que las texturas se pueden clasificar en los siguientes grupos texturales: gruesa, moderadamente gruesa, media, moderadamente fina y fina.

En la Tabla 2, se presenta el detalle de esta clasificación precisando los símbolos por grupo textural y una equivalencia con las clases texturales relacionadas en cada grupo.

Tabla 2

Clasificación de grupo textural

Símbolo	Grupo	Textura
G	Gruesa	Arena (A)
		Arena franca (FA)
MG	Moderadamente gruesa	Franca arenosa (FA)
M	Media	Franca (F)
		Franca limosa (FL)
		Limo (L)
MF	Moderadamente fina	Franco arcillosa (FAr)
		Franco arcillo arenosa (FArA)
		Franco arcillo limosa (FArL)
F	Fina	Arcillo arenosa (ArA)
		Arcillo limosa (ArL)
		Arcilla (Ar)

Nota: adaptado del D.S. N° 005-2022-MIDAGRI.

Clasificación del color del suelo

Según Weil y Brady (2017) el color del suelo se ve influenciado por el contenido de materia orgánica, contenido de agua y estado de oxidación de hierro y manganeso en diversos minerales. Jordán (2006) afirma que la tonalidad de los colores del suelo nos puede brindar información valiosa sobre su contenido, tal como se describe en la Tabla 3.

Tabla 3

Interpretación de los colores de suelo

Color	Propiedad del suelo
Negro u oscuro	Presencia de materia orgánica; a mayor contenido de esta, mayor tonalidad oscura.
Blanco o claro	Presencia de carbonatos de calcio y magnesio, yeso u otras sales solubles.
Grisés	Presencia de compuestos ferrosos (Fe ²⁺) y férricos (Fe ³⁺).

Nota: adaptado de (Jordán, 2006).

En la Figura 3, se presenta un perfil edáfico con una capa superficial orgánica (*topsoil*) que presenta un color negro u oscuro, que indica la presencia de material orgánico que definitivamente contiene nutrientes esenciales para el crecimiento de la vegetación que se encuentra presente.

Figura 3

Ejemplo de los colores presentados en un perfil edáfico



Nota: Tomado de (Weil y Brady, 2017).

Características del potencial de hidrógeno

Según Bárbaro et al. (2014) el potencial de hidrógeno (pH) es un parámetro químico que expresa el grado de acidez o alcalinidad del medio acuoso. El rango óptimo para buenas condiciones de suelo es de 5,5 a 6,8 de unidades pH, ya que la mayoría de los nutrientes, como el nitrógeno, potasio, fósforo, calcio y magnesio, se encuentran más solubles. Cabe resaltar, que las concentraciones de óxidos metálicos de hierro, manganeso, zinc y cobre aumentan significativamente en condiciones de pH ácido, especialmente cuando este desciende por debajo de 5 unidades de pH. La clasificación del grado de acidez o alcalinidad del suelo se realiza tomando como referencia los rangos establecidos en la Tabla 4.

Tabla 4

Clasificación de acidez o alcalinidad del suelo

Rangos	Clases
4,5 – 5,0	Muy fuertemente ácido

Rangos	Clases
5,1 – 5,5	Fuertemente ácido
5,6 – 6,0	Moderadamente ácido
6,1 – 6,5	Ligeramente ácido
6,6 – 7,3	Neutro

Nota: adaptado del D.S. Nº 005-2022-MIDAGRI.

Según Alloway (2013), en presencia de metales pesados, el pH se ve afectado principalmente a través de mecanismos de hidrólisis y oxidación, en donde, los cationes metálicos como Fe^{3+} , Al^{3+} y otros, al interactuar con el agua, tienden a hidrolizarse liberando protones (H^+) a la solución, disminuyendo así el pH (generando un ambiente más ácido). La disminución del pH favorece la solubilidad de otros metales, incrementando su movilidad y biodisponibilidad. Por el contrario, en ambientes donde predominan procesos de disolución de minerales carbonatados o infiltración de aguas bicarbonatadas, se puede observar un aumento del pH. En la Figura 4, se presenta una especie vegetal que es sensible a un pH ácido y otra que es tolerante a esas condiciones, en donde, se puede ver claramente que una vegetación que no es tolerante a medios ácidos no va a prosperar en el tiempo y por ello la elección adecuada de la vegetación representa una de las consideraciones más importantes para las actividades de revegetación.

Figura 4

Influencia del pH en el crecimiento de la vegetación



Nota: Tomado de (Weil y Brady, 2017).

Relación de la conductividad eléctrica y la vegetación

Bábaro et al. (2014), precisa que la conductividad eléctrica es un parámetro que refleja la concentración de sales solubles presentes en la solución del suelo, es así como se relaciona con el nivel de salinidad del suelo. A continuación, en la Tabla 5 se precisa la relación entre el nivel de salinidad y el crecimiento de especies vegetales.

Tabla 5

Clasificación de suelos salinos o alcalinos

Clases	Descripción
No salino	Menor de 2 dS/m: no representan una restricción significativa para el crecimiento de especies vegetales sensibles.
Muy ligeramente salino	2 a 4 dS/m: representan una restricción para el crecimiento de especies vegetales sensibles.
Ligeramente salino	4 a 8 dS/m: inhiben el desarrollo de las especies vegetales sensibles; sin embargo, sí permite el desarrollo normal de especies vegetales tolerantes.
Moderadamente salino	8 a 16 dS/m: permiten el desarrollo de especies tolerantes.
Fuertemente salino	Mayor de 16 dS/m: permiten sólo el desarrollo de especies muy tolerantes.

Nota: Adaptado del D.S. N° 005-2022-MIDAGRI.

Presencia de fragmentos rocosos

Según el D.S. N° 005-2022-MIDAGRI, los fragmentos rocosos se deben a la presencia de gravas y piedras en el perfil edáfico, cuyos diámetros se encuentran entre 2 mm y 60 cm. Según Weil y Brady (2017), la presencia en grandes cantidades de fragmentos rocosos, pueden dificultar labores como el arado, la siembra, la aireación y, en general, el manejo del suelo. En la Tabla 6, se presenta la clasificación de fragmentos rocosos en base al porcentaje presente por volumen de suelo.

Tabla 6

Clasificación de fragmentos rocosos

Clases	Descripción
Libre	Contiene menos del 5 % de fragmentos rocosos
Ligeramente	Contiene menos del 15 % de fragmentos rocosos
Moderadamente	Contiene de 15 a 35 % de fragmentos rocosos
Fuertemente	Contiene de 35 a 60 % de fragmentos rocosos
Muy fuertemente	Contiene más de 60 % de fragmentos rocosos

Nota: Adaptado del D.S. N° 005-2022-MIDAGRI.

Contenido de materia orgánica

Porta et al. (2019), precisa que la materia orgánica es una combinación de microorganismos y restos de tejidos de vegetales con productos derivados de su transformación y descomposición, que incluye sustancias húmicas de síntesis y millones de organismos vivos. Su presencia y concentración en el suelo están influenciadas por diversos factores, entre los que se incluyen: vegetación, clima, organismos del suelo, drenaje y la textura del suelo. En la Figura 5, se presenta dos casos particulares, en la mano izquierda se muestra un suelo con abundante presencia de materia orgánica, incluidas las raíces de las plantas, contribuye a generar condiciones físicas favorables para el crecimiento tanto de plantas superiores como de microorganismos; y en la mano derecha se presenta un suelo con bajo contenido de materia orgánica, especialmente aquellos con alto contenido de limo y arcilla, suelen ser terronosos y no adecuados para un desarrollo óptimo de las plantas.

Figura 5

Ejemplo de los colores presentados en un perfil edáfico



Nota: Tomado de (Weil y Brady, 2017).

2.1.3 Características y calidad del topsoil

Características del topsoil

Según Kumar (2013), el *topsoil* es la capa de suelo con mayor contenido de nutrientes, presencia de desarrollo radicular y de microorganismos, debido a que, toda la

actividad microbiana que ayuda a mejorar el crecimiento de las plantas se encuentra presente en esta capa, tales como: lombrices, insectos, bacterias, hongos, entre otros.

Por lo general, el *topsoil* tiene una profundidad de 30 cm, a partir de donde se aprecian otras capas de suelo que inhiben el crecimiento de la raíz, tal como roca madre, material con alta pedregosidad o alto contenido de arcillas. Este mismo autor, precisa que las propiedades del *topsoil* se encuentran directamente relacionados por un lado por el clima, que es un factor dominante incluso desde la formación del *topsoil*, cuyos principales indicadores son la temperatura, humedad, radiación, velocidad y dirección viento.

Por otro lado, la vegetación es un factor contribuye de varias maneras en la formación de las características del *topsoil*, por ejemplo, cuando las raíces se van introduciendo en el suelo mejoran la porosidad y la aireación; que permiten aumentar su capacidad de retención de agua. Por otro lado, las hojarascas, ramas y tallos en descomposición son transformadas en materia orgánica y con ello aportan nutrientes al suelo.

Calidad del *topsoil*

Según Koenig e Isaman (2010), en caso se requiera predecir la calidad del *topsoil* en campo, se pueden tomar en cuenta los siguientes criterios:

- Si los suelos presentan colores claros, es porque potencialmente tengan una alta salinidad y esto no es recomendable para el crecimiento de la vegetación. En cambio, si el suelo presenta un color marrón oscuro o negro, esto indica que el suelo contiene materia orgánica.
- Si al tomar un puñado de suelo este se vuelve duro, esto podría indicar que tiene un bajo contenido de materia orgánica o un contenido alto de arcilla.

Para evaluar el cambio en la calidad del *topsoil* a lo largo del tiempo debe considerarse su calidad inicial (según lo establecido en la línea base del proyecto). Sin embargo, Koenig e Isaman (2010) ha categorizado la calidad del *topsoil* tal como se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7*Categorías de la calidad del topsoil según características fisicoquímicas*

Categorías	Conductividad (dS/cm)	pH	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural	M.O. (%)	F.G. (%)
Ideal	< 2	5,5 a 7,5	< 70	< 70	< 30	Fr, FrL	≥ 2	≤ 2
Aceptable	< 4	5,0 a 8,2	< 70	< 70	< 30	FrArA, FrA, FrAr y FrArL	≥ 1	2,1 a 5
Inaceptable	> 4	< 5,0 y > 8,2	> 70	> 70	> 30	AFr, ArA, ArL, A, L y Ar	< 1	> 5

Nota: A= arena, AFr=arena franca, FrA=franco arenoso, FrAr=franco arcilloso, Fr=franco, FrL=franco limoso, L=limoso, FrArA= franco arcillo arenoso, FrArL=franco arcillo limoso, ArA= arcillo arenoso, ArL=arcillo limoso, Ar=arcilloso; M.O.=materia orgánica, FG=fragmentos gruesos. Tomado de (Koenig e Isaman, 2010).

Según este autor la calidad del *topsoil* se puede evaluar en base a parámetros como conductividad, pH, fracciones de textura, contenido de materia orgánica y porcentaje de fragmentos gruesos que puede haber en el suelo. Asimismo, en la Tabla 8, se presentan las concentraciones de nutrientes para una calidad de *topsoil* aceptable.

Tabla 8*Niveles aceptables de nutrientes en topsoil*

Categorías	Nitrato-Nitrógeno (mg N/kg de suelo)	Fósforo (mg P/kg de suelo)	Potasio (mg K/kg de suelo)	Hierro (mg Fe/kg de suelo)
Aceptable	> 20	> 15	> 150	> 10

Nota: Tomado de (Koenig e Isaman, 2010).

Cabe precisar que, dependiendo del uso que se destine a las zonas cerradas (luego de la etapa de post cierre), puede tomarse como referencia el D.S. N° 011-2017-MINAM, que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. Por ejemplo, si estas zonas revegetadas serán utilizadas como áreas recreativas o turísticas, es importante que se demuestre que las concentraciones de metales pesados se encuentren por debajo de los estándares vigentes.

Relación entre el pH y la calidad del *topsoil*

Soil Quality Knowledge Base (s.f.) menciona que el pH del suelo es un indicador fundamental de su calidad, ya que regula tanto la disponibilidad de nutrientes como la toxicidad de ciertos elementos, la actividad biológica y el desarrollo de las raíces. Cuando

el *topsoil* presenta un pH menor a 5,5, puede verse afectado por múltiples limitaciones funcionales, que se ven reflejados en deficiencias de elementos esenciales como fósforo, magnesio y calcio, además de una menor disponibilidad de micronutrientes.

Asimismo, se puede presentar un desarrollo limitado del sistema radicular, con raíces cortas y engrosadas, y una disminución notable de la actividad microbiana. En situaciones extremas ($\text{pH} < 4$), la presencia de suelos sulfatados ácidos representa un riesgo adicional para la estabilidad biogeoquímica del *topsoil*. Por otro lado, un pH alcalino (mayor a 8,3) puede estar asociado a la presencia de carbonato de calcio o compuestos tóxicos como el carbonato de sodio, que alteran el equilibrio químico del suelo. Además, suelos con pH muy alto suelen presentar problemas físicos como sellado o encostramiento superficial debido al exceso de sodio, lo cual afecta negativamente la infiltración de agua y la aireación. También se identifican deficiencias de zinc, toxicidad por boro y nuevamente una reducción de la actividad microbiana. En su conjunto, estos efectos comprometen la funcionalidad del suelo, especialmente en contextos de restauración o revegetación. Por tanto, para que un *topsoil* sea considerado de calidad adecuada para procesos de recuperación de áreas degradadas o cierre de componentes mineros, debería presentar un pH moderado, dentro del rango óptimo de 5,5 a 8,3, donde se maximizan las condiciones edáficas favorables para el desarrollo vegetal y la actividad biótica.

Esto concuerda con lo señalado por el MINEM (2007), el cual establece que, en caso de utilizarse el *topsoil* como cobertura de cierre, si presenta un pH menor a 5,5 es probable que el suelo tenga deficiencia de nitrógeno y fósforo; y por esta razón se debe corregir mediante la aplicación de enmiendas calcáreas (caliza y dolomita) con la finalidad de favorecer el crecimiento de las plantas y de los microorganismos.

2.1.4 Contaminación de suelo

Según Weil y Brady (2017) actualmente se estima que la toxicidad de las sustancias inorgánicas liberadas al ambiente supera a la generada por fuentes orgánicas y radiactivas combinadas. Las principales sustancias inorgánicas que contaminan al suelo son el mercurio, cadmio, plomo, arsénico, entre otros.

Según Doménech (2014), los contaminantes aportados por la actividad antropogénica corresponden a una contaminación exógena, que es distinta de la endógena, la cual se produce en el mismo sistema natural a causa de un desequilibrio que da lugar al incremento de la concentración en algún componente natural, alcanzando niveles que pueden originar la aparición de problemas ambientales. El desequilibrio que da lugar a la aparición de contaminación endógena puede ser debido a causas naturales o bien puede ser intensificada por la actividad humana. Ejemplos de causas de contaminación endógena son:

- Procesos de meteorización, los cuales pueden liberar elementos tóxicos, como arsénico o cationes de metales pesados, los cuales pasan a la disolución del suelo y contaminan acuíferos o corrientes superficiales.
- Precipitaciones ácidas que provocan la liberación de aluminio de los aluminosilicatos o de cationes metálicos adsorbidos.
- Oxidación de suelos piríticos, los cuales originan una elevada acidez en los lixiviados.
- Sodificación de suelos áridos a causa de una climatología seca, lo cual da lugar a la presencia de un exceso de iones sodio en la disolución del suelo.
- Procesos anaerobios en sistemas con déficit de oxígeno, que originan la producción de gases reductores y la formación de cationes metálicos en su estado reducido, los cuales son más solubles y se movilizan a través del medio acuático.

Presencia de metales pesados en el suelo:

García et al. (2002) define a los metales pesados como elementos de naturaleza metálica que se caracterizan por poseer un peso específico superior a 5 g/cm^3 o un número atómico mayor a 20. Además de sus propiedades fisicoquímicas, estos elementos son considerados contaminantes ambientales debido a su toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación. Su presencia en el suelo suele estar asociada principalmente a actividades de origen antropogénico, aunque también puede depender del tipo de roca

madre o material parental que dio origen al material edáfico, influyendo directamente en la concentración natural de dichos metales.

En el suelo, los metales pesados pueden encontrarse en diversas formas: como iones libres en la solución del suelo, adsorbidos sobre partículas coloidales, formando complejos solubles con materia orgánica o como precipitados en la fracción sólida. Esta diversidad de formas determina su movilidad, biodisponibilidad y potencial toxicidad dentro del ecosistema edáfico. En los procesos de adsorción y desorción en el suelo, la presencia de materia orgánica y óxidos de hierro y magnesio desempeña un papel crucial, ya que estos componentes facilitan la retención de metales pesados mediante grupos hidroxilo, que actúan como sitios activos de enlace.

La estabilidad de los complejos formados entre la materia orgánica y los metales pesados se incrementa con el aumento del pH, dado que una mayor ionización de los grupos funcionales favorece la formación de enlaces más estables. Sin embargo, al complejarse con los metales, la materia orgánica puede liberar protones (H^+), generando una disminución del pH. Estas condiciones ácidas pueden favorecer la movilización de los metales hacia formas solubles, lo que incrementa su biodisponibilidad y, en consecuencia, su potencial de contaminación. En la Tabla 9, se describen la movilidad de metales pesados según el pH.

Tabla 9

Movilidad de elementos traza activos en función del pH

Asociaciones geoquímicas en suelos	Prácticamente inmóviles	Moderadamente móviles	Fácilmente móviles
Ácido (pH < 5,5)	Mo	Pb ²⁺ , Cr ³⁻⁶⁺ , Ni ²⁻³⁺ , V ⁵⁺ , As ³⁺ , Co ²⁻³⁺	Sr, Ba, Cu, Zn, Cd, Hg
Neutro o debilmente ácido (pH 5,5 a 7,5)	Pb	Sr, Ba, Cu, Cd, Cr ³⁻⁶⁺ , Co ²⁻³⁺ , Mo ⁴⁺	Zn, V ⁵⁺ , As ⁵⁺
Alcalino o fuertemente alcalino (pH 7,5 a 9,5)	Pb, Ba, Co	Zn, Ag, Sr, Cu, Cd	Mo ⁶⁺ , V ⁵⁺ , As ⁵⁺

Nota: Pb = plomo, Cr = cromo, Ni = níquel, V = vanadio, As = arsénico, Co = cobalto, Sr = estroncio, Ba = bario, Cu = cobre, Cd = cadmio, Mo = molibdeno, Zn = zinc, Ag = plata y Hg = mercurio. Adaptado de (García et al., 2002)

Porta et al. (2019), menciona que la distribución de estos elementos traza que existen en la naturaleza, entendiéndose traza como soluciones en muy baja concentración, estará condicionado por el fondo geoquímico del suelo, ósea de la roca madre, y por aportes de actividades humanas que se han llevado a lo largo de un periodo determinado. Además, esta distribución varía en función de la profundidad u horizonte de la movilidad del elemento, ya que estos elementos con un potencial contaminante pueden encontrarse solubles, adsorbidos en sus formas intercambiables o precipitados. Las reacciones que se pueden dar en el suelo, por la presencia de estos elementos, pueden ser del tipo de hidrólisis, redox que pueden tener consecuencias nocivas para la calidad del suelo.

Según Galán y Romero (2008), en zonas de actividad minera, especialmente en áreas de explotación y procesamiento de menas metálicas, los suelos superficiales tienden a acumular concentraciones elevadas de metales pesados como Cu, Ni, As, Se, Cd y Fe, entre otros. Esta acumulación está directamente asociada a la liberación de metales por oxidación de sulfuros, contenidos en los residuos generados durante la extracción y beneficio del mineral; y dicha oxidación produce un flujo constante de elementos tóxicos hacia el ambiente edáfico, alterando su composición y funcionalidad.

2.1.5 Estadística univariada para el análisis de exploración de datos

Variable aleatoria

Mendenhall et al. (2010) menciona que una variable se considera aleatoria cuando los valores que puede asumir están determinados por el resultado incierto de un experimento, es decir, cada valor corresponde a un evento cuya ocurrencia está sujeta al azar y puede describirse mediante una probabilidad. Además, la distribución de esta probabilidad se representa mediante gráficas, tablas o fórmulas.

Estadísticos descriptivos

Los estadísticos descriptivos relacionados a un análisis univariante son la mediana, los cuantiles y la varianza. La mediana corresponde al valor central de un conjunto de datos una vez que estos han sido organizados en orden ascendente o descendente, dividiendo la distribución en dos mitades de igual frecuencia.

Respecto a los cuantiles (q), estos representan los valores a partir de los cuales se deja por debajo de la distribución a un determinado porcentaje de las muestras; para poder identificar estos valores es necesario que las medidas estén ordenadas de menor a mayor.

Por otro lado, la varianza (σ^2) es la media aritmética del cuadrado de las desviaciones respecto a la media de una distribución estadística e indica la dispersión de las muestras respecto a su media.

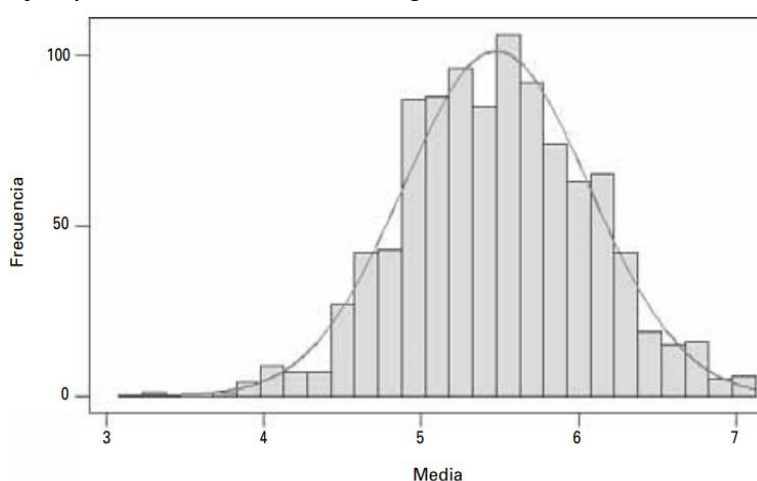
Gráficos exploratorios

Los gráficos exploratorios de un análisis univariante son principalmente el histograma y el diagrama de cajas y bigotes. Respecto a los histogramas, según Newbold et al. (2008), es una representación gráfica compuesta por barras verticales que se ubican sobre una línea horizontal dividida según los intervalos de la variable analizada. Estos intervalos coinciden con los utilizados en una tabla de frecuencias y la altura de cada barra refleja la cantidad de datos que se encuentran dentro de ese intervalo.

En la Figura 6, se presenta un ejemplo del diseño de un histograma en donde se ve que en el eje X se encuentra la media de los intervalos evaluados y en el eje Y se ve la frecuencia de los datos.

Figura 6

Ejemplo del diseño de un histograma



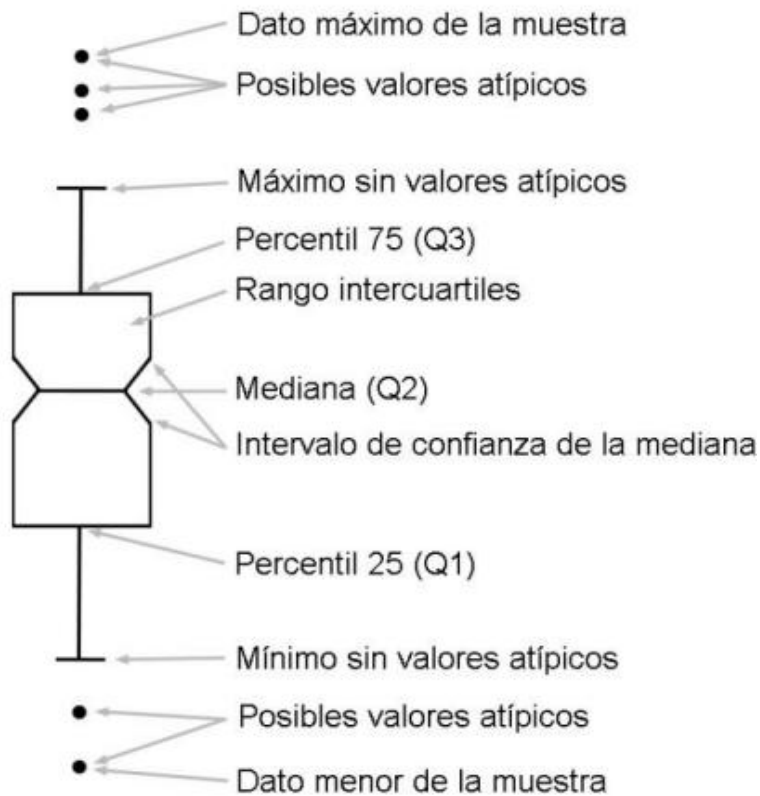
Nota: tomado de (Newbold et al., 2008).

Los diagramas de cajas y bigotes, según Walpole et al. (2012), permite visualizar el rango intercuartílico, la mediana, la variabilidad y la asimetría de los datos que facilita la

identificación de valores extremos (ver Figura 7), que son datos anómalos que podrían perjudicar el análisis en caso se deba a algún error durante el proceso; además, un criterio común para detectar valores extremos es que se ubiquen a más de 1,5 veces el rango intercuartílico desde la caja.

Figura 7

Composición de un diagrama de cajas y bigotes



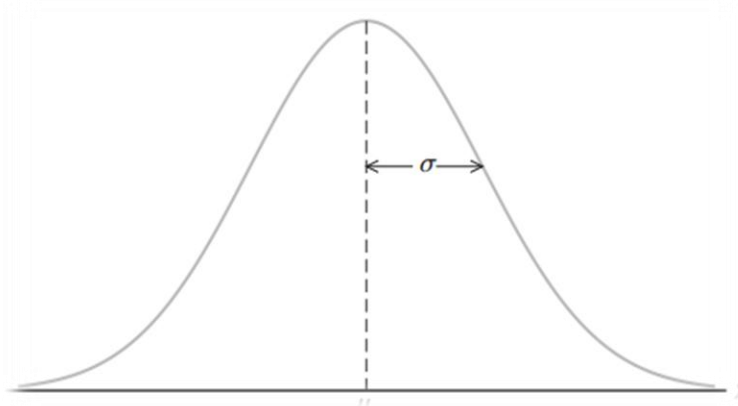
Nota: tomado de (Ávila y Ramírez-Arrieta, 2020).

Distribución normal o Gaussiana

Según Walpole et al. (2012), la distribución normal, también denominada distribución de Gauss, es una de las funciones de probabilidad más relevantes en estadística. Describe el comportamiento de una variable continua cuyos valores se agrupan simétricamente en torno a la media, formando una curva con forma de campana, tal como se ve en la Figura 8. Esta distribución se caracteriza por dos parámetros: la media (μ), que determina la ubicación del centro, y la desviación estándar (σ), que controla la dispersión de los datos.

Figura 8

Representación gráfica de una distribución normal



Nota: extraído de (Walpole et al., 2012).

Según Ghasemi y Zahediasl (2012), para tamaños de muestra menores a 50 se recomienda utilizar la prueba de normalidad Shapiro Wilk, en donde, si el p valor es mayor a 0,05 los valores tienen un comportamiento normal. Cabe precisar que el p valor de esta prueba es el resultado de contrastar la hipótesis nula (H_0 : los datos provienen de una distribución normal) contra la hipótesis alternativa (H_1 : los datos no provienen de una distribución normal), y según Shapiro y Wilk (1965) se calcula bajo la Ecuación N° 01.

$$W = \frac{(\sum_{i=0}^n a_i * x_{(i)})^2}{\sum_{i=0}^n (x_i - \theta)^2} \dots\dots\dots (N^\circ 1)$$

Nota: $x_{(i)}$ = los valores ordenados de la muestra (de menor a mayor), θ = la media de la muestra, a_i = coeficientes calculados en función de los valores esperados y covarianzas de los estadísticos de orden de una distribución normal y n = tamaño de la muestra. Tomado de (Shapiro y Wilk, 1965).

En aplicaciones de la geoestadística, es común encontrar datos que no siguen una distribución normal, lo cual puede afectar la precisión de las estimaciones obtenidas mediante métodos como el *kriging* ordinario, que se ve reflejado en el grado de incertidumbre de los resultados. Para abordar este problema, según Giraldo (2014), se pueden ejecutar transformaciones logarítmicas (por ejemplo, log base 10) que permiten estabilizar la varianza y aproximar los datos a una distribución normal; esta transformación mejora la aplicabilidad de los modelos geoestadísticos y reduce las incertidumbres de las predicciones espaciales.

2.1.6 Geoestadística

González et al. (2007), afirma que la geoestadística es una es una herramienta valiosa para describir la variación de propiedades en un espacio determinado para conocer el nivel de influencia de un carácter, estimar el valor en espacios donde no hay información. Además, esta herramienta permite obtener la precisión de la estimación realizada gracias a la cuantificación de los errores asociados al cálculo.

Referente al ámbito de aplicación, Díaz (2002), afirma que la geoestadística ha sido empleada en diversos proyectos científicos e ingenieriles relacionados a la minería, procesamiento de imágenes, cartografía, edafología, etc. A continuación, se listan las aplicaciones más comunes según la especialidad:

- Minería: Modelización geológica del yacimiento, evaluación de recursos y reservas de un yacimiento.
- Hidrogeología: Modelización de un acuífero, migración de especies acuáticas y terrestres.
- Ingeniería ambiental: cartografías geoquímicas, estudios de impacto ambiental, estimación de suelos contaminados.

