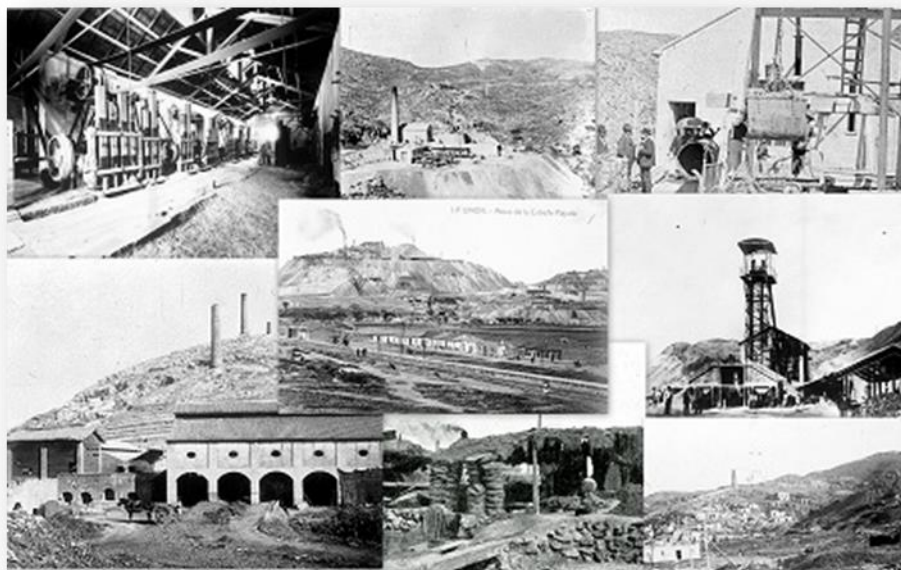


EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES FISCOQUÍMICAS DE RESÍDUOS MINEROS



TRABAJO FINAL DE MASTER

MARÍA GABARRÓN SÁNCHEZ
2013



Universidad Politécnica de Cartagena
Máster en Ingeniería del Agua y el Terreno

TUTORES

Pedro Martínez Pagán

José Alberto Acosta Avilés



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
MÁSTER EN INGENIERÍA DEL AGUA Y EL TERRENO

EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE RESÍDUOS MINEROS

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

MARÍA GABARRÓN SÁNCHEZ

2013

TUTORES

Pedro Martínez Pagán

José Alberto Acosta Avilés

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Problemática ambiental de las balsas de estériles mineros.....	4
2. OBJETIVOS DEL TRABAJO.....	6
3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	6
4. MATERIALES Y MÉTODOS	14
4.1. MÉTODOS GEOFÍSICOS	14
4.1.1. Fundamentos de los métodos de resistividad eléctrica	14
4.1.1.1. Principios básicos	15
4.1.2 Tomografía Eléctrica: aplicación en campo	25
4.2. MÉTODOS GEOQUÍMICOS	34
4.2.1. Toma de muestras en campo.....	34
4.2.2. Procedimientos analíticos	36
4.2.2.1. Humedad del suelo.....	38
4.2.2.2. Textura	38
4.2.2.3. Estabilidad de agregados en agua.....	43
4.2.2.4. pH real	44
4.2.2.5. Conductividad Eléctrica (CE)	45
4.2.2.6. Carbonato Cálcico Equivalente	45
4.2.2.7. Extracción y determinación de metales pseudo-totales por digestión vía húmeda.	48
4.2.2.8. Extracción y determinación de los metales biodisponibles.....	49
4.2.2.9. Extracción y determinación de los metales solubles	51
4.2.2.10. Determinación de Nitrógeno, Carbono y Azufre totales en el suelo	52
4.3. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO	53
5. RESULTADOS.....	54
5.1 CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA.....	54
5.1.1. Perfiles de tomografía en seco	55

5.1.2. Perfiles de tomografía en húmedo	57
5.1.3. Porcentaje de cambio de resistividad	58
5.2. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA.....	60
5.2.1. Caracterización y propiedades de los residuos.....	60
5.2.1.1. pH	60
5.2.1.2. Conductividad Eléctrica (CE)	61
5.2.1.3. Humedad	63
5.2.1.4. Carbono Total	63
5.2.1.5 Carbono Inorgánico	64
5.2.1.6. Carbono Orgánico	66
5.2.1.7. Contenido en Azufre	66
5.2.1.8. Contenido en Nitrógeno.....	67
5.2.1.9. Agregados.....	68
5.2.1.10. Contenido en arcilla	69
5.2.1.11. Contenido en limo	70
5.2.1.12. Contenido en arena.....	71
5.2.2. Concentración de metales pesados	72
5.2.2.1. Metales Totales	72
5.2.2.1.1. Zinc.....	74
5.2.2.1.2. Plomo	75
5.2.2.1.3. Cobre.....	76
5.2.2.1.4. Cadmio	76
5.2.2.1.5. Cromo	77
5.2.2.1.6. Níquel.....	78
5.2.2.1.7. Aluminio	79
5.2.2.1.8. Manganeso	80
5.2.2.1.9. Hierro	81
5.2.2.1.10. Arsénico	81
5.2.2.1.11. Selenio.....	82
5.2.2.2. Metales bioasimilables.....	83
5.2.2.2.1. Zinc.....	83

5.2.2.2.2. Plomo	83
5.2.2.2.3. Cobre.....	84
5.2.2.2.4 Cadmio	85
5.2.2.2.5. Cromo	86
5.2.2.2.6. Níquel.....	86
5.2.2.2.7. Aluminio.....	87
5.2.2.2.8. Manganeso	87
5.2.2.2.9. Hierro	88
5.2.2.2.10. Arsénico	89
5.2.2.2.11. Selenio.....	90
5.2.2.3. Metales solubles.....	91
5.2.2.3.1. Zinc.....	91
5.2.2.3.2. Plomo	91
5.2.2.3.3. Cobre.....	92
5.2.2.3.4. Cadmio	93
5.2.2.3.5. Cromo	93
5.2.2.3.6. Níquel.....	94
5.2.2.3.7. Aluminio.....	95
5.2.2.3.8. Manganeso	95
5.2.2.3.9. Hierro	96
5.2.2.3.10. Arsénico	96
5.2.2.3.11. Selenio.....	97
5.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	98
5.4. DISCUSIÓN	112
6. CONCLUSIONES.....	114
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: fragmento del Mapa Geológico de España. Unidad Bética..... 7

Figura 2: distribución general de las unidades Alpujárride y Nevado Filábride del sector centro-oriental de la Cordillera Bética (Vera, 2004). 8

Figura 3: flujo de corriente eléctrica 15

Figura 4: fases del suelo 18

Figura 5: configuración Wenner 22

Figura 6: configuración Schlumberger..... 23

Figura 7: configuración dipolo-dipolo 23

Figura 8: situación de los puntos de medida en una configuración dipolo-dipolo en una pseudosección de resistividades aparentes. (Tomado de Martínez Pagán, 2006). 24

Figura 9: distribución espacial de las muestras..... 34

Figura 10: diagrama triangular para la determinación de la clase textural según los criterios ISSS 42

Figura 11: regresión entre resistividad eléctrica y propiedades del suelo. 108

Figura 12: comparación de valores estimados y medidos 112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: métodos geofísicos y sus principales aplicaciones. (Traducida de Reynolds 2011)..... 3

Tabla 2: resistividades de los materiales más comunes (Reynolds, 2011) 21

Tabla 3: clasificación del suelo en función de su contenido en carbonatos. 65

Tabla 4: niveles genéricos de referencia aplicables la zona 3a, grupo 4..... 74

Tabla 5: coeficiente de correlación de Pearson datos en seco 100

Tabla 6: coeficiente de correlación de Pearson datos en húmedo. 101

Tabla 7: coeficiente de correlación de Spearman datos en seco..... 102

Tabla 8: coeficiente de correlación de Spearman datos en húmedo..... 103

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1: balsas de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. 12

Imagen 2: balsa objeto de estudio. El Gorguel..... 13

Imagen 3: ubicación de los perfiles en la balsa objeto de estudio..... 25

Imagen 4: perfil G1 26

Imagen 5: perfil G2 26

Imagen 6: perfil G3 27

Imagen 7: equipo de Tomografía Eléctrica..... 28

Imagen 8: programa para hacer secuencias de perfiles Electre II 29

Imagen 9: detalle de la conexión entre el cable multiconductor y un electrodo 29

Imagen 10: numeración de los electrodos (ejemplo en el perfil G2)..... 30

Imagen 11: preparación del suelo para la medición en húmedo..... 31

Imagen 12: ejemplo de filtrado de datos con Prosys II 32

Imagen 13: distribución de los bloques por el modelo 2D junto con los datos en la pseudosección 33

Imagen 14: muestreo de suelo 35

Imagen 15: muestreo de suelo 35

Imagen 16: muestreo de suelo 35

Imagen 17: muestra de suelo sin tamizar 36

Imagen 18: muestra de suelo tamizada. A la izquierda partículas de tamaño grueso (superior a 2 mm) retenidas por el tamiz y a la derecha partículas de tamaño inferior a 2 mm..... 36

Imagen 19: muestras en desecación 37

Imagen 20: a la izquierda el mortero automático y a la derecha una muestra de suelo triturado..... 37

Imagen 21: columnas de texturas 40

Imagen 22: medición de pH..... 44

Imagen 23: detalle de la escala antes de desprenderse el CO₂ (izquierda) y después (derecha)..... 46

Imagen 24: extracción de metales totales 49

Imagen 25: extracción de metales bioasimilables 51

Imagen 26: perfil G1 Medida nº2 en seco 55

Imagen 27: perfil G2 Medida nº2 en seco.....	55
Imagen 28: perfil G3 Medida nº2 en seco.....	55
Imagen 29: perfil G1 Medida nº2 en húmedo.....	57
Imagen 30: perfil G2 Medida nº2 en húmedo.....	57
Imagen 31: perfil G3 Medida nº2 en húmedo.....	57
Imagen 32: porcentaje de cambio de resistividad para los datos recogidos en las medidas 1 y 3 del Perfil G1 en condiciones de seco.....	58
Imagen 33: porcentaje de cambio de resistividad para los datos recogidos en las medidas 1 y 3 del perfil G1 en condiciones húmedas.	59
Imagen 34: porcentaje de cambio de resistividad para los datos recogidos en las medidas 1 y 3 del perfil G2 en condiciones de seco.....	59
Imagen 35: porcentaje de cambio de resistividad para los datos recogidos en las medidas 1 y 3 del perfil G2 en condiciones húmedas.	59
Imagen 36: porcentaje de cambio de resistividad para los datos recogidos en las medidas 1 y 3 del perfil G3 en condiciones de seco.....	59
Imagen 37: porcentaje de cambio de resistividad para los datos recogidos en las medidas 1 y 3 del perfil G3 en condiciones húmedas	60

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: valores de pH	61
Gráfica 2: valores de Conductividad Eléctrica	62
Gráfica 3: valores de humedad del suelo	63
Gráfica 4: valores de carbono total	64
Gráfica 5: valores de carbono inorgánico.....	65
Gráfica 6: valores de carbono orgánico.....	66
Gráfica 7: valores de contenido en azufre	67
Gráfica 8: valores de contenido en Nitrógeno	67
Gráfica 9: valores de agregados	68
Gráfica 10: valores de contenido en arcilla	69
Gráfica 11: valores de contenido en limo.....	70
Gráfica 12: valores de contenido en arena	71
Gráfica 13: valores de contenido en Zinc	75
Gráfica 14: valores de contenido en Plomo	75
Gráfica 15: valores de contenido en Cobre	76
Gráfica 16: valores de contenido en Cadmio	77
Gráfica 17: valores de contenido en Cromo.....	78
Gráfica 18: valores de contenido en Níquel	79
Gráfica 19: valores de contenido en Aluminio	79
Gráfica 20: valores de contenido en Manganeso.....	80
Gráfica 21: valores de contenido en Hierro	81
Gráfica 22: valores de contenido en Arsénico.....	82
Gráfica 23: valores de contenido en Selenio.....	82
Gráfica 24: valores de Zinc bioasimilable	83
Gráfica 25: valores de Plomo bioasimilable	84
Gráfica 26: valores de Cobre bioasimilable	85
Gráfica 27: valores de Cadmio bioasimilable	85
Gráfica 28: valores de Cromo bioasimilable.....	86
Gráfica 29: valores de Níquel bioasimilable	87
Gráfica 30: valores de Aluminio bioasimilable	87
Gráfica 31: valores de Manganeso bioasimilable.....	88

Gráfica 32: valores de Hierro bioasimilable	89
Gráfica 33: valores de Arsénico bioasimilable.....	90
Gráfica 34: valores de Selenio bioasimilable.....	90
Gráfica 35: valores de Zinc soluble	91
Gráfica 36: valores de Plomo soluble	92
Gráfica 37: valores de Plomo soluble	92
Gráfica 38: valores de Cadmio soluble	93
Gráfica 39: valores de Cromo soluble	94
Gráfica 40: valores de Níquel soluble.....	94
Gráfica 41: valores de Aluminio soluble	95
Gráfica 42: valores de Manganeso soluble	95
Gráfica 43: valores de Hierro soluble	96
Gráfica 44: valores de Arsénico soluble	97
Gráfica 45: valores de Selenio soluble.....	97

1. INTRODUCCIÓN

La geofísica, según la *RAE*, es la parte de la geología que estudia la física terrestre. Ésta queda dividida en *geofísica pura*, encargada del estudio del conjunto o de las partes sustanciales del planeta, y en *geofísica aplicada*, concerniente a la investigación de la corteza terrestre y las capas superficiales de la misma. Con esta última, se obtiene información sobre acuíferos, recursos minerales, localización de restos arqueológicos o de tuberías y cables enterrados para obras de ingeniería. Cuando se trata del estudio de factores que afectan sensiblemente al medio ambiente pasa a denominarse *geofísica ambiental* (Reynolds, 2011).

Fruto del desarrollo de la geofísica aplicada son los métodos o técnicas geofísicos. Éstos nacieron a mediados de la década de los 80 en Reino Unido y su uso se ha extendido hasta la actualidad. Responden a las propiedades físicas del subsuelo (rocas, sedimentos, agua...) y pueden clasificarse en dos tipos: *métodos activos*, basados en la generación de señales artificiales que son transmitidas a través del subsuelo y recogidas por un detector, de forma que cada modificación de la señal es característica del tipo de material que ha atravesado (Reynolds, 2011). Se consideran técnicas activas la exploración sísmica en todas sus variantes, el georadar y las técnicas eléctricas y electromagnéticas (Styles, 2012). En contraposición, los *métodos pasivos* son aquellos que detectan las variaciones del campo natural terrestre (gravitacional y magnético) sin necesidad de introducir ningún tipo de señal (Reynolds, 2011). Se consideran como tales la gravimetría, el magnetismo y el potencial natural (Styles, 2012).

En función de la aplicación que queramos estudiar (investigación en ingeniería, exploración de depósitos mineros, localización de lixiviados y contaminantes, biogeofísica, etc.) y de la resolución que pretendamos obtener, deberemos elegir la técnica más adecuada. Un factor importante a tener en cuenta es si queremos que la técnica sea o no invasiva.

Así por ejemplo, para Reynolds (2011) los métodos gravimétricos son más sensibles a los contrastes de densidad a lo largo del espesor de las capas sub-superficiales y por tanto son ideales para la exploración de cuencas sedimentarias donde hay un gran contraste de densidades entre los sedimentos más finos y las rocas subyacentes. Por el contrario, los métodos gravimétricos pueden resultar inapropiados para buscar zonas cercanas a fuentes de aguas subterráneas donde las diferencias de densidad entre las rocas saturadas y no saturadas son prácticamente despreciables. Para ello sería mejor usar métodos que fuesen más sensibles a los cambios en las propiedades físicas. Sin embargo una combinación de ambos tipos de métodos nos proporcionaría una información mucho más completa que si solo usásemos uno de los dos. Estas combinaciones suelen darse en la aplicación de los métodos gravimétricos y magnéticos.

Por otra parte algunos métodos eléctricos, como por ejemplo el electromagnético, son mejores para investigaciones que ocupen los primeros 100 metros de profundidad (contados desde la superficie), sobre todo en áreas erosionadas o en glaciares donde se haya producido un afloramiento de rocas a las capas más superficiales.

En la siguiente tabla se recogen los diferentes métodos geofísicos existentes y las aplicaciones para las que se consideran más aptos.

MÉTODO GEOFÍSICO	PROPIEDAD FÍSICA DE LA QUE DEPENDE	APLICACIONES (ver leyenda)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Gravimetría	Densidad	P	P	s	s	s	s	x	x	s	x	x	x
Magnético	Susceptibilidad	P	P	P	P	x	m	x	P	P	x	x	p
Sísmica de Refracción	Módulo de elasticidad; densidad	P	P	m	s	s	s	x	x	x	x	x	x
Sísmica de Reflexión	Módulo de elasticidad; densidad	P	P	m	s	s	m	x	x	x	x	x	x
Resistividad	Resistividad	m	m	P	P	P	P	P	s	P	P	m	x
Potencial Espontáneo	Diferencias de Potencial	x	x	P	m	P	m	m	m	x	P	x	x
Polarización Inducida	Resistividad; Capacitancia	m	m	P	m	s	m	m	m	m	P	m	x
Electro-Magnético (EM)	Conductancia; Inductancia	s	P	P	P	P	P	P	P	P	m	m	P
EM-VLF	Conductancia; Inductancia	m	m	P	m	s	s	s	m	m	x	x	x
EM-GPR	Permisividad; conductividad	x	x	m	P	P	P	s	P	P	m	P	s
Magneto-Telúrico	Resistividad	s	P	P	m	m	x	x	x	x	x	x	x
Resonancia Magnética	Momento magnético; porosidad	x	x	x	x	P	x	m	x	x	x	x	x
Sondeos Radiométricos (MRS)	γ -radioactividad	s	s	P	s	x	x	x	x	x	x	x	x
P= método primario; s=método secundario; m=puede usarse pero no es la mejor opción; x= inapropiado													
APLICACIONES:		7. Localización de lixiviados y plumas de contaminantes. 8. Localización y definición de objetos metálicos enterrados. 9. Arqueofísica. 10. Biogeofísica. 11. Geofísica forense. 12. Detección de artefactos explosivos sin detonar.											
1. Exploración para hidrocarburos 2. Estudios geológicos regionales (áreas > 100Km ²). 3. Exploración/desarrollo de depósitos mineros. 4. Investigación en ingeniería o en medio ambiente. 5. Investigación hidrogeológica. 6. Detección de cavidades subterráneas.													

Tabla 1: métodos geofísicos y sus principales aplicaciones. (Traducida de Reynolds 2011)

El estudio expuesto en este trabajo tiene lugar en una balsa de estériles de minería, en la que se realizarán una serie de medidas de resistividad del suelo y un muestreo del mismo para analizar algunas de sus propiedades en el laboratorio. Como técnica de medida de la resistividad hemos elegido la **Tomografía de Resistividad Eléctrica**. Se trata de una técnica no destructiva y que permite obtener datos sin hacer demasiados sondeos mecánicos, permitiendo reducir el coste (en comparación con otras técnicas

geofísicas). Requiere poco personal y permite hacer varias tomas de datos en un solo día.

Esta técnica, por tanto, permite resolver los inconvenientes que presentan otras técnicas geoelectricas como los sondeos eléctricos verticales (SEV) o las calicatas eléctricas, siendo a su vez capaz de ofrecer una imagen de las resistividades reales del subsuelo después de un proceso matemático de inversión, aunque éste posea una geología compleja con cambios laterales y verticales de resistividad.

Por todo ello, numerosos autores la han empleado en sus investigaciones. Algunos ejemplos de ello son: Storz, H., et al. (2000); Rey et al. (2006) que la emplean en la caracterización de suelos; Martín-Crespo, T., *et al.*, (2012), Nearing y Tuller *et al.*,(2013); Martínez, J., et al., (2012); Lghoul, Teixidó et al., (2012); Martínez-Pagán, P., et al., (2009) que la usan en la determinación de parámetros geoambientales y caracterización de balsas de estériles mineros; Paillet *et al.*, (2010) que utilizan la medida de la resistividad eléctrica para evaluar las propiedades de un suelo forestal; Nijland *et al.*, (2010) que la emplea para establecer la relación entre la humedad del suelo y la capacidad de absorción de agua por las plantas; Rosales *et al.*, (2012) que emplea la técnica de tomografía eléctrica para la detección de plumas de contaminación por hidrocarburos en el subsuelo, entre otros.

Como se puede apreciar se trata de una técnica muy versátil en cuanto a los campos de aplicación.

1.1. Problemática ambiental de las balsas de estériles mineros.

Las explotaciones mineras generan diversos problemas ambientales. Antiguamente los residuos de flotación se vertían directamente a los cauces de los ríos y ramblas cercanos, provocando un alto grado de contaminación. En los años 50 el Gobierno español prohibió esta práctica, obligando a las empresas mineras a construir balsas de deshidratación donde se vertían los lodos y acumulaban los metales hasta el cese de la actividad. De ahí que con el paso del tiempo estas balsas hayan pasado a ser una de las principales fuentes de contaminación de las zonas mineras.

Los estériles de las explotaciones más antiguas, como son las situadas en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, presentan contenidos muy elevados en metales pesados, debido a que se empleaban procesos de separación menos eficaces, pasando

a ser el principal componente contaminador (Martínez y Pérez, 2007). La presencia de metales y la actividad minera en general, provoca impactos sobre el suelo, el agua, la atmósfera, la flora y el paisaje. Su innegable presencia en las balsas colmatadas y abandonadas, hace que la erosión superficial de sus suelos provoque una suspensión de polvo cargado de metales pesados que pueden ser tóxicos para la flora, la fauna y el ser humano, mediante su inhalación o por depósito en las plantas. Otra forma de toxicidad se manifiesta mediante la bioacumulación de metales en la flora y/o fauna y su incorporación a la cadena trófica. Una tercera alteración es la generación del drenaje ácido de minas (ADM) provocado por la “combinación de la oxidación de los sulfuros metálicos, principalmente pirita (FeS_2) y el proceso de disolución de los sulfuros metálicos y su transporte por el agua (García, 2004)”.

Ante precipitaciones prolongadas o torrenciales, también se pueden producir lixiviados que contaminen cursos de agua tanto superficiales como subterráneos, con lo que también hay un cierto grado de dependencia de la climatología de la zona.

Tanto la erosión hídrica como la eólica, generan un transporte del material contaminante que puede ocasionar problemas, incluso a varios kilómetros del foco contaminador, según sea la intensidad de estos fenómenos.

Por último, pero no menos importante, el impacto generado sobre el paisaje, ya que, por ejemplo, sobre la superficie de las balsas de estériles apenas hay crecimiento de la flora debido a la falta de nutrientes y la acidez del medio.

2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El **objetivo principal** del trabajo es estudiar la idoneidad de la técnica de “tomografía eléctrica” como herramienta de evaluación de las propiedades fisicoquímicas de residuos mineros. Desde el punto de vista práctico se trata de averiguar si existe o no influencia entre dichas propiedades y la resistividad eléctrica en este tipo de residuos.

Para ello será necesario llevar a cabo la caracterización geoquímica del depósito minero, a través de análisis de laboratorio de las muestras de residuo tomadas. Esto permitirá, a su vez, establecer el grado de contaminación del depósito. Debemos evaluar también el efecto de la humedad en la resolución de la tomografía eléctrica (en adelante, TE) y, por último, estudiar la correlación entre las variables geoquímicas y geofísicas.

3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La minería en la Región de Murcia ha sido durante siglos un sector de actividad de gran tradición, cuyos orígenes se remontan a la época fenicia, siendo el pueblo romano asentado en nuestras tierras uno de los más grandes explotadores de su historia. La Sierra de Cartagena-La Unión constituye uno de los distritos mineros más importantes de España y el más representativo de la Región por sus yacimientos de Fe, Pb y Zn, de los que se extraía blenda, galena argentinífera y piritita. La explotación de minerales en esta Sierra se mantuvo prácticamente latente durante los siglos XVI y XVII, hasta que en 1839 se descubrió el filón “jaroso” que permitía la explotación de plomo y plata, haciendo de los siglos XIX y XX los de mayor apogeo minero. En 1989 se produjo el cierre definitivo de Peñarroya, última empresa explotadora, con lo que en la actualidad todas las actividades mineras están paralizadas.

En los aproximadamente 50 Km² de explotaciones de la Sierra Minera se calcula que, en el periodo de 1960 a 1989, se removieron anualmente 2,5 millones de toneladas de materiales; lo que nos da una idea del porqué del paisaje actual (Arana, 2009; Ros Amorós, 1999).

Desde el punto de vista geológico La Sierra de Cartagena pertenece a la zona Bética, formada por una serie de mantos de corrimientos superpuestos, modelados en la orogenia alpina y afectados por un metamorfismo regional decreciente de abajo a arriba. Sobre estos materiales se deposita una serie neógena transgresiva que sufre una etapa de fracturación, sobre la que después se desarrolla un importante vulcanismo (Arana, 2009).

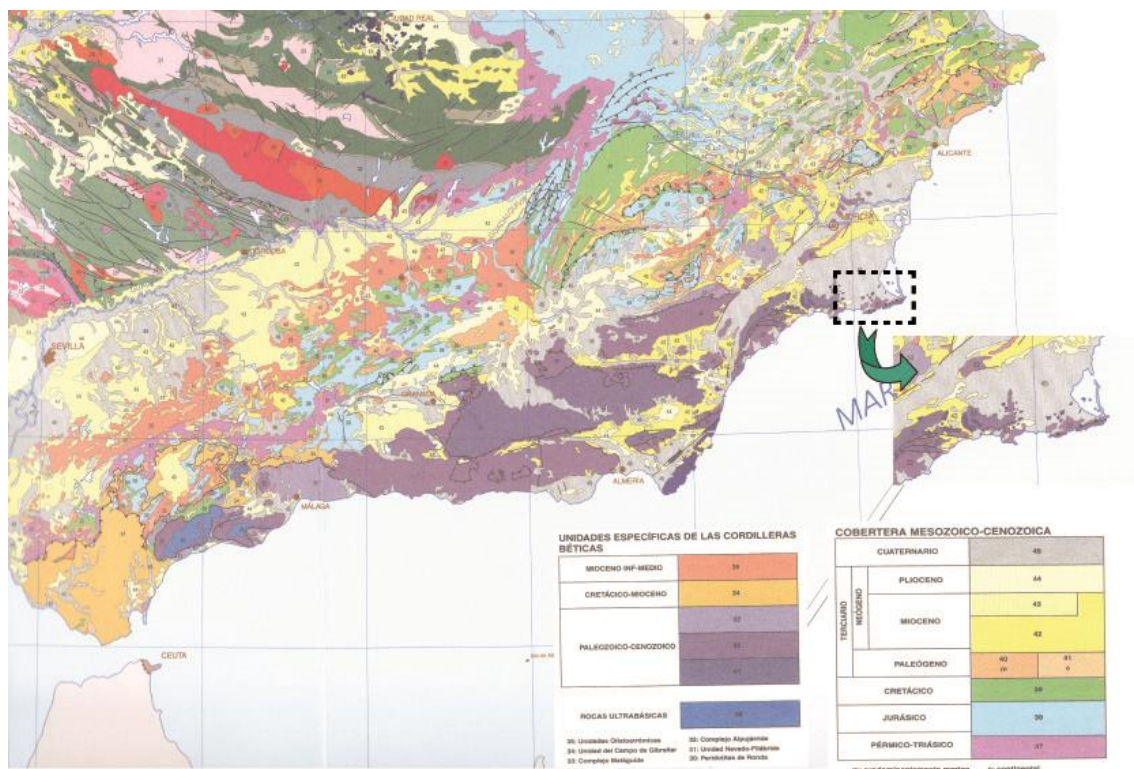


Figura 1: fragmento del Mapa Geológico de España. Unidad Bética.

A nivel estratigráfico y tectónico se pueden distinguir en este distrito minero tres grandes unidades: el Complejo Nevado-Filábride, el Complejo Alpujárride y materiales postorogénicos (Arana, 2007).

El complejo Nevado-Filábride presenta una serie basal formada por esquistos grafitosos y cuarcitas de potencia superior a los 500m. Sobre ésta se dispone un conjunto de materiales variados como micacitas, cuarcitas y mármoles de formación superior.

En contraposición, se encuentra el Complejo Alpujárride. Éste queda clasificado en Alpujárride Inferior (Unidad de San Ginés), compuesto por una base paleozoica de

micasquistos, cuarcitas y brechas calcáreas, sobre las que se dispone una serie de filitas y cuarcitas. Sobre ellas se halla una serie carbonatada de gran extensión formada por calizas de grano muy fino con intercalaciones dolomíticas e intrusiones de diabasas. Su potencia máxima es de aproximadamente 200 m.

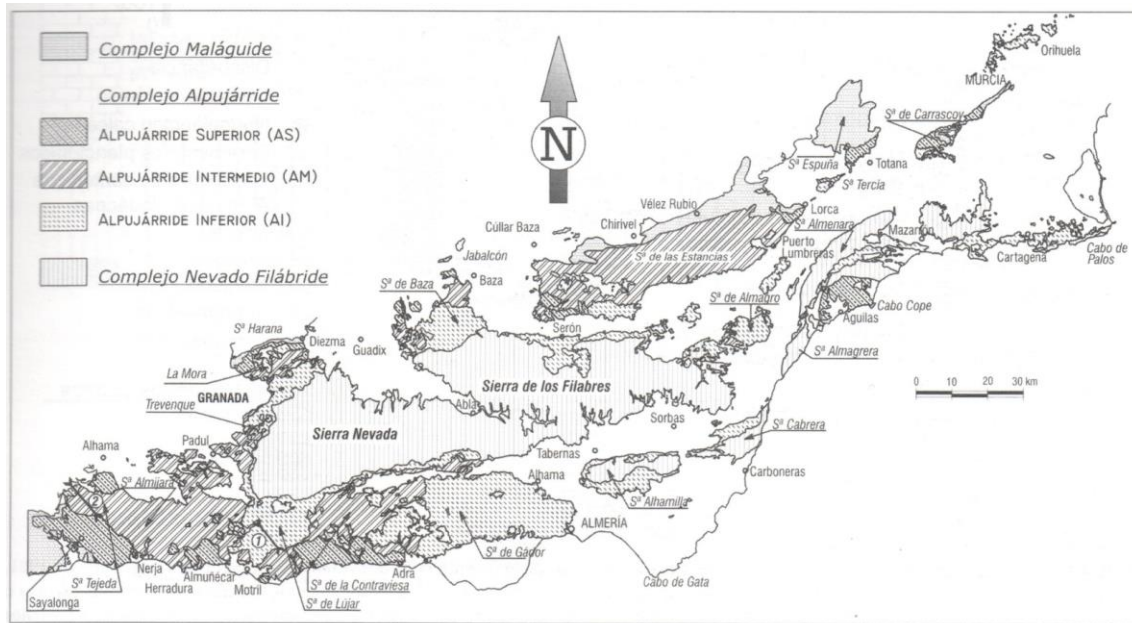


Figura 2: distribución general de las unidades Alpujárride y Nevado Filábride del sector centro-oriental de la Cordillera Bética (Vera, 2004).

El complejo Alpujárride superior o Unidad de Portmán, está constituido por una unidad de filitas y brechas margocalizas sobre las que aparece un paquete de calizas dolomíticas del triásico. Su espesor máximo alcanza los 180 m. En la vertiente meridional de la Sierra este complejo llega a apoyarse sobre el complejo Nevado-Filábride de San Ginés.

En cuanto al conjunto de materiales postorogénicos, Arana (2009) diferencia la serie neógena y las rocas ígneas.

La unidad concerniente a este estudio es la de El Gorguel. Ésta presenta una base permotriásica de perlitas y areniscas cuarcíticas violáceas, azuladas o blanquecinas. Sobre ella aparece una serie triásica calizo-dolomítica de tonos grises, fuertemente tectonizada.

El clima de la Sierra de Cartagena es de tipo mediterráneo semiárido con una pluviometría media de 339 mm y una temperatura media de 17.1 °C en los últimos 30 años con una tasa de evapotranspiración potencial que supera los 900 mm/año (AEMET, 2004).

En cuanto a la vegetación que rodea la balsa, podemos encontrar *Brachypodium retusum*, *Stipa tecnacissima* (Esparto), *Calicotome intermedia*, *Dorycnium pentaphyllum*, *Thymus hyemalis* (Tomillo de invierno), *Lavandula dentata* (Lavanda), *Tamarix canariensis* (Taray), *Chamaerops humilis* (Palmito), *Pinus halepensis* (Pino Carrasco) o *Tetraclinis articulata* (Arar o Ciprés de Cartagena) entre otros (Kabas et al., 2012; Acosta, 2011).



Brachypodium retusum



Stipa tecnacissima



Calicotome intermedia



Tamarix canariensis

*Chamaerops humilis**Tetraclinis articulata*

Como consecuencia de la gran actividad minera de esta Sierra se puede encontrar un elevado número de depósitos (Imagen 1) cuyos principales residuos se han catalogado como:

Estériles de corta: son los materiales procedentes del desmonte realizado en una corta minera. Se suelen acumular en escombreras. El inicio de estos acopios data de los años 50 cuando se iniciaron las explotaciones a cielo abierto. En los estériles de corta se encuentran los diversos tipos de rocas existentes en las diferentes unidades estructurales de los distritos mineros, y son principalmente: calizas, dolomías, doleritas, filitas, esquistos cloríticos, esquistos cuarzo sericíticos, mica-esquistos, mármoles, cuarcitas y esquistos grafitosos.

Lodos de flotación: es el producto en forma de torta o hidromezcla, generado en el proceso de tratamiento de minerales, con una relación sólido/líquido concreta para cada caso y con tamaño de grano generalmente comprendido entre arena y limo. Es el material que se vierte en las balsas. Su origen tiene lugar con el desarrollo de la técnica de flotación diferencial empleada en los años 40.

Los principales minerales que forman los lodos de flotación son el cuarzo, hematites, caolinita y pirita. En menor proporción se encuentran la magnetita, galena y clorita, además de trazas de otros.

Estériles de concentración gravimétrica: son los materiales resultantes del proceso de concentración de los minerales por el método gravimétrico, incluidos el cribado, balsa de arroyo y rumbo; producidos desde tiempos prerromanos hasta el año 1950, en que se sustituye este método por el de flotación diferencial. Son materiales de grano medio, tamaño gravas-arenas, dispuestos en tongadas de unos 30º de inclinación, en depósitos de dimensiones reducidas. En este caso el mineral predominante es la hematites, seguido del cuarzo, la pirita, caolinita y clorita.

Estériles de mina: son aquellos materiales estériles que se han arrancado en la mina y se han acumulado en el exterior, en la terraza del pozo. Su origen data de finales del siglo XX. En la composición mineralógica de estos estériles se aprecia un predominio del cuarzo seguido de la caolinita, hematites y pirita. En menor medida aparecen galena y moscovita.

Óxidos: se encuentran en la cobertera de los yacimientos de sulfuros y reciben el nombre de "gossan". Se trata de minerales que, por su estado de óxidos, no pueden concentrarse por los procedimientos industriales conocidos por lo que se han acumulado en escombreras específicas mientras que no se resuelve el problema de su tratamiento. En las escombreras de óxidos predominan el cuarzo, seguido de los minerales de óxidos de hierro y la pirita y en menor medida la caolinita. El resto de los minerales se encuentran en concentraciones inferiores al 2%.

Rechazo de granulometría: son los residuos procedentes del proceso de preconcentración que se realizaba dentro del ciclo de flotación diferencial. Dado que los sulfuros se concentraban preferentemente en la fracción fina, se realizaba un corte granulométrico del todo-uno mediante cribas y se eliminaba la fracción superior a 30 mm, con lo que se obtenía un importante ahorro en los costes económicos en el proceso del lavado. Los minerales predominantes

son la hematites, cuarzo, pirita, caolinita y magnetita. En menor medida pirrotina, galena, dolomita y otros minerales en concentración traza.

Escoria de fundición: son los depósitos de las gachas procedentes de los hornos de fundición, las cuales se acopian en escombreras denominadas localmente “gacheros”. Estos materiales son de naturaleza silicatada, textura vítrea y granulometría gruesa. En este caso, los principales minerales son el cuarzo, las micas y el feldespato sódico.

Estéril de pozo: son los materiales estériles procedentes de la profundización de los pozos mineros, acumulados en superficie alrededor de la boca de éstos, y que constituyen sus escombreras.

La acumulación de estos materiales en las balsas de deshidratación y las escombreras adyacentes son las causantes de los problemas ambientales que se describen en el punto 1.1.

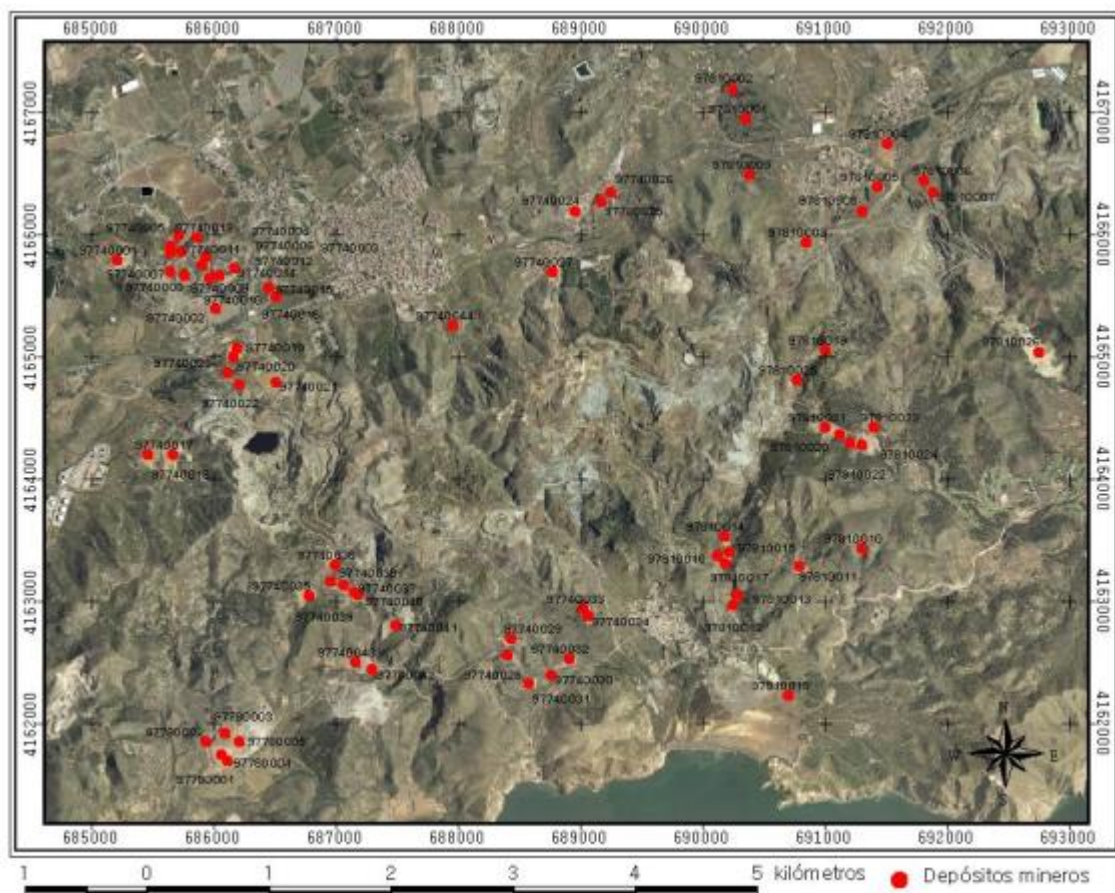


Imagen 1: balsas de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión.

