



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**COMPARACIÓN ENTRE LA APLICACIÓN DE KRIGING Y COKRIGING PARA
ESTIMAR ESPECIES DE COBRE EN UN YACIMIENTO TIPO PÓRFIDO
CUPRIFERO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

GUSTAVO ALEJANDRO NAVARRO POPPE

PROFESOR GUÍA:

XAVIER EMERY

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ALEJANDRO CÁCERES SAAVEDRA

CRISTIAN QUIÑONES CONSTANZO

Memoria Parcialmente Financiada por CONICYT

SANTIAGO DE CHILE

2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS
POR: GUSTAVO A. NAVARRO POPPE
FECHA: 18 DE AGOSTO DEL 2020
PROF. GUÍA: XAVIER EMERY**

***COMPARACIÓN ENTRE LA APLICACIÓN DE KRIGING Y COKRIGING PARA
ESTIMAR ESPECIES DE COBRE EN UN YACIMIENTO TIPO PÓRFIDO CUPRIFERO***

La necesidad de predecir variables regionalizadas, sean contaminantes, metales valiosos u otros, a partir de la toma de muestras, ha impulsado el desarrollo de varias disciplinas, siendo de las más importantes la geoestadística. Las herramientas de esta área matemática combinan la información estadística de las variables de interés y sus relaciones espaciales, permitiendo definir funciones que estiman sus valores, en puntos no muestreados del espacio. Sin perjuicio de lo anterior, las técnicas de estimación geoestadística han resuelto muchos y variados problemas que surgen al querer aplicar estos métodos eficientemente. Algunos de éstos son comunes y fáciles de abordar, como es la estacionaridad y aditividad de las variables, pero otros son peculiares y ciertamente poco tratados, a pesar incluso de ser recurrentes en la industria.

Uno de estos problemas se da cuando las variables que se desea estimar tienen un mismo elemento de interés y muestran relaciones de desigualdad o relaciones entre sus valores promedio, lo que se da en depósitos con varios grupos de menas del elemento de interés, los cuales tienen que ser cuantificados separadamente debido a los requerimientos de alguna de las etapas aguas abajo en el proceso minero y/o metalúrgico.

Este trabajo presenta los resultados, comparaciones y análisis de la estimación de tres especies de cobre (cobre total CuT, cobre soluble CuS y cobre cianurable CuCN) y su uso para el cálculo de Recursos Minerales de un depósito tipo pórfido cuprífero, a partir de la aplicación de un interpolador tradicional de kriging ordinario (OK), y uno propuesto, denominado cokriging con medias relacionadas (CKM). Para esto se trabaja cuatro casos de estudio, donde se añade el desagrupamiento y capping de los compósitos a razón de evaluar la sensibilidad de éstos.

Las comparaciones y análisis indican como favorable el uso de la metodología de interpolación propuesta (CKM), en términos de que logra solventar las dificultades (inconsistencias de leyes estimadas) que se presenta con la metodología tradicional (OK), sin sacrificar calidad y precisión.

Agradecimientos

Primero agradecer a mi familia. A mis dos padres, los cuales me han guiado e inculcado aquellas cosas que hoy me hacen la persona que soy, pero, sobre todo, por el amor con el que me han hecho crecer. A mis hermanos, de los que he aprendido, y espero haberles enseñado de lo poco que se. Por esto, gracias familia, saben que los amo y espero que nos tengamos por siempre.

Agradecer a mis familiares en Bolivia, por su cariño, preocupación y apoyo constante en mis proyectos, particularmente en mis estudios.

Agradecer a todos mis grupos de amigos. Los de Bolivia (Edu, José, Cristian, Busti, Paco, Pistacho, Hana, Lore, etc), gracias por crecer conmigo y seguir haciéndolo, incluso a la distancia. A los del departamento de minas (Lucho, Camilo, Mati, Javi, Sebas, Maca, Vale, Coni, etc), gracias por estos cuatro años donde compartimos experiencias de todos los gustos y colores. Y a mis “Amigos Chilenos” (Juan, Pablo, Manen, Fran, Isi, Lore, Mayo), gracias por haber querido agregarme a su grupo especial, y ciertamente perdón por si es que ahora se arrepiente un poco.

Agradecer a los Profesores Amaya, Casali, Troncoso, Vargas y muchos más, que talvez sin saberlo, incidieron en mi camino por la Universidad, por varios tipos de enseñanzas. En particular al Profesor Emery quien, desde el primer curso hasta la realización de esta memoria, ha mostrado siempre su buena disposición para guiar, apoyar y enseñar.

Agradecer a la empresa Wood, por permitirme trabajar con ellos, ganando experiencia en muchas de las áreas que me interesan profesionalmente, particularmente a Cristian Q., Cristina J., Antonio y Camilo, por su apoyo en el trabajo y buena voluntad, permitiéndome desarrollar mis primeros pasos laborales. Y a mi amigo Carlos, por su disposición a que esto se diera a lugar.

Agradecer al Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile y al Advanced Mining Technology Center de la Universidad de Chile, y su gente. Por haberme entregado conocimiento y darme la confianza para realizar mi memoria.

Así también agradecer a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo, mediante los proyectos AFB180004 PIA CONICYT (AMTC) y CONICYT/ FONDECYT/ REGULAR/ N°1170101, permitiendo que esta memoria sea un instrumento de investigación.

Finalmente declarar que, dado el solo el hecho de haber llegado a esta Universidad siendo una persona ajena a este país, me afirma sin lugar a dudas que hay casi innumerables personas a las que les agradezco mucho, y que a pesar de no logré incluir en esta única hoja, dejo en constancia que siempre estarán en mi memoria.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Motivación	1
1.2.	Planteamiento del Problema	3
1.3.	Objetivo General	4
1.4.	Objetivos Específicos	4
1.5.	Alcances	4
1.6.	Hipótesis	5
2.	ANTECEDENTES	6
2.1.	Modelamiento Geoestadístico	6
2.1.1	Variable Regionalizada y Función Aleatoria	6
2.1.2	Estacionaridad de Segundo Orden.....	6
2.1.3	Momentos de Primer y Segundo Orden	7
2.1.4	Variografía Experimental Directa y Cruzada.....	8
2.2.	Modelamiento Variográfico	10
2.3.	Kriging y Cokriging	11
2.3.1	Descripción General del Cokriging Ordinario.	12
2.3.2	Descripción del Cokriging con Medias Relacionadas	14
3.	METODOLOGÍA	17
4.	CASOS DE ESTUDIO	21
4.1.	Revisión del Proyecto	21
4.1.1	Descripción General	21
4.1.2	Unidades Litológicas	22
4.1.3	Zonas de Mineralización.....	23
4.1.4	Base de Datos	25
4.1.5	Pruebas Metalúrgicas.....	27
4.2.	Selección de los Dominios de Estimación	29
4.3.	Caracterización de los Casos de Estudio	30
4.4.	Estudio Estadístico.....	31
4.4.1	Compositación	31
4.4.2	Desagrupamiento y Capping	32
4.4.3	Determinación de las Relaciones entre Leyes Medias.....	35
4.5.	Modelamiento Variográfico	37

4.6.	Definición de Planes de Estimación y Ejecución de la Interpolación.....	43
4.7.	Validación.....	53
4.7.1	Validación Estadística.....	53
4.7.2	Validación Visual.....	57
4.8.	Cálculo de Recursos Minerales.....	64
4.8.1	Secuencia de Actualización	65
4.8.2	Asignación de Densidad	66
4.8.3	Clasificación	66
4.8.4	Cálculo de la Envoltente Económica y Cubicación	66
5.	COMPARACIONES Y ANÁLISIS	69
5.1.	Comparaciones de Estimación Local	69
5.2.	Comparaciones Estadísticas	76
5.3.	Análisis de Resultados.....	79
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
6.1.	Recomendaciones	86
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	87
8.	ANEXOS.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Resumen de las perforaciones generadoras de la base de datos	26
Tabla 4-2: Resultados de las recuperaciones metalúrgicas en las pruebas de botella	28
Tabla 4-3: Resumen de los valores de recuperación metalúrgica por especie y proceso metalúrgico	29
Tabla 4-4: Descripción de las características de los casos de estudio	30
Tabla 4-5: Resumen de la base de datos separada por especie y dominio de estimación	31
Tabla 4-6: Estadísticas de los compósitos originales (datos A) para las especies de interés	32
Tabla 4-7: Estadística de los compósitos desagrupados y con capping (datos B) para las especies de interés	35
Tabla 4-8: Coeficientes de relación entre las medias de las especies de cobre para todos los dominios de estimación	37
Tabla 4-9: Método de estimación y direcciones de anisotropía interpretables del caso base 1 y 2 para cada dominio de estimación	38
Tabla 4-10: Resumen de los parámetros variográficos para la interpolación por kriging ordinario	39
Tabla 4-11: Direcciones de anisotropía interpretables del caso propuesto 1 y 2 para cada dominio de estimación	41
Tabla 4-12: Límites del modelo de bloques.....	43
Tabla 4-13: Parámetros de los planes de estimación para los cuatro casos de estudio	44
Tabla 4-14: Resumen de la interpolación del caso base 1	46
Tabla 4-15: Resumen de la interpolación del caso base 2	48
Tabla 4-16: Resumen de la interpolación del caso propuesto 1 (efecto estimaciones negativas).....	49
Tabla 4-17: Resumen de la interpolación del caso propuesto 1	50
Tabla 4-18: Resumen de la interpolación del caso propuesto 2 (efecto estimaciones negativas).....	51
Tabla 4-19: Resumen de la interpolación del caso propuesto 2	52
Tabla 4-20: Resultados de la validación cruzada para los dos métodos de interpolación en el sulfuro secundario fuerte.....	54
Tabla 4-21: Resultados de la validación cruzada para los dos métodos de interpolación en el sulfuro secundario débil	54
Tabla 4-22: Resultados de la validación cruzada para los dos métodos de interpolación en el sulfuro primario con ley.....	54
Tabla 4-23: Estadísticas de las variables estimadas del caso base 1	55
Tabla 4-24: Estadísticas de las variables estimadas del caso propuesto 1.....	56
Tabla 4-25: Estadísticas de las variables estimadas del caso base 2	56
Tabla 4-26: Estadísticas de las variables estimadas del caso propuesto 2.....	57
Tabla 4-27: Parámetros para la optimización del pit	67
Tabla 4-28: Resumen de la ubicación de los dominios de estimación en la envolvente de recursos minerales para cada caso de estudio.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Diagrama de la región de búsqueda para el cálculo del variograma experimental en el plano horizontal	10
Figura 2-2: Ejemplo del variograma de la función esférica, marcando su meseta y alcance.	11
Figura 4-1: Vista en planta del terreno del proyecto y las perforaciones incluidas en el estudio.....	27
Figura 4-2: Vista en planta de los dominios de sulfuros primarios y secundarios con la línea de corte transversal A-A'	30
Figura 4-3: Box-plot del cobre total en el sulfuro secundario fuerte (izq) y débil (der) de la base original y desagrupada	34
Figura 4-4: Box-plot del cobre total en el sulfuro primario con ley (izq) y estéril (der) de la base original y desagrupada	34
Figura 4-5: Relación lineal entre el CuT y CuS (izq) y el CuT y CuCN (der) del secundario fuerte	36
Figura 4-6: Mapa variográfico (izq) y pares calculados (der) del cobre total en el dominio secundario fuerte	38
Figura 4-7: Mapa variográfico cruzado (izq) y pares calculados (der) del CuT/CuS en el sulfuro secundario fuerte	40
Figura 4-8: Mapa variográfico cruzado (izq) y pares calculados (der) del CuT/CuCN en el sulfuro secundario fuerte.....	41
Figura 4-9: Parámetros de estimación por cokriging en el sulfuro secundario fuerte	45
Figura 4-10: Dispersión del CuS/CuT (izq) y CuCN/CuT (der) de los bloques con inconsistencias en el dominio sulfuro secundario fuerte del caso base 1	46
Figura 4-11: Dispersión del CuS/CuT (izq) y CuCN/CuT (der) de los bloques con inconsistencias en el dominio sulfuro secundario débil del caso base 1.....	47
Figura 4-12: Dispersión del CuS/CuT (izq) y CuCN/CuT (der) de los bloques con inconsistencias en el dominio sulfuro secundario fuerte del caso base 2.....	48
Figura 4-13: Dispersión del CuS/CuT (izq) y CuCN/CuT (der) de los bloques con inconsistencias en el dominio sulfuro secundario débil del caso base 2.....	49
Figura 4-14: Dispersión del CuS/CuT (izq) y CuCN/CuT (der) de los bloques con inconsistencias en el dominio sulfuro secundario débil del caso propuesto 1	51
Figura 4-15: Dispersión del CuS/CuT (izq) y CuCN/CuT (der) de los bloques con inconsistencias en el dominio sulfuro secundario débil del caso propuesto 2.....	52
Figura 4-16: Corte A-A' en el dominio secundario fuerte mostrando las leyes de cobre soluble (sup) y cobre cianurable (inf) de las muestras de la base de datos A	58
Figura 4-17: Corte A-A' en el secundario fuerte mostrando las leyes de bloque del cobre soluble [izq] en el caso base 1 (sup) y propuesto 1 (inf) y del cobre cianurable [der] en el caso base 1 (sup) y propuesto 1 (inf).....	59
Figura 4-18: Corte A-A' en el dominio secundario débil mostrando las leyes de cobre soluble (sup) y cobre cianurable (inf) de las muestras de la base de datos A.....	60
Figura 4-19: Corte A-A' en el secundario débil mostrando las leyes de bloque del cobre soluble [izq] en el caso base 1 (sup) y propuesto 1 (inf) y del cobre cianurable [der] en el caso base 1 (sup) y propuesto 1 (inf).....	61
Figura 4-20: Corte A-A' en el dominio primario con ley mostrando las leyes de cobre soluble (sup) y cobre cianurable (inf) de las muestras de la base de datos A.....	62

Figura 4-21: Corte A-A' en el primario con ley mostrando las leyes de bloque del cobre soluble [izq] en el caso base 1 (sup) y propuesto 1 (inf) y del cobre cianurable [der] en el caso base 1 (sup) y propuesto 1 (inf).....	63
Figura 4-22: Secuencia para la actualización de leyes	65
Figura 5-1: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuT en el secundario fuerte con los datos A	70
Figura 5-2: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuS en el secundario fuerte con los datos A	70
Figura 5-3: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuCN en el secundario fuerte con los datos A	71
Figura 5-4: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuT en el secundario débil con los datos A	72
Figura 5-5: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuS en el secundario débil con los datos A	73
Figura 5-6: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuCN en el secundario débil con los datos A	73
Figura 5-7: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuT en el primario con ley con los datos A	74
Figura 5-8: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuS en el primario con ley con los datos A	75
Figura 5-9: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuCN en el primario con ley con los datos A	76
Figura 5-10: Comparación estadística de los casos en el dominio sulfuro secundario fuerte usando la base de datos A (izq) y la base de datos B (der)	77
Figura 5-11: Comparación estadística de los casos en el dominio sulfuro secundario débil usando la base de datos A (izq) y la base de datos B (der)	78
Figura 5-12: Comparación estadística de los casos en el dominio sulfuro primario con ley usando la base de datos A (izq) y la base de datos B (der)	79

ANEXOS

Anexo 8-1: Vista isométrica de la topografía del proyecto	88
Anexo 8-2: Resumen del material por zona mineralizada al interior del pit de reserva preliminar del proyecto	88
Anexo 8-3: Corte A-A' de los dominios secundario fuerte (azul), secundario débil (celeste) y primario con ley (rojo)	88
Anexo 8-4: Probabilidad acumulada de cobre total de los compósitos declusterizados en los dominios de estimación	89
Anexo 8-5: Dispersión de la variable de estimación del coeficiente para la relación entre CuS y CuT con los datos A, en el secundario fuerte (izq-sup), secundario débil (der-sup), primario con ley (izq-inf) y primario estéril (der-inf).....	89
Anexo 8-6: Dispersión de la variable de estimación del coeficiente para la relación entre CuCN y CuT con los datos A, en el secundario fuerte (izq-sup), secundario débil (der-sup), primario con ley (izq-inf) y primario estéril (der-inf).....	90
Anexo 8-7: Dispersión de la variable de estimación del coeficiente para la relación entre CuS y CuT con los datos B, en el secundario fuerte (izq-sup), secundario débil (der-sup), primario con ley (izq-inf) y primario estéril (der-inf).....	91
Anexo 8-8: Dispersión de la variable de estimación del coeficiente para la relación entre CuCN y CuT con los datos B, en el secundario fuerte (izq-sup), secundario débil (der-sup), primario con ley (izq-inf) y primario estéril (der-inf).....	91
Anexo 8-9: Variogramas modelados del dominio sulfuro secundario fuerte para el cobre total (sup-izq), el cobre soluble (sup-der) y el cobre cianurable (inf).....	92
Anexo 8-10: Variogramas modelados del dominio sulfuro secundario débil para el cobre total (sup-izq), el cobre soluble (sup-der) y el cobre cianurable (inf).....	93
Anexo 8-11: Variogramas modelados para el cobre total en primario con ley (izq) y estéril (der).....	94
Anexo 8-12: Resumen de la interpolación de leyes de los casos base 1 y 2	94
Anexo 8-13: Variogramas directos y cruzados modelados del dominio sulfuro secundario fuerte para el cobre total (sup-izq), el cobre soluble (sup-der), el cobre cianurable (med-izq), el cobre soluble/cobre cianurable (med-der), cobre total/cobre cianurable (inf-izq) y el cobre total/cobre soluble (inf-der)	95
Anexo 8-14: Variogramas directos y cruzados modelados del dominio sulfuro secundario débil para el cobre total (sup-izq), el cobre soluble (sup-der), el cobre cianurable (med-izq), el cobre soluble/cobre cianurable (med-der), cobre total/cobre cianurable (inf-izq) y el cobre total/cobre soluble (inf-der)	96
Anexo 8-15: Variogramas directos y cruzados modelados del dominio sulfuro primario con ley para el cobre total (sup-izq), el cobre soluble (sup-der), el cobre cianurable (med-izq), el cobre soluble/cobre cianurable (med-der), cobre total/cobre cianurable (inf-izq) y el cobre total/cobre soluble (inf-der)	97
Anexo 8-16: Variogramas directos y cruzados modelados del dominio sulfuro primario estéril para el cobre total (sup-izq), el cobre soluble (sup-der), el cobre cianurable (med-izq), el cobre soluble/cobre cianurable (med-der), cobre total/cobre cianurable (inf-izq) y el cobre total/cobre soluble (inf-der)	98
Anexo 8-17: Parámetros de estimación por cokriging en el sulfuro secundario débil	99
Anexo 8-18: Parámetros de estimación por cokriging en el sulfuro primario con ley.....	99
Anexo 8-19: Parámetros de estimación por cokriging en el sulfuro primario estéril	100
Anexo 8-20: Relación entre el CuT y las leyes negativas de CuS en el secundario fuerte del caso propuesto 1	100

Anexo 8-21: Relación entre el CuT y las leyes negativas de CuS en el primario con ley del caso propuesto 1	101
Anexo 8-22: Relación entre el CuT y las leyes negativas de CuS en el secundario fuerte del caso propuesto 2	101
Anexo 8-23: Relación entre el CuT y las leyes negativas de CuS en el primario con ley del caso propuesto 2	102
Anexo 8-24: Dominio secundario fuerte mostrando la línea de corte A-A'	102
Anexo 8-25: Dominio secundario débil mostrando la línea de corte A-A'	102
Anexo 8-26: Corte A-A' en el dominio secundario fuerte mostrando las leyes de cobre soluble (sup) y cobre cianurable (inf) de las muestras de la base de datos B	103
Anexo 8-27: Corte A-A' en el secundario fuerte mostrando las leyes de bloque del cobre soluble [izq] en el caso base 2 (sup) y propuesto 2 (inf) y del cobre cianurable [der] en el caso base 2 (sup) y propuesto 2 (inf).....	104
Anexo 8-28: Corte A-A' en el dominio secundario debil mostrando las leyes de cobre soluble (sup) y cobre cianurable (inf) de las muestras de la base de datos B	105
Anexo 8-29: Corte A-A' en el secundario débil mostrando las leyes de bloque del cobre soluble [izq] en el caso base 2 (sup) y propuesto 2 (inf) y del cobre cianurable [der] en el caso base 2 (sup) y propuesto 2 (inf).....	106
Anexo 8-30: Dominio primario con ley mostrando la línea de corte A-A'	107
Anexo 8-31: Corte A-A' en el dominio primario con ley mostrando las leyes de cobre soluble (sup) y cobre cianurable (inf) de las muestras de la base de datos B	107
Anexo 8-32: Corte A-A' en el primario con ley mostrando las leyes de bloque del cobre soluble [izq] en el caso base 2 (sup) y propuesto 2 (inf) y del cobre cianurable [der] en el caso base 2 (sup) y propuesto 2 (inf).....	108
Anexo 8-33: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuT en el secundario fuerte con los datos B	109
Anexo 8-34: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuS en el secundario fuerte con los datos B	110
Anexo 8-35: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuCN en el secundario fuerte con los datos B.....	110
Anexo 8-36: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuT en el secundario débil con los datos B	111
Anexo 8-37: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuS en el secundario débil con los datos B	112
Anexo 8-38: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuCN en el secundario débil con los datos B	112
Anexo 8-39: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuT en el primario con ley con los datos B	113
Anexo 8-40: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuS en el primario con ley con los datos B	114
Anexo 8-41: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuCN en el primario con ley con los datos B	114

1. INTRODUCCIÓN

En la industria minera existen diversas etapas para poder llegar a definir Reservas Mineras, las cuales posteriormente se evalúan para estudiar el beneficio económico de su extracción. Dentro de esta cadena, la estimación de Recursos Minerales es crítica, dado que ésta define la cantidad y calidad del material valioso que se desea extraer, por lo que es la base para una correcta definición de Reservas Mineras y su posterior evaluación. En estos, los resultados entregan la cantidad, que es informada en términos de la masa del material mineral que contiene las especies de interés (tonelaje), y la calidad, que se informa en términos de concentración (ley) o porcentaje respecto a la masa del material que contiene la especie.

Como en cualquier negocio, la minería busca maximizar el beneficio de la extracción de minerales, cuestión que desde hace un tiempo tiene a la geoestadística como uno de sus pilares principales, por ser útil en la cuantificación de la incertidumbre respecto de la valorización de los proyectos, y también en la estimación de variables y parámetros técnicos usados en la planificación minera, como por ejemplo la recuperación metalúrgica. En este sentido, a través del tiempo y desde sus inicios, la geoestadística ha tenido un gran desarrollo, presentando en las últimas décadas técnicas como la estimación multivariable y simulación para generar escenarios geológicos - geometalúrgicos, por mencionar algunas. Estas nuevas técnicas, permiten un mejor manejo de la incertidumbre y entendimiento de las variables, buscando que al final del proceso las decisiones sean tomadas en base a información de calidad y lo más precisa posible, para permitir la captura de valor en los procesos del negocio minero.

1.1. Motivación

La necesidad de predecir variables regionalizadas, sean contaminantes, metales valiosos u otros, a partir de la toma de muestras, ha impulsado el desarrollo de varias disciplinas, siendo una de las más importante la geoestadística. Las herramientas de esta área matemática combinan la información estadística de las variables de interés y sus relaciones espaciales, permitiendo definir funciones que estiman los valores de las variables, en puntos no muestreados del espacio. Sin perjuicio de lo anterior, las técnicas de estimación geoestadística han resuelto muchos y variados problemas que surgen al querer aplicar estos métodos eficientemente. Algunos de éstos son comunes y fáciles de abordar, como es la estacionaridad y aditividad de las variables, pero otros son peculiares y ciertamente poco tratados, a pesar incluso de ser recurrentes en la industria.

Un problema común que se ha debido enfrentar, tiene relación con la estimación en escenarios donde se presenta una falta de muestras representativas, por ejemplo, cuando se tienen bases de datos de varias variables de interés, pero éstas son parcial o totalmente heterotópicas (es decir, no todas las variables están medidas en todos los sitios de muestreo). El muestreo heterotópico en la minería es común, siendo las siguientes algunas de las razones por las que ocurre:

- a) Sensibilidad variable de las especies de interés en las muestras, respecto a la técnica de análisis elemental aplicado.
- b) Decisiones técnico-económicas para realizar muestreos preferenciales de ciertas especies en el depósito.
- c) Mezcla y/o pérdida de información en la base de datos por traspaso, venta u otro, del proyecto minero.

Una de las técnicas desarrolladas para enfrentar este problema es la interpolación por cokriging, el cual es un método de estimación multivariable que puede aplicarse sin mucha dificultad para estimar variables secundarias usando las correlaciones presentes respecto a una variable primaria en la base de datos, siendo ejemplos la estimación de molibdeno con muestras de cobre en un pórfido “Cu-Mo” o la estimación de fósforo en un depósito de hierro. Esta técnica es de aplicación directa cuando las variables muestran correlaciones cruzadas, indiferentemente de que la base de datos sea homotópica o parcialmente heterotópica. Sin embargo, surge una dificultad en el modelamiento, cuando las variables que se desea estimar tienen un mismo elemento de interés y muestran relaciones de desigualdad o relaciones entre sus valores promedio, lo que se da en depósitos con varios grupos de menas del elemento, los cuales tienen que ser cuantificados separadamente debido a los requerimientos de alguna de las etapas aguas abajo en el proceso minero y/o metalúrgico. En estos casos la industria parece no tener considerado un método estándar, por lo que existen distintas metodologías de trabajo propuestas, la mayoría dentro del marco del proceso tradicional de interpolación mediante kriging ordinario. En la revisión de casos relativamente actuales (Copper Mountain Mine), se puede encontrar procedimientos que se basan en el cálculo de razones porcentuales a partir de los valores interpolados de todas las especies en el modelo de bloques, con las que luego se calculan las leyes finales de las especies en los bloques, aplicando sobre los valores totales estimados las razones previamente calculadas. En general el uso de ecuaciones lineales o proxis para corregir o actualizar los valores aparecen en alguna parte del proceso, lo cual se aleja considerablemente de las bases del uso de la geoestadística. En casos como los recién descritos, incluso la técnica de cokriging puede conllevar a problemas en el proceso de la evaluación de Recursos Minerales.

A raíz de estos dos problemas recién descritos, los que son frecuentes en los proyectos mineros, la geoestadística ha formulado soluciones, las que aún son poco conocidas o empleadas en la industria, sin embargo, muestran tener un alto potencial para obtener información valiosa que se traduce en la captura de valor, el aumento de beneficio y un mejor manejo de la incertidumbre en los proyectos.

1.2. Planteamiento del Problema

El desarrollo de la memoria considera una base de datos de un proyecto con muestras parcialmente heterotópicas de leyes de varios tipos de cobre (cobre total CuT , cobre soluble CuS , cobre cianurable $CuCN$ y cobre insoluble CuI), donde la variable principal es la ley de cobre total. El proyecto requiere la construcción de un modelo de bloques con las cuatro variables, con el fin de poder usarlas para estimar las recuperaciones (extracción metalúrgica) de cobre total del proceso de lixiviación de minerales de cobre en pilas ROM y estáticas. Adicionalmente, se tiene resultados de pruebas metalúrgicas de pequeña y mediana escala, sin embargo, dada su baja cantidad son difíciles de estimar por separado, ya que no poblarían efectivamente el modelo de bloques bajo ningún plan de estimación factible. No obstante, se ha establecido que los dominios de estimación están controlados por las zonas de mineralización metálica, las cuales, dado que el depósito es un pórfido cuprífero, están caracterizadas por las relaciones entre las cantidades de cobre total, cobre soluble y cobre cianurable. En este sentido, se tiene bien definido para cada uno de los dominios, las razones medias entre los distintos tipos de cobre, la cual es información adicional que puede robustecer el modelamiento. Por tanto, combinando la necesidad de estimar variables heterotópicas, junto con el conocimiento general de las relaciones de medias que tiene el cobre total con las otras variables, se tiene las condiciones para poder aplicar la metodología de cokriging con medias relacionadas para estimar los cuatro tipos de cobre. Si bien posterior a la estimación multivariable se requiere determinar ciertas reglas de corrección o actualización para mantener la relación que indica que la suma de las leyes de las especies de cobre en un bloque es igual al cobre total en el bloque ($CuT = CuS + CuCN + CuI$), la memoria estará enfocada en comparar la efectividad de la metodología y sus efectos en el cálculo de Recursos Minerales, respecto a casos donde se estima las variables de forma independiente usando kriging ordinario, en las que también se incluyen ciertos análisis de sensibilidad.

1.3. Objetivo General

Comparar los Recursos Minerales calculados y las leyes de cuatro tipos de cobre, por la aplicación del interpolador cokriging con medias relacionadas, respecto a casos base realizados mediante la metodología tradicional de interpolación a través del uso de kriging ordinario.

1.4. Objetivos Específicos

- Diseñar cuatro casos de estudio, considerando un grupo que usa la metodología tradicional y otro que usa la propuesta de cokriging con medias relacionadas.
- Realizar el estudio exploratorio de datos para definir los parámetros de estimación y la base datos para los casos que agregan desagrupamiento y capping.
- Modelar variogramas directos y cruzados para las tres especies de cobre en todos los dominios de estimación elegidos del proyecto y para todos los casos.
- Diseñar planes de estimación bajo criterios comparativos y consistentes.
- Realizar la estimación tradicional de las especies de cobre.
- Realizar la estimación multivariable de las especies de cobre.
- Definir una secuencia de actualización de leyes en los bloques para obtener modelos consistentes para la estimación de recursos mineros.
- Comparar y analizar los resultados de los cuatro casos planteados en términos de eficiencia de estimación (inconsistencias, sesgo global y precisión del interpolador), estadística general de la interpolación y comportamiento local de las leyes.
- Comparar y analizar los resultados del cálculo de recursos, en términos de tonelaje, leyes medias y metal contenido.

1.5. Alcances

Este trabajo evalúa la aplicación de cokriging con medias relacionadas, como técnica para la interpolación de variables sujetas a relaciones lineales entre ellas, considerando además una base de datos heterotópica.

En la memoria se considera como bien definido el modelo geológico, por tanto, no se realizan cambios al respecto. De forma similar, no se desarrolla un estudio exploratorio de datos particular para definir los dominios de estimación, sin embargo, sí se presenta algunos resultados estadísticos para enfocar los trabajos del estudio en tres de los ocho dominios existentes (Sulfuro

Primario Calcopirítico “con ley”, Sulfuro Secundario Débil y Sulfuro Secundario Fuerte). Se plantea específicamente cuatro casos, dos con metodología tradicional y dos con estimación multivariable, donde cada tipo de metodología considera un caso que incluye desagrupamiento y capping, logrando así estudiar la sensibilidad de los interpoladores a las leyes altas y el efecto de sobre muestreo. Los cuatro casos son comparados en términos de los elementos descritos anteriormente, antes de ser ajustados con una técnica propuesta de actualización de leyes para obtener modelos de bloques consistentes y útiles para la estimación de recursos. Los resultados de cada etapa son ordenados y comentados.

Si bien el proyecto tiene varias etapas a realizar en concordancia con el interés del dueño del mismo, se tiene que la memoria considera especialmente el enfoque geoestadístico, donde se plantean comparaciones de los casos de estudio en todas las etapas realizadas en este trabajo, desde el estudio exploratorio de datos, hasta el cálculo de recursos mineros.

1.6. Hipótesis

Respecto a los resultados de los casos con la metodología propuesta, se espera que las variables primarias (ley de cobre soluble y ley de cobre cianurable) mejoren su calidad de estimación (muestren similitud con las muestras localmente), teniendo como soporte las relaciones que tienen con la variable correlacionada cobre total. Adicionalmente, en un sentido más práctico, se espera que los modelos presenten menos cantidad de bloques que requieran corregir alguna de estas variables, reflejando en los Recursos Minerales menores leyes.

2. ANTECEDENTES

2.1. Modelamiento Geoestadístico

El proceso de estimación geoestadística tiene una metodología bien definida, la cual va transformando la información de entrada (sondajes de exploración, muestras de producción, etc.), mediante la aplicación de diversas herramientas, en los componentes principales para realizar los procesos de interpolación. Buscando poder desarrollar con claridad el trabajo de memoria, se presentan las siguientes definiciones y conceptos básicos para el estudio.