Respecto a la aplicación de la estimación de suelos contaminados, la geoestadística es una herramienta mucho más precisa que las convencionales como el polígono de Thiessen y el inverso del cuadrado de las distancias; ya que estos últimos no tienen en cuenta la distribución espacial de los datos recopilados. Además, con la geoestadística sí se pueden cuantificar los errores e incertidumbres asociadas a las estimaciones realizadas, que complementan mejor todo el análisis.

Variable regionalizada

Díaz (2002) precisa que la variable regionalizada es una variable que se encuentra distribuida en el espacio de tal forma que tiene una estructura espacial de correlación. Del Olmo (2020), precisó las siguientes características para una variable regionalizada.

- **Localización:** la variable regionalizada se encuentra geográficamente definida, es decir, está asociada a una posición específica en el espacio, lo que implica que sus características dependen directamente del lugar donde se registra y no pueden extrapolarse arbitrariamente a otras ubicaciones.
- **Continuidad:** se refiere al grado en que los valores de una variable regionalizada muestran consistencia o conexión espacial. En muchos casos, esta continuidad puede ser parcial o inexistente, con una distribución espacial irregular y discontinua. Cuando la variabilidad es tan elevada que no se aprecia una estructura espacial clara, se identifica como efecto pepita o *nugget*. Un ejemplo típico en el análisis de suelos es la concentración de metales pesados de origen antrópico, cuyos patrones espaciales pueden carecer de una correlación evidente.
- **Anisotropía:** este fenómeno se manifiesta cuando la variabilidad espacial de una variable regionalizada no es uniforme en todas las direcciones. La anisotropía puede responder a influencias geológicas, geomorfológicas o antrópicas que generan una distribución direccional diferenciada, lo que hace necesario incorporar dicha condición en el modelamiento geoestadístico.

Función de covarianza

Según Del Olmo (2020), la función de covarianza espacial describe el grado de similitud entre los valores de una variable regionalizada en puntos separados por una distancia definida por el vector h . En general, se espera que a distancias cortas (valores pequeños de h), los puntos presenten una mayor similitud o covarianza, la cual disminuye conforme aumenta la separación espacial, debido a que los puntos pueden pertenecer a zonas con distintas influencias ambientales o fuentes de contaminación.

Cuando los puntos se ubican dentro de una misma fuente de contaminación, sus valores suelen ser similares y, por tanto, la covarianza es alta. A distancias intermedias, la comparación puede involucrar puntos tanto dentro como fuera de zonas contaminadas, lo que reduce la covarianza. A grandes distancias, la correlación puede desaparecer completamente si los puntos se encuentran en contextos ambientales diferentes. La

función de covarianza se define como la medida de la relación entre los valores de la variable en una ubicación y aquellos en ubicaciones desplazadas por un vector h .

En contraste, el variograma representa la variabilidad o disimilitud entre esos puntos. Así, mientras la covarianza cuantifica la similitud, el variograma expresa la diferencia; por ello, este último se considera conceptualmente como la inversa de la función de covarianza. En geoestadística, se emplea con mayor frecuencia el variograma, debido a su facilidad para ser representado y ajustado mediante modelos teóricos.

Variograma

Londoño y Valdés (2012) afirma que el variograma es una función monótona creciente que alcanza un valor máximo conocido como meseta que equivale a la varianza de las muestras, que permite hacer un análisis de continuidad espacial de la variable que se encuentre en estudio. Para el análisis de variables aleatorias, el variograma se define bajo la siguiente Ecuación N° 2:

$$\gamma(x + h, x) = \gamma(h) = \frac{1}{2} * E\{(Z(x + h) - Z(x))^2\} \dots\dots\dots (N° 2)$$

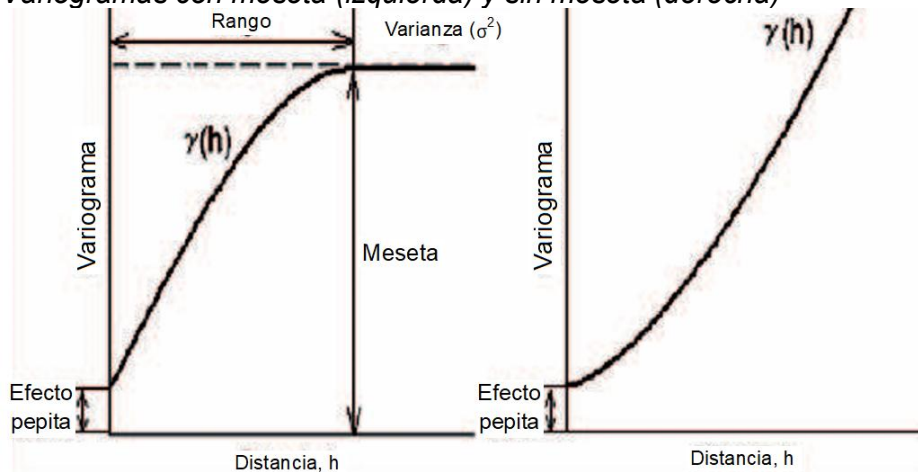
Nota: $\gamma(h)$ = variograma para la distancia h , x = coordenada en el dominio donde se mide la variable, h = es la distancia (o *lag*) que separa dos puntos espaciales, $Z(x)$ y $Z(x + h)$ = es el valor de la variable aleatoria que está estudiando en el punto x y $x + h$, E = es el valor esperado, el promedio teórico de todas las diferencias cuadradas para cada h , representa una media estadística en todos los pares de puntos separados por la misma distancia. Tomado de (Londoño y Valdés, 2012).

Estos autores también precisan que el variograma indica como cambian los valores de una propiedad cuando los puntos están más lejos entre sí, si dos puntos están cerca, es muy probable que tengan valores parecidos, si dos puntos están más lejos los valores pueden cambiar más; por ello el variograma mide ese cambio promedio según la distancia. A medida que la distancia aumenta (eso es el valor de h), la relación entre los puntos disminuye, hasta que ya no hay relación: es decir, los valores se comportan como si fueran al azar. A esa distancia se le llama el rango. La meseta tiene un alcance de valor h que es conocido, también llamado rango o alcance, que determina la zona de influencia en el entorno de un punto. Cabe precisar que no todos los variogramas alcancen una asíntota igual a la varianza, sino que tienda al infinito como así tienda el valor de h , tal como se ve en la Figura 9. Por teoría, el variograma en el origen es cero, pero con frecuencia muestra

un valor positivo (discontinuidad en el origen), lo que da lugar al efecto pepita (*nugget*). Este se debe a la variabilidad a una distancia h más pequeña que la menor distancia considerada que se puede deber principalmente a errores experimentales o de muestreo. Por otro lado, existen variogramas que tienden a la horizontalidad, que indica ausencia de una estructura espacial, lo que se conoce como efecto pepita puro; sin embargo, existen algunas variables ambientales que cambian dependiendo de la dirección considerada por el análisis (existe anisotropía) y es así como para esos casos se deben emplear variogramas que dependen no solamente de h , sino también de la dirección.

Figura 9

Variogramas con meseta (izquierda) y sin meseta (derecha)



Nota: Tomado de (Londoño y Valdés, 2012).

Variograma experimental

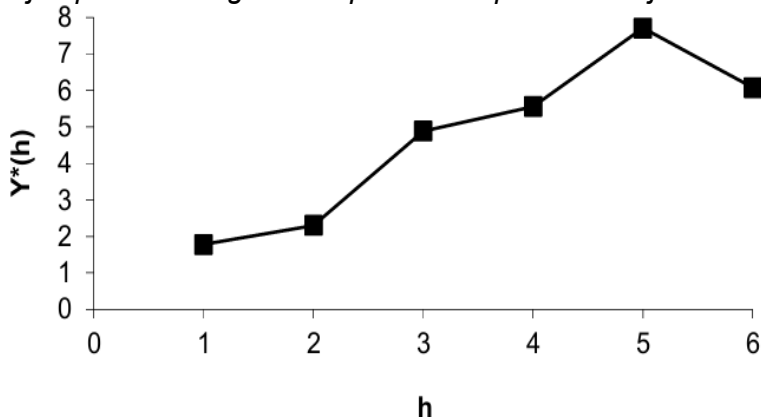
Londoño y Valdés (2012) precisa que los variogramas experimentales se grafican a partir de los datos, utilizando la siguiente Ecuación N° 3 y en la Figura 10 se presenta un ejemplo de aplicado a un conjunto de datos.

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [(Z(x_i + h) - Z(x_i))]^2 \dots\dots\dots (N^\circ 3)$$

Nota: $\gamma^*(h)$ = variograma experimental, x = es una posición espacial o coordenada en el dominio donde se mide la variable, h = es la distancia (o lag) que separa dos puntos espaciales, $Z(x)$ y $Z(x + h)$ = son valores experimentales en los puntos (x_i) y $(x_i + h)$, $N(h)$ = es el número de pares de puntos separados por una distancia h . Tomado de (Londoño y Valdés, 2012).

Figura 10

Ejemplo de variograma experimental para un conjunto de datos



Nota: Tomado de (Londoño y Valdés, 2012).

Cabe precisar que este tipo de variograma no debería ser utilizado como insumo para realizar interpolación (del tipo *kriging* ordinario), ya que para ello se requeriría generar un variograma teórico, el cual se explica a continuación.

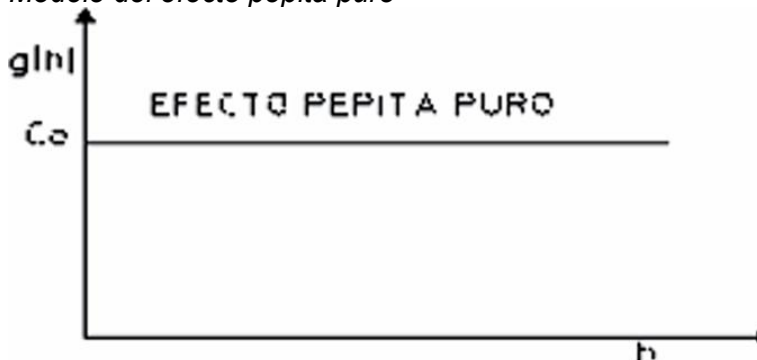
Variograma teórico

Una vez que se construye un variograma experimental, se ajusta a un variograma teórico en base a modelos, tal como se describen a continuación:

- Efecto pepita puro: Londoño y Valdés (2012) precisa que este efecto se usa para modelar fenómenos sin correlación espacial y gráficamente se representa según la Figura 11.

Figura 11

Modelo del efecto pepita puro



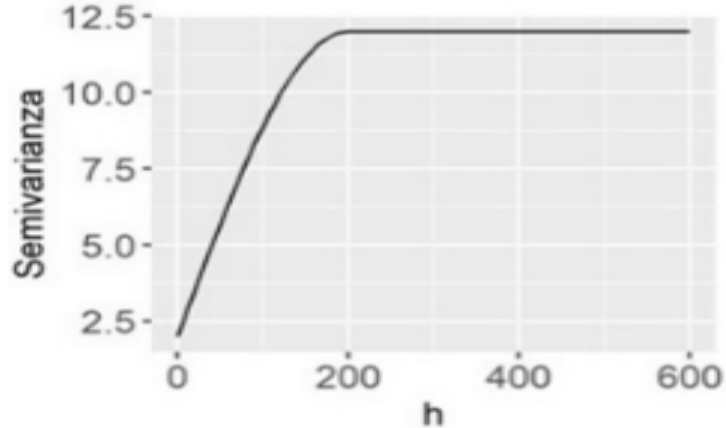
Nota: extraído de (Londoño y Valdés, 2012).

- Modelo esférico: Córdova et al. (2019) afirma que este tipo de modelo es de los más utilizados para modelar variogramas experimentales. Además, presenta dos

características principales: un comportamiento lineal cerca del origen de coordenadas y que la distancia del variograma encuentra la meseta y después se mantiene constante (llano); tal como se observa en la Figura 12.

Figura 12

Función de variograma para el modelo esférico

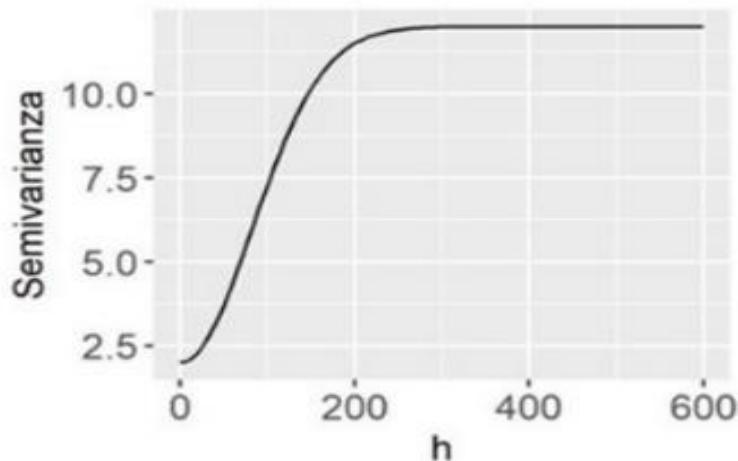


Nota: Tomado de (Córdova et al., 2019).

- Modelo exponencial: Córdova et al. (2019) precisa que el modelo exponencial se aproxima a la meseta del variograma de manera asintótica a medida que la distancia h tiende al infinito. Comparado con el modelo esférico, y considerando un mismo valor de rango y meseta, el modelo exponencial alcanza valores próximos a la meseta en distancias menores, lo que implica que refleja una disminución más rápida de la correlación espacial con la distancia; tal como se ve en la Figura 13.

Figura 13

Función de variograma para el modelo exponencial



Nota: Tomado de (Córdova et al., 2019).

A continuación, se precisa la definición de los pasos (o *lags*), tolerancia del paso y anisotropías, tal como sigue:

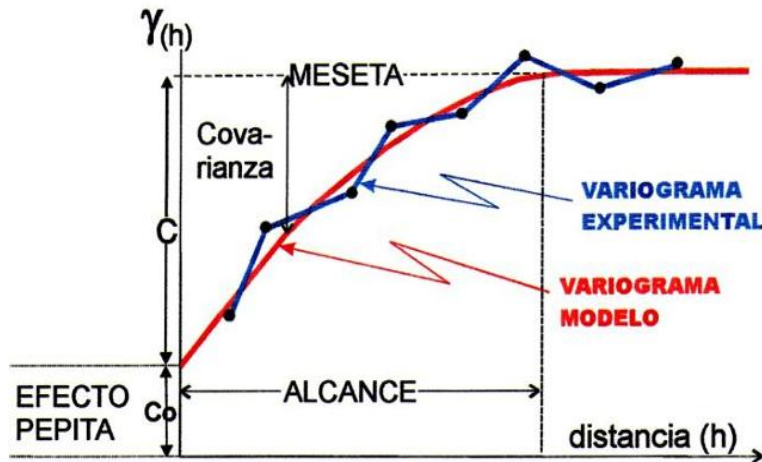
- Paso (o *lag*): según ITRC (2016), el valor del *lag* puede calcularse tomando el promedio de las distancias entre los puntos de muestreo. A medida que la distancia entre las muestras se incrementa, la confiabilidad de las estimaciones disminuye. Por ello, una regla general es que la distancia máxima del *lag* no debe exceder la mitad de la distancia máxima entre muestras.
- Tolerancia del paso: Según Del Olmo (2020), se establece como la mitad del valor asignado al intervalo de separación o pasos entre datos (*lag*), con el fin de permitir una agrupación adecuada de los pares de datos dentro de cada clase de distancia.
- Anisotropías: Según Del Olmo (2020), cuando la dispersión de la variable analizada varía según la dirección en el espacio, es necesario establecer direcciones específicas de referencia para cada vector $x+h$, con el fin de capturar adecuadamente la estructura espacial direccional del fenómeno.

Los parámetros para la modelización del variograma experimental, tal como se ve en la Figura 14 y se describe a continuación:

- Efecto pepita (C_0): Según Emery (2013), un efecto pepita bajo refleja una mayor continuidad espacial entre las muestras cercanas, mejora la precisión en los resultados de interpolación.
- Meseta: es el valor de la varianza total que se alcanza cuando el efecto pepita deja de incrementarse, permaneciendo constante con el aumento de la distancia. Este valor representa la varianza total del fenómeno espacial analizado y se obtiene como la suma del efecto pepita (C_0) y el salto de meseta (C), es decir, $C_0 + C$.
- Rango o alcance: corresponde a la distancia a partir de la cual se considera que dos puntos comparados dejan de tener correlación espacial entre ellos. El variograma se estabiliza y alcanza su valor máximo de varianza, la cual se mantiene constante para cualquier valor de h . Lo más recomendable es que el valor del rango no supere en $2/3$ del tamaño total de la zona estudiada.

Figura 14

Representación gráfica de un variograma experimental y teórico



Nota: El variograma experimental equivale a variograma experimental y el variograma modelo equivale al variograma teórico. Tomado de (Puga, 2021).

Según Cambardella et al. (1994), la relación entre el efecto pepita (*nugget effect*) y la meseta total (*sill*) en un variograma permite interpretar el grado de dependencia espacial. Una baja proporción de nugget indica que la mayor parte de la variabilidad es explicada por la estructura espacial y no por errores de medición, en donde una relación *nugget effect/sill* menor al 25 % evidencia una fuerte dependencia espacial, lo que implica una alta continuidad entre los datos muestreados. Esta condición es ideal para aplicar técnicas de interpolación como *kriging*, ya que la información espacial puede ser estimada con mayor confianza.

Según Del Olmo (2020), si bien no existen reglas fijas para la modelización de un variograma experimental, se pueden seguir las siguientes recomendaciones para tener una curva experimental lo más cercana a la realidad:

- A la hora de elegir un efecto pepita, es conveniente que este valor no supere el 30 % del valor de la meseta y si se realizan variograma direccionales, lo más recomendable es tomar el efecto pepita de la dirección que esté mejor definida.
- En general, es recomendable que el valor total del alcance no exceda los dos tercios de la dimensión total del área evaluada, a fin de asegurar una representación adecuada de la estructura espacial de los datos.

- En caso se modelicen variogramas direccionales, es recomendable que se realicen modelizaciones consistentes en cada una de las direcciones escogidas.

Krigeado ordinario como técnica geoestadística

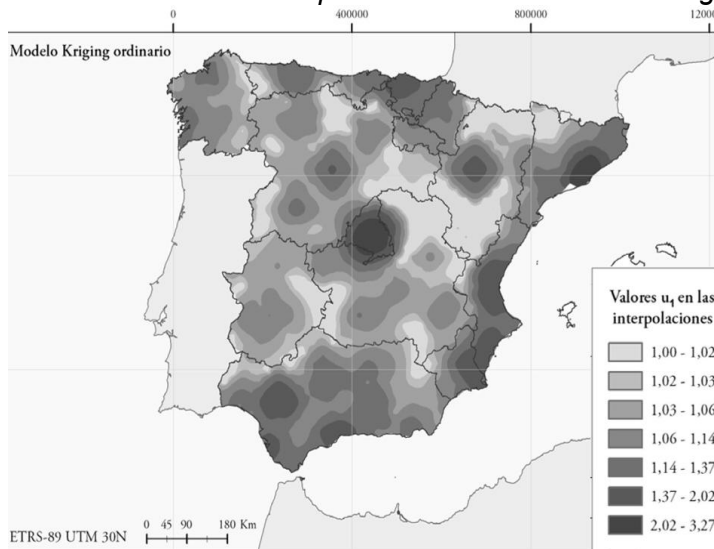
Según Londoño y Valdés (2012), el krigeado es una técnica geoestadística que permite estimar valores desconocidos a partir de datos conocidos, bajo el principio de que las observaciones más cercanas al punto a estimar ejercen una mayor influencia sobre su valor que aquellas más distantes. Además, afirma que el krigeado ordinario es uno de los procesos de estimación que existen y se basa en el conocimiento de las varianzas, representadas mediante variogramas, calculadas a partir de los datos obtenidos en los puntos de observación. A través de este análisis se infiere la correlación espacial entre los datos, lo cual se expresa mediante la Ecuación N° 4 y se puede representar gráficamente tal como se ve en la Figura 15:

$$Z_{KO}^*(u_o) = \sum_{i=1}^{n(u)} \lambda_{KO}^i Z(u_i) \dots\dots\dots (N^{\circ} 4)$$

Nota: Z_{KO}^* = representa el dato a estimar, λ_{KO}^i = representa a los pesos, $Z(u_i)$ = son los datos con los cuales se realiza la estimación. Tomado de (Londoño y Valdés, 2012).

Figura 15

Resultados de una interpolación con el método de kriging ordinario



Nota: Tomado de (García-Moruno y De La Riva-Fernández, 2019).

García-Moruno y De La Riva-Fernández (2019) precisa que el método de interpolación de *kriging* ordinario utiliza variogramas teóricos, que inicialmente fueron

variogramas experimentales que luego fueron ajustados a un modelo (esférico, exponencial, entre otros) para que puedan ser utilizados en el proceso de interpolación.

2.1.7 Cierre de minas y actividades involucradas

MINEM (2005), precisa que el cierre de minas se entiende como el conjunto de acciones planificadas e implementadas a lo largo del ciclo de vida del proyecto minero, con el propósito de cumplir con los criterios ambientales establecidos y alcanzar los objetivos sociales. Las actividades que incluye se consideran desde el plan de cierre conceptual en la parte inicial del proyecto, actividades propias de cierre progresivo durante la operación, proyectos de investigación para determinar las mejores técnicas que formarán parte del cierre de mina, actualizaciones de los planes de cierre de mina y actividades de cierre final y post cierre que hayan sido declaradas en los instrumentos de gestión ambiental. Las actividades de cierre más importantes son la estabilidad geoquímica, manejo de aguas y revegetación mediante coberturas de *topsoil*. Dentro de las actividades cierre se encuentran principalmente el desmantelamiento y demolición de infraestructuras, actividades destinadas para la estabilidad física de los componentes que se planifican cerrar. Además, también se requieren actividades como estabilidad geoquímica, manejo de aguas y actividades de revegetación, que se describen a continuación.

Estabilidad geoquímica

Según Quispe (2020), las actividades de estabilización geoquímica durante los proyectos de cierre de mina están directamente relacionadas con el diseño de coberturas, las cuales están diseñadas de acuerdo la ingeniería de proyecto planteada. Schwarz (2018) precisa que la estabilización geoquímica a largo plazo es la operación más compleja durante un proceso de cierre de mina ya que implica analizar distintas reacciones que se generarán durante el contacto con componentes mineros y matrices ambientales (agua, aire, suelo, etc.) bajo distintas condiciones ambientales. La generación del agua ácida es el principal problema cuando se quiere realizar una estabilidad geoquímica, la cual aparece cuando tres componentes se juntan: agua, material generador de acidez y oxígeno.

Manejo de aguas

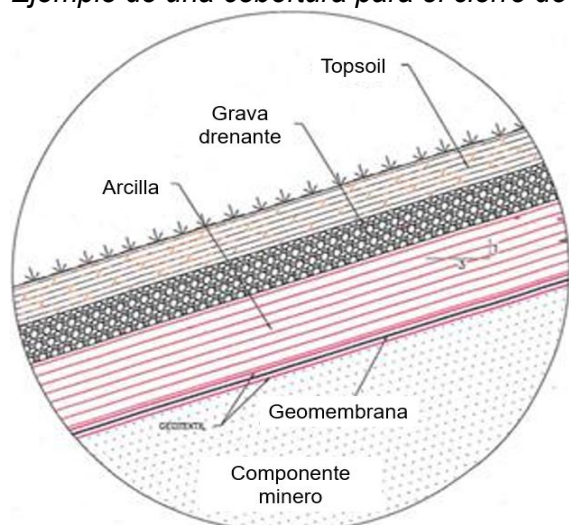
Con relación al manejo de aguas, Schwarz (2018) afirma que el desarrollo e implementación de obras e instalaciones hidráulicas e instalaciones hidrogeológicas principales y secundarias tales como pozas de captación, canales de coronación, aliviaderos, canales de derivación, etc. Todo diseño que se pueda tomar busca garantizar que el agua proveniente de las precipitaciones pueda tener el menor contacto posible con el material generador de acidez, ya que de esta manera se evita la infiltración que pueda contaminar componentes ambientales.

Actividades de revegetación

Referentes a las actividades revegetación, según Quispe (2020), el objetivo de colocar una cobertura para su posterior revegetación es poder devolver una capa vegetal de forma permanente a suelos que han sido impactados por actividades mineras, dando protección contra la erosión y previniendo la generación del drenaje ácido de roca mediante este aislamiento generado con la cobertura. Los criterios de diseño de cobertura van desde materiales simples como sólo utilizar material de desmonte (que no sea generador de acidez), hasta coberturas más complejas, tal como se ve en la Figura 16, que deben disminuir la infiltración y percolación hacia el material del componente minero a cerrar.

Figura 16

Ejemplo de una cobertura para el cierre de un componente minero



Nota: Se muestra un tipo cobertura que contiene *topsoil*, grava drenante y arcilla (material impermeable) y una geomembrana que cubre el componente minera (opcional). Adaptado de (Lagos y Fierro, 2024).

En la Figura 17, se presenta un ejemplo de actividades de revegetación en un depósito de desmonte en la mina Almadén en España, en donde en el círculo amarillo contiene zonas en donde se avanzaron los trabajos de perfilado de los taludes del componente minero y posteriormente se ejecutaron las actividades de revegetación.

Figura 17

Depósito de desmonte en revegetación (mina Almadén - España)



Nota: En la figura se incluyó un círculo con bordes amarillos, que presenta los avances de los trabajos de revegetación. Adaptado de (Pardo, 2020).

2.2 Marco conceptual

- Agua de contacto en minería: es toda aquella agua (proveniente de lluvia, escorrentía, filtraciones o procesos industriales) que ha tenido interacción con materiales potencialmente contaminantes expuestos debido a la construcción de componentes principales y auxiliares de compañías mineras, y que como consecuencia puede contener metales pesados, sedimentos o sustancias tóxicas.
- Depósito de *topsoil*: es el área o estructura donde se deposita el suelo superficial orgánico que ha sido retirado cuidadosamente del terreno original antes de realizar actividades que alteran el uso del suelo, con el propósito de conservar sus propiedades físicas, químicas y biológicas para su futura reincorporación durante las actividades de revegetación.
- Análisis de caracterización de suelo: es un análisis de parámetros fisicoquímicos que incluye la evaluación del potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica, textura, carbonatos, potasio, fósforo, capacidad de intercambio catiónico, materia

orgánica, entre otros. Estos parámetros permiten definir el nivel de fertilidad que tiene el suelo para fines de revegetación.

- *Azimuth*: Es el parámetro direccional que define la orientación horizontal del variograma dentro del espacio de estudio.
- *Bandwith*: Se refiere al ancho de la banda de tolerancia alrededor de la dirección del variograma que se utiliza para seleccionar los pares de datos que contribuyen al cálculo del semivariograma experimental.
- Barreno: herramienta que permite extraer muestras de suelos a diferentes profundidades, mediante movimientos de rotación sobre su propio eje.
- Cadena de custodia: Documento que contiene información del transporte, conservación y entrega de muestras de suelo al laboratorio para la realización de pruebas de análisis fisicoquímico.
- Calidad de suelos: Es la capacidad natural del suelo de cumplir diferentes funciones: ecológicas, agronómicas, económicas, culturales, arqueológicas y recreacionales. Es el estado del suelo en función de sus características físicas, químicas y biológicas que le otorgan una capacidad de sustentar un potencial ecosistémico natural y antropogénico.
- Canales de coronación: Se trata de canaletas ubicadas en la parte superior de los taludes, diseñadas para desviar el agua superficial proveniente de las zonas más elevadas en forma de escorrentía. Estas estructuras deben instalarse sobre la cobertura del terreno existente y, si se considera necesario tras una evaluación, pueden ser revestidas para mejorar su funcionalidad.
- Cierre final de minas: Etapa destinada a clausurar completamente todas las labores, zonas e instalaciones de una unidad minera que, por motivos operativos, no pudieron cerrarse durante la fase de producción o comercialización. Esta acción debe asegurar el logro de los objetivos establecidos en el Plan de Cierre de Minas aprobado, cuya correcta implementación ha sido confirmada mediante una auditoría integral realizada por la autoridad competente. Todo ello sin afectar la

continuidad de las actividades de post cierre, las cuales deben seguir desarrollándose conforme a la normativa ambiental vigente.

- Cierre progresivo: Son las acciones de rehabilitación que el titular de la actividad minera lleva a cabo de manera paralela al desarrollo de sus operaciones productivas, conforme al cronograma y a las condiciones previstas en el Plan de Cierre de Minas aprobado, el cual se ejecuta bajo la supervisión de la autoridad minera competente.
- *Dip*: Es el ángulo de inclinación vertical de la dirección del variograma.
- Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para Suelos: es el valor de referencia que determina la concentración o intensidad de ciertos elementos, compuestos o parámetros físicos, químicos y biológicos existentes en el suelo como medios receptores, y cuya presencia en dichos niveles no implica un riesgo considerable para la salud humana ni para el entorno natural. Dependiendo del parámetro evaluado, estos niveles pueden expresarse como valores máximos, mínimos o intervalos aceptables.
- *Liner*: Es un sistema de barrera física que se coloca en el fondo o en los taludes de depósitos mineros para evitar la filtración de contaminantes al suelo y aguas subterráneas.
- Monitoreo de calidad de suelos: es el proceso sistemático de evaluación del estado físico, químico y biológico del suelo mediante la recolección y análisis de muestras, con el fin de determinar su capacidad para mantener funciones ecológicas y productivas, identificar alteraciones o contaminaciones, y establecer medidas de manejo o remediación según estándares como los ECA para Suelo.
- Muestras compuestas: es una combinación de muestras simples, que han sido mezcladas y llevadas al laboratorio para su correspondiente análisis. Una vez que se ubica la estación de muestreo se establece un cuadrilátero en su entero, cuyos vértices se encuentran en su entorno cercano (la distancia depende de las condiciones del terreno) de donde se extraen muestras para hacer la respectiva

combinación; y una vez que se tiene la muestra mezclada se particiona para seleccionar la muestra compuesta que se analiza.