La balsa en la que se realiza este estudio está situada en la pedanía de *El Gorguel* (37°35'19.41''N 0°52'53.78''W).



Imagen 2: balsa objeto de estudio. El Gorguel

Se trata de un área de 7400 m², con una profundidad de 14 m y un volumen de 150000 m³. Se considera representativa por sus características de salinidad, falta de vegetación, elevado contenido de metales (Cd, Pb, y Zn), bajo contenido de materia orgánica y su afección por la erosión hídrica y eólica (Kabas et al., 2012).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. MÉTODOS GEOFÍSICOS

4.1.1. Fundamentos de los métodos de resistividad eléctrica

Los estudios realizados con este método se basan en la introducción de corriente eléctrica directamente en el suelo. Esta corriente eléctrica modificará el campo potencial del subsuelo el cual es medido por medio de un voltímetro dándonos una medida de la resistencia que las rocas ofrecen al paso de esta corriente. A este tipo de estudios se les denomina estudios de resistividad (Majoribanks, 2010).

El primer uso de los métodos eléctricos en geofísica aplicada se le atribuye al científico inglés Robert Fox, quien en 1830 a través de su trabajo con minerales de sulfuro en las minas de Cornish, detectó que había cuerpos minerales que generaban un voltaje natural y sugirió el uso de la medida de la resistencia eléctrica como herramienta de investigación. Sin embargo, no fue capaz de desarrollar un sistema de trabajo debido a la polarización de los electrodos. En 1880, Carl Barus, solventó el problema desarrollando un electrodo no polarizable hecho de madera porosa y arcilla sin esmaltar bañado en una solución de sulfato de cobre.

Los métodos de resistividad eléctrica, como se conocen actualmente, empezaron a desarrollarse a principios de 1990; aunque no fue hasta 1970 cuando se generalizó el uso de estas técnicas, ayudado en parte por la disponibilidad de ordenadores para el procesado y análisis de los datos (Styles, 2012).

En la actualidad, a la determinación del potencial que detectó Fox es a lo que llamamos medidas del potencial natural; y a los métodos de resistividad desarrollados en Francia por los hermanos Schlumberger y en Estados Unidos por Wenner, son a los que denominamos métodos de resistividad eléctrica, ya que es en estos en los que se introduce corriente en el suelo y se mide el campo potencial con un voltímetro permitiendo obtener los valores de resistividad eléctrica de los materiales que se encuentran en el subsuelo.

4.1.1.1. Principios básicos.

El objetivo principal de la realización de los ensayos eléctricos es determinar la distribución de resistividades eléctricas que hay en el subsuelo mediante la realización de medidas desde la superficie. Para ello será necesario conocer algunos de los siguientes parámetros:

a) RESISTIVIDAD ELÉCTRICA:

La ley física fundamental que se emplea para la medida de la resistividad es la **Ley de Ohm**.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (4.1)$$

donde ΔV e I son la diferencia de potencial a lo largo del material y la intensidad de corriente que pasa a través del mismo, respectivamente.

Esto se puede escribir de forma alternativa en términos de fuerza de campo eléctrico (E ; V/m) y densidad de corriente (J ; A/m²):

$$\rho = \frac{E}{J} \text{ (}\Omega\text{m)} \quad (4.2)$$

Si consideramos un cubo uniforme con longitud L a través del cual hacemos pasar una corriente (I), el material que hay dentro del cubo se resistirá al paso de la electricidad a través de él, resultando en una diferencia de potencial (ΔV) entre las dos caras opuestas del cubo.

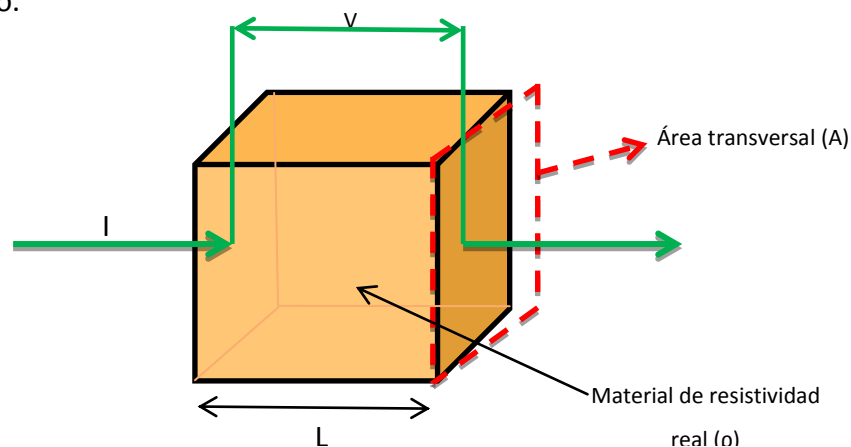


Figura 3: flujo de corriente eléctrica

La resistencia (R) será proporcional a la longitud (L) del material resistivo e inversamente proporcional al área transversal (A). La constante de proporcionalidad es la resistividad real (ρ).

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (4.3)$$

De acuerdo con la ley de Ohm (ecuación 4.1), la relación entre la diferencia de potencial y la corriente aplicada (V/I) también define la resistencia (R) del cubo, de forma que la combinación de estas dos expresiones se pueden combinar para formar el producto de la resistencia (Ω) y la distancia, definido como **resistividad eléctrica**.

$$\rho = \frac{VA}{IL} \quad (\Omega m) \quad (4.4)$$

Por otro lado, la inversa de la resistividad eléctrica es la conductividad (σ):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \left(\frac{S}{m}\right) \quad (4.5)$$

Si en lugar de trabajar sobre un cubo de material homogéneo imaginamos que en el cubo hay contenidos dos materiales distintos, cada uno de ellos con su propia resistividad (ρ_1 y ρ_2), tendremos que tener muy en cuenta la proporción de ambos en el medio y su geometría en el interior del cubo. A las variaciones eléctricas que en consecuencia se producen dentro del cubo se le conoce como anisotropía. El coeficiente de anisotropía viene dado por la relación entre la resistividad máxima y mínima. Este coeficiente generalmente oscila entre 1 y 2 (Reynolds, 2011).

Por último, la **resistividad aparente** se define como el valor obtenido del producto de la medida de la resistencia (R) por el factor geométrico (K). Este último viene dado por la disposición del electrodo y la geometría de la propagación de la corriente a través de éste. Sus unidades son el Ωm .

b) CONDUCTIVIDAD DE LOS MATERIALES

Como ya hemos definido en el apartado anterior, la conductividad es la capacidad que tiene un material de transmitir la corriente eléctrica. Existen tres tipos de conductividad: la *electrolítica*, que sucede por el movimiento relativamente lento de los electrones de un electrolito y que depende del tipo de ion, la concentración iónica y la movilidad de los mismos; la conductividad *electrónica*, que es la que se da en los metales, los cuales transmiten la corriente al permitir el movimiento rápido de los electrones; y la *dieléctrica*, que se da en materiales poco conductores o aislantes cuando se les aplica una corriente externa. Ésta causa que los electrones del átomo se muevan ligeramente con respecto del núcleo (Reynolds, 2011), es decir, aquí lo que se produce es una conducción a través del movimiento de los iones en la suspensión del suelo.

Las rocas poseen la capacidad de transmitir la corriente eléctrica debido a que el fluido que contienen en sus poros actúa de electrolito, ya que en general los minerales no contribuyen mucho a la conductividad de la roca, a excepción de aquellos que son buenos conductores *per se*.

Para poder entender y explicar las variaciones de resistividad eléctrica que encontramos en el subsuelo al hacer mediciones con las técnicas eléctricas, debemos tener en cuenta la variación de este parámetro en función de las propiedades físicas de los materiales que lo componen y del grado de saturación en agua, entre otros factores.

Partiendo de las observaciones recogidas en trabajos de otros investigadores (Majoribanks, 2010; Loke, 2013; Samouëlian et al., 2005; Reynolds, 2011) podemos decir que la conductividad eléctrica está muy relacionada con el tamaño de partícula, que influye en la cantidad de carga eléctrica superficial de los constituyentes sólidos del suelo.

Los poros del suelo son parte fundamental en el comportamiento del mismo, ya que en función de la cantidad de huecos, su distribución y forma, el contenido de aire y agua en el suelo variará.

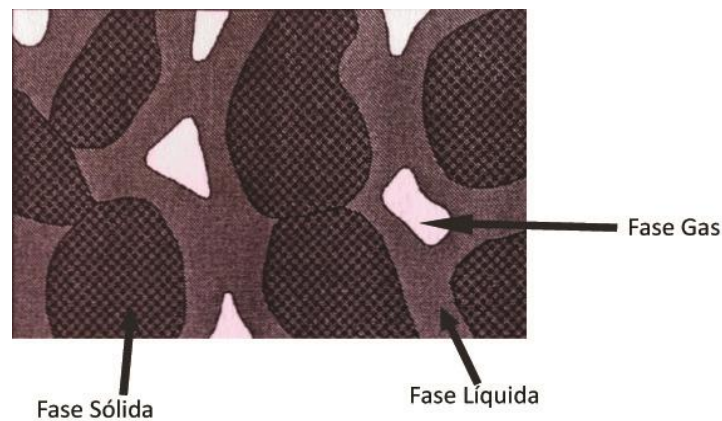


Figura 4: fases del suelo

Una forma de medir la porosidad a través de su relación con la resistividad viene dada por la Ley de Archie, aunque solo es aplicable a suelos con un bajo contenido en arcillas. También hay que tomar esta porosidad como una medida relativa, ya que la Ley de Archie supone que todos los poros están ocupados y además lo están de agua, excluyendo la posibilidad de que estén llenos de aire.

$$\rho = \rho_w \cdot a\phi^{-m} \quad (4.6)$$

donde ρ es la resistividad de la roca; ρ_w es la resistividad del fluido en el poro; ϕ es la porosidad (dada como la fracción de poros llenos de fluido); a y m son dos constantes empíricas que para la mayoría de las rocas suele ser 1 para a y 2 para m (Loke, 2013).

El contenido en agua de los poros del suelo es muy importante *per se*, ya que la forma de transmisión de corriente en la gran mayoría de los suelos es de tipo electrolítico, de forma que se necesita de la existencia de agua en el suelo para que los iones se puedan desplazar y transmitir la corriente. Si a esto le sumamos que, en prácticamente la totalidad de los casos, el agua lleva consigo sales disueltas se mejora sobremanera la conductividad eléctrica.

La relación entre la resistividad eléctrica y el contenido de agua viene dada por una modificación de la anterior ecuación de la Ley de Archie (ecuación 4.6), basada en los resultados obtenidos por el propio Archie en sus ensayos de laboratorio y que ahora sí tiene en cuenta que los poros pueden contener otros elementos distintos al agua.

$$S^n = \frac{F \rho_w}{\rho} \quad (4.7)$$

De la combinación de ésta con la original (ecuación 4.6) se obtiene:

$$S^n = \frac{\alpha \rho_w}{\phi^m \rho} \quad (4.8)$$

donde S es el grado de saturación y n es un parámetro relacionado con el grado de saturación. Esta ecuación se considera válida para suelos con granulometría gruesa y asume que las características de la fase sólida no influyen en la conductividad.

Siguiendo con el contenido de los poros, también es importante conocer la concentración de sales y su estado, ya que para que se produzca la transmisión de corriente éstas deben estar ionizadas, de forma que donde se den estas características serán los “camino” por donde se transmita la corriente. En sus estudios Kalinski y Kelly (1993) establecieron una relación entre la conductividad del agua y la resistividad eléctrica, de forma que para un contenido de agua dado, cuando la primera aumenta la segunda disminuye. Del mismo modo vieron que la presencia de distintos iones en una solución afectaba de diferente manera a la conductividad, ya que no todos los iones presentan la misma movilidad. Por eso soluciones de suelo de igual concentración tienen diferente conductividad eléctrica.

El último factor importante que influye en la conductividad es la temperatura. Ésta influye en la viscosidad de los fluidos en que van disueltos los iones, de manera que si aumenta la temperatura, disminuye la viscosidad del fluido y por tanto la agitación de los iones es mayor, produciéndose una disminución de los valores de resistividad.

Todos estos factores están presentes en cada tipo de suelo y sus características varían en función del proceso que lo haya formado (ígneo, metamórfico, sedimentario...).

Keller y Frischknecht (1996) y Daniels y Alberty (1996) entre otros, estudiaron los valores de resistividad de los diferentes materiales que componen el subsuelo. De sus trabajos se puede concluir que el rango de resistividades es muy amplio, oscilando desde valores de $1.6 \times 10^{-8} \Omega m$ para la plata pura (Reynolds, 2011) o los $10^{-4} \Omega m$ de la pizarra gráfica (Loke, 2013) hasta los $10^{16} \Omega m$ del sulfuro puro o del xileno.

Las rocas ígneas y metamórficas presentan valores de resistividad elevados, aunque suelen estar influenciados por el grado de fracturación y el porcentaje de agua que rellene las fracturas.

Las rocas sedimentarias son, por lo general, más porosas y por tanto pueden almacenar un mayor contenido de agua en sus poros, con lo que sus valores de resistividad son también elevados. En este caso, el rango de resistividades suele ser bastante amplio, dependiendo del grado de porosidad de la roca y la salinidad de la fase líquida del suelo.

Los sedimentos sin consolidar suelen tener valores de resistividad inferiores a los de las rocas sedimentarias.

Por otro lado, los suelos arcillosos presentan valores de resistividad menores que los suelos arenosos.

En general, los suelos y rocas presentan superposición de resistividades, ya que este factor depende a su vez de otros, que son característicos de cada lugar.

A continuación se detalla en una tabla el rango de resistividades para los materiales geológicos más comunes:

Material	Nominal resistivity (Ωm)	Material	Nominal resistivity (Ωm)
Sulphides:		London clay	4-20
Chalcopyrite	$1.2 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-1}$	Lias clay	10-15
Pyrite	$2.9 \times 10^{-5} - 1.5$	Boulder clay	15-35
Pyrrhotite	$7.5 \times 10^{-6} \times 1^{-2}$	Clay (very dry)	50-150
Galena	$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^2$	Mercia mudstone	20-60
Sphalerite	1.5×10^7	Coal measures clay	50
Oxides:		Middle coal measures	>100
Haematite	$3.5 \times 10^{-3} - 10^7$	Chalk	50-150
Limonite	$10^3 - 10^7$	Coke	0.2-8
Magnetite	$5 \times 10^{-5} - 5.7 \times 10^3$	Gravel (dry)	1400
Ilmenite	$10^{-3} - 50$	Gravel (saturated)	100
Quartz	$300 - 10^6$	Quaternary/Recent sands	50-100
Rock salt	$30 - 10^{13}$	Ash	4
Anthracite	$10^{-3} - 2 \times 10^5$	Colliery spoil	10-20
Lignite	9-200	Pulverised fuel ash	50-100
Granite	$300 - 1.3 \times 10^6$	Laterite	800-1500
Granite (weathered)	30-500	Lateritic soil	120-750
Syenite	$10^2 - 10^6$	Dry sandy soil	80-1050
Diorite	$10^4 - 10^5$	Sand clay/clayey sand	30-215
Gabbro	$10^3 - 10^6$	Sand and gravel	30-225
Basalt	$10 - 1.3 \times 10^7$	Unsaturated landfill	30-100
Schists (calcareous and mica)	$20 - 10^4$	Saturated landfill	15-30
Schist (graphite)	10-100	Acid peat waters	100
Slates	$600 - 4 \times 10^7$	Acid mine waters	20
Marble	$100 - 2.5 \times 10^8$	Rainfall runoff	20-100
Consolidated shales	20-2000	Landfill runoff	<10-50
Conglomerates	$2 \times 10^3 - 10^4$	Glacier ice (temperate)	$2 \times 10^6 - 1.2 \times 10^8$
Sandstones	$1 - 7.4 \times 10^8$	Glacier ice (polar)*	$5 \times 10^4 - 3 \times 10^5$
Limestones	$50 - 10^7$	Permafrost	$10^3 - >10^4$
Dolomite	$350 - 5 \times 10^3$		
Maris	3-70		
Clays	1-100		
Alluvium and sand	10-800		
Moraine	$10 - 5 \times 10^3$		
Hydrocarbon reservoir	25 - 27.5		
Sherwood sandstone	100-400		
Soil (40% clay)	8		
Soil (20% clay)	33		
Topsoil	250-1700		

* -10°C to -60°C , respectively; strongly temperature-dependent (Reynolds, 1985).
Based on Telford et al. (1990) with additional data from McGinnis and Jensen (1971), Reynolds (1987a), Reynolds and Paren (1980, 1984) and many commercial projects.

Tabla 2: resistividades de los materiales más comunes (Reynolds, 2011)

c) CONFIGURACIÓN DE LOS ELECTRODOS

En las técnicas de resistividad eléctrica y más en concreto en la tomografía eléctrica, los electrodos se pueden disponer de varias formas en el terreno en función de la sensibilidad con la que queramos obtener los datos.

- Configuración tipo Wenner: en ella la separación entre electrodos es simétrica. Los electrodos de corriente y los de potencial están dentro de la formación (Allred, 2008). La resistividad aparente viene dada por la ecuación $\rho_a = 2\pi aR$.

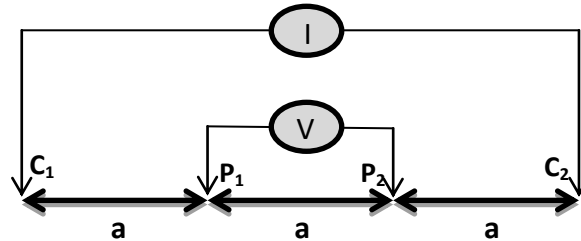


Figura 5: configuración Wenner

Esta configuración suele tener una buena resolución vertical, pero es bastante pobre en la detección de cambios de resistividad horizontales. En cuanto a la profundidad de investigación, para esta configuración, suele ser aproximadamente 0.5 veces el espaciamiento de a , con lo que comparado con otras configuraciones es un poco limitada.

- Configuración tipo Schlumberger: en este método, la separación entre los electrodos de potencial se mantiene constante, pero los electrodos de corriente se van espaciando progresivamente hasta que se hace muy difícil medir el voltaje (Styles, 2012). El espacio entre los electrodos de potencial no suele ser más de la quinta parte de la mitad del espacio entre los electrodos de corriente. Cuando la medida del voltaje comienza a ser muy pequeña, lo que se hace es espaciar los electrodos de potencial, de forma que se repita la operación hasta llegar a la profundidad de muestreo deseada. En esta configuración la profundidad media alcanzada es un 10% mayor que la conseguida con la configuración Wenner para una misma distancia entre los electrodos C_1 y C_2 (Loke, 2013).

La resistividad para esta configuración viene dada por la ecuación (Reynolds, 2011):

$$\rho_a = \frac{\pi a^2}{b} \left[1 - \frac{b^2}{4a^2} \right] R \text{ siendo } a \geq 5b$$

En general este conjunto es sensible a variaciones de resistividad tanto horizontal como vertical.

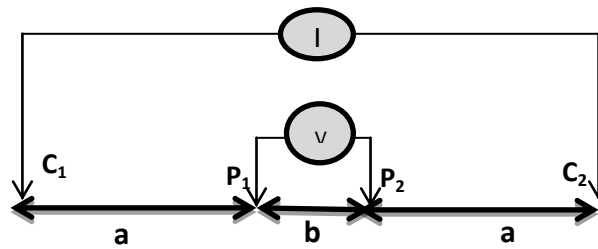


Figura 6: configuración Schlumberger

- Configuración Polo-polo: en ella solo hay un electrodo de corriente (C_1) y un electrodo de potencial (P_1). Los otros electrodos de corriente y potencial (C_2 y P_2) se han de colocar a una distancia de, como mínimo, 20 veces la separación máxima entre C_1 y P_1 . Este conjunto se usa principalmente en relevamientos donde el espaciamiento entre electrodos es inferior a 10 metros. Otra desventaja es la gran cantidad de ruido en las medidas debido a la gran distancia que separa los electrodos.
- Configuración Dipolo-dipolo: es la configuración más empleada en estudios con una relativamente amplia separación entre los electrodos de corriente y los de potencial.

Es muy sensible a cambios de resistividad horizontal, pero relativamente insensible a los cambios verticales. Su profundidad media de investigación depende del factor "n" así como de "a". La resistividad aparente vendrá dada por la ecuación $\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)aR$

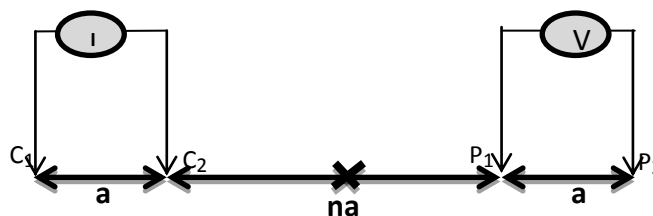


Figura 7: configuración dipolo-dipolo

En tomografía eléctrica, la configuración dipolo-dipolo hace que el dispositivo comience a medir, de forma habitual, con una distancia de $1xa$ entre los electrodos de inyección de corriente (C_1 y C_2) y los electrodos de medida de potencial (P_1 y P_2)¹. La primera secuencia de medidas se efectúa dándole un valor de 1 al factor n (relación entre $C_1 P_1/ C_2 P_2$). Esto es seguido por $n=2$, manteniendo a los electrodos de inyección de corriente C_1 y C_2 a un espaciamiento constante de valor $1xa$. Lo mismo ocurre para los electrodos de potencial. Así, cuando $n=2$, la distancia entre el electrodo de corriente C_1 y el de potencial P_1 es el doble de la distancia existente entre los electrodos de inyección de corriente. Para las siguientes medidas, el valor de n se va incrementando hasta un valor de 6, a partir del cual los valores de potencial obtenidos no son muy fiables.

Para aumentar la profundidad de investigación se debe aumentar la distancia entre los electrodos de corriente a $2xa$ dando comienzo otra serie de medidas con diferentes valores de n .

En investigaciones de tomografía empleando la configuración Dipolo-Dipolo, como es nuestro caso, se colocan los puntos de medida en el punto de intersección de dos líneas que parten a 45° de los centros de los segmentos $C_1 C_2$ y $P_1 P_2$. No obstante, esto no es del todo fiable, ya que es una convención establecida para representar de una forma sencilla valores de resistividad aparente. No es un valor real.

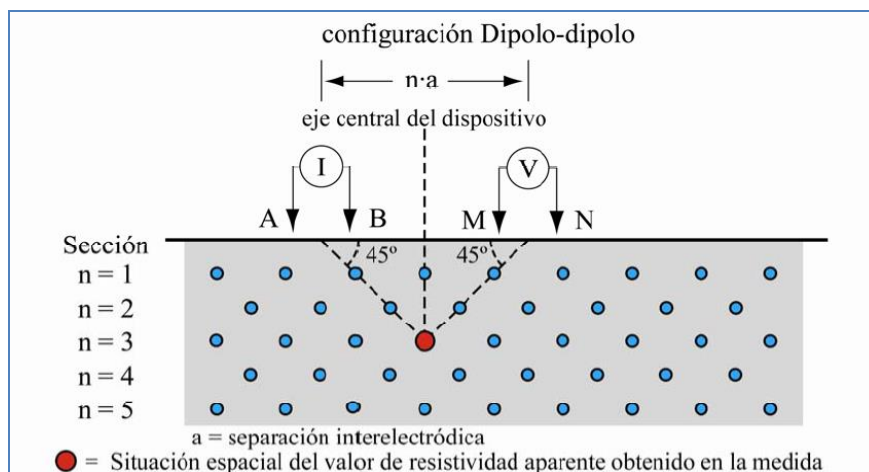


Figura 8: situación de los puntos de medida en una configuración dipolo-dipolo en una pseudosección de resistividades aparentes. (Tomado de Martínez Pagán, 2006).

¹ Algunos autores llaman a los electrodos de corriente C_1 y C_2 como A y B y a los electrodos de potencial P_1 y P_2 como electrodos M y N.

Otro método para colocar los puntos de medida sobre una posición vertical está basado en la profundidad media de investigación (Martínez-Pagán, 2006).

4.1.2. Tomografía Eléctrica: aplicación en campo.

Como ya se citó en el apartado 1, la técnica escogida para este estudio es el método de tomografía eléctrica (TE), conocido en la literatura científica inglesa como “*electrical resistivity tomography (ERT) method*” o “*electrical resistivity imaging (ERI) method*”.

Para su aplicación en campo se debe seguir una serie de pasos que se relatan a continuación.

En primer lugar debemos seleccionar la ubicación de las mediciones. En nuestro caso escogimos 3 perfiles dentro de la balsa, que se consideraron representativos. Los nombramos como perfil G1, G2 y G3. Sobre cada uno de los perfiles se hicieron tres series de medidas con el suelo seco y otras tres series con el suelo húmedo. Se decidió entonces nombrarlos como Perfil GxD03-n para el suelo seco y GxM03-n para el suelo húmedo, siendo x el número de perfil y n el número de la serie.

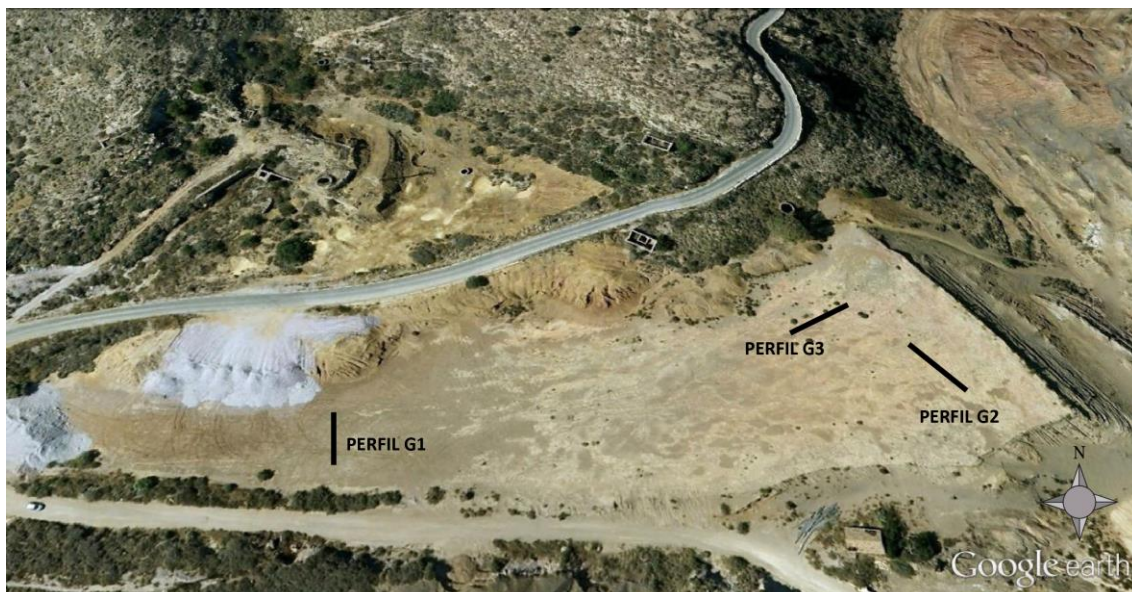


Imagen 3: ubicación de los perfiles en la balsa objeto de estudio.



Imagen 4: perfil G1



Imagen 5: perfil G2



Imagen 6: perfil G3

Una vez identificada la ubicación de los perfiles, se debe decidir el espacio de separación entre electrodos y la configuración más apropiada, ya que de ello dependerá la resolución vertical de las medidas. Según Bernard, para la configuración dipolo-dipolo se puede estimar la resolución vertical multiplicando la longitud total de la sección eléctrica por 0,2.

En estudios previos realizados en esta balsa (Proyecto IRIS, 2008-2012), se vio que la mayor parte de las variaciones de resistividad eléctrica se situaban entre la superficie y los 2 metros de profundidad. Para conseguir alcanzar esta resolución vertical se decidió establecer la separación entre electrodos en 30 cm, con un total de 36 electrodos. Basándonos en esto, si aplicamos la ecuación descrita por Bernard, la profundidad máxima que alcanzaremos es de 2,16 m.

$$L=0,3\text{m} * 36 \text{ electrodos} = 10,8\text{m}.$$

$$\text{Profundidad} = 10,8 * 0,2 = 2,16\text{m}.$$

Un espaciamiento mayor habría supuesto mayor profundidad de estudio, pero un empeoramiento de la resolución horizontal que, para este caso, es la que realmente nos puede indicar con mayor precisión el grado de influencia de algunas propiedades de los residuos en la resistividad. El equipo empleado para la medición es el *SYSCAL R1 Plus Switch 72*, de la casa *Iris Instruments* (Orleans, Francia). Este resistivímetro posee una memoria interna en la que se carga previamente el fichero que contiene la secuencia de medidas. Dicha secuencia establece el tipo de configuración adoptada, separación de electrodos, número de medidas, etc. El resistivímetro, a través de la secuencia de medidas, selecciona automáticamente los electrodos que actuarán como electrodos de corriente (dos electrodos activos en cada medida) y electrodos de medida de potencial (dos electrodos activos en cada medida).



Imagen 7: equipo de Tomografía Eléctrica

La elaboración de la secuencia de medidas se realiza con el programa *Electre II*, de *Iris Instruments*. Con él podemos configurar la calidad máxima de cada medida, el *stacking* o número de medidas, el tiempo durante el cual el equipo está enviando corriente a los electrodos, el factor de geometría y la configuración de los electrodos (en este caso Dipolo-dipolo).

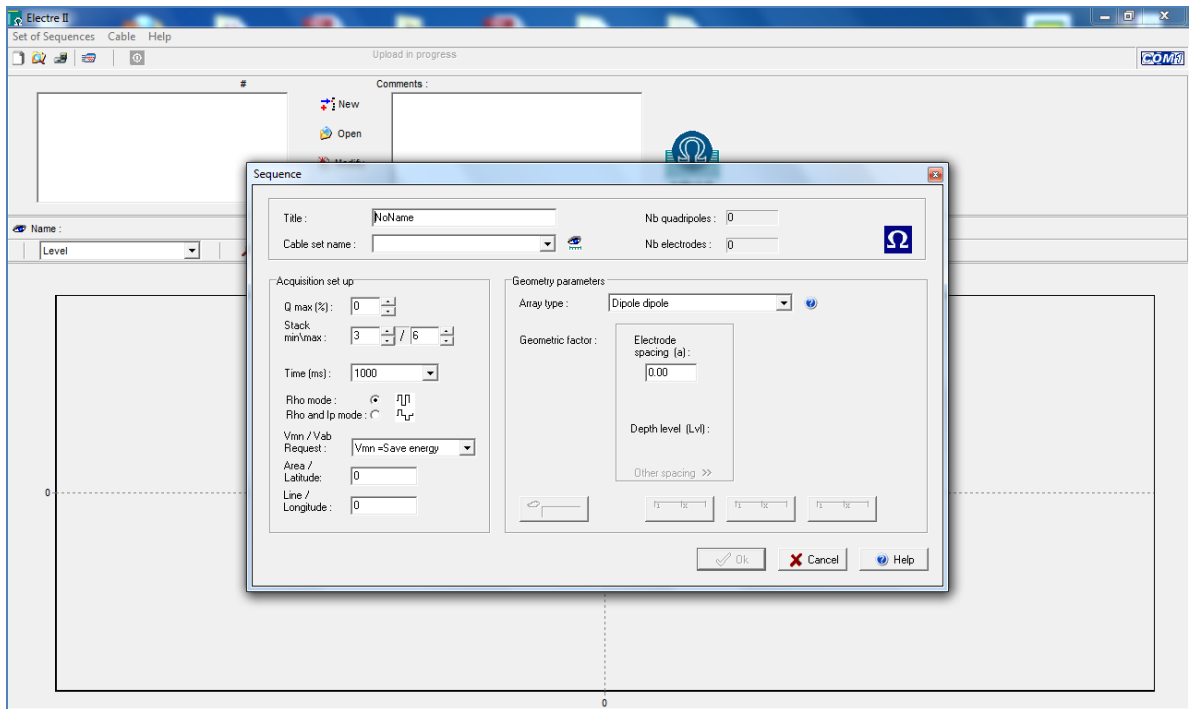


Imagen 8: programa para hacer secuencias de perfiles Electre II

Para transmitir la corriente eléctrica hasta los electrodos y medir el potencial, se utiliza un cable multiconductor que va conectado en un extremo al equipo y en cada uno de los bornes del cable a uno de los electrodos.



Imagen 9: detalle de la conexión entre el cable multiconductor y un electrodo

Cada electrodo se numera en una única dirección dentro del dispositivo, lo que permite que el resistivímetro lo identifique y sepa en qué electrodos está midiendo. En

nuestro caso, hemos puesto 36 electrodos, siendo el numero 1 el más alejado del equipo y el número 36 el más cercano.

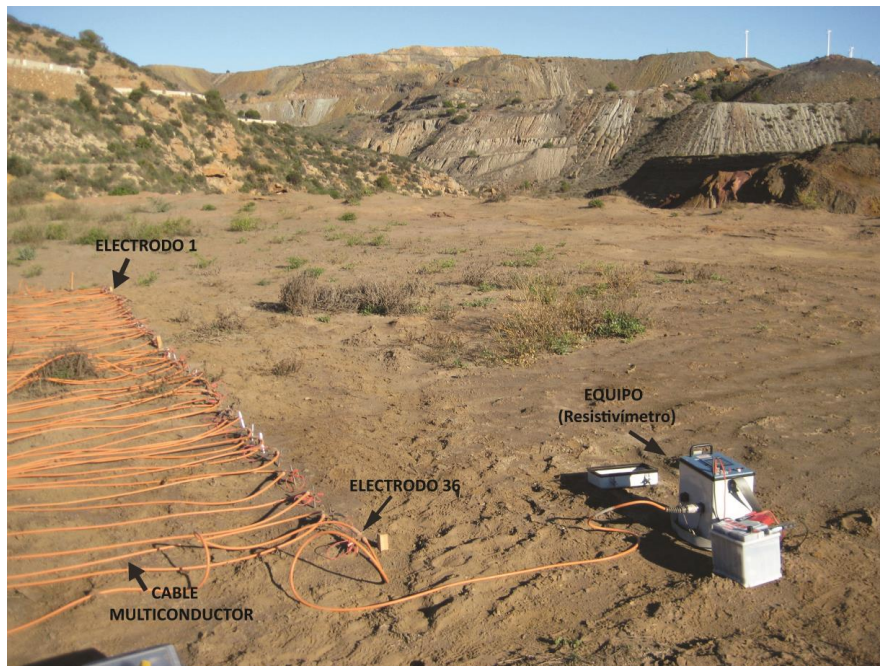


Imagen 10: numeración de los electrodos (ejemplo en el perfil G2)

Como electrodos se utilizan picas metálicas de acero inoxidable o electrodos especiales que eliminen la generación de polarización inducida para asegurar un contacto galvánico (Martínez-Pagán, 2006).

Para poder asegurar que los valores de resistividad son correctos debemos realizar mediciones tanto con el suelo seco como con el suelo húmedo y analizar las variaciones. Por ello en cada perfil se hicieron tres mediciones con el suelo seco, tal y como se muestra en la imagen 10. Después se hicieron una especie de pocillos alrededor de cada electrodo, donde se vertió un litro de agua por electrodo (imagen 11). Una vez absorbida se procedió a realizar tres mediciones con el suelo húmedo.



Imagen 11: preparación del suelo para la medición en húmedo.
(11A: preparación de los pocillos; B: detalle de uno de los pocillos con el litro de agua; C estado final del suelo listo para la medición)

Una vez que hemos tomado todos los datos en campo, éstos se descargan en un ordenador y comienza la etapa de procesado y análisis de la información.

Para ello utilizamos el programa Prosys II, de IRIS Instruments. Con él podemos hacer un filtrado de datos de forma automática o de forma manual en función de diferentes parámetros, eliminando los valores de resistividad erróneos.

The screenshot shows the Prosys II software interface. The main window displays a data table titled 'SYSVAL multi electrodes'. The table has columns for 'Spa.4', 'Rho', 'Dev.', 'M', 'Sp', 'Vp', and 'In'. The data rows are numbered from 1 to 29. A context menu is open over the 'Rho' column, showing options like 'Filtering', 'Sliding average...', and 'Median average...'. The status bar at the bottom indicates 'Data: 794 / 794' and the file path 'F:\Trabajo Fin de Master_IAT\Datos\Gorguel_Datos\Campaña Geofísica Diciembre 2012\Perfil Gorguel 2 - 20122712\Gorguel_Geofisic'.