2.1.1 Variable Regionalizada y Función Aleatoria

Se nombra variable regionalizada, denotada como $\{z(x), x \in D \subset R^3\}$, a una variable que se distribuye en una región o dominio “D” del espacio y presenta cierta continuidad en sus valores. En geoestadística, esta variable se interpreta como una realización de una función aleatoria, denotada como $\{Z(x), x \in D \subset R^3\}$, que a cualquier punto “x” perteneciente a D asocia una variable aleatoria $Z(x)$. El dominio en general es de dimensión tres para aplicaciones mineras. La función aleatoria se puede caracterizar por su distribución espacial, que contiene a todas las distribuciones finito-dimensionales de la forma:

$$\forall n \in N, \forall x_1, \dots, x_n \in R^3, \forall z_1, \dots, z_n \in R$$
$$F(z_1, \dots, z_n; x_1, \dots, x_n) = Prob\{Z(x_1) \leq z_1, \dots, Z(x_n) \leq z_n\} \quad (1)$$

2.1.2 Estacionaridad de Segundo Orden

El hecho de contar con información escasa y fragmentaria sobre la variable regionalizada, limita la posibilidad de determinar la distribución espacial, por lo cual es necesario realizar simplificaciones que permitan aplicar la inferencia estadística a partir de las propiedades más relevantes de las variables aleatorias.

La estacionaridad de segundo orden establece que para una función aleatoria cualquiera, los valores de sus dos primeros momentos (esperanza y función de covarianza) existen y son invariantes por traslación (Rivoirard, 2003). En otras palabras, la relación espacial entre puntos en una determinada configuración, se mantiene independiente de la ubicación de dicha configuración. Para los efectos de la estimación, es razonable suponer que se cumple por lo menos a escala local.

2.1.3 Momentos de Primer y Segundo Orden

En la geoestadística lineal, basta considerar los dos primeros momentos de las funciones aleatorias, para poder desarrollar las herramientas del proceso de estimación. El momento de orden 1 corresponde al valor esperado o esperanza matemática de la variable aleatoria $Z(x)$, y se define de forma general como:

$$m(x) = E[Z(x)] \quad (2)$$

Aplicando el concepto de estacionaridad de segundo orden, se tiene que la media deja de ser función de su posición en el espacio, teniendo un valor constante denotado por “ m ”.

Dentro del grupo de los momentos de segundo orden, son relevantes tanto la varianza como la covarianza. La varianza es una medida de la dispersión de la variable aleatoria $Z(x)$ en torno a su valor esperado y está definida como:

$$Var(Z(x)) = \sigma^2 = E\{[Z(x) - m]^2\} = E\{Z(x)^2\} - m^2 \quad (3)$$

Por otro lado, la covarianza se puede definir de forma similar a la varianza, pero considerando dos variables aleatorias $Z(x)$ y $Z(x')$. Ésta mide la variación conjunta de ambas variables y está definida como:

$$Cov\{Z(x), Z(x')\} = E\{[Z(x) - m][Z(x') - m]\} = E\{Z(x)Z(x')\} - m^2 \quad (4)$$

Cabe notar que existe una relación entre la varianza y la covarianza, siendo la primera la aplicación de la segunda a solo una variable aleatoria.

Para describir la variabilidad espacial de la función aleatoria, se calcula la variación conjunta de la variable en el punto “ x ” y la misma variable en el punto “ $x + h$ ”, donde “ h ” es un vector de separación cualquiera, por lo que considerando la hipótesis de estacionaridad de segundo orden (Wackernagel, 2003), la covarianza se puede desarrollar como:

$$Cov\{Z(x), Z(x + h)\} = E\{Z(x)Z(x + h)\} - m^2 = C(h) \quad \forall x, x + h \quad (5)$$

Por último, se define la función variograma, la cual mide la mitad de la varianza de la diferencia entre dos valores de la función aleatoria, separadas por un vector “ h ”. Considerando la hipótesis de estacionaridad es posible definirla como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} Var[Z(x) - Z(x + h)] = \frac{1}{2} E\{[Z(x) - Z(x + h)]^2\} \quad (6)$$

El variograma es una función que representa la desestructuración o disimilitud entre dos datos, dada una distancia de separación entre ellos. Tanto la función de covarianza como la función variograma son capaces de representar la continuidad espacial de la variable regionalizada, presentando comportamientos contrarios respecto a su crecimiento en función de la distancia, lo cual es posible observar en las siguientes relaciones:

$$C(h) = \gamma(\infty) - \gamma(h) \quad (7)$$

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (8)$$

2.1.4 Variografía Experimental Directa y Cruzada

Dado que se busca realizar la inferencia estadística usando el conocimiento de continuidad espacial que se tiene de la variable regionalizada, la extracción de esta información a partir de los datos es crítica para obtener resultados satisfactorios.

Posiblemente por ser más intuitivo este concepto, es más común modelar la función variograma para un conjunto de datos y distancias de separación, siendo este proceso llamado modelado variográfico o simplemente variografía. Dicho proceso usa un estimador experimental cuyos parámetros son el número de pares “ $N(h)$ ” a una distancia dada “ h ” y se define como:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2 \quad (9)$$

Cabe notar que el estimador compara valores de una misma variable regionalizada, sin embargo, las bases de datos suelen tener registros de más de una variable, cuyas relaciones deben ser entendidas para poder realizar estimaciones multivariantes. En este sentido, es posible medir el grado de disimilitud de z_j y z_k , siendo éstas las j -ésima y k -ésima variables regionalizadas muestreadas en el espacio, respectivamente. A esta función se la conoce como variograma cruzado y se define teóricamente (a nivel de las funciones aleatorias) y experimentalmente (a nivel de las variables regionalizadas), bajo el supuesto de estacionariedad, de la siguiente forma:

$$\gamma_{jk}(h) = \frac{1}{2} E\{[Z_j(x+h) - Z_j(x)][Z_k(x+h) - Z_k(x)]\} \quad (10)$$

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z_j(x_i + h) - z_j(x_i)][z_k(x_i + h) - z_k(x_i)] \quad (11)$$

Para cada variograma cruzado se considera un par de variables, por lo que la existencia de valores para ambas variables, en el mismo punto del espacio, es imprescindible. Dado lo anterior, se debe saber el grado heterotópico de la base de datos con la que se trabaja, ya que, si este se acerca al caso heterotópico total, se hace muy complicado calcular variogramas cruzados experimentales.

Ya sea que se quiera modelar variogramas directos o cruzados, es poco probable hacerlo efectivamente aplicando estrictamente la definición, dado que las muestras suelen no estar separadas de forma regular en el espacio.

Para sortear esta dificultad se usan parámetros de tolerancia en la búsqueda de pares. En el espacio tridimensional, una vez elegido el azimut " θ ", la inclinación " φ " (dip) y la distancia " h " para evaluar, se genera un espacio de búsqueda usando tolerancias llamadas angulares y de paso (Figura 2.1). Las siguientes son las 5 tolerancias generalmente aplicadas para obtener variogramas experimentales:

1. Tolerancia angular en el azimut ($\Delta\theta$): ángulo de búsqueda permitido a la izquierda y derecha del azimut. Cuando equivale a 90° el variograma es omnidireccional en el plano.
2. Tolerancia en la distancia (Δh): Es la distancia que se agrega y resta al paso elegido.
3. Ancho de la banda (d): Es el espesor que tiene la región de búsqueda sobre el plano del azimut.
4. Tolerancia angular del dip ($\Delta\varphi$): ángulo de búsqueda permitido sobre y bajo el dip. Cuando equivale a 90° el variograma es omnidireccional en el plano del dip.
5. Alto de la banda (b): Es el alto que tiene la región de búsqueda sobre el plano del dip.

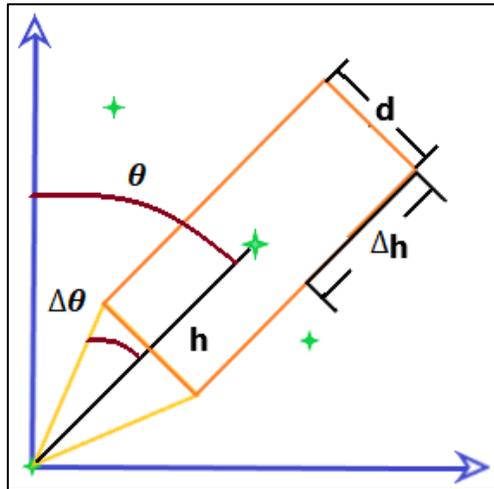


Figura 2-1: Diagrama de la región de búsqueda para el cálculo del variograma experimental en el plano horizontal

En general antes de realizar la variografía, se estudia la existencia de direcciones principales de anisotropía en términos de la continuidad espacial de las variables. Las anisotropías están separadas en geométricas y zonales. El primer grupo llega a un mismo valor máximo (meseta del variograma), pero a diferentes distancias; mientras que el segundo grupo no requiere llegar al mismo valor máximo. El uso de las tolerancias para obtener los variogramas experimentales de estas direcciones, entrega resultados menos erráticos y más claros, sin embargo, se debe tener cuidado de no perder la información de la estructuración específica en la dirección, que es el caso cuando las tolerancias son exageradas.

2.2. Modelamiento Variográfico

Si bien el variograma experimental se sustenta totalmente en los datos, tiene el problema de no ser continuo, ya que solamente se logra hacer el cálculo para un número limitado de distancias y direcciones. Por lo anterior se requiere ajustar un modelo (función continua) sobre el variograma experimental, logrando así obtener un valor de variograma para cualquier distancia y dirección del espacio. Para lo anterior, existe un conjunto de modelos básicos ya definidos, los cuales se acoplan para ajustarse lo mejor posible a los valores experimentales, generando así los llamados modelos “anidados”. Dentro de este conjunto, las funciones más aplicadas en la industria son: efecto pepita, esférico, exponencial y cubico. Cada una de éstas viene definida por uno o dos parámetros específicos llamados meseta y alcance (Figura 2.2). La meseta es el valor teórico que alcanza el variograma a distancias grandes, mientras que el alcance es la distancia a la cual se llega a la meseta (nula en el caso del efecto pepita).

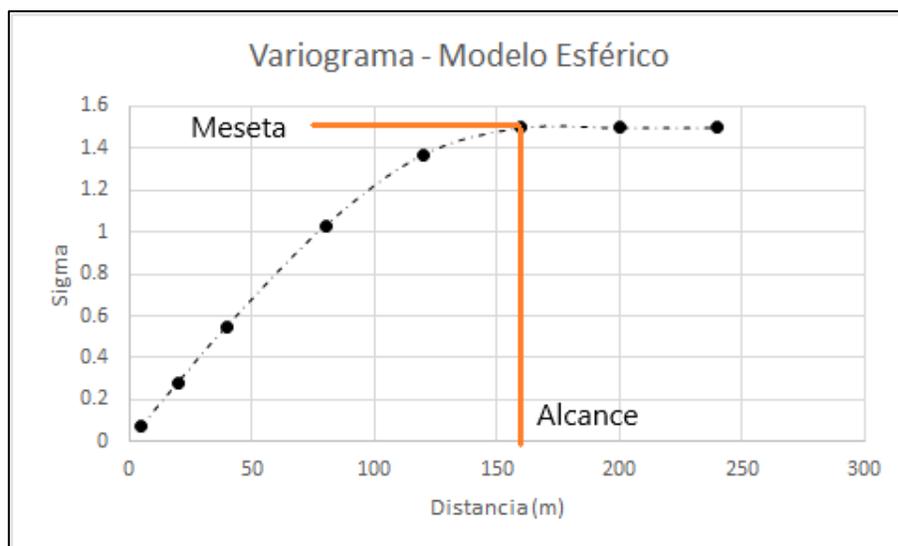


Figura 2-2: Ejemplo del variograma de la función esférica, marcando su meseta y alcance.

2.3. Kriging y Cokriging

Desde su formulación, el estimador de kriging ha sido estudiado tanto teóricamente como en casos de aplicación. Por definición, la interpolación por kriging implica usar el mejor estimador lineal insesgado de un conjunto de muchos posibles, en el sentido que el error de estimación tiene una esperanza nula (restricción de insesgo) y una varianza mínima (restricción de optimalidad). Sin embargo, presenta la limitación de tratar con solo una variable regionalizada, lo que no se ajusta a la necesidad de las operaciones mineras que consideran múltiples especies de valor (Myers, 1992).

A la luz de lo anterior, se llegó a proponer un estimador similar, denominado cokriging, el cual toma en cuenta la información adicional de otras variables regionalizadas, sin perder las características del kriging (Matheron, 1979), solucionando paralelamente el problema de sub-optimalidad que se demostró tenía el interpolador kriging, al no considerar las correlaciones entre las variables regionalizadas adicionales (cuantificadas a través de sus variogramas directos y cruzados). Posteriormente a su formalización matemática, se estudió las condiciones nuevas que planteaba el uso del cokriging (Myers, 1992), donde la más importante tiene relación con las condiciones que deben tener las matrices de los coeficientes de meseta de los variogramas anidados, requiriendo que sean estrictamente definidos positivos, para poder generar sistemas lineales invertibles. De igual forma se empezó a realizar aplicaciones prácticas (Pan et al., 1993), dado el hecho de la aparición de nuevas técnicas que simplificaban el modelamiento de variogramas cruzados, elemento esencial de la estimación por cokriging.

Las siguientes sub-secciones presentan diferentes variantes del cokriging considerando “ P ” variables y “ N ” puntos con datos. Mencionar que el kriging corresponde al caso particular de una sola variable ($P = 1$).

2.3.1 Descripción General del Cokriging Ordinario.

El estimador de cokriging ordinario es una combinación lineal de ponderadores multiplicados por los vectores de variables regionalizadas situadas en los puntos de estimación. Denotando \mathbf{Z}_o^* al vector de variables estimadas en cierta localización sin datos, la ecuación para su estimación por cokriging se escribe como:

$$\mathbf{Z}_o^* = \sum_{\alpha=1}^N \Lambda_{\alpha}^T \mathbf{Z}_{\alpha} \quad (12)$$

Donde:

N : Número de puntos con datos existentes de las variables regionalizadas.

\mathbf{Z}_{α} : Vector de funciones aleatorias en la ubicación α .

Λ_{α} : Matriz de ponderadores asociados a la ubicación α .

Dado que el estimador es insesgado, la condición que se debe cumplir es:

$$E \left[\mathbf{Z}_o - \sum_{\alpha=1}^N \Lambda_{\alpha}^T \mathbf{Z}_{\alpha} \right] = 0 \quad (13)$$

Asumiendo sin pérdida de generalidad que todas las “ P ” variables serán estimadas usando el set completo de variables disponibles, la ecuación (13) puede ser reescrita como:

$$\mathbf{m}^T \left\{ I_P - \sum_{\alpha=1}^N \Lambda_{\alpha}^T \right\} = 0 \quad (14)$$

Donde:

\mathbf{m}^T : Vector traspuesto de medias desconocidas de las funciones aleatorias

I_P : Matriz identidad de tamaño $P \times P$.

La ecuación anterior implica que la suma de ponderadores relacionada a la variable a estimar deber ser igual a 1, mientras que la suma de ponderadores relacionada a cada covariable debe ser igual a 0.

Para obtener el sistema completo de ecuaciones, se debe agregar la minimización de la varianza del error. La matriz de varianza-covarianza del error de estimación puede expresarse como:

$$\begin{aligned} Var\{\mathbf{Z}_o - \mathbf{Z}_o^*\} &= C(x_o - x_o) - \sum_{\alpha=1}^N \Lambda_{\alpha}^T C(x_{\alpha} - x_o) - \sum_{\alpha=1}^N C(x_o - x_{\alpha}) \Lambda_{\alpha} \\ &+ \sum_{\alpha=1}^N \sum_{\beta=1}^N \Lambda_{\alpha}^T C(x_{\alpha} - x_{\beta}) \Lambda_{\beta} \end{aligned} \quad (15)$$

Donde:

$C(x_{\alpha} - x_{\beta})$: matriz de covarianzas de dimensión $P \times P$ con término genérico $C_{ij}(x_{\alpha} - x_{\beta})$, covarianza cruzada entre las variables aleatorias $Z_i(x_{\alpha})$ y $Z_j(x_{\beta})$.

Bajo una hipótesis de simetría espacial, la covarianza cruzada C_{ij} se relaciona con el variograma cruzado γ_{ij} de forma similar a la ecuación (7):

$$C_{ij}(h) = \gamma_{ij}(\infty) - \gamma_{ij}(h) \quad (16)$$

Para obtener el sistema de estimación de ponderadores, se debe solucionar el problema de minimización imponiendo las restricciones de insesgo. Se procede por el método del lagrangiano, el cual genera un conjunto de multiplicadores igual al número de variables a estimar. Luego de realizar todos los cálculos, se obtiene el siguiente sistema:

$$\begin{bmatrix} \Gamma(x_1 - x_1) & \cdots & \Gamma(x_1 - x_N) & I_P \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \Gamma(x_N - x_1) & \cdots & \Gamma(x_N - x_N) & I_P \\ I_P & \cdots & I_P & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda_1 \\ \vdots \\ \Lambda_N \\ -M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma(x_1 - x_o) \\ \vdots \\ \Gamma(x_N - x_o) \\ I_P \end{bmatrix} \quad (17)$$

Donde:

$\Gamma(x_{\alpha} - x_{\beta})$: Matriz con valores de variogramas, cuyo término genérico es $\gamma_{ij}(x_{\alpha} - x_{\beta})$.

M : Matriz de los multiplicadores de Lagrange.

El sistema (17) ha sido establecido bajo el supuesto de isotopía (todas las variables han sido medidas en todos los puntos con datos). En el caso de bases de datos heterotópicas, el sistema se obtiene eliminando las filas y columnas correspondientes a los datos faltantes.

Si bien la aplicación de cokriging ofrece mejores estimaciones que los métodos de kriging, comparando bajo los criterios de insesgo de estimación y minimización de la varianza del error

de estimación (Yalçın, 2005), se ha cuestionado el beneficio adicional aportado por el método, teniendo en cuenta las dificultades adicionales de aplicarlo en comparación con los métodos tradicionales. Una de las observaciones, es el problema que presenta el cokriging ordinario, respecto a la asignación de valores de ponderadores muy bajos a las covariables, teniendo un aporte insignificante a la estimación en muchos casos (Goovaerts 1998; Hohn, 1999). En otras palabras, al estimar una variable primaria en particular, el sistema tiende a valorar más los datos de esa misma variable, cuya ponderación suma 1, mientras que los datos de cada covariables tienen una ponderación que suma 0.

Este efecto podría estar causado por el hecho de asumir que las funciones aleatorias asociadas tienen medias (momentos de primer orden) desconocidas, junto con tener solamente la correlación espacial (momentos de segundo orden) totalmente descrita, lo que podría ser una suposición muy severa, causando por tanto pérdida de información y haciendo que las covariables sean menos relevantes de lo que deberían (Emery, 2012). Considerando que el sistema para determinar los ponderadores se origina a partir de esta suposición, es factible tratar de reducir este efecto generalizando la condición. Una propuesta de solución es asumir que las medias de las variables a estimar están relacionadas por combinaciones lineales con coeficientes conocidos (Emery, 2012). Este nuevo marco se denomina cokriging con medias relacionadas.

2.3.2 Descripción del Cokriging con Medias Relacionadas

Para establecer el nuevo sistema de interpolación, se debe desarrollar la suposición de medias relacionadas. Considérese los siguientes elementos: un vector de P funciones aleatorias con estacionaridad de segundo orden $\mathbf{Z} = (Z_1, \dots, Z_P)^T$; además un vector de las medias correspondientes a las variables, $\mathbf{m} = (m_1, \dots, m_P)^T$, las que siguen siendo constantes en el espacio; y también por $C(h) = (C_{ij}(h): i = 1, \dots, P; j = 1, \dots, P)$ la matriz de covarianzas directas y cruzadas, la que es función del vector de separación h . En general, se puede imponer K relaciones respecto a las medias, lo que se puede escribir como:

$$\forall k \in \{1, \dots, K\}, \quad \sum_{i=1}^P a_{k,i} m_i = b_k, \quad a_{k,i} \in A, b_k \in b \quad (18)$$

Donde:

b: Vector de elementos reales.

A: Matriz de K filas y P columnas.

Se supone que A es una matriz de rango completo, es decir, sus filas son linealmente independientes, lo que significa que no existe redundancia o incoherencia entre las relaciones de medias escritas. Reordenando eventualmente los elementos de \mathbf{Z} , es posible reescribir la ecuación (18) como:

$$A \mathbf{m} = (A_1 \ A_2) \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix} = b \quad (19)$$

Donde:

A_1 : Matriz de K filas y $(P - K)$ columnas.

m_1 : Vector de las primeras $(P - K)$ medias.

A_2 : Matriz cuadrada de K filas y K columnas.

m_2 : Vector de las últimas K medias.

Sin pérdida de generalidad, se puede asumir que $b = 0$ (basta con modificar el vector de variables a estimar como $\mathbf{Z} - \delta$, donde el vector δ es tal que $A\delta = b$). Dado lo anterior, es posible expresar el vector m_2 , en términos de los componentes de m_1 , por lo que la ecuación (19) se puede reescribir como:

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} I_{P-K} \\ -A_2^{-1}A_1 \end{pmatrix} m_1 = \begin{pmatrix} I_{P-K} \\ \Omega \end{pmatrix} m_1 = Fm_1 \quad (20)$$

Donde:

I_{P-K} : Matriz identidad de dimension $(P - K)$.

Ω : Matriz de relacion de los subvectores de \mathbf{m} .

A partir de la última ecuación, es posible obtener un nuevo sistema para estimar los ponderadores del cokriging. Considerando nuevamente que todas las variables de la base de datos son conocidas en todo el espacio de estimación, la condiciones de insesgo descrita por la ecuación (14), se redefine como:

$$\left\{ \sum_{\alpha=1}^N \Lambda_{\alpha}^T - I_P \right\} Fm_1 = 0 \quad (21)$$

Dado que m_1 es un vector de componentes que pueden tomar cualquier valor entre los reales, la única forma de asegurar una estimación insesgada, es desprender de la ecuación (21) la siguiente condición:

$$\left\{ \sum_{\alpha=1}^N \Lambda_{\alpha}^T - I_p \right\} F = 0 \quad (22)$$

De forma similar al cokriging ordinario, para obtener el sistema de estimación, se minimiza la diagonal de la matriz de varianza-covarianza del error de estimación descrita por la ecuación (16), solo que ahora se considera las restricciones definidas por la ecuación (22). Después de realizados los cálculos, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones (Emery, 2012):

$$\begin{bmatrix} C(x_1 - x_1) & \cdots & C(x_1 - x_N) & F \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C(x_N - x_1) & \cdots & C(x_N - x_N) & F \\ F^T & \cdots & F^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda_1 \\ \vdots \\ \Lambda_N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(x_1 - x_o) \\ \vdots \\ C(x_N - x_o) \\ F^T \end{bmatrix} \quad (23)$$

Donde:

$C(x_{\alpha} - x_{\beta})$: Matriz con valores de covarianzas, cuyo término genérico es $C_{ij}(x_{\alpha} - x_{\beta})$,

covarianza cruzada entre las variables aleatorias $Z_i(x_{\alpha})$ y $Z_j(x_{\beta})$.

M : Matriz de los multiplicadores de Lagrange.

Este nuevo sistema es una generalización del cokriging ordinario que corresponde al caso $K = 0$ (no se conoce ninguna relación entre medias). Asimismo, es capaz de tratar con bases heterotópicas, donde el sistema se redefine eliminando las filas y columnas correspondientes a los datos faltantes.

En la práctica, las restricciones lineales entre las medias de los componentes del vector de estimación, pueden ser determinados de muchas formas (Emery, 2012), siendo las formas más comunes las siguientes:

- Impuestas por la naturaleza del vector de funciones aleatorias, siendo un ejemplo las variables que por composición deban sumar la unidad.
- Inferidas del conocimiento geológico, a partir de la información de composición entre otras.
- Determinadas experimentalmente, a partir de ajustes lineales o multilineales entre las medias locales del vector de funciones aleatorias.

3. METODOLOGÍA

Para todos los casos de estudio planificados, se define la siguiente metodología de trabajo, donde los dos primeros puntos aplican de forma general y los restantes de forma particular para cada uno de éstos.

I. Revisión del Proyecto

En esta etapa se revisa la consistencia, calidad y características de la información proporcionada para la creación de los modelos de bloques. La información proporcionada es:

1. Topografía de la zona.
2. Modelo litológico.
3. Modelo de zonas de mineralización.
4. Base de datos de perforaciones.
5. Resultados de pruebas metalúrgicas de baja escala.
6. Parámetros técnico económicos del proyecto.
7. Informes de trabajos varios.

Dentro de la etapa, se valida la información proporcionada, comparando lo descrito en los informes de estudio con los modelos y bases de datos proporcionadas. Se revisa la existencia y ubicación de las muestras de las pruebas metalúrgicas en la base de datos y su relación con los modelos litológico y de zonas de mineralización. Además, se valida la coherencia de las muestras, revisando cuáles cumplen la relación entre el cobre total y las otras variables que contienen cobre ($CuT = CuS + CuCN + CuI$). La salida de esta etapa es una base de sondajes coherente y con toda la información necesaria para ser usada en la estimación.

II. Selección de los Dominios de Estimación

Como se mencionó anteriormente, dada la etapa en que se encuentra el proyecto, ésta ya cuenta con una definición de dominios de estimación. Considerando lo anterior, acá se selecciona entre los 8 dominios existentes, aquellos más importantes e interesantes para realizar los trabajos de estimación multivariable. El propósito de esta medida tiene relación con mantener acotado el tiempo de trabajo, además de centrarse en aquellos dominios donde será más fácil observar diferencias en los resultados de cada caso. En este sentido, se trabaja con información del depósito por cada unidad mineralizada. La salida de esta etapa es un conjunto de dominios de estimación.

III. Caracterización de los Casos de Estudio

Dado que se busca comparar los resultados de estimación entre casos de estudio, se establece los aspectos que los definen. El primero es el método de estimación y el segundo, como un tipo de estudio de la sensibilidad de los interpoladores, es el desagrupamiento y el capping de los datos. La salida de esta etapa es la descripción de las características de cada uno de los casos de estudio.

IV. Estudio Estadístico

Se realiza un estudio estadístico de las tres variables rescatadas de la base de datos (CuT, CuS y CuCN). Se usarán solo tres de las cuatro especies de cobre, dado que el cobre insoluble (CuI) se estimará a partir de las otras variables previamente estimadas ($CuI = CuT - CuS - CuCN$). Este estudio se hace únicamente agrupando la información por zonas mineralizadas, considerando que el proyecto tiene determinado que los dominios se forman en base a este atributo geológico. El comprender los aspectos generales en términos estadísticos, dará ideas respecto a la influencia de su carácter heterotópico, siendo ésta una de las razones por la que se propone estimar con el método de cokriging. Además, se determina las relaciones lineales entre las medias de los distintos tipos de cobre, las cuales son la base de la aplicación del cokriging con medias relacionadas. La salida de esta etapa es información estadística de las muestras por dominio de estimación y los coeficientes que caracterizan las relaciones lineales.

V. Estudio Variográfico

El estudio variográfico está comprendido por dos labores específicas y subsecuentes. Primero se realiza un análisis para buscar direcciones de anisotropía respecto a las variables separadas y en pares (cruzadas) consideradas para la estimación. Para este análisis se usan mapas variográficos e información del muestreo espacial. Una vez definidas la existencia y cantidad de estas direcciones, se procede a obtener los variogramas experimentales. El paso requiere de la aplicación de criterios de tolerancias, los que dependen de la densidad y geometría de las muestras. La salida de esta etapa son variogramas experimentales directos y cruzados, con su respectiva información.

VI. Modelamiento Variográfico

Ya sea que el sistema con que se calculan los valores de los ponderadores use la información desde el variograma o la covarianza, se requiere que estén definidos por funciones continuas para cualquier vector de distancia. Dado lo anterior, en esta etapa se modela los variogramas directos y cruzados experimentales obtenidos en la etapa anterior. Para dicha tarea se usa un programa semiautomático con el cual, a partir de la selección del número y tipo de modelos

para anidar, se logra ajustar el mejor modelo posible, corrigiendo posteriormente los parámetros a elección del usuario. Se requiere del uso de esta herramienta, debido a la dificultad de modelar variogramas coherentes con la restricción de positividad de sus matrices de mesetas. La salida de esta etapa son modelos variográficos directos y cruzados continuos.

VII. Definición de Planes de Estimación y Ejecución de la Interpolación

Se define planes de estimación para poder comparar los casos de estudio. Estos planes se construyen como combinación entre los alcances de los elipsoides de búsqueda y el número de muestras mínimas para estimar. Para los casos de cokriging el análisis requiere más detalle sobre los valores de estos parámetros, dado que la rutina usada no tiene la posibilidad de imponer muchas restricciones respecto a las muestras usadas en la estimación. En esta etapa también se evalúa el tipo de fronteras entre las unidades de estimación. Ya con todos los parámetros determinados, se finaliza la etapa aplicando el método de interpolación correspondiente, para las leyes de cobre total, cobre soluble y cobre cianurable. La salida de esta etapa son modelos de bloques para cada uno de los casos de estudio.

VIII. Validación

En ambos casos de las interpolaciones por cokriging, junto con la de los dos casos bases, la primera comparación se hace por medio del método de validación cruzada. Esta herramienta permite analizar si los modelos, estrategia e información de los planes de estimación están bien definidos respecto a la base de datos. Además, sirve para revisar el grado de insesgo global, mediante cálculos estadísticos de los errores de interpolación y errores estandarizados. También se observa la consistencia global de las estimaciones mediante la revisión de estadísticas generales y visualizaciones de los modelos de bloques. Las salidas de esta etapa son estadísticas y vistas en corte de los dominios de estimación.

IX. Actualización de Modelos y Cálculo de Recursos

En esta etapa se define una estrategia para actualizar las leyes en los bloques asociadas a cada caso de estudio, buscando obtener modelos consistentes para poder realizar el cálculo de Recursos Minerales del proyecto. Luego, planteando una serie de parámetros técnico económicos, se realiza el cálculo, obteniéndose las envolventes económicas que las representan. Al interior de estas se realiza la cubicación del mineral y se obtiene información respecto a las leyes medias de las especies de cobre consideradas, el metal contenido en la envolvente, la cantidad de metal recuperable (dependiente de las recuperaciones metalúrgicas) y el tonelaje total de Recursos Minerales que representan. En este punto finaliza el desarrollo de los casos.

X. Comparaciones y Análisis

Bajo un cuadro general, se usan dos parámetros básicos para poder comparar la eficiencia de estimación de cada uno de los casos realizados. Se observa por un lado la consistencia de la estimación en los bloques, donde se ve la cantidad de bloques que cumplen las restricciones respecto a la ley de cobre total ($CuT \geq CuS$, $CuT \geq CuCN$, $CuT \geq CuS + CuCN$). Por otro lado, se compara la cantidad de bloques con las tres leyes estimadas, sabiendo que en los casos base existen bloques con una o dos leyes no interpoladas inicialmente. Además, se analiza la ocurrencia de la estimación de leyes negativas, efecto que se tiene considerado a partir del conocimiento sobre planteamiento matemático del método propuesto.

Igualmente se ejecuta un análisis respecto a la información de sesgos globales y estadística de los casos. En particular para los modelos de bloques de cada caso, se compara la estimación de las variables a nivel local respecto a la base de datos que usan. Por último, se evalúa los efectos de la metodología de actualización de leyes, antes y después del cálculo de Recursos Minerales.

4. CASOS DE ESTUDIO

4.1. Revisión del Proyecto

Para la realización de la memoria, en conjunto con la empresa consultora Wood Plc (Wood), se genera un convenio de trabajo para el uso de datos de un proyecto minero real, el que se encuentra en etapa de pre-factibilidad y cumple los requerimientos para el estudio, dada la necesidad de la estimación de múltiples variables regionalizadas, las que se encuentran relacionadas de forma local. La información con la que se cuenta es amplia y relacionada a varios aspectos del proyecto minero, sin embargo, los trabajos en cuestión se enfocan únicamente en el análisis del punto de vista geoestadístico. El nombre y las coordenadas del proyecto han sido modificados para proteger la confidencialidad de éste y su base de datos.

4.1.1 Descripción General

El proyecto Tajo Azul considera un depósito descrito como un complejo intrusivo de roca sub-volcánica, de carácter porfídico y composición variable, donde se logra determinar que existieron diversos eventos de alteración y mineralización de origen hidrotermal, los que generaron varias zonas de mineralización. De los estudios en terreno e interpretaciones geológicas se logra clasificar el depósito como un clásico sistema mineralizador del tipo “Pórfido Cuprífero Cu-Mo”, de edad cretácico superior-terciario inferior.