- Parámetros de calidad de suelos: son variables fisicoquímicas y biológicas que permiten evaluar la capacidad del suelo para cumplir funciones ecosistémicas, agrícolas y ambientales. Estos parámetros sirven como indicadores del estado del suelo, su fertilidad, su capacidad para sostener vida y su grado de alteración por actividades antrópicas.
- Post cierre: Son las actividades relacionadas con el tratamiento de afluentes y emisiones, así como las labores de monitoreo y mantenimiento que deben llevarse a cabo una vez finalizadas las tareas de rehabilitación, hasta que se confirme la estabilidad física y química del residuo o componente minero que podría generar impactos negativos. Estas actividades se desarrollan conforme a lo establecido en el Plan de Cierre de Minas aprobado por la autoridad competente. Cabe precisar que la ejecución de obras de ingeniería y la construcción de infraestructura para la rehabilitación ambiental no forman parte de la etapa de post cierre.
- Raspado de *topsoil* (*stripping*): consiste en el movimiento de tierras para la recuperación del *topsoil*, que luego es llevada un depósito exclusivo de este material.
- Rehabilitación: Es el proceso orientado a lograr que las áreas intervenidas o alteradas por los diversos componentes de la actividad minera alcancen una estabilidad física y química, así como la regeneración de las comunidades locales de flora y fauna. Este proceso debe asegurar que dichas zonas representen un riesgo mínimo para la salud humana y, en la medida de lo posible, presenten condiciones aptas para un uso futuro del suelo, ya sea con fines pasivos (como áreas forestales o de recreación) o productivos (como pastoreo o actividades forestales), entre otros aspectos que dependan de las particularidades del terreno.

- Software SGeMS: es un software de acceso libre que dispone de una interfaz gráfica que utilizaremos para el desarrollo de este proyecto. Esta interfaz contiene un gran número de posibilidades en cuanto a técnicas geoestadísticas se refiere.

2.3 Marco legal

- Ley N° 28090 que regula el Cierre de Minas y su Reglamento (incluyendo sus modificatorias): esta ley peruana y su reglamento fueron aprobados para regular las obligaciones y procedimientos que deben cumplir los titulares (minerías nuevas y en operación) de la actividad minera en la elaboración e implementación del Plan de Cierre de Minas con la finalidad de mitigar todos sus impactos negativos a la salud de la población y al ecosistema.
- Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelos: aprobado mediante D.S. N° 011-MINAM, precisa los estándares de calidad ambiental para suelo de uso agrícola, residencial / parques y comercial / industrial / extractivo para parámetros orgánicos como hidrocarburos aromáticos volátiles, hidrocarburos poliaromáticos, compuestos organoclorados y así también, establece estándares para parámetros inorgánicos como arsénico, bario total, cadmio, cromo total, cromo VI, mercurio, plomo y cianuro libre.
- Guía para el muestreo de suelos: esta guía fue generada en el marco del D.S. N° 002-2013-MINAM que aprobó los Estándares de Calidad de Suelos que fueron derogados por el D.S. N° 011-MINAM. La guía establece principalmente detalles para determinar la existencia de contaminación de suelos y para determinar la dimensión de la contaminación que se pudo haber generado en el suelo.
- Guía para la elaboración de planes de cierre de pasivos ambientales mineros: esta guía publicada en el año 2005 por el Ministerio de Energía y Minas del Perú proporciona un formato estándar para la preparación de los planes de cierre de pasivos ambientales mineros, que incluye la estimación de costos, así como actividades de rehabilitación, como la revegetación.

- Guía para el diseño de coberturas de depósitos de residuos mineros: esta guía publicada en el año 2005 por el Ministerio de Energía y Minas del Perú proporciona una metodología para la aplicación del sistema de coberturas para el cierre de depósitos de relaves y desmonte de mina, en donde se presentan lineamientos para el uso adecuado del *topsoil* como parte de la cobertura de cierre.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

Los trabajos operativos del proyecto de tesis se planificaron dentro de los límites de propiedad de la unidad minera de una compañía minera que brindó todos los permisos para llevar a cabo los trabajos de campo. El nombre y la ubicación de la compañía minera se mantiene en reserva, así como cualquier tipo de información georreferenciada.

La unidad minera acopió *topsoil* en varios depósitos ubicados dentro de su límite de propiedad, para que sean usados como cobertura de cierre de sus componentes mineros principales y auxiliares, durante la etapa de post cierre y cierre final. Uno de estos depósitos de *topsoil*, llamado en la presente tesis como “depósito de *topsoil* TS” fue escogido para ser estudiado, debido a su accesibilidad y grado de conservación. El *topsoil* almacenado en este depósito será utilizado como cobertura de cierre de los componentes principales de la unidad minera y presenta una profundidad de 3 m aproximadamente.

En el presente capítulo se describe la siguiente información: la funcionalidad de los controles aplicados en el depósito de *topsoil* TS, la ubicación del área de estudio, los parámetros críticos que definen la calidad del *topsoil* evaluado y la metodología considerada para la distribución y la cantidad de las estaciones de muestreo. Además, se detalla la metodología que se consideró para el análisis geoestadístico en gabinete.

Cabe precisar que la metodología de la presente tesis presenta un nivel explicativo, de diseño no experimental (transversal), enfoque cuantitativo y del tipo básica.

3.1 Funcionalidad de los controles aplicados en el depósito de *topsoil*

Durante la visita a campo, se verificó que todos los controles de calidad actualmente siguen operativos, lo que reduce significativamente la influencia de la escorrentía (aguas arriba) sobre la calidad del *topsoil*. En la Tabla 10 se presentan los cuatro controles verificados.

Tabla 10*Estatus de los controles aplicados en el depósito de topsoil TS*

Nº	Controles	Operativo (Sí / No)	Descripción del estatus
1	El depósito del <i>topsoil</i> TS acopiado sobre material orgánico.	Sí	Se verificó que el depósito de <i>topsoil</i> fue ubicado sobre suelo con material orgánico y presencia de vegetación.
2	Los canales de coronación del depósito cuentan con elementos de control de erosión (enrocados) para evitar el arrastre de sedimentos.	Sí	Se verificó que el depósito de <i>topsoil</i> TS cuenta con canales de coronación en el perímetro del depósito para evitar el ingreso de escorrentía al interior del depósito, tal como se ve en la Figura 18. Además, cuentan con presencia de enrocado para evitar el arrastre de sedimentos.
3	Las cunetas internas del depósito cuentan con elementos de control de erosión (enrocados) para evitar el arrastre de sedimentos.	Sí	Se verificó que el depósito de <i>topsoil</i> TS cuenta con cunetas internas dentro del depósito para manejar el agua de escorrentía generado en el interior. Además, cuentan con presencia de enrocado para evitar el arrastre de sedimentos.
4	El revestimiento de los canales de coronación y cunetas internas deben estar operativos (sin roturas).	Sí	Se verificó que el revestimiento, que se utilizó en los canales y cunetas internas, fue con <i>liner</i> y que este se ha encontrado en perfectas condiciones para su uso.

Figura 18

Sistema de drenaje superficial en el depósito de topsoil TS



Por otro lado, se verificó que a 10 m al noroeste del depósito de *topsoil* TS se encuentra una vía de acceso no pavimentada que es transitada por vehículos livianos y volquetes que participan en los trabajos operativos de uno de los componentes principales que se ubica al norte del depósito de *topsoil* TS; tal como se observa en la Figura 19. Esta vía de acceso se encuentra ubicada en una formación geológica con presencia de sulfuros como la pirita, calcopirita, galena u otras asociaciones, que se encuentran relacionadas principalmente a la presencia de metales pesados como arsénico, cadmio, manganeso y plomo; además, no presentaba materiales que limiten la deposición de material particulado generado por el tránsito vehicular con el paso del tiempo.

Figura 19

Acceso ubicado a 10 m al noroeste del depósito de topsoil TS



3.2 Definición de los parámetros críticos de la calidad del *topsoil* evaluado

Hace unos años la unidad minera realizó un análisis de caracterización del *topsoil* del depósito de *topsoil* TS, cuyos resultados indicaron que la calidad del *topsoil* era aceptable según la Tabla 8, pero para asegurar una óptima concentración de nutrientes, la unidad minera decidió que agregará abono para mejorar la fertilidad de este suelo, durante las actividades previas a la revegetación. Es probable que la profundidad del depósito haya influido en que la calidad del *topsoil* no haya disminuido considerablemente, tal como precisó Fischer et al. (2022), en un depósito de *topsoil* con una profundidad menor a 6 m, las propiedades del suelo se tienen a mantener en el tiempo. Sin embargo, para poder determinar si la calidad del *topsoil* es ideal o aceptable, se tendría que evaluar los valores de potencial de hidrógeno con una mayor densidad de muestreo, ya que este parámetro es muy sensible a cambios o alteraciones externas en comparación a los parámetros de caracterización. Por otro lado, el contenido de metales pesados también que se ven influenciados por fuentes externas, como la deposición de material particulado que proviene del acceso no pavimentado. Para la elección de los metales pesados a analizar, se revisó geología local de la zona del acceso no pavimentado, en donde se verificó que se encuentra sobre una formación geológica con presencia de sulfuros relacionados a metales pesados como arsénico, cadmio, manganeso y plomo en bajas concentraciones; pero el proceso de erosión que se ha estado dando en el acceso (tránsito vehicular) podría haber acumulado estos metales en el tiempo y de esta manera podría alterar la concentración de estos metales respecto a sus condiciones iniciales.

En ese sentido, considerando que sólo faltaría evaluar el parámetro de potencial de hidrógeno para poder determinar la calidad de *topsoil* del depósito de *topsoil* TS, en base a Koenig e Isaman (2010), se definió a este como el parámetro crítico. Además, de manera complementaria, considerando el posible contenido metálico de las partículas suspendidas generadas por el tránsito vehicular en el acceso no pavimentado, se evaluaron las concentraciones de arsénico, cadmio, manganeso y plomo. Estos valores se compararon de forma referencial con los estándares establecidos en el D.S. N° 011-2017-MINAM (ECA

para Suelos) y, adicionalmente, se relacionaron con los resultados de pH, con el fin de verificar la posible existencia de una fuente de contaminación en el entorno del depósito de topsoil TS.

3.3 Definición del área de estudio

Tomando en cuenta la delimitación del depósito de *topsoil* TS que se muestra en la Figura 20, se estableció un área de estudio de dimensiones de 128 m largo por 48 m de ancho, con un área de 0,61 ha que cubre el 85,3 % del área del depósito de *topsoil* TS (0,72 ha); incluyendo tanto zonas expuestas a fuentes potenciales de contaminación (al oeste) como zonas alejas a esta fuente (al este).

Figura 20

Área del depósito de topsoil evaluado y área de estudio



Nota: elaboración propia usando el software ArcGis 10.8 usando imágenes satelitales de Google Earth (2023).

3.4 Etapa de gabinete pre - campo

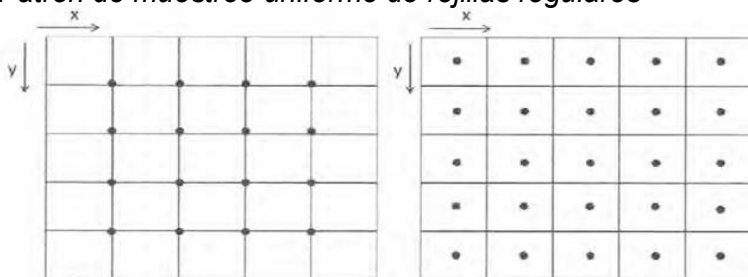
Los trabajos en la etapa de gabinete (antes de la salida a campo) consistieron en la planificación de los muestreos de calidad de suelos, en donde se definió la metodología a considerar para definir la distribución de las estaciones de muestreo, elección del método de muestreo y preparación de materiales y equipos necesarios para cubrir todos los requerimientos en campo y mantener un adecuado control de calidad durante la extracción de las muestras en cada estación.

3.4.1 Definición de la distribución de estaciones de muestreo

Según la R.M. N° 085-2014-MINAM, el patrón de muestreo uniforme usa el patrón de rejillas regulares, tal como se ve en la Figura 21, en donde cada estación de muestreo se encuentra ubicada de forma simétrica y ordenada, pero esto podría generar una anisotropía artificial, cuyos resultados podrían dar la idea de continuidad en una dirección determinada pero no necesariamente por el fenómeno que esté ocurriendo en el suelo. Por esta razón este patrón de muestreo no fue elegido para el análisis geoestadístico.

Figura 21

Patrón de muestreo uniforme de rejillas regulares

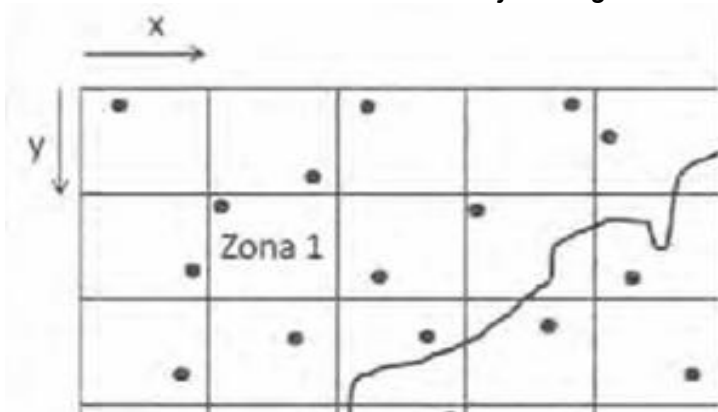


Nota: Tomado de la R.M. N° 085-2014-MINAM.

Por otro lado, el patrón de muestreo aleatorio es el método más recomendado para un análisis geoestadístico, ya que, las estaciones de muestreo son distribuidas sin seguir un patrón fijo, y esto ayuda a detectar la verdadera estructura espacial de la variable; tal como se puede ver en la Figura 22. Por ese motivo, se eligió el patrón de muestreo aleatorio sobre rejillas regulares.

Figura 22

Patrón de muestreo aleatorio sobre rejillas regulares



Nota: Adaptado de la R.M. N° 085-2014-MINAM.

3.4.2 Definición de la cantidad de estaciones de muestreo

Según la Guía para el Muestreo de Suelos, aprobada con el R.M. N° 085-2014-MINAM, en base a la magnitud del área de estudio (0,55 ha), se deberían considerar entre seis y nueve estaciones de muestreo. Sin embargo, para el análisis geoestadístico se requiere una mayor cantidad de puntos de muestreo; tal como menciona Harre et al. (2009), para un análisis geoestadístico se requiere como mínimo 15 estaciones de muestreo. En ese sentido, considerando la dimensión del área de estudio, el patrón de muestreo aleatorio y la cantidad mínima de estaciones, se decidió trabajar con 24 estaciones de muestreo y una muestra de duplicado para asegurar el control de calidad de los resultados; las cuales se listan en la Tabla 11.

Tabla 11

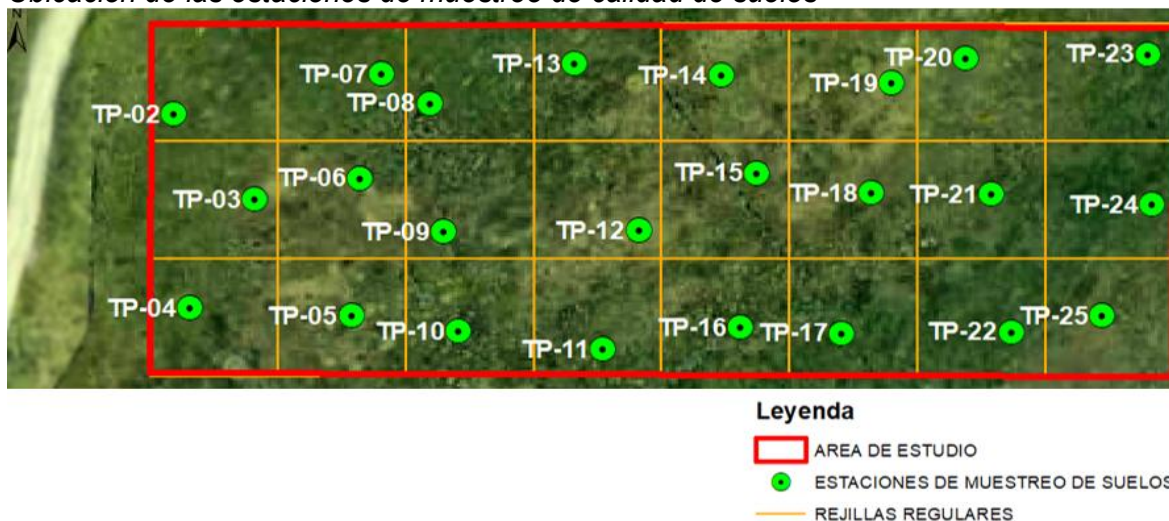
Estaciones de muestreo

N° de estaciones	Códigos de las estaciones
24	TP-02, TP-03, TP-04, TP-05, TP-06, TP-07, TP-08, TP-09, TP-10, TP-11, TP-12, TP-13, TP-14, TP-15, TP-16, TP-17, TP-18, TP-19, TP-20, TP-21, TP-22, TP-23 y TP-24

En la Figura 23, se ve la distribución aleatoria de las 24 estaciones de muestreo de calidad de suelos dentro del área de estudio, donde se ha empleado un patrón de cuadrícula de 8 m x 3 m, y cada cuadrícula tiene de 16 m por lado.

Figura 23

Ubicación de las estaciones de muestreo de calidad de suelos



Nota: Elaboración propia usando el software ArcGis 10.8 usando imágenes satelitales de Google Earth (2023).

3.4.3 Preparación de equipos y materiales

Los equipos que se adquirieron para las actividades de campo fueron un GPS Garmin calibrado, una radio *Handy* (para recibir alerta de tormentas) y para extraer las muestras de suelo se contó con un barreno tipo *Riverside* de hasta un metro de alcance de acero inoxidable, tal como se ve en la Figura 24.

Figura 24

Barreno del tipo Riverside adquirido para los muestreos de suelos



Además, se prepararon materiales como pala de jardinero, pico, un *cooler*, *ice packs*, cadenas de custodia, envases de plástico para las muestras de suelos y etiquetas para los envases; estos tres últimos materiales fueron proporcionados por el laboratorio SGS. Además, para la limpieza del barreno entre cada muestreo se requirió adquirir dos litros de agua destilada. Cabe precisar que por motivos de seguridad se utilizaron EPP básicos como cascos de seguridad, zapatos de seguridad, pares de guantes de nitrilo y badana; además, se contó con el apoyo de otra persona para el para el desarrollo de las actividades del muestreo.

3.5 Etapa de campo

Una vez que se llegó al entorno del área de estudio, se trasladó manualmente todos los materiales y equipos en una zona plana en el perímetro oeste del depósito de *topsoil* TS, para que estos sean almacenados temporalmente, durante los trabajos de campo.

3.5.1 Toma de muestra de suelos

Para la toma de muestras se utilizó un barreno metálico de 1 m de alcance, que fue introducido verticalmente en el suelo para extraer una muestra compuesta en los primeros

30 cm del suelo, en cada estación de muestreo. Para ello, una vez que se ubicó la estación de muestreo con la ayuda de un GPS calibrado, se estableció un cuadrilátero con una distancia equidistante de 0,5 m respecto a la ubicación de la estación de muestreo, tal como se ve en la Figura 25.

Figura 25

Cuadrilátero establecido para extraer la muestra compuesta



Seguidamente se extrajo la muestra en los cinco puntos ubicados (uno de la misma estación y de los cuatro vértices), tal como se puede ver en la Figura 26.

Figura 26

Pasos seguidos para la extracción de la muestra de suelos con el barreno



Nota:

[1] Ubicación de la estación de muestreo con ayuda de un GPS.

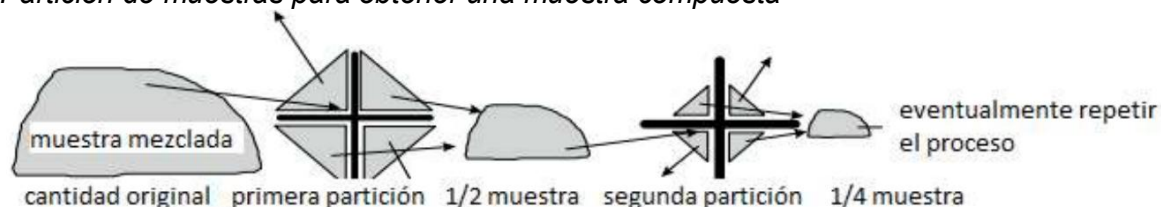
[2] Limpieza del área de trabajo e introducción del barreno en la estación de muestreo georreferenciada.

[3] Extracción del barreno con la muestra de suelo.

Las cinco muestras extraídas por cada estación de muestreo fueron mezcladas sobre una material de plástico, para que luego haga una partición en cruz (cuatro partes iguales), de las cuales escogieron dos partes ubicadas en extremos opuesto de la cruz para luego obtener la mitad de la muestra. Seguidamente, se volvió a realizar la misma partición de esta mitad de muestra, de donde se eligió dos partes ubicadas en extremos para conformar la muestra compuesta, tal como se puede ver en la Figura 27. Cabe precisar que todo este proceso se realizó con guantes de badana para cada estación muestreada.

Figura 27

Partición de muestras para obtener una muestra compuesta



Nota: Tomado de (Córdova et al., 2019).

Cada muestra compuesta fue colocada en un frasco de plástico etiquetado para el análisis de metales pesados y potencial de hidrógeno; cabe precisar que se extrajeron 24 muestras de suelo y una muestra duplicado para realizar un análisis de control de calidad. Debido a que se muestrearon suelos con trazas de metales pesados, se lavaba el barreno con agua destilada en cada cambio de estación, para evitar la existencia de algún tipo de contaminación cruzada, tal como se ve en la Figura 28. Luego de ello, se secaba el equipo para que sea trasladado hacia la siguiente estación de muestreo.

Figura 28

Limpieza del barreno con agua destilada



3.5.2 Cierre de actividades de muestreo

Una vez que se terminaba el muestreo de calidad de suelos en cada estación se retiró las herramientas y residuos sólidos generales que se hayan podido haber generado; y se regresó el material de suelo (que no fue usado para la muestra), para retornarlo en sus ubicaciones, de tal manera que se dejó la zona de forma muy similar a como se encontraba antes de las actividades de muestreo, tal como se puede ver en el Anexo 1.

3.5.3 Preparación de muestras para traslado al laboratorio

El cooler de tecnopor con el contenido de todas las muestras fue trasladado a un depósito para preparar la cadena de custodia (ver Anexo 2) e introducirles los *ice packs* antes del sellado del cooler, con el objetivo de mantener una temperatura menor a seis grados centígrados, tal como se ve en la Figura 29. Luego, este fue enviado vía terrestre hacia la ciudad de Lima.

Figura 29

Muestras de suelos en sus envases etiquetados junto a los ice packs.



3.5.4 Ingreso de muestras de suelo al laboratorio

Una vez que las muestras fueron recogidas de la agencia (en Lima), estas fueron trasladadas al laboratorio SGS donde se procedió al análisis del potencial de hidrógeno y contenido de metales pesados, y para ello se entregó la cadena de custodia al personal que recibió las muestras. En la Figura 30, se puede observar que los envases que contienen las muestras de suelos se encontraron en perfectas condiciones, rotulados y

acompañados de ice packs que permitieron mantener una temperatura por debajo de los 6 °C dentro del cooler de tecnopor.

Figura 30

Entrega de muestras al laboratorio SGS



3.6 Etapa de gabinete – post campo

Una vez que se recibieron los resultados del laboratorio SGS (ver Anexo 3), se procedió a realizar un análisis de control de calidad (ver Anexo 4), en donde se verificó que la diferencia porcentual relativa menor al 25 % entre el resultados de la muestra de duplicado TP-1 y la muestra original; lo cual indica que el laboratorio reportó resultados consistentes y de calidad. A continuación, de manera preliminar, se describen los resultados de pH y metales pesados, tales como arsénico, bario, cadmio, cromo, manganeso y plomo. Los resultados de los metales pesados fueron comparados referencialmente con el ECA-Suelo para uso agrícola e industrial / extractivo; mientras que los resultados de pH fueron clasificados según lo indicado por Koenig e Isaman (2010).

- Potencial de hidrógeno: las 24 estaciones evaluadas registraron concentraciones entre 5,09 unidades de pH (TP-09) y 6,83 unidades de pH (TP-13). En las estaciones de muestreo TP-02, TP-04, TP-09 y TP-10 se registraron concentraciones por debajo de 5,5 unidades de pH; lo que indica que, según Koenig e Isaman (2010), la calidad de *topsoil* en estas estaciones es aceptable pero no es ideal para los trabajos de revegetación.
- Arsénico: se registraron concentraciones entre 6,77 mg/kg (TP-20) y 53,88 mg/kg (TP-10), las cuales no superaron el ECA-Suelo para el uso agrícola (50 mg/kg); a excepción de la estación TP-10.

- Bario: se registraron concentraciones entre 53,19 mg/kg (TP-06) y 228,51 mg/kg (TP-08), las cuales no superaron el ECA-Suelo para el uso agrícola (750 mg/kg).
- Cadmio: las 24 estaciones evaluadas registraron concentraciones entre 0,14 mg/kg (TP-20) y 0,59 mg/kg (TP-02), las cuales no superaron el ECA-Suelo para uso agrícola (1,4 mg/kg).
- Cromo total: se registraron concentraciones entre 4,0 mg/kg (TP-05) y 17,90 mg/kg (TP-25), las cuales no superaron el ECA-Suelo para el uso industrial / extractivo (1 000 mg/kg).
- Manganeso: se registraron concentraciones entre 351,47mg/kg (TP-20) y 1 603,64 mg/kg (TP-09). Cabe precisar que el ECA-Suelo vigente no presenta valores referenciales para este metal.
- Mercurio: en las 24 estaciones evaluadas se registraron concentraciones por debajo del límite de detección del método de ensayo (< 0,262 mg/kg).
- Plomo: las 24 estaciones evaluadas registraron concentraciones entre 13,38 mg/kg (TP-24) y 255,91 mg/kg (TP-10), de las cuales en cuatro estaciones se registraron concentraciones que superaron el ECA-Suelo para uso agrícola (70 mg/kg), en las estaciones TP-05 (147,12 mg/kg), TP-10 (255,91 mg/kg), TP-11 (99,40 mg/kg) y TP-12 (82,70 mg/kg).

En la Tabla 12, se presentan los resultados de parámetros inorgánicos analizados en las estaciones de muestreo evaluadas. En base a los resultados obtenidos e información de la geología de la zona (descrito en la sección 3.2), se continuó con el análisis de distribución y dispersión del pH, arsénico, cadmio, manganeso y plomo.

Tabla 12

Resultados de pH y metales pesados proveniente del laboratorio

Estación	pH	Arsénico	Bario	Cadmio	Cromo total	Manganeso	Mercurio	Plomo
TP-02	<u>5,32</u>	33,18	105,27	0,59	7,28	1 576,68	<0,262	32,52
TP-03	5,70	29,48	87,41	0,41	7,89	1 271,69	<0,262	31,33
TP-04	<u>5,43</u>	12,97	55,56	0,26	5,78	938,45	<0,262	29,11
TP-05	5,50	43,47	62,71	0,41	4,01	877,02	<0,262	<u>147,12</u>
TP-06	5,74	7,04	53,19	0,35	6,99	879,79	<0,262	22,35
P-07	6,48	17,55	59,19	0,32	6,57	718,97	<0,262	27,21
TP-08	6,53	44,99	228,51	0,34	5,56	1 152,14	<0,262	21,74
TP-09	<u>5,09</u>	34,27	130,99	0,41	7,41	1 603,64	<0,262	37,63
TP-10	<u>5,46</u>	<u>53,88</u>	79,17	0,33	5,16	583,05	<0,262	<u>255,91</u>
TP-11	5,88	25,24	80,56	0,41	6,96	635,60	<0,262	<u>99,40</u>
TP-12	5,64	31,56	100,11	0,24	6,12	505,55	<0,262	<u>82,70</u>
TP-13	6,83	16,09	109,09	0,38	6,62	865,11	<0,262	31,19
TP-14	6,34	9,86	88,89	0,20	8,39	634,60	<0,262	21,12
TP-15	5,94	12,31	101,32	0,23	8,12	693,35	<0,262	29,01
TP-16	5,57	15,54	89,08	0,34	7,99	515,00	<0,262	56,13
TP-17	6,01	8,82	89,79	0,25	8,65	493,61	<0,262	32,14
TP-18	5,84	9,05	76,44	0,21	7,16	570,16	<0,262	19,13

Estación	pH	Arsénico	Bario	Cadmio	Cromo total	Manganeso	Mercurio	Plomo
TP-19	6,07	10,60	113,11	0,24	9,53	805,07	<0,262	23,93
TP-20	6,37	6,77	102,58	<0,144	15,94	351,47	<0,262	14,46
TP-21	6,00	11,32	87,31	0,30	8,49	575,51	<0,262	21,88
TP-22	5,67	9,57	93,41	0,20	9,56	534,02	<0,262	20,74
TP-23	5,61	10,52	91,39	0,29	16,34	599,23	<0,262	29,83
TP-24	5,98	7,80	101,25	<0,144	10,51	583,79	<0,262	13,38
TP-25	5,61	8,91	81,79	0,18	17,90	468,87	<0,262	19,92
ECA-Suelo para uso agrícola	-	50	750	1,4	-	-	24	70
ECA-Suelo para uso industrial / extractivo	-	140	2 000	22	1 000	-	800	800
Koenig e Isaman (2010)	Ideal	5,5 a 7,5	-	-	-	-	-	-
	Aceptable	5,0 a 8,2	-	-	-	-	-	-

Nota: Las concentraciones en negrita, cursiva y subrayada indican concentraciones de pH de calidad aceptable según Koenig e Isaman (2010), y concentraciones de metales que superan el ECA Suelo para uso agrícola.