#	Spa.4	Rho	Dev.	M	Sp	Vp	In				
1	0.90	137.09	0.0	0.00	-151.0	-23.851	0.984				
2	1.20	97.04	0.0	0.00	-151.0	-18.759	4.373				
3	1.50	53.37	0.0	0.00	-151.0	-20.386	21.602				
4	1.80	39.71	0.0	0.00	-151.0	-19.945	56.799				
5	2.10	64.29	0.0	0.00	-151.0	-19.744	60.786				
6	2.40	58.45	0.0	0.00	-151.0	-19.732	106.896				
7	2.70	45.02	0.0	0.00	-151.0	-11.991	126.529				
8	3.00	52.13	0.0	0.00	-151.0	-9.940	129.393				
9	3.30	63.88	0.0	0.00	-151.0	-8.856	131.593				
10	3.60	63.88	0.0	0.00	-151.0	-7.057	133.413				
11	3.90	63.88	0.0	0.00	-151.0	-5.531	135.039				
12	4.20	63.88	0.0	0.00	-151.0	-2.324	136.428				
13	4.50	63.88	0.0	0.00	-151.0	-1.682	137.738				
14	4.80	36.59	0.0	0.00	-151.0	-1.605	138.919				
15	5.10	24.61	0.0	0.00	-151.0	-0.896	140.074				
16	5.40	18.29	0.0	0.00	-151.0	-0.559	141.165				
17	5.70	41.30	0.0	0.00	-151.0	-1.071	142.141				
18	1.50	127.42	0.0	0.00	-151.0	-41.946	1.163				
19	2.10	53.48	0.0	0.00	-151.0	-18.883	8.736				
20	2.70	52.91	0.0	0.00	-151.0	-20.100	28.197				
21	3.30	57.49	0.0	0.00	-151.0	-20.901	59.370				
22	3.90	62.49	0.0	0.00	-151.0	-19.635	95.262				
23	4.50	35.22	0.0	0.00	-151.0	-9.486	136.139				
24	5.10	32.26	0.0	0.00	-151.0	-5.703	138.084				
25	2.10	108.11	0.0	0.00	-151.0	-46.415	1.259				
26	2.40	74.77	0.0	0.00	-151.0	-17.605	1.973				
27	3.00	64.95	0.0	0.00	-151.0	-19.709	8.898				
28	3.30	62.01	0.0	0.00	-151.0	-19.687	14.628				
29	3.90	66.63	0.0	0.00	-151.0	-20.444	29.240				
30	Dipole Dipole	0.00	0.90	3.30	4.20	61.05	0.0	0.00	-151.0	-20.148	42.575
31	Dipole Dipole	0.00	0.90	3.90	4.80	38.43	0.0	0.00	-151.0	-20.714	117.399
32	Dipole Dipole	0.00	0.90	4.20	5.10	36.77	0.0	0.00	-151.0	-19.795	147.608
33	Dipole Dipole	0.00	0.90	4.80	5.70	32.03	0.0	0.00	-151.0	-11.718	151.390
34	Dipole Dipole	0.00	0.90	5.10	6.00	34.77	0.0	0.00	-151.0	-10.688	153.197
35	Dipole Dipole	0.30	0.60	0.90	1.20	156.97	8.0	0.00	-151.0	-31.678	1.141
36	Dipole Dipole	0.30	0.60	1.20	1.50	73.68	0.0	0.00	-151.0	-18.514	5.684
37	Dipole Dipole	0.30	0.60	1.50	1.80	49.15	0.0	0.00	-151.0	-19.862	22.850
38	Dipole Dipole	0.30	0.60	1.80	2.10	76.06	0.0	0.00	-151.0	-20.078	22.404

Imagen 12: ejemplo de filtrado de datos con Prosys II

Una vez que tenemos los datos de resistividad corregidos, los tratamos con el programa RES2DINV, de Geotomo Software. Este programa está diseñado para invertir un gran conjunto de datos (desde 200 a 100.000) recogidos por un elevado número de electrodos (desde 25 a 16.000), de forma que relacione cada dato con su electrodo.

Para la inversión, se usa un modelo 2-D que consiste en un gran número de bloques rectangulares cuya distribución está poco relacionada con la distribución de los datos puntuales en la pseudosección eléctrica. La distribución y tamaño de los bloques es generada automáticamente por el programa utilizando la distribución de los datos puntuales como guía.

La profundidad de la fila inferior de bloques se ajusta para que sea aproximadamente igual a la mediana de la profundidad de investigación de los puntos con el mayor espaciamiento entre electrodos.

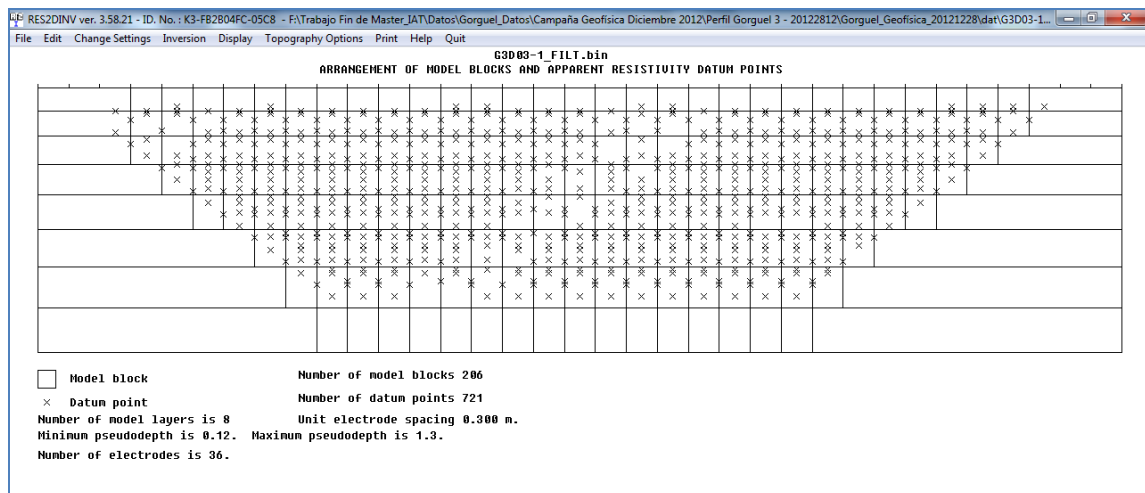


Imagen 13: distribución de los bloques por el modelo 2D junto con los datos en la pseudosección

Para calcular los valores de resistividad aparente, el programa aplica el modelo de diferencias finitas o de elementos finitos; y para calcular la resistividad de los bloques utiliza una relación no lineal suavizada de la técnica de mínimos cuadrados.

El método de optimización intenta reducir la diferencia entre los valores calculados y medidos de resistividad aparente mediante el ajuste de la resistividad de los bloques del modelo sujeto a las limitaciones de suavidad utilizados.

Una forma de medir esta diferencia es con el error medio cuadrático (RMS). En general podemos tomar como iteración correcta aquella en la que el cambio en el error cuadrático no sea significativo respecto de la anterior. Esto generalmente ocurre entre la tercera y la quinta iteración (Geotomo, 2012).

4.2. MÉTODOS GEOQUÍMICOS

A continuación se presentan los métodos geoquímicos utilizados en este trabajo, que permitirán evaluar las relaciones existentes entre la resistividad eléctrica y las propiedades edáficas de los residuos mineros.

4.2.1. Toma de muestras en campo

Para la distribución de la toma de muestras nos hemos basado en la profundidad alcanzada con el estudio de tomografía y la extensión de los perfiles realizados, cuyo objetivo principal era alcanzar la máxima representatividad de la zona de estudio. Así, coincidiendo con él, se ha decidido tomar muestras a 3 profundidades: 0-30 cm; 30-60 cm y 60-90 cm; coincidiendo con tres electrodos distanciados 1 m entre sí: el E14, E18 y E22. Como muestras control se han tomado las extraídas bajo el electrodo E6 a 30-60 cm de profundidad; el E10 a 0-30 cm y el E26 a 60-90 cm de profundidad.

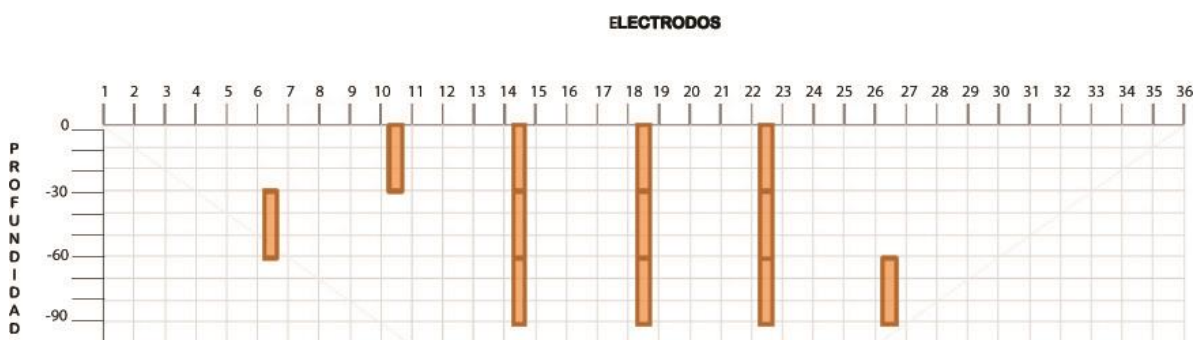


Figura 9: distribución espacial de las muestras

La extracción de las muestras se realizó de forma manual con una barrena y guardando las muestras en bolsas de polietileno para su transporte al laboratorio. El proceso se repitió para cada uno de los 3 perfiles de tomografía, tomando un total de 36 muestras.



Imagen 14: muestreo de suelo



Imagen 15: muestreo de suelo



Imagen 16: muestreo de suelo

4.2.2. Procedimientos analíticos

Para la mayoría de los procedimientos analíticos que se van a exponer a continuación es necesario tamizar el suelo muestreado para eliminar las gravas (partículas de tamaño superior a 2 mm), ya que éstas se consideran no reactivas en términos de geoquímica de suelos. Para ello se utiliza un tamiz con luz de malla de 2 mm.



Imagen 17: muestra de suelo sin tamizar



Imagen 18: muestra de suelo tamizada. A la izquierda partículas de tamaño grueso (superior a 2 mm) retenidas por el tamiz y a la derecha partículas de tamaño inferior a 2 mm.

Así mismo, una vez separada una submuestra para la determinación de la humedad, el resto de las muestras se disponen en bandejas debidamente etiquetadas y se introducen en la estufa a 105°C durante al menos 1 día para eliminar la humedad de las mismas, como inicio de la preparación y posterior análisis.



Imagen 19: muestras en desecación

Para el análisis de algunas propiedades y constituyentes del suelo es necesario moler parte de las muestras que habíamos tamizado previamente. Para ello utilizamos un mortero mecánico de ágata.



Imagen 20: a la izquierda el mortero automático y a la derecha una muestra de suelo triturado.

4.2.2.1. Humedad del suelo

Se denomina humedad del suelo a la cantidad de agua contenida en un peso de suelo conocido. Normalmente se expresa en porcentaje. Su medición exacta en laboratorio se realiza gravimétricamente, pesando una muestra de suelo antes y después del secado (Porta et al., 1986).

El procedimiento consiste en introducir una fracción de cada una de las muestras de suelo, de peso conocido en una estufa de aire forzado a 105°C durante un mínimo de 10 horas. Una vez transcurrido este tiempo, se sacan de la estufa y se colocan en un desecador. Cuando las muestras están frías se pesan de nuevo.

Con los datos obtenidos de las pesadas aplicamos la siguiente expresión y obtenemos el porcentaje de humedad:

$$\% \text{ de humedad del suelo} = \frac{(P_h - (P_f - P_c))}{P_h} * 100$$

donde:

P_h = peso del suelo húmedo + crisol

P_f = peso del crisol + muestra de suelo seco

P_c = peso del crisol

4.2.2.2. Textura

La textura de un suelo hace referencia a la distribución de los tamaños de las partículas minerales individualizadas que lo componen. El resultado (porcentaje en peso), expresa la composición granulométrica de la muestra. Cada clase textural corresponde a una determinada composición cuantitativa de arena, limo y arcilla. Para clasificar los constituyentes del suelo según su tamaño de partícula, se han establecido muchas clasificaciones granulométricas. Todas aceptan los términos de arena, limo y arcilla, pero difieren en los valores de los límites establecidos para definir cada clase. De todas estas escalas granulométricas, son la de Atterberg o Internacional (ISSS) y la americana del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) las más utilizadas. Ambas clasificaciones dividen al suelo en arena, limo y arcilla, con la diferencia de que, según ISSS, la arena tiene un tamaño entre 2-0,02 mm y USDA establece un tamaño para la arena entre 2-0,05 mm.

En suelos con un elevado contenido de materia orgánica (como los suelos agrícolas) se hace necesario llevar a cabo un pretratamiento con H_2O_2 que permite destruir la materia orgánica (que contribuye a la agregación de las partículas minerales) e individualizar dichas partículas con un mínimo efecto sobre la fracción mineral. En nuestro caso, al tratarse de un suelo de origen minero, la fracción de materia orgánica es prácticamente nula con lo que este paso no es necesario realizarlo, no viéndose alterado nuestro resultado.

Además, para lograr la dispersión del suelo hay que sustituir los cationes polivalentes de la doble capa de los coloides por fracciones monovalentes, litio o sodio principalmente. Entre los dispersantes químicos más generalizados se encuentra el calgón, que es el nombre con el que se comercializa una mezcla de $NaPO_3$ o $(NaPO_3)_6$.

En algunas ocasiones, cuando los suelos son muy salinos presentan graves problemas de dispersión ya que las sales hacen que las arcillas floculen y precipiten. Esto se puede solucionar con sucesivos lavados del suelo con agua desionizada (Porta et al., 1986).

El método elegido para la determinación de la textura del suelo en este caso es el método Bouyoucos.

Este método se basa en la Ley de Stokes, válida para partículas esféricas pequeñas que se mueven a velocidades bajas en un medio viscoso. La resistencia ofrecida por un líquido a la caída de una partícula rígida varía con la circunferencia de la esfera y no con su superficie siendo, además, proporcional a la viscosidad (η) y a la velocidad de caída (V). La fuerza de caída es proporcional al peso de la partícula y, consecuentemente, a su volumen, a la diferencia de densidades de la partícula (d_1) y del líquido (d_2) y a la aceleración de la gravedad (g):

$$\text{Fuerza de caída} = \frac{4}{3} \pi r^3 (d_1 - d_2) g$$

$$\text{Resistencia a la caída} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot 3 \cdot V$$

En una sedimentación en régimen laminar:

$$V = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 (d_1 - d_2) g}{\eta}$$

donde:

V = velocidad límite de caída (cm s^{-1})

d_1 = densidad de las partículas (g cm^{-3})

d_2 = densidad del líquido (g cm^{-3})

g = aceleración de la gravedad (cm s^{-2})

r = radio aparente de la partícula de mayor tamaño de la fracción (cm)

η = viscosidad (poise = $\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-1}$)

El método Bouyoucos considera que la concentración de sólidos totales en la suspensión dispersa es proporcional a la densidad de esas partículas, por lo que introduciendo un densímetro de tipo Bouyoucos a diferentes tiempos, se puede estimar la concentración de arenas, limos y arcillas, en función del tiempo de sedimentación de cada fracción.

En este método (Dewis y Freitas, 1970), experimentalmente se considera que, cuando se utiliza un densímetro del tipo Bouyoucos, la concentración de sólidos totales en la suspensión (g L^{-1}) indicada por la escala del densímetro a los 40 s después de la agitación, corresponde a partículas de diámetro $\leq 20 \mu\text{m}$ (0,02 mm) (arcilla y limo) y la indicada a las dos horas corresponde a partículas de diámetro $\leq 2 \mu\text{m}$ (arcilla), según el sistema internacional (ISSS).



Imagen 21: columnas de texturas

Por tanto, la lectura realizada a las 2 h indica directamente la concentración de arcilla en la suspensión y restando esta cantidad de la correspondiente a los cuarenta segundos, se obtiene la concentración de limo. El contenido de arena se calcula por diferencia entre el peso total de suelo y el peso del conjunto de arcilla y limo a través de la expresión:

$$X = \frac{d + [(t - 20) * 0,36]}{P} * 100 = \% \text{ limo} + \text{arcilla}$$

$$Y = \frac{d' + [(t' - 20) * 0,36]}{P} * 100 = \% \text{ arcilla}$$

donde:

X - Y = % limo.

100 - X = % arena.

P = peso de la muestra de suelo seco (g).

0,36 = factor de corrección por grado de diferencia de temperatura. Se supone que la temperatura de contraste del densímetro Bouyoucos es de 20 °C.

Con los porcentajes obtenidos de arena, limo y arcilla, se accede, en la Figura 10 para determinar la clase textural de cada una de las muestras analizadas:

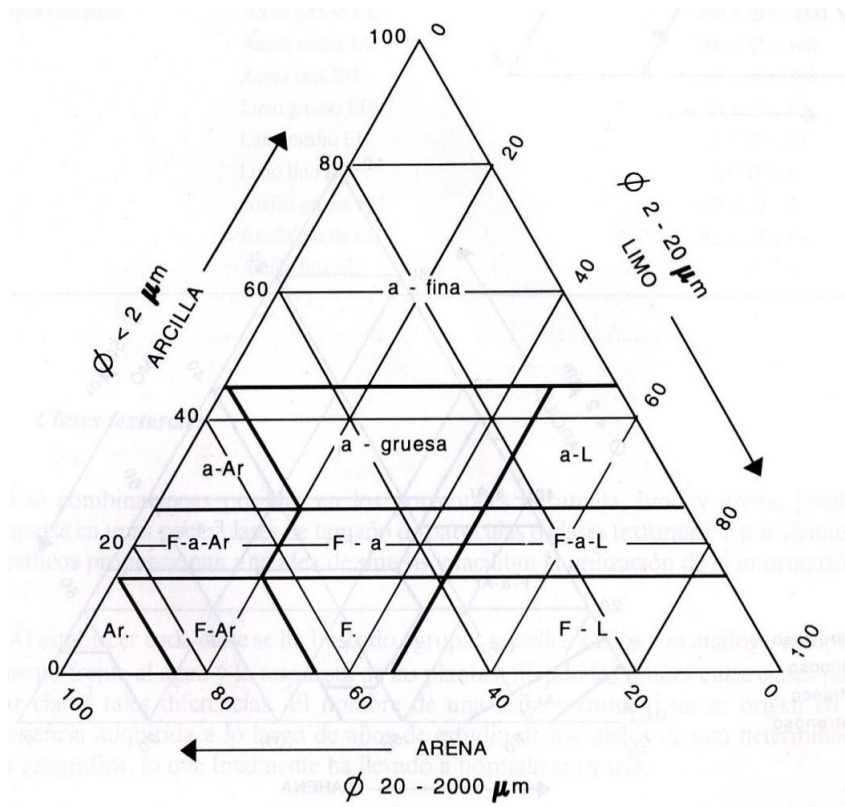


Figura 10: diagrama triangular para la determinación de la clase textural según los criterios ISSS

LEYENDA:

- | | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| a: arcilla | F-a-L: franco arcilloso limoso |
| a-Ar: arcillo arenoso | Ar: arena |
| a-L: arcillo limoso | F-Ar: franco arenoso |
| F-a-Ar: franco arcilloso arenoso | F: franco |
| F-a: franco arcilloso | F-L: franco arenoso |

4.2.2.3. Estabilidad de agregados en agua

Las partículas individuales del suelo no están dispuestas al azar, sino que forman unas estructuras que poseen cierta organización interna y forma externa característica, denominadas agregados. La naturaleza y distribución del tamaño de los agregados y del espacio de poros se denomina estructura del suelo y juega un papel importante en las propiedades físicas del mismo. La estructura del suelo está relacionada con la disposición mutua de las partículas individuales del suelo, con la estabilidad del estado agregado y con el tamaño de los poros.

La estabilidad de los agregados hace referencia a la capacidad de éstos para mantener su forma al estar sometidos a fuerzas inducidas artificialmente. En concreto, las derivadas de la humectación o al impacto de las gotas de lluvia (Díaz et al., 1994).

El método utilizado es el propuesto por USDA (1999), con modificaciones derivadas del empleo de la estufa de aire forzado a 110°C (Soil Science Society of America, 1986). En él se describe el análisis para los agregados del suelo con un tamaño inferior a 2 mm.

El método consiste en colocar una muestra de suelo tamizado de peso conocido en un tamiz de 0,25 mm y sumergirlo lentamente en una bandeja con agua, realizando movimientos ascendentes y descendentes con el fin de desprender las partículas menores de 0,25 mm. Se pone la muestra en la cámara de secado (en nuestro caso la estufa de aire forzado es sustituida por un secador convencional) y una vez seca se pesa.

A continuación se sumerge la muestra en una bandeja que contiene calgón (polifosfato sódico) con el fin de destruir los agregados y quedarnos solo con la arena. Se vuelve a secar y pesar de nuevo, de forma que aplicando la siguiente expresión podremos obtener el porcentaje de agregados estables en agua:

$$\text{Agregados estables en agua (\%)} = \frac{P_{as} - P_a}{P_{ss} - P_a} * 100$$

donde:

P_{as} = peso de agregados secos (g)

P_a = peso arena (g)

P_{ss} = peso de la muestra de suelo seco (g)

4.2.2.4. pH real

El valor del pH permite conocer, en una primera aproximación, algunas características químicas del suelo como la saturación de bases y, en consecuencia, la disponibilidad y movilidad de ciertos elementos nutritivos y oligoelementos. La determinación del pH real (usando H₂O) según el método de Cobertera (1993) (método oficial español), se realiza a partir de una relación suelo:líquido 1:2,5, diferente de la establecida en el método descrito por Peech (1965), en el que se señala una relación suelo:líquido 1:1. Para las medidas de pH se utilizan pH-metros que contienen un potenciómetro provisto de un electrodo de pH combinado y otro electrodo de temperatura con el que se realizan las mediciones. El pH-metro establece el pH midiendo el potencial generado (en mV) por el electrodo de vidrio que es sensible a la actividad del ión H⁺; el potencial es comparado con un electrodo de referencia, que produce un potencial constante e independiente del pH.

Para el análisis tomamos una muestra de suelo de peso conocido (8 g) a la que añadimos 20 ml de agua desionizada. Se agita durante 10 minutos y se deja reposar. Seguidamente se introducen los electrodos del pH-metro en la suspensión de suelo y se realiza la lectura. Es muy importante comprobar previamente que el pH-metro está calibrado y limpiar el electrodo con agua desionizada tras cada medición.

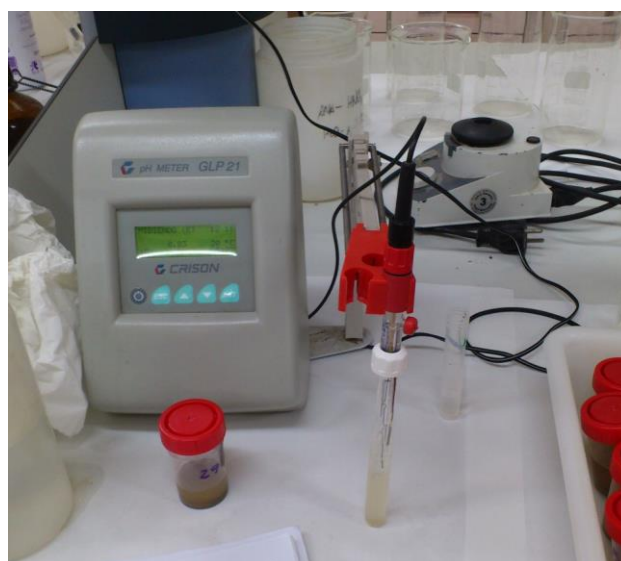


Imagen 22: medición de pH.

4.2.2.5. Conductividad Eléctrica (CE)

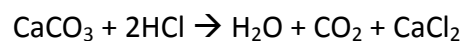
La conductividad eléctrica hace referencia a la capacidad que tiene una solución para transmitir la corriente eléctrica. Esta determinación indica la concentración total de componentes ionizados en las distintas soluciones. La conductividad eléctrica es proporcional al contenido de sales disueltas, por lo tanto, está directamente relacionada con la suma de cationes o aniones que se determinen químicamente. En general, presenta una estrecha correlación con los sólidos totales disueltos. Las medidas varían dependiendo de la temperatura, por lo que se estandariza a 25°C.

El método consiste en medir la mayor o menor facilidad que presenta una solución para conducir la corriente eléctrica, lo que guarda una relación directa con la mayor o menor cantidad de sales disueltas que contenga. La unidad de medida empleada es el Siemens ($1\text{dS m}^{-1} = 1\text{ mS cm}^{-1} = 1\text{ mmhos cm}^{-1}$).

El procedimiento realizado se resume en introducir en un vial una muestra de suelo tamizado de peso conocido (8 g) y añadirle 40 ml de agua desionizada (relación 1:5) y someterlo a agitación. Una vez éste ha reposado se toma la medida con el conductímetro, previamente calibrado, lavando los electrodos tras cada medida.

4.2.2.6. Carbonato Cálcico Equivalente

Su determinación en un suelo tiene interés por su valor diagnóstico de diversas propiedades del mismo: estructura, actividad biológica, bloqueo de nutrientes, análisis granulométrico, etc. El método se basa en el tratamiento del suelo con ácido clorhídrico cuyos carbonatos desprenderán CO_2 , según la siguiente reacción:



Si dicha reacción se lleva a cabo en un dispositivo cerrado (calcímetro), a presión y temperatura constantes y no se desprenden otros gases, la medida del volumen de CO_2 desprendido permitirá calcular el contenido de carbonatos. El método de análisis a utilizar será el del calcímetro de Bernard, basado en el descrito por *Porta (1986)*.

Dicho calcímetro recoge el CO_2 desprendido en la reacción expuesta anteriormente de forma que la cantidad desprendida se puede valorar en una columna de medida. Como resultado se obtiene la cantidad de CaCO_3 que tiene el suelo analizado, una vez

efectuados los cálculos adecuados, referenciando los volúmenes de CO_2 desprendido a pesos conocidos de carbonato cálcico puro.

Para la realización de la medida se debe coger un determinado peso de suelo molido y colocarlo en un matraz Erlenmeyer, donde también se introduce un tubo de ensayo con 5 ml de HCl 4N. Se tapa la boca del matraz herméticamente con un tapón de goma provisto de un tubo de desprendimiento unido al calcímetro Bernard. A continuación se toma la medida en la escala de valor del calcímetro y se anota. Seguidamente se vierte el contenido del tubo de ensayo sobre la muestra de suelo y se agita. El gas desprendido en la reacción hace descender el líquido contenido en la columna Bernard, dando un valor final. También es necesario anotar la presión y temperatura del laboratorio en el momento de la medida.



Imagen 23: detalle de la escala antes de desprenderse el CO_2 (izquierda) y después (derecha)

Este proceso se repetirá de la misma manera para cada una de las muestras. Para realizar la recta de calibrado en lugar de muestras de suelo, preparamos diferentes muestras con distintos pesos de CaCO_3 puro.

Una vez que tenemos todos los valores anotados calculamos con las siguientes expresiones:

La recta de calibrado es de la forma $Y = aX + b$, donde Y y X se calculan de la siguiente manera:

$$Y = V * CN$$

donde:

$$V = (V_2 - V_1)$$

$$CN = \frac{(P * 273,15)}{(T + 273,15) * 760}$$

V_2 y V_1 = volumen desplazado en el calcímetro con posterioridad y anterioridad al contacto entre HCl y el suelo (mL).

P = presión (mbar)

T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

$$X = g\text{CaCO}_3$$

El factor CN se utiliza para transformar el volumen desplazado V a volumen en condiciones normales.

Con los distintos valores de Y y X, se puede representar una línea recta con la forma $Y = aX + b$, pudiendo obtener los parámetros a y b, quedando la recta de calibrado perfectamente definida.

Para la obtención del contenido en carbonatos en cada una de las muestras (X) en g, se deben realizar los siguientes cálculos:

1. $\Delta V = (V_2 - V_1)$

2. CN se calcula de manera análoga a CN en la recta de calibrado. Si la temperatura y la presión es la misma en la toma de datos de muestras de suelo y de CaCO_3 para la calibración, el valor de CN es el mismo en ambos casos.

3. $X = Y - b/a$, siendo

X= g de CaCO₃ en la muestra a calcular

a y b= coeficientes de la recta de calibrado calculados anteriormente.

Una vez obtenidos los g de CaCO₃ contenidos en la muestra de suelo (X) y conociendo la cantidad pesada de suelo inicial, se calcula el porcentaje de carbonato cálcico de la siguiente manera:

$$\% \text{ carbonato} = \frac{X}{P} \times 100$$

donde:

P = peso de la muestra de suelo seco (g)

X = CaCO₃ de la muestra (g)

4.2.2.7. Extracción y determinación de metales pseudo-totales por digestión vía húmeda.

Los métodos de análisis pseudo-total (casi total) son aquellos que utilizan para la disolución y extracción de los elementos algunos ácidos no demasiado fuertes, como por ejemplo HCl, HNO₃ ó HClO₄, de manera que los metales pesados retenidos en las fracciones cristalinas de algunos de los minerales más resistentes no serán extraídos.

El objetivo de este método consiste en transformar la muestra sólida en una solución donde se encuentren disueltos los metales pesados (Scott y Thomas, 1977), mediante una mezcla de ácidos fuertes (nitríco-perclórico) bajo calentamiento y sistema de reflujo.

En este caso el procedimiento utilizado es el método de extracción pseudo-total por vía húmeda, basado en la metodología de Risser y Baker (1990), y se aplica para los metales Cd, Cu, Pb, Zn, Mn, Ni, Cr y As.

El procedimiento seguido consiste en tomar 1 g de suelo molido e introducirlo en un tubo Kjeldhal y añadir 20 ml de una disolución ácida de nítrico-perclórico al 50%. A continuación se introducen los tubos en el digestor. Una vez terminada la digestión se retira la gradilla y se dejan enfriar. Se adiciona HCl 0,5 N a cada uno de los tubos y se traspa la solución a un matraz de 100 ml, utilizando un filtro y enjuagando el tubo

con HCl 0,5N para asegurar un buen lavado. Se enrasa con este ácido a 100 ml y se homogeniza.

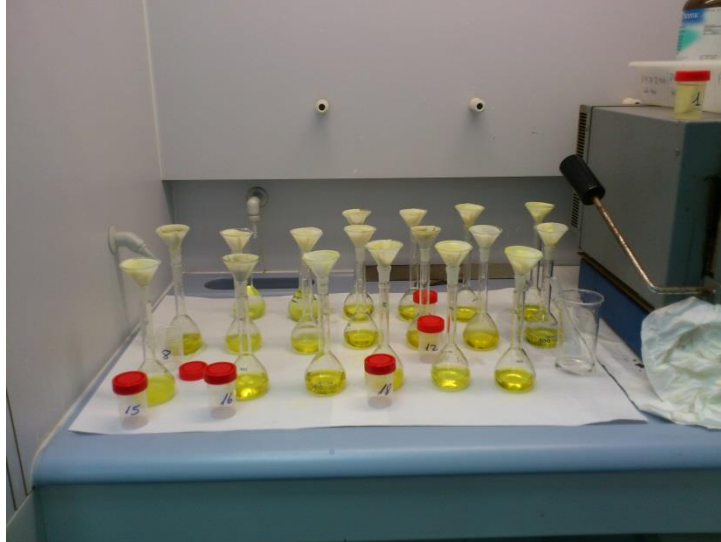


Imagen 24: extracción de metales totales

Seguidamente se traspara a viales más pequeños que ya pueden ser almacenados para la medida de los metales usando un ICP-MS.

Una vez que conocemos la concentración de metales en la muestra y teniendo en cuenta el factor de dilución aplicado, podemos calcular la cantidad de metal por kg de suelo aplicando la siguiente expresión:

$$\text{mg metal kg}^{-1} \text{ suelo} = \frac{M * fd * V}{P}$$

donde:

M = mg metal L⁻¹ (lectura del equipo)

fd = factor de dilución (volumen final/alícuota)

V = volumen final de la muestra (enrasada en matraz aforado) (100 mL)

P = peso de la muestra de suelo seco (g)

4.2.2.8. Extracción y determinación de los metales biodisponibles

En el suelo los metales se asocian con distintas fracciones: (1) en solución, como iones de metal libre y complejos metálicos solubles, (2) adsorbidos en los sitios de intercambio de los constituyentes orgánicos e inorgánicos del suelo, (3) ligados a la

materia orgánica, (4) precipitados como óxidos, hidróxidos y carbonatos, y (5) en las estructuras cristalinas de los minerales silicatados (Rieuwerts et al., 1998; Lassat, 2001; Reichman, 2002; Basta, 2004). Se entiende por biodisponibilidad la fracción de metales pesados que está disponible para la absorción por las plantas.

La biodisponibilidad depende de la solubilidad de los metales y de su capacidad de adsorción en la fracción coloidal del suelo (sólo los metales asociados con las fracciones 1 y 2 están realmente disponibles para que las plantas los extraigan). La interacción entre los distintos procesos como intercambio catiónico, adsorción/desorción, precipitación/disolución y formación de complejos, afectan la distribución de los metales entre la solución suelo y la fase sólida, siendo responsables de su movilidad y biodisponibilidad (Rieuwerts et al., 1998).

Los factores que afectan la concentración de los metales en la solución del suelo afectan la biodisponibilidad son: pH, potencial redox, textura, contenido y tipo de arcillas, materia orgánica, óxidos de Fe, Mn y Al, y la presencia de cationes y aniones en solución (Rieuwerts et al., 1998; Reichman, 2002; Silveira et al., 2003; Basta, 2004). La biodisponibilidad puede ser determinada utilizando agentes quelantes como el EDTA y el DTPA, que captan todo ión metálico que se encuentre en la solución del suelo (Kabata-Pendias, 2000; Reichman, 2002). Según diferentes autores (McBride, 1995; Greman et al., 2001), el EDTA es capaz de extraer los metales pesados solubles e intercambiables, unidos débilmente a la materia orgánica.

En función de la acidez/basicidad del suelo se seguirá un determinado procedimiento. En nuestro caso, el suelo que se investiga es de tipo básico ($\text{pH} > 6$) con lo que utilizaremos el procedimiento adaptado de Lindsay y Norvel (1978) y Crock y Severson (1980). Para ello utilizaremos DTPA 0,05 M ajustado a pH 7,30 como agente quelante. Con él se medirán los metales Cd, Cu, Pb, Zn, Mn, Ni, Cr y As.

En primer lugar pesamos 15 g de muestra de suelo tamizado en un tubo falcon, adicionamos DTPA en una relación 1:2 y agitamos durante 2 horas. Para conseguir una mejor separación de las fases sólida y líquida centrifugamos las muestras. Posteriormente las filtramos en viales más pequeños en los que podemos almacenar la muestra hasta que se mida por ICP-MS.

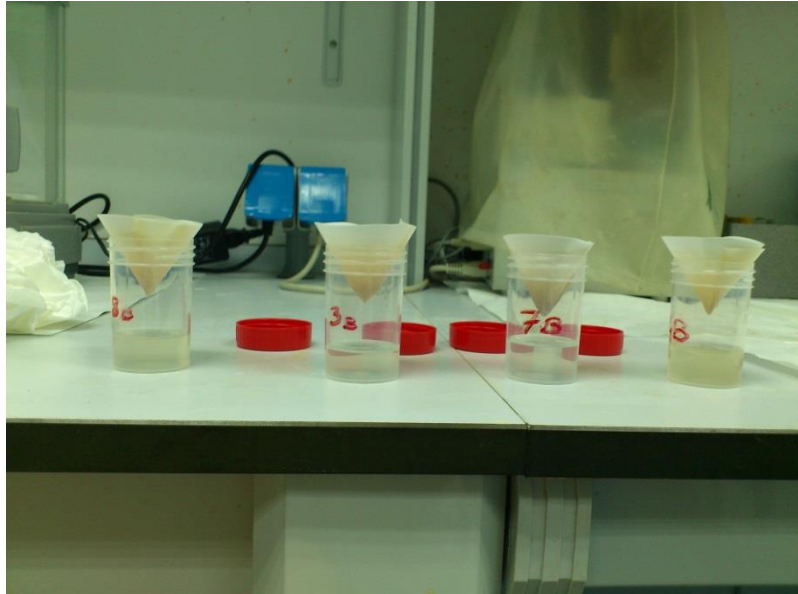


Imagen 25: extracción de metales bioasimilables

Una vez que tenemos los resultados de la espectrofotometría debemos aplicar la siguiente expresión para averiguar la concentración del metal en el suelo:

$$\text{mg metal kg}^{-1} = \frac{M * fd * V}{P}$$

donde:

M = mg metal L⁻¹.

fd = factor de dilución (volumen final/alícuota).

V = volumen añadido de EDTA o DTPA (mL).

P = peso de la muestra de suelo seco (g).

4.2.2.9. Extracción y determinación de los metales solubles

Los metales solubles son aquellos que se encuentran en la solución del suelo, como iones de metal libre y complejos metálicos disueltos. Esta fracción de los metales pesados es altamente móvil, ya que se desplazan con el agua de lluvia o de riego, por lo que pueden ser lixiviados hacia los acuíferos o ser transportados a otras zonas por escorrentía superficial.

El suelo es un sistema dinámico y complejo, de forma que cualquier cambio en sus propiedades físico-químicas puede cambiar la fracción o especiación de los metales pesados. Las propiedades que afectan la movilidad de los mismos con mayor

intensidad son el pH y el potencial redox, de modo que los medios ácidos y altamente oxidantes normalmente favorecen una alta movilidad. La determinación de los metales solubles es imprescindible en estudios de evaluación de riesgos ambientales o de salud pública en zonas contaminadas por estas sustancias.

El método empleado en este estudio se basa en la extracción de los metales del suelo con agua Milli-Q (tipo I) para determinar el contenido de la fracción soluble y fácilmente lixiviable. El procedimiento descrito está basado en la metodología propuesta por Buurman et al. (1996) y Frau (2000). Con él se medirán los metales Cd, Cu, Pb, Zn, Mn, Ni, Cr, Hg, As y Co.

El procedimiento consiste en pesar 8 g de suelo tamizado en tubo falcon y se adiciona el agua Mili-Q en una relación 1:5 y se somete a agitación. Después se centrifugan las muestras para conseguir una separación óptima de las fases sólida y líquida y se filtra en viales más pequeños, donde se podrá almacenar hasta su determinación mediante ICP-MS.

Una vez realizada la determinación, con los datos obtenidos aplicamos la siguiente expresión a fin de calcular el contenido de los metales en el suelo:

$$\text{mg metal kg}^{-1} \text{ suelo} = \frac{M * fd * V}{P}$$

donde:

M = mg metal L⁻¹ (lectura del equipo).

fd = factor de dilución (volumen final/alícuota).

V = volumen añadido de agua MilliQ-(tipo I) (40 mL).

P = peso de la muestra de suelo seco (g).

4.2.2.10. Determinación de nitrógeno, carbono y azufre totales en el residuo minero.

Los contenidos de carbono, nitrógeno y azufre totales fueron determinados mediante un analizador elemental LECO CHNS-932. El análisis elemental es una técnica instrumental que proporciona el contenido de carbono, nitrógeno y azufre presente en

una muestra. Esta técnica se basa en la oxidación completa de la muestra, que tiene lugar a 1000 °C en oxígeno puro. Los productos que resultan de la combustión son separados y analizados. El resultado final es la cantidad de C, N y S que contiene la muestra expresada en porcentaje respecto a su peso total.