El depósito se encuentra emplazado en una zona de terreno irregular (Anexo 8-1), específicamente sobre una colina de poca elevación, extendiéndose desde la cima del mismo hasta su parte inferior. Si bien la topografía varía entre los 1000 y 1300 m.s.n.m., el depósito se extiende por lo menos unos 250 metros más en profundidad, comprendiendo cuerpos con presencia de leyes económicamente viables. En la revisión del archivo computacional de la topografía, se asegura que pase con las pruebas básicas de consistencias y estabilidad de triangulación, corroborando que se puede trabajar con la misma.

Si bien el proyecto tiene definidas unidades litológicas, zonas mineralizadas y de alteración, a partir de los trabajos anteriores, se considera únicamente relevante la generación del modelo de zonas mineralizadas y litológico como triangulación tridimensional. El modelo litológico es relativamente simple en su formato computacional, siendo integrado únicamente por cuatro unidades, siendo una casi irrelevante en términos de volumen. Sin perjuicio de lo anterior, se revisa solo la información de estas unidades, dado que finalmente son con las que se trabaja.

Posteriormente, se revisa la información relacionada con las zonas mineralizadas, las cuales son mayor en cantidad y mucho más relevantes para el estudio.

4.1.2 Unidades Litológicas

- **Granodiorita (GRD)**

Se refiere a rocas del batolito de edad Paleoceno, que varían de una composición granodiorítica a diorítica cuarcífera, con plagioclasas de grano medio a grueso, con cuarzo intersticial de formas triangulares. Además, presenta abundantes cúmulos de máficos (horblendas) alterados a biotita y magnetita (tardimagmática), con incipiente alteración de clorita y epidota producto de una alteración retrógrada. Esta unidad corresponde a la roca de caja que hospeda los diferentes pulsos magmáticos hipabisales pre-minerales (Pórfido Feldespático), inter-minerales (Pórfidos Cuarcíferos, Brechas Hidrotermales y Brechas de Turmalina) y post-minerales (diques dacíticos y andesíticos).

- **Pórfido Feldespático (PFD)**

Las rocas de esta unidad, de composición dacítica, presentan una característica textural porfídica con fenocristales de plagioclasas, inmersos en una masa fundamental afanítica de color gris oscuro, debido a los abundantes minerales máficos (biotitas) presentes. Además, existen variaciones texturales dentro de esta unidad con texturas inequigranulares, donde aumenta el contenido de fenocristales con más de una generación de cristales inmersos en una menor proporción de masa fundamental de biotita.

Estas rocas presentan, según las observaciones macroscópicas y estudios petrográficos, una textura porfídica con fenocristales gruesos de plagioclasas, alterados a sericita o arcillas, de hasta 1 cm y una masa fundamental afanítica con abundantes minerales máficos (predominio de biotita) que pueden presentar alteraciones de clorita, cuarzo y sericita de aspecto gris verdoso, vetillas y disseminación de sulfuros de pirita y calcopirita, en algunos casos vetillas del tipo D con halos de sericita y zonas con cuarzo pervasivo.

El término “Pórfido Feldespático” corresponde a una litología de terreno o unidad minera creada para un mejor reconocimiento respecto a otros pórfidos que presentan similares composiciones dacíticas, pero de diferentes texturas y composiciones de la masa fundamental, relaciones de contactos y colores de roca.

- **Pórfido Cuarcífero (PQZ)**

Esta unidad corresponde a un pórfido granodiorítico con texturas que varían de porfídica a inequigranular con fenocristales de plagioclasas y, en menor proporción, feldespatos potásicos de tamaño de grano entre medio a fino. Además, se caracteriza por presentar abundante cuarzo intersticial (mayor al 20%) y en las variaciones más porfídicas ojos de cuarzo. La masa fundamental afanítica, de colores claros, está compuesta principalmente por cuarzo, plagioclasas y feldespatos potásicos. Se diferencia de las rocas granodioríticas del batolito por su textura inequigranular y la ausencia de cúmulos de biotitas, además de presentar diseminación fina de sulfuros. De acuerdo a los sondeos observados, esta unidad es restringida a estructuras en forma de diques métricos y pequeños fingers centimétricos, con mineralización de pirita y calcopirita, diseminada y en vetillas en la zona primaria. En la zona lixiviada se reconocen “*boxwork*” con hematita y jarosita diseminada.

Espacialmente, dentro del depósito, se encuentran por lo general en el contacto entre la granodiorita y la unidad Pórfido Feldespático (PFD) y en estructuras N70W a E-W asociadas a una intensa alteración de sílice y hematita en fracturas, o bien, en forma de pequeños fingers lenticulares con intensa sílice pervasiva y hematita diseminada fina, otorgándoles en algunos casos un aspecto brechoso con característicos colores pardos rojizos producto de la lixiviación de sulfuros.

4.1.3 Zonas de Mineralización

- **Lixiviado (LIX)**

Esta zona se caracteriza por la ocurrencia de jarosita, hematita, goethita o la mezcla de éstas (limonitas), asociadas a la lixiviación de sulfuros diseminados o en vetillas de pirita y calcopirita, otorgándole a la roca característicos colores pardos, pardos rojizos y rojizos observados en superficie y en los sondeos.

- **Lixiviado con Ley (LIXCU)**

Esta zona corresponde a una zona fuertemente lixiviada, descrita anteriormente, pero con relictos (trazas) de cobre residual en las limonitas, siendo éstas trazas de cobres verdes y/o negros.

- **Óxidos de Cobre (OXCU)**

Esta zona corresponde a la ocurrencia en fracturas, vetillas y oquedades, de crisocola, brocantita, sulfatos de cobre re-movilizados y óxidos de cobre negros que se observan de forma superficial y en los sondeos, asociados principalmente a zonas de fallas,

diaclasamiento y en oquedades dentro de vetillas de cuarzo. Por lo general se observan cortando zonas de lixiviación con un control estructural de orientación NE y su interpretación debe ser relacionada a zonas de fallas principalmente, aunque se observan en terreno otras estructuras que controlan la ocurrencia como diaclasamientos subhorizontales y bolsonadas en zonas de intersecciones estructurales principalmente asociados a afloramientos del Pórfido Cuarzífero.

Para una zonación de los distintos tipos de oxidados o especies minerales de cobre, se dividió la zona en cuatro subunidades de acuerdo al color y la proporción.

- a. **OXCUV:** zona de oxidados de cobre verdes dominantes. Esta zona se refiere a la ocurrencia de óxidos de cobre verdes (crisocola, brocantita, malaquita, atacamita, azurita) y que son mayoritarios, aunque pueden existir de forma subordinada óxidos de cobre negros.
- b. **OXCUN:** zona de oxidados de cobre negros dominantes. En esta zona la proporción de oxidados de cobre negros (tenorita principalmente) son mayoritarios y pueden existir de forma subordinada óxidos de cobre verdes.
- c. **OXCUVN:** zona de oxidados de cobre negros y verdes. En esta zona coexisten en proporciones relativamente similares cobres negros y verdes.
- d. **ARCU:** zona con arcillas de colores verde y turquesa con contenidos de cobre variable, estos se encuentran en fracturas y oquedades cercanas a zonas de fallas.

- **Mixto (MIX)**

Esta zona corresponde a la coexistencia de sulfuros primarios con calcosina y oxidados de cobre. Por lo general, esta zona con minerales mixtos se observa en los sondajes mapeados en la zona de enriquecimiento y primario, bajo la zona de lixiviación, junto a jarosita y hematita debido a una sobreimposición de eventos de re-movilización de cobre asociado a estructuras recientes. Otro tipo de ocurrencia se da como reemplazo en calcosinas por un cambio a condiciones oxidantes, probablemente por cambios en los niveles freáticos o movimientos en la vertical por fallas.

- **Enriquecimiento Secundario (SEC)**

Esta zona se refiere a la ocurrencia de calcosina en patinas impregnando a piritas y en bordes de reemplazamiento en cristales de calcopiritas. Los sulfuros primarios de pirita y calcopirita, diseminados y en vetillas, en zonas de alteración cuarzo sericita, desarrollados en la roca de caja granodiorítica, presentan el mayor volumen de mineralización de este tipo, que es

producto de la re-movilización de cobre de la zona lixiviada a zonas más profundas bajo el nivel freático.

Las zonas con mayor espesor se encuentran en sectores más permeables como contactos entre pórfidos y roca de caja o fallas. La ocurrencia de calcosina en profundidad disminuye gradualmente disminuyendo a su vez las leyes de cobre cianurable.

- **Sulfuros Primarios (Prim)**

Esta zona se refiere a la ocurrencia de sulfuros primarios hipógenos bajo las zonas de oxidación y/o enriquecimiento secundario. El evento principal que aporta mineralización de sulfuros es la alteración fílica, afectando en su mayor volumen a las rocas que hospedan esta alteración (Granodiorita y Pórfido Feldespático), la cual presenta zonaciones laterales y verticales de calcopirita-pirita diseminada, donde la calcopirita aumenta sobre la pirita en zonas más cercanas al pórfido mineralizador y la pirita se encuentra hacia los bordes (zonas distales) perdiendo de forma gradual la ocurrencia de calcopirita. La precipitación y volumen de sulfuros diseminados depende del tipo de permeabilidad de la roca observando en las granodioritas con cúmulos de biotita con una mayor concentración de sulfuros respecto al resto de la roca y en el Pórfido Feldespático la diseminación de sulfuros es más fuerte en la masa fundamental de biotita alterada a sericita, aumentando el porcentaje de sulfuros respecto a la granodiorita. Además, esta unidad se caracteriza por presentar vetillas que consisten en una asociación principal de pirita y cuarzo, y subordinadamente calcopirita y molibdenita. Otras ocurrencias de sulfuros se refieren a vetillas en stockwork de cuarzo sericita con sutura central de pirita y/o calcopirita, asociadas a la alteración cuarzo sericítica. Además, se observan vetillas de calcopirita y pirita que pueden venir acompañadas de cuarzo, conformando stockwork o vetilleos subparalelos que cortan vetillas de cuarzo sericita-sulfuros, este evento se encuentra asociado a estructuras en un ambiente frágil-dúctil y en sectores en vetillas subhorizontales.

4.1.4 Base de Datos

El proyecto cuenta con una base de datos formada por varias campañas, realizadas desde el año 1988 hasta el 2018 (Tabla 4-1), ya que la propiedad ha pasado por diversos dueños. La base contiene valores de leyes, generados de la extracción y análisis de muestras de pulpa desde sondajes y perforaciones de aire reverso. En resumen, se tiene un total de 359 pozos perforados de longitud variable, los cuales en conjunto suman en torno a los 9179 metros de extensión. Varias de estas perforaciones han sido revalidadas en términos de ubicación e información,

principalmente mediante revisión en terreno y realización de duplicados. Para el estudio, únicamente 302 perforaciones son consideradas, dado que 31 de éstas no presentan valores de ninguna de las variables a interpolar y 26 quedan fuera de los límites del modelo de bloques a construir (Figura 4-1).

Tabla 4-1: Resumen de las perforaciones generadoras de la base de datos

Encargado	Año de Realización	Tipo	Nro. Pozos Perforados	Largo [m]	Largo Total [m]
Dueño Actual	2018	DDH	27	5052.5	9179.5
		RC	25	4127	
Antiguos	1988-	DDH/RC	307	27982.5	27982.5
Total			359	37162	37162

El área de trabajo es aproximadamente de 1740 x 1240 metros, donde la mayor parte de las 302 perforaciones se ubican en la parte central de la colina principal, con una profundidad promedio en torno a los 100 metros, buzamiento que ronda por los 65 grados y tendencia a estar orientados de suroeste al noreste. En este sentido, la mayoría de las perforaciones atraviesa varias zonas de mineralización y litologías, llegado generalmente hasta la zona de sulfuros primarios.

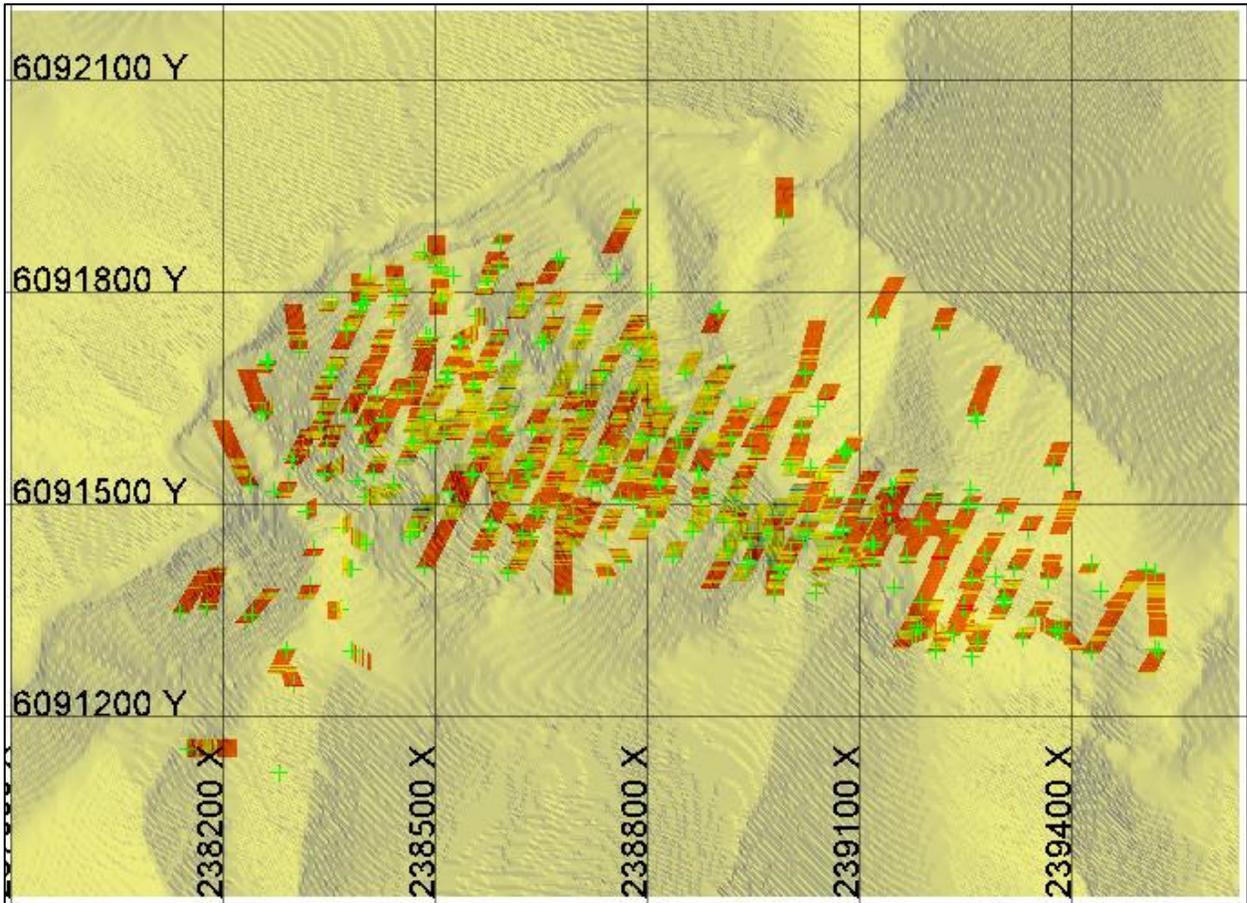


Figura 4-1: Vista en planta del terreno del proyecto y las perforaciones incluidas en el estudio

4.1.5 Pruebas Metalúrgicas

Las pruebas metalúrgicas con las que actualmente cuenta el proyecto son de baja escala, siendo en su mayoría prueba de botellas y algunas micro columnas. Las pruebas en botellas consisten en, a partir de pulpas -10# malla Ty, obtener muestras de 1 kg de material pulverizado, las cuales son sometidas a químicos bajo la lógica tradicional de lixiviación acida, a pH 1.5 constante, por 24 horas. Los cambios se dan al agregar sulfato ferroso a la botella hasta alcanzar una concentración de fierro ferroso de aproximadamente 20 gpl. Luego de pasadas 48 horas, se agrega cloruro de sodio a la botella hasta alcanzar una concentración de cloro cercana a los 200 gpl. La lixiviación bajo esos nuevos términos, se desarrolla hasta llegar a las 96 horas de procesamiento. De este tipo de pruebas se tiene 35 realizaciones con resultados detallados (Tabla 4-2). Como se puede observar, cerca del 50% de las muestras se ubican en la zona mineralizada de lixiviado con ley que, si bien es importante en términos de tonelaje, se considera que posee leyes relativamente bajas.

Tabla 4-2: Resultados de las recuperaciones metalúrgicas en las pruebas de botella

HOLEID	Recuperación CuT (%)	Recuperación CuS (%)	Recuperación CuCN (%)	Recuperación Cul (%)	UE
RT14	38	72.5	39.2	24.3	lix_ley
RT14	53.3	67.6	86.2	24.6	sec_fue
RT15	53.6	70	90.2	43.1	lix_est
RT11	31.5	51.2	78.9	15.9	lix_ley
RT14	48.5	85.1	57.7	20.7	lix_est
RT16	79.8	93.6	83.5	1.6	lix_est
RT16	32.2	54.5	25.3	28.3	lix_ley
RT22	81.6	94.5	78.4	36.9	lix_ley
RT25	31.1	69.4	66.1	9.9	ox_est
RT26	79	94.3	92.5	20.1	lix_ley
RT27	28.7	66.8	65.2	7.5	primario
RT22	50.7	79.1	80.5	26.3	lix_ley
RT23	66.5	89.1	85.7	16.7	lix_ley
RT27	49.3	71	81.3	30.3	ox_est
RT28	12.1	26.5	15.6	11.2	lix_est
RT28	61.6	81.3	84.4	43.6	lix_est
RT29	66.9	70.1	85.5	32.3	sec_fue
RT26	88	95.8	95.1	15.4	lix_ley
RT24	36.7	66	87.3	22	lix_ley
RT25	73.3	74	88.4	32.8	sec_fue
RT21	55.9	76.9	96.5	28.7	lix_ley
RT21	7.1	55.4	33.3	33.5	ox_ley
RT22	60	59	89.9	16.1	lix_ley
RT25	64.2	45.7	93.3	13	sec_fue
RT23	26.1	64.7	33.3	15.3	lix_ley
RT25	70.1	84.8	72.9	48.4	ox_est
RT26	65.2	81	74.7	45.4	lix_ley
RT7	46.1	71.9	75.8	14.7	sec_fue
RT9	70.2	78.9	87.5	34.6	sec_fue
RT9	78.7	95.2	79.6	20.9	lix_ley
RT3	25.9	51.2	33.7	24.1	lix_est
RT4	39.5	71.3	79.5	17.4	lix_ley
RT6	89.9	96	89.6	44	lix_ley
RT8	34.3	71.6	69.4	6.3	ox_ley

Respecto a las pruebas de micro columnas, solamente se tiene resultado de 15 y el resto se encuentra en desarrollo, por lo que no se mostrarán en este informe. A partir del ajuste de regresiones de los resultados de pruebas en botella, se define una extracción por especie (Tabla 4-3), la que aplica en el proceso de las pilas convencionales, pero también se propone

recuperaciones para el proceso metalúrgico ROM, obtenidas a partir de los resultados de las pruebas parciales en columnas.

Tabla 4-3: Resumen de los valores de recuperación metalúrgica por especie y proceso metalúrgico

Proceso	Recuperación CuS (%)	Recuperación CuCN (%)	Recuperación CuI (%)
Lixiviación Heap	95	88	40
Lixiviación ROM	50	40	10

4.2. Selección de los Dominios de Estimación

Los dominios de estimación en general son cuerpos tridimensionales que se forman al combinar distintos atributos geológicos en función de la similitud de distribución de leyes de alguna especie en particular. En el caso del proyecto, por ejemplo, vendrían dado por combinaciones de zonas litológicas y de mineralización. Sin perjuicio de lo anterior, el dueño del depósito tiene definido desde etapas tempranas del proyecto que los dominios de estimación están directamente relacionados a las distintas zonas de mineralización, por lo que queda descartado el uso de litologías en este estudio.

Para la selección de los dominios, se cuenta con los resultados del estudio de Recursos preliminar del proyecto (último estudio realizado por el dueño), con el cual se puede realizar una revisión de los dominios de estimación en términos de importancia económica (Anexo 8-2). A partir de esta evidencia y conversaciones con los expertos de Wood, se decide trabajar únicamente en los cuerpos de sulfuros secundarios y primarios (Figura 4-2). Se toma la decisión anterior entendiendo que éstos son los dominios con mejores relaciones de tonelaje y ley media (aunque los primarios tienen mucha menor importancia), y también que dados los volúmenes que representan dentro del depósito (Anexo 8-3), aún tiene potencial para transformar mayores cantidades de mineral en Recursos. Sin embargo, la razón principal de la decisión, que particularmente implica dejar fuera los dominios de óxidos de cobre, es que estos aún se encuentran en la etapa de estudio geológico, la que permitirá mejorar su definición.

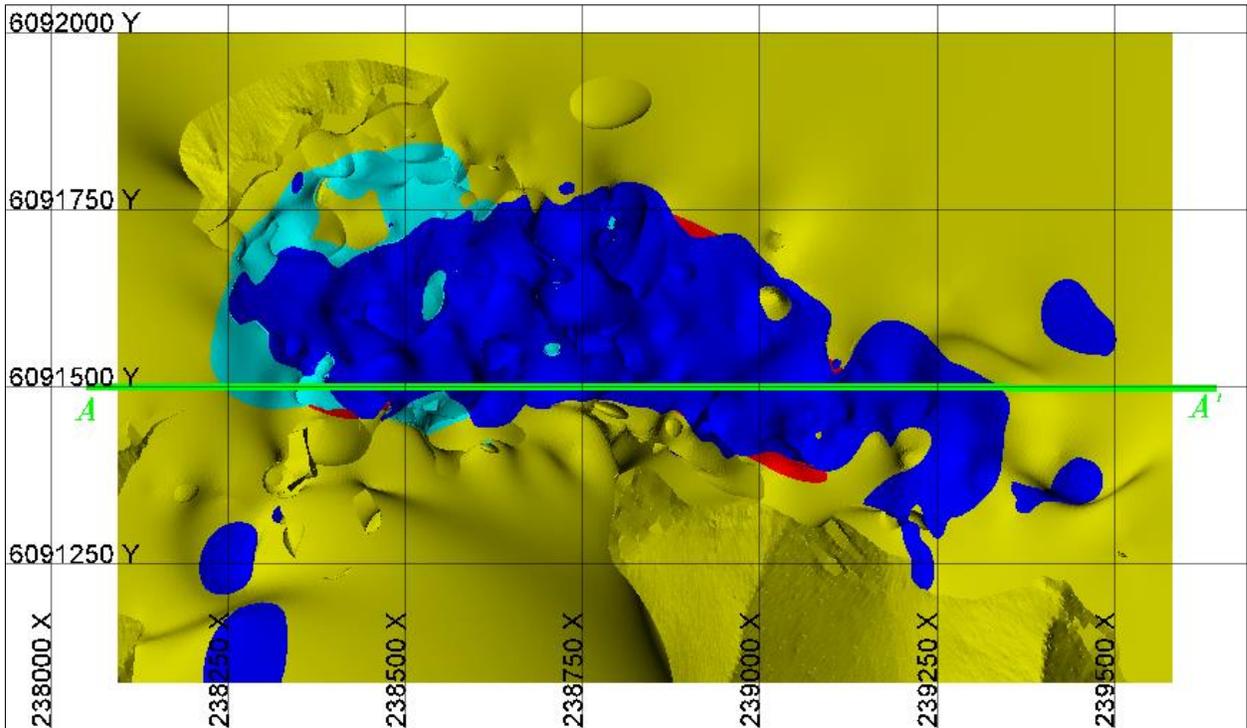


Figura 4-2: Vista en planta de los dominios de sulfuros primarios y secundarios con la línea de corte transversal A-A'

4.3. Caracterización de los Casos de Estudio

El estudio está separado en cuatro casos (Tabla 4-4), los cuales combinan desagrupamiento, capping y el método de estimación aplicado, donde según el último se define si el caso es base o propuesto.

Tabla 4-4: Descripción de las características de los casos de estudio

Caso	Desagrupamiento	Capping	Método de Estimación
Base 1	No	No	Kriging Ordinario
Base 2	Si	Si	Kriging Ordinario
Propuesto 1	No	No	Cokriging Medias Relacionadas
Propuesto 2	Si	Si	Cokriging Medias Relacionadas

Cabe mencionar que el desagrupamiento y capping se añaden como características de los casos para poder evaluar la sensibilidad de los interpoladores, bajo la hipótesis de que las dificultades que presenta el uso del kriging ordinario están influenciadas justamente por cúmulos de leyes altas y bajas en los dominios.

4.4. Estudio Estadístico

La base de datos a compositar es una base heterotópica parcial, lo que significa que no todas las especies minerales muestreadas se encuentran en la misma cantidad (Tabla 4-5). Este punto es crítico, ya que las cuatro variables a estimar (CuT, CuS, CuCN, CuI) guardan relación entre ellas, la cual se verá afectada por esta característica de la base de datos. Si bien las muestras cumplen la relación “ $CuT = CuS + CuCN + CuI$ ”, la metodología de compositación puede entregar resultados donde la relación no se cumple. Si bien puede tomarse una decisión respecto a esta observación, para el estudio se mantiene el resultado de compositación tal como lo entrega el método. Señalar que, dada la relación descrita anteriormente, los valores de cobre insoluble (CuI) se calcularán a partir de los valores de las otras especies, por lo que se descarta su tratamiento de aquí en adelante en los trabajos plasmados en el informe.

Tabla 4-5: Resumen de la base de datos separada por especie y dominio de estimación

Especie	Parámetros	Dominio de Estimación			
		Secundario Fuerte	Secundario Débil	Primario con Ley	Primario Estéril
Cobre Total (CuT)	Nro. de Muestras	4029	941	3243	5668
	(% de las muestras)	100	100	100	100
Cobre Soluble (CuS)	Nro. de Muestras	3636	540	2253	2969
	(% de las muestras)	90.2	57.4	69.5	52.4
Cobre Cianurable (CuCN)	Nro. de Muestras	3542	519	1702	3286
	(% de las muestras)	87.9	55.1	52.5	58

4.4.1 Compositación

En los estudios geoestadísticos, el tratamiento de los datos es posible realizarlo antes o después de la compositación. Considerando lo anterior, se decide que para los casos que lo requieren (Tabla 4-4), se ejecutará posterior a este proceso. La compositación se realiza a un largo de 2.5 metros, desde la base del collar hasta el final del sondaje, dejando sin restricción el largo del tramo final. Este valor ha sido determinado por el dueño del proyecto anteriormente. Para este ejercicio no se considera restricciones de compositación en la interfaz de los dominios de estimación, básicamente para mantener el estudio enfocado en los objetivos planteados. Las estadísticas de los compósitos muestran que la mayoría de las especies tienen valores en un rango de dos órdenes de magnitud (Tabla 4-6), lo cual puede ser positivo al momento de la estimación, sin embargo, el valor más crítico son los coeficientes de variación, los que muestran

que, excepto para el cobre total en todas los dominios de estimación, el valor promedio de las muestras puede no ser representativo con certeza, siendo factible la presencia de sesgo al momento del muestreo o la selección de muestras a cuantificar.

Tabla 4-6: Estadísticas de los compósitos originales (datos A) para las especies de interés

Dominio de Estimación	Especie	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
Secundario Fuerte	CuT	0.743	0.040	5.352	0.517	0.696
	CuS	0.167	0.010	2.451	0.140	0.841
	CuCN	0.498	0.005	4.657	0.394	0.792
Secundario Débil	CuT	0.235	0.010	1.434	0.200	0.853
	CuS	0.040	0.001	0.446	0.050	1.265
	CuCN	0.119	0.001	1.069	0.173	1.452
Primario con Ley	CuT	0.313	0.010	4.304	0.232	0.739
	CuS	0.019	0.002	0.527	0.036	1.930
	CuCN	0.057	0.001	3.420	0.218	3.819
Primario Estéril	CuT	0.084	0.001	1.070	0.065	0.780
	CuS	0.015	0.001	1.070	0.054	3.613
	CuCN	0.015	0.001	0.741	0.037	2.406

Mencionar que no se realiza una comparación de la asignación de muestras sobre los dominios de estimación desde la base datos, con respecto a la asignación del “flageo” de los modelos tridimensionales, dado que la base de datos no tiene la información de mapeo geológico ordenada para su uso. Para el caso base 1 y el propuesto 1 se usan directamente estos compósitos para la estimación, siendo las estadísticas finales las recién presentadas.

4.4.2 Desagrupamiento y Capping

Parte importante del estudio está en agregar estos elementos para el análisis de la sensibilidad de los métodos de estimación, logrando así evaluar efectivamente si tener dominios de estimación que tienen zonas excesivamente muestreadas y/o con leyes elevadas afectan la consistencia de las estimaciones, considerando que uno de los efectos esperados de la metodología propuesta es reducir al máximo los bloques con leyes inconsistentes respecto de la relación que deben mantener las variables. Así mismo, en términos prácticos y más relacionados con los resultados para el cliente, es importante realizar este proceso ya que, por diversas razones, las decisiones de muestreo suelen ser algo sesgadas a zonas específicas, lo que podría conllevar a errores e incertidumbre en la definición de los Recursos Minerales y cuantificación económica del proyecto.

La técnica que permite resolver esta situación es el desagrupamiento, el cual otorga un factor de corrección o peso a las muestras, en función de un proceso que evalúa su representatividad en el espacio. Existen múltiples variantes de este método para lograr su fin, sin embargo, para este estudio se usa el llamado método de celdas. A pesar de tener en cuenta que la base de datos contiene información de tres especies de cobre con muestreo heterotópico, se decide desagrupar respecto a la variable mayoritaria (cobre total) y luego usar esos mismos ponderadores para las otras especies de cada muestra. Se considera que lo anterior debiese permitir no perder información de las relaciones entre las variables que se presentan en la base de datos, lo que debiera corroborarse al encontrar que las razones de solubilidad no varían posteriormente a la ejecución de este proceso (por lo menos no significativamente).

El método elegido asigna los valores en función del espacio total en el que existen muestras y el específico que ocupan las muestras. Para lo anterior se realiza un análisis de las dimensiones más adecuadas de las celdas, tomando un rango amplio y eligiendo aquella que minimiza la media desagrupada. Los resultados muestran en general una reducción de valores de cobre total, tanto para los secundarios (Figura 4-3) como para los primarios (Figura 4-4), ya que el valor promedio en los gráficos se desplaza en la dirección inferior.

A pesar de la observación anterior, también es visible que en los cuatro dominios, existen muestras que al ser ponderadas por sus respectivos factores, producen valores de cobre total sobre el valor máximo de los datos no desagrupados. Estas muestras no necesariamente corresponden a los valores más altos de la base de compósitos original, pero en definitiva aumentan el número de muestras que eventualmente están sobre el percentil 99%, las cuales serán truncadas. Cabe resaltar que este efecto es más visible en el sulfuro secundario débil. De igual forma es visible una reducción en el rango entre el primer y tercer cuartil, la cual se traduce en una reducción de varianza posterior al procesamiento de la base de datos.