3.6.1 Análisis exploratorio de los datos

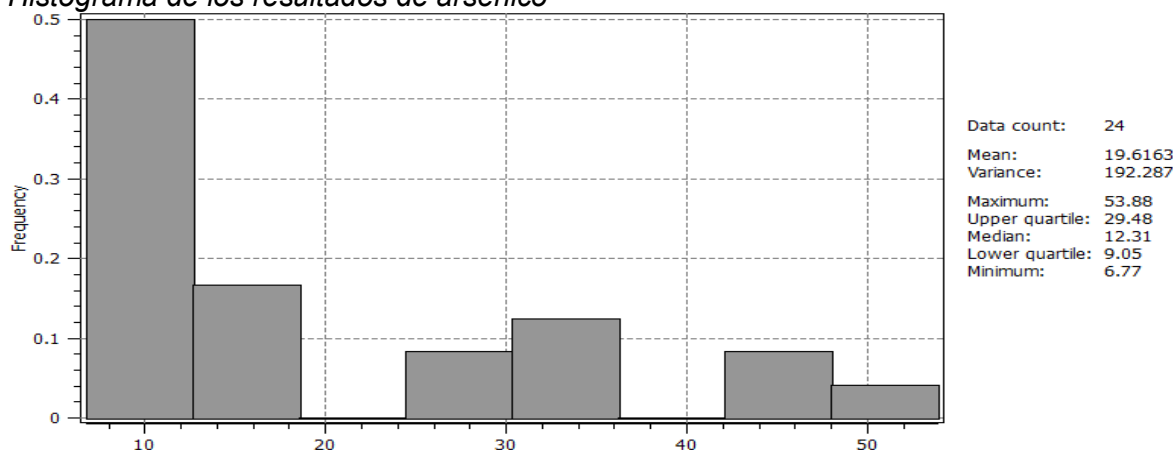
El análisis exploratorio de los datos consiste en un análisis de distribución y dispersión de los resultados obtenidos del laboratorio SGS. Mediante histogramas de ocho intervalos generados con el software SGeMS, el cual también genera información sobre la media, mediana y la varianza, este último se consideró como la meseta de los variogramas que se generaron posteriormente. Por otro lado, el análisis de dispersión se realizó mediante la generación de diagramas de cajas generados con el software Past.

Arsénico (As)

El histograma de los resultados de arsénico se generó en ocho intervalos de 10 mg/kg, tal como se ve en la Figura 31. En donde se observó una media de 19,62 mg/kg y una mediana inferior de 12,31 mg/kg; lo que sugiere una distribución claramente asimétrica hacia la derecha, ya que más del 50 % de las estaciones se agrupan en el primer intervalo (menor a 10 mg/kg). El rango de los datos va desde 6,77 a 53,88 mg/kg, con una varianza de 192,287 mg/kg. La presencia de frecuencias bajas de rangos con mayor concentración (a partir de los 30 mg/kg) podría indicar que estas concentraciones provienen de alguna fuente externa.

Figura 31

Histograma de los resultados de arsénico

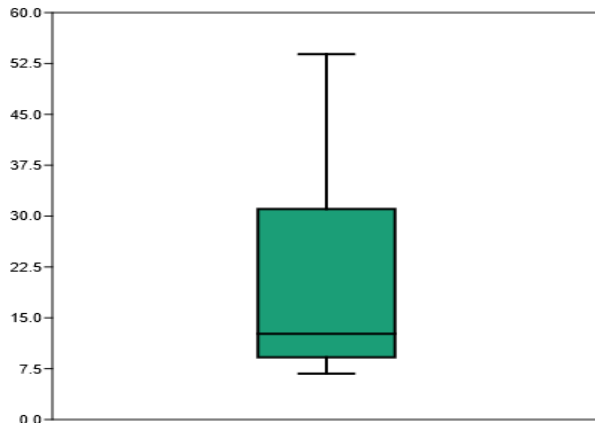


El diagrama de caja de los resultados de arsénico representa un rango intercuartílico que va desde 9,05 mg/kg (Q1) y 29,48 mg/kg (Q3) y sin *outliers*, tal como se

ve en la Figura 32. Además, el hecho de que el bigote superior sea mucho más largo que el inferior, refleja la presencia de concentraciones altas con una menor frecuencia.

Figura 32

Diagrama de cajas resultados de arsénico

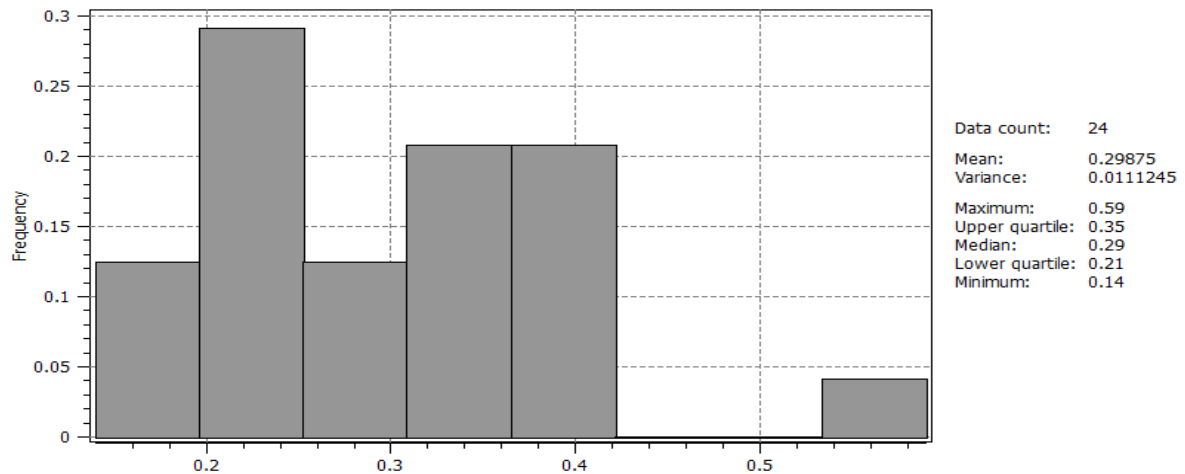


Cadmio (Cd)

El histograma de los resultados de cadmio se generó en ocho intervalos de 0,05 mg/kg, tal como se ve en la Figura 33. En donde se observó una media de 0,299 mg/kg y una mediana ligeramente inferior de 0,290 mg/kg; lo que sugiere una distribución ligeramente asimétrica hacia la derecha. La mayor concentración de datos se encuentra en el intervalo de 0,20 a 0,25 mg/kg, que representa aproximadamente el 30 % de las muestras. El rango de los datos va desde 0,14 a 0,59 mg/kg, con una varianza de 0,011 mg/kg.

Figura 33

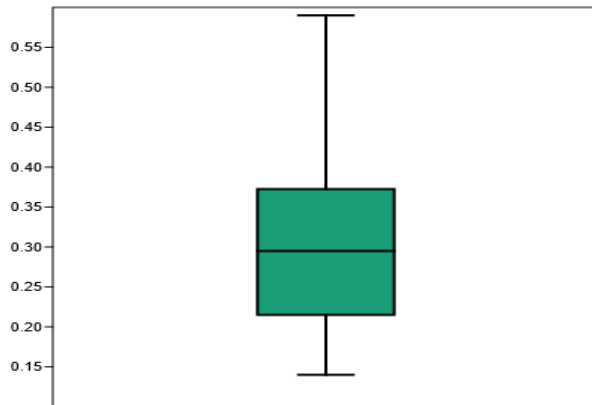
Histograma de los resultados de cadmio



El diagrama de caja de los resultados de cadmio representa un rango intercuartílico que va desde 0,21 mg/kg (Q1) y 0,35 mg/kg (Q3) y sin *outliers*, tal como se ve en la Figura 34. Además, el hecho de que el bigote superior sea mucho más largo que el inferior, refleja las presencia de concentraciones altas con una menor frecuencia.

Figura 34

Diagrama de cajas resultados de cadmio

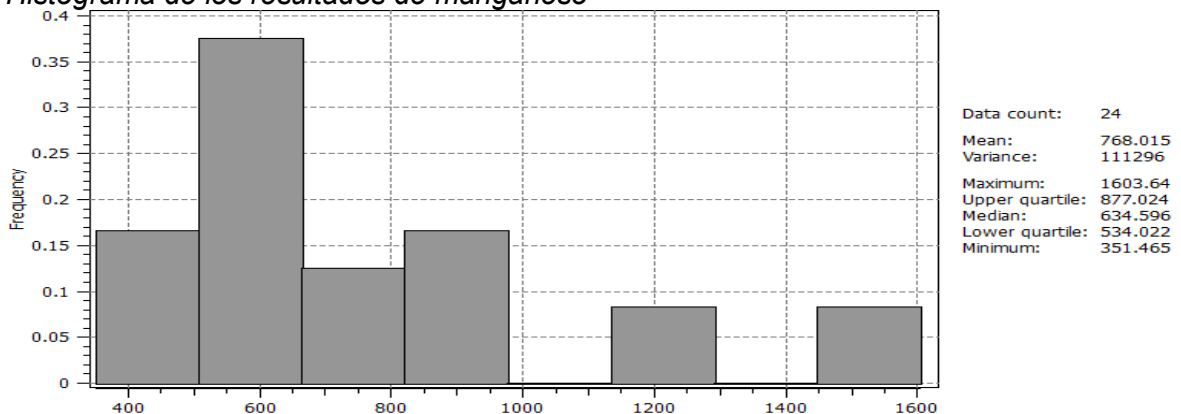


Manganeso (Mn)

El histograma de los resultados de manganeso se generó en ocho intervalos de 200 mg/kg, tal como se ve en la Figura 35. En donde se observó una media de 768,015 mg/kg y una mediana ligeramente inferior de 634,596 mg/kg; lo que sugiere una distribución ligeramente asimétrica hacia la derecha. La mayor concentración de datos se encuentra en el intervalo de 600 a 800 mg/kg, que representa aproximadamente el 37,5 % de las muestras. El rango de los datos va desde 351,465 a 1 603,640 mg/kg, con una varianza de 111 296 mg/kg.

Figura 35

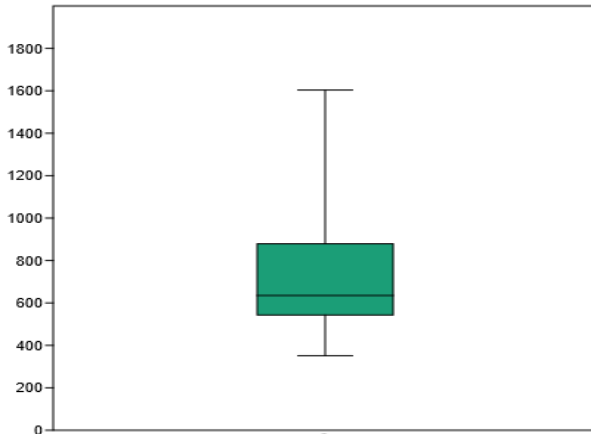
Histograma de los resultados de manganeso



El diagrama de caja de los resultados de manganeso representa un rango intercuartílico que va desde 534 mg/kg (Q1) y 877 mg/kg (Q3) y sin *outliers*, tal como se ve en la Figura 36. Además, el hecho de que el bigote superior sea mucho más largo que el inferior, refleja las presencia de concentraciones altas con una menor frecuencia.

Figura 36

Diagrama de cajas resultados de manganeso

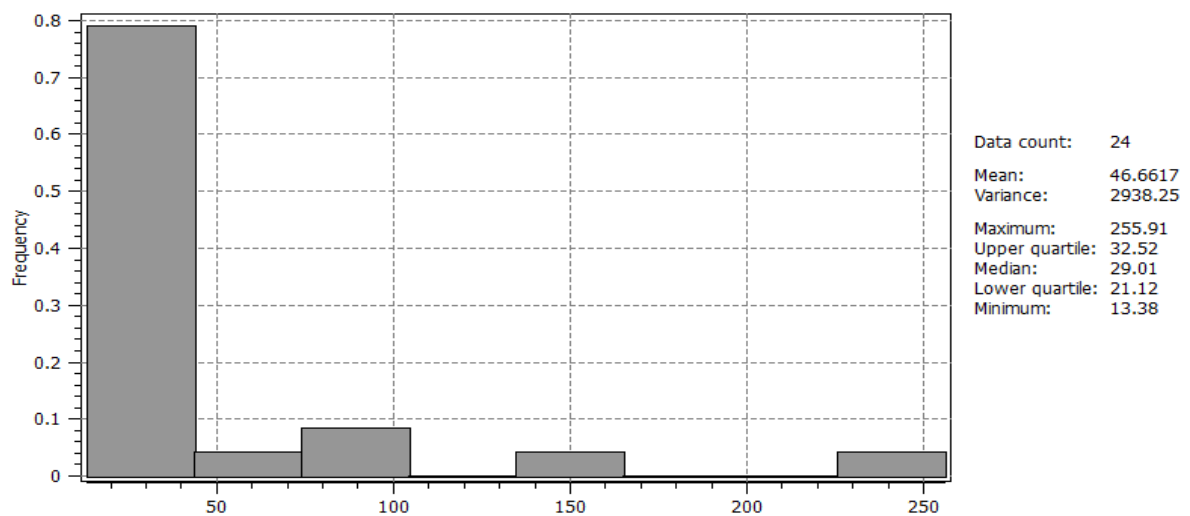


Plomo (Pb)

El histograma de los resultados de plomo se generó en ocho intervalos de 50 mg/kg, tal como se ve en la Figura 37.

Figura 37

Histograma de los resultados de plomo



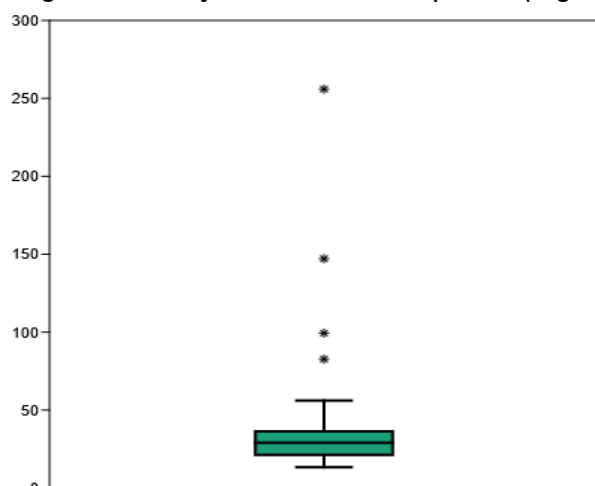
En donde se observó una media de 46,66 mg/kg y una mediana inferior de 29,01 mg/kg; lo que sugiere una distribución claramente asimétrica hacia la derecha. La mayor

concentración de datos se encuentra en el intervalo de 0,13 a 0,50 mg/kg, que representa aproximadamente el 80 % de las muestras. El rango de los datos va desde 13,38 a 255,91 mg/kg, con una varianza de 2 938,25 mg/kg.

El diagrama de caja de los resultados de plomo representa un rango intercuartílico que va desde 21,12 mg/kg (Q1) y 32,52 mg/kg (Q3), tal como se ve en la Figura 38. Los bigotes se extienden hasta valores próximos a los 50 mg/kg, pero se observan múltiples valores atípicos (*outliers*) por encima de ese rango. Estos *outliers* representan muestras que superan ampliamente el valor máximo del bigote superior, alcanzando incluso niveles superiores a 100 mg/kg, y un valor máximo cercano a 256 mg/kg.

Figura 38

Diagrama de cajas resultados de plomo (mg/kg)

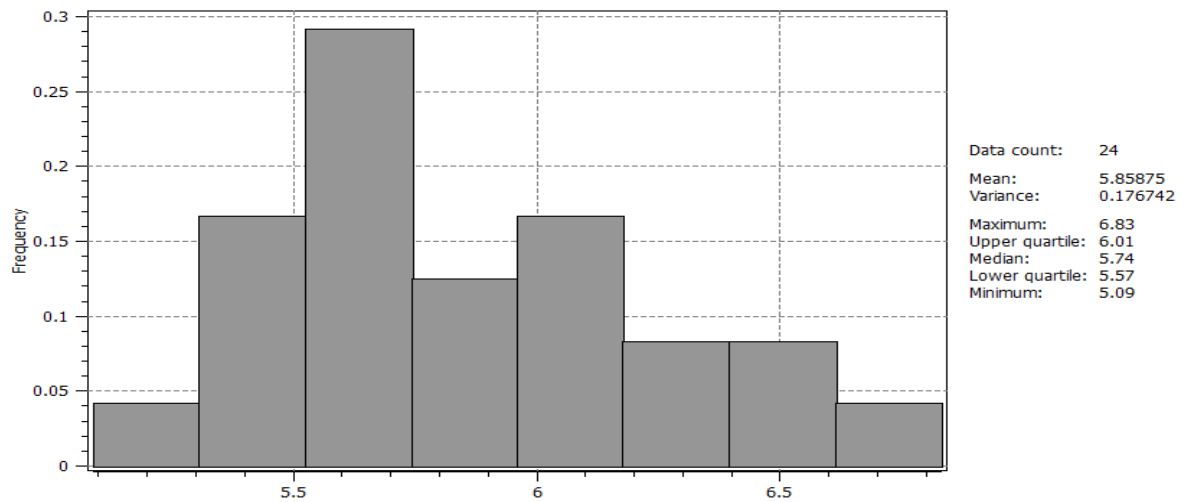


Potencial de hidrógeno (pH)

El histograma de los resultados de potencial de hidrógeno se generó en ocho intervalos de 0,2 unidades de pH, tal como se ve en la Figura 39. En donde se observó una media de 5,86 unidades de pH y una mediana ligeramente inferior de 5,74 unidades de pH; lo que sugiere una distribución levemente asimétrica hacia la derecha. El rango de los datos va desde 5,09 a 6,83 unidades de pH, con una varianza de 0,1767 unidades de pH. La mayor cantidad de muestras se encuentran en el intervalo de 5,4 y 5,6 unidades de pH, cuyo intervalo representa el 30 % del total, lo que indica que la mayoría de los suelos tienen una reacción entre fuertemente ácido y moderadamente ácido.

Figura 39

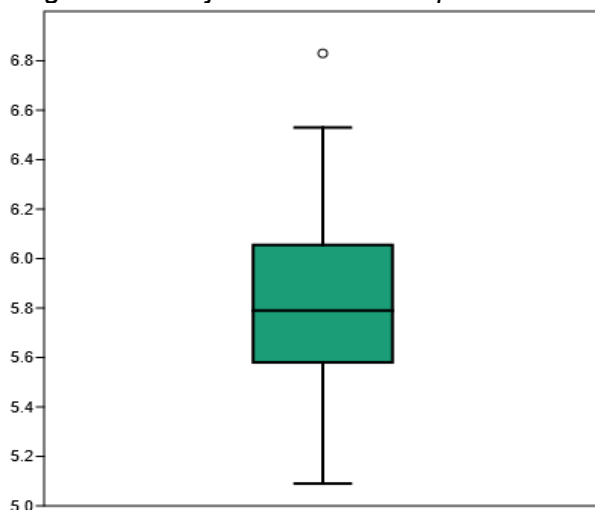
Histograma de los resultados de potencial de hidrógeno



El diagrama de caja de los resultados del pH presenta un rango intercuartílico que va desde 5,57 mg/kg (Q1) a 6,01 mg/kg (Q3), tal como se puede observar en la Figura 40. Además, se observó la presencia de un único valor atípico (*outlier*) ubicado por encima del bigote superior, con un valor de 6,83 mg/kg que se registró en la estación de muestreo TP-13 ubicada al norte del área de estudio. Cabe precisar que este valor no distorsiona significativamente la distribución de los datos, por otro lado, este puede atribuirse a factores externos del área de estudio evaluado.

Figura 40

Diagrama de cajas resultados de potencial de hidrógeno



3.6.2 Análisis de normalidad

Mediante el software Past, se realizó la prueba de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk. Los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk, indicaron que las variables pH y cadmio presentaron valores p de 0,62 y 0,23, respectivamente, lo cual indica que no se rechaza la hipótesis nula de normalidad (p mayor que 0,05) y, por tanto, estas variables pueden considerarse normalmente distribuidas bajo este criterio. En contraste, las variables arsénico ($p = 0,000683$), manganeso ($p = 0,00149$) y plomo ($p = 2,963 \times 10^{-7}$) arrojaron valores de p significativamente menores a 0,05, lo que indica que no siguen una distribución normal. Esta condición es coherente con la asimetría observada previamente en los histogramas y diagramas de caja, particularmente en el caso del plomo, donde la presencia de valores atípicos elevados contribuye a distorsionar la distribución. Los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk confirmaron la necesidad de aplicar transformaciones estadísticas (como \log_{10}) a las variables arsénico, manganeso y plomo, a fin de adecuarlas a los supuestos requeridos por los métodos geoestadísticos que recomiendan este tipo de tratamiento preliminar.

3.6.3 Normalización

Tratamiento previo mediante transformación logarítmica

Como parte del tratamiento estadístico previo al análisis geoestadístico, se aplicó una transformación logarítmica base 10 (\log_{10}) a las variables que no cumplían con los criterios de normalidad según la prueba de Shapiro-Wilk. Esta transformación tiene como objetivo reducir la asimetría positiva de la distribución, disminuir la influencia de valores extremos y estabilizar la varianza todo lo posible, lo cual resulta fundamental para cumplir con los supuestos requeridos por métodos como el *kriging* ordinario. La Tabla 13, muestra tanto los valores originales (expresados en mg/kg) como sus correspondientes valores transformados mediante \log_{10} para cada una de las estaciones de muestreo.

Se observa que, como es característico de esta transformación, los valores resultantes en escala logarítmica son inferiores a los originales, manteniendo proporcionalidad relativa entre ellos. Esta relación garantiza que las tendencias espaciales

y los contrastes entre concentraciones se conserven, pero representados en una escala más adecuada para el análisis geoestadístico.

Cabe precisar que esta transformación no afecta la interpretación cualitativa del fenómeno, ya que puede revertirse mediante la función exponencial inversa ($X=10^*Y$) una vez concluido el modelamiento.

Tabla 13

Transformación logarítmica de las concentraciones de arsénico y plomo

Código de la estación	Arsénico (As)		Manganeso (Mn)		Plomo (Pb)	
	Valor (mg/kg)	Log ₁₀	Valor (mg/kg)	Log ₁₀	Valor (mg/kg)	Log ₁₀
TP-02	5,32	1,52	1 576,68	3,20	7,28	1,51
TP-03	5,70	1,47	1 271,69	3,10	7,89	1,50
TP-04	5,43	1,11	938,45	2,97	5,78	1,46
TP-05	5,50	1,64	877,02	2,94	4,01	2,17
TP-06	5,74	0,85	879,79	2,94	6,99	1,35
TP-07	6,48	1,24	718,97	2,86	6,57	1,43
TP-08	6,53	1,65	1 152,14	3,06	5,56	1,34
TP-09	5,09	1,53	1 603,64	3,21	7,41	1,58
TP-10	5,46	1,73	583,05	2,77	5,16	2,41
TP-11	5,88	1,40	635,60	2,80	6,96	2,00
TP-12	5,64	1,50	505,55	2,70	6,12	1,92
TP-13	6,83	1,21	865,11	2,94	6,62	1,49
TP-14	6,34	0,99	634,60	2,80	8,39	1,32
TP-15	5,94	1,09	693,35	2,84	8,12	1,46
TP-16	5,57	1,19	515,00	2,71	7,99	1,75
TP-17	6,01	0,95	493,61	2,69	8,65	1,51
TP-18	5,84	0,96	570,16	2,76	7,16	1,28
TP-19	6,07	1,03	805,07	2,91	9,53	1,38
TP-20	6,37	0,83	351,47	2,55	15,94	1,16
TP-21	6,00	1,05	575,51	2,76	8,49	1,34
TP-22	5,67	0,98	534,02	2,73	9,56	1,32
TP-23	5,61	1,02	599,23	2,78	16,34	1,47
TP-24	5,98	0,89	583,79	2,77	10,51	1,13
TP-25	5,61	0,95	468,87	2,67	17,90	1,30

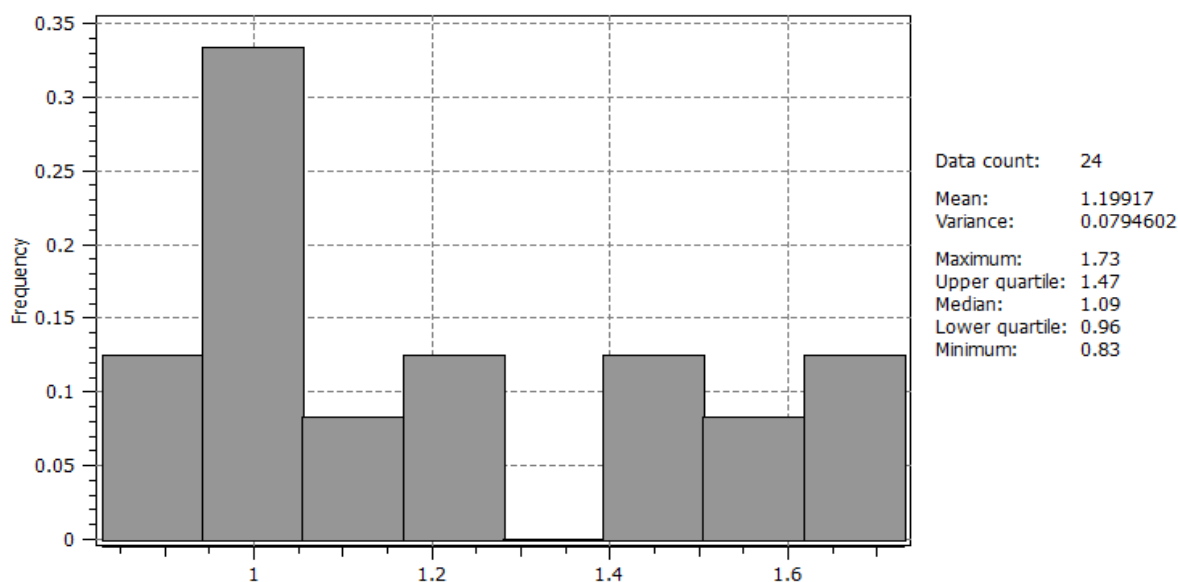
Análisis de distribución de valores de arsénico

El histograma de los resultados de arsénico transformados se generó en ocho intervalos de 0,1 mg/kg, tal como se ve en la Figura 41. En donde se observó una media de 1,20 mg/kg y una mediana inferior de 1,09 mg/kg; lo que sugiere una distribución considerablemente más cercana a la normalidad que la distribución original. La mayor concentración de datos se encuentra en el intervalo de 0,95 a 1,05 mg/kg, que representa aproximadamente el 33 % de las muestras. El rango de los datos va desde 0,83 a 1,73 mg/kg, con una varianza de 0,08 mg/kg.

En conjunto, esta transformación logró suavizar significativamente la distribución, haciendo que sea más adecuada para técnicas geoestadísticas que requieren aproximación a la normalidad. El comportamiento observado en el histograma confirma que el uso del Log10 como tratamiento previo ha sido eficaz para controlar la asimetría original sin alterar la jerarquía de las concentraciones medidas.

Figura 41

Histograma de los resultados de arsénico transformados



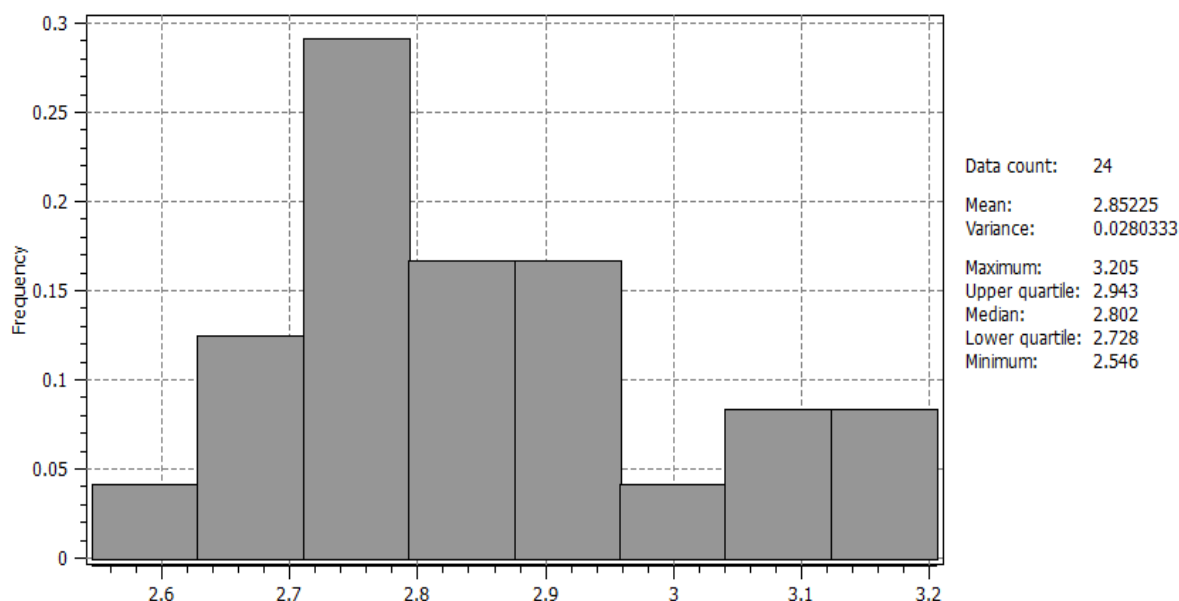
Análisis de distribución de valores de manganeso

El histograma de los resultados de manganeso transformados se generó en ocho intervalos de 0,1 mg/kg, tal como se ve en la Figura 42. En donde se observó una media de 2,85 mg/kg y una mediana ligeramente inferior de 2,80 mg/kg; lo que sugiere una

distribución considerablemente más cercana a la normalidad que la distribución original. La mayor concentración de datos se encuentra en el intervalo de 2,75 a 2,80 mg/kg, que representa aproximadamente el 30 % de las muestras. El rango de los datos va desde 2,55 a 3,21 mg/kg, con una varianza de 0,028 mg/kg.