4.3. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

Para evaluar la influencia de algunas propiedades del suelo sobre la resistividad debemos analizar estadísticamente su correlación. Para ello utilizaremos el software para análisis predictivos SPSS™ versión 19 y Excel™ 2010.

Previo a cualquier tratamiento estadístico, es necesario comprobar si los datos siguen o no una distribución normal, ya que según el resultado se aplicará un tratamiento u otro. Para ello se realiza el test de normalidad de “Kolmogorov-Smirnov”. En el caso de que alguno de los datos no siga una distribución normal deberá ser transformado usando logaritmos; de manera que ya podremos pasar a hacer el análisis de correlación entre variables. Entendemos como correlación el grado de variación conjunta existente entre dos o más variables. Para averiguar si las variables siguen o no una distribución lineal aplicamos el “coeficiente de correlación de Pearson”. Este coeficiente es válido para dos variables cuantitativas y se suele representar como r .

El coeficiente de correlación de Pearson puede tomar valores entre -1 y 1. El valor 1 indica una relación lineal perfecta positiva, el valor -1 indica una relación lineal perfecta negativa y un valor de 0 indica relación lineal nula. Generalmente estos valores suelen venir expresados en forma de matriz de correlación, en la que cada coeficiente r viene acompañado del nivel de significación (p-valor) que le corresponde, bajo la hipótesis nula de que no existe relación lineal.

En el caso de que las variables sean ordinales, se incumpla el supuesto de normalidad o simplemente se quiera comprobar si existe algún otro tipo de correlación más fuerte entre las variables, se puede aplicar el “coeficiente de correlación de Spearman” como alternativa al de Pearson. El coeficiente de Spearman también nos indica si hay o no linealidad. Se trata de una medida no paramétrica cuyo resultado también adopta valores entre -1 y 1 y que se interpreta igual que el de Pearson.

Una vez obtenidos los resultados de la correlación, y en caso de ser necesario, haremos una regresión para averiguar qué tipo de distribución se ajusta más a las variables y obtener la ecuación que la rige.

Calculadas las ecuaciones, sustituiremos la resistividad medida en las muestras tomadas bajo los electrodos control, lo que nos proporcionará un valor estimado de cada uno de los parámetros geoquímicos medidos. Por último, compararemos el valor estimado con el valor medido en los ensayos en laboratorio y calcularemos la desviación que ofrecen las ecuaciones.

5. RESULTADOS

En este apartado se detallarán los resultados obtenidos a partir de los análisis geofísicos y geoquímicos recogidos en el epígrafe 4.

5.1. CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA

Como se mencionó en el apartado 4.1.2 aplicación en campo, se han realizado tres series de medidas tomadas con el suelo seco y otras tres con el suelo húmedo, en cada uno de los tres perfiles de estudio.

Los resultados obtenidos de procesar los datos de resistividad eléctrica aparente tomados en campo se presentan en forma de pseudosecciones. En ellas, el eje y recoge la profundidad a la que se encuentra el punto de medida, mientras que en el eje x se representa la posición de los electrodos. Los números que aparecen en el eje x hacen referencia a la distancia de los electrodos respecto del electrodo 1 (0,0m). Los valores de resistividad vienen recogidos en una escala colorimétrica y representados mediante contornos.

Para representar los resultados se han elegido como secciones representativas las referidas a la segunda medida tanto en seco como en húmedo, debido a que las variaciones de resistividad entre medidas de un mismo perfil son pequeñas.

5.1.1. Perfiles de tomografía en seco

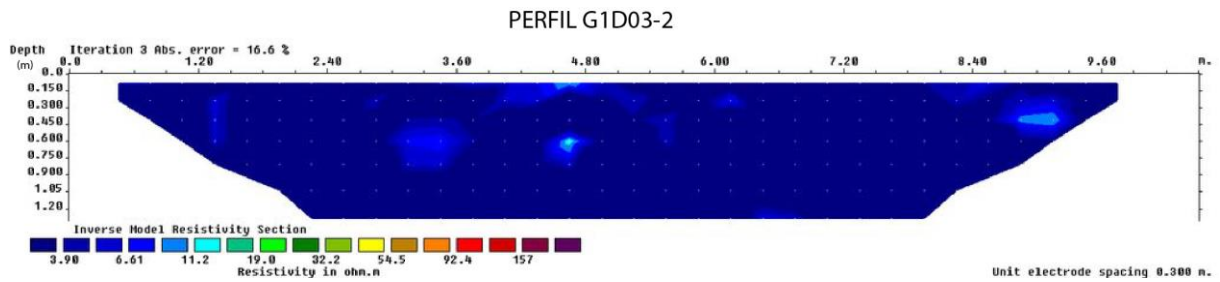


Imagen 26: perfil G1 Medida nº2 en seco

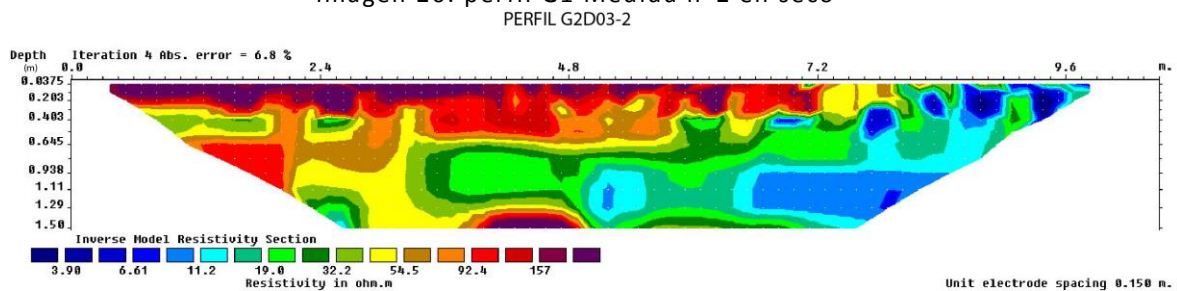


Imagen 27: perfil G2 Medida nº2 en seco

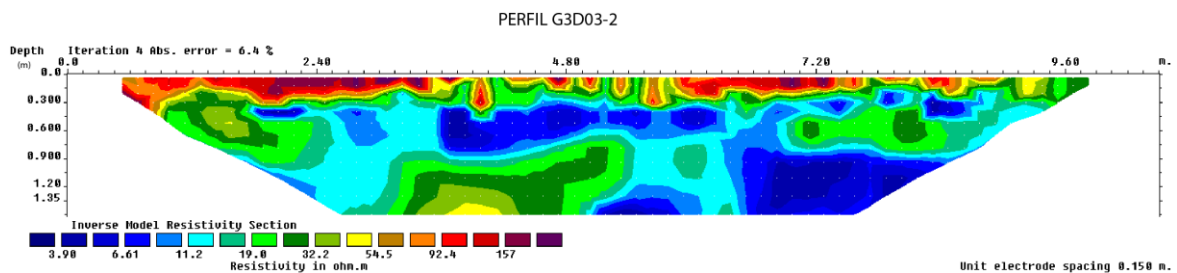
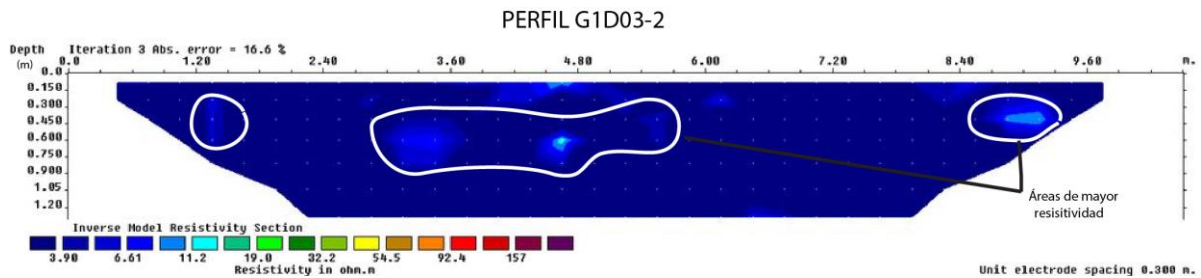


Imagen 28: perfil G3 Medida nº2 en seco

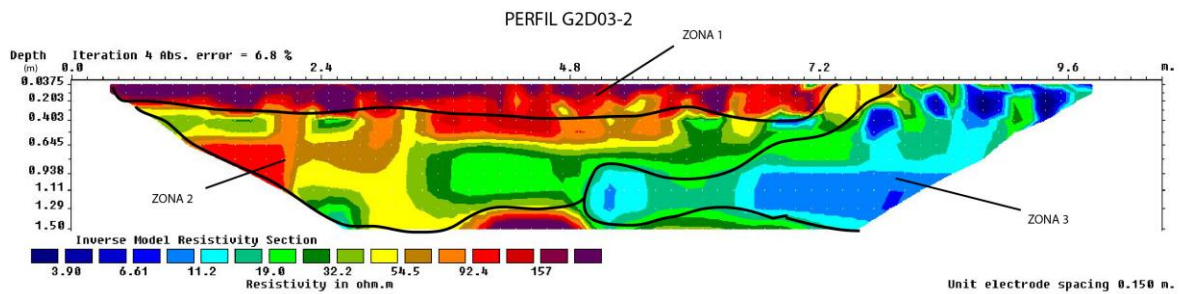
Al comparar los tres perfiles entre sí, podemos apreciar que existe una clara diferencia entre el perfil G1 y los perfiles G2 y G3. En el G1, prácticamente toda la sección presenta valores de resistividad muy bajos (3-4 Ω m), mientras que en los perfiles G2 y G3 la variación de la resistividad dentro de la sección es más heterogénea.

Por otro lado, los perfiles G2 y G3 son similares en cuanto a que en ellos se distinguen dos zonas con una diferencia de resistividades más acusada. La primera se encontraría situada entre la superficie y los primeros 30 cm de profundidad, recogiendo los valores de resistividad más altos. La segunda estaría asociada al resto del área del perfil y en ella se incluirían también variaciones de resistividad, aunque no tan acusada. No obstante, el perfil G3 es menos resistivo que el G2.

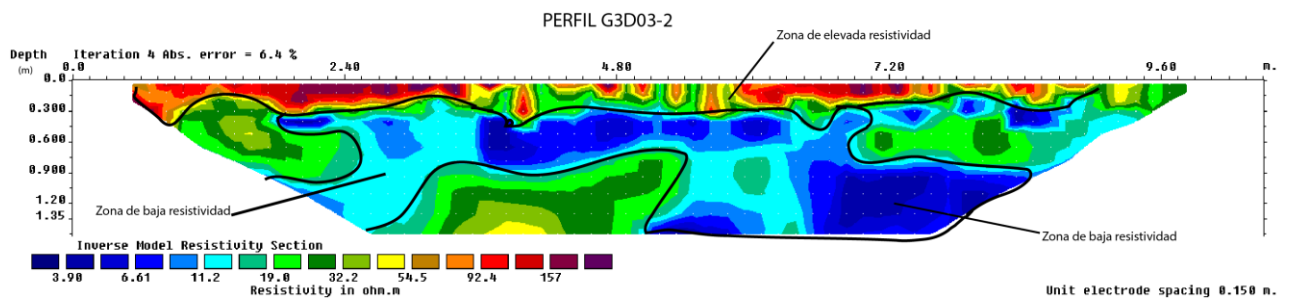
Si realizamos un análisis perfil a perfil, vemos que en el G1 también existe una pequeña franja situada entre los 30 y 60 cm de profundidad en la que la resistividad aumenta hasta valores de 12 Ωm .



En el perfil G2 se diferencian claramente tres regiones, una de baja resistividad a la derecha (zona 3) y otra en la que se registran los valores más altos, situada en los primeros 50 cm de profundidad (zona 1). La tercera ocupa el resto del perfil con valores de resistividad de 25 a 90 Ωm .



Para el perfil G3, el área de mayor resistividad se sitúa en los primeros 30 cm de profundidad, con valores superiores a los 90 Ωm . El resto del perfil presenta valores más bajos, siendo las 2 regiones menos resistivas las situadas a la derecha del perfil entre los 90 y 130 cm de profundidad, y en el centro a los 60 y 90 cm de profundidad.



Como diferencia con el perfil G2 cabe destacar que aunque en los primeros 30 cm la resistividad es alta, es un poco menor que en el G3..

5.1.2. Perfiles de tomografía en húmedo

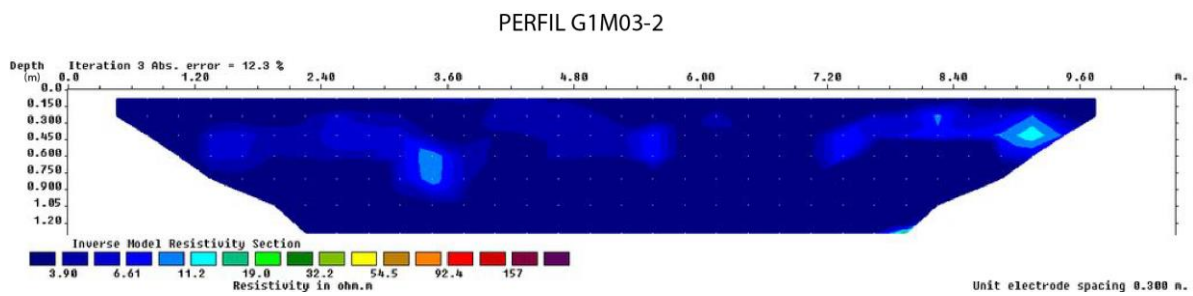


Imagen 29: perfil G1 Medida nº2 en húmedo

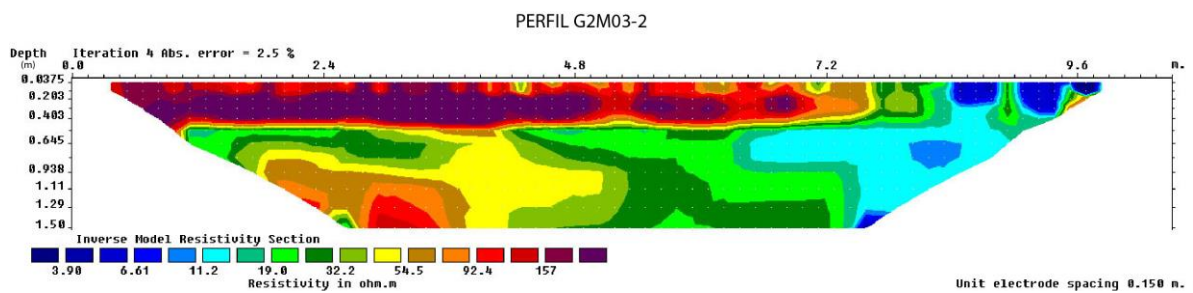


Imagen 30: perfil G2 Medida nº2 en húmedo

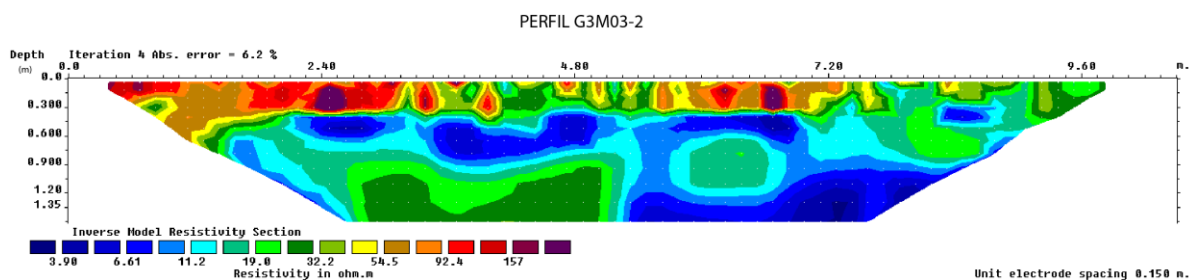


Imagen 31: perfil G3 Medida nº2 en húmedo

La distribución de los valores de resistividad medidos en húmedo nos permite apreciar en el perfil G1 la aparición de algunas zonas de mayor resistividad a los 60 cm de profundidad.

En cuanto al perfil G2 el cambio más representativo, respecto a la distribución obtenida con las medidas en seco, es el desplazamiento hacia abajo de la región de mayor resistividad. En los primeros 15 cm, aproximadamente, la resistividad disminuye hasta situarse cerca de los 90 Ω m, en lugar de los 157 Ω m de la medida en seco. Este descenso podría atribuirse al efecto de la humedad provocado por el agua vertida en el suelo antes de hacer estas mediciones. En cuanto al resto del perfil la zona 2 parece

desplazarse un poco a la derecha, aumentando de 11 a 20 Ωm y reduciendo por tanto la zona 3, de menor resistividad, donde también se incrementan ligeramente sus valores.

Sobre el perfil G3 cabe destacar la bajada de resistividad de los primeros 30 cm de espesor del suelo. En el resto del perfil los valores suben ligeramente, pero prácticamente se mantiene estable.

5.1.3. Porcentaje de cambio de resistividad

Con la finalidad de asegurar la repetibilidad del ensayo hemos comparado los perfiles entre sí, usando la opción “*Time-Lapse Monitoring*” del programa RES2DINV. De este modo hemos obtenido una serie de pseudosecciones en las que viene representado en tanto por ciento cuánto varía el valor de resistividad, entre las medidas a diferentes tiempos, para un mismo perfil.

Para cada uno de los perfiles se ha decido comparar la primera y tercera medida entre sí, tanto en condiciones en seco como en húmedo. De esta forma aseguramos la repetibilidad del experimento en cada una de las condiciones.

A continuación se exponen las pseudosecciones obtenidas del *Time-Lapse Monitoring*:

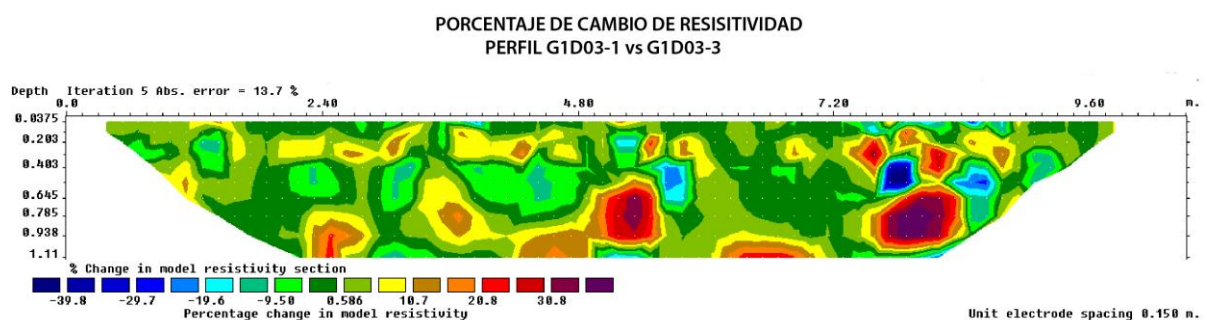


Imagen 32: porcentaje de cambio de resistividad para los datos recogidos en las medidas 1 y 3 del Perfil G1 en condiciones de seco

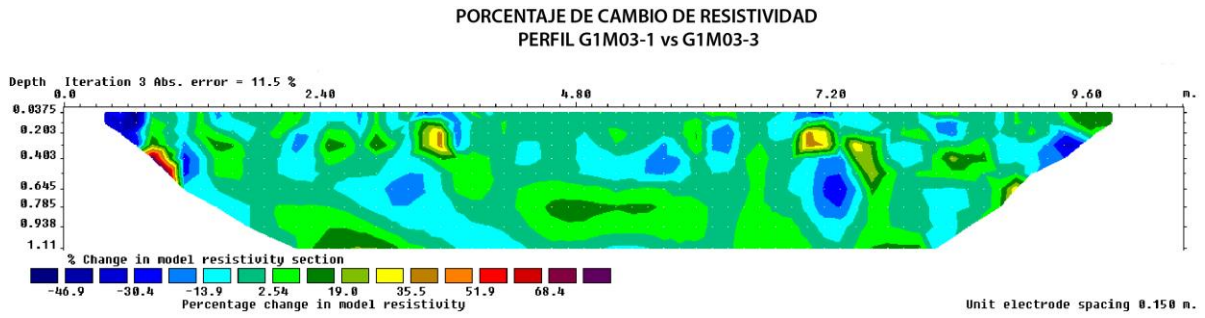


Imagen 33: porcentaje de cambio de resistividad para los datos recogidos en las medidas 1 y 3 del perfil G1 en condiciones húmedas.

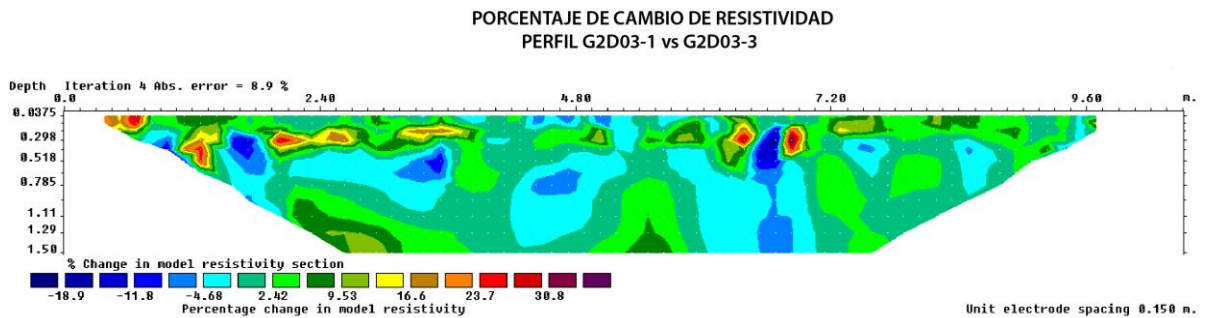


Imagen 34: porcentaje de cambio de resistividad para los datos recogidos en las medidas 1 y 3 del perfil G2 en condiciones de seco

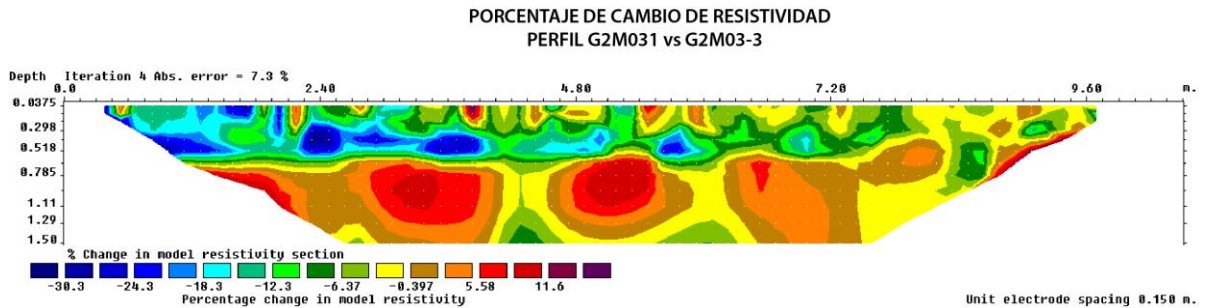


Imagen 35: porcentaje de cambio de resistividad para los datos recogidos en las medidas 1 y 3 del perfil G2 en condiciones húmedas.

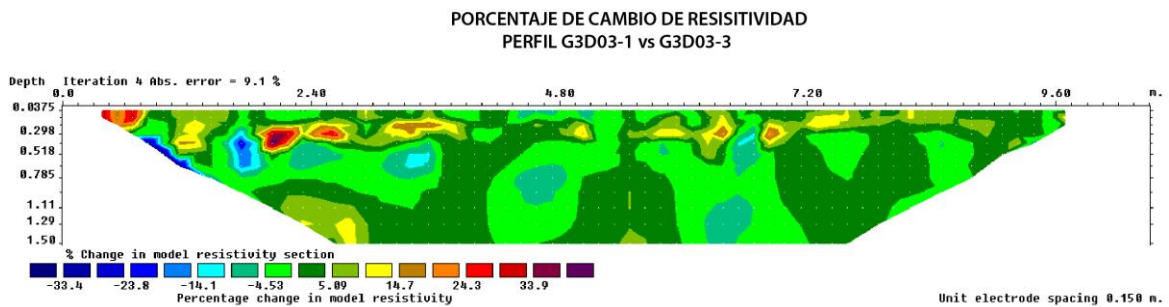


Imagen 36: porcentaje de cambio de resistividad para los datos recogidos en las medidas 1 y 3 del perfil G3 en condiciones de seco

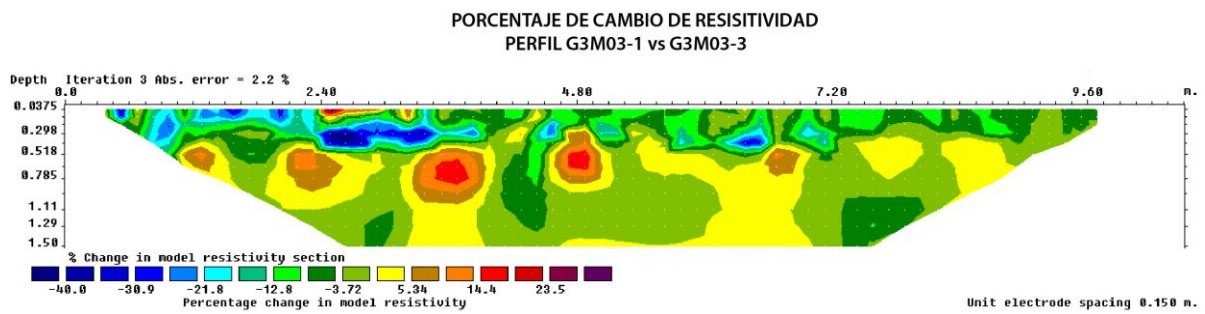


Imagen 37: porcentaje de cambio de resistividad para los datos recogidos en las medidas 1 y 3 del perfil G3 en condiciones húmedas

Para todos los perfiles se observa una variación entre el -10% y el 10% de porcentaje de cambio en la mayor parte de la sección eléctrica. Solamente en algunos puntos cercanos a los extremos y por encima de los 30 cm de profundidad se aprecia un incremento de los valores. Esto podría deberse al ruido que se genera en los bordes del perfil durante la medición de la resistividad. En cuanto a las medidas en seco y en húmedo no parece haber grandes diferencias. En ambos casos se producen pequeñas oscilaciones, aunque parece que para las medidas en húmedo el valor de los porcentajes de cambio es un poco menor.

5.2. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

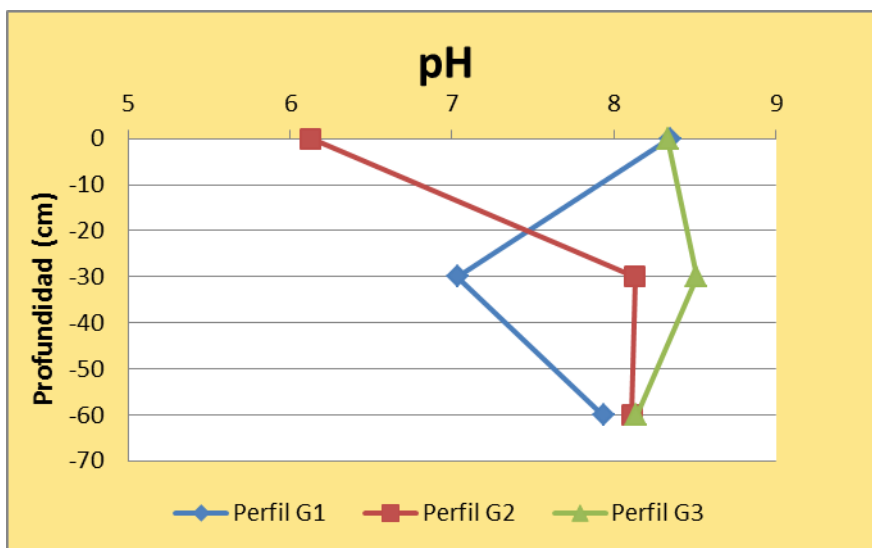
5.2.1. Caracterización y propiedades de los residuos

5.2.1.1. pH

Es uno de los parámetros más importantes en la determinación de la movilidad de los metales en el suelo. Los pH altos, debido generalmente a la presencia de carbonatos, favorecen la precipitación de metales pesados y la adsorción del Cd, Zn, Pb y otros metales.

Los suelos de la Región varían en general entre neutros a ligeramente alcalinos, sin embargo en zonas mineras encontramos suelos muy ácidos debido a la alteración supergénica de sulfuros (Martínez y Pérez, 2007).

A continuación se muestran los resultados obtenidos para los 3 perfiles muestreados:

Gráfica 1: valores de pH²

Para el perfil G1, tanto en los primeros 30 cm como a los 60-90 cm de profundidad, el pH toma valores ligeramente alcalinos siendo la parte central más próxima a la neutralidad.

En contraposición, el perfil G2 presenta una ligera acidez en superficie que va neutralizándose hasta alcanzar la alcalinidad a medida que se profundiza en el terreno.

El perfil G3 es más homogéneo, con poca variación en profundidad y con valores de nuevo ligeramente alcalinos.

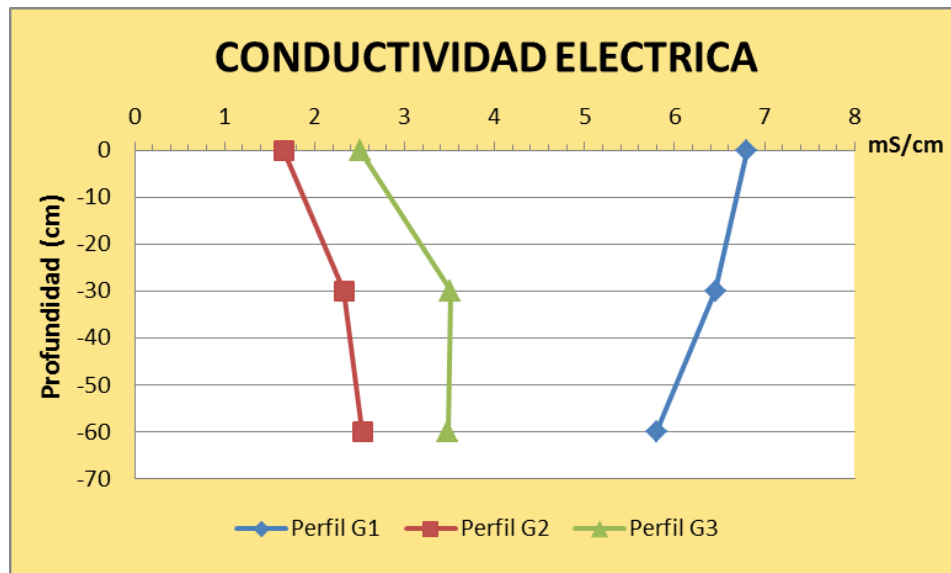
En principio, al tratarse de un suelo minero sería esperable encontrar valores de pH ácidos, pero en este caso el origen geológico de los materiales explotados en las minas próximas (calcáreo) y, que tras su procesado dieron lugar al depósito de lodos objeto de estudio, provocan que el pH de estos residuos sea alcalino.

5.2.1.2. Conductividad Eléctrica (CE)

Es la magnitud empleada para caracterizar la salinidad de un suelo y, por tanto, su capacidad para transmitir una corriente eléctrica a través de él.

² El eje vertical que indica la profundidad de muestreo se ha simplificado. El punto 0 corresponde a los resultados obtenidos del análisis de las muestras de suelo recogidas entre los 0 y 30 cm de profundidad; el punto -30 corresponde a las muestras tomadas entre los 30 y 60 cm y el punto -60 se corresponde a las muestras de entre 60 y 90 cm de profundidad.

Un incremento en la salinidad puede aumentar la movilización de metales pesados, bien porque los cationes asociados con las sales (sodio y potasio) reemplacen a los metales pesados en las posiciones de cambio, o bien porque los aniones cloruro formen complejos solubles estables con algunos metales pesados como Hg, Cd o Zn.



Gráfica 2: valores de Conductividad Eléctrica

Según Martínez y Pérez (2007) la conductividad media de esta zona se sitúa entre 3 y 4 mS/cm.

Los resultados obtenidos para el perfil G1 indican valores de CE más elevados que la media, siendo próxima a 7 en los primeros 30 cm de profundidad para ir decreciendo hasta cerca de los 6 mS/cm en la parte más profunda.

Los perfiles G2 y G3 presentan una distribución bastante similar con, aproximadamente, una unidad de diferencia.

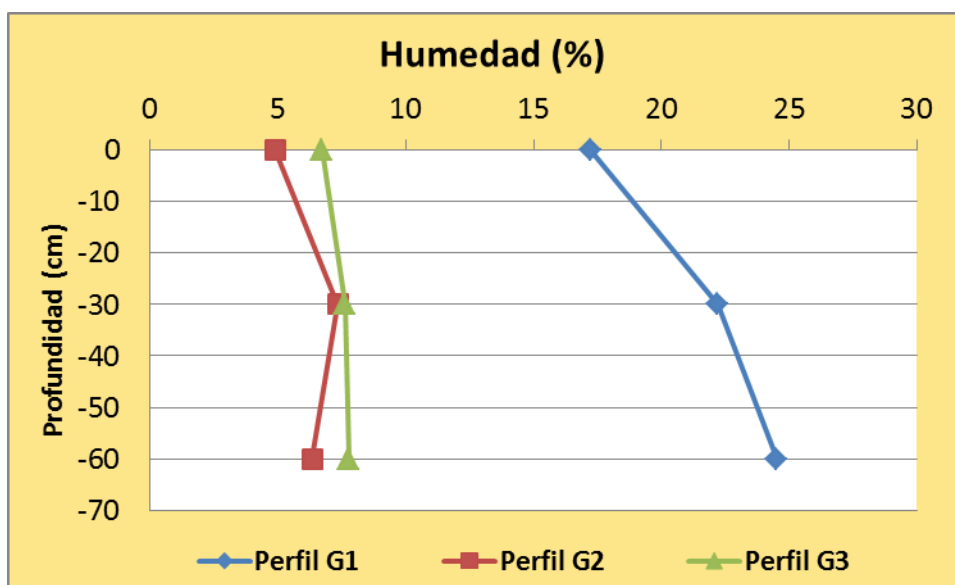
La diferencia observada entre los perfiles G2/G3 y el perfil G1 es debida al modo de formación del depósito, siendo la zona más deprimida y donde las aguas cargadas de sales y las partículas más finas de residuos se acumulan, coincidiendo con la localización del perfil G1.

5.2.1.3. Humedad

En el perfil G1 la humedad en los primeros centímetros de suelo se sitúa en torno al 17% para aumentar en profundidad hasta casi el 25%.

Para el perfil G2 encontramos el punto más húmedo a los 30-60 cm de profundidad, pero en general podemos decir que es bastante homogéneo, al igual que sucede con el perfil G3.

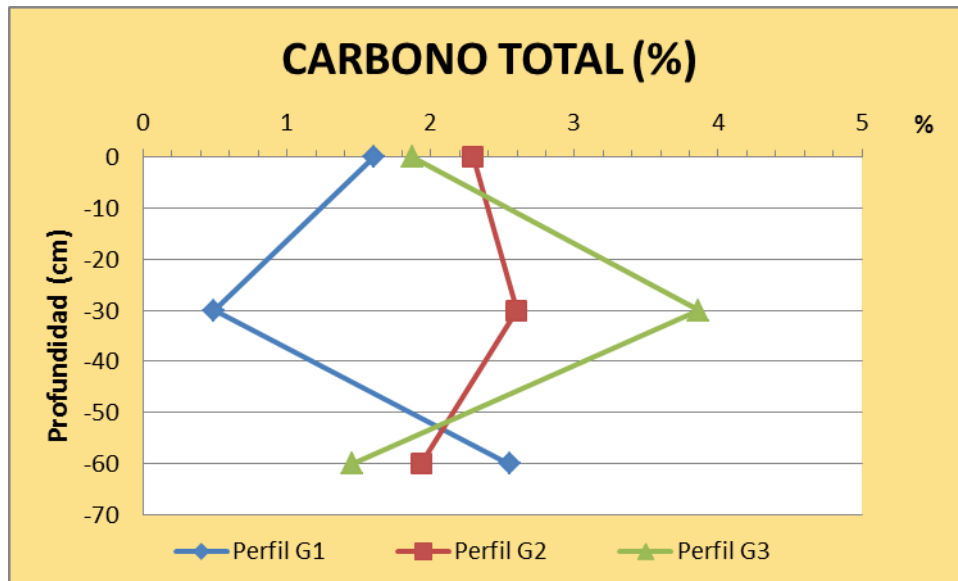
Sin embargo, cabe destacar la gran diferencia (entorno a un 10%) entre el perfil G1 y los perfiles G2 y G3. Esto se debe a que, como se ha comentado anteriormente, la zona donde se localiza el perfil G1 corresponde a la zona más deprimida del depósito; en la que se acumulan el agua de lluvia y de escorrentía, que junto con la presencia de partículas más finas favorece la retención de agua y, por lo tanto, el aumento de la humedad.



Gráfica 3: valores de humedad del suelo

5.2.1.4. Carbono Total

El carbono total hace referencia a la suma del carbono inorgánico y orgánico presente en el residuo, los cuales serán evaluados posteriormente para conocer su importancia en los procesos que suceden en estos residuos mineros.



Gráfica 4: valores de carbono total

En general, los valores son bajos en todos los perfiles, lo que indica que, aunque existen diferencias, los contenidos tanto de carbono orgánico como inorgánico deben de ser bajos.

En este trabajo se alcanzan los valores más bajos en el perfil G1 a los 30 cm de profundidad, alcanzando apenas un 0,5% de contenido en carbono total.