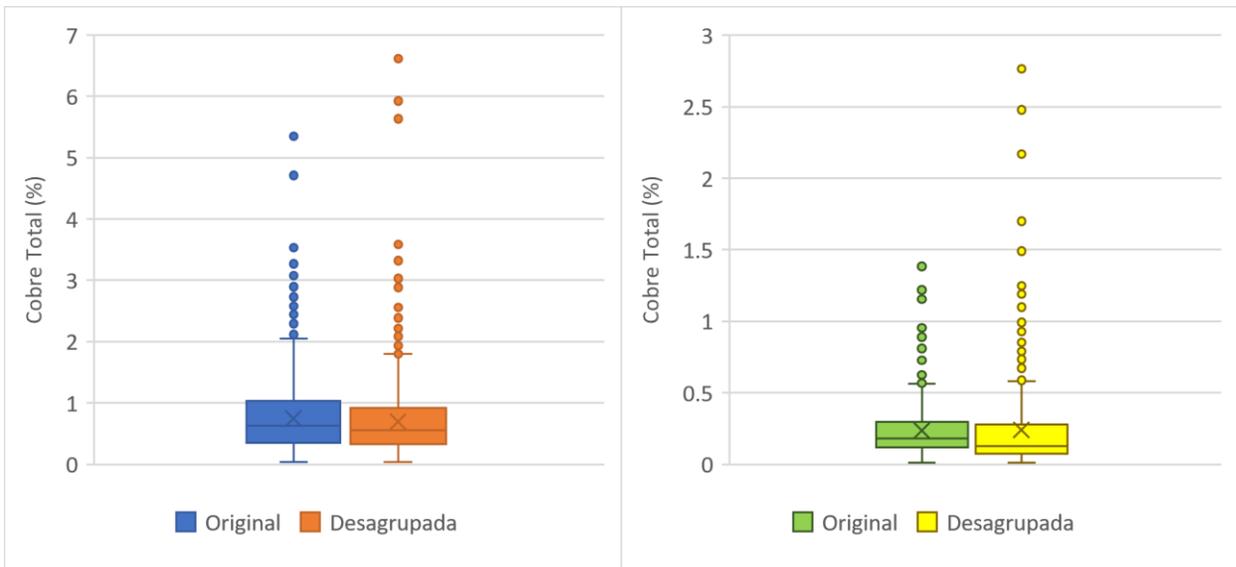


Figura 4-3: Box-plot del cobre total en el sulfuro secundario fuerte (izq) y débil (der) de la base original y desagrupada

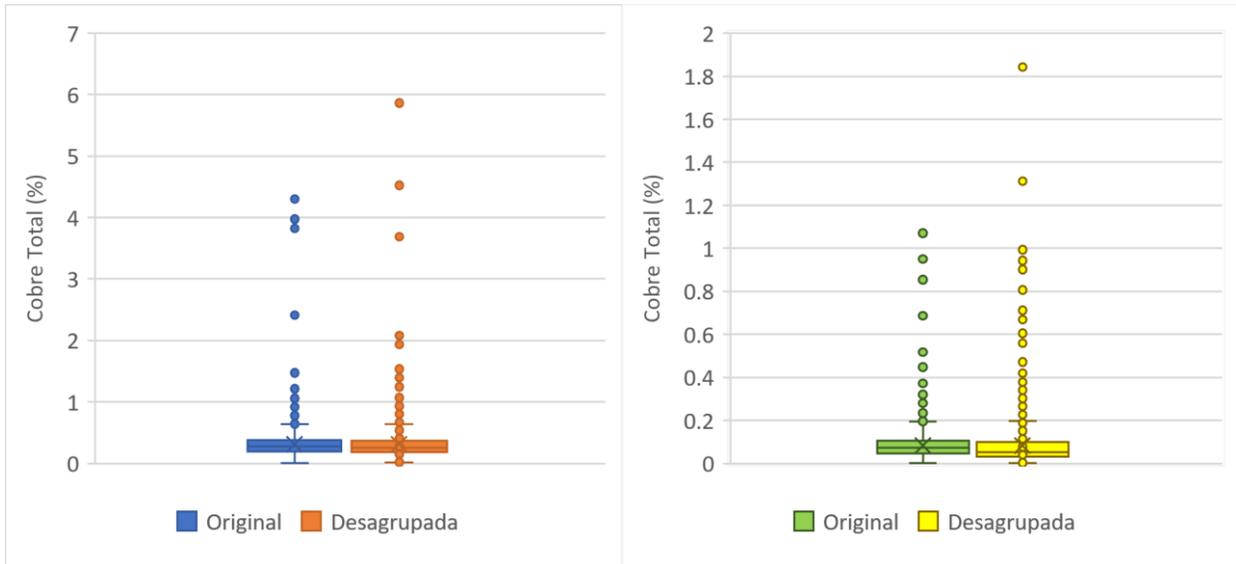


Figura 4-4: Box-plot del cobre total en el sulfuro primario con ley (izq) y estéril (der) de la base original y desagrupada

Para la selección de valores aberrantes se adopta un criterio por cuantiles, truncando las muestras que se encuentren sobre el 99% de las curvas de distribución acumulada de cobre total en los dominios. Este criterio es conservador y su efecto depende de la distribución de los datos desagrupados y la cantidad de muestras que contenga el dominio (Anexo 8-4), siendo 19 datos truncados en el secundario fuerte, 4 en el secundario débil, 16 en el primario con ley y 25 en el primario estéril, generando nuevas estadísticas (Tabla 4-7). De aquí en adelante los compósitos originales serán nombrados “datos A” y los desagrupados y con capping, “datos B”.

Tabla 4-7: Estadística de los compósitos desagrupados y con capping (datos B) para las especies de interés

Dominio de Estimación	Especie	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
Secundario Fuerte	CuT	0.671	0.038	2.389	0.456	0.679
	CuS	0.154	0.005	1.381	0.131	0.847
	CuCN	0.437	0.005	2.226	0.339	0.774
Secundario Débil	CuT	0.217	0.011	1.286	0.231	1.065
	CuS	0.039	0.001	0.471	0.058	1.482
	CuCN	0.117	0.001	0.834	0.179	1.524
Primario con Ley	CuT	0.297	0.018	1.036	0.161	0.544
	CuS	0.018	0.003	0.805	0.036	2.014
	CuCN	0.041	0.001	0.590	0.073	1.769
Primario Estéril	CuT	0.076	0.001	0.472	0.069	0.901
	CuS	0.011	0.000	0.777	0.039	3.434
	CuCN	0.014	0.000	0.387	0.029	2.150

4.4.3 Determinación de las Relaciones entre Leyes Medias

Un elemento muy importante para la memoria, es poder definir los coeficientes que controlan las relaciones de las especies de cobre dentro de cada dominio de estimación, lo que puede ser resuelto por lo menos de tres formas. La primera es considerar como coeficiente la razón entre la ley media de cobre total y la ley media de alguna de las dos especies lixiviables, siendo ésta la solubilidad media. Por ejemplo, en el secundario fuerte, tomando los datos de la Tabla 4-7, las razones medias de solubilidad son 0.23 para el cobre soluble y 0.65 para el cobre cianurable, por lo que las ecuaciones de medias relacionadas que usa el estimador serían del tipo: " $\overline{CuT} - 0.23 * \overline{CuS} = 0$ " y " $\overline{CuT} - 0.65 * \overline{CuCN} = 0$ ", respectivamente.

Por otro lado, una segunda aproximación sería usar relaciones de ajuste lineal que dieran cuenta un comportamiento más detallado de los datos. Siguiendo con el dominio de ejemplo, se puede construir una relación de cobre soluble y cobre total, y otra de cobre cianurable y cobre total (Figura 4-5). Como se puede observar, los coeficientes para el caso de las regresiones varían respecto al otro método, disminuyendo en el caso del cobre soluble, el cual tiene además un coeficiente de ajuste bajo, y aumentando respecto al cobre cianurable, lo que posteriormente afectará a las estimaciones. Además, dada la forma de los ajustes lineales, se tendría que evaluar alguna forma de incluir el efecto de los sumandos, lo cual dado el planteamiento matemático del interpolador es factible (Ecuación 19), sin embargo, para este estudio se prefiere no considerarlo.

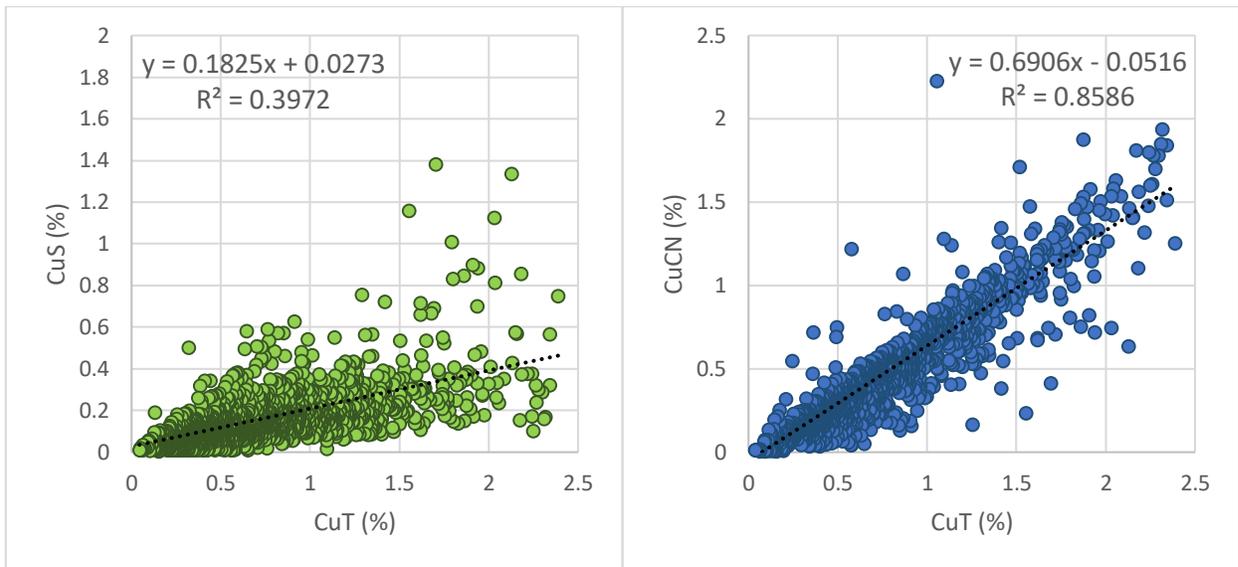


Figura 4-5: Relación lineal entre el CuT y CuS (izq) y el CuT y CuCN (der) del secundario fuerte

El tercer enfoque es similar al primero, agregando ciertos requerimientos. Para encontrar el parámetro se considera la variable “ $Y = CuQ - a * CuT$ ”, donde “ CuQ ” es cualquiera de las especies y “ a ” el coeficiente de relación, entonces se impone que la variable “ Y ” tenga esperanza nula, lo que se logra con un único valor de “ a ”. Cabe resaltar dos elementos importantes, primero notar que esta tercera forma implica que solo se usan las muestras homotópicas en cada uno de los dominios de estimación y segundo, es posible cambiar la función “ Y ” por la diferencia cuadrática, la que entrega valores ligeramente diferentes.

Bajo estas consideraciones y la recomendación del guía de la memoria, se decide usar la última forma descrita, determinando de esta manera 16 coeficientes de relación (Tabla 4-8), 8 para los casos base 1 y propuesto 1 que usan los “datos A” y 8 para los otros dos casos, que usan los “datos B”. Para observar el grado de precisión que tiene la relación lineal, se generan gráficos de dispersión entre el cobre total y los valores de la variable “ Y ” en todos los dominios de estimación, para los “datos A” (Anexo 8-5 y Anexo 8-6) y para los “datos B” (Anexo 8-7 y Anexo 8-8). En éstos, se puede observar que los valores se distribuyen en torno a la horizontal de valor cero, donde los valores positivos son menos frecuentes que los negativos, pero éstos se encuentran más alejados del valor nulo. Según estos resultados se puede validar la hipótesis del subcapítulo anterior, que señala que, posterior al desagrupamiento y capping de los datos, las relaciones entre las medias de las variables se mantienen constantes en el espacio.

Tabla 4-8: Coeficientes de relación entre las medias de las especies de cobre para todos los dominios de estimación

Dominio de Estimación	Propuesto 1		Propuesto 2	
	Coeficiente CuS	Coeficiente CuCN	Coeficiente CuS	Coeficiente CuCN
Secundario Fuerte	0.215	0.627	0.222	0.618
Secundario Débil	0.133	0.394	0.142	0.406
Primario con Ley	0.053	0.160	0.054	0.125
Primario Estéril	0.176	0.181	0.155	0.197

4.5. Modelamiento Variográfico

Para realizar el modelamiento variográfico, se procede con la metodología tradicional, realizando en primera instancia un estudio variográfico donde se revisa si las variables muestran por lo menos una dirección de anisotropía, y se define preliminarmente los parámetros de tolerancia de los variogramas directos y cruzados experimentales que se deben calcular. Estos estudios usan mapas variográficos, ya sea de las variables solas o en pares, y están separados por dominio de estimación, por lo que se contempla la generación y estudio de una gran cantidad de mapas. Cabe mencionar que estos estudios incluyen el análisis de continuidad espacial, considerando las distribuciones de valores y densidad de muestras para el cálculo.

Los primeros estudios están enfocados en los variogramas directos que se usarán en los casos base 1 y 2, donde se observa por dominio las posibles direcciones de los variogramas, siendo en algunos bastante visibles, como por ejemplo la del cobre total para el sulfuro secundario fuerte (Figura 4-6) pero en otros no tanto, como la de los cobres soluble y cianurable en el primario estéril. A partir de lo anterior, se determina que, en los sulfuros primarios, los mapas variográficos del cobre soluble y cianurable no son lo suficientemente interpretables para considerar el uso de variogramas en su estimación, considerando además que su aporte en términos económicos al proyecto es bastante menor. En este sentido, se decide estimar las variables usando el método de inverso de la distancia (ID), en el cual es posible incorporar direcciones preferenciales, que efectivamente se pueden definir para el cobre soluble en los dos cuerpos primarios. En concreto el estudio revela que, para los sulfuros secundarios las tres variables (cobre total, cobre soluble y cobre cianurable) tienen tres direcciones de anisotropía (Tabla 4-9), mientras que en los sulfuros primarios solo el cobre total y cobre soluble tienen dos direcciones, dejando al cobre cianurable sin dirección preferencial alguna.

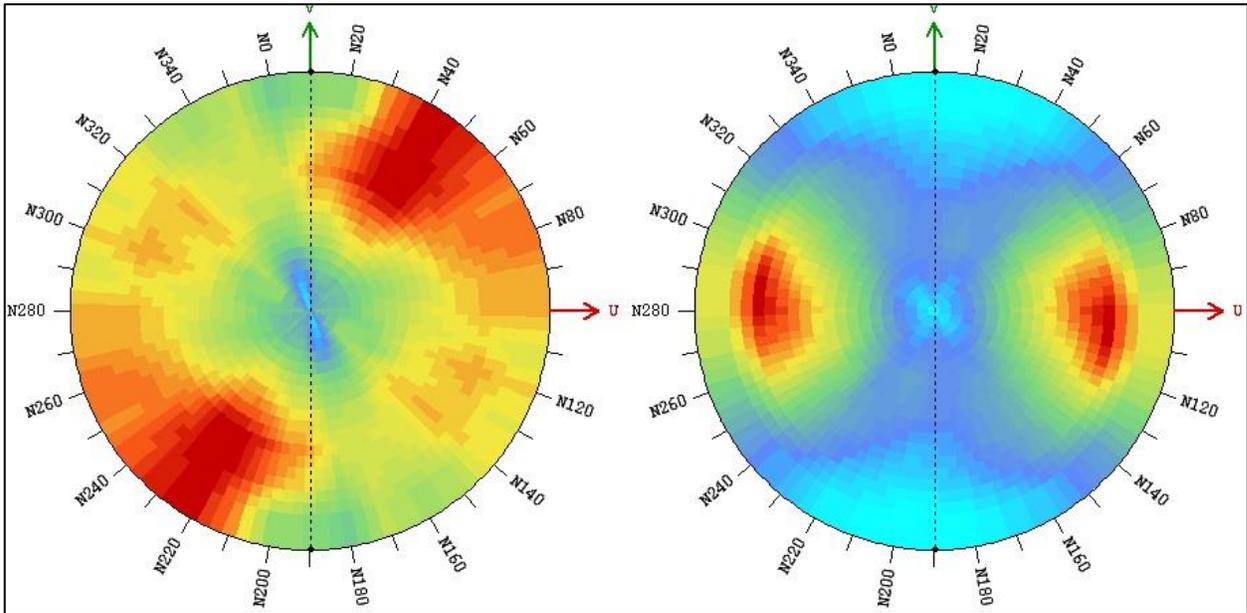


Figura 4-6: Mapa variográfico (izq) y pares calculados (der) del cobre total en el dominio secundario fuerte

Tabla 4-9: Método de estimación y direcciones de anisotropía interpretables del caso base 1 y 2 para cada dominio de estimación

Dominio de Estimación	Cobre Total (CuT)		Cobre Soluble (CuS)		Cobre Cianurable (CuCN)	
	Método	Direcciones de Anisotropía	Método	Direcciones de Anisotropía	Método	Direcciones de Anisotropía
Secundario Fuerte	Kriging Ordinario	3	Kriging Ordinario	3	Kriging Ordinario	3
Secundario Débil	Kriging Ordinario	3	Kriging Ordinario	3	Kriging Ordinario	3
Primario con Ley	Kriging Ordinario	2	Inverso de la Distancia	2	Inverso de la Distancia	0
Primario Estéril	Kriging Ordinario	2	Inverso de la Distancia	2	Inverso de la Distancia	0

Posteriormente, se ajustan modelos anidados sobre los variogramas experimentales, usando modelos elementales bien definidos, entre los que tradicionalmente se usan están el modelo esférico (esf) y el modelo exponencial (exp). Cabe resaltar que en este estudio se incorpora un análisis adicional para la construcción de los modelos, el que tienen que ver con la medición de variabilidad de las leyes a pequeñas distancias, denominado efecto pepa. La herramienta para determinar este efecto, es el cálculo y modelamiento del variograma a través de los sondajes de cada dominio de estimación, conocido como análisis “down the hole”, que describe la variabilidad a pequeña escala, dado que las muestras están sobre los sondajes a la

menor distancia posible en promedio. Incluyendo la información del efecto pepa, se modela los variogramas de todas las variables regionalizadas. Para el dominio sulfuro secundario fuerte se tiene tres modelos con gran calidad de ajuste (Anexo 8-9), donde para el cobre total y soluble se usa dos modelos anidados, mientras que para el cobre cianurable son tres los ajustados (Tabla 4-10). En el dominio sulfuro secundario débil, los modelamientos también tienen un buen ajuste (Anexo 8-10) y todas las variables requieren únicamente de dos funciones básicas. En los dominios de sulfuro primario, solo se tiene los modelos para el cobre total (Anexo 8-11), donde en el primario con ley la dirección mayor es sub-vertical y en el primario estéril las direcciones sobre el plano horizontal son mayores. Estos parámetros definidos para los modelos, son los necesarios y suficientes para ser usados en cualquier software comercial para realizar la interpolación, siendo uno de éstos usado en la estimación de los casos base de la memoria.

Tabla 4-10: Resumen de los parámetros variográficos para la interpolación por kriging ordinario

Dominio de Estimación	Especie	Efecto Pepa	Mod	Meseta	Alcance (m)			Plunge	Azimuth	Dip
					Mayor	Semi	Menor			
Secundario Fuerte	CuT	0.0189	Exp	0.1500	110	90	25	10	100	0
			Esf	0.0780	140	90	inf			
	CuS	0.0009	Esf	0.0077	40	30	8	10	70	10
			Esf	0.0050	210	90	inf			
	CuCN	0.0051	Esf	0.0450	30	16	12	10	100	10
			Esf	0.0400	100	105	25			
Esf			0.0395	225	150	inf				
Secundario Débil	CuT	0.0027	Esf	0.0053	140	80	45	10	40	0
			Esf	0.0225	250	200	40			
	CuS	0.0004	Esf	0.0003	175	30	15	10	80	10
			Esf	0.0005	175	78	20			
	CuCN	0.0001	Esf	0.0062	15	200	15	0	130	0
			Esf	0.0152	135	220	12			
Primario con Ley	CuT	0.0016	Esf	0.0016	12	12	10	0	90	10
			Esf	0.0158	70	70	160			
Primario Estéril	CuT	0.0003	Esf	0.0003	10	10	60	0	90	0
			Esf	0.0009	180	180	80			

Dado que el modelamiento de variogramas cruzados es complejo, ya que se trata de encontrar direcciones en las que la correlación espacial de todas las variables sea visibles e interpretables, se decide priorizar el análisis de la variable principal cobre total (CuT) con respecto a las otras dos restantes, para luego aproximar el variograma experimental cruzado a las

direcciones más robustas que se encuentren en este proceso, por lo que el número de estudios variográficos es de ocho en total.

A modo de ejemplo, en el dominio de estimación del sulfuro secundario fuerte se generan los mapas variográficos cruzados para el cobre total y soluble (Figura 4-7), y para el cobre total y cianurable (Figura 4-8), donde se analiza las posibles direcciones de anisotropía existentes y el número de pares de muestras que las sustentan. En este caso, el primer par (CuT y CuS) muestra una anisotropía débil, posiblemente modelable por dos direcciones, debido a que en su plano de análisis se observa más bien una anisotropía zonal. En cambio, para el segundo par (CuT y CuCN) la anisotropía es clara, siendo ésta geométrica y sustentada por un número considerable de pares para el cálculo en las direcciones del plano. En este sentido, con este análisis se puede establecer que es posible un modelamiento para el sulfuro secundario fuerte con tres direcciones ortogonales, siendo la mayor sub-horizontal y la menor sub-vertical.

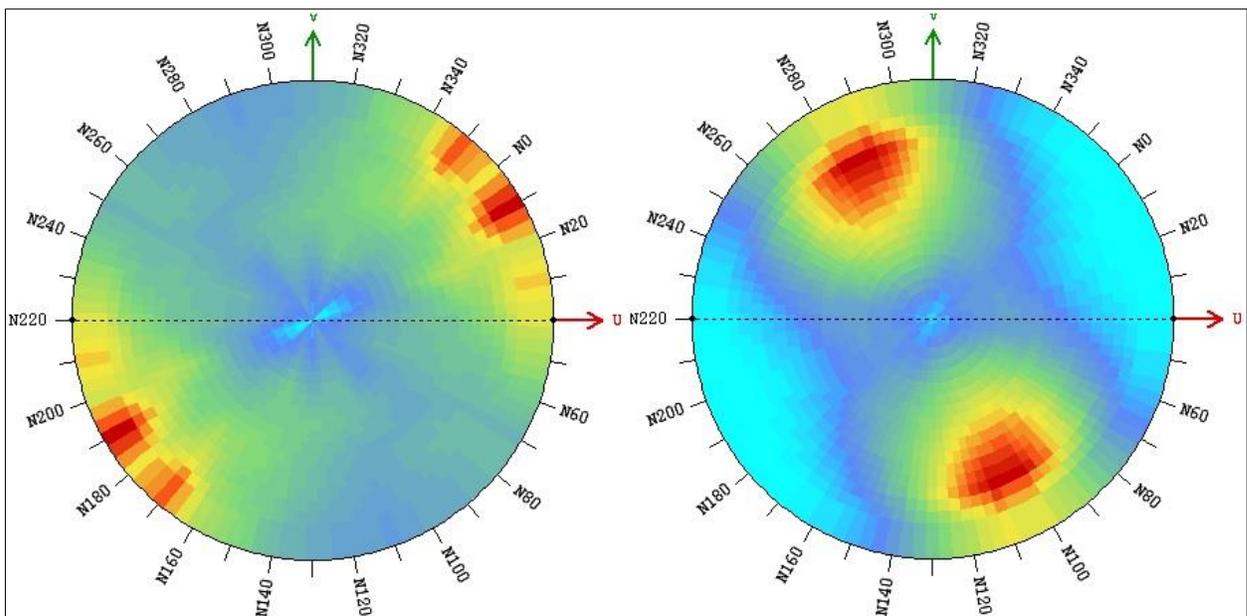


Figura 4-7: Mapa variográfico cruzado (izq) y pares calculados (der) del CuT/CuS en el sulfuro secundario fuerte

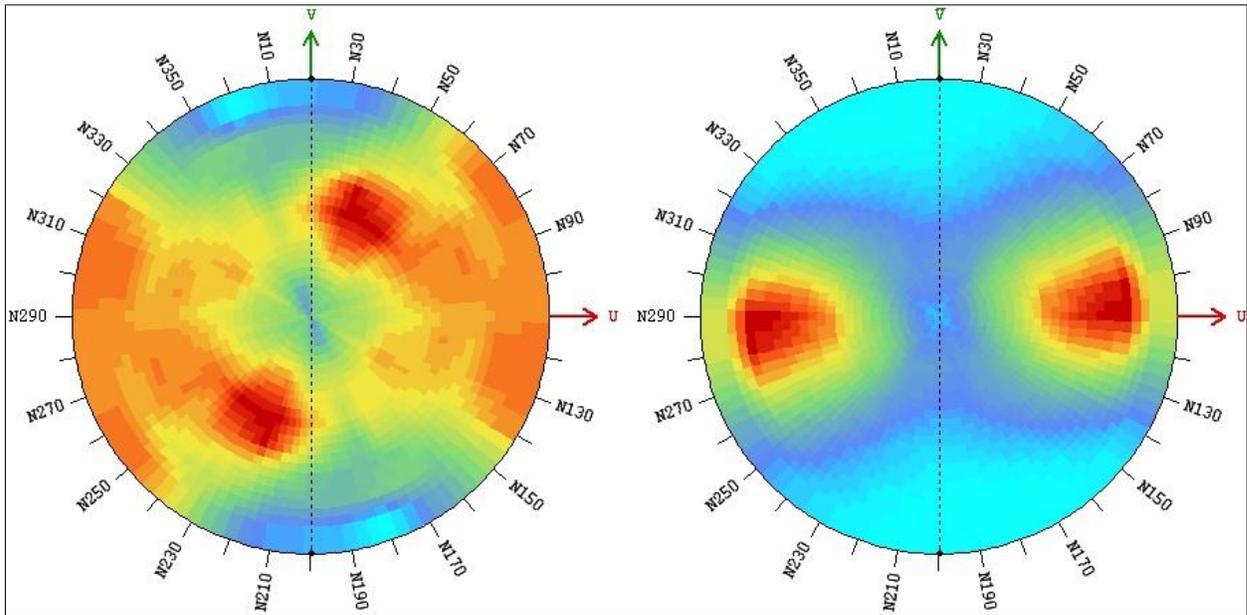


Figura 4-8: Mapa variográfico cruzado (izq) y pares calculados (der) del CuT/CuCN en el sulfuro secundario fuerte

Estos mapas son generados para los otros tres dominios de estimación, realizando el mismo análisis similar al ejemplificado anteriormente, de los que se establece las potenciales direcciones para los variogramas directos y cruzados experimentales (Tabla 4-11). Como se puede observar, el sulfuro secundario fuerte tiene tres direcciones principales, el sulfuro secundario débil y sulfuro primario con ley presentan dos direcciones, mientras que para el primario estéril no se aprecia ninguna dirección principal interpretable, lo que es esperable, dado que el dominio presenta valores escasos y muy bajos de cobre soluble y cianurable, además de una fuerte discontinuidad de muestras, dado que el cuerpo del primario con ley lo atraviesa totalmente en su zona central.

Tabla 4-11: Direcciones de anisotropía interpretables del caso propuesto 1 y 2 para cada dominio de estimación

Dominio de Estimación	Direcciones Potenciales	CuT y CuS			CuT y CuCN		
		Plunge	Azimuth	Dip	Plunge	Azimuth	Dip
Secundario Fuerte	3	0	40	10	10	120	0
Secundario Débil	2	10	130	-10	-10	110	0
Primario con Ley	2	0	90	-10	0	90	-10
Primario Estéril	0	0	90	0	0	90	0

Luego, se procede a revisar cuál de las direcciones estudiadas es más representativa para los variogramas directos y cruzados de las tres variables en los dominios de estimación. En este sentido, se decide que para el sulfuro secundario fuerte, la dirección principal será similar a la que presentan el segundo par (CuT y CuCN), para el sulfuro secundario débil se toma como dirección principal la estudiada con el primer par (CuT y CuS), y en los sulfuros primarios se toman los parámetros de dirección indiferentemente, dado que son los mismos (Tabla 4-11).

De forma similar a los casos base 1 y 2, se ajustan modelos anidados sobre los variogramas experimentales directos y cruzados que están definidos por las direcciones principales elegidas, usando modelos elementales bien definidos (esférico y cubico). Dada la cantidad de los parámetros de los modelos establecidos, es preferible presentarlos en forma de ecuaciones matriciales, donde los términos de los variogramas directos y cruzados están dispuestos en las posiciones que muestran la matriz de la Ecuación 24. El primer dominio modelado es el sulfuro secundario fuerte (Ecuación 25), cuyos variogramas anidados se ajustan satisfactoriamente a los experimentales (Anexo 8-13). Cabe notar en este dominio, que al igual que los variogramas para los casos base, los modelos cruzados muestran que la dirección subvertical menor, tiende a formar una anisotropía zonal. El segundo dominio modelado es el sulfuro secundario débil (Ecuación 26), donde sus variogramas con únicamente dos direcciones, tienen relativamente un buen ajuste, excepto para el cobre soluble (Anexo 8-14). El tercer dominio trabajo es el sulfuro primario con ley (Ecuación 27), cuyos variogramas tienen dos direcciones, similar al dominio anterior, pero muestran un ajuste relativamente más pobre, sobre todo en los modelos relacionados a los cobres lixiviables (Anexo 8-15). El último dominio es el sulfuro primario estéril (Ecuación 28), cuyos modelos son simples y bien ajustados (Anexo 8-16).

$$C = \begin{pmatrix} \gamma_{cut} & \gamma_{cut/cus} & \gamma_{cut/cucn} \\ \gamma_{cut/cus} & \gamma_{cus} & \gamma_{cus/cucn} \\ \gamma_{cut/cucn} & \gamma_{cus/cucn} & \gamma_{cucn} \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{pmatrix} 0.043 & 0.004 & 0.026 \\ 0.004 & 0.002 & 0.002 \\ 0.026 & 0.002 & 0.027 \end{pmatrix} pepita + \begin{pmatrix} 0.052 & 0.011 & 0.036 \\ 0.011 & 0.005 & 0.006 \\ 0.036 & 0.006 & 0.027 \end{pmatrix} cub(30,90,15) \\ + \begin{pmatrix} 0.128 & 0.021 & 0.095 \\ 0.021 & 0.007 & 0.012 \\ 0.095 & 0.012 & 0.076 \end{pmatrix} esf(170,120,300) \quad (25)$$

$$\begin{pmatrix} 0.0039 & 0.0013 & 0.0028 \\ 0.0013 & 0.0005 & 0.0010 \\ 0.0028 & 0.0010 & 0.0022 \end{pmatrix} pepita + \begin{pmatrix} 0.0051 & 0.0 & 0.005 \\ 0.0 & 0.0001 & 0.0 \\ 0.005 & 0.0028 & 0.005 \end{pmatrix} esf(60,100,100) \\ + \begin{pmatrix} 0.06 & 0.008 & 0.0028 \\ 0.008 & 0.0022 & 0.008 \\ 0.034 & 0.008 & 0.03 \end{pmatrix} esf(200,80,80) \quad (26)$$

$$\begin{pmatrix} 0.0093 & 0.0007 & 0.0015 \\ 0.0007 & 0.0002 & 0.0003 \\ 0.0015 & 0.0003 & 0.0009 \end{pmatrix} pepita + \begin{pmatrix} 0.0015 & 0.0 & 0.001 \\ 0.0 & 0.0002 & 0.0002 \\ 0.001 & 0.0002 & 0.001 \end{pmatrix} esf(35,35,230) \\ + \begin{pmatrix} 0.018 & 0.0013 & 0.0068 \\ 0.0013 & 0.0002 & 0.0009 \\ 0.0068 & 0.0009 & 0.0045 \end{pmatrix} esf(50,50,260) \quad (27)$$

$$\begin{pmatrix} 0.0012 & 0.0001 & 0.0005 \\ 0.0001 & 0.0001 & 0.0001 \\ 0.0005 & 0.0001 & 0.0004 \end{pmatrix} pepita + \begin{pmatrix} 0.0031 & 0.0008 & 0.0005 \\ 0.0008 & 0.0012 & 0.0006 \\ 0.0005 & 0.0006 & 0.0004 \end{pmatrix} esf(260,260,260) \quad (28)$$

4.6. Definición de Planes de Estimación y Ejecución de la Interpolación

Respecto al modelo de bloques, éste es el mismo para los cuatro casos de estudio (Tabla 4-12), tal que es lo suficientemente grande para contener a todos los 302 sondajes con los que se trabaja. Respecto al análisis del tipo de frontera (contacto), a partir de las conversaciones con profesionales de Wood y las consultas realizadas a los encargados del proyecto, se establece que la mejor forma de trabajo es considerar que todos los dominios de estimación tienen frontera dura, por lo que únicamente usan las muestras en su interior para la interpolación. Lo anterior tiene que ver principalmente con los efectos de tomar muestras de cobre soluble y cianurable entre dominios, los que podrían potenciar las inconsistencias de estimación.

Los planes de estimación y en sí la misma interpolación de las variables, difieren entre los casos base y los propuestos. Lo anterior se debe a la diferencia en la flexibilidad de la selección de parámetros que se tiene para estimar. Mientras que para los casos base 1 y 2 se realiza la estimación a través de un software comercial, para los casos propuestos 1 y 2, dada la novedad de la metodología, se usa un “*script*” único (en el lenguaje GNU Octave) que contiene la implementación específica y necesaria para realizar la interpolación (Emery, 2012).