Figura 42

Histograma de los resultados de manganeso transformados



En conjunto, esta transformación logró suavizar significativamente la distribución, haciendo que sea más adecuada para técnicas geoestadísticas que requieren aproximación a la normalidad. El comportamiento observado en el histograma confirma que el uso del Log10 como tratamiento previo ha sido eficaz para controlar la asimetría original sin alterar la jerarquía de las concentraciones medidas.

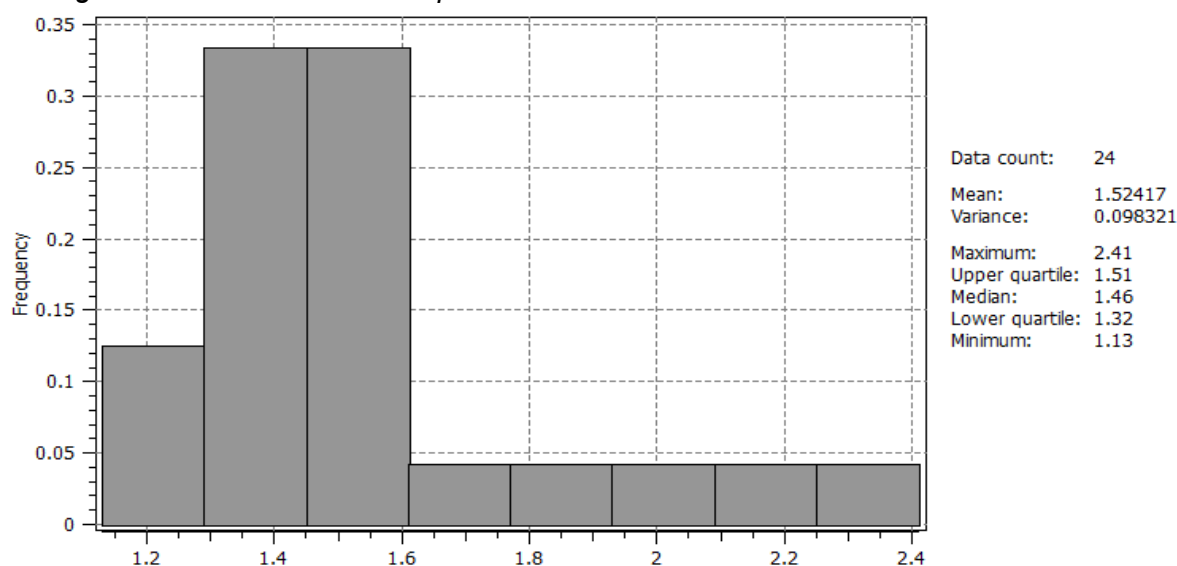
Análisis de distribución de valores de plomo

El histograma de los resultados de plomo transformados se generó en ocho intervalos de 0,1 mg/kg, tal como se ve en la Figura 43. En donde se observó una media de 1,52 mg/kg y una mediana inferior de 1,46 mg/kg; lo que sugiere una distribución considerablemente más cercana a la normalidad que la distribución original. La mayor concentración de datos se encuentra en el intervalo de 1,35 a 1,55 mg/kg, que representa aproximadamente el 70 % de las muestras. El rango de los datos va desde 1,13 a 2,41 mg/kg, con una varianza de 0,098 mg/kg.

En conjunto, esta transformación logró suavizar significativamente la distribución, haciendo que sea más adecuada para técnicas geoestadísticas que requieren aproximación a la normalidad. El comportamiento observado en el histograma confirma que el uso del Log10 como tratamiento previo ha sido eficaz para controlar la asimetría original sin alterar la jerarquía de las concentraciones medidas.

Figura 43

Histograma de los resultados de plomo transformados



Análisis de normalidad de valores transformados

Los resultados transformados de arsénico, manganeso y plomo fueron analizados con la prueba de normalidad Shapiro-Wilk W, en donde se verificó cuantitativamente que el grado de normalidad de los datos mejoró notablemente; tal como se ve en la Tabla 14.

Tabla 14

Resultados de la prueba de normalidad de los resultados transformados

Prueba de normalidad	Arsénico	Manganeso	Plomo
Shapiro-Wilk W	0,03	0,1887	0,002

3.6.4 Preparación de datos para el ingreso al software

Los resultados obtenidos del laboratorio fueron ingresados a una plantilla en Microsoft Excel que tiene el formato requerido por el software SGeMS. Este formato consistió en colocar en la primera fila sólo el nombre del título "Modelamiento", luego en la

segunda fila se colocó la cantidad de variables que se ingresarán, las cuales son nueve: coordenada X, coordenada Y, concentración de pH, arsénico, cadmio, manganeso y plomo.

En las siguientes filas se colocaron los nombres de estas nueve variables, luego se colocó en la primera columna todos los valores de la primera variable y así sucesivamente; tal como se ve en la Figura 44. Seguidamente, este formato se guardó en formato txt (delimitado por tabulaciones) para que pueda ser ingresado al software.

Figura 44

Base de datos en formato txt

```

Modelamiento
9
X
Y
pH (unidades de pH)
Arsenico Total (mg/kg)
Cadmio Total (mg/kg)
Cromo Total (mg/kg)
Plomo Total (mg/kg)
Manganeso (mg/kg)
Zinc (mg/kg)

```

	5.32	1.521	0.594	0.862	1.512	3.198	105.427
	5.7	1.47	0.414	0.897	1.496	3.104	95.113
	5.43	1.113	0.26	0.762	1.464	2.972	78.808
	5.5	1.638	0.406	0.603	2.168	2.943	82.635
	5.74	0.848	0.353	0.845	1.349	2.944	79.516
	6.48	1.244	0.322	0.817	1.435	2.857	92.553
	6.53	1.653	0.337	0.745	1.337	3.062	72.867
	5.09	1.535	0.409	0.87	1.576	3.205	110.918
	5.46	1.731	0.333	0.712	2.408	2.766	84.043
	5.88	1.402	0.406	0.843	1.997	2.803	85.315
	5.64	1.499	0.237	0.787	1.918	2.704	59.19
	6.83	1.206	0.381	0.821	1.494	2.937	78.709
	6.34	0.994	0.198	0.924	1.325	2.802	63.133
	5.94	1.09	0.234	0.91	1.463	2.841	76.663
	5.57	1.191	0.341	0.903	1.749	2.712	80.728
	6.01	0.946	0.247	0.937	1.507	2.693	69.232
	5.84	0.956	0.21	0.855	1.282	2.756	67.793
	6.07	1.025	0.242	0.979	1.379	2.906	68.884
	6.37	0.831	0.144	1.203	1.16	2.546	56.397
	6	1.054	0.303	0.929	1.34	2.76	68.489
	5.67	0.981	0.197	0.98	1.317	2.728	76.532
	5.61	1.022	0.292	1.213	1.475	2.778	84.503
	5.98	0.892	0.144	1.021	1.126	2.766	56.691
	5.61	0.95	0.18	1.253	1.299	2.671	73.817

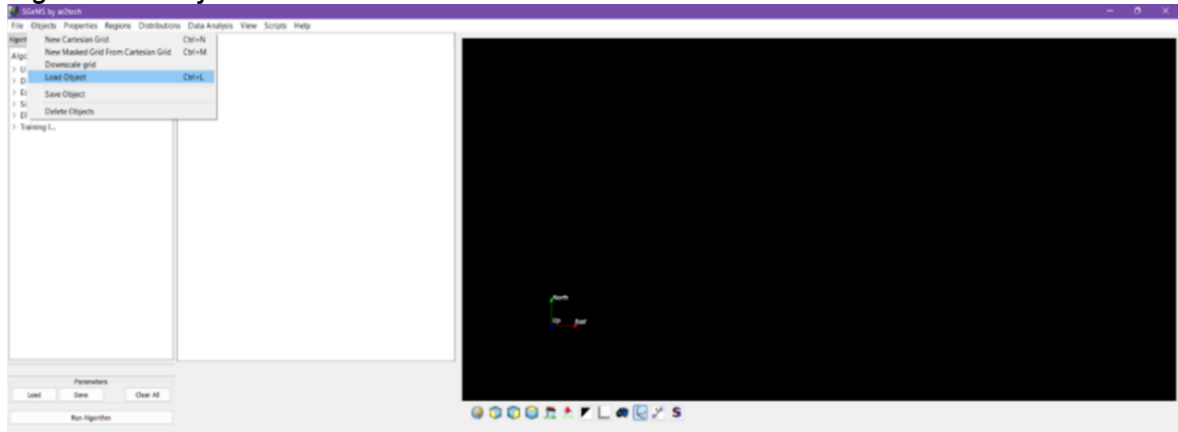
Nota: Se ha tapado las coordenadas X (este) e Y (norte) debido al acuerdo de confidencialidad con la unidad minera.

3.6.5 Ingreso al software SGeMS

Se inició el software SGeMS, se dio clic en la opción *Objects*, y se eligió la opción *Load Object*, para poder ingresar el formato de texto generado anteriormente, que contiene las coordenadas de las estaciones de muestreo y los resultados obtenidos de laboratorio; tal como se ve en la Figura 45.

Figura 45

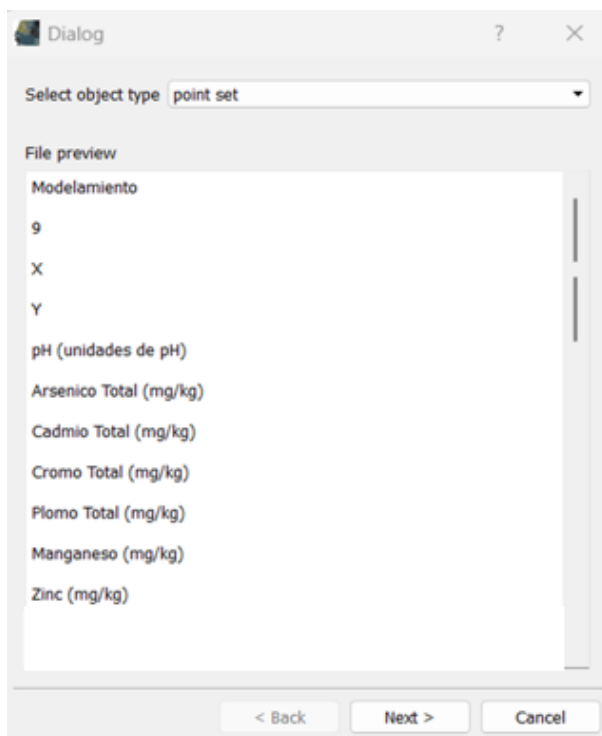
Ingreso del Object al software SGeMS



Luego apareció una ventana llamada *Dialog*, en donde se seleccionó el tipo de objeto *point set*, ya que es ideal para cargar información real de estaciones distribuidas de manera aleatoria y luego de dar clic a *Next*, apareció una ventana para colocar el nombre del proyecto, el número de columna para las coordenadas X e Y, luego se dio clic a *Finish*. En el área de visualización se pudo observar la distribución espacial de los datos cargados en formato *point set*, tal como se ve en la Figura 46.

Figura 46

Ingreso de información en la ventana Dialog



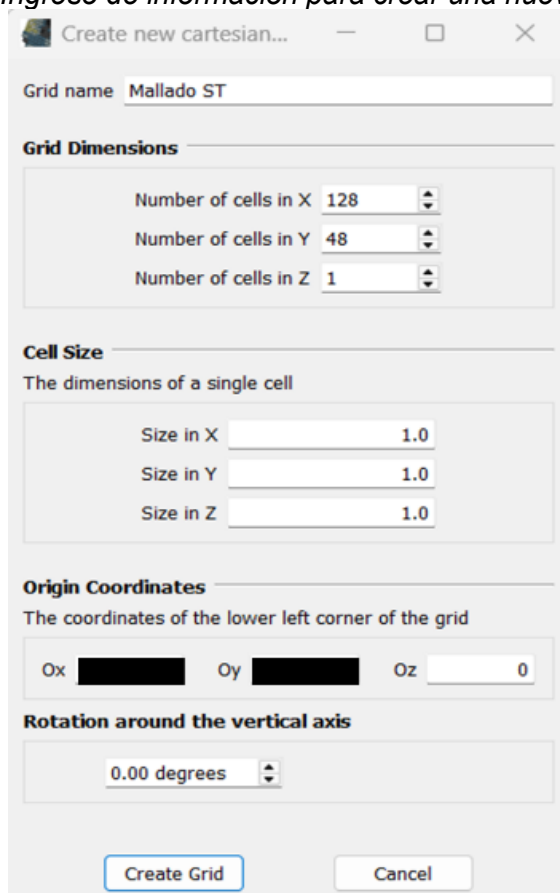
3.6.6 Creación de *grillado*

La creación de una nueva grilla cartesiana se utiliza para definir el dominio espacial donde se realizarán las estimaciones o simulaciones geoestadísticas y es un insumo importante para este proceso. Para ello se dio clic en la opción *Objects* ubicada en el panel de objetos y se eligió la opción *Create new Cartesian grid*. Luego apareció una ventana en donde se ingresó la siguiente información:

- Tamaño total del dominio en las direcciones X e Y, en donde se consideró 128 celdas de 1 m de longitud para el eje X y 48 celdas de 1 m de longitud para el eje Y; considerando las dimensiones del área de estudio.
- Se colocó un par de coordenadas referenciales para ubicar en el espacio la nueva grilla, pero esta información, tal como se ve en la Figura 47 y Figura 48.

Figura 47

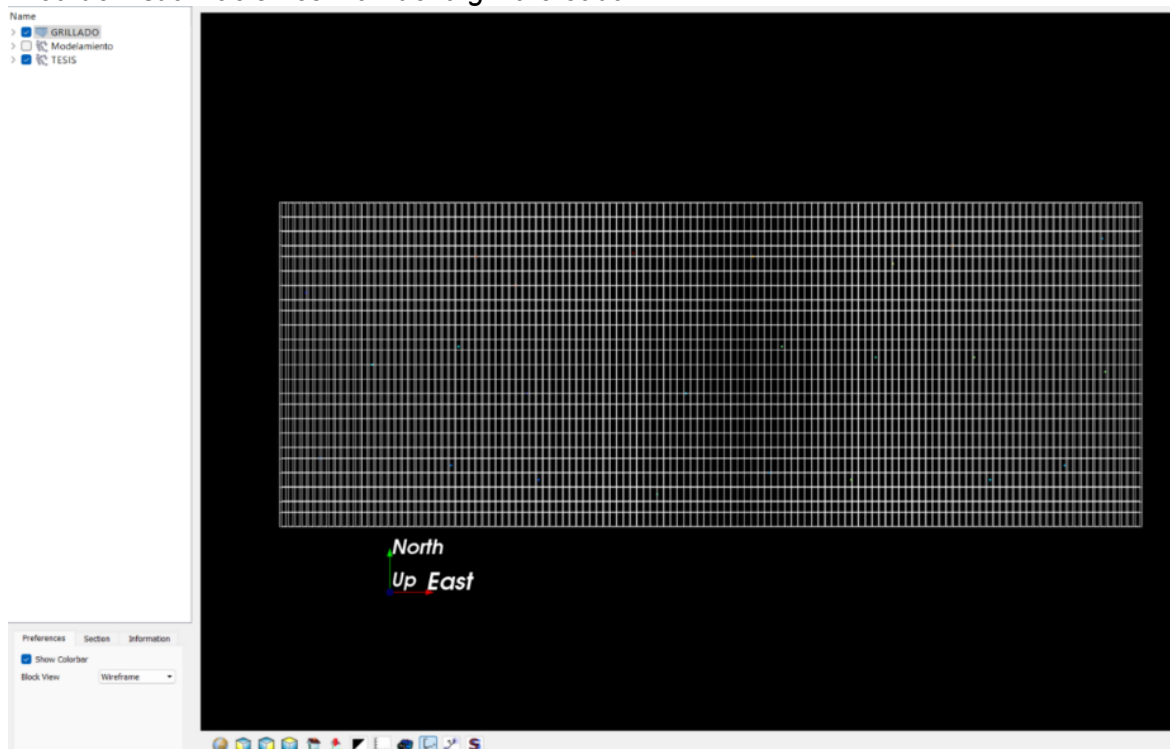
Ingreso de información para crear una nueva grilla



Nota: Se ha censurado las coordenadas X (este) e Y (norte) de la ubicación referencial, debido al acuerdo de confidencialidad con la unidad minera.

Figura 48

Área de visualización con la nueva grilla creada



Cabe precisar que se eligió el tamaño de celda de 1 m x 1m, ya que la distancia entre las estaciones en promedio ha sido de 12 m, por lo tanto, no habría inconveniente en usar este tamaño de grilla.

3.6.7 Generación de variograma teórico y experimental

En primer lugar, se configuraron los pasos y las direcciones de los variogramas experimentales de cada parámetro en el software SGeMS. La configuración de los pasos consistió en ingresar información sobre los números de intervalos de separación (*lags*), separación y la tolerancia de los pasos. Además, debido a que se considerará un análisis omnidireccional, dentro de la configuración de la dirección se consideró a los valores de *azimuth* como 0° (no se usó una dirección fija), *dip* como 0° (sin un ángulo de inclinación), *tolerance* como 90° (sin importar la dirección sino la distancia entre los valores) y un *bandwidth* con un valor alto para que pueda incluir en el análisis todos los valores existentes.

Posteriormente, se ajustó el variograma experimental a un modelo esférico para generar un variograma teórico. Para ello, se consideró a la meseta (*sill*) al valor de la varianza de los datos del parámetro, y se consideró un rango y efecto pepita de tal manera

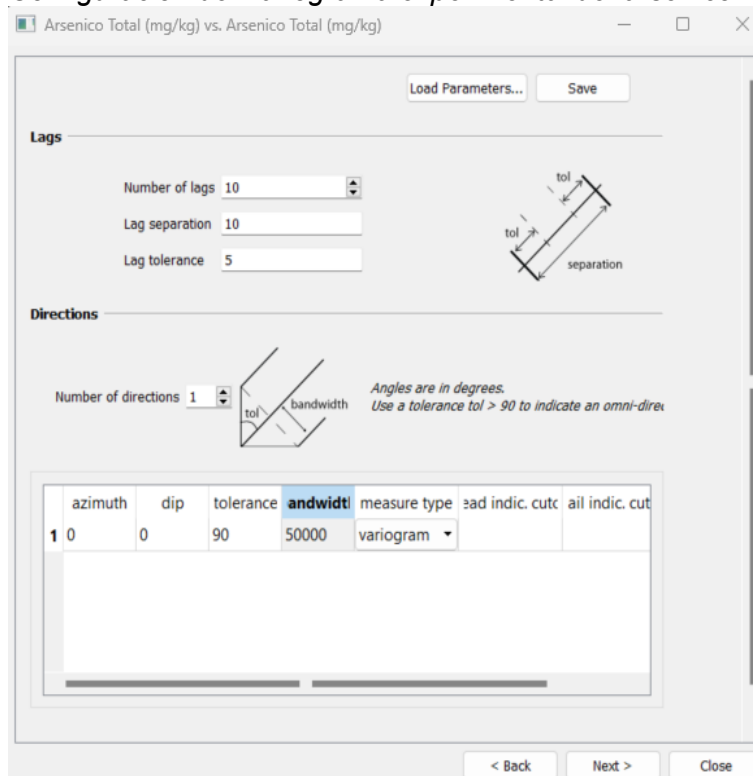
que la gráfica generada cruce la mayor cantidad de puntos que se generaron en el variograma experimental. A continuación, se describen los variograma teóricos generados para cada parámetro.

Arsénico (As)

Para la configuración del variograma experimental del arsénico, se consideraron 10 *lags* con una separación de 10 unidades y una tolerancia de 5 unidades, tal como se ve en la Figura 49.

Figura 49

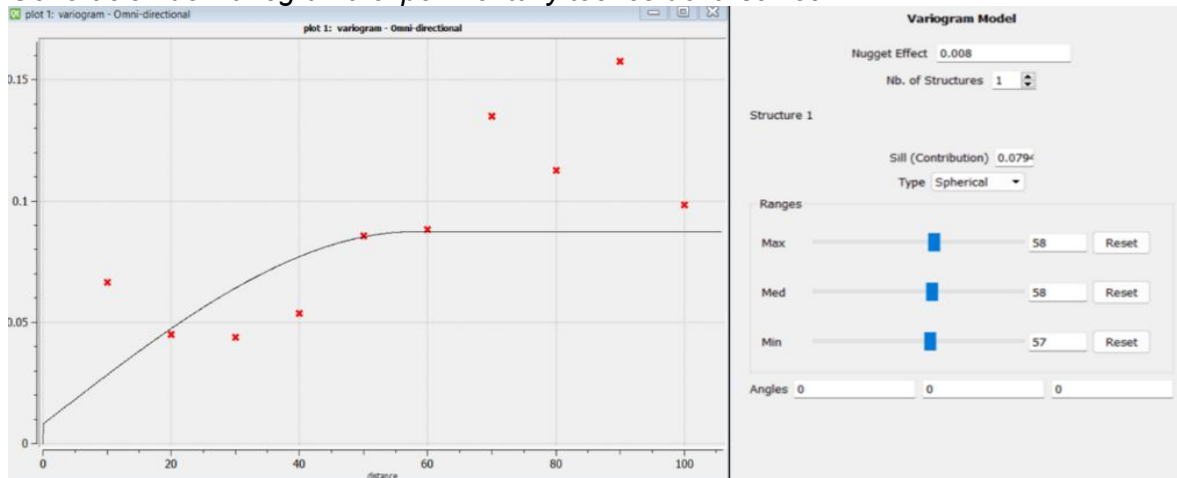
Configuración del variograma experimental del arsénico



Luego para ajustar el variograma experimental al variograma teórico tal como se ve en la Figura 50, se configuró un efecto pepita (*nugget effect*) de 0,008, una meseta (*sill*) de 0,079 y un rango efectivo aproximado de 58 unidades. La relación *nugget effect/sill* es de aproximadamente 10,1 %, siendo menor a 25 %, lo que indica que existe un bajo nivel de error y este variograma teórico puede ser utilizado en métodos de interpolación para evaluar la distribución espacial de este parámetro.

Figura 50

Generación del variograma experimental y teórico del arsénico

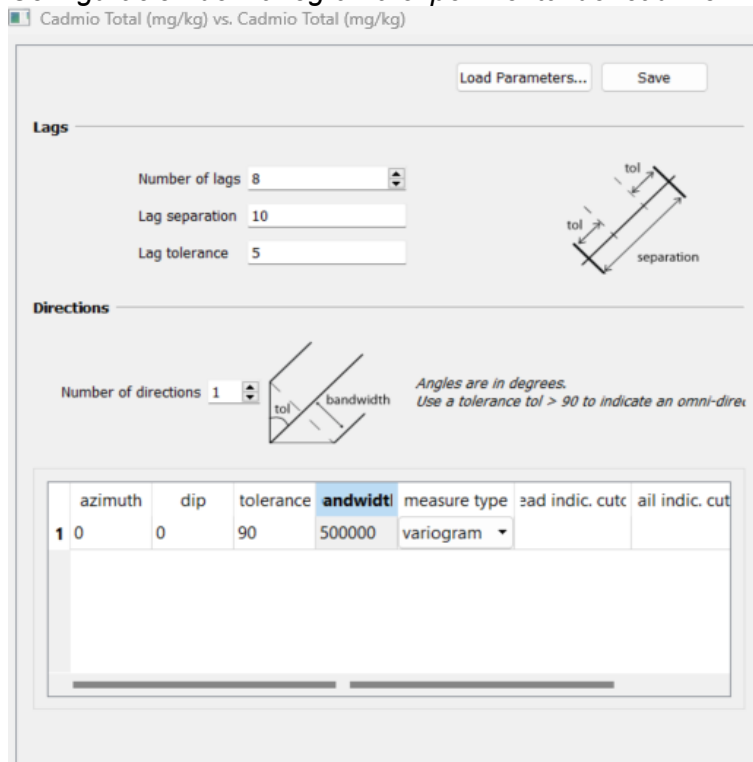


Cadmio (Cd)

Para la configuración del variograma experimental del cadmio, se establecieron 8 lags con una separación de 10 unidades y una tolerancia de 5 unidades, tal como se ve en la Figura 51.

Figura 51

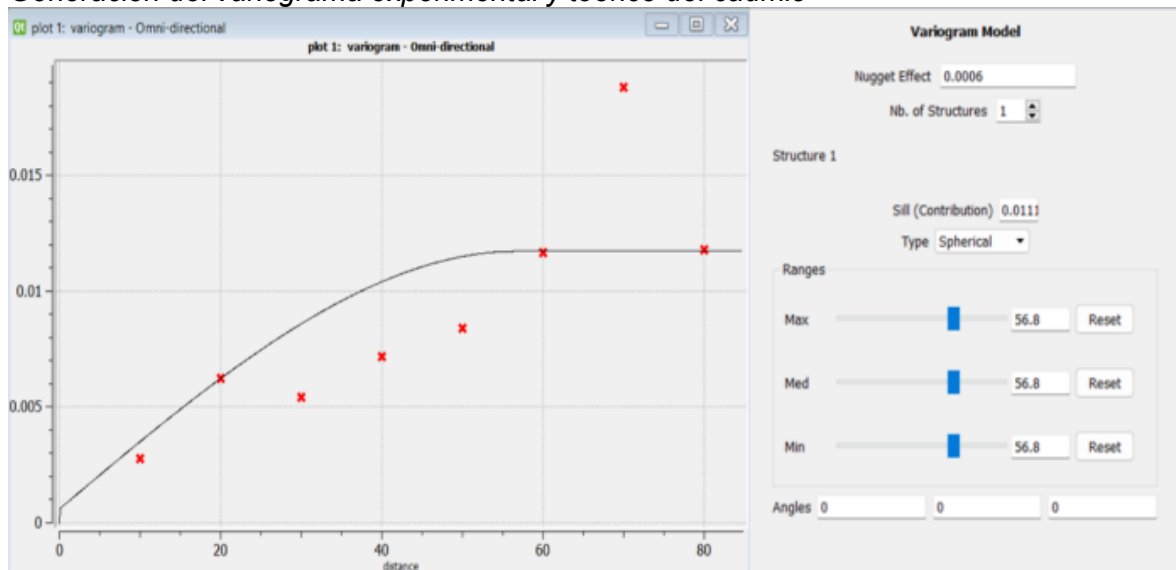
Configuración del variograma experimental del cadmio



Luego para generar el variograma teórico del tipo esférico que se observa en la Figura 52, se consideró un efecto pepita (*nugget effect*) de 0,0006, una meseta (*sill*) de 0,0111 y un rango de 56,8 unidades, constante en todas las direcciones. La relación *nugget effect/sill* fue de 5,4 % (muy por debajo del 25 %), lo que indica que existe un bajo nivel de error y este variograma teórico puede ser utilizado en métodos de interpolación para evaluar la distribución espacial de este parámetro.

Figura 52

Generación del variograma experimental y teórico del cadmio



Manganeso (Mn)

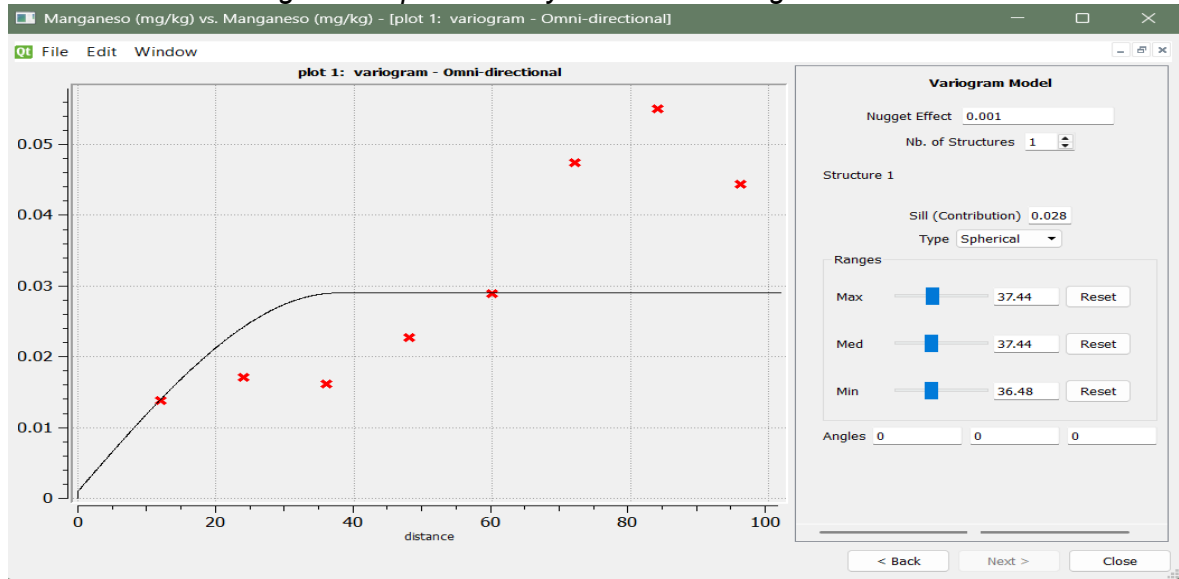
Para la configuración del variograma experimental del manganeso, se consideraron ocho lags, con una distancia de separación de 12 unidades y una tolerancia de los pasos de seis unidades.