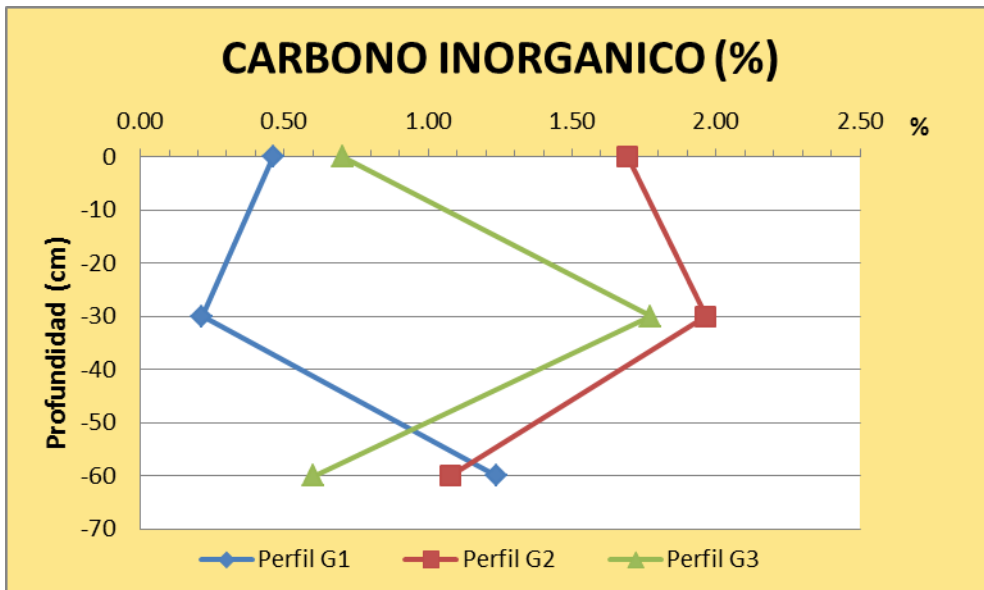
El perfil G2 presenta poca oscilación en sus valores, del 1,96 en los 60-90cm de profundidad hasta el 2,6 a los 30-60 cm.

El perfil G3 es el que presenta un porcentaje de carbonatos más elevado con casi un 4% para las muestras recogidas entre los 30 y los 60 cm de profundidad.

5.2.1.5. Carbono Inorgánico

Es el carbono ligado a la fracción inorgánica del suelo; es decir, el que no procede de los seres vivos. Son por tanto los carbonatos, bicarbonatos, CO_2 disuelto, etc.

La presencia de los carbonatos es de especial relevancia ya que afecta directamente con la posibilidad de inmovilización de metales pesados, así como en el poder de amortiguación ante los cambios de pH.



Gráfica 5: valores de carbono inorgánico

Los valores de carbono inorgánico más bajos se presentan en el perfil G1, siendo casi inexistente en las muestras tomadas entre los 30 y 60 cm de profundidad y un poco mayor que la unidad para las muestras a 60-90 cm.

El perfil G2 es el que, por el contrario, presenta valores de carbono inorgánico más altos, alcanzando casi el 2%.

En el perfil G3 los valores oscilan desde el 0,7% en superficie hasta el 1,77% en la mitad del perfil.

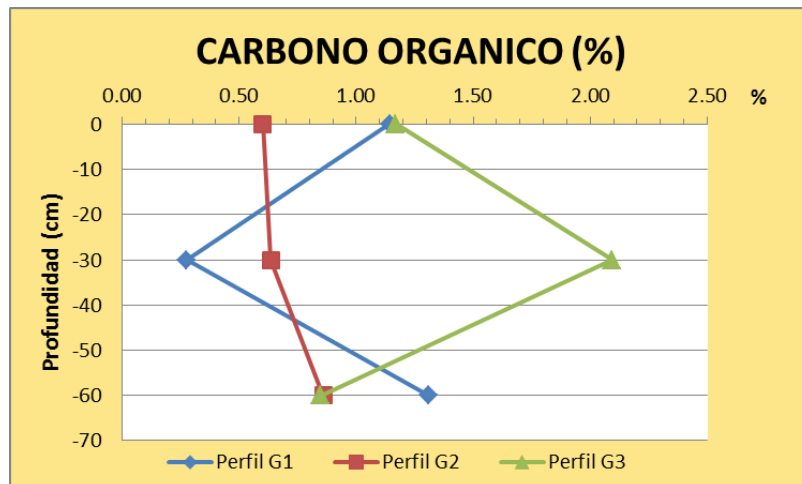
Si tomamos de referencia la clasificación realizada por Porta et al., (1986) podemos decir que nuestro suelo es poco calizo y, por lo tanto, la retención de metales en esta fracción no será muy destacable.

% en CaCO ₃	Clasificación
< 1%	No se considera calizo
1-5%	Poco calizo
5-80%	Calizo
>80%	Caliza excesiva

Tabla 3: clasificación del suelo en función de su contenido en carbonatos.

5.2.1.6. Carbono Orgánico

Entendemos como carbono orgánico aquel que proviene de la fracción viva del suelo; es decir, de la descomposición de los seres vivos y del metabolismo bacteriano entre otros.



Gráfica 6: valores de carbono orgánico

Los valores observados en el perfil G1 oscilan entre poco más del 1% detectado en superficie y a los 60-90 cm; y el 0,28% medido en las muestras tomadas a los 30-60 cm de profundidad.

El perfil G2 tiene una mayor homogeneidad en su contenido en carbono orgánico, siendo el perfil G3 el de mayor contenido de los tres, con poco más de un 2% a los 30-60 cm de profundidad.

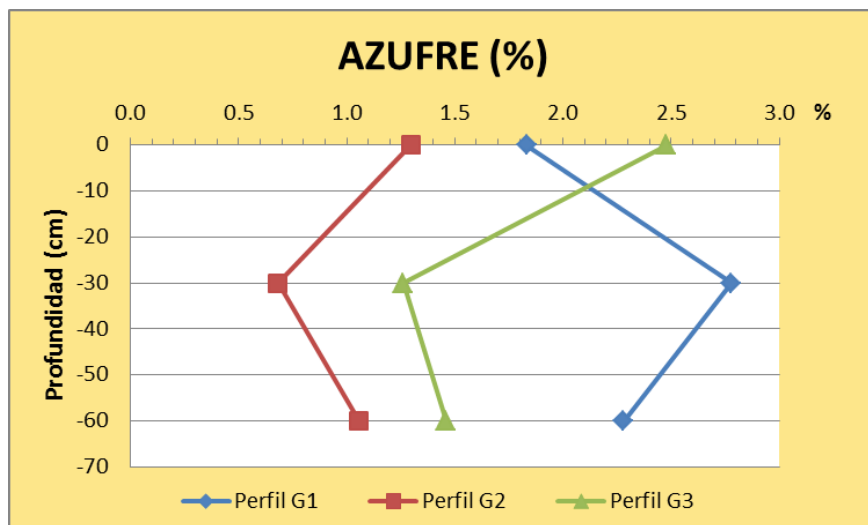
5.2.1.7. Contenido en Azufre

Este parámetro da una idea de la capacidad de acidificación que tiene este suelo tras la oxidación del azufre.

El perfil G1 es el que presenta un mayor contenido en azufre alcanzando valores que van desde el 1,8% en superficie al 2,8% en la mitad del perfil.

El perfil G2 es el que presenta los valores más bajos de los tres perfiles, con un 1,3% en superficie y cerca del 0,7% a los 30 cm.

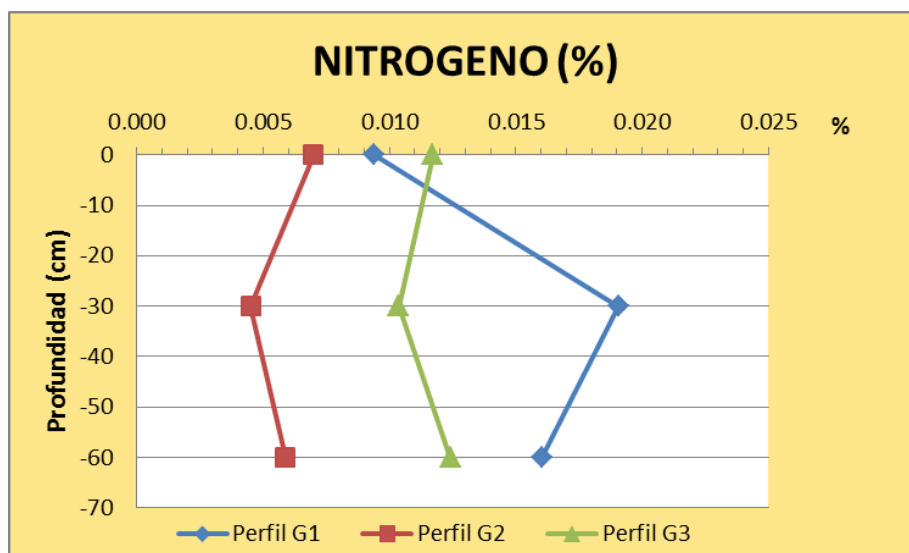
El perfil G3, al igual que el G2, presenta un mayor valor en superficie para después descender.



Gráfica 7: valores de contenido en azufre

5.2.1.8. Contenido en Nitrógeno

En general, se puede decir que los tres perfiles presentan un valor muy bajo de nitrógeno, lo que muestra la escasa fertilidad de estos residuos. De forma particular, el perfil G1 es el que presenta los valores más altos a 30 y 60 cm de profundidad, aunque éstos siguen siendo muy bajos ya que en ningún caso sobrepasan el 0,02%.

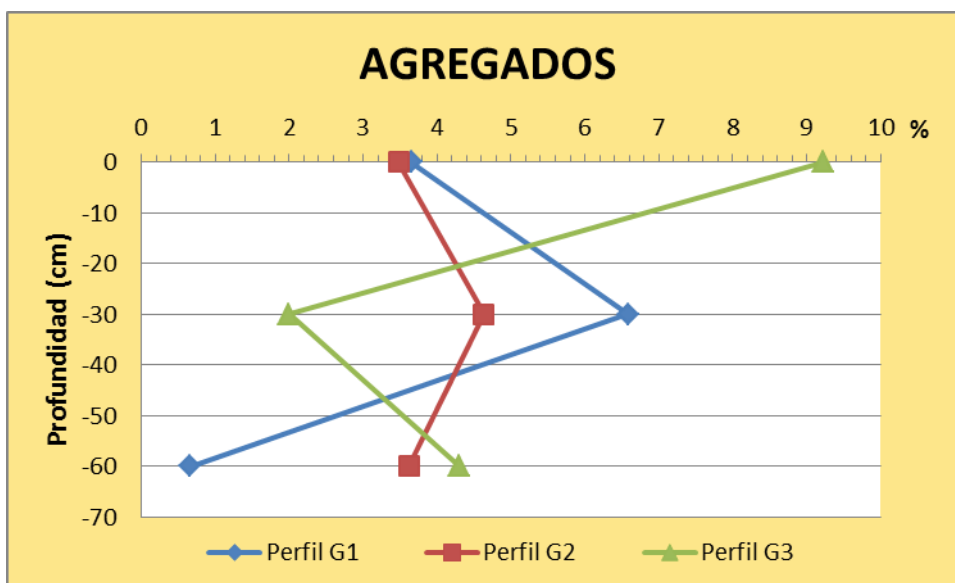


Gráfica 8: valores de contenido en Nitrógeno

En el caso de los perfiles G2 y G3 presentan una distribución muy similar, aunque las concentraciones son algo superiores en el perfil G3, quizás debido a la mayor presencia de vegetación en esta zona.

5.2.1.9. Agregados

En relación a los agregados estables en agua podemos ver que existe una cierta heterogeneidad en los resultados, tanto en cada perfil como entre ellos, a excepción del perfil G2 donde los valores son parcialmente constantes con la profundidad. Esta heterogeneidad es debida a que en la formación de estos agregados interviene tanto el contenido de materia orgánica como las arcillas (cantidad y tipo), constituyentes cuya presencia es escasa y muy heterogénea en los residuos mineros, lo que da como resultado de su interacción en la formación de agregados, valores muy dispares y generalmente bajos.



Gráfica 9: valores de agregados

El perfil G1 presenta una estructura de agregados heterogénea, ya que parte de un 3,5% en superficie para después casi duplicar su contenido en las muestras recogidas entre los 30 y 60 de profundidad. Finalmente, a los 60-90 cm desciende su contenido hasta aproximarse a cero.

En el perfil G2 la situación es un poco más homogénea, estabilizándose en valores próximos al 3-4 % en función de la profundidad.

Para el perfil G3 se observa una situación similar al G1, pero esta vez es a los 30-60 cm de profundidad donde se alcanzan los valores más bajos, siendo en superficie donde se hallan los valores más altos de agregados (por encima del 9%).

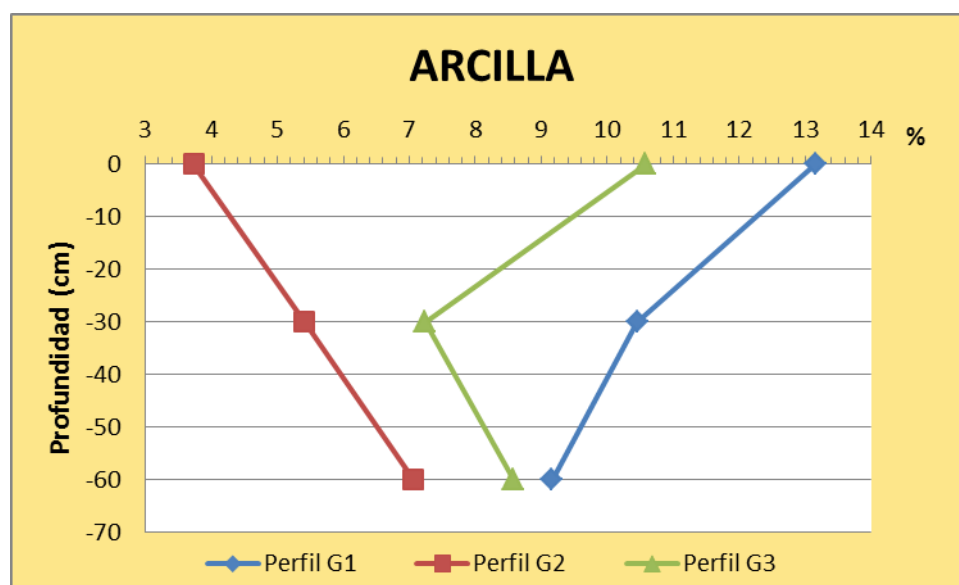
5.2.1.10. Contenido en arcilla

La textura en combinación con la estructura repercute en la movilidad y retención del agua en el suelo y en la aireación, siendo, por tanto, un factor determinante en los procesos de contaminación.

Los suelos de textura gruesa serán los más permeables, favoreciendo la oxidación, volatilización y movimiento de los agentes contaminantes, mientras que los suelos de textura fina (arcillosos) serán más asfixiantes e impermeables, reteniendo la contaminación e impidiendo el drenaje de la misma.

El porcentaje medio de arcilla en la zona de la Sierra de Cartagena es del 21,6% según los estudios de Martínez y Pérez (2007).

Los valores obtenidos del contenido de arcilla del depósito de residuos mineros estudiado en este trabajo se recogen en la siguiente gráfica:



Gráfica 10: valores de contenido en arcilla

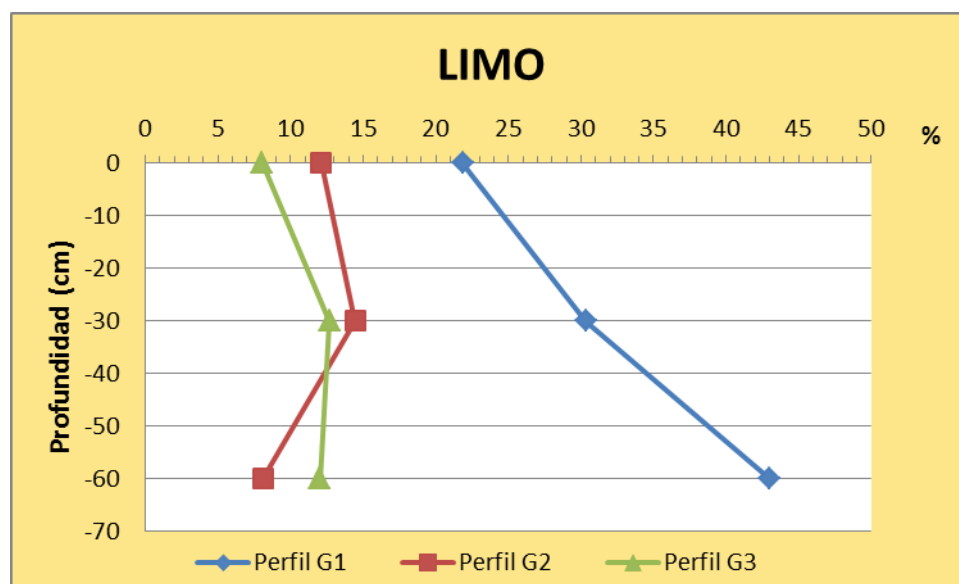
El perfil G1 es el que presenta un mayor contenido en arcilla de los tres perfiles. En superficie alcanza un valor ligeramente superior al 13%, para luego disminuir con la profundidad hasta el 9% obtenido de las muestras recogidas entre los 60 y 90 cm de profundidad.

El perfil G2, por el contrario, es el que presenta valores más bajos de contenido en arcilla y una distribución distinta a los otros tres perfiles, ya que en este caso el contenido en arcilla se incrementa con la profundidad. Parte de un 3,7% en superficie hasta el 7% en el último tramo.

En cuanto al perfil G3 sigue una distribución similar al G1. Comienza con el valor más alto en superficie 10,57% y alcanza su punto más bajo a los 30-60cm de profundidad (7,24%). Por lo que se puede decir que los contenidos de arcilla en estos residuos son bajos, siendo las fracciones predominantes las más gruesas.

5.2.1.11. Contenido en limo

En la siguiente figura se presenta en porcentaje de limo de los perfiles estudiados en este trabajo.



Gráfica 11: valores de contenido en limo

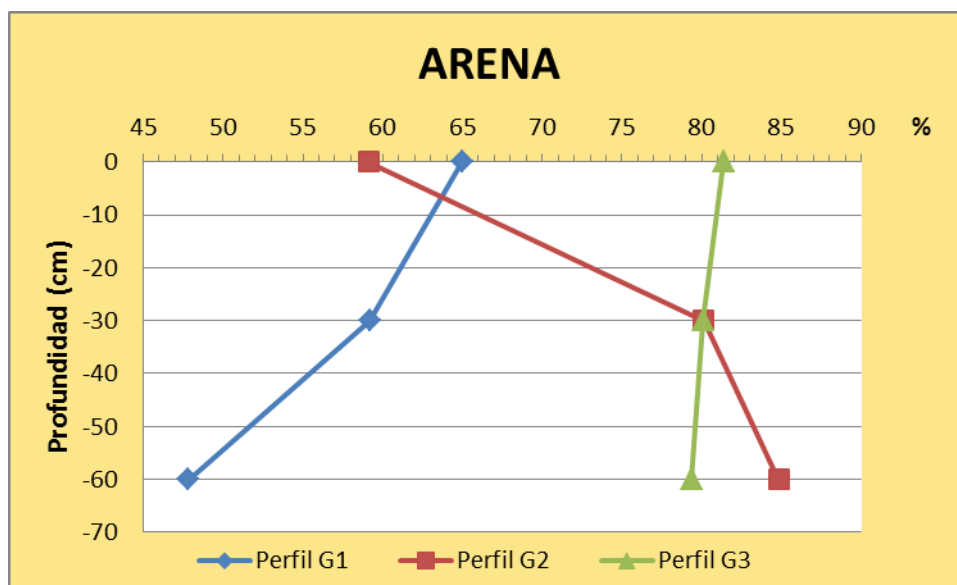
El perfil G1 es el que presenta un mayor contenido en limo partiendo de un 20% en superficie hasta alcanzar su máximo (43%) a los 60-90 cm de profundidad.

El perfil G2 baja mucho su contenido en limo en comparación con el G1 y mantiene una menor diferencia entre sus valores máximo (14% a los 30cm) y mínimo (8% a los 60cm).

El perfil G3 también adquiere su valor máximo a los 30 cm, pero, al contrario que el G2, su valor en superficie es menor que a los 60-90 cm.

5.2.1.12. Contenido en arena

En la siguiente figura se presenta en porcentaje de arena de los perfiles estudiados en este trabajo.



Gráfica 12: valores de contenido en arena

El contenido en arena sigue una distribución bastante heterogénea tanto dentro de los propios perfiles como entre ellos, siendo la fracción predominante con valores en la mayor parte de los casos superior al 50% del total.

El perfil G1 adquiere su valor máximo en superficie (65%) para ir descendiendo con la profundidad hasta valores cercanos al 45%.

Por el contrario el perfil G2 tiene su valor más bajo en superficie (cerca del 60%) y va aumentando hasta alcanzar casi el 85% a los 60 cm de profundidad.

El perfil G3 es el que presenta mayor uniformidad en su distribución con valores cercanos al 80% en cualquiera de sus puntos.

5.2.2. Concentración de metales pesados

5.2.2.1. Metales Totales

La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) estimó en 1999 entre 300.000 y 1.500.000 el número de zonas o áreas contaminadas en Europa occidental.

A pesar de la evidente vulnerabilidad ecológica de los suelos, la legislación europea y la española han carecido de instrumentos normativos para promover su protección, y hasta la promulgación de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, en España no se disponía de ninguna norma legal que permitiera proteger eficazmente los suelos contra la contaminación y, en el caso de los ya contaminados, identificarlos y caracterizarlos utilizando para ello una metodología normalizada y técnicamente rigurosa.

Con el Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados, se da cumplimiento a lo previsto en la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, una vez consultadas las comunidades autónomas. En el Real Decreto se precisa la definición de suelo contaminado del artículo 3.p de la citada Ley y se hace referencia a la presencia de sustancias químicas de carácter peligroso y de origen humano que pueden alterar las características tanto químicas como físicas o biológicas del suelo, lo que comportaría un riesgo que ha de ser cuantificado para estimar el posible daño que se puede derivar para la salud humana y el medio ambiente. El suelo se declarará contaminado, mediante resolución expresa, si conforme al baremo de este Real Decreto dicho riesgo se considera inaceptable para la salud humana y el medio ambiente.

En 2011, la Ley 10/1998 de residuos es derogada por la actual Ley 22/2011 de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. En ella se especifica en su artículo 2.d que *<<Esta Ley no será de aplicación a los residuos que se citan a continuación, en los aspectos ya regulados por otra norma comunitaria o nacional que incorpore a nuestro ordenamiento normas comunitarias [...] Los residuos resultantes de la prospección, de la extracción, del tratamiento o del almacenamiento de recursos minerales, así como de la explotación de canteras cubiertos por el Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras.>>*

Así mismo remite la condición de suelo contaminado al *Título V* de la ley 22/2011.

En resumen, la actual Ley de residuos y suelos contaminados y el RD 9/2005 excluyen a los suelos con residuos mineros de la lista de suelos contaminados. Sin embargo, la presencia de los mismos sí puede entrañar riesgo para la salud humana y para el medio ambiente. Por otra parte la Ley 22/2011 nos remite al RD 975/2009, sin embargo en él tampoco se da ningún criterio para poder declarar un suelo minero como contaminado, sino que directamente propone una serie de directrices para su recuperación y unas normas para la explotación de dichos suelos.

Por todo ello, la opción que se ha tomado en la Región de Murcia ha sido desarrollar una metodología que ha permitido establecer los niveles de fondo y de referencia para los metales pesados en suelos (Martínez y Pérez, 2007) tomando como base los criterios propuestos en el *Real Decreto 9/2005, Anexos III a VIII*, de los que destaca que *<<los niveles genéricos de referencia serán los resultantes de sumar a la concentración media el doble de la desviación estándar de las concentraciones existentes en suelos de zonas no contaminadas y con sustratos geológicos de similares características [...] a efectos de evaluación de la contaminación del suelo, los Niveles Genéricos de Referencia para metales serán únicos y por tanto, aplicables a cualquier uso del suelo y atendiendo tanto a la protección de la salud humana como a la protección de los ecosistemas>>* (Anexo VII, punto 3).

Los Niveles Genéricos Referencia obtenidos por el equipo de Martínez y Pérez (2007) aplicables a nuestra área de estudio se recogen en la siguiente tabla:

METALES PESADOS	mg/Kg
Antimonio	2
Arsénico	16
Cadmio	0.5
Cobalto	21
Cobre	30
Cromo	114
Mercurio	1.7
Níquel	57
Plomo	57
Selenio	1.5
Talio	0.4
Zinc	90

Tabla 4: niveles genéricos de referencia aplicables la zona 3a, grupo 4.

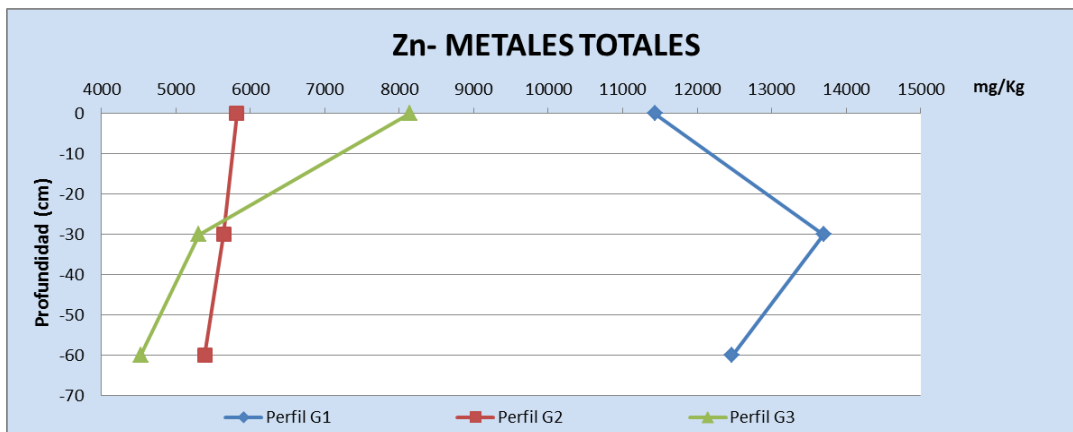
A continuación se detallan los resultados obtenidos sobre la concentración total de metales pesados en la zona de estudio. Destacar, que las elevadas variaciones existentes entre los puntos muestreados son propias de estos residuos mineros debido a los métodos de procesamiento de las menas extraídas.

5.2.2.1.1. Zinc

Para el perfil G1 el contenido en Zn varía desde los 11435 mg/kg hasta los 13700 mg/kg, siendo éste mucho mayor que en los perfiles G2 y G3.

En el perfil G2 el contenido en Zn se mantiene bastante homogéneo a medida que avanzamos en profundidad, rondando los 6000 mg/kg de suelo. Sin embargo, en el perfil G3 vemos que el valor en superficie es mucho más elevado en el G2 y que además disminuye hasta casi la mitad con la profundidad.

En cualquiera de los tres casos se supera ampliamente el nivel de referencia de 90 mg/kg.



Gráfica 13: valores de contenido en Zinc

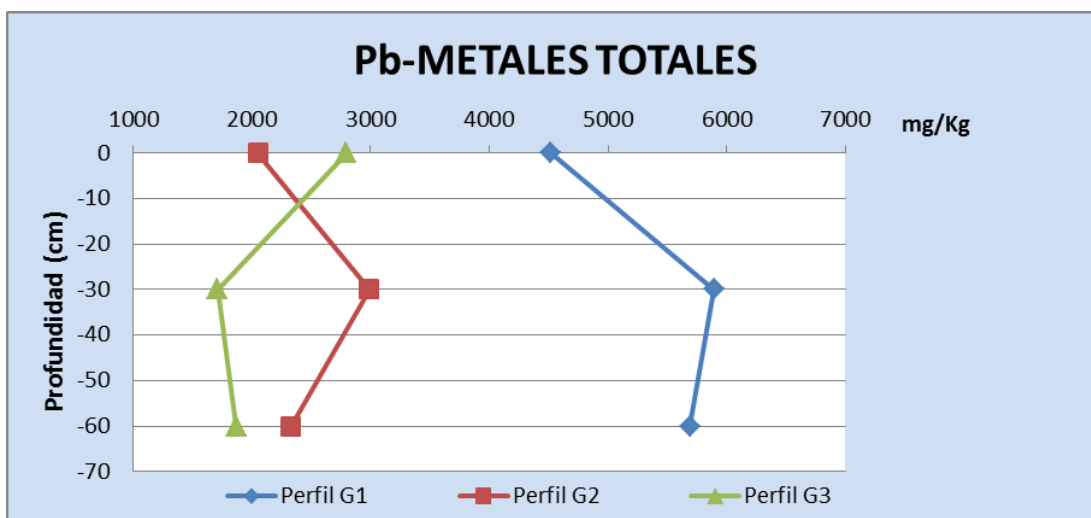
5.2.2.1.2. Plomo

Para el perfil G1 el contenido en Plomo oscila entre los 4500 y 5900 mg/kg de suelo, siendo de los tres perfiles estudiados el que recoge valores más elevados.

El perfil G2 presenta su valor más bajo en superficie (2000 mg/kg) y el más alto en las muestras tomadas a los 30-60 cm de profundidad donde alcanza casi los 3000 mg/kg.

En el perfil G3 se observa lo contrario, el valor más alto se haya en los primeros 30 cm de suelo, para luego descender a medida que aumenta la profundidad a valores por debajo de los 2000 mg/kg.

De nuevo, en cualquiera de los tres perfiles estudiados se recogen valores muy superiores a los de referencia, en este caso 57 mg/kg.



Gráfica 14: valores de contenido en Plomo

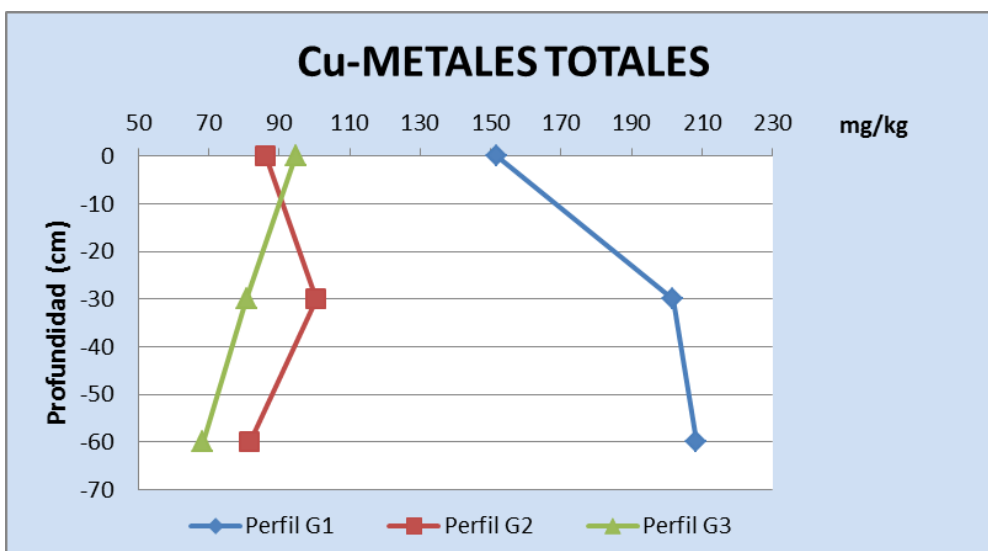
5.2.2.1.3. Cobre

En el perfil G1 obtenemos valores de 150 mg/kg de Cu en los primeros 30 cm de suelo, que aumentan con la profundidad hasta prácticamente estabilizarse a los 60 cm de profundidad con valores próximos a los 200 mg/kg de suelo.

Los perfiles G2 y G3 presentan valores más bajos. El G2 se aproxima a los 90 mg en superficie, aumenta hasta los 100 mg/kg y luego vuelve a disminuir.

En cambio el perfil G3 supera ligeramente los 90 mg/kg en superficie, pero después disminuye con la profundidad hasta los 68 mg/kg.

El nivel de referencia para el Cu es de 30 mg/kg. En este caso, dicho nivel, duplica su valor hasta en la situación más favorable.



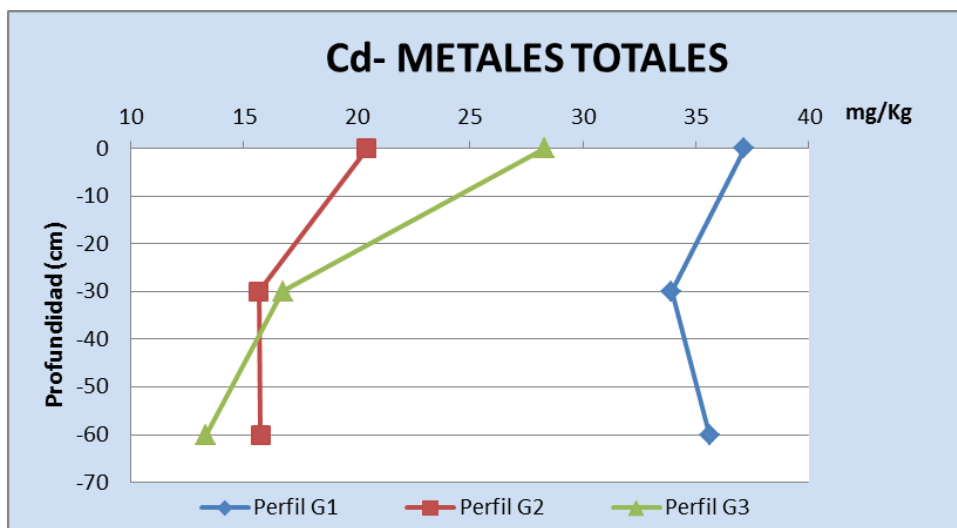
Gráfica 15: valores de contenido en Cobre

5.2.2.1.4. Cadmio

Los valores más altos se recogen para el perfil G1. En el caso de Cadmio los tres perfiles se asemejan en su distribución del metal con la profundidad, ya que en todos ellos el valor más elevado se haya en los primeros 30 cm y luego va disminuyendo en mayor o menor medida.

Los valores máximos para los perfiles G1, G2 y G3 son 37, 20 y 28 mg/kg respectivamente y los mínimos 34, 15 y 13 mg/kg.

De nuevo, en los tres casos se supera el nivel de referencia, establecido en 0,5 mg/kg.



Gráfica 16: valores de contenido en Cadmio

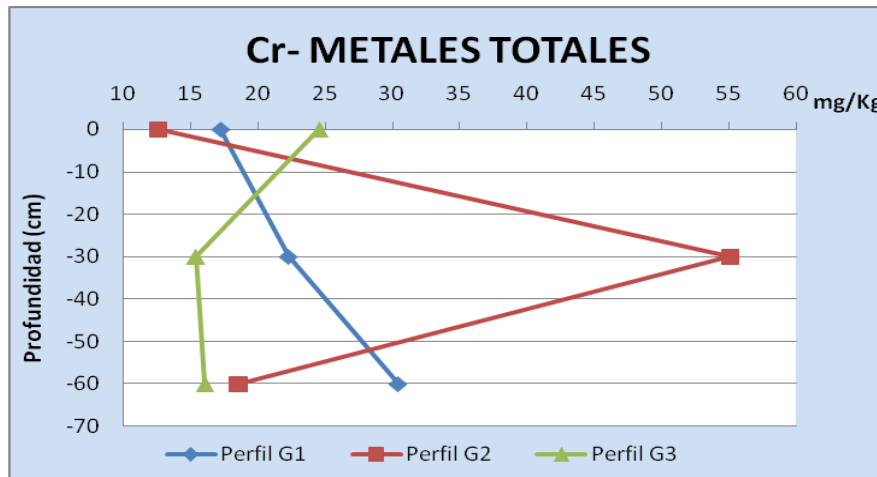
5.2.2.1.5. Cromo

El valor más bajo (17,2 mg/kg) del perfil G1 se halla en los primeros 30 cm de suelo, incrementándose paulatinamente con la profundidad hasta alcanzar los 30,44 mg/kg a la máxima profundidad muestreada.

El perfil G2 presenta un pico muy elevado entre los 30 y los 60 cm de profundidad, en comparación con los niveles en la superficie y en el fondo.

Para el perfil G3 se ha observado su valor más elevado en la superficie, el cual va aumentando hasta los 21 mg/kg a los 30-60 cm de profundidad, a partir de los cuales apenas hay variación. En este caso este perfil es el que recoge menor contenido en Cromo.

A diferencia que el resto de metales evaluados hasta ahora, para el caso del Cromo el nivel de referencia se establece en 114 mg/kg, con lo que en ninguno de los perfiles se supera dicho umbral.



Gráfica 17: valores de contenido en Cromo

5.2.2.1.6. Níquel

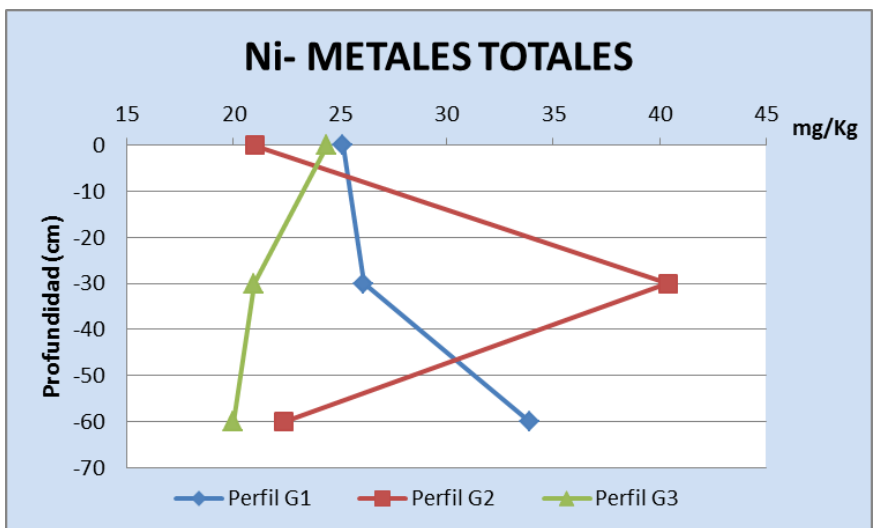
La distribución del Níquel sigue una distribución similar a la del Cromo, con ciertas diferencias en sus concentraciones.

Así, para el perfil G1 los valores registrados son de 34 mg/kg en la parte más profunda y de 25 mg/kg en superficie.

El perfil G2 presenta un valor de 40 mg/kg entre los 30 y los 60 cm de profundidad, mientras que los valores en los primeros 30 cm y a los 90 cm de profundidad son muy similares.

El perfil G3 tiene de nuevo su valor máximo en superficie y el mínimo en la profundidad máxima.

El valor de referencia para el Níquel es de 57 mg/kg de suelo, valor que no se supera en ninguno de los casos.