Tabla 4-12: Límites del modelo de bloques

Dirección	Mínimo	Máximo	Tamaño de Bloque	Número de Bloques
Este	238094	239584	5	298
Norte	6091082	6092002	5	184
Elevación	830	1330	5	100

Considerando lo anterior, se definen primero los parámetros de los casos base (Tabla 4-13), tal que se diseña una metodología de estimación de tres pasadas para las tres variables de cobre, donde progresivamente se aumentan los rangos de la elipse de búsqueda, manteniendo

constante el número total de muestras requeridas para la interpolación. Esta estrategia, la cual ha sido revisada y formulada con los expertos del proyecto, logra sobre 90% de estimación de las tres variables en los bloques de los sulfuros secundarios y el primario con ley (Anexo 8-9), que son los dominios más importantes económicamente para el proyecto.

Tabla 4-13: Parámetros de los planes de estimación para los cuatro casos de estudio

Caso	Discretización del Bloque	Pasadas	Mínimo Numero de Muestras	Radios de Elipses por Pasada (Porcentaje del Alcance, %)
Base 1	8 puntos	3	6	50,100,200
Base 2	8 puntos	3	6	50,100,200
Propuesto 1	8 puntos	1	1	50
Propuesto 2	8 puntos	1	1	50

Para los casos propuestos, el “script” tiene una menor flexibilidad para elegir los parámetros respecto al uso de muestras, por lo que se diseña una estrategia de una sola pasada, pensando en lograr un porcentaje de estimación parecido al de los casos base. Por ejemplo, para el sulfuro secundario fuerte se genera un archivo especial con los parámetros relevantes, donde se ingresan los modelos, los coeficientes de relación y la restricción de muestras (Figura 4-9), las que pueden estar en términos totales o por octantes, siendo el umbral limite al uso de muestras. En ésta, se observa efectivamente que el elipsoide de búsqueda está alineado con las direcciones de los variogramas y que sus radios son los alcances al 50% de lo que están modelados. De forma similar, se generan los archivos para los tres dominios restantes (Anexo 8-17, Anexo 8-18 y Anexo 8-19). A partir de los parámetros expuestos es posible realizar el poblamiento del modelo de bloques.

```

START OF PARAMETERS:
1 % type of cokriging: 0=gridded locations; 1=scattered locations
SSF.csv % if =1: file with coordinates of locations for cokriging
1 2 3 % columns for location coordinates
5.0 5.0 5.0 % if =0: x0, y0, z0
52 42 20 % nx, ny, nz
10.0 10.0 10.0 % dx, dy, dz
2 2 2 % block discretization (1 1 1 for point-support cokriging)
comp_ssf.csv % file with conditioning data
1 2 3 % columns for coordinates
4 5 6 % columns for data values
0 1e21 % trimming limits for data values
2 % number of constraints on the mean values of the form sum{a_ki*m_i} = b_k
0.215 -1 0 0 % 1st constraint: coefficients a_ki and b_k for k=1
0.627 0 -1 0 % 2nd constraint: coefficients a_ki and b_k for k=1
2 % number of nested structures
5 30 90 15 120 10 0 1 % 1st structure: it a1 a2 a3 angl ang2 ang3 b
0.052 0.011 0.036 0.011 0.005 0.006 0.036 0.006 0.027 % variance-covariance matrix
1 170 120 350 120 10 0 1 % 2nd structure: it a1 a2 a3 angl ang2 ang3 b
0.128 0.021 0.095 0.021 0.007 0.012 0.095 0.012 0.076 % variance-covariance matrix
0.043 0.004 0.026 0.004 0.002 0.002 0.026 0.002 0.027 % nugget effect variance-covariance matrix
0 0 0 0 % filter out mean, nugget and/or other nested structures? 1=yes, 0=no
0 % cross-validation? 1=yes, 0=no
85 60 150 % maximum search radii in the rotated system
120 10 0 % angles for search ellipsoid
1 % divide into octants? 1=yes, 0=no
4 % optimal number of data per octant (if octant=1) or in total (if 0)
ssf.out % name of output file
3 % number of decimals for values in the output file
1 % create a header in the output file? 1=yes, 0=no

Available model types:
1: spherical
2: exponential
3: gamma (parameter b > 0)
4: stable (parameter b < 2)
5: cubic
6: Gaussian
7: cardinal sine
8: J-Bessel (parameter b > 0.5)
9: K-Bessel (parameter b > 0)
10: generalized Cauchy (parameter b > 0)
11: exponential sine

```

Figura 4-9: Parámetros de estimación por cokriging en el sulfuro secundario fuerte

Posteriormente a la interpolación, se realiza la revisión de resultados de cada caso, sin embargo, considerando la importancia económica de cada dominio en el proyecto, únicamente los resultados de los sulfuros secundarios y el primario con ley son estudiados.

En primer lugar, se tiene que los resultados del caso base 1 (Tabla 4-14), muestran porcentajes relativamente bajos de bloques que tienen una de las leyes de las especies de cobre (CuS o CuCN) no estimada, entre 0.2% y 1% respecto al total de bloques que tiene por lo menos estimación del cobre total. Junto con lo anterior, se presentan valores porcentuales importantes de los bloques que tienen alguna inconsistencia entre las variables estimadas. Se puede observar que, para los tres dominios seleccionados, las estimaciones entre el cobre cianurable y cobre total presentan porcentajes mayores de incumplimiento de la desigualdad que deben cumplir, comparándolos con los resultantes entre el cobre soluble y total. Respecto al tercer tipo de inconsistencia “ $CuT \leq CuS + CuCN$ ”, los sulfuros secundarios presentan valores sobre un cuarto del total de bloques con cobre total estimado.

Tabla 4-14: Resumen de la interpolación del caso base 1

Dominio de Estimación	Número Total de Bloques	Porcentaje de Bloques con CuT Estimado (%)	Porcentaje de Bloques sin Estimación (%)		Porcentaje de Bloques con Estimación Inconsistente (%)		
			CuS	CuCN	CuT<CuS	CuT<CuCN	CuT<CuS+CuCN
Sulfuro Fuerte	47,943	92.4	0.2	0.2	0.1	7.1	26.7
Sulfuro Débil	15,912	100	1.0	0.2	2.8	11.2	29.4
Primario con Ley	230,524	99	0.3	0.4	0.0	0.1	0.2

A partir del conocimiento de los porcentajes de bloques que presentan inconsistencias del caso 1, es interesante observar el grado de error que presentan las leyes, ya que puede ser un elemento clave al momento de comparar los casos. Observando la tabla 4-14, se considera que únicamente vale la pena realizar este análisis en los dominios de sulfuro secundario. Respecto al dominio sulfuro secundario fuerte (Figura 4-10), la diferencia en la cantidad es evidente, pero más aún el grado de error que presentan los bloques. Por un lado, se observa que en promedio de las leyes de cobre soluble es 23.8% mayor al promedio del cobre total, mientras que en el caso de las leyes de cobre cianurable, los bloques inconsistentes muestran que el valor promedio es 23.2% mayores al promedio de leyes de cobre total.

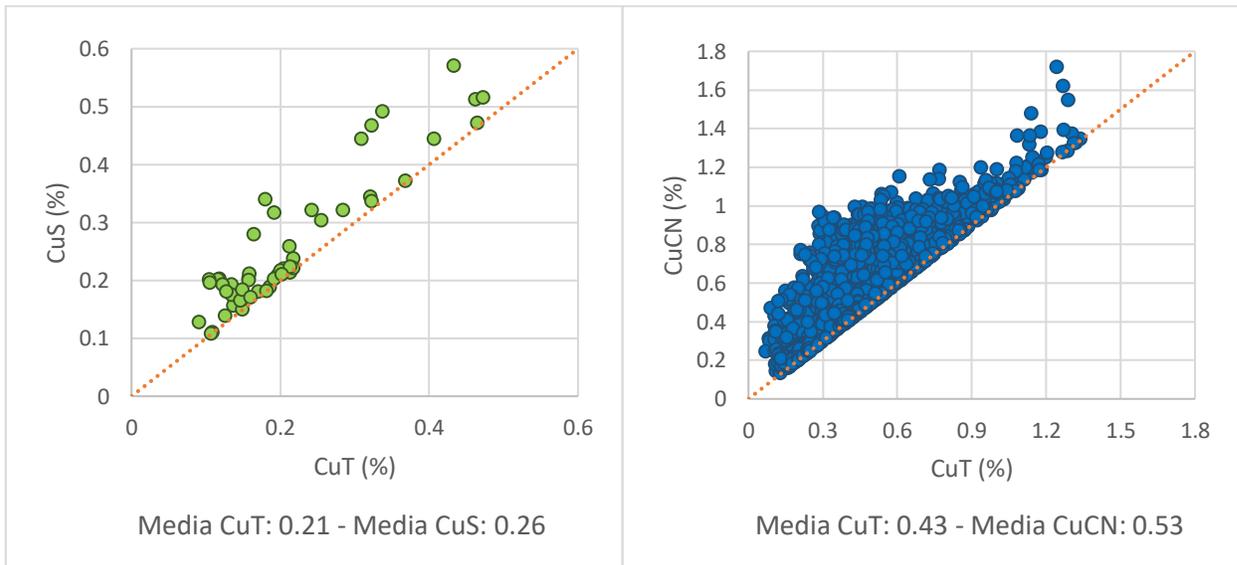


Figura 4-10: Dispersión del CuS/CuT (izq) y CuCN/CuT (der) de los bloques con inconsistencias en el dominio sulfuro secundario fuerte del caso base 1

En este mismo caso, en el dominio sulfuro secundario débil (Figura 4-11), se observa que la cantidad de bloques en el gráfico de dispersión del cobre soluble es menor respecto a la del cobre cianurable, siendo notable sobre todo que el rango de cobre total es muy estrecho (menor a 0.18% CuT). La diferencia de promedio de las leyes para los bloques con inconsistencia entre el cobre soluble y total es de 30%, mientras que para el cobre cianurable y cobre total es de 40%, el cual además presenta un rango amplio de valores de cobre total (sobre el promedio del dominio que es 0.74% CuT). Cabe mencionar que, si bien porcentualmente este dominio presenta valores más altos que los que se presentan el sulfuro secundario fuerte, la cantidad de bloques que requerirían algún tipo de proceso de corrección de leyes es mucho menor. Por ejemplo, considerando los bloques que tienen “ $CuT \leq CuCN$ ”, en el sulfuro secundario débil requiere actualizaciones en 1782 bloques críticos, mientras que el sulfuro secundario fuerte son 3145 los bloques requieren correcciones, casi 1.8 veces la cantidad del anterior dominio.

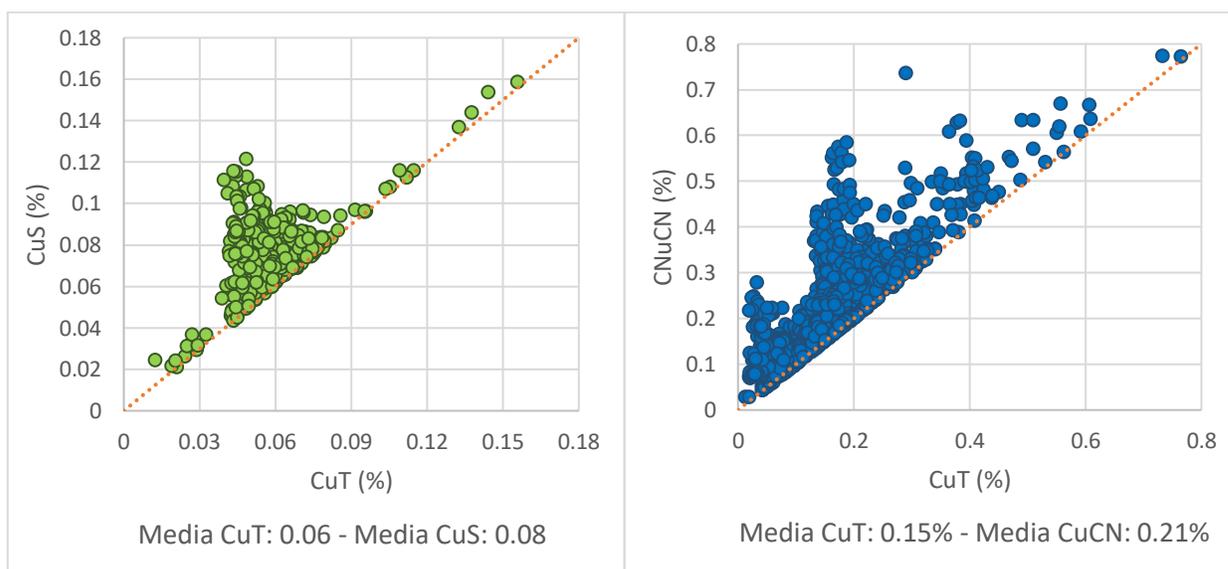


Figura 4-11: Dispersión del CuS/CuT (izq) y CuCN/CuT (der) de los bloques con inconsistencias en el dominio sulfuro secundario débil del caso base 1

Respecto a los resultados del caso base 2 (Tabla 4-15), que usa el mismo método de interpolación que el caso base 1, pero con la base de datos procesada “datos B”, se presentan algunos cambios de las cifras a remarcar. Si bien se puede ver que los porcentajes de bloques sin estimación se mantienen constante respecto al caso anterior, hay cambios (tanto crecientes como decrecientes) del número de bloques con inconsistencias. Para el sulfuro secundario fuerte aumenta incipientemente los bloques que no cumplen la primera desigualdad, mientras que el decrecimiento en las otras dos es algo más considerable, sobre 0.7 puntos porcentuales. Por otro lado, en el sulfuro secundario débil se da un aumento generalizado, casi en 1.2% para el caso más crítico, que corresponde al relacionado entre el cobre cianurable y total.

Tabla 4-15: Resumen de la interpolación del caso base 2

Dominio de Estimación	Número Total de Bloques	Porcentaje de Bloques con CuT Estimado (%)	Porcentaje de Bloques sin Estimación (%)		Porcentaje de Bloques con Estimación Inconsistente (%)		
			CuS	CuCN	CuT<CuS	CuT<CuCN	CuT<CuS+CuCN
Sulfuro Fuerte	47,943	92.4	0.2	0.2	0.2	6.4	25.1
Sulfuro Débil	15,912	100	1.0	0.2	3.2	12.4	29.1
Primario con Ley	230,524	99	0.3	0.4	0.0	0.0	0.1

Análogamente al caso base 1, se analiza el comportamiento de los bloques en los dominios sulfuros secundarios. En el sulfuro secundario fuerte se puede observar que la dispersión general es similar a la del caso anterior (Figura 4-12), presentando cambios menores en las leyes medias, siendo los bloques del primer tipo de inconsistencias los que tienen mayores cambios. En el sulfuro secundario débil es bastante visible el cambio en la dispersión general, así como también el aumento de bloques y los valores de leyes media en cada tipo de inconsistencias analizada al interior del dominio.

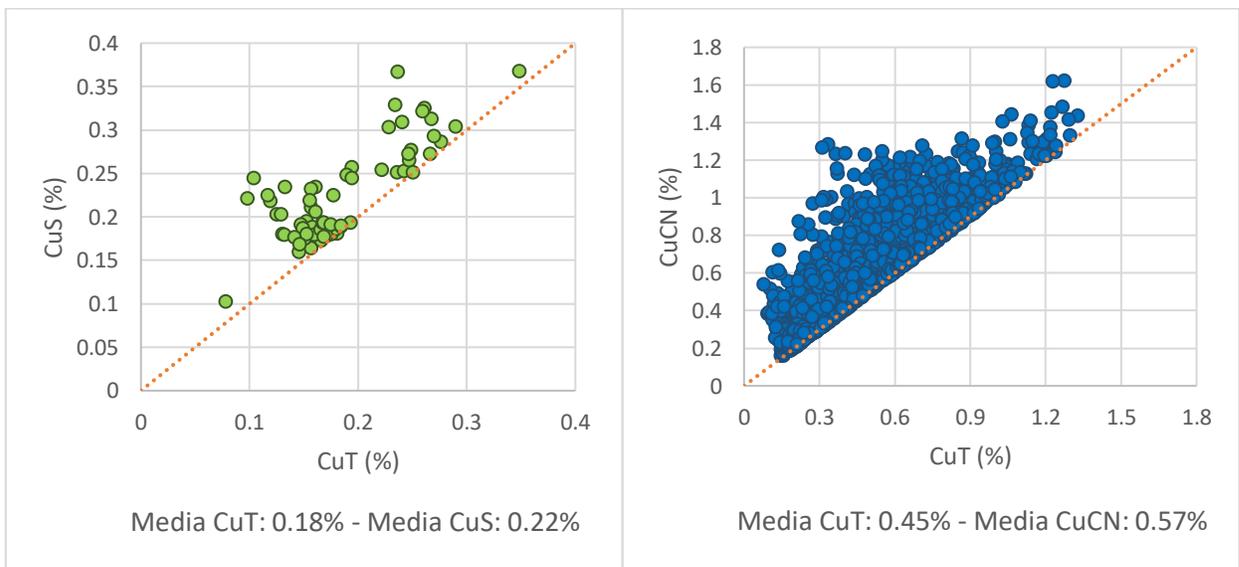


Figura 4-12: Dispersión del CuS/CuT (izq) y CuCN/CuT (der) de los bloques con inconsistencias en el dominio sulfuro secundario fuerte del caso base 2

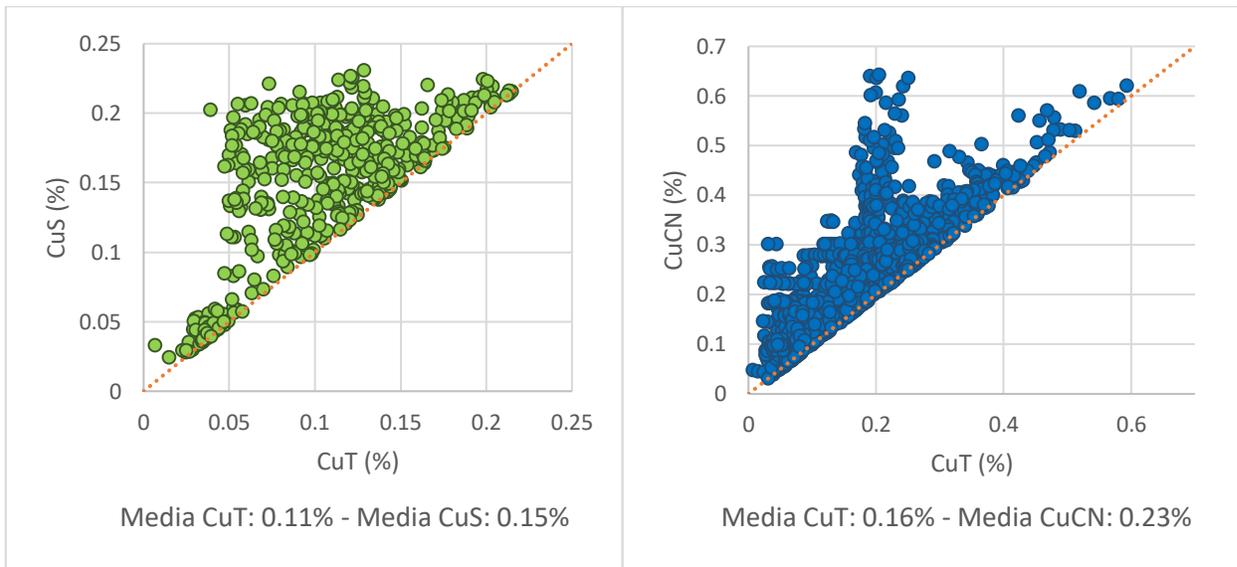


Figura 4-13: Dispersión del CuS/CuT (izq) y CuCN/CuT (der) de los bloques con inconsistencias en el dominio sulfuro secundario débil del caso base 2

Si bien las métricas analizadas respecto al método tradicional de interpolación aparecen también en los casos de la metodología propuesta, se hace presente un elemento adicional que se debe observar y analizar.

Dado el planteamiento matemático sobre el que se basan las ecuaciones de interpolación por cokriging, los resultados del proceso de estimación de los casos propuestos 1 y 2 presentan la posibilidad de encontrar bloques con valores negativos de las variables, lo que está relacionada con la posibilidad de que el método calcule ponderadores negativos. Este elemento adicional se resume por dominio de estimación y variable en ambos casos de estudio.

En el caso propuesto 1, donde los porcentajes de bloques con estimación de cobre total son similares al de los casos base, el número de bloques con leyes negativas es prácticamente de valor nulo en el sulfuro secundario fuerte y el sulfuro primario con ley, pero relativamente alto para el sulfuro secundario débil (Tabla 4-16). Se puede revisar el comportamiento general de las leyes negativas de los dos dominios que las contienen (Anexo 8-20 y Anexo 8-21), donde se observa que éstas están más bien asociadas a valores bajos de cobre total, además, las leyes medias de este grupo de bloques se muestran en la tabla 4-16, siendo visiblemente bajos. Sin perjuicio de lo anterior, para calcular los porcentajes de bloques con leyes inconsistentes, se ajustan los valores de las leyes negativas a cero, agregando la consideración de que si el bloque tiene un valor de cobre total negativo (porcentaje ínfimo en los dominios de estimación), entonces las otras dos variables igualmente son nulas.

Tabla 4-16: Resumen de la interpolación del caso propuesto 1 (efecto estimaciones negativas)

Dominio de Estimación	Porc. Est. (%)	Porcentaje Negativos CuT (%)	Porcentaje Negativos CuS (%)	Porcentaje Negativos CuCN (%)	Ley Media en Bloques con CuS Negativo (%)		Ley Media en Bloques con CuCN Negativo (%)	
					CuT	CuS	CuT	CuCN
Sulfuro Fuerte	99.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sulfuro Débil	100	0.0	1.1	6.0	0.114	-0.005	0.147	-0.015
Primario con Ley	98.4	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.254	-0.015

Respecto a las inconsistencias de este caso, se observan valores muy bajos de los porcentajes, en particular para los dominios sulfuro secundario fuerte y primario con ley (Tabla 4-17). En el sulfuro secundario débil los valores son mayores, sin embargo, representan disminuciones importantes respecto a los casos base, hasta en 73% para el tercer tipo de inconsistencia, aunque en términos prácticos todavía pueden ser altos. Respecto a los dos primeros porcentajes de los dominios cabe mencionar que la naturaleza multivariable del método propuesto, es la razón por la cual, en todos los bloques revisados, las tres variables tienen un valor estimado, siendo el cambio común a todos los dominios. Al igual que en los casos anteriores, se analiza la dispersión de los bloques con inconsistencias, siendo claro que esto solo aplica al dominio sulfuro secundario débil (Figura 4-14). Acá se puede observar primeramente que los valores de las mismas leyes son bajos, pero además se tiene que el error de los valores de cobres lixiviables respecto al cobre total es bastante bajo, sobre todo para el cobre cianurable.

Tabla 4-17: Resumen de la interpolación del caso propuesto 1

Dominio de Estimación	Número Total de Bloques	Porcentaje de Bloques con CuT Estimado (%)	Porcentaje de Bloques sin Estimación (%)		Porcentaje de Bloques con Estimación Inconsistente (%)		
			CuS	CuCN	CuT<CuS	CuT<CuCN	CuT<CuS+CuCN
Sulfuro Fuerte	47,943	99.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sulfuro Débil	15,912	100	0.0	0.0	1.1	1.6	8.0
Primario con Ley	230,524	98.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

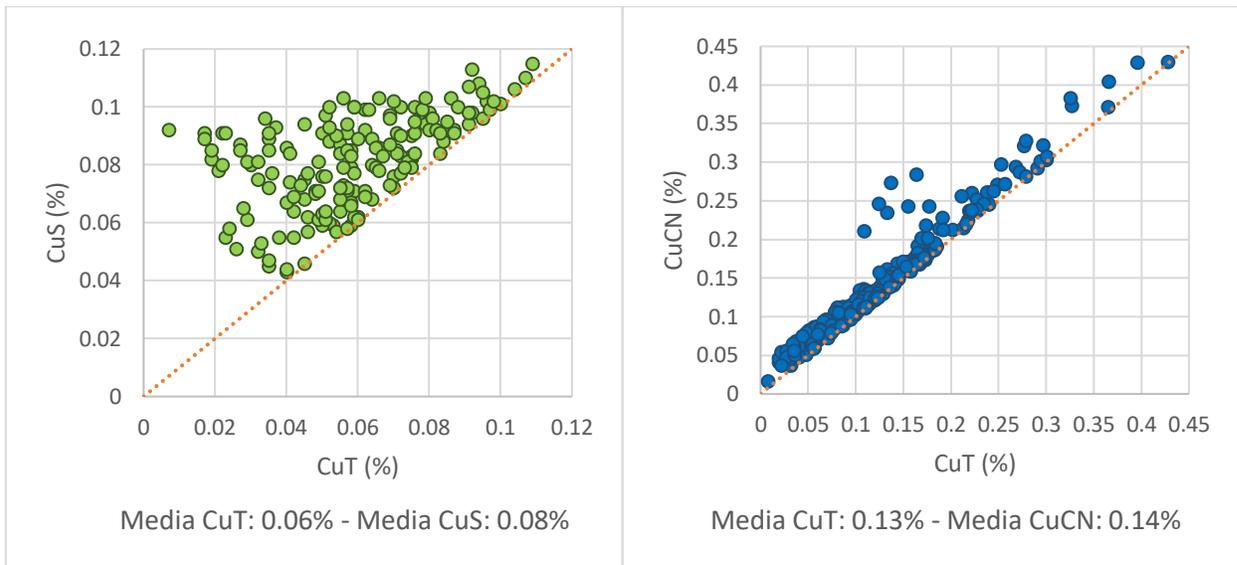


Figura 4-14: Dispersión del CuS/CuT (izq) y CuCN/CuT (der) de los bloques con inconsistencias en el dominio sulfuro secundario débil del caso propuesto 1

Respecto a los resultados del caso propuesto 2 (Tabla 4-18), que de forma similar al caso base 2, la base de datos procesada es la que se usa, donde se observa cambios en las cifras de bloques con leyes negativas. Particularmente para el dominio más interesante, el sulfuro secundario débil, se observa una disminución para la ley de cobre soluble y un aumento para la ley de cobre cianurable. Se puede observar el comportamiento general de las leyes negativas de los dos dominios que las contienen (Anexo 8-22 y Anexo 8-23), notando particularmente que el caso del cobre cianurable en el sulfuro secundario fuerte, es el gráfico de dispersión que más cambia respecto al caso anterior, además, se tiene que las leyes medias en los bloques con leyes negativas, son ligeramente más bajas que el caso propuesto 1, según la Tabla 4-18.

Tabla 4-18: Resumen de la interpolación del caso propuesto 2 (efecto estimaciones negativas)

Dominio de Estimación	Porc. Est. (%)	Porcentaje Negativos CuT (%)	Porcentaje Negativos CuS (%)	Porcentaje Negativos CuCN (%)	Ley Media en Bloques con CuS Negativo (%)		Ley Media en Bloques con CuCN Negativo (%)	
					CuT	CuS	CuT	CuCN
Sulfuro Fuerte	99.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sulfuro Débil	100	0.0	0.6	7.5	0.088	-0.004	0.109	-0.019
Primario con Ley	98.4	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.262	-0.013

Respecto a las inconsistencias, se tiene que los cambios en las cifras son menores, y están relacionados nuevamente al dominio sulfuro secundario débil (Tabla 4-19), aumentando el porcentaje de bloques inconsistentes entre cobre soluble y cobre total, pero disminuyendo para las otras dos relaciones. Igualmente se puede analizar la relación que muestran las variables de los cobres lixiviables respecto al cobre total (Figura 4-15). Acá se observa un comportamiento similar al del caso propuesto 1, donde la dispersión entre cobre soluble y cobre total es alta, haciendo que la diferencia entre las leyes medias sea de cercana al 56%, así como también se ve una dispersión baja para el cobre cianurable y total, llegando a tener una diferencia entre las variables de apenas 25%, respecto al cobre total. Uno de los cambios notorios comparativamente con el caso propuesto 1, tiene que ver con el aumento del rango de cobre total en ambas figuras.

Tabla 4-19: Resumen de la interpolación del caso propuesto 2

Dominio de Estimación	Número Total de Bloques	Porcentaje de Bloques con CuT Estimado (%)	Porcentaje de Bloques sin Estimación (%)		Porcentaje de Bloques con Estimación Inconsistente (%)		
			CuS	CuCN	CuT<CuS	CuT<CuCN	CuT<CuS+CuCN
Sulfuro Fuerte	47,943	99.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sulfuro Débil	15,912	100	0.0	0.0	1.3	1.3	6.7
Primario con Ley	230,524	98.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

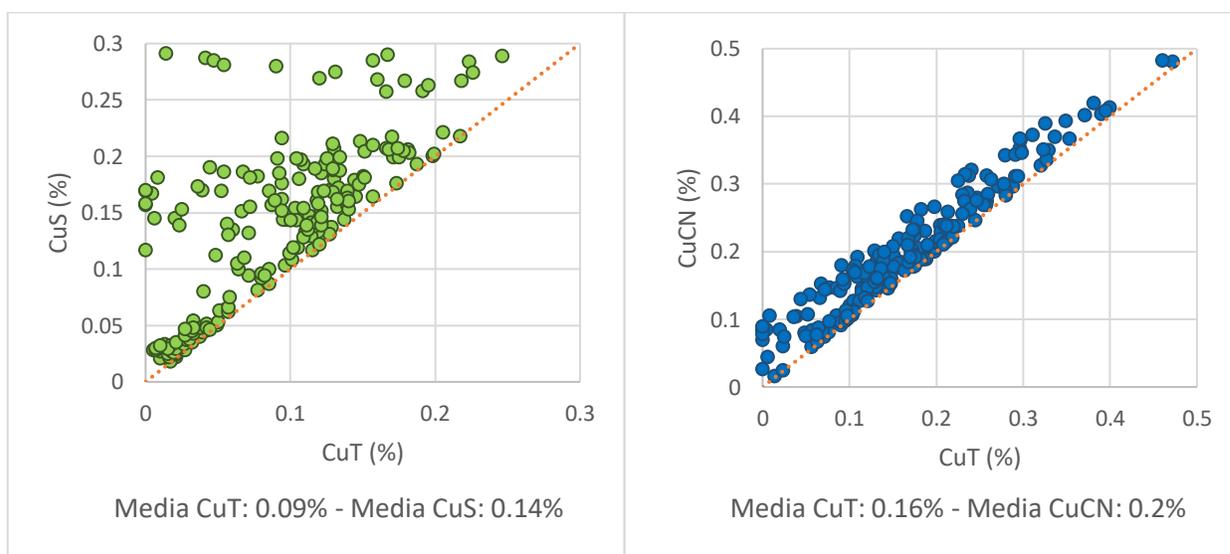


Figura 4-15: Dispersión del CuS/CuT (izq) y CuCN/CuT (der) de los bloques con inconsistencias en el dominio sulfuro secundario débil del caso propuesto 2

4.7. Validación

La validación de las estimaciones de las leyes, mediante la aplicación de kriging ordinario y cokriging con medias relacionadas se lleva a cabo considerando los siguientes dos métodos: estadística descriptiva, de la validación cruzada y los resultados de las estimaciones, y visualizaciones de las leyes calculadas en zonas de los dominios.

Los resultados son mostrados separadamente por dominio de estimación y, al igual que en el subcapítulo anterior, únicamente tres de los cuatro dominios son analizados (sulfuro secundario fuerte, sulfuro secundario débil y sulfuro primario con ley). Los modelos de bloques obtenidos en cada caso son filtrados por la variable de estimación y el método de interpolación aplicado, buscando obtener resultados efectivamente comparables. El primer análisis que se realiza es la validación general de los planes de estimación formulados, mediante la técnica de validación cruzada, comprobando que los resultados no estén sujetos a problemas relacionados los planes de estimación y/o los modelos variográficos determinados. En este análisis se observan el sesgo global y el error de estimación de los interpoladores. Este análisis se encuentra dentro del subcapítulo de validación estadística.

4.7.1 Validación Estadística

Primeramente, se ejecuta las pruebas de validación cruzada para evaluar y comparar los modelos geoestadísticos y eficiencia de los dos interpoladores usados en el estudio. Estas pruebas se realizan para todas las variables en los dominios de sulfuro secundario (Tabla 4-20 y Tabla 4-21), pero solo para la variable cobre total en el primario con ley (Tabla 4-22), dado que las especies lixiviables en este dominio fueron estimadas mediante la técnica de inverso de la distancia, por lo que no es aplicable este análisis. La validación cruzada consiste en el proceso de estimar una a una cada muestra de la base de datos, usando los planes de estimación y modelos variográficos previamente definidos. Los cuatro parámetros que se analizan son el promedio y varianza de los errores de estimación, y de los errores de estimación estandarizados, lo cual se enmarca en el enfoque tradicional de estudio.