Luego para generar el variograma teórico del tipo esférico que se observa en la Figura 53, se consideró un efecto pepita (*nugget effect*) de 0,001, una meseta (*sill*) de 0,028 y un rango de 37,44 unidades, constante en todas las direcciones.

La relación *nugget effect/sill* fue de 3,57 % (muy por debajo del 25 %), lo que indica que existe un bajo nivel de error y este variograma teórico puede ser utilizado en métodos de interpolación para evaluar la distribución espacial de este parámetro.

Figura 53

Generación del variograma experimental y teórico del manganeso

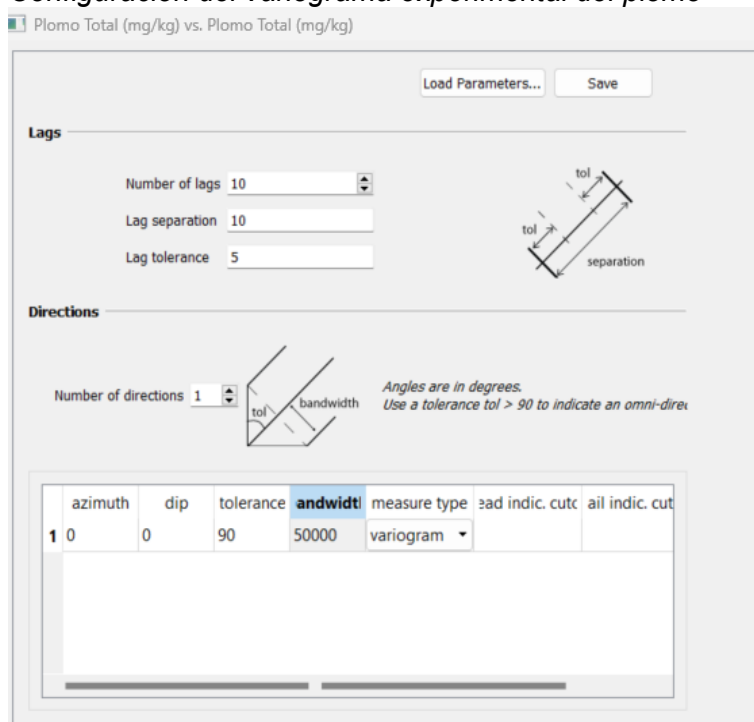


Plomo (Pb)

Para configurar el variograma experimental del plomo, se consideró un total de 10 lags, cada uno separado por 10 unidades, con una tolerancia de lag de 5 unidades, tal como se ve en la Figura 54.

Figura 54

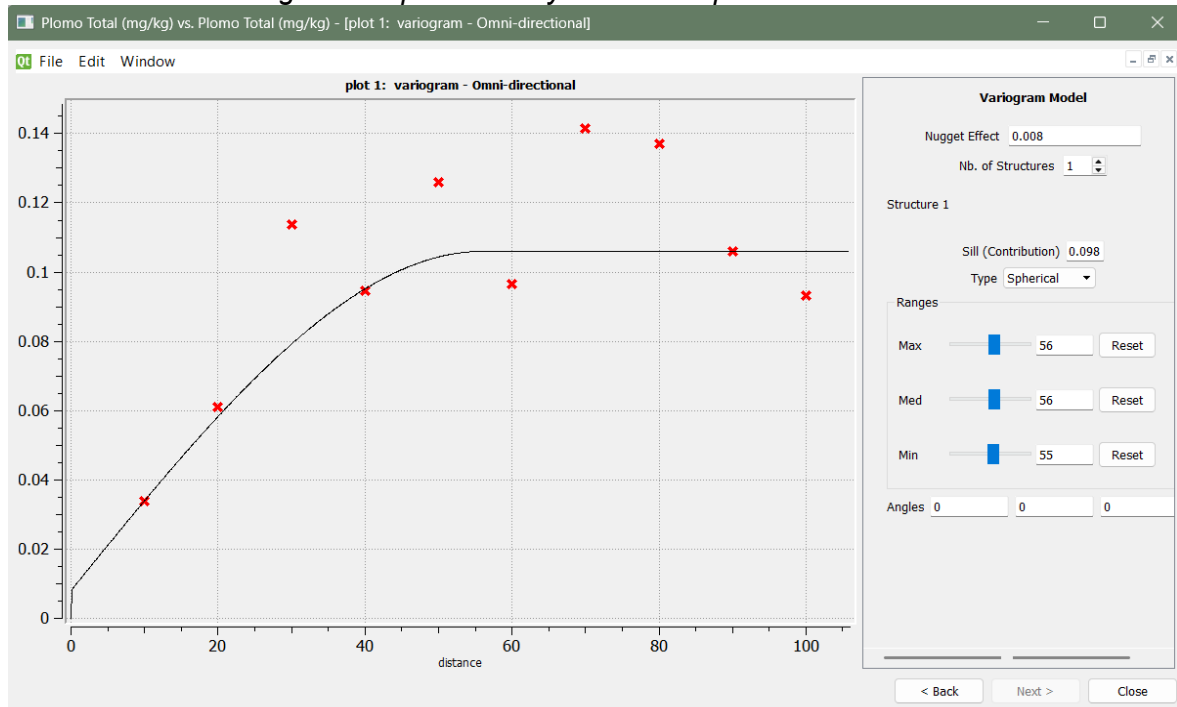
Configuración del variograma experimental del plomo



Posteriormente, el variograma experimental se ajustó a un modelo esférico, tal como se observa en la Figura 55, con un efecto pepita (*nugget*) de 0,008, una meseta (*sill*) de 0,098 y un rango de 56 unidades, constante en todas las direcciones. La relación *nugget effect/sill* fue de 8,2 %, siendo muy inferior al 25 %, lo que indica que existe un bajo nivel de error y este variograma teórico puede ser utilizado en métodos de interpolación para evaluar la distribución espacial de este parámetro.

Figura 55

Generación del variograma experimental y teórico del plomo

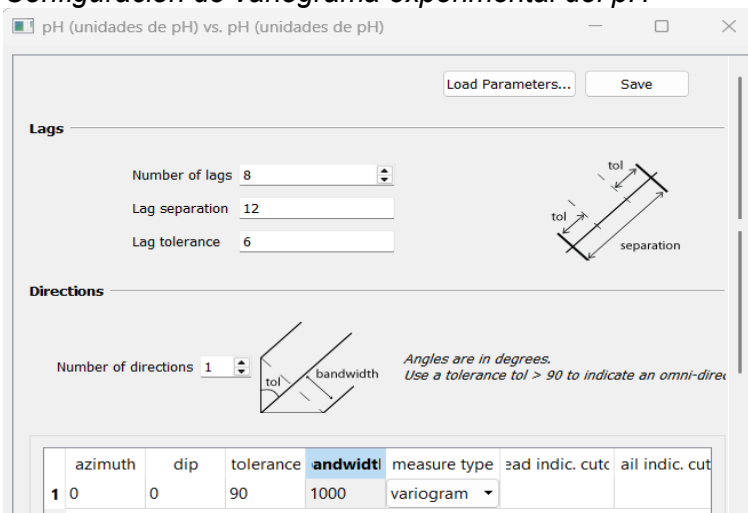


Potencial de hidrógeno (pH)

Para caracterizar la estructura espacial de la variable potencial de hidrógeno (pH), se generó un variograma experimental con ocho *lags* y con una distancia de separación de 12 unidades y una tolerancia de los pasos de seis unidades; tal como se presenta en la Figura 56.

Figura 56

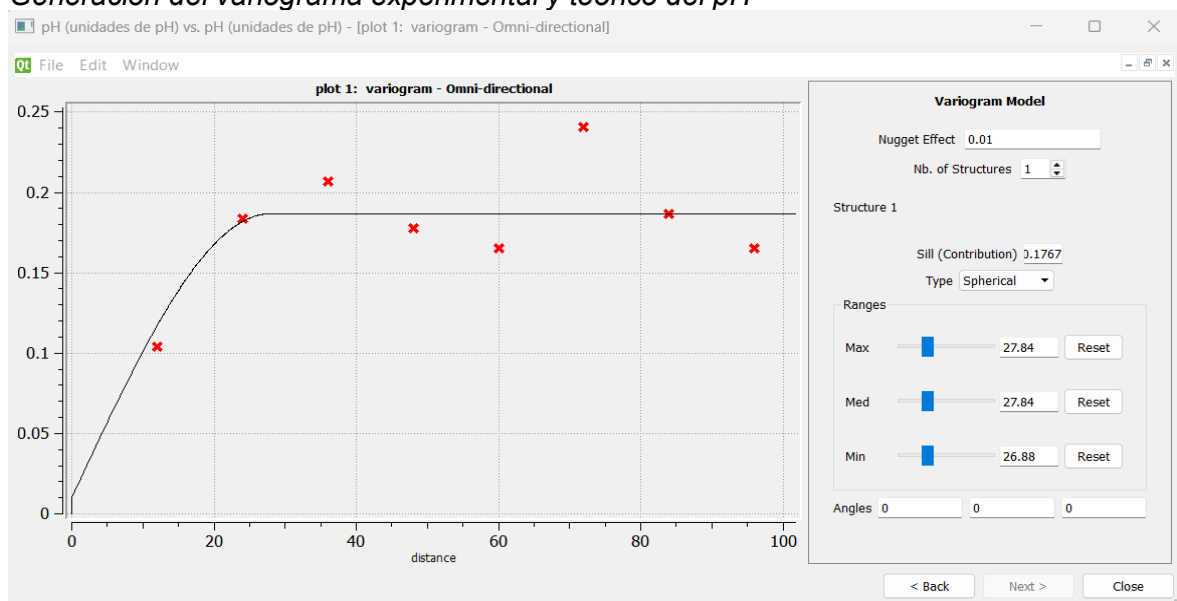
Configuración de variograma experimental del pH



Para generar el variograma teórico se ajustó el variograma a un modelo teórico de tipo esférico, con un efecto pepita (*nugget effect*) de 0,01, una meseta (*sill*) de 0,176 (mismo valor de la varianza) y un rango (*ranges*) de aproximadamente 27,84 unidades en todas las direcciones (isotrópico), tal como se puede observar en la Figura 57. La proporción *nugget effect/sill* fue de 5,7 % siendo muy inferior al 25 %, lo que indica que existe un bajo nivel de error y este variograma teórico puede ser utilizado en métodos de interpolación para evaluar la distribución espacial de este parámetro.

Figura 57

Generación del variograma experimental y teórico del pH



Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Modelización de la distribución espacial

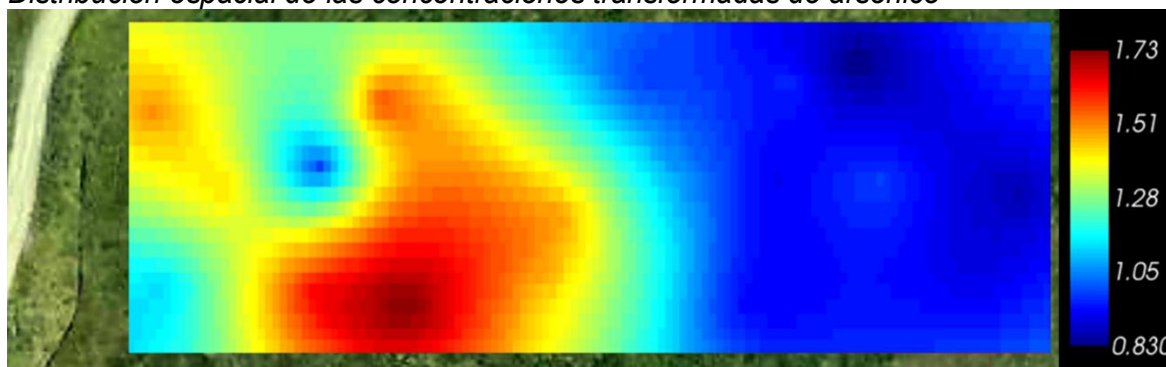
A continuación, se presentan los resultados de la interpolación espacial realizada con el método de *kriging* ordinario con el software SGeMS, a partir de los variogramas teóricos que se generaron para los parámetros de arsénico, cadmio, manganeso, plomo y potencial de hidrógeno.

4.1.1 Arsénico (As)

La distribución espacial de las concentraciones de arsénico que se obtuvo en el software SGeMS se presenta en la Figura 58, que contiene una barra de colores (en escala logarítmica) que va de 0,830 (azul oscuro) a 1,73 (rojo oscuro) que equivale a un rango de 6,76 y 53,70 mg/kg; en donde se ha observado una zona con mayor concentración de arsénico que proviene desde el oeste y noroeste hacia el centro del área de estudio y al suroeste del área de estudio se observan concentraciones entre 37,15 y 53,88 mg/kg. Por otro lado, al este del área de estudio se observó una zona homogénea en donde que existen concentraciones de arsénico inferiores a 11,22 mg/kg.

Figura 58

Distribución espacial de las concentraciones transformadas de arsénico



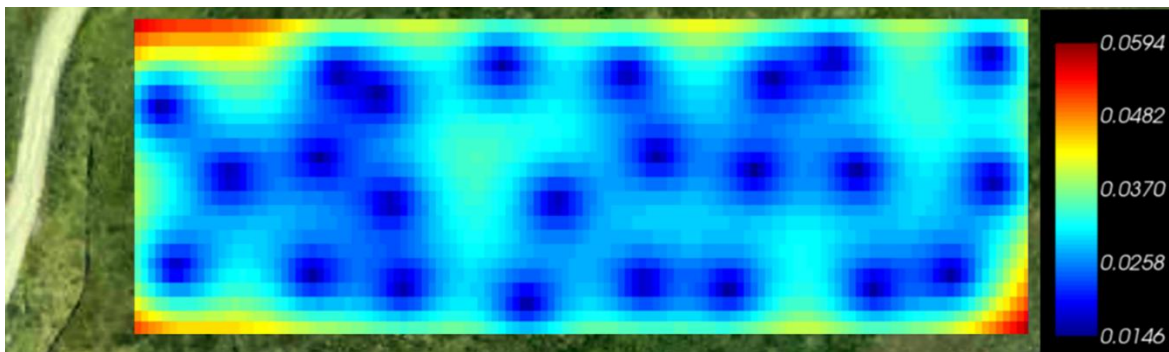
Nota: La escala de colores está considerando los valores transformados con escala logarítmica, por ende, su equivalencia corresponde de la siguiente manera: 1,73 <> 53,88 mg/kg, 1,51 <> 37,15 mg/kg, 1,28 <> 19,1 mg/kg, 1,05 <> 11,22 mg/kg, 0,83 <> 6,77 mg/kg. Elaboración propia con el software SGeMS.

Por otro lado, en la Figura 59, se visualizó el resultado de las incertidumbres que contiene una barra de colores (en escala logarítmica) que va de 0,0146 (azul oscuro) a 0,0594 (rojo oscuro) que equivale a un rango de 1,03 mg/kg y 1,15 mg/kg. El patrón

espacial muestra que los errores más bajos (en azul oscuro) se concentran principalmente en el entorno inmediato de las estaciones de muestreo, ya que en estas zonas la interpolación se basa en datos reales. A medida que aumenta la distancia con respecto a los datos originales, la varianza también se incrementa, lo que se refleja en el gradual cambio hacia tonalidades verdes, amarillas y finalmente rojas en los bordes del área de estudio.

Figura 59

Estimación de incertidumbre de la distribución espacial del arsénico



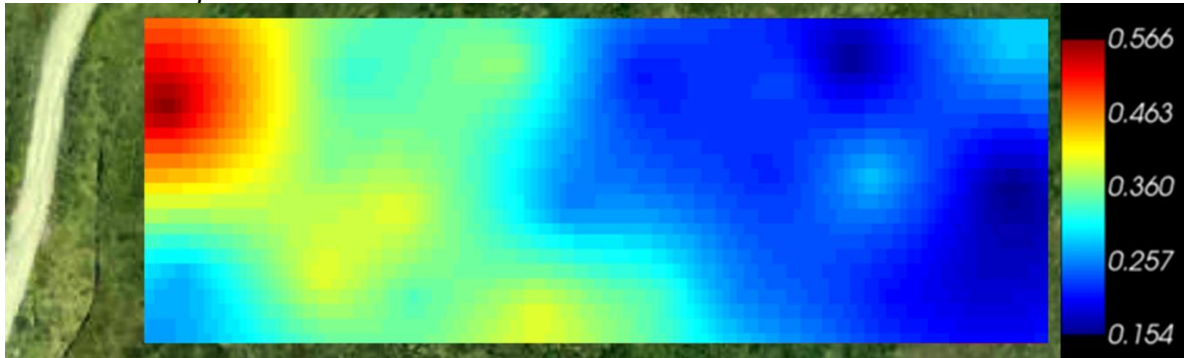
Nota: La escala de colores está considerando los valores transformados con escala logarítmica, por ende, su equivalencia corresponde de la siguiente manera: 0,0594 <> 1,15 mg/kg, 0,0482 <> 1,12 mg/kg, 0,037 <> 1,09 mg/kg, 0,0258 <> 1,06 mg/kg, 0,0146 <> 1,03 mg/kg.

4.1.2 Cadmio (Cd)

La distribución espacial de las concentraciones de cadmio que se obtuvo en el software SGeMS se presenta en la Figura 60, que contiene una barra de colores que va de 0,154 mg/kg (azul oscuro) a 0,566 mg/kg (rojo oscuro); en donde se ha observado una zona con concentraciones entre 0,36 y 0,56 mg/kg de cadmio que proviene desde el noroeste hacia el centro del área de estudio.

Figura 60

Distribución espacial de las concentraciones de cadmio

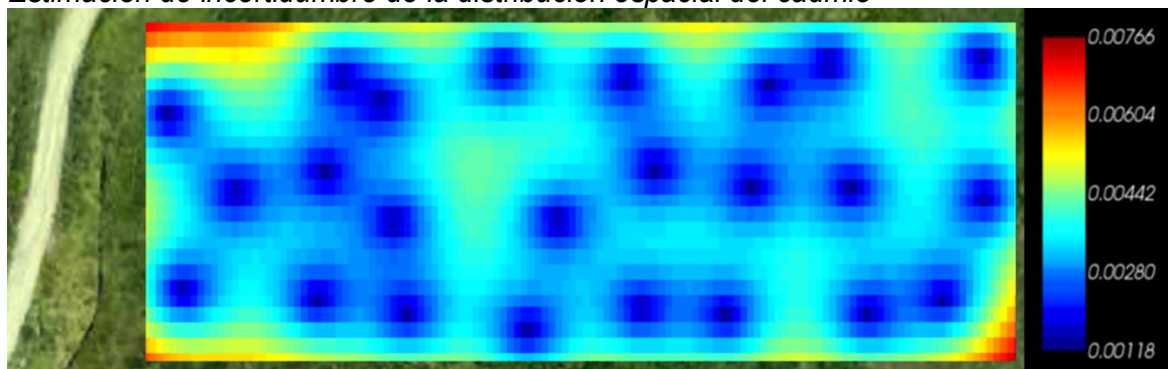


Por otro lado, al este del área de estudio se observó se observó una zona homogénea en donde que existen concentraciones de cadmio inferiores a 0,257 mg/kg. En la Figura 61, se visualizó el resultado de las incertidumbres que contiene una barra de colores que va de 0,00118 mg/kg (azul oscuro) a 0,00766 mg/kg (rojo oscuro).

El patrón espacial muestra que los errores más bajos (en azul oscuro) se concentran en el entorno de las estaciones de muestreo y en las zonas perimetrales del área de estudio se observaron los valores de incertidumbre más alto.

Figura 61

Estimación de incertidumbre de la distribución espacial del cadmio



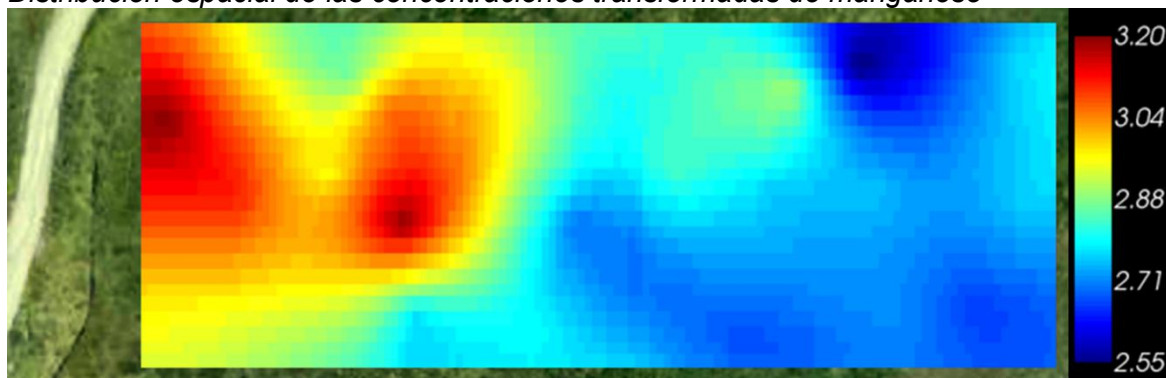
4.1.3 Manganeso (Mn)

La distribución espacial de las concentraciones de manganeso que se obtuvo en el software SGeMS se presenta en la Figura 62, que contiene una barra de colores (en escala logarítmica) que va de 2,55 (azul oscuro) a 3,20 (rojo oscuro) que equivale a un rango de 351,41 mg/kg y 1 603,64 mg/kg; en donde se ha observado una zona con mayor concentración de manganeso que proviene desde el oeste y noroeste hacia el centro del área de estudio y al suroeste del área de estudio se observan concentraciones entre 758,58 y 1 603,64 mg/kg.

Por otro lado, al este del área de estudio se observó se observó una zona homogénea en donde que existen concentraciones de arsénico inferiores a 512,86 mg/kg.

Figura 62

Distribución espacial de las concentraciones transformadas de manganeso

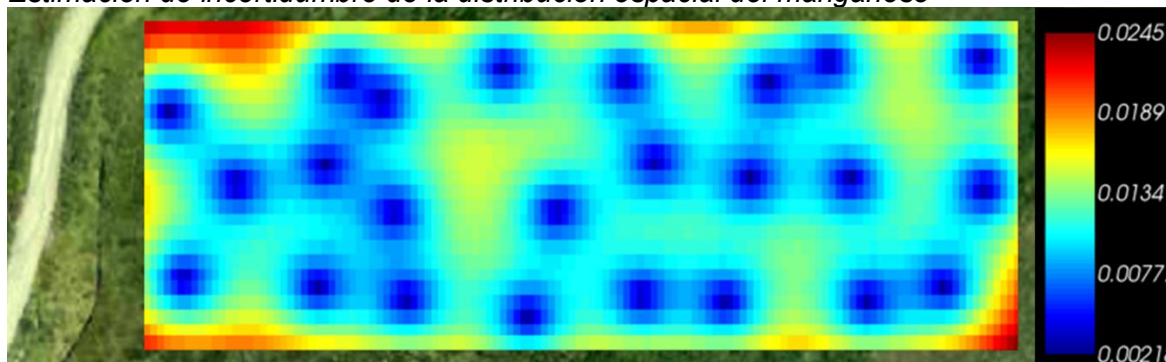


Nota: La escala de colores está considerando los valores transformados con escala logarítmica, por ende, su equivalencia corresponde de la siguiente manera: 3,205 <> 1 603,64 mg/kg, 3,04 <> 1 096,48 mg/kg, 2,88 <> 758,58 mg/kg, 2,71 <> 512,86 mg/kg, 2,55 <> 351,47 mg/kg.

Por otro lado, en la Figura 63, se visualizó el resultado de las incertidumbres que contiene una barra de colores (en escala logarítmica) que va de 0,00218 (azul oscuro) a 0,0245 (rojo oscuro) que equivale a un rango de 1,005 y 1,058 mg/kg. El patrón espacial muestra que los errores más bajos (en azul oscuro) se concentran principalmente en el entorno inmediato de las estaciones de muestreo, ya que en estas zonas la interpolación se basa en datos reales. A medida que aumenta la distancia con respecto a los datos originales, la varianza también se incrementa, lo que se refleja en el gradual cambio hacia tonalidades verdes, amarillas y finalmente rojas en los bordes de las zonas noroeste y sureste del área de estudio.

Figura 63

Estimación de incertidumbre de la distribución espacial del manganeso



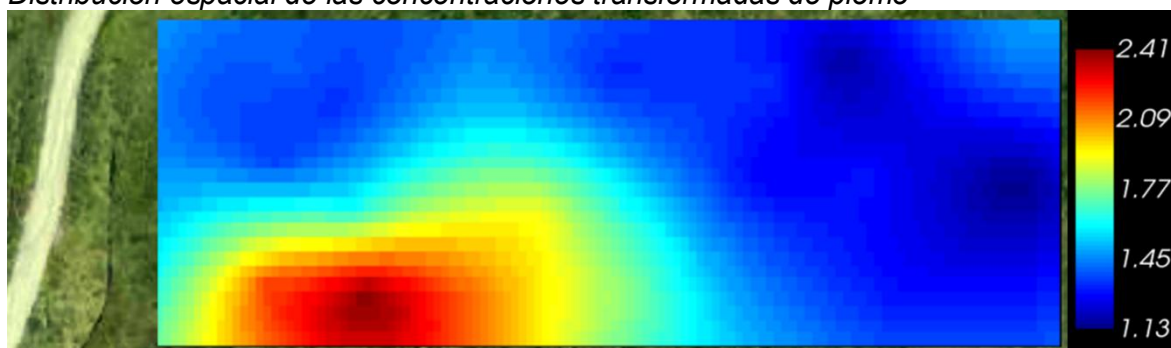
Nota: La escala de colores está considerando los valores transformados con escala logarítmica, por ende, su equivalencia corresponde de la siguiente manera: 0,0245 <> 1,058 mg/kg, 0,0189 <> 1,044 mg/kg, 0,0134 <> 1,031 mg/kg, 0,00777 <> 1,018 mg/kg, 0,00218 <> 1,005 mg/kg.

4.1.4 Plomo (Pb)

La distribución espacial de las concentraciones de plomo se presenta en la Figura 64, que contiene una barra de colores (en escala logarítmica) que va de 1,13 (azul oscuro) a 2,41 (rojo oscuro) que equivale a un rango de 13,49 y 257,04 mg/kg; en donde se ha observado una zona con mayor concentración de plomo que proviene desde el oeste hacia el suroeste del área de estudio con concentraciones entre 123,03 y 257,04 mg/kg. Por otro lado, al este del área de estudio se observó una zona homogénea (menor a 28,18 mg/kg).

Figura 64

Distribución espacial de las concentraciones transformadas de plomo

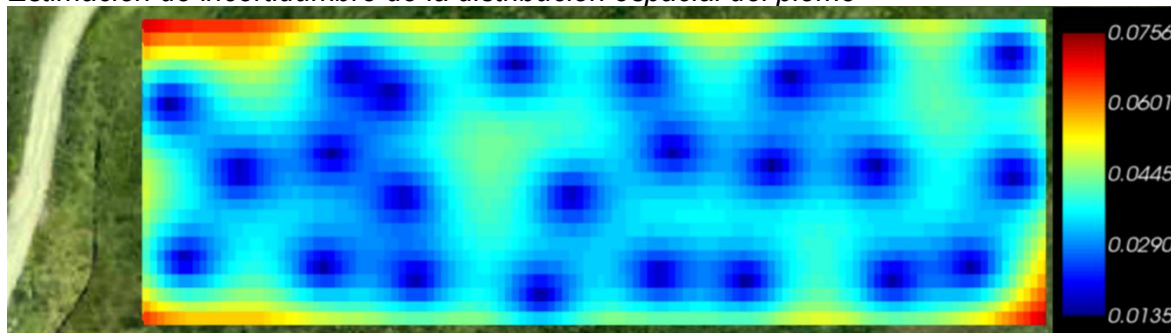


Nota: La escala de colores están en escala logarítmica, por ende, su equivalencia corresponde de la siguiente manera: 2,41 <> 257,04 mg/kg, 2,09 <> 123,03 mg/kg, 1,77 <> 58,88 mg/kg, 1,45 <> 28,18 mg/kg, 1,13 <> 13,49 mg/kg.

Por otro lado, en la Figura 65, se visualizó el resultado de las incertidumbres que contiene una barra de colores (en escala logarítmica) que va de 0,0135 (azul oscuro) a 0,0756 (rojo oscuro) que equivale a un rango de 1,03 y 1,19 mg/kg. El patrón espacial muestra que los errores más bajos en el entorno inmediato de las estaciones de muestreo.