Gráfica 18: valores de contenido en Níquel

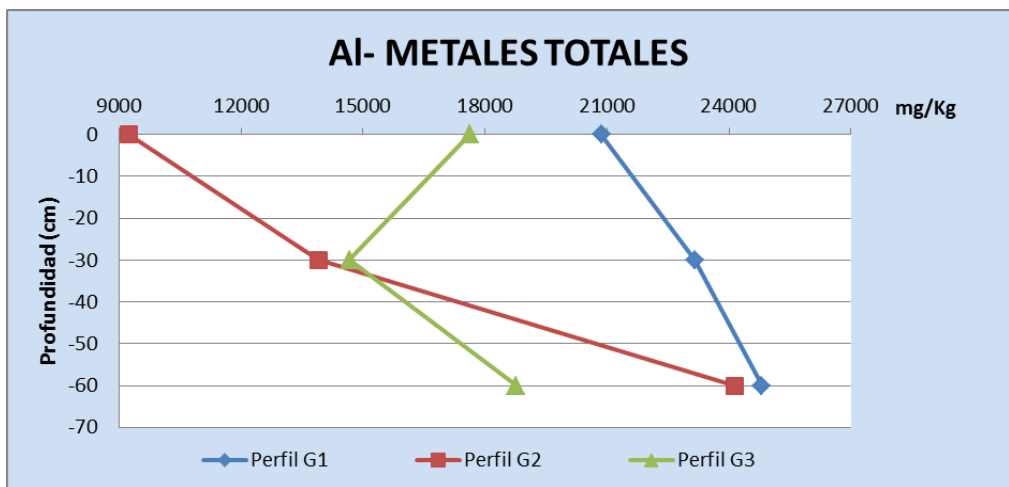
5.2.2.1.7. Aluminio

En el perfil G1 se registran los valores de aluminio más altos, oscilando entre los 21000 mg/kg en los primeros 30 cm hasta los 24800 mg/kg en la parte más profunda.

Para el perfil G2 se observa una gran variación en el contenido en este metal a las diferentes profundidades, obteniendo como valor mínimo 9200 mg/kg en superficie hasta los casi 24000 mg/kg a la mayor profundidad muestreada.

En cuanto al perfil G3, tanto el valor en los primeros 30 cm como en los últimos está próximo a los 18000 mg/kg, mientras que a los 30-60 cm de profundidad desciende por debajo de los 15000 mg/kg.

Para el caso del Aluminio no se han establecido niveles de referencia ya que no se considera un elemento tóxico en sí mismo.



Gráfica 19: valores de contenido en Aluminio

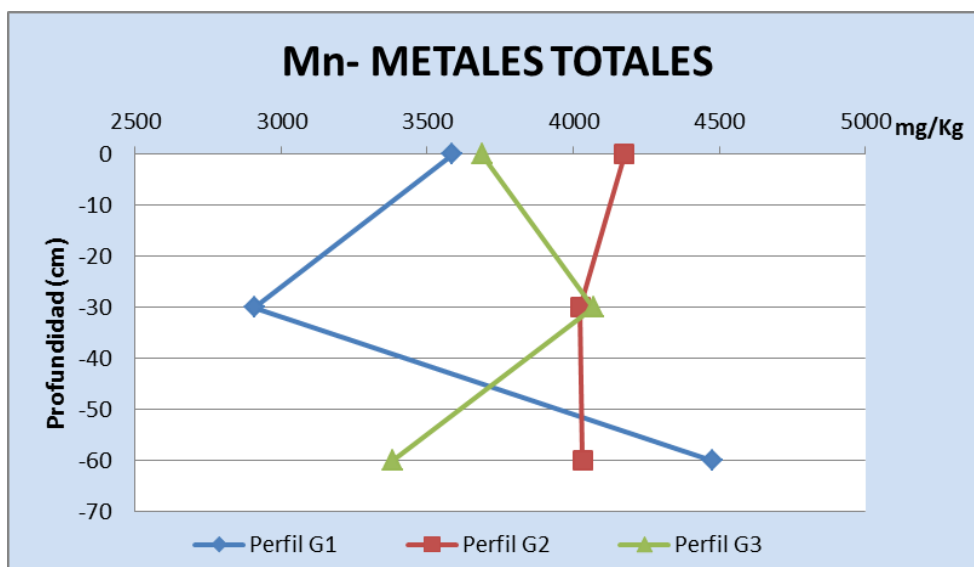
5.2.2.1.8. Manganeso

En el perfil G1 se observa una gran variación de los valores respecto de la profundidad, de forma que en superficie se superan ligeramente los 3500 mg/kg para luego descender un poco por debajo de 3000 mg/kg y volver a aumentar en la parte más profunda hasta casi los 4500 mg/kg.

Los perfiles G2 y G3 también presentan estas variaciones, pero en menor medida. Así, en G2 su valor máximo se halla en superficie, mientras que desde los 30 a los 90 cm de profundidad apenas hay variación.

En el G3 el valor máximo se da a una profundidad media, mientras que los valores en superficie y a la máxima profundidad del muestreo son similares.

Para el Manganeso tampoco existe nivel de referencia en los suelos de nuestra Región.



Gráfica 20: valores de contenido en Manganeso

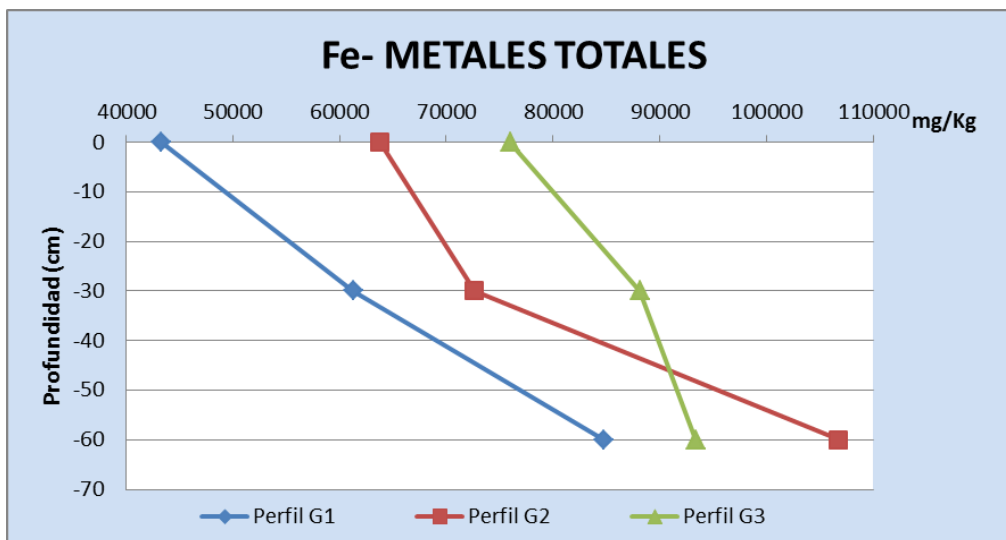
5.2.2.1.9. Hierro

El perfil G1 es el que presenta los valores más bajos de contenido en hierro, aunque con una gran variación del contenido con la profundidad. Se observa su valor mínimo (43000 mg/kg) en superficie y el máximo en la parte más profunda del muestreo, casi duplicando el contenido en hierro.

El perfil G2 sigue prácticamente la misma distribución que el G1, pero con valores más elevados, alcanzando los 106000 mg/kg en la zona más profunda.

El perfil G3 es el que presenta un valor más alto en superficie, pero por otro lado, es el que menos ve incrementado el contenido en este metal con la profundidad.

Para el hierro tampoco se ha establecido un nivel de referencia en la Región de Murcia.



Gráfica 21: valores de contenido en Hierro

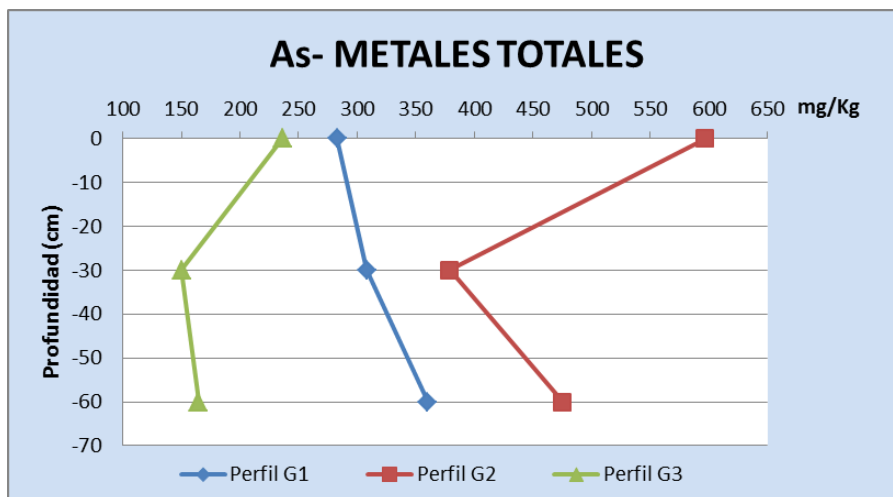
5.2.2.1.10. Arsénico

El perfil G1 presenta valores que oscilan entre los 280 mg/kg y los 360 mg/kg en los primeros y últimos 30 cm de profundidad, respectivamente.

El perfil G2 tiene el contenido más alto en arsénico de los tres perfiles, con 600 mg/kg en superficie, 380 mg/kg en el punto medio y 475 mg/kg en el más profundo.

El perfil G3 es el de valores más bajos con casi 250 mg/kg en superficie y valores próximos a 150 mg/kg en el resto.

El nivel de referencia dado para el arsénico es de 16 mg/kg, con lo que en todos los perfiles se supera ampliamente dicho valor.



Gráfica 22: valores de contenido en Arsénico

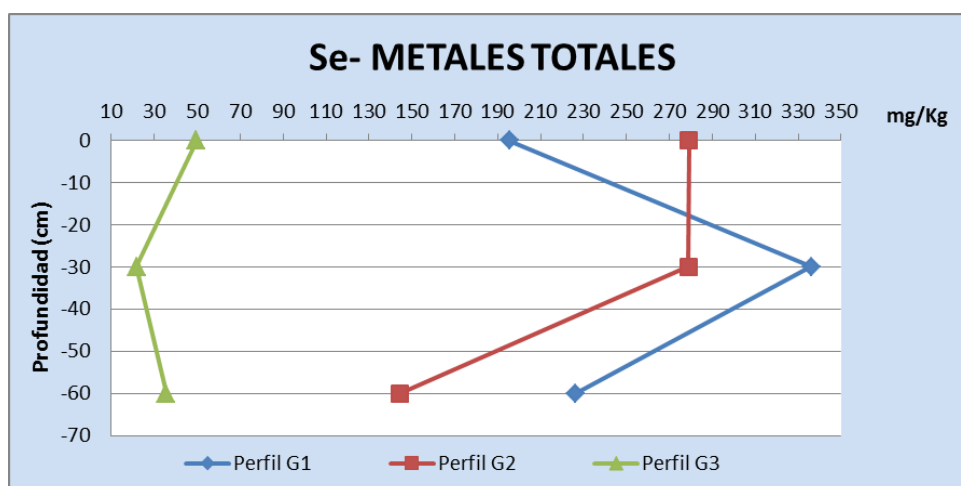
5.2.2.1.11. Selenio

En el perfil G1 se observa un importante incremento en el contenido en selenio para las muestras recogida entre los 30 y los 60 cm de profundidad en comparación con los datos recogido a las demás profundidades pasando, por ejemplo, de los 195 mg/kg en los primeros 30 cm a los 335 mg/kg en el punto medio.

El perfil G2 presenta valores muy similares desde la superficie hasta los 60 cm de profundidad para luego descender bruscamente entre los 60 y 90 cm.

El G3 es el que presenta los valores más bajos, con 50 mg/kg en superficie y casi 22 mg/kg a profundidad media.

El nivel de referencia establecido es de 1,5 mg/Kg, con lo que de nuevo en todos los perfiles muestreados se supera dicho nivel.



Gráfica 23: valores de contenido en Selenio

5.2.2.2. Metales bioasimilables

Es la fracción de los metales que por su estado químico puede ser asimilada por los seres vivos, en especial para las plantas, ocasionando bioacumulación y toxicidad.

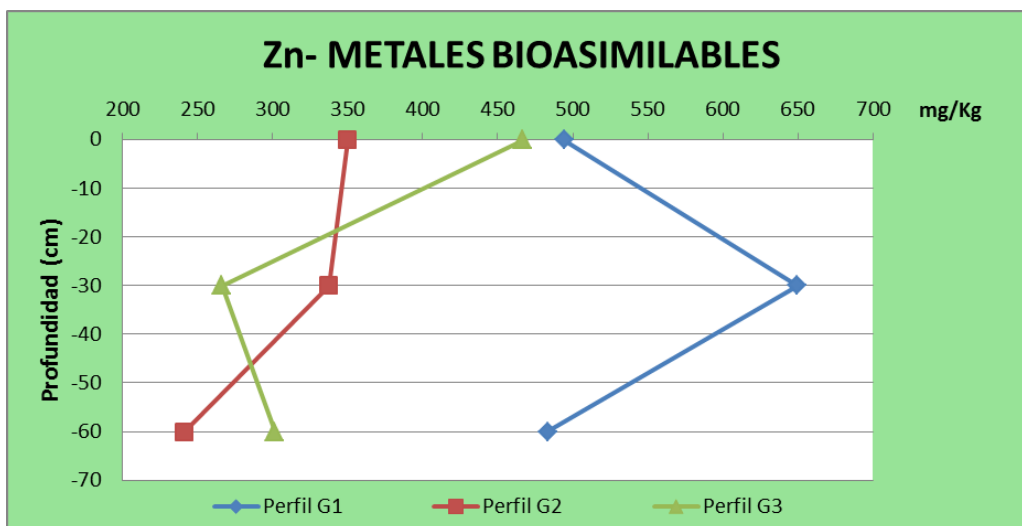
A continuación se describen los resultados obtenidos de los análisis de esta fracción.

5.2.2.2.1. Zinc

El perfil G1 es el que recoge mayores valores de Zn bioasimilable. Su máximo (650 mg/kg) se observa en las muestras recogidas entre los 30 y 60 cm de profundidad, mientras que en superficie y a los 90 cm los valores recogidos son menores y muy similares.

El perfil G2 presenta los valores más altos en los primeros 60 cm de profundidad, para luego descender entre los 60 y 90 cm ligeramente por debajo de los 250 mg/kg.

En el perfil G3 se observa una gran variación entre los valores recogidos en los primeros 30cm de suelo (466 mg/kg) y los obtenidos para los 60 cm restantes (entre 260 y 300 mg/kg).



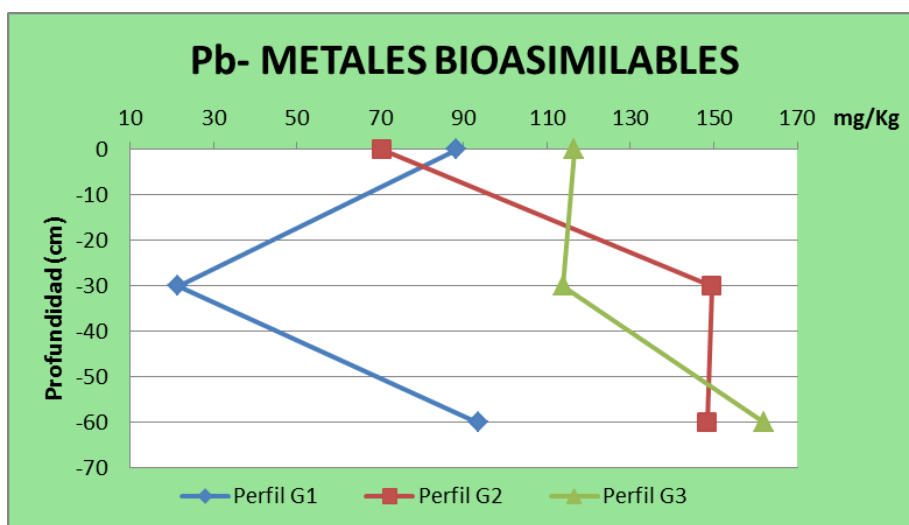
Gráfica 24: valores de Zinc bioasimilable

5.2.2.2.2. Plomo

El perfil G1 es el que presenta valores más bajos de Plomo, con 90 mg/kg en superficie y en los últimos 30 cm de profundidad; y 21,5 mg/kg entre los 30 y 60 cm de profundidad.

En el perfil G2 se aprecia una gran variabilidad en el contenido del metal entre la parte más superficial (70 mg/kg) y los 30 a 90 cm de profundidad en los que el valor asciende hasta los 150 mg/kg de Pb.

Para el perfil G3 la situación es inversa, presentando uniformidad de valores en los primeros 60 cm de profundidad (ligeramente por encima de los 110 mg/kg) para luego aumentar hasta los 162 mg/kg entre los 60 y 90 cm.



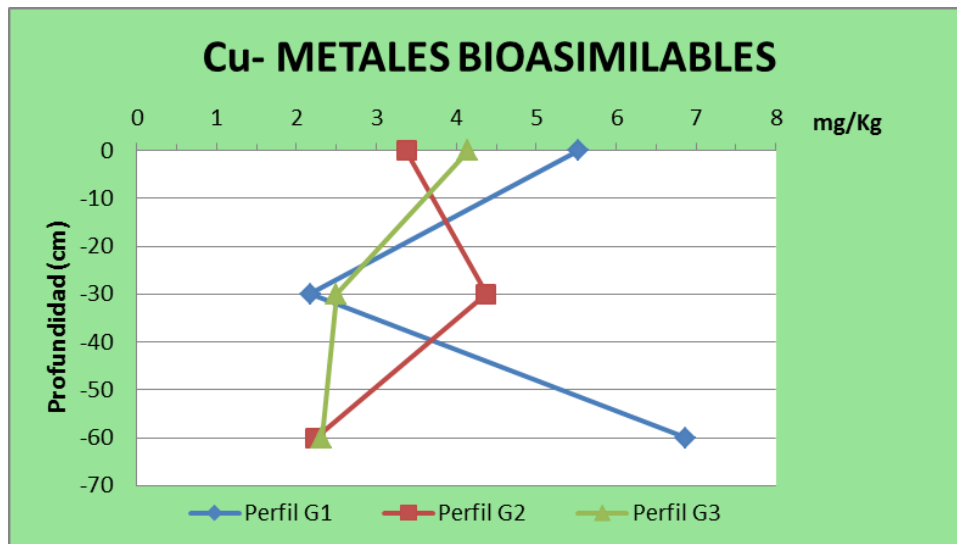
Gráfica 25: valores de Plomo bioasimilable

5.2.2.2.3. Cobre

En el caso del cobre no se aprecia una gran diferencia entre los tres perfiles, como ha ocurrido con los metales anteriores.

Sin embargo, para el perfil G1 se observa una mayor variación de los valores con la profundidad que no es tan acusada en los otros dos perfiles. Así, se han obtenido valores de 5,5 mg/kg de Cu en superficie, que disminuyen hasta los 2 mg/kg entre los 30 y 60 cm de profundidad, para volver a incrementarse de nuevo en la parte más profunda aproximándose a los 7 mg de Cu por kg de suelo.

El perfil G2 recoge su valor máximo (4,3 mg/kg) entre los 30 y 60 cm de profundidad y el mínimo en la parte más profunda del muestreo, que a su vez es coincidente con el valor mínimo del perfil G3.



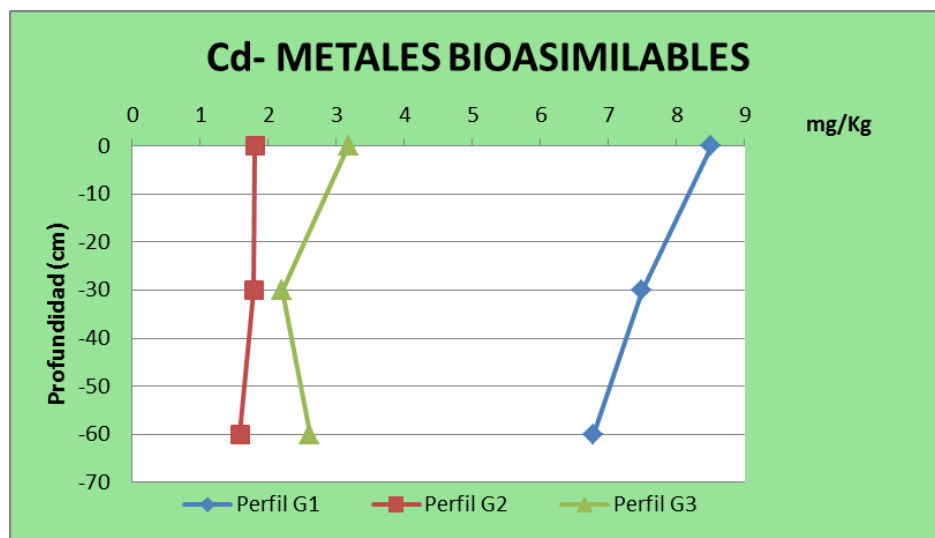
Gráfica 26: valores de Cobre bioasimilable

5.2.2.2.4. Cadmio

En la gráfica se observa que los valores obtenidos para el perfil G1 prácticamente triplican a los obtenidos para los otros dos perfiles. El valor máximo hallado para el perfil G1 es de 8,5 mg/kg y el mínimo de 6,8 mg/kg de suelo.

El perfil G2 presenta una distribución del metal en profundidad bastante homogénea, con valores próximos a 2 mg/kg en todos los puntos.

El perfil G3 tiene una distribución similar al G2, pero sus valores oscilan entre los 2 y 3 mg/kg.

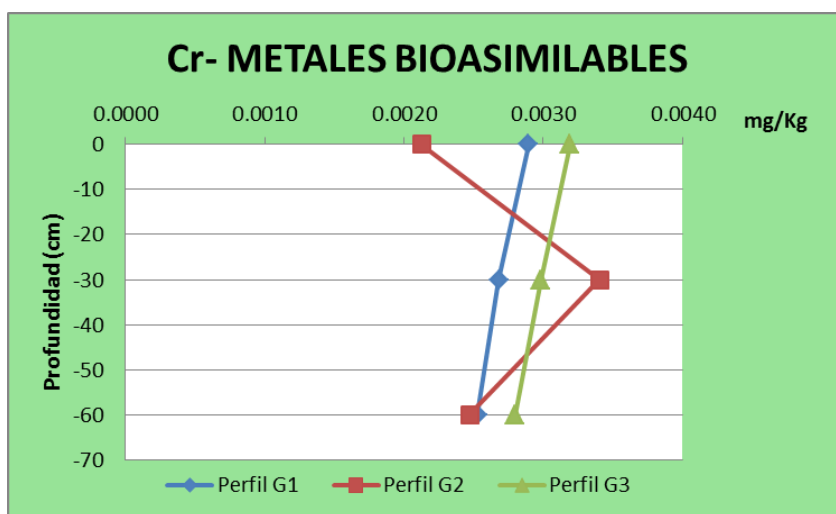


Gráfica 27: valores de Cadmio bioasimilable

5.2.2.2.5. Cromo

En este caso los valores son muy bajos. Concretamente para los perfiles G1 y G3 son muy similares, diferenciándose en $3 \cdot 10^{-4}$ mg/kg. Además, ambos perfiles tienen similar distribución en profundidad, con valores ligeramente mayores en superficie.

El perfil G2 presenta una mayor variación en su distribución vertical, con valores en superficie de 0,002 mg/kg y de 0,0034 mg/kg como valor máximo.

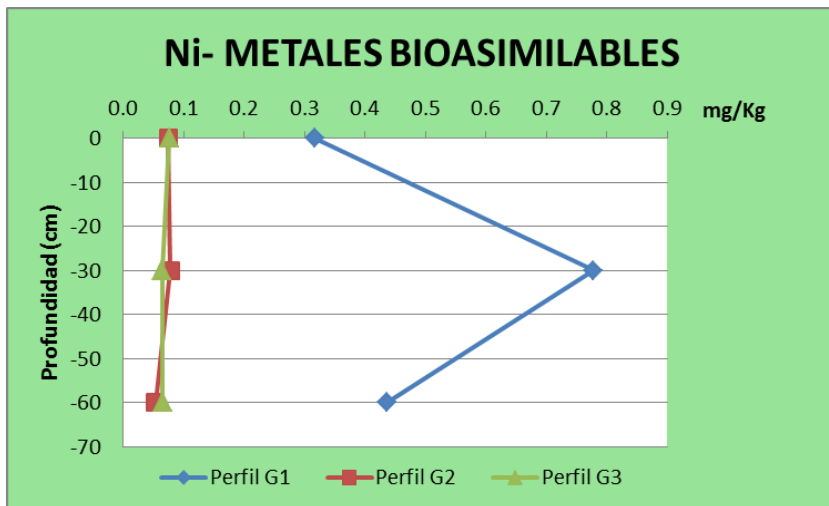


Gráfica 28: valores de Cromo bioasimilable

5.2.2.2.6. Níquel

El perfil G1 presenta valores bastante diferenciados con respecto a los otros dos perfiles. En superficie se han obtenido valores de 0,3 mg/kg que crecen hasta los 0,8 mg a los 30-60 cm de profundidad para luego descender hasta 0,4 mg/kg en la parte más profunda.

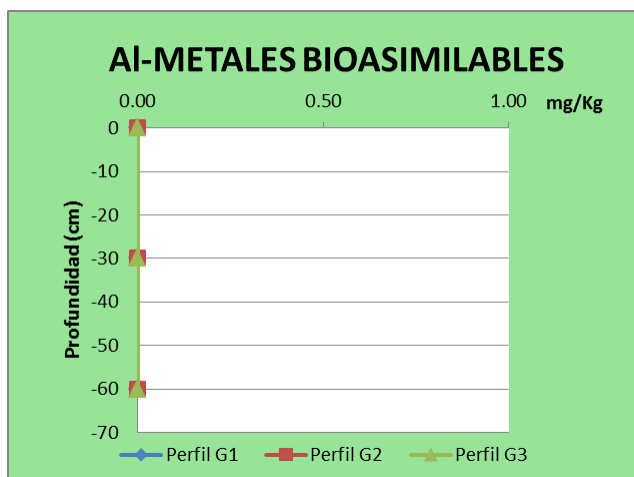
Los perfiles G2 y G3 presentan unos valores y distribución de los mismos prácticamente idénticos, todos ellos próximos a 0,1 mg/kg.



Gráfica 29: valores de Níquel bioasimilable

5.2.2.2.7. Aluminio

No se ha detectado presencia de aluminio bioasimilable en ninguna de las muestras recogidas, lo que indica que este metal está inmovilizado en los minerales que componen el residuo minero.

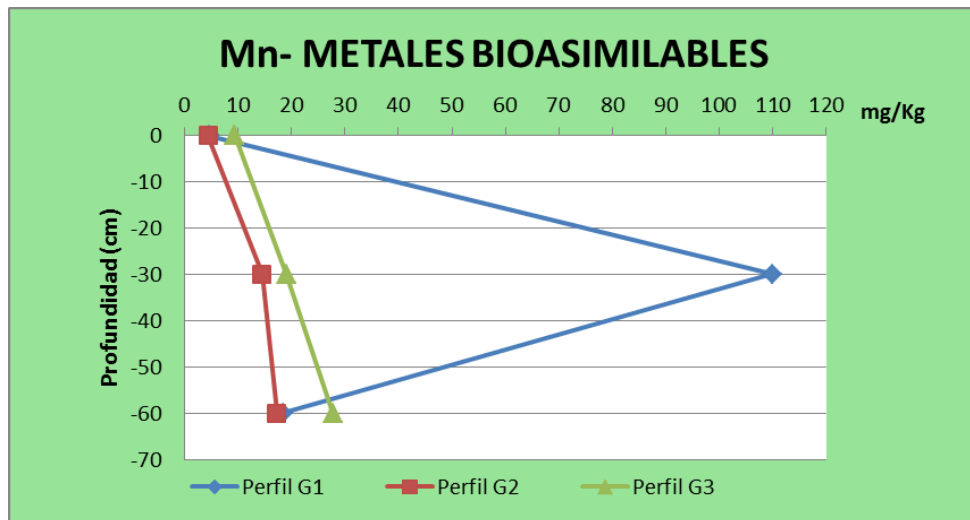


Gráfica 30: valores de Aluminio bioasimilable

5.2.2.2.8. Manganeso

Para el perfil G1 se observa un pico de contaminante a los 30-60 cm de profundidad que alcanza valores de 110 mg/kg, mientras que en los primeros y últimos 30 cm los valores son 4 y 18 mg/kg respectivamente.

Los perfiles G2 y G3 presentan una distribución similar, con valores menores en superficie que van incrementándose con la profundidad.



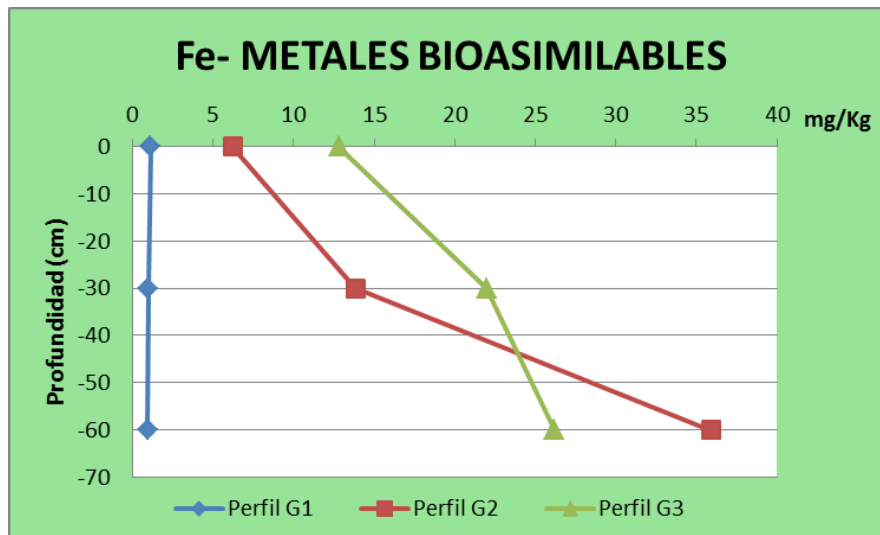
Gráfica 31: valores de Manganeso bioasimilable

5.2.2.2.9. Hierro

Para el caso del hierro, el perfil G1 es el que presenta los valores más bajos de los tres perfiles, con una distribución sumamente homogénea en la que todos los valores están muy próximos a la unidad.

El perfil G2 presenta una distribución más heterogénea, con un incremento de los valores a medida que aumenta la profundidad de muestreo. Así, se recogen valores de 6 mg/kg para los primeros 30 cm de muestreo, 14 mg/kg para la zona media y 36 mg/kg para la más profunda.

El perfil G3 tiene también su valor mínimo en superficie y va aumentando con la profundidad. A diferencia del G2, los valores obtenidos para los 30-60 cm y para los 60-90 cm de profundidad son más similares entre sí.



Gráfica 32: valores de Hierro bioasimilable

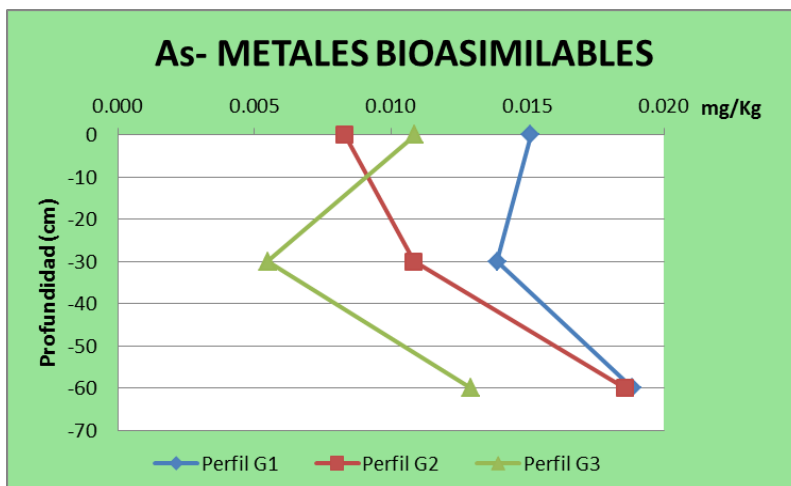
5.2.2.2.10. Arsénico

Teniendo en cuenta que la diferencia entre los valores mínimo y máximo de los tres perfiles es de tan solo 0.014 mg/kg, se puede apreciar una cierta diferencia entre cada uno ellos.

Así, el perfil G1 es el que presenta, de nuevo, los valores más elevados de contenido en Arsénico, con 0,015 mg/kg en superficie y 0,019 mg/kg en la parte más profunda.

El perfil G2 sufre un incremento más acusado de sus valores con la profundidad, ya que, partiendo de un valor en superficie menor que el G1, alcanza los 0,019 mg/kg de nuevo a la profundidad máxima.

El perfil G3 tiene valores similares y próximos a 0,012 mg/kg tanto en superficie como a los 90 cm de profundidad, sin embargo entre los 30 y 60 cm el contenido en As disminuye hasta los 0,005 mg/kg.



Gráfica 33: valores de Arsénico bioasimilable

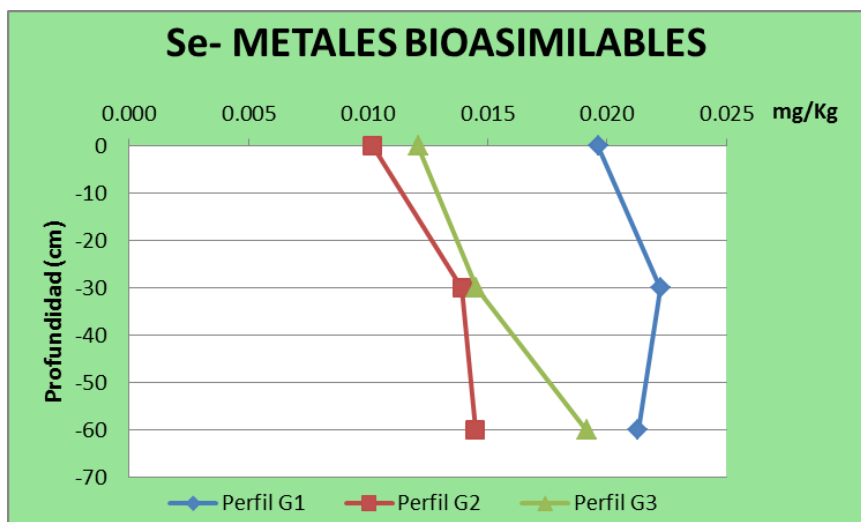
5.2.2.2.11. Selenio

Al igual que sucede con el Arsénico, para el Selenio los valores de los tres perfiles no presentan una gran diferencia entre sí, siendo en este caso muy bajos.

El perfil G1 es de nuevo el que presenta los valores más altos, con valores próximos a los 0,02 mg/kg en todo el perfil.

El perfil G2 es el que presenta por contra los valores más bajos, oscilando entre los 0.01 mg de su superficie hasta los 0,015 mg/kg del resto del perfil.

En el perfil G3 se aprecia un incremento continuado de los valores con la profundidad, oscilando desde los 0,012 a los 0,019 mg/kg de Se.



Gráfica 34: valores de Selenio bioasimilable

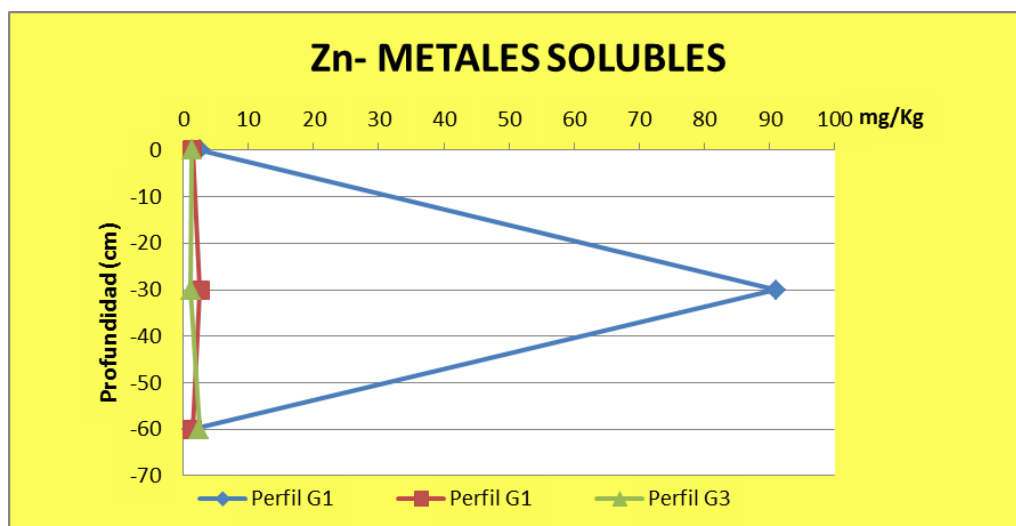
5.2.2.3. Metales solubles

Son aquellos metales que se encuentran de forma libre o de complejos, disueltos en la solución del suelo y que, por tanto, pueden ocasionar problemas ambientales por lixiviación y escorrentía, generando contaminación difusa.

5.2.2.3.1. Zinc

El perfil G1 presenta un pico de contenido en Zn entre los 30 y los 60 cm de profundidad alcanzando los 91 mg/kg. En el resto de muestras, sin embargo, los valores están próximos a 2 mg/kg.

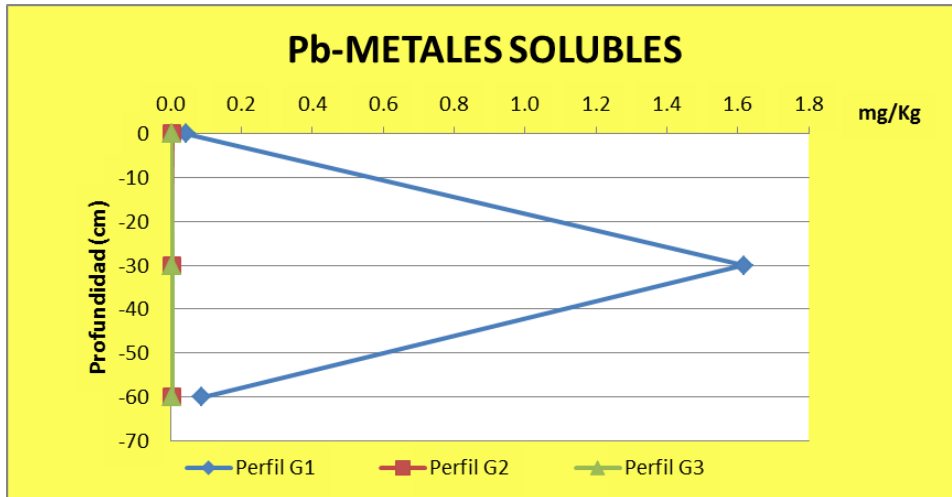
Los perfiles G2 y G3 presentan distribución y valores muy similares entre sí y dentro de la variación en profundidad. Así los valores oscilan entre 1,40 y 2,60 mg/kg.