Tabla 4-20: Resultados de la validación cruzada para los dos métodos de interpolación en el sulfuro secundario fuerte

Variable	Método	Estadístico	Promedio	Varianza
Cobre Total	Cokriging de Medias Relacionadas	Error	0.007	0.106
		Error Estandarizado	0.005	5.198
	Kriging Ordinario	Error	0.008	0.106
		Error Estandarizado	0.016	1.530
Cobre Soluble	Cokriging de Medias Relacionadas	Error	0.000	0.012
		Error Estandarizado	0.053	6.468
	Kriging Ordinario	Error	0.002	0.012
		Error Estandarizado	0.010	2.324
Cobre Cianurable	Cokriging de Medias Relacionadas	Error	-0.003	0.066
		Error Estandarizado	-0.056	5.550
	Kriging Ordinario	Error	0.007	0.065
		Error Estandarizado	0.023	2.243

Tabla 4-21: Resultados de la validación cruzada para los dos métodos de interpolación en el sulfuro secundario débil

Variable	Método	Estadístico	Promedio	Varianza
Cobre Total	Cokriging de Medias Relacionadas	Error	-0.002	0.019
		Error Estandarizado	0.002	3.400
	Kriging Ordinario	Error	-0.002	0.018
		Error Estandarizado	-0.016	2.616
Cobre Soluble	Cokriging de Medias Relacionadas	Error	-0.004	0.002
		Error Estandarizado	-0.195	4.540
	Kriging Ordinario	Error	-0.001	0.002
		Error Estandarizado	-0.012	1.977
Cobre Cianurable	Cokriging de Medias Relacionadas	Error	-0.012	0.017
		Error Estandarizado	-0.183	5.314
	Kriging Ordinario	Error	-0.004	0.017
		Error Estandarizado	-0.034	2.392

Tabla 4-22: Resultados de la validación cruzada para los dos métodos de interpolación en el sulfuro primario con ley

Variable	Método	Estadístico	Promedio	Varianza
Cobre Total	Cokriging de Medias Relacionadas	Error	0.000	0.014
		Error Estandarizado	0.003	5.916
	Kriging Ordinario	Error	0.000	0.013
		Error Estandarizado	0.002	3.399

Como se puede observar de forma general, ambos métodos muestran valores cercanos a cero para el promedio del error y el error estandarizado, lo cual implica que no se presenta un

sesgo global en el estimador. Lo anterior igual es válido para las varianzas del error de todas las variables en los tres dominios analizados, sin embargo, el parámetro de varianza del error estandarizado difiere entre los dos métodos de interpolación. Efectivamente cuando se revisa los errores estandarizados de aquellas variables estimadas mediante el cokriging con medias relacionadas, se observa un mayor rango de valores, que están directamente relacionados con los valores de la varianza del estimador (varianza del cokriging). Este parámetro depende fuertemente de los modelos variográficos aplicados, los que cambian entre los casos bases y propuestos, por lo que es cuestionable el uso de este valor como métrica del error. Sin perjuicio de lo anterior, en general se puede decir que ambos interpoladores no presentan sesgo global y son relativamente precisos.

Una vez comprobado lo anterior, se procede a validar estadísticamente los resultados de las estimaciones en los bloques, las que deben ser comparadas con los compósitos. En este sentido, primero se genera las estadísticas del caso base 1 y propuesto 1, dado que usaron la misma base de “datos A”. Revisando los resultados, lo primero que se observa son valores promedio de las variables en general algo más elevados en el caso base 1 (Tabla 4-23), que aquellas del caso propuesto 1 (Tabla 4-24). Lo segundo que se observa es que caso propuesto logra determinar valores más bajos de las leyes, cercanas al cero. Para el resto de las cifras estadísticas se tiene diferentes relaciones entre los casos, dependiendo el dominio y variable, siendo más similares alguna de estas cifras en el sulfuro primario con ley. A pesar de lo anterior, casi en general las diferencias están en el orden de las décimas y centésimas.

Tabla 4-23: Estadísticas de las variables estimadas del caso base 1

Dominio de Estimación	Especie	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
Secundario Fuerte	CuT	0.721	0.069	3.327	0.384	0.532
	CuS	0.169	0.014	1.600	0.086	0.512
	CuCN	0.46	0.05	3.080	0.26	0.566
Secundario Débil	CuT	0.217	0.012	1.044	0.136	0.626
	CuS	0.045	0.006	0.239	0.028	0.618
	CuCN	0.113	0.000	0.774	0.094	0.837
Primario con Ley	CuT	0.305	0.036	3.545	0.095	0.313
	CuS	0.013	0.004	0.432	0.011	0.864
	CuCN	0.034	0.002	3.135	0.046	1.331

Tabla 4-24: Estadísticas de las variables estimadas del caso propuesto 1

Dominio de Estimación	Especie	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
Secundario Fuerte	CuT	0.689	0.151	2.42	0.329	0.478
	CuS	0.155	0.002	1.234	0.073	0.469
	CuCN	0.419	0.006	1.835	0.238	0.568
Secundario Débil	CuT	0.218	0.000	1.319	0.144	0.660
	CuS	0.032	0.000	0.193	0.028	0.881
	CuCN	0.082	0.000	0.794	0.088	1.074
Primario con Ley	CuT	0.309	0.004	4.297	0.147	0.475
	CuS	0.016	0.000	0.421	0.012	0.777
	CuCN	0.048	0.000	2.843	0.070	1.464

El segundo grupo de estadísticas es la de los casos base 2 y propuesto 2, por la misma razón señalada anteriormente. Los resultados del caso base 2 (Tabla 4-25) cambian respecto al caso base 1, presentando un aumento de los valores promedios y comportamiento variado en las otras cifras. Para el caso propuesto 2 (Tabla 4-26), los valores cambian significativamente respecto al caso propuesto 1 y lo más interesante de observar es que las cifras se asemejan a la de los casos base. Por otro lado, se puede observar que estos segundos resultados muestran algunos cambios importantes en los coeficientes de variación de la especie de cobre cianurable. Las comparaciones entre las estadísticas mostradas y las bases de datos, se harán en el siguiente capítulo, aplicando gráficos que permitan observar los elementos críticos y poder definir cuáles resultados se ajustan mejor a los datos.

Tabla 4-25: Estadísticas de las variables estimadas del caso base 2

Dominio de Estimación	Especie	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
Secundario Fuerte	CuT	0.736	0.078	2.184	0.353	0.479
	CuS	0.173	0.014	0.926	0.085	0.489
	CuCN	0.465	0.048	1.649	0.237	0.510
Secundario Débil	CuT	0.262	0.006	1.210	0.179	0.681
	CuS	0.062	0.003	0.324	0.051	0.811
	CuCN	0.132	0.000	0.675	0.107	0.810
Primario con Ley	CuT	0.354	0.055	0.913	0.095	0.267
	CuS	0.014	0.004	0.581	0.012	0.809
	CuCN	0.038	0.002	0.468	0.030	0.786

Tabla 4-26: Estadísticas de las variables estimadas del caso propuesto 2

Dominio de Estimación	Especie	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
Secundario Fuerte	CuT	0.725	0.117	1.948	0.301	0.416
	CuS	0.168	0.007	0.758	0.072	0.430
	CuCN	0.437	0.016	1.506	0.215	0.493
Secundario Débil	CuT	0.263	0.001	1.378	0.191	0.724
	CuS	0.046	0.001	0.312	0.044	0.958
	CuCN	0.115	0.001	0.767	0.105	0.915
Primario con Ley	CuT	0.327	0.022	1.978	0.136	0.415
	CuS	0.017	0.001	0.283	0.009	0.558
	CuCN	0.041	0.001	0.432	0.028	0.670

4.7.2 Validación Visual

Dado el problema planteado, respecto particularmente en la estimación de las variables de cobre lixiviables, el enfoque de la validación visual se centra en ver los valores de las muestras de cobre soluble y cianurable en la base de datos que corresponde, para luego ver el comportamiento de las estimaciones de los casos que usan la base de datos mostrada. En este sentido, se define el siguiente orden general para mostrar las imágenes. Primero se muestra el dominio de estimación con su respectiva línea de corte, la que corta, en lo posible, la zona de mayor densidad de bloques. Luego para el corte se despliega una imagen con las muestras para cada una de las bases de datos y posteriormente se muestran los bloques para cada caso, según la base que le corresponda.

Se procede primero con el sulfuro secundario fuerte (Anexo 8-24), dominio sobre el cual se define un corte en dirección oeste-este sobre la coordenada 6091530N. En este corte se procede a mostrar los compósitos para las variables de cobre soluble y cianurable (Figura 4-16) con una misma escala de ley, considerando un ancho de sección de 30 metros al norte y al sur. Posteriormente se muestra las leyes de los cobres lixiviables estimadas para el caso base 1 y propuesto 1 (Figura 4-17), agrupados por variable de estimación. Dado que se busca observar principalmente las diferencias generadas por el método de interpolación aplicado y no tanto por la base de datos que se usa, en esta sección solo se presentan la mitad de los resultados. Los cortes de los casos producidos con la base de datos B se encuentra en la sección de anexos, tanto para el sulfuro secundario fuerte (Anexo 8-26 y Anexo 8-27), débil (Anexo 8-27 y Anexo 8-29) y primario con ley (Anexo 8-31 y Anexo 8-32).

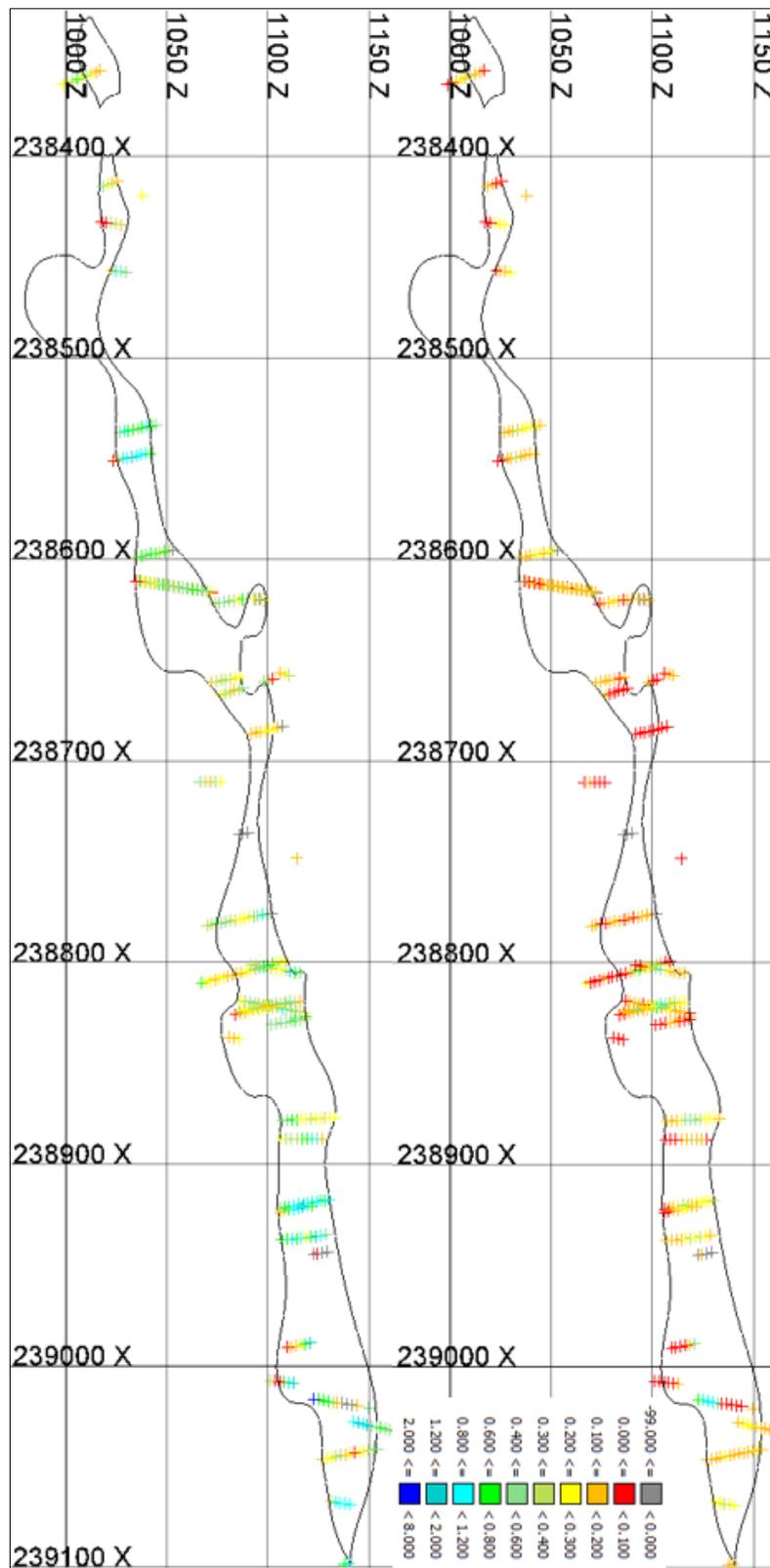


Figura 4-16: Corte A-A' en el dominio secundario fuerte mostrando las leyes de cobre soluble (sup) y cobre cianurable (inf) de las muestras de la base de datos A

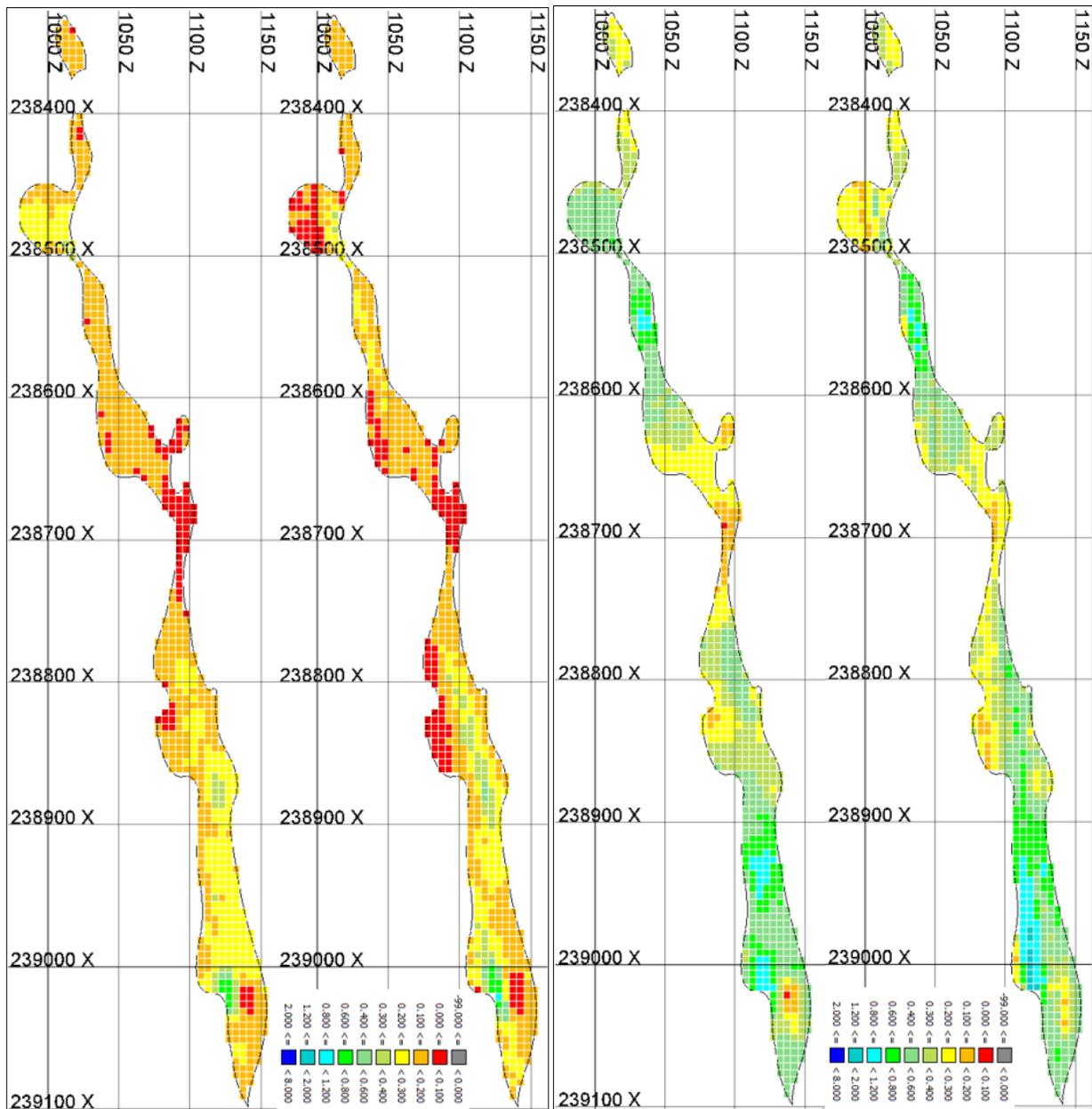


Figura 4-17: Corte A-A' en el secundario fuerte mostrando las leyes de bloque del cobre soluble [izq] en el caso base 1 (sup) y propuesto 1 (inf) y del cobre cianurado [der] en el caso base 1 (sup) y propuesto 1 (inf)

En la figura anterior, se puede ver que ambos casos presentan un comportamiento general similar, donde particularmente las leyes tienen mayor continuidad subhorizontal, sin embargo, la distancia de continuidad cambia, siendo mayor en el caso base 1. La otra diferencia observable se da en las zonas sin muestras, por ejemplo, observando el bolsón ubicado entre las coordenadas 238450E y 238500E, se ve que las leyes aumentan para el caso propuesto 1, las que, relacionadas a la ley de cobre total presente en la zona, configuran valores de razón de solubilidad similares a las que definen las relaciones impuestas para la estimación.

De forma similar se procede con el dominio sulfuro secundario débil, con un corte en la misma dirección del dominio anterior, realizado en la coordenada 6091540N (Anexo 8-25). En este corte se señalan las muestras usadas (Figura 4-18) y las leyes de los casos (Figura 4-19).

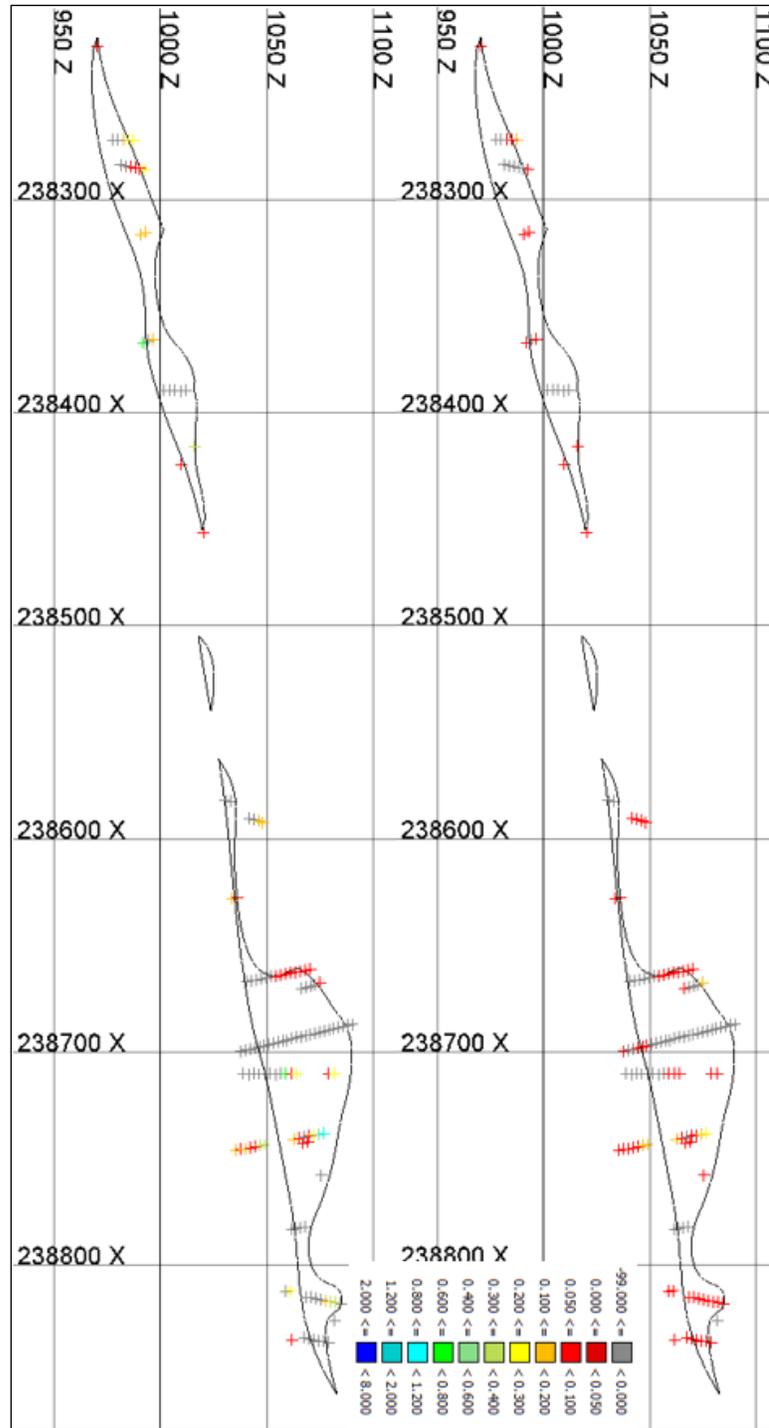


Figura 4-18: Corte A-A' en el dominio secundario débil mostrando las leyes de cobre soluble (sup) y cobre cianurable (inf) de las muestras de la base de datos A

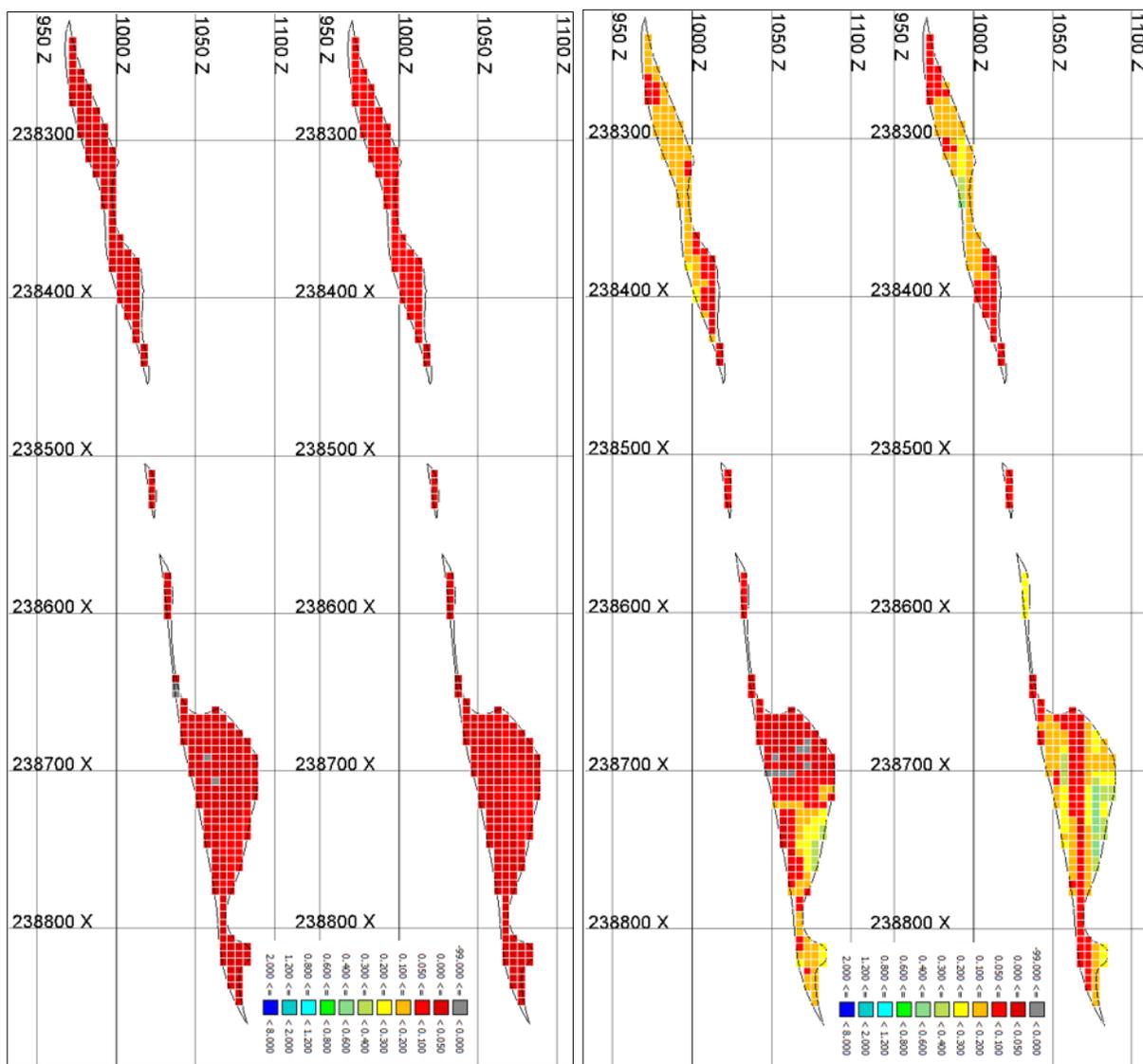


Figura 4-19: Corte A-A' en el secundario débil mostrando las leyes de bloque del cobre soluble [izq] en el caso base 1 (sup) y propuesto 1 (inf) y del cobre cianurable [der] en el caso base 1 (sup) y propuesto 1 (inf)

En este dominio las tendencias en la interpolación son claramente visibles. Para ambas variables analizadas, se observa una baja general en las cifras a través de todo el dominio entregadas en el caso propuesto 1, respecto al caso base 1. De igual forma se puede ver nuevamente la diferencia de continuidad, siendo más fuerte en el caso base 1. Vale notar las bajas leyes que presenta el dominio para cobre soluble (menor al 0.1%), mientras que para el cobre cianurable se observa algunos bloques de color gris, lo que significa que fueron estimados con valores negativos. Una zona interesante para el cobre cianurable es la que se encuentra entre las coordenadas 238300E y 238400E, por que los resultados obtenidos con la base de “datos B”, muestran mejores leyes (Anexo 8-29), posiblemente producto del capping.

De forma similar se procede con el dominio sulfuro primario con ley, con un corte en la misma dirección que los otros dos dominios, realizado en la coordenada 6091520N (Anexo 8-30). En este corte se muestran las muestras usadas (Figura 4-18) y las leyes interpoladas para los casos de análisis (Figura 4-19).

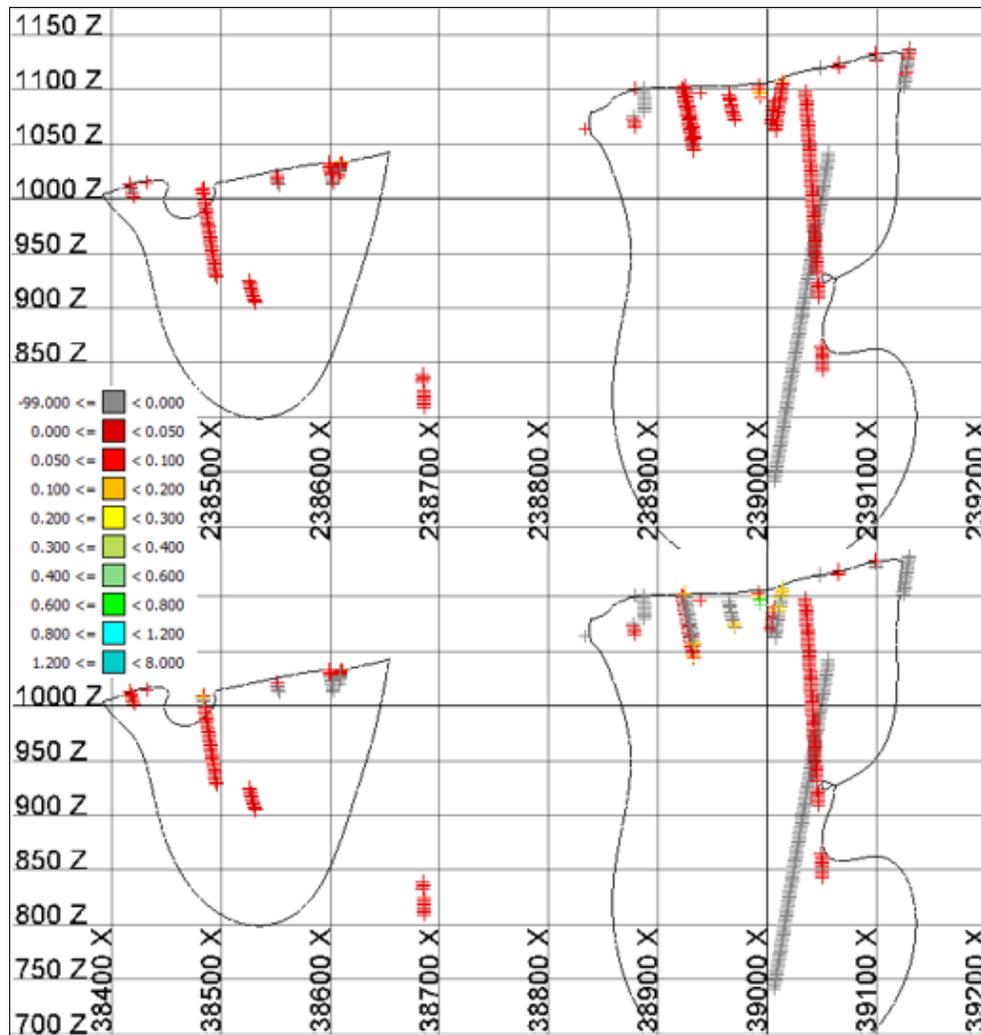


Figura 4-20: Corte A-A' en el dominio primario con ley mostrando las leyes de cobre soluble (sup) y cobre cianurable (inf) de las muestras de la base de datos A

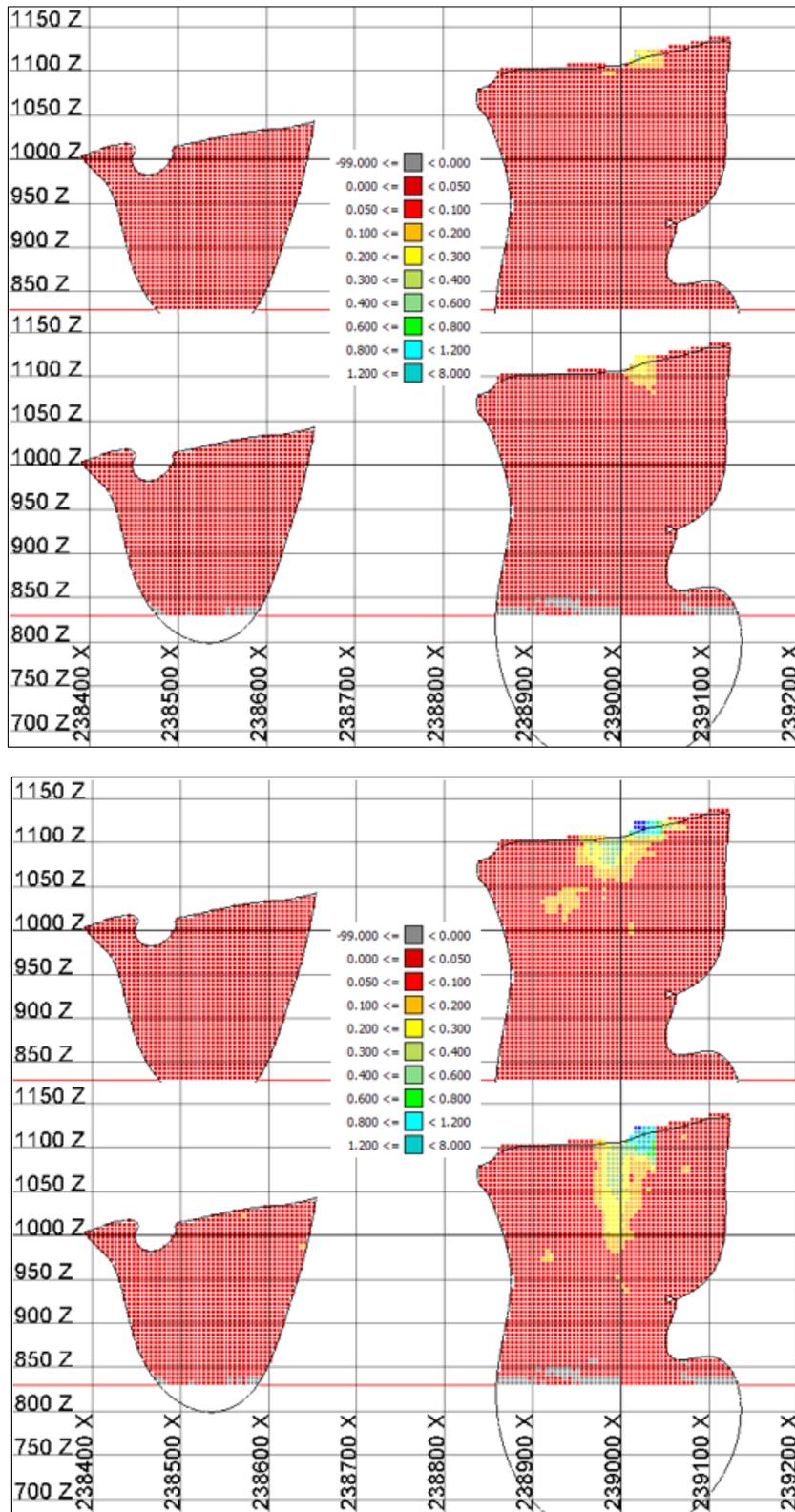


Figura 4-21: Corte A-A' en el primario con ley mostrando las leyes de bloque del cobre soluble [izq] en el caso base 1 (sup) y propuesto 1 (inf) y del cobre cianurable [der] en el caso base 1 (sup) y propuesto 1 (inf)

Para empezar, respecto a las muestras (Figura 4-20) se ve particularmente poblada la zona superior del cuerpo, con valores de las leyes de cobre soluble y cianurable, donde se observa particularmente un sector de alta ley para el cobre cianurable, con muestras en torno a 0.3%. Respecto al cobre soluble, las estimaciones se ven consistentes respecto a las muestras, mostrando mayormente leyes bajas. No obstante, para el cobre cianurable, se invierte el efecto de continuidad en las interpolaciones de los anteriores dominios. Vale decir, el cokriging hace que los resultados del caso propuesto 1 muestran una zona de mayor continuidad de altas leyes de cobre cianurable, respecto a las entregadas en el caso base 1. Esta observación parece no estar relacionada a las muestras que usa, porque la zona central del dominio contiene leyes menores de cobre cianurable, a las que están estimadas en los bloques.