Figura 65

Estimación de incertidumbre de la distribución espacial del plomo



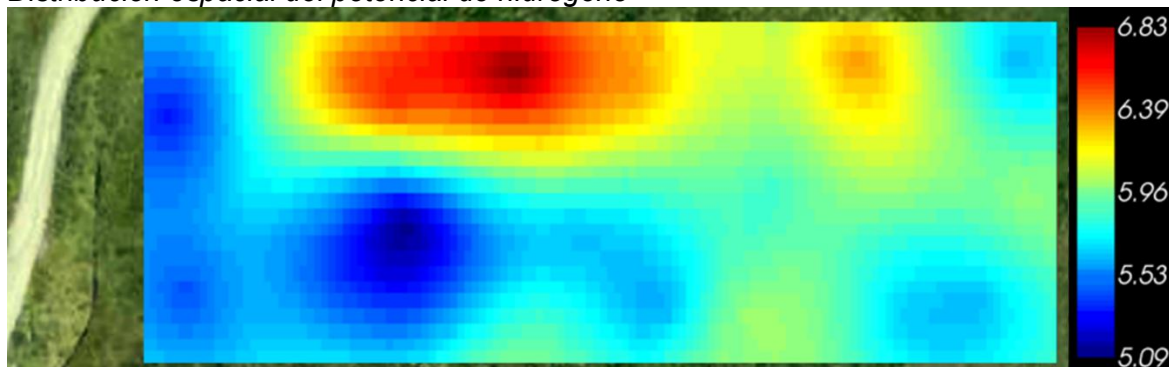
Nota: La escala de colores están en escala logarítmica, por ende, su equivalencia corresponde de la siguiente manera: 0,0756 <> 1,19 mg/kg, 0,0601 <> 1,15 mg/kg, 0,0445 <> 1,11 mg/kg, 0,029 <> 1,07 mg/kg, 0,0135 <> 1,03 mg/kg.

4.1.5 Potencial de hidrógeno (pH)

La distribución espacial del potencial de hidrógeno se presenta en la Figura 66, donde se puede ver una escala de colores que va de azul oscuro a rojo oscuro (5,09 a 6,83 unidades de pH). Se ha observado una zona con un pH menor a 5,5 con un área aproximada de 0,12 ha, que representa una calidad de *topsoil* aceptable, que requeriría de un tratamiento preliminar antes de ser utilizado para los trabajos de revegetación; cabe resaltar que esta zona presenta una forma alargada, extendiéndose en dirección noroeste a sureste, que tiende a atenuarse en dirección del centro del área de estudio. En base a los resultados presentados de la distribución de los metales pesados descritos anteriormente, se puede observar que tienen un comportamiento similar; lo que corrobora la interrelación que existe entre estos parámetros. Por otro lado, el área restante de 0,49 ha representa una zona con un potencial de hidrógeno mayor a 5,5 unidades de pH, que indica un *topsoil* de calidad ideal para los trabajos de revegetación, que no requeriría de algún tratamiento previo relacionado a este parámetro.

Figura 66

Distribución espacial del potencial de hidrógeno

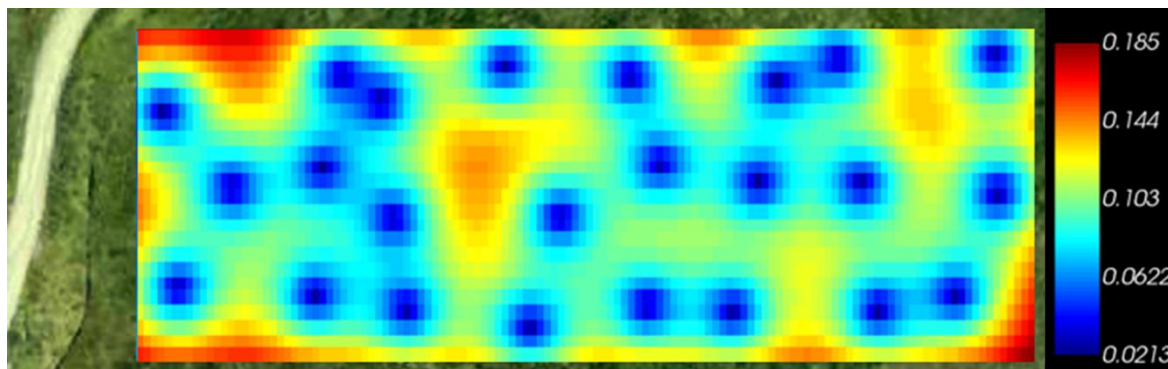


La Figura 67 corresponde a la distribución de los errores asociado al modelamiento geoestadístico mediante *kriging* ordinario, en donde los valores del error varían entre 0,0208 y 0,185 (azul a rojo oscuro), tal como se indica en la escala de colores. El patrón espacial muestra que los errores más bajos (en azul oscuro) se concentran principalmente en el entorno inmediato de las estaciones de muestreo, lo cual es esperado, ya que en estas zonas la interpolación se basa en datos reales. A medida que aumenta la distancia

con respecto a los datos originales, la varianza también se incrementa, lo que se refleja en el gradual cambio hacia tonalidades hasta rojas (en los bordes del área de estudio).

Figura 67

Estimación de incertidumbre – potencial de hidrógeno (pH)



4.2 Prueba de hipótesis

A continuación, en la Tabla 15 se presentan los resultados de la comprobación de las hipótesis específicas desarrolladas en el ítem 1.5. Cabe indicar que las hipótesis específicas descriptivas sólo requirieron de un contraste empírico a base a lo que se ha determinado con las inspecciones visuales en campo, con lo determinado en la metodología y en base a los resultados obtenidos.

Tabla 15

Resultados de la prueba de hipótesis

Nº	Hipótesis específicas	Tipo de prueba	Resultado
1	<p><i>H₀</i>: El depósito de <i>topsoil</i> no cuenta con controles de calidad operativos, que contribuyen a la conservación de la calidad del <i>topsoil</i>.</p> <p><i>H₁</i>: El depósito de <i>topsoil</i> cuenta con controles de calidad operativos, que contribuyen a la conservación de la calidad del <i>topsoil</i></p>	Empírica	Se verificó en campo que el depósito de <i>topsoil</i> sí presenta sus controles operativos. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa.

N°	Hipótesis específicas	Tipo de prueba	Resultado
2	<p><i>Ho:</i> Los parámetros críticos que caracteriza la calidad del <i>topsoil</i> son el pH y los metales pesados relacionados a la geología del acceso.</p> <p><i>H1:</i> El parámetro crítico que caracteriza la calidad del <i>topsoil</i> es el pH.</p>	Empírica	En base a la información disponible se obtuvo que el parámetro crítico es el pH, mientras que los metales pesados permiten corroborar la posible influencia que tiene el acceso sobre la calidad del <i>topsoil</i> . Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa.
3	<p><i>Ho:</i> La cantidad de estaciones de muestreo definida es menor a 15.</p> <p><i>H1:</i> La cantidad de estaciones de muestreo definida es mayor a 15.</p>	Empírica	En base a la dimensión del área de estudio, se determinaron 24 estaciones de muestreo. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa.
4	<p><i>Ho:</i> El área de estudio contiene un porcentaje del 100 % de <i>topsoil</i> con calidad aceptable y no se tiene <i>topsoil</i> con calidad ideal.</p> <p><i>H1:</i> El área de estudio contiene un porcentaje menor al 100 % de <i>topsoil</i> con calidad aceptable y el resto tiene una calidad ideal.</p>	Empírica	En base los resultados obtenidos, se determinó que el 21 % del área de estudio tiene una calidad de <i>topsoil</i> ideal y el 79 % tiene una calidad de <i>topsoil</i> aceptable. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa.

Conclusiones

El depósito de *topsoil* evaluado cuenta con todos los controles de calidad operativos, como por ejemplo, el sistema de drenaje superficial, que disminuye significativamente el riesgo de ingreso de agua de contacto al interior. Además, se verificó la presencia de un acceso no pavimentado ubicado al noroeste del depósito de *topsoil* evaluado.

El parámetro crítico fue potencial de hidrógeno, ya que permitió concluir con la definición del tipo de calidad de *topsoil*, usando como base los resultados obtenidos en el análisis de caracterización realizado por la unidad minera. De manera complementaria, se evaluaron metales pesados como el arsénico, cadmio, manganeso y plomo; para brindar información sobre la posible influencia del acceso no pavimentado sobre la calidad del *topsoil* evaluado.

El diseño y ubicación del área de estudio permitió evaluar la calidad del *topsoil* en casi toda la extensión del depósito de *topsoil* evaluado, y facilitó la evaluación de la posible influencia del acceso no pavimentado sobre el depósito de *topsoil*; ya que contiene zonas cercanas y alejadas de este acceso. Además, las 24 estaciones de muestreo distribuidas de manera aleatoria sobre rejillas regulares fueron suficientes cumplir con todos los requerimientos técnicos del método geoestadístico para generar la distribución espacial de los parámetros analizados dentro de todo el área de estudio.

El 19,7 % del área de estudio (0,12 ha), contiene *topsoil* de calidad aceptable con un potencial de hidrógeno menor a 5,5 unidades de pH, mientras que el 80,3 % restante (0,49 ha), contiene *topsoil* de calidad ideal para los trabajos de revegetación con un potencial de hidrógeno mayor a 5,5 unidades de pH. La distribución espacial del arsénico, cadmio, manganeso y plomo tuvieron comportamientos muy similares entre sí, cuyas concentraciones más altas coincidían con valores de pH inferiores a 5,5. Estos patrones espaciales sugieren que se podría deber a misma fuente potencial de contaminación, que podría a ser el tránsito de vehículos sobre el acceso no pavimentado (de material sulfurado)

ubicado a 10 m del depósito de *topsoil* TS. Esto se podría haber provocado por la acumulación de material particulado con contenido metálico de arsénico, cadmio manganeso y plomo sobre el depósito de *topsoil* TS. Cabe precisar que, el área que contiene el *topsoil* de calidad ideal se encuentra hacia el este del área de estudio, siendo la zona más alejada del acceso no pavimentado.

Recomendaciones

Antes de realizar un análisis de calidad en un depósito de *topsoil* destinado para el cierre de componentes mineros, es importante que siempre se realice una supervisión previa de todos los controles aplicados por la unidad minera para tratar de mantener la calidad del *topsoil* en el tiempo e identificar fuentes potenciales de contaminación; ya que esta información será muy clave para poder elegir los parámetros críticos de evaluación y también permitirán sustentar los resultados de la calidad del *topsoil* que se puedan obtener en cada caso.

Respecto a estudios similares que no cuentan con una información base del *topsoil*, se deben considerar a los principales parámetros de caracterización de suelo tales como; textura, potasio, fósforo, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, carbonatos, potencial de hidrógeno, entre otros; así como la actividad microbiana del suelo, que brinda información acerca de la actividad de los microorganismos que son vitales para el crecimiento de vegetación. Por otro lado, se pueden adicionar al análisis parámetros como los metales pesados, para poder hacer algún seguimiento a la calidad del suelo en el tiempo y prevenir de alguna anomalía que pueda presentarse; siempre y cuando exista alguna fuente potencial de contaminación que se encuentre relacionada con el aporte de metales pesados al depósito de *topsoil*.

En un estudio geoestadístico es recomendable que se utilicen por lo menos 15 estaciones de muestreo, y distribuidas de manera aleatoria para que se puedan obtener mejores resultados, con una incertidumbre muy baja. Por otro lado, el área de estudio en lo posible es recomendable que pueda contener la mayor área superficial posible del depósito de *topsoil* para poder tener claro cuál es la distribución de los parámetros a analizar en toda la extensión del depósito. En caso, no se pueda evaluar todo el área por temas logísticos, es recomendable hacer una supervisión en campo y revisar si existe alguna información histórica que permita priorizar justificadamente la evaluación de un área en específico del depósito de *topsoil*.

En base a los resultados, se podría evaluar la adición de cal (previo a las actividades de revegetación) al *topsoil* de calidad aceptable, para elevar el valor del potencial de hidrógeno en ese suelo; y con relación al *topsoil* de calidad ideal, es recomendable que este suelo sea oxigenado para activar la actividad microbiana. Por otro lado, para verificar si efectivamente el acceso no pavimentado es una fuente de contaminación para el depósito de topsoil TS, se sugiere que se realicen muestreos complementarios en el acceso no pavimentado, para verificar si los niveles de metales evaluados corresponderían a los encontrados en el área de estudio.

Referencias bibliográficas

- Agbeshie, A. A., Awuah, R., Ofori-adjei, N. B., Ennison, M., & Atta-darkwa, T. (2024). Assessment of soil quality degradation impacted by *topsoil* stockpiling of a surface mining operation in a Tropical climate. *Scientific African. Elsevier B.V*, Artículo e02481. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02481>.
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soil: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3rd ed.). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-4470-7>.
- Arce, S. (2017). *Suelos contaminados con plomo en la ciudad de La Oroya - Junín y su impacto en la calidad del agua del río Mantaro* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v20i40.14389>.
- Ávila, D. D., & Ramírez-Arrieta, V. M. (2020). *Si una imagen vale 1000 palabras: ¿Cuánto puede decir un gráfico de cajas?*. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34348.28806/1>.
- Barbaro, L., Karlanian, M., & Mata, D. (2014). *Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los sustratos para plantas*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca - INTA.
- Benito, Á. (2012). *Modelización Geoestadística para la predicción de actividad de ¹³⁷Cs en suelo*. [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid]. Repositorio Departamento de Química Física Aplicada. <http://hdl.handle.net/10486/12304>.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F., & Konopka, A. E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1501–1511. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>.

- Córdova, M., Paccioretti, P., Giannini, F., Bruno, C., & Balzarini, M. (2019). *Guía para el análisis de datos espaciales en agricultura*. Serie Estadística Aplicada. Com. Balzarini M. Brujas. Córdoba, Argentina.
- Del Olmo, S. (2020). Geoestadística aplicada a la contaminación de suelos [Seminario web]. Ingeoexpert. https://ingeoexpert.com/cursos/curso-geoestadistica-aplicada-a-contaminacionsuelos/?srsltid=AfmBOorCzftdxFShc72jOCOOhMdNqQZ9BnCxOjet1FknpTw8p3vk_dz-a.
- Díaz, M. (2002). *Estadística Aplicada*. Instituto de Geofísica. Instituto Superior Tecnológico ITCA, Ibarra- Ecuador. https://doi.org/10.37811/cli_w832.
- Doménech, X. (2014). *Fundamentos de química ambiental: Química de los sistemas atmosférico edáfico e hidrosférico* (1). Síntesis. <https://dmc2vm44yioo9.cloudfront.net/94ebd359-8c96-48a3-9db6-3be5f1816b78.pdf>.
- Emery, X. (2013). *Geoestadística: Apuntes de clase del curso de Geoestadística Aplicada*. Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile.
- Ersoy, A., & Yünel, T. (2018). The assessment of soil contamination by heavy metals using geostatistical sequential Gaussian simulation method. *Human and Ecological Risk Assessment*, 24(8), 2142–2161. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1440528>.
- Fischer, A. M., Van Hamme, J. D., Gardner, W. C., & Fraser, L. H. (2022). Impacts from *topsoil* stockpile height on soil geochemical properties in two mining operations in British Columbia: Implications for restoration practices. *Mining*, 2, 315–329. <https://doi.org/10.3390/mining2020017>.
- Galán, E. & Romero, A. (2008). *Contaminación de suelos por metales pesados*. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Facultad de Química. Apartado 553. Universidad de Sevilla. Sevilla 41071.
- García, C., Moreno, J. L., Hernandez, T., & Polo, A. (2002). *Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo*. Ciencia y Medio Ambiente - CCMA-CSIC, 125–138. <http://hdl.handle.net/10261/111812>.

- García-Moruno, L., & De La Riva-Fernández, J. (2019). *Análisis geoestadístico del coeficiente de corrección por accesibilidad a núcleos de población en las valoraciones urbanísticas en España*. EURE (Santiago), 45(134), 125–145. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612019000100125>.
- Ghasemi, A., & Zahediasl, S. (2012). Normality tests for statistical analysis: A guide for non-statisticians. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 10(2), 486–489. <https://doi.org/10.5812/ijem.3505>.
- Giraldo, R. (2014). *Introducción a la geoestadística: Teoría y aplicación*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Estadística.
- González, J., Guerra, F., & Gómez, H. (2007). *Conceptos básicos de geoestadística en geografía y ciencias de la Tierra*. *Geoenseñanza*, 12 (1), 81–90. Universidad de los Andes. <https://www.redalyc.org/pdf/360/36014577008.pdf>.
- Harre, K., Chaudhry, T., Greenwald, R., Jian, W., Davis, C., Zavislak, M., & Minsker, B. (2009). *Adaptive long-term monitoring at environmental restoration sites (ER-0629)* [Technical Report TR-2317-ENV]. ESTCP – Environmental Security Technology Certification Program. <http://www.sampleoptimizer.com/PDFs/ER-0629-FR.pdf>.
- Interstate Technology & Regulatory Council. (2016). *Geospatial Analysis for Optimization at Environmental Sites*. GRO-1. Interstate Technology & Regulatory Council, Geostatistics for Remediation Optimization Team.
- Jordán, A. (2006). *Manual de Edafología [Curso 2005-2006]*. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla.
- Kerin, E. J., & Lin, H. K. (2010). Fugitive dust and human exposure to heavy metals around the Red Dog Mine. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 206, 49-63. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6260-7_3.
- Koenig, R., & Isaman, V. (2010). *Topsoil Quality Guidelines for Landscaping*. Gardening, Paper 15. https://digitalcommons.usu.edu/extension_curgarden/15.
- Kumar, S. (2013). *Ecorestoration of the coalmine degraded lands*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-0851-8>.

- Lagos, R., & Fierro, G. (2024). Experiences of mine closure cover with geosynthetics in Peru. *E3S Web of Conferences*, 569, 16004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456916004>.
- Ledesma, J., Neilson, J. W., Maier, R. M., Babst-Kostecka, A., & Rasmussen, C. (2025). Effects of stockpiling on *topsoil* biogeochemistry for semiarid mine reclamation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 42, 15–26. <https://doi.org/10.1007/s42461-024-01164-2>.
- LFU-MERKBLATT. (2010). *Probenahme von Boden und Bodenluft bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Gewässer* (Merkblatt 3.8/4, Stand: 15). Alemania.
- Liao, Y., Li, D., & Zhang, N. (2018). Comparison of interpolation models for estimating heavy metals in soils under various spatial characteristics and sampling methods. *Transactions in GIS*, 22(2), 409–434. <https://doi.org/10.1111/tgis.12319>.
- Londoño, L., & Valdés, J. C. (2012). *Geoestadística aplicada*. Editorial Académica Española, Vol. 11, Issue 1.
- Meerschman, E., Cockx, L., Islam, M., Meeuws, F., & Van, M. (2011). Geostatistical assessment of the impact of world war i on the spatial occurrence of soil heavy metals. *Ambio*, 40(4), 417–424. <https://doi.org/10.1007/s13280-010-0104-6>
- Mendenhall, W., Beaver, R., & Beaver, B. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística*. Cengage Learning. https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w25418w/sem8_introduccionalaprobabilidadyestadistica.pdf.
- MIDAGRI. (2022). *Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor (Anexo V del D.S. N° 005-2022-MIDAGRI)*.
- MINEM. (2005). *Guía para la Elaboración de Planes de cierre de minas*. Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros.
- MINEM. (2007). *Guía para el diseño de coberturas de depósitos de residuos mineros*. Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros.

- Minera San Xavier. (2011). *Manifestación de impacto ambiental modalidad regional para la ampliación del proyecto minero Peñasquito*. Minera San Xavier. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgiraDocs/documentos/zac/estudios/2020/32ZA2020MD012.pdf>.
- Newbold, P., Carlson, W. L., & Thome, B. M. (2008). *Estadística para administración y economía* (6.ª ed.). Pearson Educación.
- Pardo Abad, C. J. (2020). Valuation of industrial heritage in terms of sustainability: Some cases of tourist reference in Spain. *Sustainability*, 12(21), 9216. <https://doi.org/10.3390/su12219216>.
- Pla, C., Valdes-Abellan, J., Pardo, M., Jódar-Abellán, A., Benavente, D., & Fernandez-Cortes, A. (2018). Geoestadística con software libre: material para prácticas docentes. Memorias del Programa de Redes-I CE de calidad, innovación e investigación en docencia universitaria, Vol. 1, 945–960. Instituto de Ciencias de la Educación de Universidad de Alicante. <https://web.ua.es/es/ice/redes-innovaestic2018>
- Porta, J., Lopez, R., & Poch, R. (2019). *Edafología: Uso y protección de suelos* (4ª ed.). Ediciones Mundi-Presa.
- Puga Gómez, C. F. (2021). *Impacto de errores de muestreo y de modelamiento en la estimación mediante kriging* [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio de la Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/183917>.
- Qu, M., Li, W., & Zhang, C. (2014). Spatial Distribution and Uncertainty Assessment of Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Soil Using Sequential Gaussian Simulation. *Human and Ecological Risk Assessment*, 20(3), 764–778. <https://doi.org/10.1080/10807039.2013.770352>.
- Quispe, J. (2020). *Diseño de obras de cierre en depósitos de relaves propiedad de minera Poderosa, distrito y provincia de Pataz, La Libertad* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional

- Agraria La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/c73f569e-932e-495f-97ec-c2bd6ae328bc>.
- Rucks, L., García, F., Kapián, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. Facultad de Agronomía de la Universidad de la República.
- Sanzano, A. (2019). *Los factores de formación del suelo*. Facultad de Agronomía y Zootecnia - Universidad Nacional de Tucumán.
- Schoeneberger, P., Wysocki, D., Benham, E., & Staff, S. S. (2012). *Field book for describing and sampling soils* (Versión 3). Natural Resources Conservation Service, Natural Soil Survey Center.
- Schwarz, M. (2018). *El proceso de cierre de minas*. Agenda Viva, 2, 24–29. Universidad de Lima.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591–611. <https://doi.org/10.2307/2333709>.
- Świdwa-Urbańska, J., & Batlle-Sales, J. (2021). Data quality oriented procedure, for detailed mapping of heavy metals in urban *topsoil* as an approach to human health risk assessment. *Journal of Environmental Management*, 295, 113019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113019>.
- Tumy, E. (2019). *Geoestadística aplicada a los niveles de contaminación de suelos afectados por arsenico (As) y mercurio (Hg) en el poblado de Mollehuaca - Arequipa* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Huánuco]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Huancavelica. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3193>.
- Velásquez, M., Vega, C., Gomringer, R., Pillaca, M., Thomas, E., Stewart, P., Gamarra, L., Dañobeytia, F., Guerrero, J., Gushiken, M., Bardales, J., Silman, M., Fernandez, L., Ascorra, C., & Torres, D. (2021). Mercury in soils impacted by alluvial gold mining in the Peruvian Amazon. *Journal of Environmental Management*, 288, 112364. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112364>.

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (9ª ed.). Pearson Educación.

Weil, R., & Brady, N. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15.ª ed.). Pearson Education Limited, 11.

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Panel fotográficos de los trabajos de muestreo en campo.....	1
Anexo 2: Cadena de custodia.....	3
Anexo 3: Informes de ensayo.....	5
Anexo 4: Análisis de control de calidad de las muestras	33

Anexo 1: Panel fotográficos de los trabajos de muestreo en campo

Fotografía 1

Suelo después de haber retirado el barreno con la muestra de suelo



Fotografía 2

Suelo rellenado para dejar el suelo similar a las condiciones iniciales



Anexo 2: Cadena de custodia

Anexo 3: Informes de ensayo



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

AV. TUPAC AMARU NRO. 210 (KM. 4.5 TUPAC AMARU)

ENV / LB-351973-002

PROCEDENCIA : **ALMACEN DE TOP SOIL EN UNIDAD MINERA**

Fecha de Recepción SGS : 28-01-2023
Fecha de Ejecución : Del 28-01-2023 al 02-02-2023
Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
TP-01
TP-02
TP-03
TP-04
TP-05
TP-06
TP-07
TP-08

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 02/02/2023

Frank M. Julcamoro Quispe
C.Q.P. 1033
Supervisor de Laboratorio

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 1 de 19

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900
Arequipa t (054) 213 506
Cajamarca t (076) 366 092

www.sgs.pe
e Pe.servicios@sgs.com

Miembro del Grupo SGS



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

TP-09
TP-10
TP-11
TP-12
TP-13
TP-14
TP-15
TP-16
TP-17
TP-18
TP-19
TP-20
TP-21
TP-22
TP-23
TP-24
TP-25

**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-01	TP-02	TP-03
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					14:01:00	14:06:00	14:15:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Aluminio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	2.701	8.602	25,274.954	25,690.827	26,694.673
Antimonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.041	0.131	0.168	0.182	0.190
Arsénico Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.897	2.857	25.472	33.182	29.483
Bario Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.138	0.440	108.034	105.270	87.409
Berilio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.054	0.173	0.716	0.693	0.795
Bismuto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	0.270	0.285	0.227
Boro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.399	17.195	<17.195	<17.195	<17.195
Cadmio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.045	0.144	0.473	0.594	0.414
Calcio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	65.382	208.223	2,113.094	2,310.003	1,971.934
Circonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.046	0.147	0.643	0.910	0.757
Cobalto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.040	0.128	6.359	8.609	8.166
Cobre Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.357	1.136	11.998	12.195	13.022
Cromo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.314	1.001	7.704	7.284	7.885
Escandio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.099	0.317	4.466	5.041	4.575
Estaño Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.296	0.940	<0.940	<0.940	<0.940
Estroncio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.258	0.822	19.416	19.647	21.184
Fosforo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	4.759	15.157	880.234	858.052	661.124
Hierro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	9.201	29.302	25,348.710	27,428.163	30,957.725
Lantano Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	14.137	12.830	14.929
Litio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.0	3.0	19.6	21.6	24.5
Magnesio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.509	17.545	4,152.700	4,277.684	4,437.273
Manganeso Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.202	0.643	1,172.201	1,576.682	1,271.691
Mercurio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.082	0.262	<0.262	<0.262	<0.262
Molibdeno Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.057	0.182	2.338	2.605	2.419
Niquel Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.156	0.498	0.987	2.142	1.299
Plata Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.084	0.268	0.377	0.333	<0.268
Plomo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.109	0.346	29.380	32.518	31.325
Potasio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	13.500	42.993	2,090.106	1,731.124	1,738.406
Selenio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.132	3.605	<3.605	<3.605	<3.605
Sodio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	7.579	24.136	89.095	89.554	82.982
Talio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.029	0.093	0.273	0.240	0.252
Thorio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.035	0.112	2.744	2.775	3.150

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 3 de 19



**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-01	TP-02	TP-03
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					14:01:00	14:06:00	14:15:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Titanio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.079	0.251	24.678	20.958	25.194
Uranio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.102	0.858	0.764	0.676
Vanadio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.488	4.737	34.928	39.079	37.542
Wolframio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.072	0.231	<0.231	<0.231	<0.231
Ytrio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.030	0.096	8.887	8.263	6.894
Zinc Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.607	1.934	90.751	105.427	95.113

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-04	TP-05	TP-06
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					14:18:00	14:22:00	14:26:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Aluminio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	2.701	8.602	20,606.064	14,802.516	23,926.286
Antimonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.041	0.131	0.235	0.186	<0.131
Arsénico Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.897	2.857	12.973	43.474	7.044
Bario Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.138	0.440	55.557	62.714	53.185
Berilio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.054	0.173	1.120	0.654	0.774
Bismuto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	0.213	0.977	0.246
Boro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.399	17.195	<17.195	<17.195	<17.195
Cadmio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.045	0.144	0.260	0.406	0.353
Calcio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	65.382	208.223	1,424.101	2,099.782	2,118.140
Circonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.046	0.147	0.552	0.400	0.569
Cobalto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.040	0.128	5.363	4.064	8.277
Cobre Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.357	1.136	8.392	12.275	13.495
Cromo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.314	1.001	5.780	4.008	6.992

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 4 de 19

**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-04	TP-05	TP-06
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					14:18:00	14:22:00	14:26:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Escandio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.099	0.317	3.463	2.110	3.821
Estaño Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.296	0.940	1.249	<0.940	<0.940
Estroncio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.258	0.822	15.406	17.547	13.826
Fosforo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	4.759	15.157	604.139	863.009	465.218
Hierro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	9.201	29.302	23,942.991	21,871.514	29,863.078
Lantano Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	25.488	17.127	16.633
Litio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.0	3.0	16.0	9.3	21.8
Magnesio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.509	17.545	5,125.067	2,581.041	7,145.997
Manganeso Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.202	0.643	938.452	877.024	879.789
Mercurio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.082	0.262	<0.262	<0.262	<0.262
Molibdeno Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.057	0.182	0.662	1.049	0.398
Niquel Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.156	0.498	<0.498	<0.498	2.040
Plata Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.084	0.268	<0.268	0.401	<0.268
Plomo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.109	0.346	29.108	147.123	22.350
Potasio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	13.500	42.993	1,027.179	1,554.882	2,009.395
Selenio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.132	3.605	<3.605	<3.605	<3.605
Sodio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	7.579	24.136	93.652	67.508	106.474
Talio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.029	0.093	0.177	0.311	0.169
Thorio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.035	0.112	5.463	4.080	3.631
Titanio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.079	0.251	11.777	23.615	20.487
Uranio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.102	0.595	0.550	0.404
Vanadio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.488	4.737	18.948	18.721	26.036
Wolframio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.072	0.231	<0.231	<0.231	<0.231
Ytrio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.030	0.096	13.665	6.927	8.706
Zinc Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.607	1.934	78.808	82.635	79.516