Gráfica 35: valores de Zinc soluble

5.2.2.3.2. Plomo

Solo el perfil G1 presenta un valor relativamente notable de Pb en comparación con los otros dos perfiles cuyos valores están muy próximos a cero.

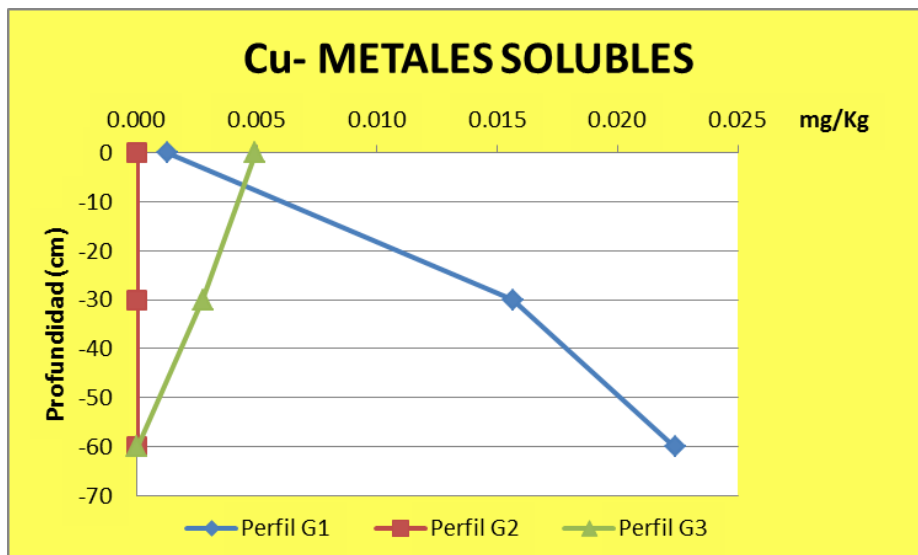


Gráfica 36: valores de Plomo soluble

5.2.2.3.3. Cobre

El perfil G1 presenta valores muy próximos a cero en superficie que se van incrementando hasta alcanzar los 0,022 mg/kg a los 90 cm.

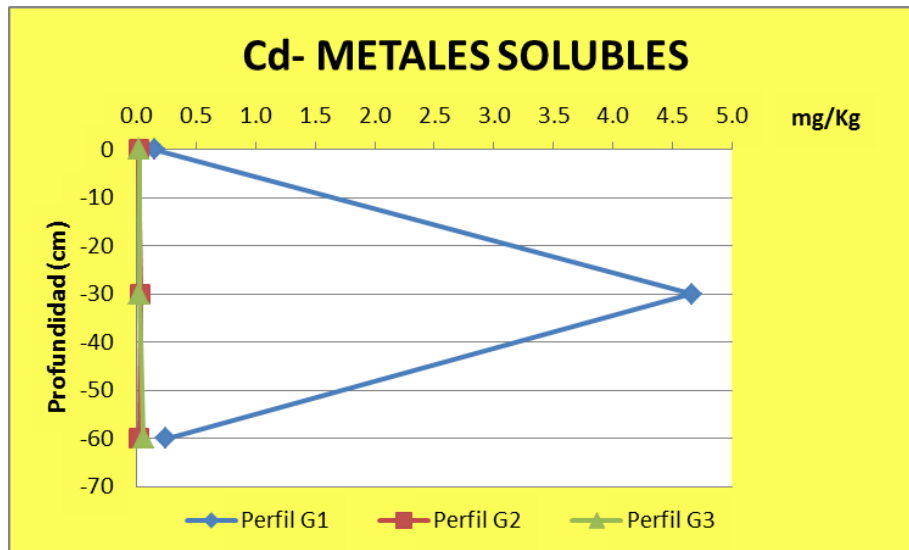
Para el perfil G2 los análisis han dado resultados del orden de 0,0003 mg/kg, mientras que el perfil G3 comienza con 0,005 mg/kg en superficie hasta desaparecer en los últimos 30 cm de profundidad.



Gráfica 37: valores de Plomo soluble

5.2.2.3.4. Cadmio

El perfil G1 es el que presenta el valor máximo, con 4,66 mg/kg entre los 30 y 60 cm de profundidad.



Gráfica 38: valores de Cadmio soluble

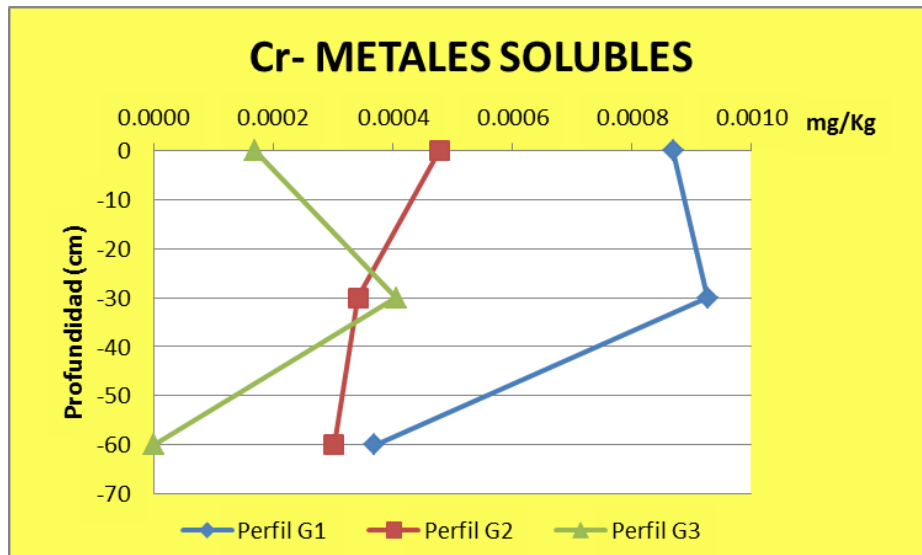
5.2.2.3.5. Cromo

En todos los puntos muestreados de los perfiles estudiados el contenido de Cr soluble es muy bajo, por lo que no se espera riesgo de movilidad por lixiviación ni por escorrentía.

El perfil G1 presenta su valor máximo (0,0009 mg/kg) entre los 30 y 60 cm de profundidad y el mínimo (0,0004 mg/kg) a los 90 cm.

El perfil G2 tiene mayor concentración de Cr en superficie, con un valor cercano a los 0,0005 mg/kg que posteriormente desciende y se estabiliza con la profundidad.

En el perfil G3 la variación es un poco mayor, con un máximo de 0,0004 mg/kg a los 30-60 cm y casi cero en la máxima profundidad.

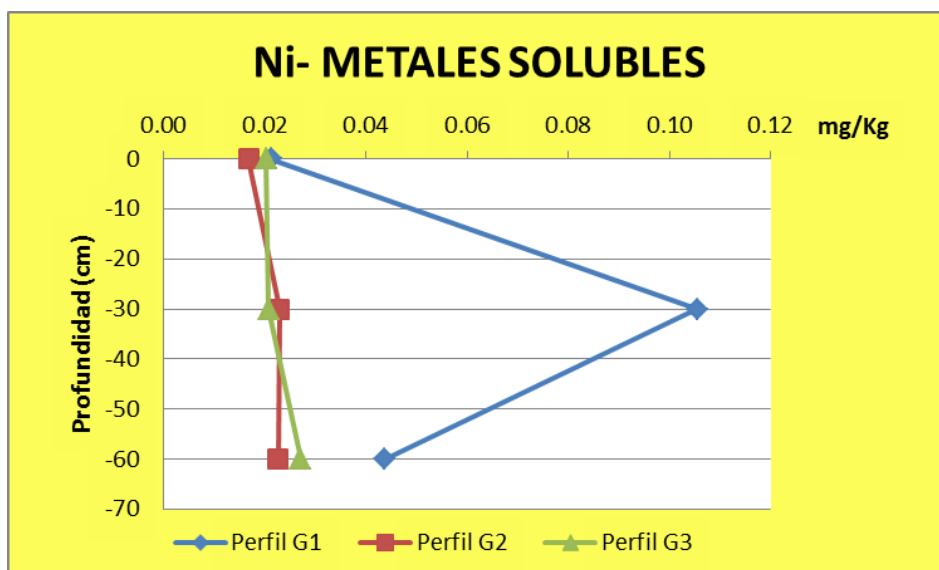


Gráfica 39: valores de Cromo soluble

5.2.2.3.6. Níquel

El perfil G1 presenta una mayor acumulación de Níquel entre los 30 y 60 cm de profundidad. En superficie y a los 90 cm sus valores oscilan entre los 0,02 y los 0,04 mg/kg respectivamente.

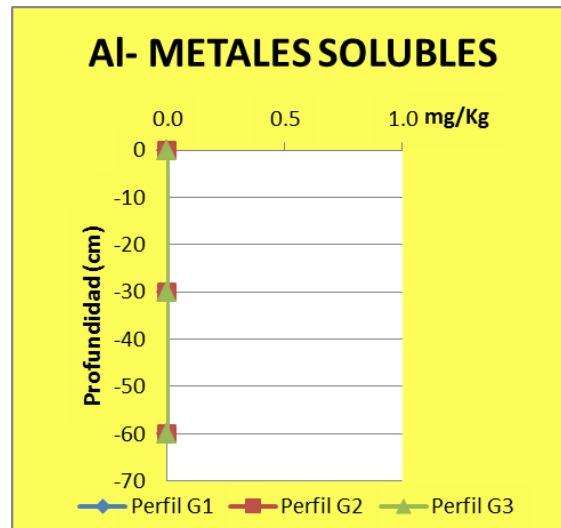
Los perfiles G2 y G3 presentan valores y distribución similares, con un contenido en Níquel aproximado de 0,02 mg/kg.



Gráfica 40: valores de Níquel soluble

5.2.2.3.7. Aluminio

En los análisis realizados no se ha encontrado Aluminio en forma soluble, lo que muestra nuevamente que este metal se encuentran totalmente inmovilizado en los minerales que componen estos residuos mineros.

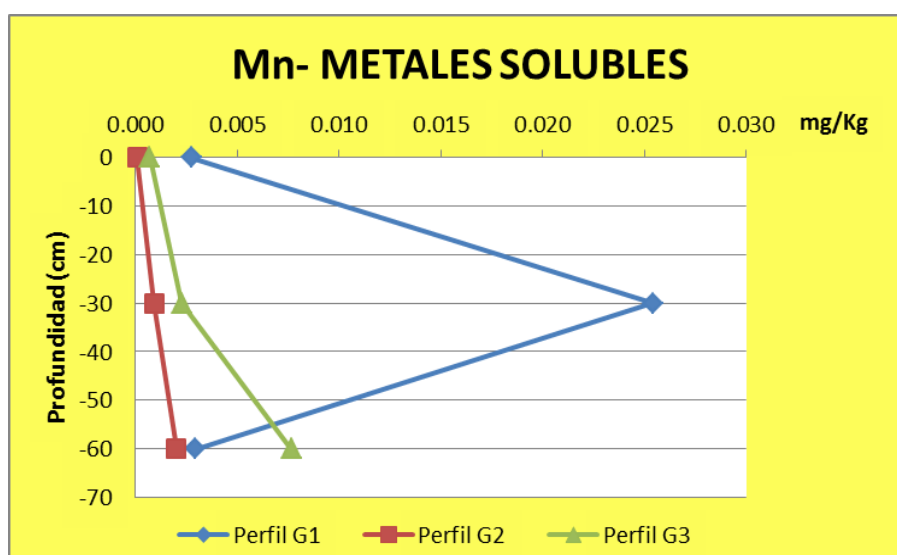


Gráfica 41: valores de Aluminio soluble

5.2.2.3.8. Manganeso

El perfil G1 presenta un máximo entre los 30 y 60 cm de profundidad, con 0,025 mg/kg de Manganeso.

Los perfiles G2 y G3 parten de valores muy próximos a cero en superficie que van aumentando con la profundidad hasta los 0,005 mg/kg en el caso del G3.

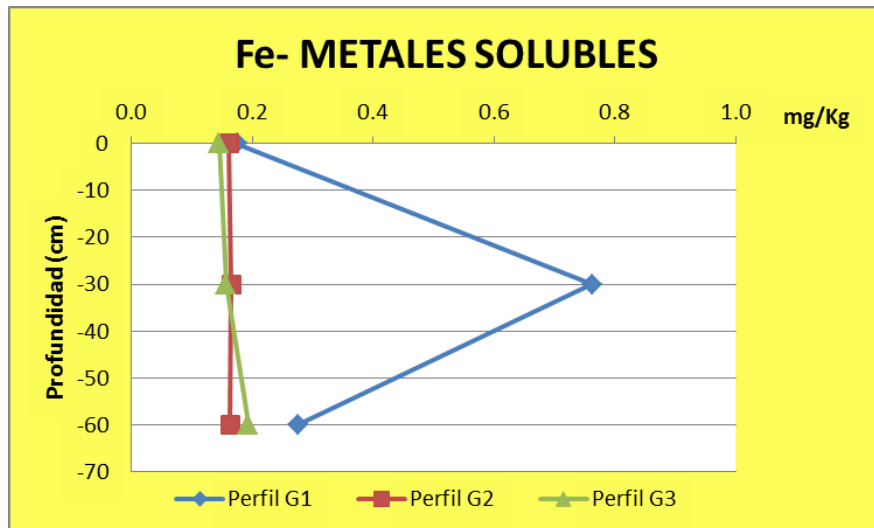


Gráfica 42: valores de Manganeso soluble

5.2.2.3.9. Hierro

De nuevo el valor máximo se recoge a los 30-60 cm del perfil G1, con un valor de 0,76 mg/kg. En superficie y a los 90 cm los valores son inferiores, rondando los 0,2 mg/kg.

Los perfiles G2 y G3 presentan valores y distribución similares, entre los 0,14 y 0,16 mg/Kg.



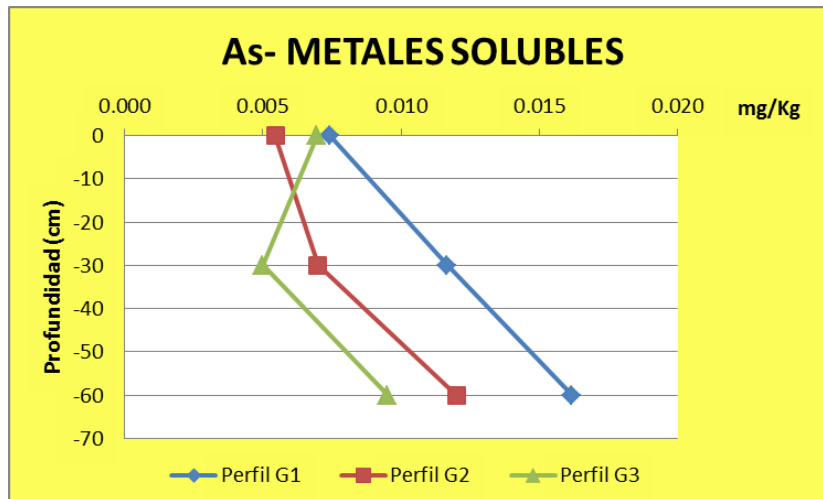
Gráfica 43: valores de Hierro soluble

5.2.2.3.10. Arsénico

El perfil G1 presenta su valor más pequeño (0,007 mg/kg) en los primeros 30 cm del muestreo. Éste se va incrementando con la profundidad hasta alcanzar su valor máximo (0,016 mg/kg) a los 90 cm de profundidad.

Los valores para el perfil G2 oscilan desde los 0,005 mg en superficie hasta los 0,012 mg/Kg en la parte más profunda.

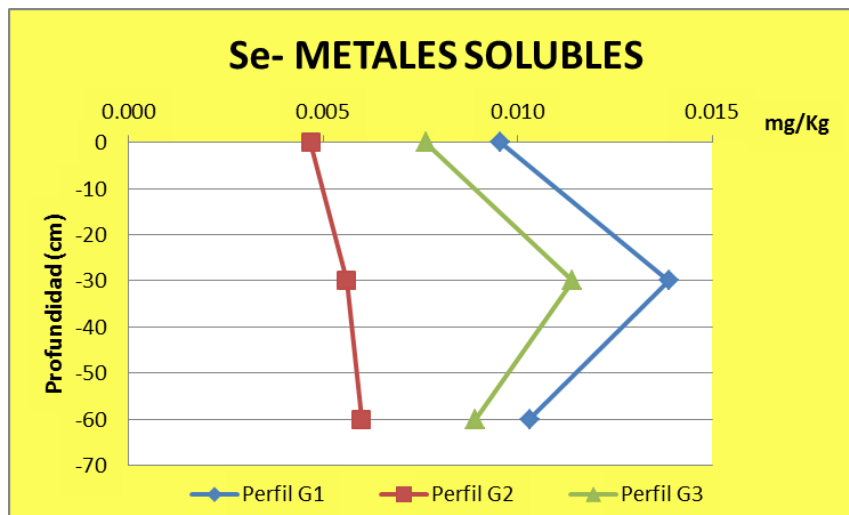
El perfil G3, por el contrario, tiene su mínimo entre los 30 y 60 cm de profundidad con un valor 0,005 mg/kg.



Gráfica 44: valores de Arsénico soluble

5.2.2.3.11. Selenio

Los valores para el Selenio oscilan entre los 0,005 mg/kg que presenta el perfil G2 y los 0,014 mg/kg del G1. Los tres perfiles presentan sus valores máximos entre los 30 y 60 cm de profundidad de muestreo.



Gráfica 45: valores de Selenio soluble

5.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Siguiendo la metodología descrita en el apartado 4.3., se ha realizado el test de Kolmogorov-Smirnov a los datos obtenidos del análisis de laboratorio de las muestras tomadas en los residuos mineros así como a las medidas de resistividad tanto en seco como en húmedo.

En una primera prueba se evidencia que las variables humedad, arena, cromo total, cromo bioasimilable, níquel bioasimilable, cadmio bioasimilable, zinc soluble, plomo soluble, cobre soluble, cadmio soluble, cromo soluble, níquel soluble, manganeso soluble, hierro soluble, y la conductividad no siguen una distribución normal tanto para las muestras en seco como para las muestras en húmedo.

Se hace necesaria, por tanto, la transformación de estas variables aplicando logaritmos. Con los datos transformados, se vuelve a realizar el test de Kolmogorov-Smirnov y se observa que las variables arena, cromo bioasimilable, cromo soluble y níquel soluble de la medida en seco siguen sin cumplir una distribución normal (p -valor $< 0,05$). Lo mismo ocurre con las variables arena, cadmio soluble, cromo soluble y níquel soluble de la medida en húmedo. Se prueba con una transformación con logaritmos en base decimal, pero en todos los casos se sigue incumpliendo la normalidad.

Una vez que tenemos normalizados los datos se analizan los coeficientes de correlación, comenzando con el de Pearson.

Como se observa en la tabla 5 las variables humedad, salinidad, carbono inorgánico, nitrógeno, arcilla, arena, aluminio total, manganeso total, arsénico total, cadmio bioasimilable, níquel bioasimilable, manganeso bioasimilable, selenio bioasimilable, cadmio soluble, manganeso soluble y selenio soluble guardan una relación de linealidad con la resistividad.

En la tabla 6, para los datos medidos en húmedo, se observa que las variables humedad, salinidad, carbono inorgánico, nitrógeno, arcilla, limo, arena, aluminio, manganeso y arsénico total, cadmio, níquel, manganeso y selenio bioasimilables y plomo, cadmio, manganeso y selenio solubles, guardan también una relación de linealidad con la resistividad.

Para poder aplicar el coeficiente de correlación de Pearson se han tenido que transformar la mayoría de las variables. Con el fin de averiguar si existe alguna otra correlación más fuerte entre las variables originales que no sea la lineal, se han analizado también con el coeficiente de correlación de Spearman.

Pearson-Seco												
Resistividad	-,575**	0,192	-,627**	0,365	,594**	-0,178	-0,151	-,390*	0,333	-,539**	-0,359	,470*
Inconductividad	,868**	-0,374	,780**	-0,28	-,471*	0,086	,393*	,613**	-,389*	,490*	,758**	-,827**
	Inhumedad	ph	Salinidad	Carbono total	Carbono inorgánico	Carbono orgánico	Azufre	Nitrógeno	Agregados	Arcilla	Limo	Inarena
Resistividad	-0,316	-0,336	-0,315	-0,18	-0,016	0,134	-,536**	,576**	0,146	,674**	0,328	
Inconductividad	,639**	,678**	,696**	,508**	0,121	0,093	,430*	-0,34	-0,223	-0,383	0,051	
	Metales Totales Zinc	Metales Totales Plomo	Metales Totales Cobre	Metales Totales Cadmio	Inmetales totales Cromo	Metales Totales Níquel	Metales Totales Aluminio	Metales totales Manganeso	Metales Totales Hierro	Metales Totales Arsénico	Metales Totales Selenio	
Resistividad	-0,051	0,187	0,06	-,474*	0,107	-,398*	-,455*	0,033	-0,233	-,531**		
Inconductividad	0,374	-,405*	0,292	,763**	-0,067	,734**	,454*	-,443*	0,297	,709**		
	Metales Bioasimilables Zinc	Metales Bioasimilables Plomo	Metales Bioasimilables Cobre	Inmetales Bioasimilables Cadmio	Inmetales Bioasimilables Cromo	Inmetales Bioasimilables Níquel	Inmetales Bioasimilables Manganeso	Metales Bioasimilables Hierro	Metales Bioasimilables Arsénico	Metales Bioasimilables Selenio		
Resistividad	-0,238	-,383*	-0,304	-,508**	-0,221	-0,332	-,561**	-0,108	-0,305	-,562**		
Inconductividad	0,333	,670**	0,461	,707**	0,219	,553**	0,427	0,34	,448*	,648**		
	Inmetales Solubles Zinc	Inmetales Solubles Plomo	Inmetales Solubles Cobre	Inmetales Solubles Cadmio	Inmetales Solubles Cromo	Inmetales Solubles Níquel	Inmetales Solubles Manganeso	Inmetales Solubles Hierro	Metales Solubles Arsénico	Metales Solubles Selenio		

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral). * . La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 5: coeficiente de correlación de Pearson datos en seco

Pearson- Húmedo												
Resistividad	-,587**	0,174	-,645**	0,328	,551**	-0,184	-0,292	-,471*	0,375	-,543**	-,391*	,499**
Inconductividad	,838**	-0,271	,801**	-0,277	-,475*	0,173	,393*	,577**	-,412*	,558**	,720**	-,808**
	Inhumedad	ph	Salinidad	Carbono total	Carbono inorgánico	Carbono orgánico	Azúfre	Nitrógeno	Agregados	Arcilla	Limo	Inarena

Resistividad	-0,371	-0,328	-0,334	-0,283	0,062	0,174	-,518**	,458*	0,122	,559**	0,284
Inconductividad	,629**	,627**	,657**	,533**	-0,035	-0,043	,471*	-0,36	-0,253	-,391*	-0,017
	Metales Totales Zinc	Metales Totales Plomo	Metales Totales Cobre	Metales Totales Cadmio	Inmetales totales Cromo	Metales Totales Níquel	Metales Totales Aluminio	Metales totales Manganeso	Metales Totales Hierro	Metales Totales Arsénico	Metales Totales Selenio

Resistividad	-0,121	0,292	0,043	-,532**	0,158	-,430*	-,388*	0,08	-0,283	-,518**
Inconductividad	0,347	-,391*	0,285	,772**	-0,079	,698**	0,368	-,417*	0,333	,699**
	Metales Bioasimilables Zinc	Metales Bioasimilables Plomo	Metales Bioasimilables Cobre	Inmetales Bioasimilables Cadmio	Inmetales Bioasimilables Cromo	Inmetales Bioasimilables Níquel	Inmetales Bioasimilables Manganeso	Metales Bioasimilables Hierro	Metales Bioasimilables Arsénico	Metales Bioasimilables Selenio

Resistividad	-0,224	-,396*	-0,287	-,507**	-0,221	-0,329	-,523*	-0,12	-0,339	-,577**
Inconductividad	0,259	,629**	0,365	,659**	0,193	,466*	0,392	0,275	,443*	,655**
	Inmetales Solubles Zinc	Inmetales Solubles Plomo	Inmetales Solubles Cobre	Inmetales Solubles Cadmio	Inmetales Solubles Cromo	Inmetales Solubles Níquel	Inmetales Solubles Manganeso	Inmetales Solubles Hierro	Metales Solubles Arsénico	Metales Solubles Selenio

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral). * . La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 6: coeficiente de correlación de Pearson datos en húmedo.

Spearman- Seco												
Resistividad	-,779**	0,312	-,937**	0,376	,542**	-0,129	-,417*	-,617**	0,36	-,768**	-,594**	,709**
Conductividad	,761**	-0,227	,931**	-0,347	-,532**	0,226	,468*	,667**	-0,345	,772**	,601**	-,718**
	Humedad	ph	Salinidad	Carbono total	Carbono inorgánico	Carbono orgánico	Azufre	Nitrógeno	Agregados	Arcilla	Limo	Arena

Resistividad	-,513**	-,480*	-,488**	-,436*	-0,201	-0,002	-,501**	0,308	0,172	0,227	-0,026
Conductividad	,566**	,494**	,528**	,500**	0,143	-0,034	,473*	-0,3	-0,207	-0,285	-0,04
	Metales Totales Zinc	Metales Totales Plomo	Metales Totales Cobre	Metales Totales Cadmio	Metales totales Cromo	Metales Totales Níquel	Metales Totales Aluminio	Metales totales Manganeso	Metales Totales Hierro	Metales Totales Arsénico	Metales Totales Selenio

Resistividad	-0,31	,401*	0,152	-,656**	0,195	-,548**	-,505**	,461*	-,404*	-,747**
Conductividad	0,347	-,447*	-0,096	,706**	-0,213	,551**	,422*	-,492**	0,358	,714**
	Metales Bioasimilables Zinc	Metales Bioasimilables Plomo	Metales Bioasimilables Cobre	Inmetales Bioasimilables Cadmio	Metales Bioasimilables Cromo	Metales Bioasimilables Níquel	Metales Bioasimilables Manganeso	Metales Bioasimilables Hierro	Metales Bioasimilables Arsénico	Metales Bioasimilables Selenio

Resistividad	-0,148	-,664**	-,661**	-,763**	-0,03	-,546**	-,815**	-0,335	-,494**	-,738**
Conductividad	0,092	,664**	,712**	,728**	0,083	,490**	,766**	0,316	,424*	,752**
	Metales Solubles Zinc	Metales Solubles Plomo	Metales Solubles Cobre	Metales Solubles Cadmio	Metales Solubles Cromo	Metales Solubles Níquel	Metales Solubles Manganeso	Metales Solubles Hierro	Metales Solubles Arsénico	Metales Solubles Selenio

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral). * . La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 7: coeficiente de correlación de Spearman datos en seco.

Spearman- Húmedo												
Resistividad	-,740**	0,198	-,932**	0,318	,494**	-0,207	-,419*	-,580**	,457*	-,764**	-,605**	,721**
Conductividad	,718**	-0,148	,942**	-0,268	-,459*	0,277	,408*	,587**	-,450*	,750**	,609**	-,715**
	Humedad	ph	Salinidad	Carbono total	Carbono inorgánico	Carbono orgánico	Azufre	Nitrógeno	Agregados	Arcilla	Limo	Arena

Resistividad	-,510**	-,469*	-,487**	-,479*	-0,137	0,005	-,523**	0,244	0,184	0,194	-0,031
Conductividad	,520**	,441*	,482*	,495**	0,117	-0,011	,462*	-0,255	-0,222	-0,271	-0,003
	Metales Totales Zinc	Metales Totales Plomo	Metales Totales Cobre	Metales Totales Cadmio	Metales totales Cromo	Metales Totales Níquel	Metales Totales Aluminio	Metales totales Manganeso	Metales Totales Hierro	Metales Totales Arsénico	Metales Totales Selenio

Resistividad	-0,303	,384*	0,058	-,667**	0,18	-,516**	-,407*	,460*	-,440*	-,719**
Conductividad	0,288	-,421*	-0,028	,668**	-0,115	,511**	0,378	-,485*	0,352	,695**
	Metales Bioasimilables Zinc	Metales Bioasimilables Plomo	Metales Bioasimilables Cobre	Inmetales Bioasimilables Cadmio	Metales Bioasimilables Cromo	Metales Bioasimilables Níquel	Metales Bioasimilables Manganeso	Metales Bioasimilables Hierro	Metales Bioasimilables Arsénico	Metales Bioasimilables Selenio

Resistividad	-0,087	-,622**	-,631**	-,725**	-0,051	-,452*	-,774**	-0,262	-,483*	-,699**
Conductividad	0,059	,588**	,655**	,703**	0,033	,399*	,747**	0,208	,394*	,729**
	Metales Solubles Zinc	Metales Solubles Plomo	Metales Solubles Cobre	Metales Solubles Cadmio	Metales Solubles Cromo	Metales Solubles Níquel	Metales Solubles Manganeso	Metales Solubles Hierro	Metales Solubles Arsénico	Metales Solubles Selenio

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral). * . La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Tabla 8: coeficiente de correlación de Spearman datos en húmedo.

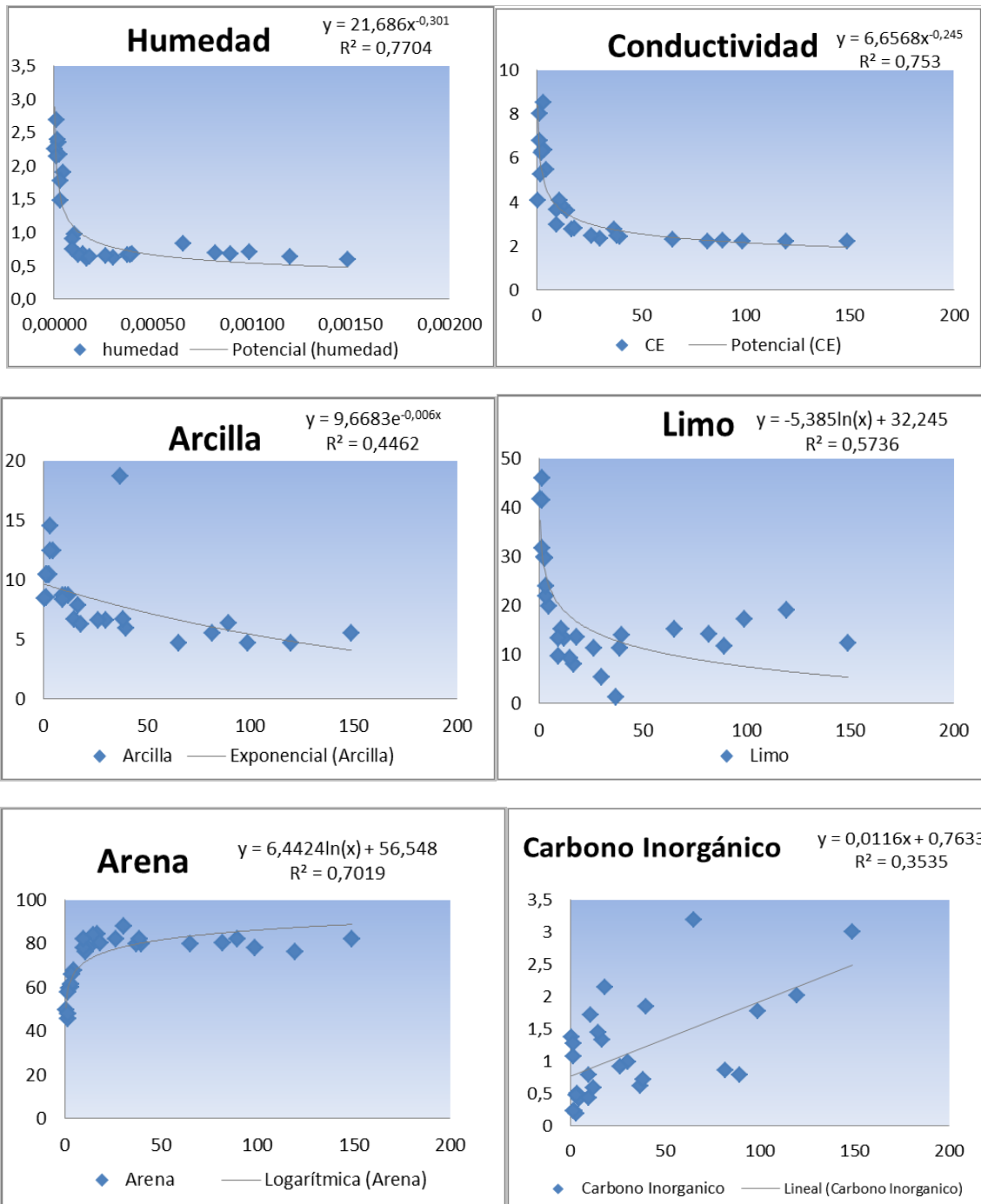
Los resultados obtenidos de la correlación de Spearman se interpretan de forma semejante a la de Pearson, de manera que todos aquellos marcados con uno o dos asteriscos guardaran una relación de linealidad entre sí.

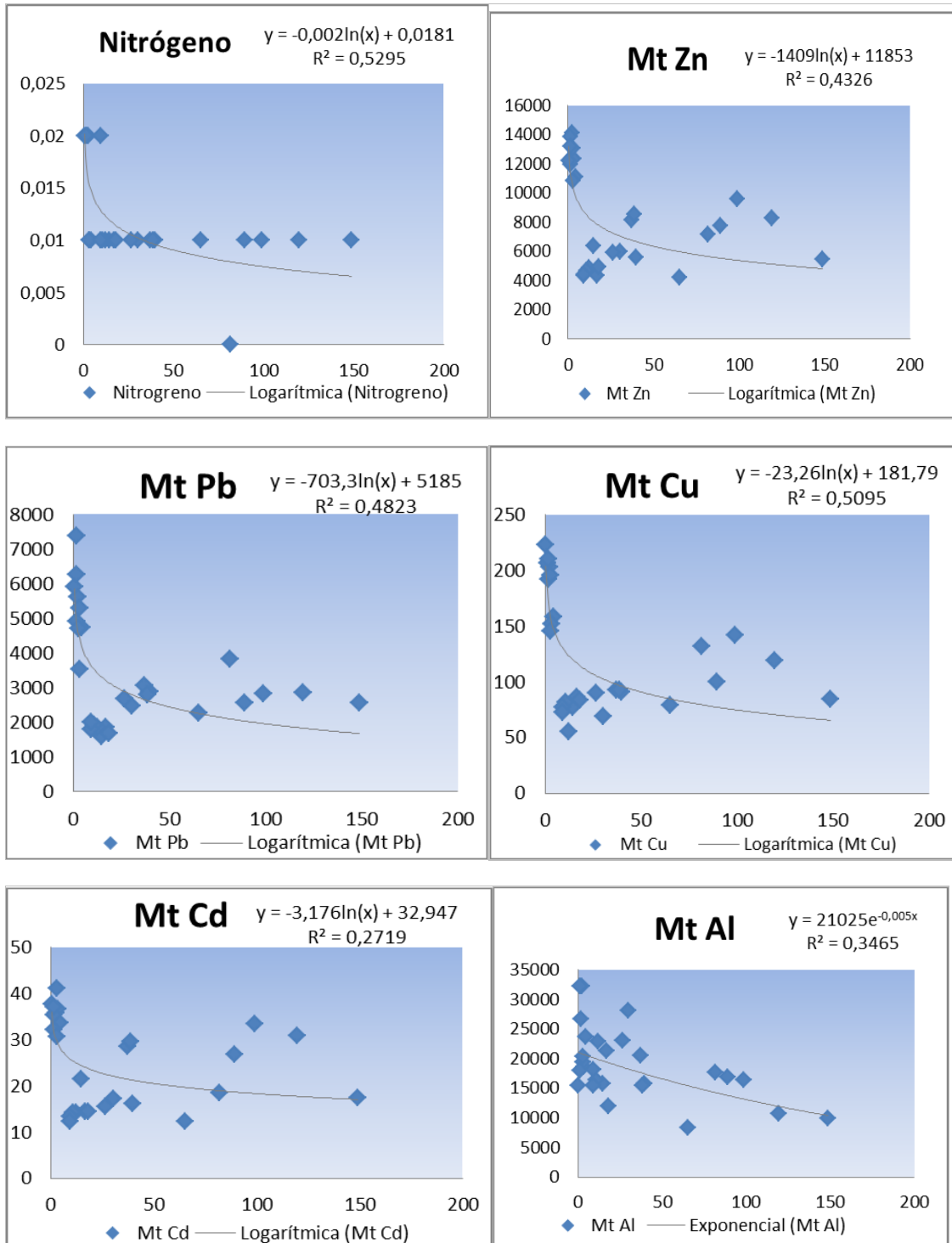
Para seguir trabajando en el análisis estadístico, elegiremos los datos resultantes de la correlación de Spearman, ya que los coeficientes de correlación (r) obtenidos con ella son bastante mayores que los obtenidos con la de Pearson. Esto indica que existe una relación que puede ser no lineal entre las variables sin transformar más fuerte que para las variables normalizadas. También es destacable el hecho de que para Spearman el número de variables correlacionadas aumenta, indicando que existen variables que se relacionan de una forma no lineal con la resistividad.