4.8. Cálculo de Recursos Minerales

Una vez validados los resultados de estimación, se procede con el cálculo de Recursos Minerales, donde se usan las cuatro leyes descritas en la introducción del proyecto, sin embargo, las estimaciones no cumplen la relación " $CuT = CuS + CuCN + CuI$ ". En este sentido, se deben realizar actualizaciones de los valores, teniendo como base que las leyes de cobre total son las que menor incertidumbre contienen, por lo que no se las debe alterar. Por tanto, los cambios van sobre las otras variables. No existe una única forma de resolver el problema y depende de las consideraciones que se toman, pero, dado que la metodología propuesta usa relaciones líneas entre el cobre total y los otros dos tipos de cobre, se decide usar las mismas. La actualización tiene dos niveles de procesamiento, donde primero se aplica las relaciones lineales, logrando actualizar las leyes de cobre soluble y cianurable que no hayan sido estimadas o sean inconsistentes, y la segunda actualiza los valores de las leyes mediante un criterio específico, con el que se logra cumplir la relación explicada y finalmente calcular el cobre insoluble (CuI).

Luego de las actualizaciones, se procede a calcular los Recursos Minerales (es decir aquella porción del depósito que tenga una perspectiva razonable para una eventual extracción económica, denominada en este estudio como envolvente económica), que se obtiene de la selección de un conjunto de pits anidados, producto de la aplicación del algoritmo de optimización de extracción "Learch-Grossmann". Para lo anterior se requiere de un conjunto de parámetros técnico-económicos y geotécnicos, los cuales se tienen ya definidos. Posteriormente dentro de cada uno de las envolventes es posible realizar una cubicación de cada uno de los dominios para obtener las leyes medias de las especies, el tonelaje de metal contenido y metal recuperable (dependiente de las leyes), para finalmente compararlos bajo un conjunto de consideraciones.

4.8.1 Secuencia de Actualización

Para realizar la actualización de leyes se debe seguir una secuencia específica, con la que se logra ajustar los valores tal que se cumple la relación de igualdad mostrada entre las cuatro variables de cobre (Figura 4-22). En ésta, se revisa los tres tipos de inconsistencias señaladas en el trabajo o si la variable no fue estimada, actualizando los valores con las relaciones lineales que se encontraron en el trabajo de EDA (Tabla 4-8). Cabe notar que respecto al tercer tipo de inconsistencia se asume una simplificación, y es que inevitablemente en algunos bloques se debe ajustar nuevamente el valor de uno de los cobres lixiviables, definiendo que únicamente el cobre soluble es la variable que se puede cambiar, considerando que los dominios estudiados corresponden a mineralizaciones donde esta variable debe ser más escasa que las otras.

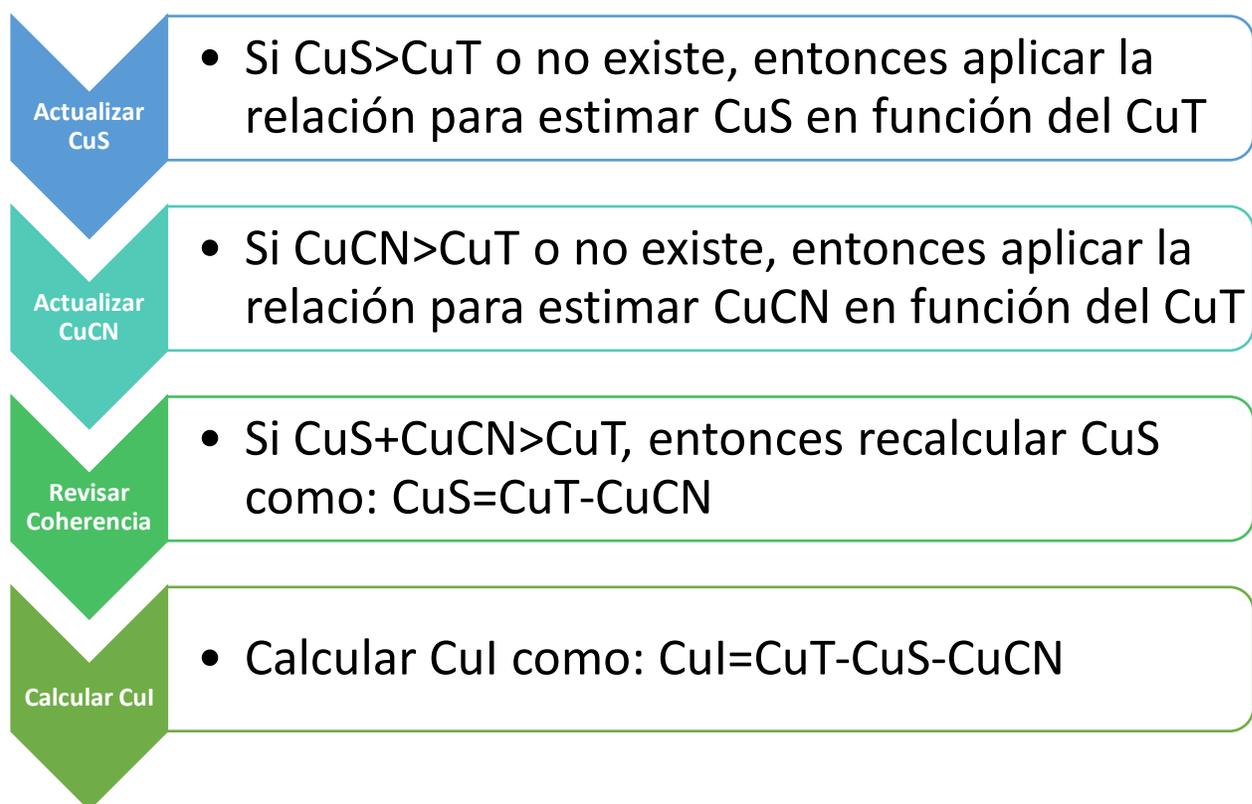


Figura 4-22: Secuencia para la actualización de leyes

Posteriormente a esta etapa, se obtienen modelos de bloques consistentes con los cuales se puede calcular los Recursos Minerales, para los cuales se deben definir concretamente dos elementos. Por un lado, se requiere la introducción de valores de densidad, para la valoración económica del material y, por otro lado, se debe incluir un tipo de categorización.

4.8.2 Asignación de Densidad

La densidad se asigna en función de la litología, siendo resultado del análisis de muestras bajo el método de la parafina. Considerando lo anterior, existen cuatro valores de densidad (t/m^3): 2.5 (GRD), 2.58 (PFD), 2.56 (PQZ) y 2.53 (MDIO), cada uno relacionado a un tipo de litología dominante en el depósito, las que fueron descritas en la revisión del proyecto.

4.8.3 Clasificación

La clasificación de Recursos Minerales es necesaria para poder diferenciar el material que puede considerarse económicamente explotable bajo un rango aceptado de incertidumbre. En este sentido, se puede construir mediante varias consideraciones un método de clasificación (categorización), sin embargo, en consistencia con el trabajo realizado sobre el proyecto minero por la compañía dueña, y dado que el objetivo de este estudio no es profundizar sobre dicha metodología, se decide mantener el método hasta el momento aplicado, el cual considera la combinación de número de muestras y rangos de las elipses de búsqueda. Éste, corresponde a las pasadas de estimación ya establecidas, las que a su vez están relacionadas con la categoría del material (Tabla 4-13), vale decir, los bloques estimados en la pasada 1 se consideran Recursos Medidos, los estimados en la pasada 2, Indicados y los estimados en la pasada 3, Inferidos. Cabe señalar que este método es directamente aplicable a los casos base, dado el control que se tiene para la restricción de uso de muestras, sin embargo, dada la similitud en los modelos geoestadísticos para los casos base y propuestos, se determina traspasar la categoría de los modelos de bloques de los casos base a los casos propuestos.

Es muy común que, para la definición de Recursos, el cálculo de beneficio económico tome en consideración el material de estas tres categorías, sin embargo, para nuevamente mantener consistencia con el trabajo realizado sobre el proyecto, solo se considerará las dos primeras categorías (Medidos e Indicados). Para el siguiente estudio se ha supuesto un modelamiento geológico y base de datos aceptable en su calidad, razón por la cual no inciden esta vez en la clasificación de Recursos Minerales.

4.8.4 Cálculo de la Envolvente Económica y Cubicación

Para realizar el cálculo, se debe considerar un conjunto de parámetros técnicos y económicos, que tienen que ver con los procesos tanto mineros como metalúrgicos (Tabla 4-27). Particularmente para el proyecto, el cálculo de beneficio está asociado a dos tipos de

procesamiento, descritos en la sección de revisión del proyecto y ciertos parámetros mineros determinados con anterioridad por el dueño del proyecto. Dado que estos parámetros se aplican sobre los cuatro casos de estudio, los resultados son dependientes únicamente de las leyes de las especies de cobre estimadas. Estos elementos y parámetros son los necesarios y suficientes para ser usados en cualquier software comercial, siendo uno de éstos el que fue usado en la memoria.

Tabla 4-27: Parámetros para la optimización del pit

Ítem	Unidad	Valor
Precio Cobre	USD/lb	3
Costo Mina	USD/t	2.11
Factor de Recuperación Minera		0.93
Factor de Dilución		1.07
Recuperación Cobre-Pila	%	$(95 \cdot \text{CuS}) + (88 \cdot \text{CuCN}) + (40 \cdot \text{CuI}) / (\text{CuT})$
Recuperación Cobre-ROM	%	$(50 \cdot \text{CuS}) + (40 \cdot \text{CuCN}) + (10 \cdot \text{CuI}) / (\text{CuT})$
Costo Procesamiento-Pila	USD/t procesada	6.3
Costo Procesamiento-ROM	USD/t procesada	1.63
Costo de Venta	USD/lb	0.332
Tasa de Descuento por Periodo	%	10
Capacidad Extracción Mina	t/año	7000000
Capacidad de Procesamiento	t/año	2100000
Talud Zona 36	grados	36
Talud Zona 38	grados	38
Talud Zona 40	grados	40
Talud Zona 42	grados	42
Talud Zona 44	grados	44
Talud Zona 45	grados	45
Talud Zona 47	grados	47
Talud Zona 48	grados	48
Talud Zona 50	grados	50
Talud Zona 51	grados	51

Posteriormente a la ejecución del algoritmo, para los cuatro casos se selecciona una envolvente económica similar, la que en general puede ser aquella con máximo valor económico. Sin embargo, en este estudio se toma una envolvente inferior a ésta (esto tiene relación con el sentido de obtener resultados relativamente conservadores). Cabe mencionar que esta envolvente económica relacionada a los Recursos Minerales, en efecto es un rajo minero, y tiene una definición diferente a las Reservas Mineras. Los Recursos Minerales en general, se entienden

como material de interés económico intrínseco. En este sentido, se diferencian particularmente de las reservas, dado que se usan parámetros (factores modificadores) “gruesos” para su cálculo, y no toman en consideración el diseño minero.

Una vez determinada la envolvente, se cubica el material de cada uno de los casos para cada en los 4 dominios de estimación (Tabla 4-28), calculando el tonelaje al interior de éste, las leyes medias de las especies (CuT, CuS y CuCN), el metal contenido (cantidad estimada aproximada dado el tonelaje al interior del pit y ley promedio de cobre total), el metal extraíble (cantidad calculada bajo los parámetros técnicos y las leyes de las especies de cobre) y la recuperación global de cobre fino (calculada como la razón entre el metal extraíble y contenido).

Tabla 4-28: Resumen de la cubicación de los dominios de estimación en la envolvente de recursos minerales para cada caso de estudio

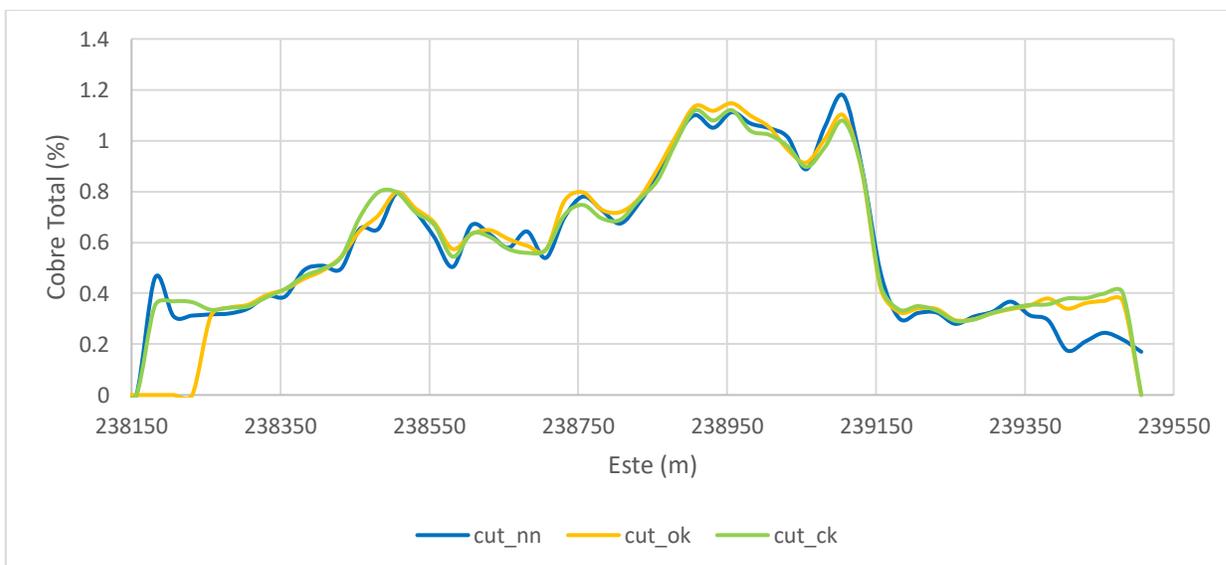
Dominio de Estimación	Caso	Tonelaje (Mt)	CuT (%)	CuS (%)	CuCN (%)	Metal Contenido (t)	Metal Extraíble (t)	Rec. (%)
Secundario Fuerte	Base 1	11.7	0.795	0.167	0.494	92662	75239	81.2
	Base 2	11.9	0.795	0.167	0.486	94673	76472	80.8
	Propuesto 1	11.8	0.772	0.170	0.473	90989	74201	81.6
	Propuesto 2	13.7	0.746	0.172	0.450	102319	83477	81.6
Secundario Débil	Base 1	2.3	0.299	0.039	0.128	6802	4135	60.8
	Base 2	3.1	0.305	0.047	0.129	9368	5528	59.0
	Propuesto 1	1.7	0.323	0.039	0.120	5540	3313	59.8
	Propuesto 2	2.1	0.364	0.045	0.131	7499	4497	60.0
Primario con Ley	Base 1	5.5	0.417	0.025	0.088	22854	12149	53.2
	Base 2	11.7	0.428	0.021	0.067	49951	24988	50.0
	Propuesto 1	7.6	0.427	0.025	0.087	32239	16694	51.8
	Propuesto 2	10.7	0.425	0.023	0.057	45297	22106	48.8
Primario Estéril	Base 1	0.7	0.144	0.068	0.026	1038	305	29.4
	Base 2	1.5	0.127	0.033	0.047	1962	406	20.7
	Propuesto 1	3.5	0.226	0.091	0.086	8023	5136	64.0
	Propuesto 2	2.0	0.119	0.028	0.040	2344	458	19.5

5. COMPARACIONES Y ANÁLISIS

Una vez obtenidos los resultados de cada caso de estudio en las diferentes etapas de trabajo, se procede a realizar comparaciones específicas de las variables, así como análisis de las causas y efectos de sus valores. Primeramente, se revisan y se comparan las estimaciones locales (valores antes de aplicarles las actualizaciones), usando gráficos de derivas donde se observa las tendencias de las tres variables sobre los dominios importantes del depósito (sulfuros secundarios y primario con ley). En esta sección se muestran las figuras relacionadas al caso base 1 y propuesto 1, por ser representativas para estudiar particularmente el efecto del interpolador aplicado, pero en la sección de anexos se encuentra aquellas relacionadas al caso base 2 y propuesto 2. Posteriormente, se configura un conjunto de figuras que permitan comparar en términos estadísticos los resultados respecto a los datos. Finalmente, se analizan todos los resultados que se obtuvieron en cada etapa de desarrollo del caso de estudio.

5.1. Comparaciones de Estimación Local

Primero se genera las derivas en las tres direcciones del secundario fuerte (este, norte, elevación), respecto al cobre total (Figura 5-1), cobre soluble (Figura 5-2) y cobre cianurable (Figura 5.3), donde los resultados del caso base 1 tienen la extensión "ok", los del propuesto 1 tienen la extensión "ck" y la relacionada a la base de datos tienen la extensión "nn", dado que se aplica el método de vecino más cercano "*nearest neighbor*" para la asignación de valores.



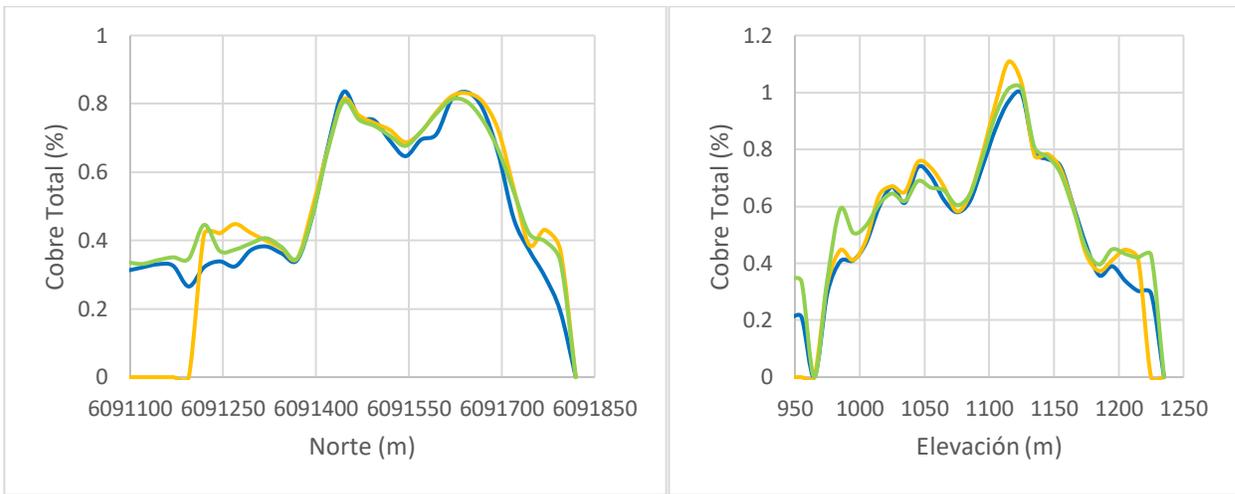


Figura 5-1: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuT en el secundario fuerte con los datos A

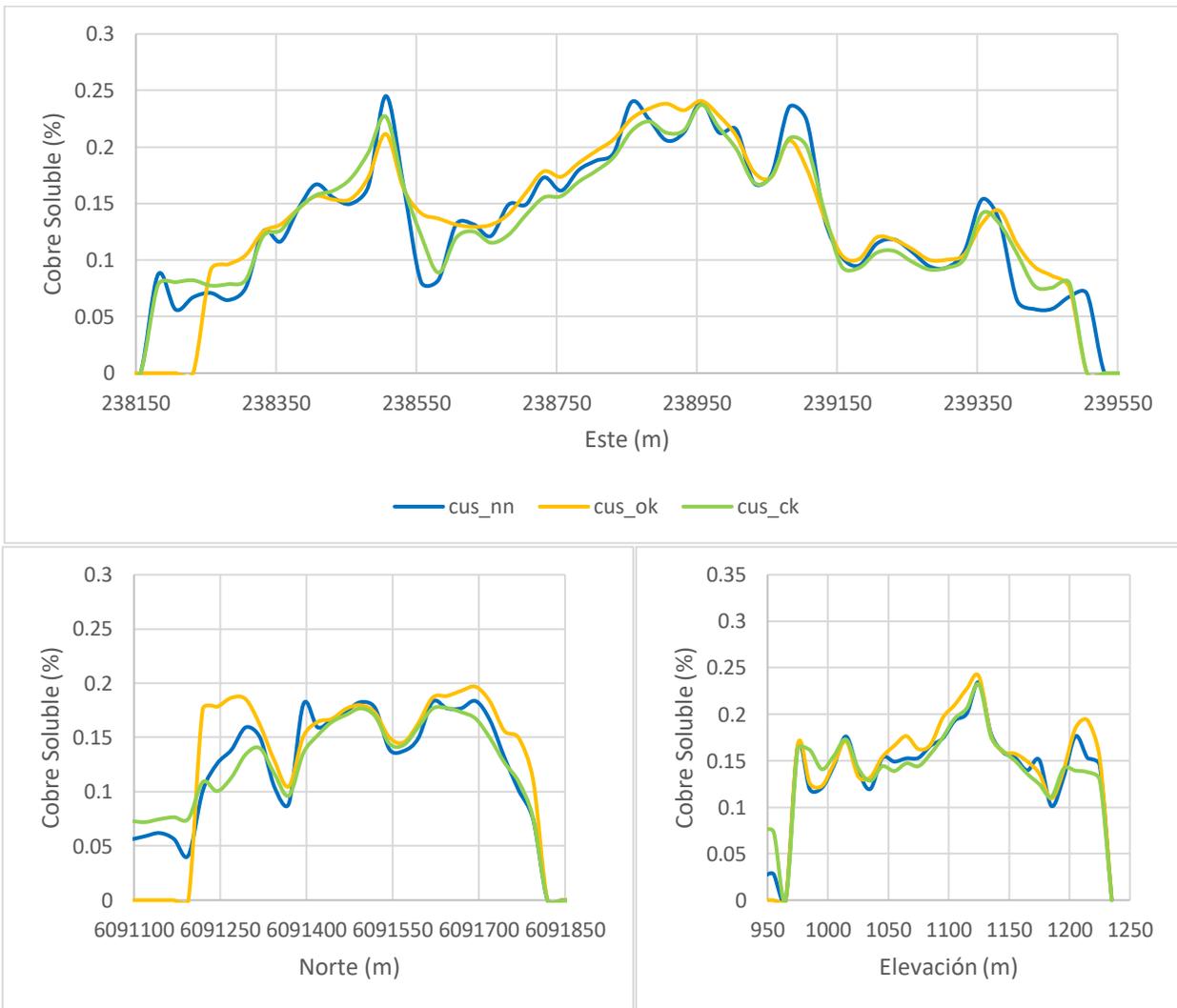


Figura 5-2: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuS en el secundario fuerte con los datos A

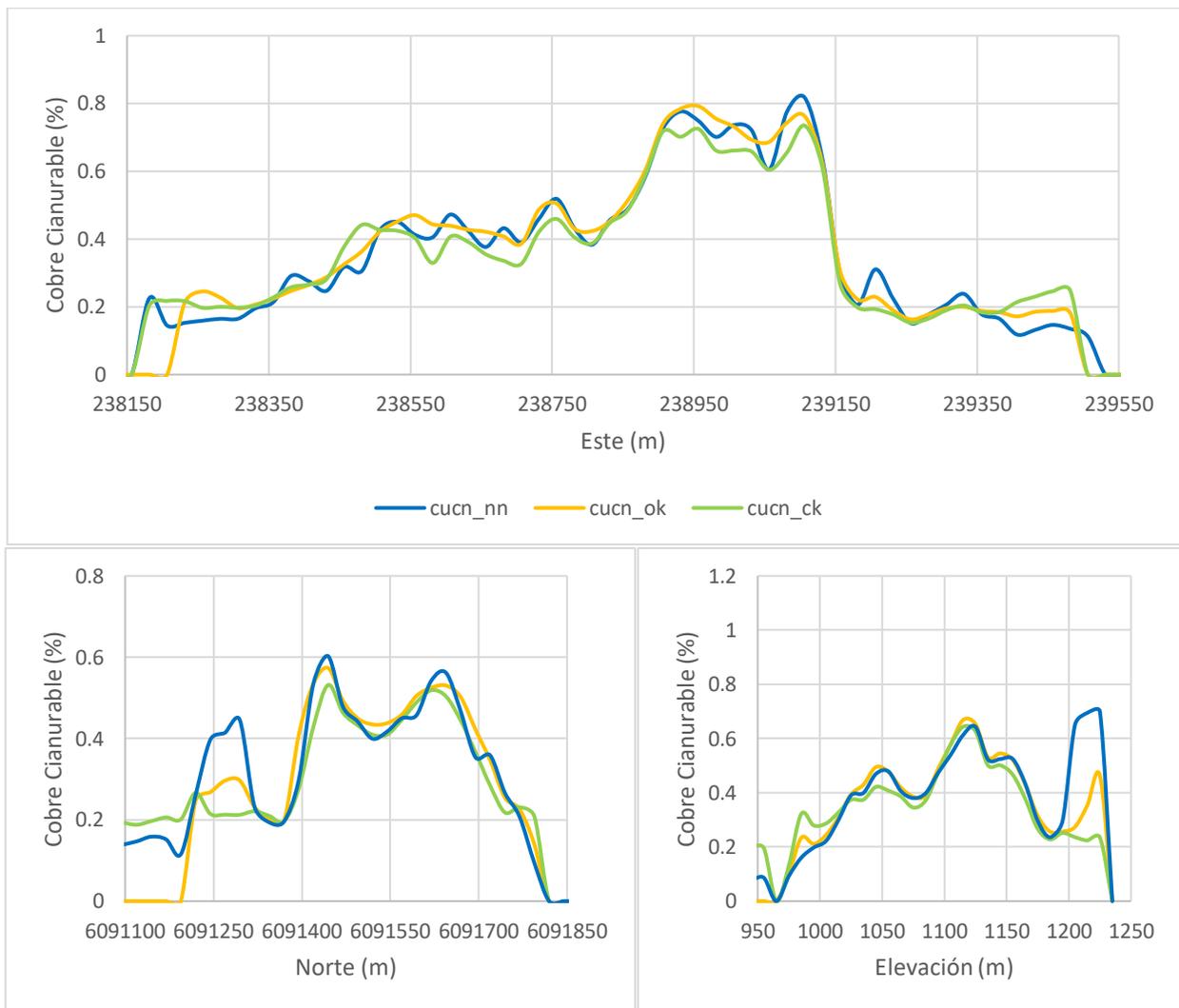


Figura 5-3: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuCN en el secundario fuerte con los datos A

De las figuras anteriores, es posible observar que en general ambos casos se ajustan de forma satisfactoria relativamente, sin embargo, la estimación mediante cokriging con medias relacionadas muestras un resultado interesante respecto a las variables de cobre soluble y cianurable. En los dos casos señalados, se observa que las curvas de ley promedio, a través de las tres direcciones ortogonales, pasan en general muy cerca o por debajo de la curva de la ley obtenida mediante el método de vecino más cercano, mientras que las curvas del caso base 1 muestran varios tramos en los que están por sobre esta curva. En los bordes del dominio es visible un efecto relacionado a los alcances de las elipses de estimación.

De forma similar a la anterior, se generan las curvas de deriva para el sulfuro secundario débil, respecto al cobre total (Figura 5-4), cobre soluble (Figura 5-5) y cobre cianurable (Figura 5-6), donde las extensiones son similares a las del dominio anterior.