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 5 de 19

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe
Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com
Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS

**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-07	TP-08	TP-09
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					14:31:00	14:39:00	14:45:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<i>Metales Totales</i>							
Aluminio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	2.701	8.602	22,431.161	22,403.768	25,893.476
Antimonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.041	0.131	0.141	<0.131	0.230
Arsénico Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.897	2.857	17.548	44.986	34.265
Bario Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.138	0.440	59.193	228.505	130.987
Berilio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.054	0.173	0.725	0.872	0.810
Bismuto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	0.284	0.216	0.241
Boro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.399	17.195	<17.195	<17.195	<17.195
Cadmio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.045	0.144	0.322	0.337	0.409
Calcio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	65.382	208.223	4,164.691	5,775.015	3,415.400
Circonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.046	0.147	0.658	1.738	0.567
Cobalto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.040	0.128	8.289	8.518	8.197
Cobre Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.357	1.136	13.651	13.826	12.632
Cromo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.314	1.001	6.565	5.562	7.406
Escandio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.099	0.317	3.683	5.285	5.095
Estaño Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.295	0.940	<0.940	1.091	1.046
Estroncio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.258	0.822	20.846	71.087	28.388
Fosforo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	4.759	15.157	438.273	253.673	814.687
Hierro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	9.201	29.302	29,048.870	39,182.620	29,676.052
Lantano Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	14.971	17.970	18.372
Litio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.0	3.0	21.7	31.6	21.2
Magnesio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.509	17.545	5,880.153	4,440.769	4,331.390
Manganeso Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.202	0.643	718.968	1,152.140	1,603.642
Mercurio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.082	0.262	<0.262	<0.262	<0.262
Molibdeno Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.057	0.182	1.022	9.999	2.252
Niquel Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.156	0.498	1.764	0.506	1.297
Plata Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.064	0.268	<0.268	<0.268	<0.268
Plomo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.109	0.346	27.214	21.739	37.631
Potasio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	13.500	42.993	1,260.593	1,535.595	2,298.255
Selenio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.132	3.605	<3.605	<3.605	<3.605
Sodio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	7.579	24.136	93.360	105.115	102.550

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 6 de 19

**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-07	TP-08	TP-09
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					14:31:00	14:39:00	14:45:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<i>Metales Totales</i>							
Talio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.029	0.093	0.193	0.219	0.257
Thorio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.035	0.112	3.639	4.019	2.945
Titanio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.079	0.251	14.573	10.303	26.245
Uranio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.102	0.401	1.453	0.922
Vanadio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.488	4.737	25.119	29.886	42.587
Wolframio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.072	0.231	<0.231	<0.231	<0.231
Ytrio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.030	0.096	6.407	13.036	8.182
Zinc Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.607	1.934	92.553	72.867	110.918

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-10	TP-11	TP-12
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					14:58:00	15:04:00	15:07:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<i>Metales Totales</i>							
Aluminio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	2.701	8.602	13,763.748	12,990.216	16,600.961
Antimonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.041	0.131	0.485	0.242	0.223
Arsénico Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.897	2.857	53.881	25.244	31.556
Bario Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.138	0.440	79.166	80.557	100.105
Berilio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.054	0.173	0.518	0.454	0.450
Bismuto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	1.735	0.787	0.702
Boro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.399	17.195	<17.195	<17.195	<17.195
Cadmio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.045	0.144	0.333	0.406	0.237
Calcio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	65.382	208.223	1,275.008	4,330.742	3,981.870
Circonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.046	0.147	0.569	1.205	1.222
Cobalto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.040	0.128	4.258	4.607	4.287

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 7 de 19



**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-10	TP-11	TP-12
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					14:58:00	15:04:00	15:07:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Cobre Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.357	1.136	15.949	13.555	12.216
Cromo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.314	1.001	5.158	6.960	6.123
Escandio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.099	0.317	2.277	2.775	3.246
Estaño Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.295	0.940	<0.940	<0.940	<0.940
Estroncio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.258	0.822	16.996	28.702	31.087
Fosforo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	4.759	15.157	692.654	778.334	730.540
Hierro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	9.201	29.302	25,846.108	19,398.831	22,483.316
Lantano Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	13.847	11.380	12.909
Litio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.0	3.0	9.6	16.9	19.7
Magnesio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.509	17.545	2,236.384	2,901.389	2,724.114
Manganeso Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.202	0.643	583.060	635.598	505.548
Mercurio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.082	0.262	<0.262	<0.262	<0.262
Molibdeno Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.057	0.182	1.477	0.773	0.760
Niquel Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.156	0.498	<0.498	<0.498	<0.498
Plata Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.084	0.268	0.803	0.606	0.643
Plomo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.109	0.346	255.908	99.398	82.704
Potasio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	13.500	42.993	1,649.144	2,204.608	2,612.234
Selenio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.132	3.605	<3.605	<3.605	<3.605
Sodio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	7.579	24.136	63.390	83.374	97.737
Talio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.029	0.093	0.439	0.212	0.282
Thorio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.035	0.112	3.590	2.524	3.304
Titanio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.079	0.251	29.160	62.749	71.950
Uranio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.102	0.593	0.716	0.834
Vanadio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.488	4.737	21.633	21.538	23.363
Wolframio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.072	0.231	<0.231	<0.231	<0.231
Ytrio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.030	0.096	4.443	8.711	8.860
Zinc Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.607	1.934	84.043	85.315	59.190

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 8 de 19

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900
Arequipa t (054) 213 506
Cajamarca t (076) 366 092

www.sgs.pe
e Pa.servicios@sgs.com

Miembro del Grupo SGS

**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-13	TP-14	TP-15
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					15:10:00	15:15:00	15:20:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Aluminio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	2.701	8.602	19,346.568	20,354.599	20,729.188
Antimonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.041	0.131	0.143	<0.131	0.176
Arsénico Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.897	2.857	16.086	9.862	12.305
Bario Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.138	0.440	109.090	88.893	101.321
Berilio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.054	0.173	0.527	0.602	0.534
Bismuto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	0.304	0.162	0.211
Boro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.399	17.195	<17.195	<17.195	<17.195
Cadmio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.045	0.144	0.381	0.198	0.234
Calcio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	65.382	208.223	8,198.683	6,631.052	6,109.194
Circonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.046	0.147	1.771	2.652	2.294
Cobalto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.040	0.128	6.199	6.751	6.850
Cobre Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.357	1.136	13.443	10.683	12.952
Cromo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.314	1.001	6.619	8.391	8.121
Escandio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.099	0.317	4.823	4.625	4.708
Estaño Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.295	0.940	<0.940	<0.940	<0.940
Estroncio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.258	0.822	41.072	35.959	35.320
Fosforo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	4.759	15.157	594.870	639.626	810.165
Hierro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	9.201	29.302	21,389.147	21,915.569	23,185.794
Lantano Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	13.211	12.680	13.925
Litio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.0	3.0	24.5	31.3	29.8
Magnesio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.509	17.545	3,544.350	4,107.867	4,132.493
Manganeso Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.202	0.643	865.113	634.596	693.354
Mercurio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.082	0.262	<0.262	<0.262	<0.262
Molibdeno Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.057	0.182	0.730	0.455	0.505
Niquel Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.156	0.498	<0.498	<0.498	0.501
Plata Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.084	0.268	0.393	0.275	<0.268
Plomo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.109	0.346	31.190	21.123	29.007
Potasio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	13.500	42.993	2,975.797	2,376.759	3,257.196
Selenio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.132	3.605	<3.605	<3.605	<3.605
Sodio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	7.579	24.136	113.525	120.339	118.824

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 9 de 19



**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-13	TP-14	TP-15
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					15:10:00	15:15:00	15:20:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<i>Metales Totales</i>							
Talio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.029	0.093	0.132	0.095	0.130
Thorio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.035	0.112	2.750	2.451	2.826
Titanio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.079	0.251	60.558	223.153	170.818
Uranio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.102	0.851	0.995	0.995
Vanadio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.488	4.737	30.021	30.683	30.744
Wolframio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.072	0.231	<0.231	<0.231	<0.231
Ytrio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.030	0.096	12.741	13.338	13.459
Zinc Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.607	1.934	78.709	63.133	76.663

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-16	TP-17	TP-18
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					15:24:00	15:28:00	15:31:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
<i>Metales Totales</i>							
Aluminio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	2.701	8.602	19,151.855	19,006.523	15,662.231
Antimonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.041	0.131	0.334	0.136	0.153
Arsénico Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.897	2.857	15.540	8.824	9.045
Bario Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.138	0.440	89.079	89.792	76.442
Berilio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.054	0.173	0.543	0.528	0.511
Bismuto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	0.342	0.193	0.169
Boro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.399	17.195	<17.195	<17.195	<17.195
Cadmio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.045	0.144	0.341	0.247	0.210
Calcio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	65.382	208.223	4,824.724	5,274.260	5,625.756
Circonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.046	0.147	1.801	2.501	2.265
Cobalto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.040	0.128	6.166	5.998	5.928

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 10 de 19



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



Registro N° LE - 002

**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-16	TP-17	TP-18
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					15:24:00	15:28:00	15:31:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Cobre Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.357	1.136	13.442	10.692	11.912
Cromo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.314	1.001	7.992	8.651	7.159
Escandio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.099	0.317	4.015	4.258	3.549
Estaño Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.295	0.940	<0.940	<0.940	<0.940
Estroncio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.258	0.822	30.159	30.479	31.762
Fosforo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	4.759	15.157	704.564	624.724	715.710
Hierro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	9.201	29.302	21,570.870	22,507.530	19,375.829
Lantano Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	13.872	11.958	10.481
Litio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.0	3.0	26.5	28.6	25.5
Magnesio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.509	17.545	3,971.615	4,371.075	3,943.137
Manganeso Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.202	0.643	515.003	493.611	570.162
Mercurio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.082	0.262	<0.262	<0.262	<0.262
Molibdeno Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.057	0.182	0.554	0.484	0.447
Niquel Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.156	0.498	<0.498	<0.498	0.643
Plata Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.084	0.268	0.511	0.361	0.325
Plomo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.109	0.346	56.126	32.138	19.133
Potasio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	13.500	42.993	2,669.214	2,735.921	2,636.398
Selenio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.132	3.605	<3.605	<3.605	<3.605
Sodio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	7.579	24.136	90.549	95.446	91.528
Talio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.029	0.093	0.216	0.107	<0.093
Thorio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.035	0.112	2.597	2.570	2.167
Titanio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.079	0.251	150.136	144.799	160.061
Uranio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.102	0.891	0.875	0.730
Vanadio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.488	4.737	28.114	27.454	23.886
Wolframio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.072	0.231	<0.231	<0.231	<0.231
Ytrio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.030	0.096	13.288	12.124	10.252
Zinc Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.607	1.934	80.728	69.232	67.793

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 11 de 19

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe
Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com
Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS

**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-19	TP-20	TP-21
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					15:40:00	15:49:00	16:02:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Aluminio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	2.701	8.602	21,483.791	24,455.596	18,621.172
Antimonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.041	0.131	<0.131	<0.131	<0.131
Arsénico Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.897	2.857	10.599	6.772	11.317
Bario Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.138	0.440	113.112	102.576	87.311
Berilio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.054	0.173	0.534	0.652	0.491
Bismuto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	0.153	<0.103	0.156
Boro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.399	17.195	<17.195	<17.195	<17.195
Cadmio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.045	0.144	0.242	<0.144	0.303
Calcio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	65.382	208.223	5,982.429	4,782.750	6,071.728
Circonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.046	0.147	2.856	3.354	2.711
Cobalto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.040	0.128	8.496	8.721	6.684
Cobre Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.357	1.136	11.432	13.588	11.929
Cromo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.314	1.001	9.534	15.944	8.489
Escandio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.099	0.317	5.118	6.489	4.191
Estaño Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.295	0.940	<0.940	<0.940	<0.940
Estroncio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.258	0.822	36.104	30.693	33.758
Fosforo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	4.759	15.157	568.106	293.558	707.565
Hierro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	9.201	29.302	23,852.768	27,665.790	21,561.743
Lantano Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	14.650	13.799	12.107
Litio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.0	3.0	33.2	31.5	28.7
Magnesio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.509	17.545	4,192.461	5,930.792	4,317.759
Manganeso Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.202	0.643	805.065	351.465	575.507
Mercurio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.082	0.262	<0.262	<0.262	<0.262
Molibdeno Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.057	0.182	0.548	0.355	0.472
Niquel Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.156	0.498	<0.498	2.939	<0.498
Plata Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.084	0.268	0.330	<0.268	0.314
Plomo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.109	0.346	23.927	14.463	21.877
Potasio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	13.500	42.993	2,456.251	2,489.697	3,017.672
Selenio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.132	3.605	<3.605	<3.605	<3.605
Sodio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	7.579	24.136	114.653	144.103	86.806

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 12 de 19

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348 Callao 1 Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe
Ernesto Gunther 275 Parque Industrial Arequipa t (054) 213 506 e Pa.servicios@sgs.com
Jr. Arnaldo Márquez Ba. San Antonio Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS

**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-19	TP-20	TP-21
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					15:40:00	15:49:00	16:02:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Yalio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.029	0.093	0.109	0.093	<0.093
Thorio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.035	0.112	2.788	2.419	2.337
Titanio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.079	0.251	129.303	60.499	151.292
Uranio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.102	1.082	0.824	0.885
Vanadio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.488	4.737	32.776	39.823	28.446
Wolframio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.072	0.231	<0.231	<0.231	<0.231
Ytrio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.030	0.096	15.484	15.628	12.349
Zinc Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.607	1.934	68.884	56.397	68.489

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-22	TP-23	TP-24
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					16:11:00	16:20:00	16:30:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Aluminio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	2.701	8.602	21,491.590	23,592.445	21,601.063
Antimonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.041	0.131	<0.131	<0.131	<0.131
Arsénico Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.897	2.857	9.565	10.519	7.799
Bario Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.138	0.440	93.406	91.393	101.248
Berilio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.054	0.173	0.552	0.611	0.545
Bismuto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	0.116	0.169	<0.103
Boro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.399	17.195	<17.195	<17.195	<17.195
Cadmio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.045	0.144	0.197	0.292	<0.144
Calcio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	65.382	208.223	5,512.679	4,956.698	4,455.596
Circonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.046	0.147	2.615	1.584	3.731
Cobalto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.040	0.128	7.135	8.379	8.308

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 13 de 19

**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-22	TP-23	TP-24
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					16:11:00	16:20:00	16:30:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Metales Totales							
Cobre Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.357	1.136	9.978	12.876	10.469
Cromo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.314	1.001	9.555	16.337	10.506
Escandio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.099	0.317	4.748	5.245	4.649
Estaño Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.295	0.940	<0.940	<0.940	<0.940
Estroncio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.258	0.822	32.512	33.810	25.185
Fosforo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	4.759	15.157	551.463	711.078	346.319
Hierro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	9.201	29.302	24.249.882	26.951.054	24.414.442
Lantano Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	13.628	11.496	13.645
Litio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.0	3.0	33.5	35.0	30.8
Magnesio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.509	17.545	4.678.337	5.925.051	4.767.501
Manganeso Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.202	0.643	534.022	599.226	583.788
Mercurio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.082	0.262	<0.262	<0.262	<0.262
Molibdeno Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.057	0.182	0.351	0.614	0.464
Niquel Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.156	0.498	0.653	4.641	1.042
Plata Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.084	0.268	<0.268	<0.268	<0.268
Plomo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.109	0.346	20.739	29.827	13.375
Potasio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	13.500	42.993	2.351.522	2.589.289	3.410.468
Selenio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.132	3.605	<3.605	<3.605	<3.605
Sodio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	7.579	24.136	101.038	89.805	122.351
Talio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.029	0.093	0.094	0.108	<0.093
Thorio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.035	0.112	2.504	2.359	2.157
Titanio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.079	0.251	193.767	109.882	155.944
Uranio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.102	0.965	0.882	1.018
Vanadio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.488	4.737	31.765	36.003	31.726
Wolframio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.072	0.231	<0.231	<0.231	<0.231
Ytrio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.030	0.096	13.378	10.785	16.019
Zinc Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.607	1.934	76.532	84.503	56.691

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 14 de 19



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



Registro N° LE - 002

INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-25
PROFUNDIDAD (m)					
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023
HORA DE MUESTREO					16:39:00
MATRIZ					SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado
Metales Totales					
Aluminio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	2.701	8.802	23,858.465
Antimonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.041	0.131	0.639
Arsénico Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.897	2.857	8.909
Bario Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.138	0.440	81.788
Berilio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.054	0.173	0.565
Bismuto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	<0.103
Boro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.399	17.195	<17.195
Cadmio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.045	0.144	0.180
Calcio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	65.382	208.223	5,617.647
Circonio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.046	0.147	1.591
Cobalto Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.040	0.128	7.814
Cobre Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.357	1.136	12.038
Cromo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.314	1.001	17.901
Escandio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.099	0.317	5.481
Estaño Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.295	0.940	<0.940
Estroncio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.258	0.822	33.294
Fosforo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	4.759	15.157	633.185
Hierro Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	9.201	29.302	29,723.743
Lantano Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.103	12.872
Litio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.0	3.0	36.8
Magnesio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	5.509	17.545	6,370.098
Manganeso Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.202	0.643	468.867
Mercurio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.082	0.262	<0.262
Molibdeno Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.057	0.182	0.490
Niquel Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.156	0.498	3.181
Plata Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.084	0.268	<0.268
Plomo Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.109	0.346	19.919
Potasio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	13.500	42.993	2,805.586
Selenio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.132	3.605	<3.605
Sodio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	7.579	24.136	104.219

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 15 de 19

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe
Arequipa t (054) 213 506 e Pa.servicios@sgs.com
Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-25
PROFUNDIDAD (m)					
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023
HORA DE MUESTREO					16:39:00
MATRIZ					SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado
Metales Totales					
Talio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.029	0.093	0.104
torio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.035	0.112	2.034
Titanio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.079	0.251	164.268
Uranio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.032	0.102	0.798
Vanadio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	1.488	4.737	39.914
Wolframio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.072	0.231	<0.231
Ytrio Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.030	0.096	12.755
Zinc Total (2)	ES_EPA3051_6020	mg/kg	0.607	1.934	73.817

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 16 de 19

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe
Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com
Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



Registro N°LE - 002

INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Aluminio Total	mg/kg	8.602	<8.602	1 - 5%	108%	110%	0%
Antimonio Total	mg/kg	0.131	<0.131	0 - 8%	98%	100%	0%
Arsénico Total	mg/kg	2.857	<2.857	1 - 6%	91%	90%	6%
Bario Total	mg/kg	0.440	<0.440	2 - 4%	95%	94%	3%
Berilio Total	mg/kg	0.173	<0.173	6 - 13%	100%	101%	0%
Bismuto Total	mg/kg	0.103	<0.103	3%	93%	88%	0%
Boro Total	mg/kg	17.195	<17.195	0%	101%	107%	0%
Cadmio Total	mg/kg	0.144	<0.144	7 - 13%	104%	92%	9%
Calcio Total	mg/kg	208.223	<208.223	1 - 7%	104%	98%	1%
Circonio Total	mg/kg	0.147	<0.147	2 - 3%	97%	95%	2%
Cobalto Total	mg/kg	0.128	<0.128	8 - 11%	100%	103%	6%
Cobre Total	mg/kg	1.136	<1.136	7 - 12%	104%	97%	3%
Cromo Total	mg/kg	1.001	<1.001	2 - 4%	104%	103%	4%
Escandio Total	mg/kg	0.317	<0.317	2 - 3%	104%	100%	1%
Estaño Total	mg/kg	0.940	<0.940	0 - 5%	92%	92%	0%
Estroncio Total	mg/kg	0.822	<0.822	0 - 6%	100%	98%	4%
Fosforo Total	mg/kg	15.157	<15.157	1 - 9%	96%	96%	0%
Hierro Total	mg/kg	29.302	<29.302	2 - 5%	100%	93%	6%
Lantano Total	mg/kg	0.103	<0.103	1 - 3%	93%	92%	0%
Litio Total	mg/kg	3.0	<3.0	1 - 6%	95%	87%	13%
Magnesio Total	mg/kg	17.545	<17.545	3 - 4%	108%	101%	5%
Manganeso Total	mg/kg	0.643	<0.643	2 - 6%	96%	94%	0%
Mercurio Total	mg/kg	0.262	<0.262	0%	108%	112%	0%
Molibdeno Total	mg/kg	0.182	<0.182	0 - 2%	89%	88%	0%
Níquel Total	mg/kg	0.498	<0.498	4 - 7%	94%	95%	6%
Plata Total	mg/kg	0.268	<0.268	0 - 1%	87%	95%	0%
Plomo Total	mg/kg	0.346	<0.346	3 - 8%	98%	92%	4%
Potasio Total	mg/kg	42.993	<42.993	2 - 6%	109%	92%	2%
Selenio Total	mg/kg	3.605	<3.605	0%	90%	90%	0%
Sodio Total	mg/kg	24.136	<24.136	4 - 7%	108%	91%	6%
Talio Total	mg/kg	0.093	<0.093	0 - 3%	110%	94%	1%
Thorio Total	mg/kg	0.112	<0.112	1 - 5%	87%	92%	8%
Titanio Total	mg/kg	0.251	<0.251	3 - 6%	90%	90%	0%
Urano Total	mg/kg	0.102	<0.102	3 - 4%	103%	98%	4%
Vanadio Total	mg/kg	4.737	<4.737	3 - 10%	102%	96%	0%
Wolframio Total	mg/kg	0.231	<0.231	0%	96%	96%	0%
Ytrio Total	mg/kg	0.096	<0.096	2 - 3%	101%	97%	5%
Zinc Total	mg/kg	1.934	<1.934	6%	108%	103%	0%

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 17 de 19

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348
Ernesto Gunther 275
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1
Parque Industrial
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe
Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com
Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
ES_EPA3051_6020	Callao	Metales Totales	EPA METHOD 3051A-2007/EPA METHOD 6020B:2014. Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils and Oils/Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance). 2017.

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 18 de 19

SGS del Perú S.A.C. | Av. Elmer Faucett 3348 Callao 1 Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe
Ernesto Gunther 275 Parque Industrial Arequipa t (054) 213 506 e Pa.servicios@sgs.com
Jr. Arnaldo Márquez Ba. San Antonio Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO
MA2302896 Rev. 0**

NOTAS

Notas:

- El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
- Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
- Los resultados de las muestras expresados en mg/Kg se calculan sobre base seca (2).

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es emitido bajo las Condiciones Generales de Servicio de SGS del Perú S.A.C., las cuales se encuentran descritas en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia; queda prohibida la reproducción total o parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s); no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas y de la información proporcionada por el cliente.

Última Revisión Enero 2022.

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 19 de 19

SGS del Perú S.A.C. | Av. Elmer Faucett 3348 Callao 1 Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe
Ernesto Gunther 275 Parque Industrial Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com
Jr. Arnaldo Márquez Ba. San Antonio Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO
MA2303596 Rev. 0**

TORRES JARA SERGIO MANUEL

JR. GARCILAZO DE LA VEGA N° 138 URBANIZACIÓN LA PASCANA - PERU - LIMA - LIMA - COMAS

ENV / LB-351990-002

PROCEDENCIA : **Almacen de Top Soll en Unidad Minera**

Fecha de Recepción SGS : 28-01-2023
Fecha de Ejecución : Del 28-01-2023 al 09-02-2023
Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
TP-01
TP-02
TP-03
TP-04
TP-05
TP-06
TP-07
TP-08
TP-10
TP-09
TP-11
TP-12
TP-13
TP-14
TP-15
TP-16

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 09/02/2023

Frank M. Julcamoro Quispe
C.Q.P. 1033
Supervisor de Laboratorio

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Página 1 de 8



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO
MA2303596 Rev. 0**

TP-17
TP-18
TP-19
TP-20
TP-21
TP-22
TP-23
TP-24
TP-25



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2303596 Rev. 0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-01	TP-02	TP-03
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					14:01:00	14:06:00	14:15:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Generales							
Potencial de Hidrógeno (1)	ES_EPA9045	pH	--	--	5.49	5.32	5.70

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-04	TP-05	TP-06
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					14:18:00	14:22:00	14:26:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Generales							
Potencial de Hidrógeno (1)	ES_EPA9045	pH	--	--	5.43	5.50	5.74

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-07	TP-08	TP-10
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					14:31:00	14:39:00	14:45:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Generales							
Potencial de Hidrógeno (1)	ES_EPA9045	pH	--	--	6.48	6.53	5.46



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2303596 Rev. 0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-09	TP-11	TP-12
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					14:58:00	15:04:00	15:07:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Generales							
Potencial de Hidrógeno (1)	ES_EPA9045	pH	--	--	5.09	5.88	5.64

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-13	TP-14	TP-15
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					15:10:00	15:15:00	15:20:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Generales							
Potencial de Hidrógeno (1)	ES_EPA9045	pH	--	--	6.83	6.34	5.94

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-16	TP-17	TP-18
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					15:24:00	15:28:00	15:31:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Generales							
Potencial de Hidrógeno (1)	ES_EPA9045	pH	--	--	5.57	6.01	5.84



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO
MA2303596 Rev. 0

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-19	TP-20	TP-21
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					15:40:00	15:49:00	16:00:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Generales							
Potencial de Hidrógeno (1)	ES_EPA9045	pH	--	--	6.07	6.37	6.00

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-22	TP-23	TP-24
PROFUNDIDAD (m)							
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023	25/01/2023	25/01/2023
HORA DE MUESTREO					16:11:00	16:20:00	16:30:00
MATRIZ					SUELOS	SUELOS	SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS	SUELOS	SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado	Resultado	Resultado
Análisis Generales							
Potencial de Hidrógeno (1)	ES_EPA9045	pH	--	--	5.67	5.61	5.98

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					TP-25
PROFUNDIDAD (m)					
FECHA DE MUESTREO					25/01/2023
HORA DE MUESTREO					16:39:00
MATRIZ					SUELOS
PRODUCTO DESCRITO COMO					SUELOS
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado
Análisis Generales					
Potencial de Hidrógeno (1)	ES_EPA9045	pH	--	--	5.61



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO
MA2303596 Rev. 0**

CONTROL DE CALIDAD

LC: Límite de cuantificación
MB: Blanco del proceso.
LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	DUP %RPD	LCS %Recovery
Potencial de Hidrógeno	pH	--	0%	99 - 100%



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO
MA2303596 Rev. 0**

REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
ES_EPA9045	Callao	Potencial de Hidrógeno	EPA 9045D; Rev 4; 2004. Soil and waste PH.



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



**INFORME DE ENSAYO
MA2303596 Rev. 0**

NOTAS

Notas:

- El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
- Las muestras recibidas cumplen con las condiciones necesarias para la realización de los análisis solicitados.
- Los resultados de las muestras se encuentran expresados a condiciones iniciales de la muestra (1).

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es emitido bajo las Condiciones Generales de Servicio de SGS del Perú S.A.C., las cuales se encuentran descritas en la página <http://www.sgs.pe/es-ES/Terms-and-Conditions.aspx>. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitación de responsabilidad, pago de indemnizaciones y jurisdicción definidas en dichas Condiciones Generales de Servicio, su alteración o su uso indebido constituye un delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia; queda prohibida la reproducción total o parcial, salvo autorización escrita de SGS del Perú S.A.C.

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas; no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La compañía no es responsable del origen o fuente de la cual las muestras han sido tomadas y de la información proporcionada por el cliente.

Última Revisión Enero 2022

Página 8 de 8

Anexo 4: Análisis de control de calidad de las muestras

En este anexo se describe la metodología utilizada para el aseguramiento y control de calidad de las muestras de suelos tomadas en campo, la cual consistió en el análisis de datos de la muestra duplicada y en el cálculo de la diferencia porcentual relativa (% DPR) de la muestra duplicada respecto a la muestra original.

El control de calidad de los resultados de laboratorio se realizó de la siguiente manera:

- Durante los trabajos de campo, se recolectó una muestra duplicada, que consistió en colocar en los envases una misma muestra de suelos recolectada en una misma estación de muestreo; de esta forma se verificó la variación del proceso analítico, incluyendo además el posible error debido al muestreo.
- En la muestra duplicada recolectada en campo se realizaron los mismos ensayos de los parámetros considerados para la muestra original.
- Para la evaluación de los resultados de laboratorio, se calculó la diferencia porcentual relativa (% DPR), el cual consistió en la comparación de los resultados reportados en la muestra original y en la muestra duplicada. En general, el valor del % DPR no debería ser mayor del 25 %, caso contrario, indicaría posibles errores durante el análisis de las muestras en el laboratorio y/o fuentes potenciales de contaminación de las muestras durante su recolección, almacenamiento y transporte. La fórmula aplicada para calcular el % DPR es la siguiente:

$$DPR = [(MO-MD) \times 100] / [(MO+MD) / 2]$$

Donde:

DPR = Diferencia Porcentual Relativa (%).

MO = Valor muestra original.

MD = Valor muestra duplicado.

En la Tabla A se presentan los resultados del análisis de % DPR de los parámetros considerados, cuyas muestras se recolectaron en campo. En donde se puede observar

que en todos los parámetros evaluados se obtuvo una diferencia porcentual relativa menor al 25 %.

Tabla A

Resultados del análisis de control de calidad de la estación de muestreo TP-03

Parámetros	TP-01	TP-03	DPR (%)
Potencial de Hidrógeno	5,49	5,70	3,75
Arsénico	25,47	29,48	14,60
Bario	108,03	87,41	-21,11
Cadmio	0,47	0,41	-13,30
Cromo total	7,70	7,89	2,32
Mercurio	<0,262	<0,262	0,00
Plomo	29,38	31,33	6,41
Zinc	90,75	95,11	4,69