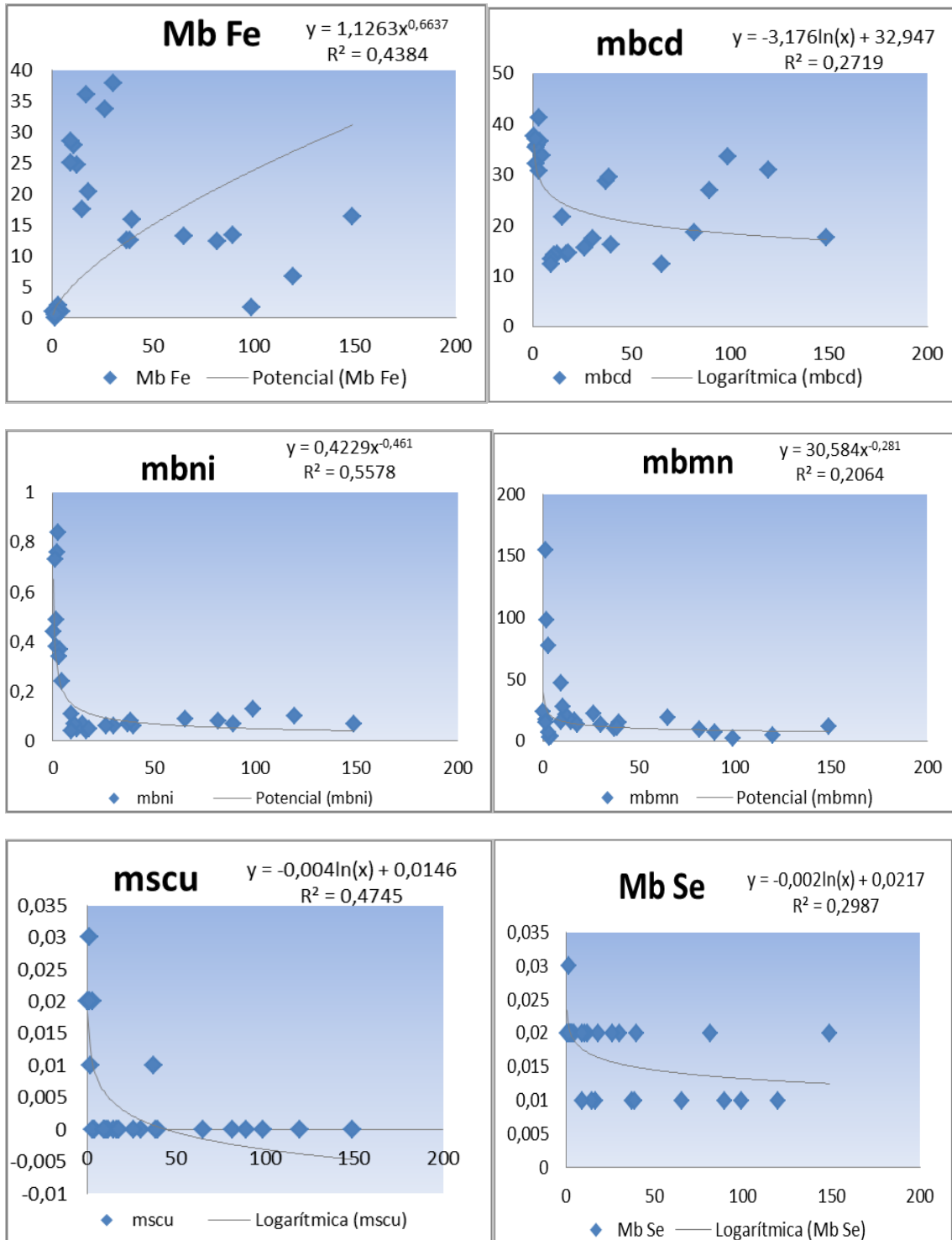
Este análisis también permite discriminar en qué condiciones de medida, seco o húmedo, se obtienen mejores resultados. En este caso, al comparar los coeficientes de correlación de las tablas 7 y 8, observamos cómo éstos son más elevados en la medida en seco. Por ello podemos sugerir que para futuras mediciones será mejor realizar las medidas en seco.

El coeficiente de determinación r^2 indica la proporción de variabilidad común, es decir, la proporción de varianza de una variable determinada o asociada a otra variable (Morales Vallejo, 2008). Para discriminar si la relación entre una variable y la resistividad es directa o si existen otros parámetros que le afecten tomamos como valor discriminatorio un r mayor o igual a 0,45. Esto implica que el coeficiente de determinación (r^2) será de 0,2025 o del 20,25%, es decir que el 20% de las diferencias que se dan en la resistividad dependen del parámetro geoquímico con el que se comparan.

Los datos de r mayor o igual a 0,45 vienen señalados en azul en las tablas 7 y 8. A partir de ellos haremos una gráfica de regresión y estimaremos qué tipo de distribución se ajusta mejor a cada variable. Con ello obtendremos una serie de ecuaciones en las que la variable "x" será la resistividad y la "y" la variable geoquímica cuya influencia se está determinando.







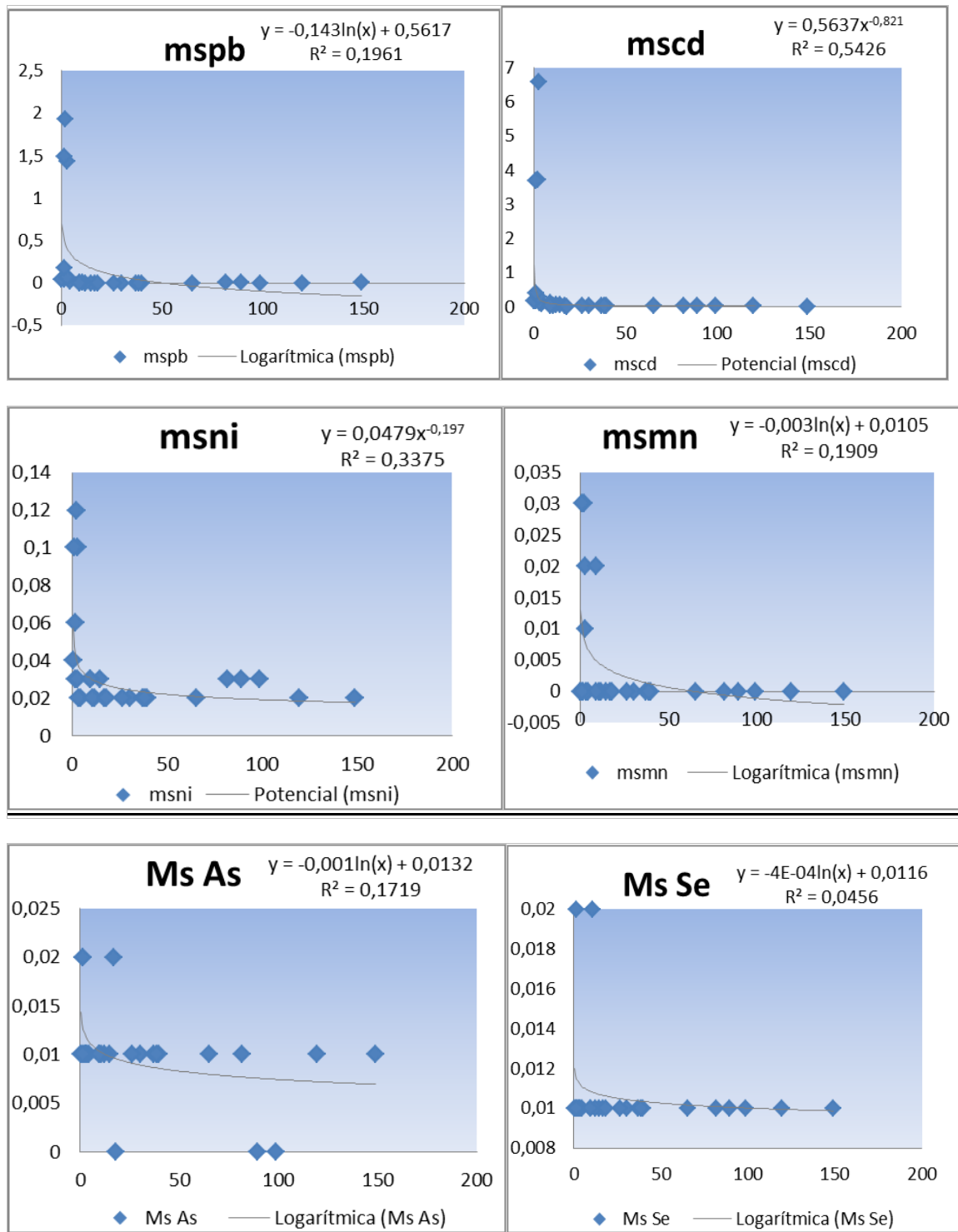
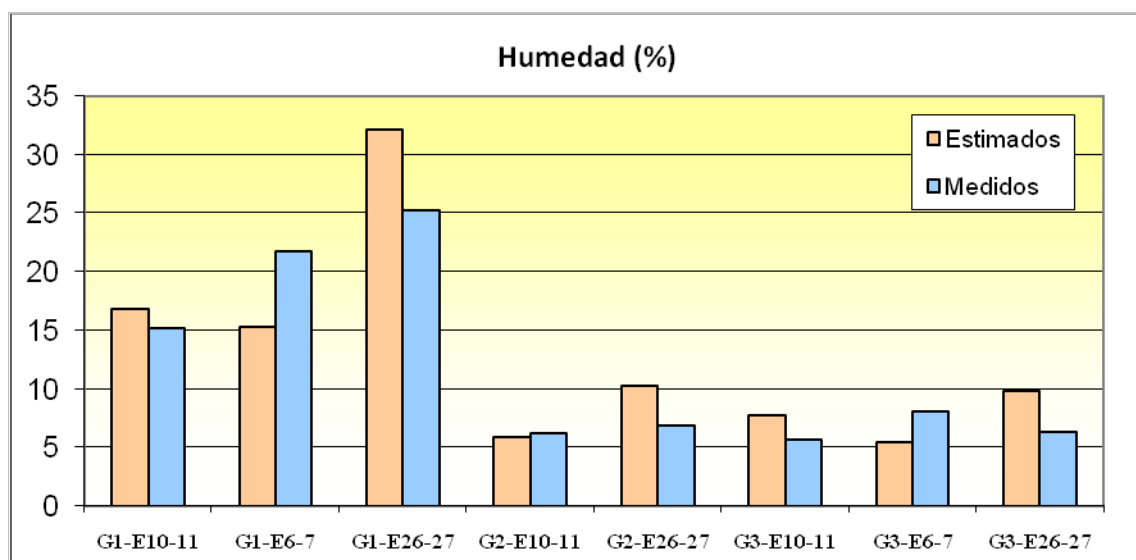


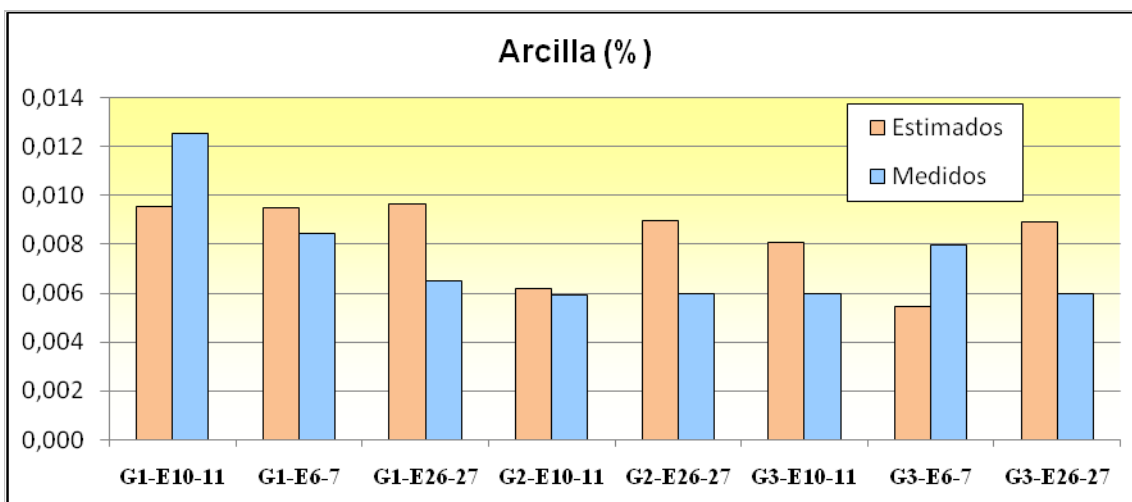
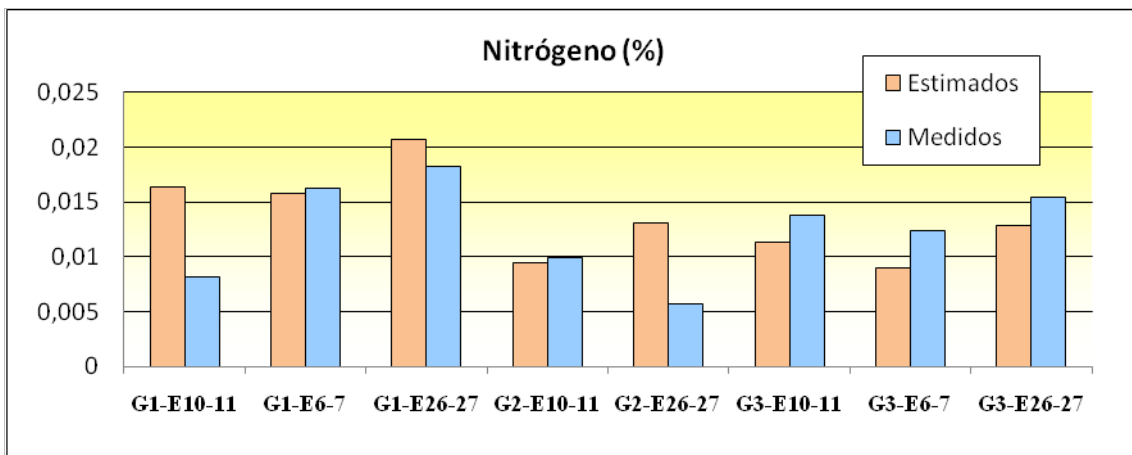
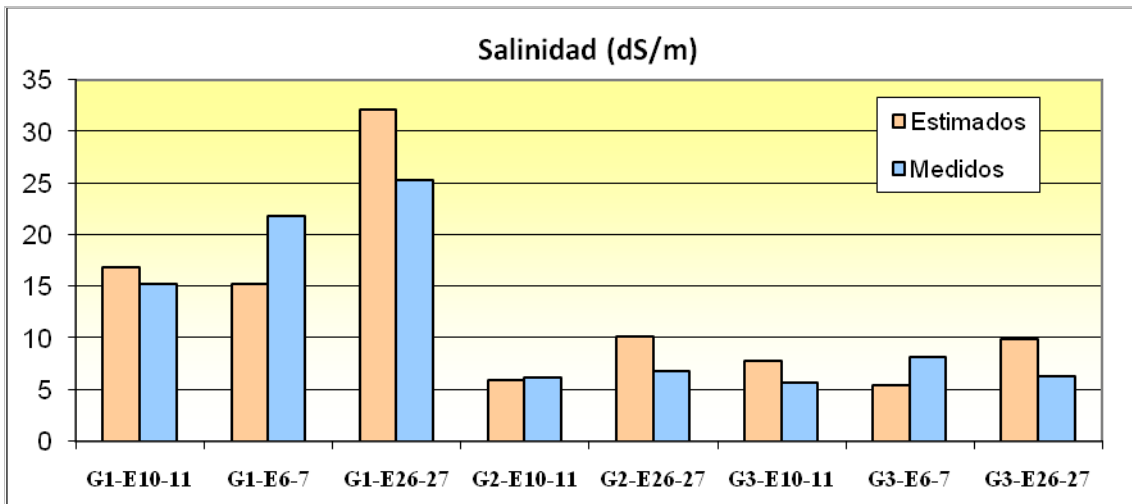
Figura 11: regresión entre resistividad eléctrica y propiedades del suelo.

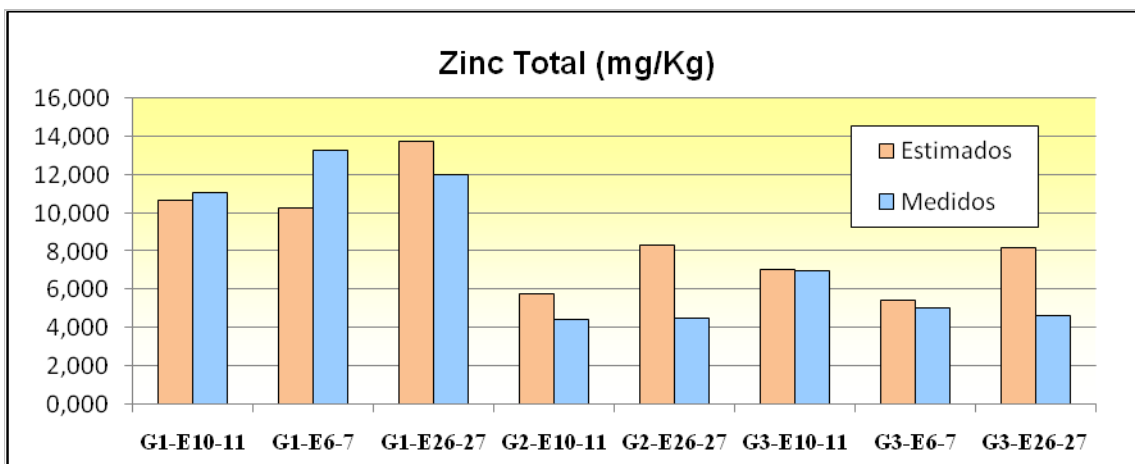
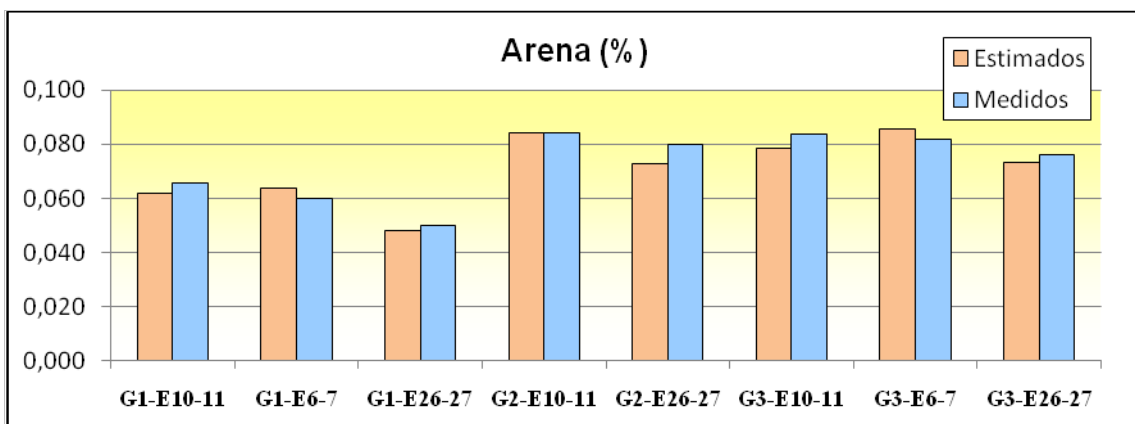
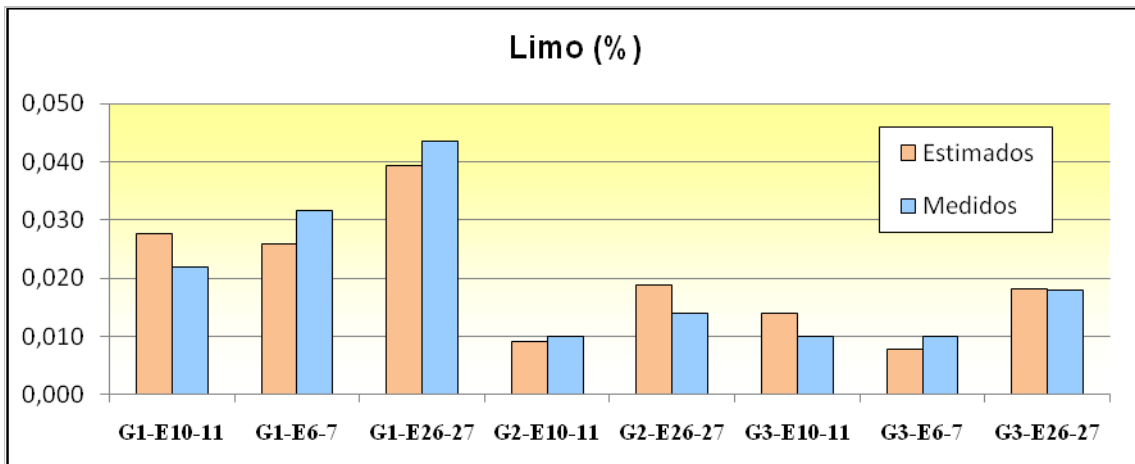
Una vez halladas las ecuaciones nos fijaremos en su R^2 . Aquellas variables cuyo R^2 sea menor que 0,45 no mantendrán una relación directa y suficientemente representativa con la resistividad, lo que indica que su variación dependerá de otros parámetros. Esto quiere decir que una variación individual de los parámetros carbono inorgánico, cadmio total, aluminio total, cadmio bioasimilable, manganeso bioasimilable, selenio bioasimilable, plomo soluble, níquel soluble, manganeso soluble, arsénico soluble y selenio soluble, no provocarán *per se* una variación de la resistividad. Sin embargo, esto no excluye la posibilidad de que alguna combinación de estos y otros parámetros altere la resistividad del subsuelo.

Para aquellas variables que sí mantienen una relación directa con la variación de resistividad ($R^2 \geq 0,45$) se procede a sustituir en sus ecuaciones los valores de resistividad medidos en campo para las muestras control.

Posteriormente, para poder averiguar qué desviación ofrecen las ecuaciones calculadas, se comparan los valores estimados y medidos de las variables humedad, salinidad, nitrógeno, arcilla, limo, arena, zinc total, plomo total, cobre total, níquel y hierro bioasimilable y cobre y cadmio soluble (Figura 12), obteniendo como resultado que la desviación media de las ecuaciones es de alrededor del 25%.







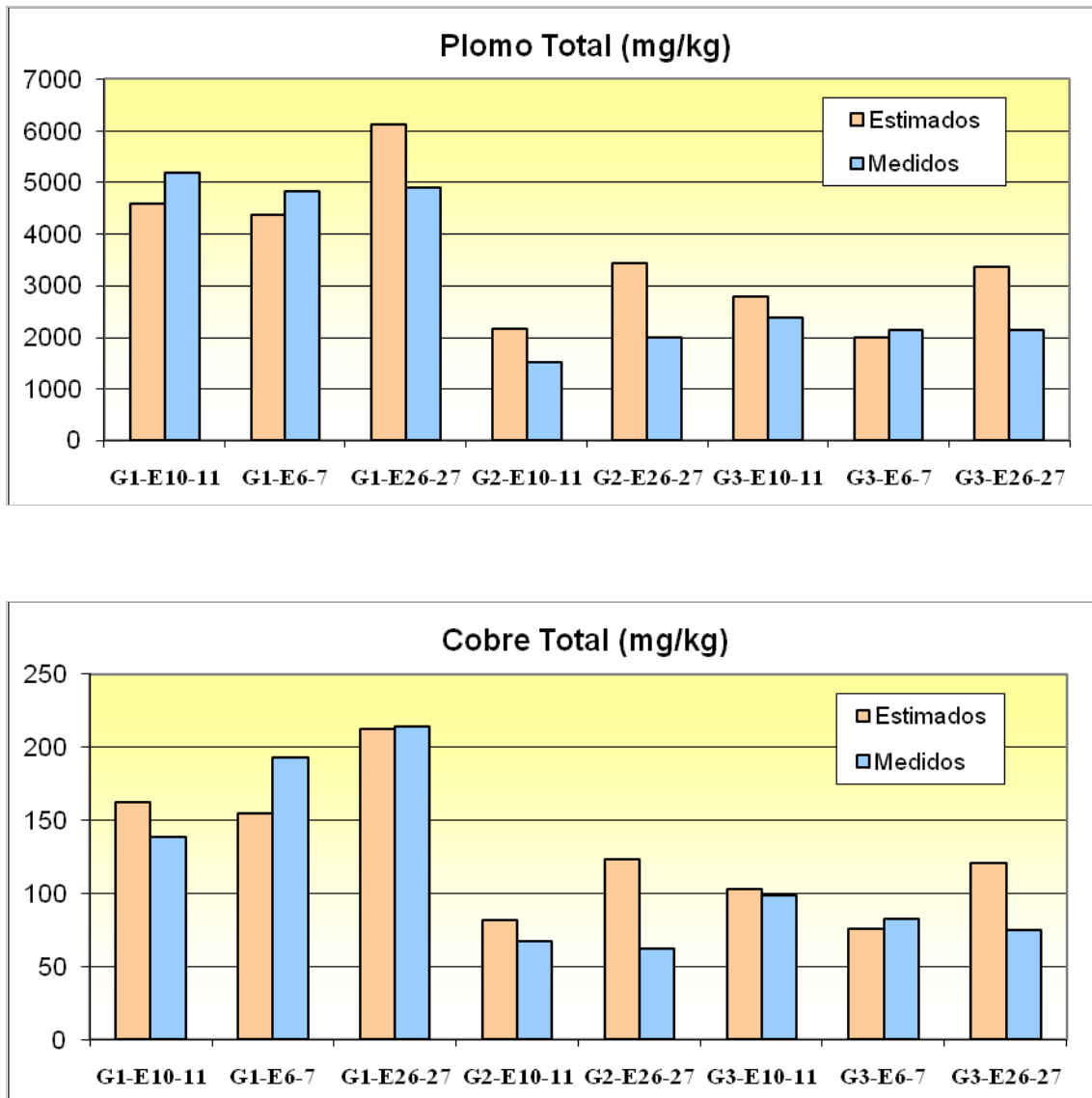


Figura 12: comparación de valores estimados y medidos

5.4. DISCUSIÓN

En base a los resultados obtenidos a partir de los muestreos geofísicos y geoquímicos y del análisis estadístico de los mismos, se ha determinado que las variables que afectan directamente a la resistividad eléctrica de los residuos de la balsa son principalmente la humedad, la salinidad y la presencia de materiales arenosos y arcillosos. Sin embargo, otras variables como el contenido en nitrógeno y algunos metales como el zinc, el plomo, el cobre, el cadmio, el níquel o el hierro, parecen influir en menor medida.

En cuanto a las variaciones de resistividad eléctrica entre los tres perfiles, cabe destacar la gran diferencia de valores que ofrece el perfil G1 respecto de los otros dos. Podemos afirmar que la baja resistividad eléctrica en este perfil se debe principalmente a un incremento en los valores de humedad y salinidad, así como a la presencia de materiales arcillosos. En lo referente a los metales y al nitrógeno, se han detectado pequeñas variaciones al alza respecto de los valores de G2 y G3. Por otro lado, también es posible que estén influyendo parámetros como el pH, el carbono inorgánico y algunos metales como el cadmio, aluminio, níquel etc., pero no se ha podido demostrar estadísticamente la existencia de una relación directa con la variación de la resistividad eléctrica, lo que no implica que la variación conjunta de algunos de estos factores pueda afectar a la resistividad.

Por otra parte, se ha determinado que el elevado valor de los parámetros medidos en el perfil G1 respecto de los otros dos se debe a que está situado en la zona más profunda de la balsa, con lo que en el momento del vertido de los residuos se originó un gradiente de materiales en función de la pendiente, de manera que aquellos con mayor densidad y menor tamaño, como las arcillas, limos y metales, se concentraron más en esta región quedando en el resto una mayor concentración de arenas (más resistivas) y menor cantidad de metales. Del mismo modo, se puede explicar el mayor contenido en humedad del perfil G1, ya que por la composición de los residuos, ricos en arcilla, la tendencia es acumular humedad en sus poros que a su vez actuará de sumidero de metales pesados.

La evaluación de la técnica de tomografía eléctrica dentro de cada una de las secciones se hace más compleja, ya que es muy difícil discernir con claridad en qué grado la variación de los parámetros geoquímicos afectan a la resistividad eléctrica.

Al comparar los perfiles G2 y G3 se puede observar que el contenido en humedad y la salinidad es muy similar entre ambos perfiles. Sin embargo, se aprecia como en los primeros 30 a 50 cm de profundidad el G2 tiene mayores valores de resistividad eléctrica que el G3. Esto puede deberse a la presencia de vegetación en el G3. Se ha constatado que, en suelos forestales, la resistividad eléctrica puede verse alterada por la presencia de vegetación y su sistema radicular, así como por la presencia de materia orgánica (Paillet, 2010). En este estudio, la presencia de materia orgánica viene

determinada por el porcentaje de carbono orgánico que, según los resultados geoquímicos obtenidos, es mayor en el perfil G3 que en el G2. Lo mismo ocurre con el nitrógeno, ya que las plantas son capaces de fijar nitrógeno en el suelo.

Si a todo esto añadimos que el porcentaje de contenido en arcillas y limo es superior en el perfil G3 podemos concluir que el conjunto de estos factores son los que hacen que, presentando valores de humedad y salinidad similares, el perfil G3 presente una menor resistividad que el G2.

En cuanto al contenido en metales, es el perfil G2 el que presenta valores más elevados. Esto puede deberse a su posición en la balsa ya que, a pesar del gradiente que explicamos anteriormente, el perfil G2 se encuentra situado en lo que fue el punto de descarga de manera que conforme se fue colmatando la balsa el efecto de la pendiente se fue atenuando, quedando la mayor parte de los metales concentrados en las capas más superficiales. También entendemos que guarda relación con el contenido en arenas, ya que en el análisis estadístico se obtuvo una correlación significativa entre estas variables.

6. CONCLUSIONES

Podemos concluir que la técnica “tomografía eléctrica” es válida para discriminar cualitativamente diferentes áreas en función de su grado de contaminación. También nos permitirá relacionar los valores de resistividad eléctrica con valores cualitativos de humedad, salinidad, granulometría e incluso de contenido en metales, siempre que las diferencias de resistividad sean relativamente grandes. Para diferencias pequeñas, como las que se nos han presentado dentro de cada uno de los perfiles, se hace muy difícil averiguar a qué se deben los cambios. Sin embargo, estas medidas a una escala menor de lo habitual, resultan bastante prácticas para delimitar mejor dónde hacer sondeos exploratorios. Por otro lado, para depósitos de características similares, debemos poder estimar los valores que obtendríamos de los parámetros humedad, salinidad, nitrógeno, arcilla, limo, arena, zinc, plomo y cobre a partir de las ecuaciones obtenidas en el apartado 5.3., sin necesidad de realizar análisis de laboratorio, teniendo en cuenta una desviación de aproximadamente el 25%.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMET (2004). Guía resumida del Clima en España 1971-2000. Plan Estadístico Nacional, 2001-2004. Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología. Madrid, Ministerio de Medio Ambiente. Disponible en:
<http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=7031&k=mur>
- Acosta, J.A. (2011). Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behavior in mine sites for future reclamation. *Journal of Geochemical Exploration*.
- Allred Barry J., Groom Douglas et al., (2008). Resistivity Methods. En CRC Press Ed. Hand book of agricultural geophysics. Barry J.Allred, Jeffery J. Daniels, M.Reza Ehsani.
- Arana Castillo, R. (2007). El patrimonio geológico de la Región de Murcia. Murcia. Academia de las Ciencias de la Región de Murcia (Ed).
- Arana Castillo, R. (2009). Geología y mineralogía de la Sierra minera de La Unión. En La Sierra Minera de Cartagena- La Unión: un modelo de gestión territorial del patrimonio geológico, ambiental y cultural minero. Edición facsimilar y estudio. Murcia. Ediciones Tres Fronteras.
- Basta, N.T. (2004). Heavy metal and trace element chemistry in residual-treated soil: Implications on metal bioavailability and sustainable land application. En: Sustainable land application Conference, January, 4-8, Florida; University of Florida.
- Bernard J. et al. Multi-electrode resistivity imaging for environmental and mining applications. IRIRS Instrument, Orleans, France.
- Buurman P., van Lagen, B., Veltoorst, E.J. (1996). Manual for Soil and Water Analysis. Backhuys publishers, Technical report, Leiden, Holanda.
- Cobertera, E. (1993). Edafología aplicada. Ediciones Cátedra SA. Madrid. 326 pp

- Crock, J.G., Severson, R.C. (1980). Four reference soil and rock samples for measuring element availability in the western energy regions: U.S. Geological Survey Circular 841, 16 p.
- Daniels, F., Alberty, R.A. (1966). Physical Chemistry. John Wiley and Sons, Inc.
- Dewis, J., Freitas, F. (1970). Physical and chemical methods of soil and water analyses. Soils Bulletin (FAO) Nº10. FAO, Roma.
- Díaz, E., Roldán, A., Lax, A., Albaladejo, J. (1994). Formation of stable aggregates in degraded soil by amendment with urban refuse and peat. *Geoderma* 63, 277-288.
- Frau, F. (2000). The formation-dissolution-precipitation cycle of melanterite at the abandoned pyrite mine of Genna Luas in Sardinia, Italy: environmental implications. *Mineralogical Magazine* 64 (6), 995-1006.
- García, C. (2004). Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la sierra de Cartagena-La unión (Murcia-España). Tesis doctoral. UPCT.
- Geotomo (2012). User Guide of RES2DINV. Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Geotomo software Malaysia. Disponible en www.geotomosoft.com
- Greman, H., Velikonja-Bolta, S., Vodnik, D., Kos, B., Lestan, D. (2001). EDTA enhanced heavy metal phytoextraction: metal accumulation, leaching and toxicity. *Plant Soil* 235, 105-114.
- Kabas, S. et al., (2012). Effect of marble waste and pig slurry on the growth of native vegetation and heavy metal mobility in a mine tailing pond. *Journal of Geochemical Exploration* 123, 69-76.
- Kabata-Pendias, A. (2000). Trace elements in soils and plants. Third Edition. CRC Press, Boca Raton, Florida, 432 p.
- Kalinski, R.J., Kelly, W.E. (1993). Estimating Water Content of soils from electrical resistivity. *Geotech. Test J.* 16, 323-329.
- Keller, G.V., Frischknecht, F.C. (1966). Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press Inc., Oxford.
- Lasat, M. (2001). The uses of plants for removal of toxic metal from contaminated soil. US-EPA

- Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos
- Ley 22/2011 de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados
- Lghoul, M., Teixidó, T., et al., (2012). Electrical and seismic tomography used to image the structure of a Tailings Pond at the abandoned Kettara mine, Morocco. *Mine Water Environ*,31: 53-61
- Lindsay, W.L., Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for Zn, Fe, Mn, and Cu. *Soil Science Society of America Journal* 42, 421-428.
- Loke, M.H. (2013). Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys. Disponible en <http://www.geotomosoft.com/downloads.php>
- Majoribanks, R. (2010). *Geological Methods in Mineral Exploration and Mining*. Springer, 2nd Ed.
- Martín-Crespo, T., et al., (2012). Geoenvironmental characterization of riverbeds affected by mine tailings in the Mazarrón district (Spain), *Journal of Geochemical Exploration*.
- Martínez-Pagán, P., et al., 2009. Electrical Resistivity Imaging revealed the spatial properties of mine tailing ponds in the Sierra Minera of southeast Spain. *JEEG*, 14 (2),63-76.
- Martínez- Pagán, P. (2006). Aplicación de diferentes técnicas no destructivas de prospección geofísica a problemas relacionados con contaminación ambiental producida por diferentes actividades antrópicas en la Región de Murcia. Tesis doctoral. UPCT.
- Martínez Sánchez, M.J., Pérez Sirvent,C. (2007). Niveles de fondo y niveles genéricos de referencia de metales pesados en suelos de la Región de Murcia. Secretaria autonómica para la sostenibilidad. Dirección General de Calidad Ambiental y Universidad de Murcia (Ed).
- Martinez, J., Rey,J. et al.,(2012). Characterization abandoned mining district dams by geophysical (ERI) and geochemical methods: The Linares-La Carolina District (Southern Spain). *Water Air Soil Pollut*, 223:2955-2968.
- McBride, M.B. (1995). Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: are USEPA regulations protective. *Journal of Environmental Quality* 24, 5-18.

- Morales Vallejo, P. (2008). Estadística aplicada a las Ciencias Sociales. Madrid, Universidad Pontificia Comillas.
- Nearing G.S., Tuller, M., et al., (2013). Electromagnetic induction for mapping textural contrast of mine tailing deposits. *Journal of Applied Geophysics*, 89, 11-20.
- Nijland, W., et al.(2010). Detection of soil moisture and vegetation water abstraction in a Mediterranean natural area using electrical resistivity tomography. *Catena* 81, 209-216.
- Paillet, Y., et al., (2010). Monitoring forest soil properties with electrical resistivity. *Biol Fertil Soils*, 46, 451-460.
- Peech M. (1965). Hydrogen-ion activity. En C.A. Black (ed.). *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy. Madison. Wisconsin, USA 2, pp. 914-916.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Rodríguez, R. (1986). *Técnicas y Experimentos en Edafología*. Col·legi Oficial d'Enginyer Agrònoms de Catalunya. Barcelona, 282 p.
- Proyecto IRIS, 2008-2012. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Real Academia Española de la Lengua (RAE): <http://www.rae.es/rae.html>
- Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados
- Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras.
- Rey, E., Jongmans, D., Gotteland, P., Garambois, S. (2006). Characterisation of soils with stony inclusions using geoelectrical measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 58,188-201.
- Reynolds, J.M. (2011). *An Introduction to applied and environmental geophysics*. Oxford, Wiley-blackwell (ed).
- Riechaman M.S.(2002). The responses of plants to metals toxicity: A review focusing on copper, manganese and zinc. Australian Minerals and Energy Environment Foundation, Melbourne, Australia, 54 p.

- Rieuwertz J.S., Thonton I., Farago M.E., Ashmore M.R. (1998). Factors influencing metals bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciation and Bioavailability* 10 (2), 61-75.
- Rodríguez –Fernández, L.R. (2004). Mapa Geológico de España a escala 1:2.000.000. *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.) SGE-IGME, Madrid.
- Ros Amorós, M.J. (1999). Guía ambiental de la minería en la Región de Murcia. Murcia, Universidad de Murcia, Servicio de publicaciones.
- Rosales, R. et al., (2012). Environmental monitoring using electrical resistivity tomography (ERT) in the subsoil of three former petrol stations in SE of Spain. *Water air soil pollut*, 223, 3757-3773.
- Samouëlian et al. (2005).Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil & Tillage Research*,83, 173-193.
- Scott, D. y Thomas, J.H (1977). Comparative efficiencies of various methods for extracting trace heavy metals from soils. *Soil Science* 124, 319-322
- Silviera M.L.A., Alleon, L.R.F, Guilherme, L.R.G. 2003. Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola* 60 (4), 793-806.
- Soil Science Society of America (1986). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Klute, A (ed.). Madison. 1188 p.
- Storz, H., Storz, W., Jacobs, F. (2000). Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust. *Geophysical prospecting*, 48,455-471.
- Styles, P. (2012). *Environmental Geophysics. Education Tour Series*. EAGE Publications bv.
- USDA (1999). *Soil Quality Test Kit Guide*. United Stated Department of Agriculture (Ed.). Washington. 82 p.
- Vera, J.A. (2004). *Geología de España*. SGE-IGME. Madrid, 890p.