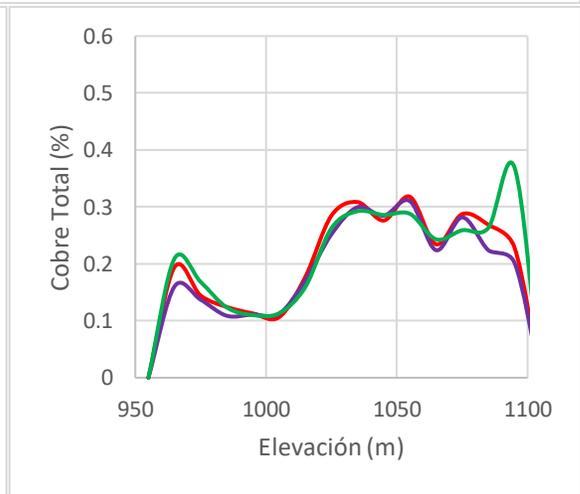
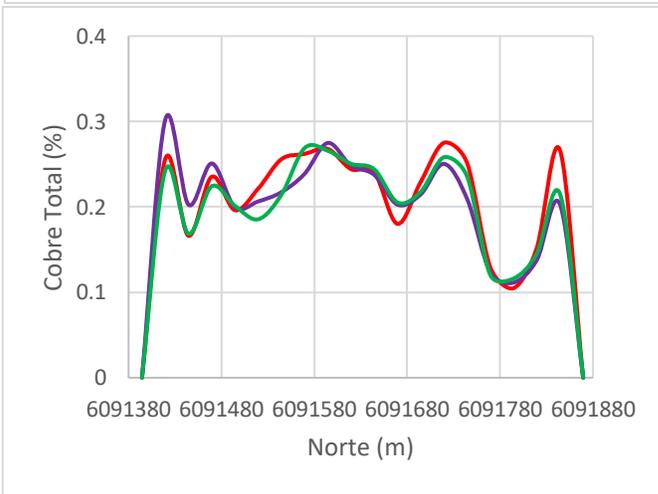
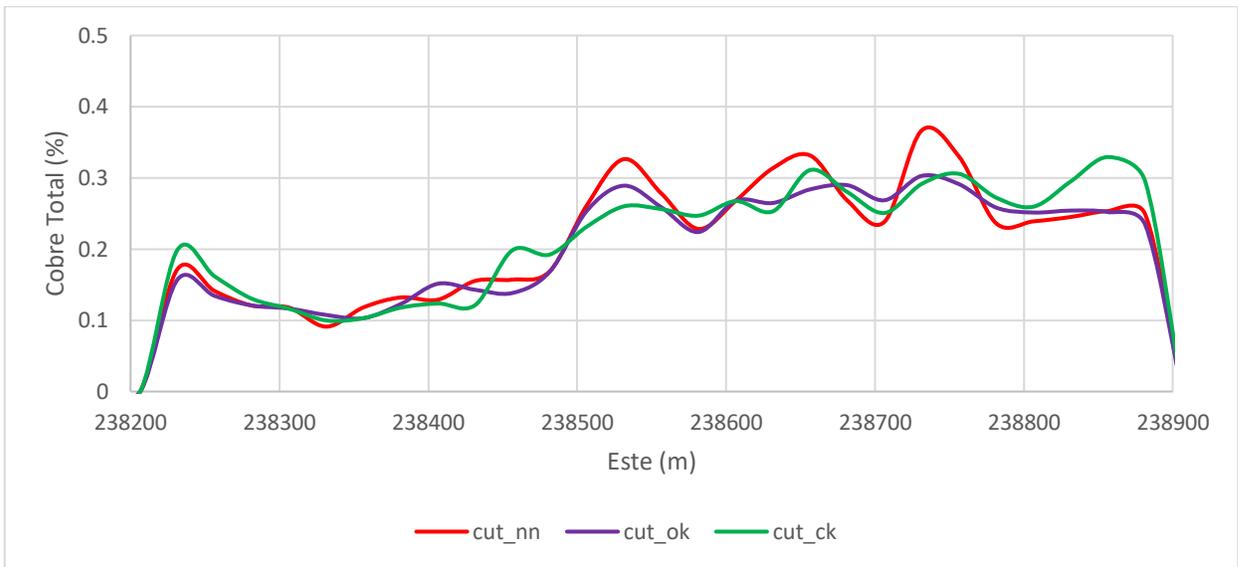
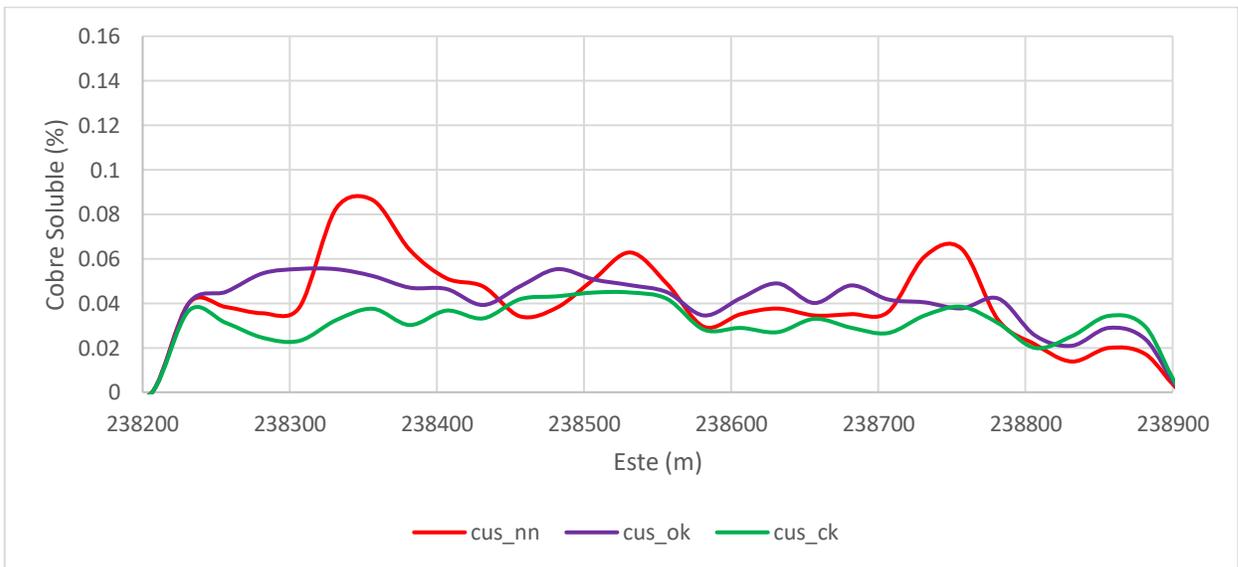


Figura 5-4: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuT en el secundario débil con los datos A



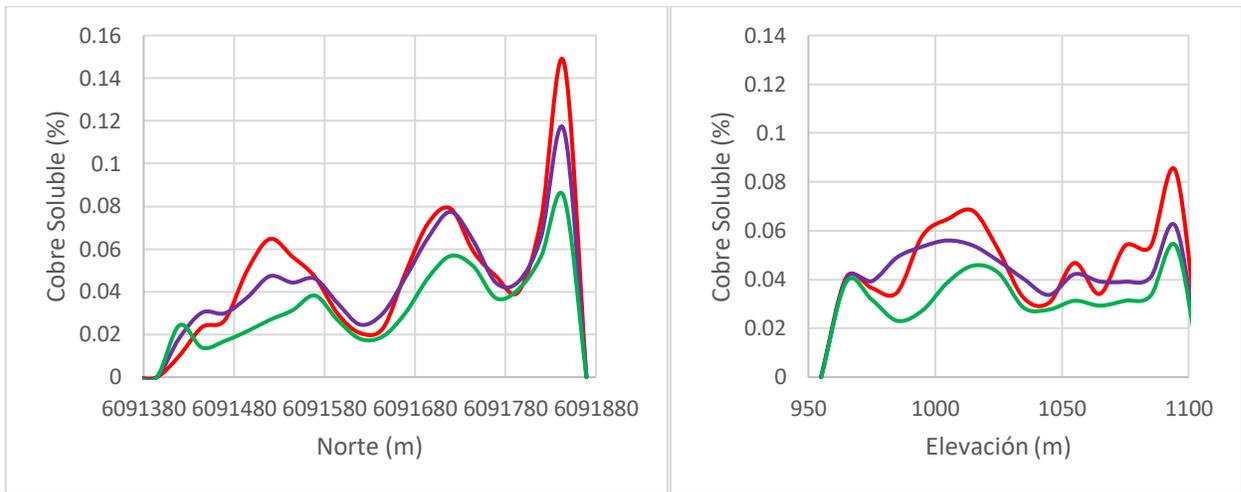


Figura 5-5: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuS en el secundario débil con los datos A

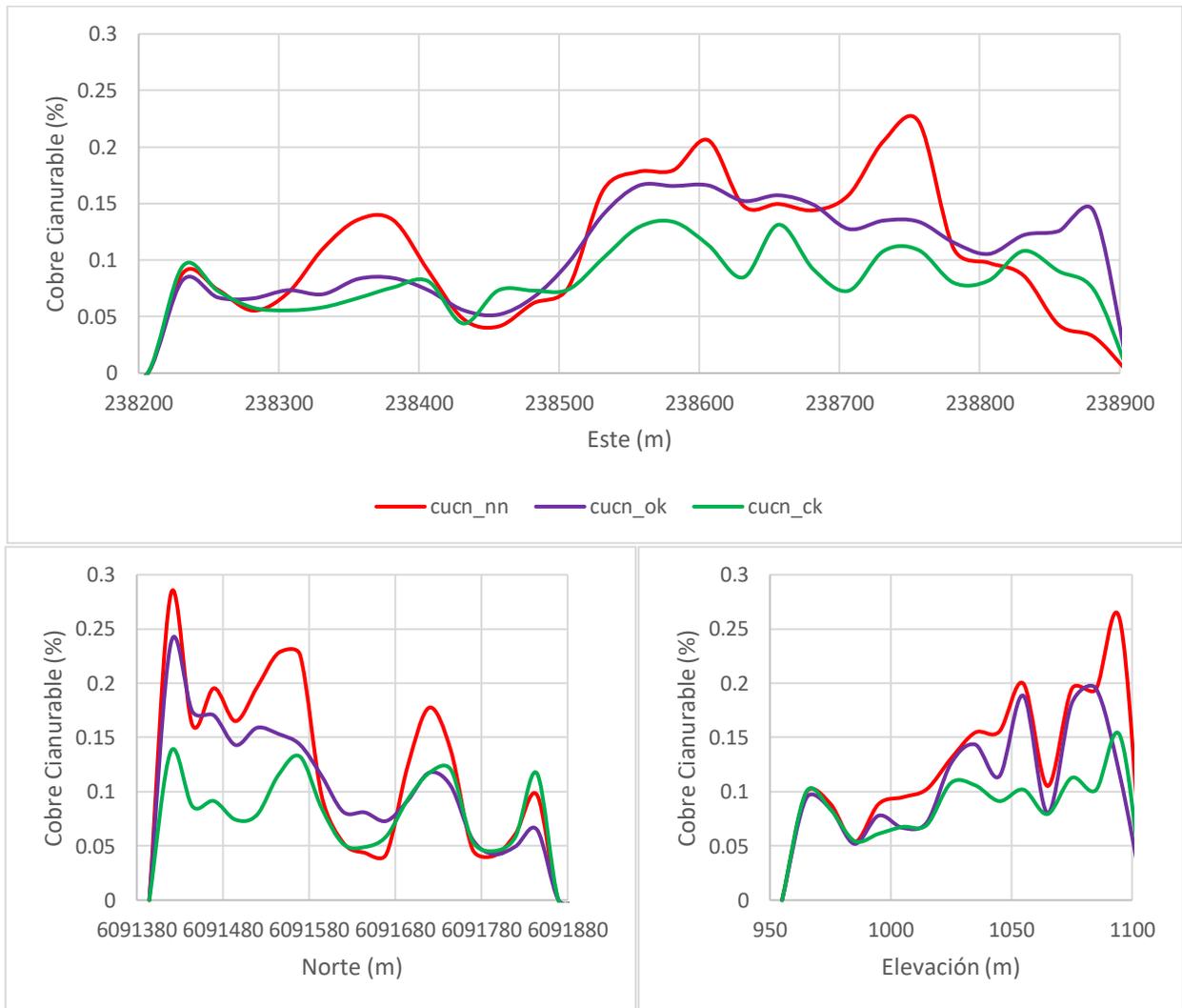


Figura 5-6: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuCN en el secundario débil con los datos A

Respecto a las derivas anteriores, es posible observar diferencias importantes según la variable y el caso. En general para el cobre total, los resultados de ambos casos se ajustan bien a los valores de la base de datos, sin embargo, entre las otras dos variables hay diferencias. En este sentido, es particularmente notable que las leyes de cobre soluble y cianurable del caso propuesto 1 presentan zonas en las que tienen poca similitud con las curvas de los datos, por ejemplo, esto es visible en los primeros 200 metros de la deriva de cobre cianurable en dirección norte (Figura 5-6). Particularmente, el corte analizado en el subcapítulo de validación ésta realizado en este rango, donde ciertamente se logra ver que el caso base estima mayores leyes.

Por último, se generan las curvas de deriva para el sulfuro primario con ley, respecto al cobre total (Figura 5-7), cobre soluble (Figura 5-8) y cobre cianurable (Figura 5-9), donde las extensiones son similares a las de los dos anteriores dominios.

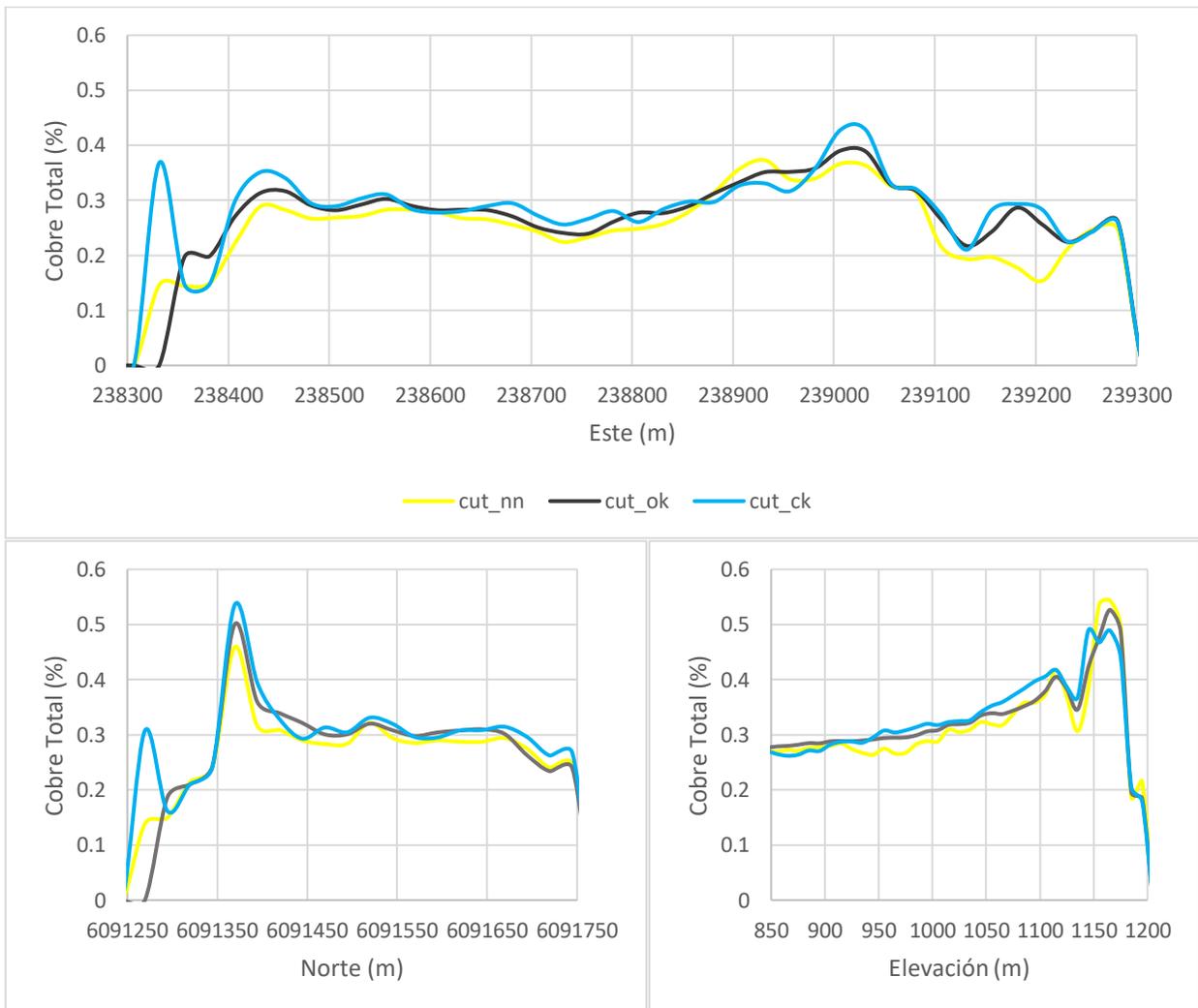


Figura 5-7: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuT en el primario con ley con los datos A

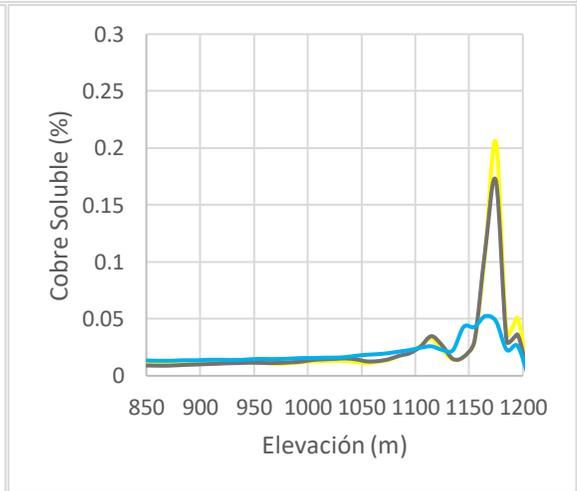
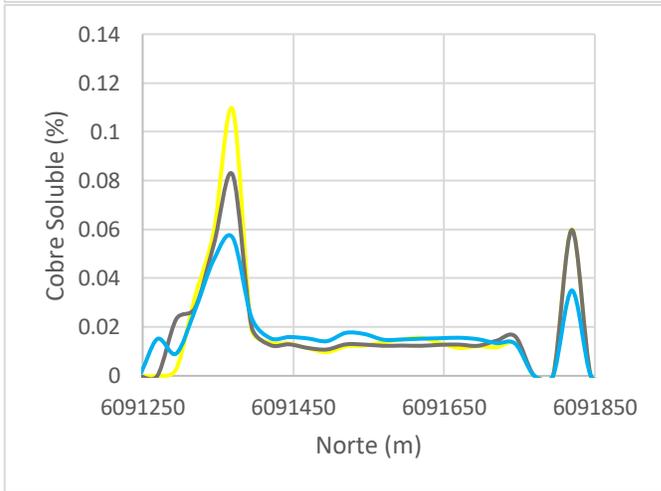
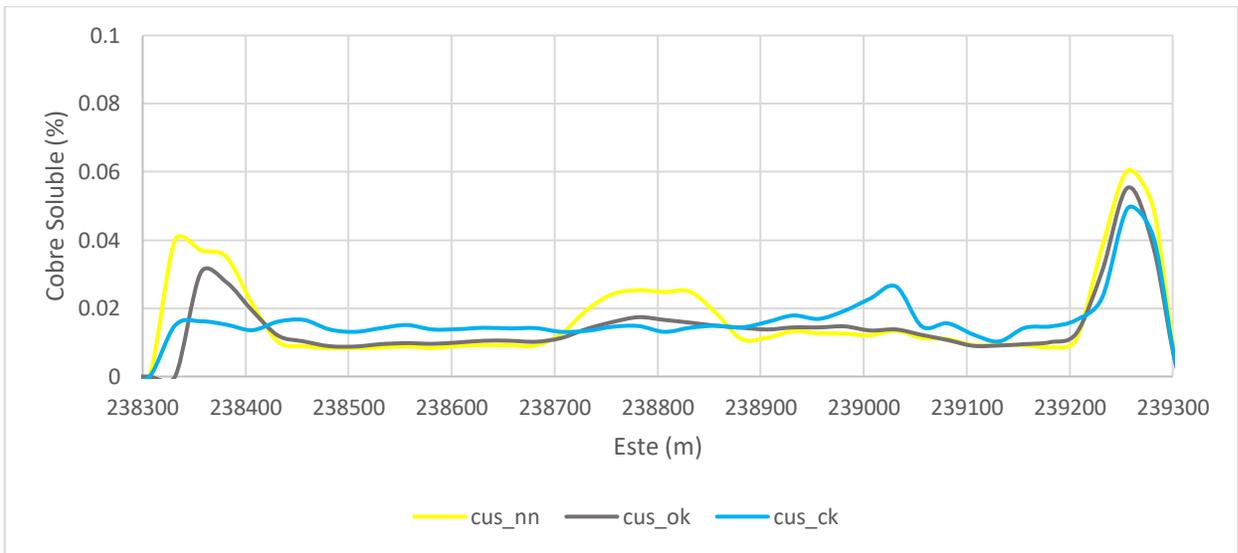
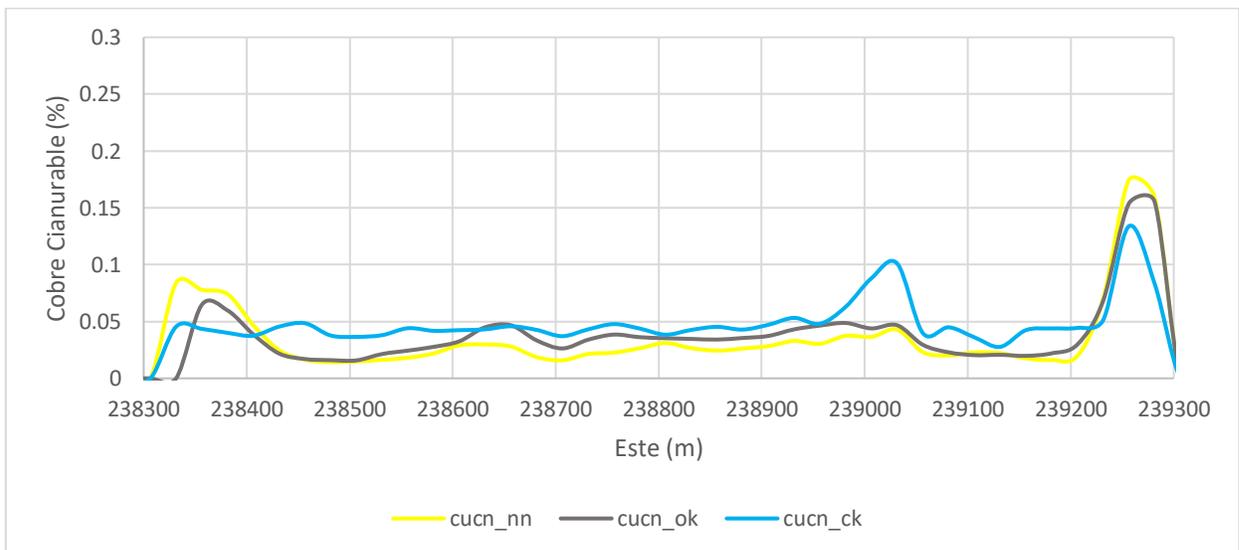


Figura 5-8: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuS en el primario con ley con los datos A



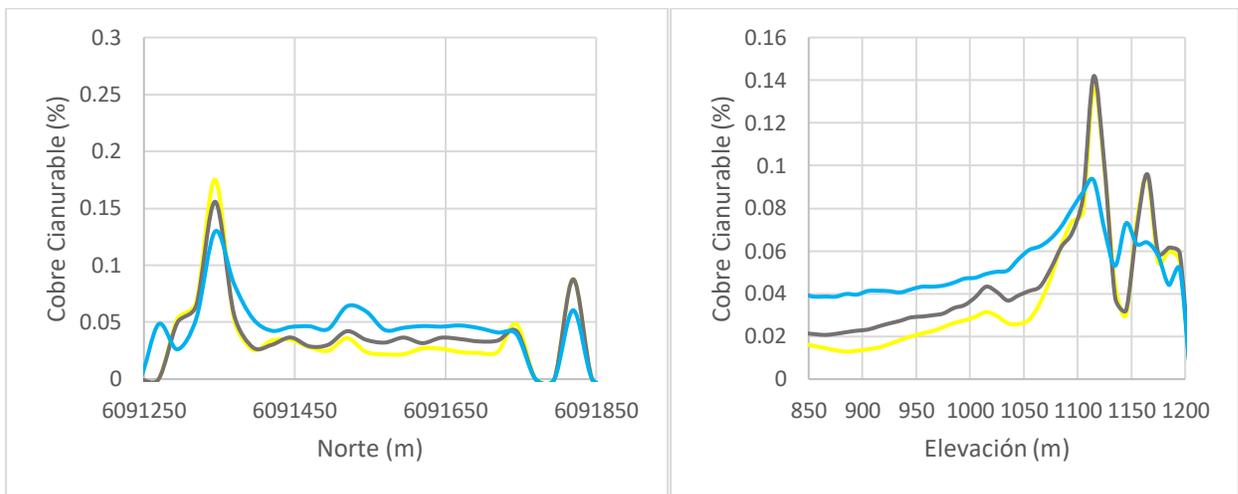


Figura 5-9: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuCN en el primario con ley con los datos A

Las figuras del dominio primario con ley presentadas anteriormente, en una primera observación general, sugieren un comportamiento diferente a la de los dos anteriores dominios, respecto a las variables cobre soluble y cianurable. Lo anterior a razón de que se puede observar que las curvas de estas variables en el caso propuesto 1, presentan tramos significativos, en cualquiera de las tres direcciones, donde pasan sobre la curva de las leyes obtenidas con el método de vecino más cercano. A pesar de la última observación, la relevancia de las leyes de los cobres lixiviables en este dominio, es menor respecto a la de los sulfuros secundarios. También se puede ver relativamente, un buen ajuste de las estimaciones de cobre total en ambos casos.

5.2. Comparaciones Estadísticas

Para el análisis se considera los dos grupos de casos, separados según la base de datos que usan para la estimación y el dominio de estimación correspondiente. En primera instancia se decide comparar cuatro parámetros, tal que dos están relacionados al cobre total y dos a la relación entre las estimaciones de cobre total y las otras especies de cobres estimadas.

Respecto al sulfuro secundario fuerte en el primer grupo (Figura 5-10), se observa que usando cokriging se estima en promedio una menor ley de cobre total comparándola con la base de datos, siendo menor en casi 7.3%, siendo además visible un mayor suavizamiento en la interpolación, dado el menor valor de desviación estándar. Se puede observar que, en relación al cobre soluble, la razón media es bastante similar entre los casos, la base de datos y aquella obtenida por el EDA, mientras que respecto al cobre cianurable, los valores se ven más separados entre sí, siendo el mayor aquel obtenido directamente de la base de datos.

En el mismo dominio, respecto al segundo grupo de casos (Figura 5-10), se observa un cambio importante en la ley media de cobre total. Esta variable en la base de datos reduce su valor, efecto del desagrupamiento y capping aplicado, provocando que el caso propuesto 2 sea el que mejor se aproxima al valor. Por otro lado, el capping y desagrupamiento reducen la desviación estándar de la base de datos, haciendo que el efecto suavizamiento de los estimadores no sea tan importante. Interesante observar que las razones de solubilidad media se ven inalteradas, algo que se comentó esperable en la etapa de desagrupamiento y capping.

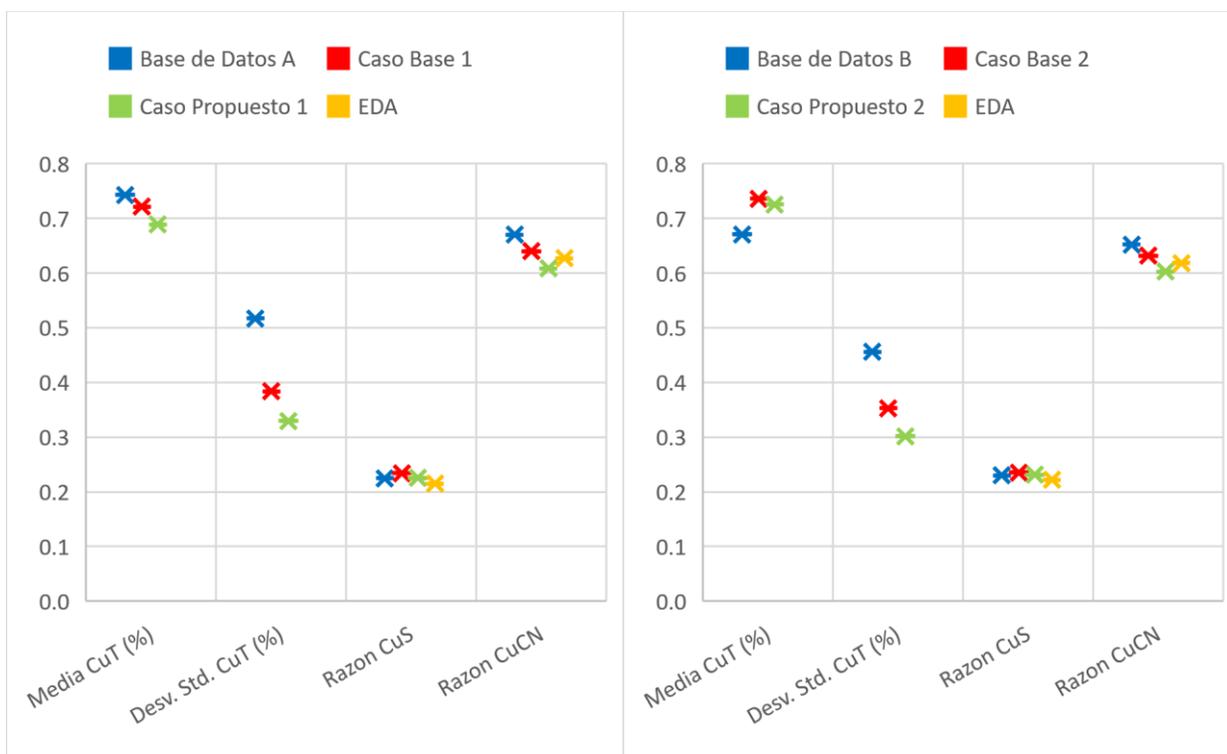


Figura 5-10: Comparación estadística de los casos en el dominio sulfuro secundario fuerte usando la base de datos A (izq) y la base de datos B (der)

Para los casos del sulfuro secundario débil que usan la base de “datos A” (Figura 5-11), se observa que ambos casos estiman leyes de cobre total similar, donde tanto las muestras como las leyes estimadas presentan una desviación estándar baja y relativamente similares entre ellas. Por otro lado, se observa que la razón de cobre soluble es muy similar para todas las fuentes de información, sin embargo, la relacionada al cobre cianurable es marcadamente diferente en dos grupos. El primero lo conforman las cifras de la base de datos y el caso base, mientras que en el segundo se encuentra la cifra del caso propuesto y la obtenida en el EDA. Esta diferencia clara puede ser explicada por la naturaleza heterotópica particular de la base de datos, la cual trata de abordar la nueva metodología. En este sentido, basta ver en la tabla 4-5, que las muestras de los cobres lixiviables en este dominio son menores al 58% del total de compósitos, por lo que es clara la diferencia entre la razón de la base de datos y el EDA, y como el planteamiento del caso

propuesto 1 usa la información de las relaciones obtenidas en el EDA, los resultados de éstos se parecen bastante.

Respecto a este dominio y la base de datos B (Figura 5-11), hay un cambio negativo en las cifras de cobre total respecto al grupo anterior, un cambio positivo en la desviación estándar, haciendo que los casos entreguen un valor más parecido al de la base de datos y un cambio muy menor respecto a las razones de solubilidad calculadas de las cuatro fuentes, siendo particularmente notable que la razón de cobre cianurable del caso base disminuye ligeramente.

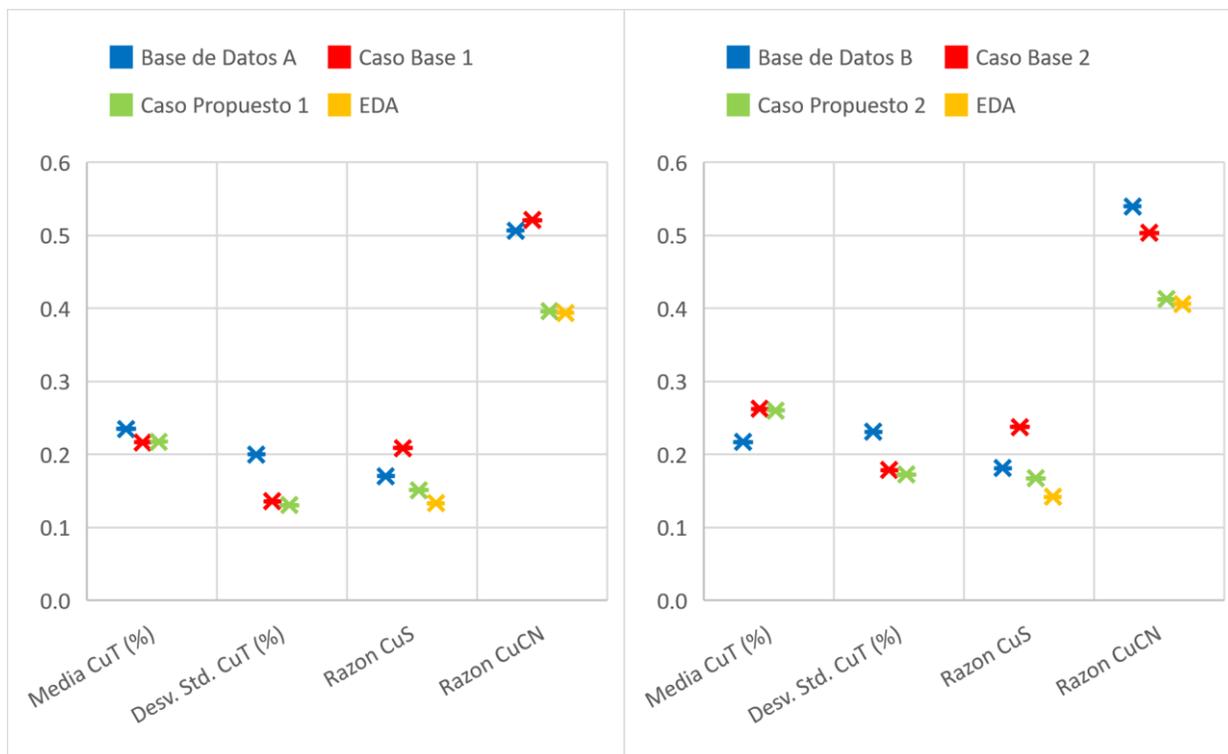


Figura 5-11: Comparación estadística de los casos en el dominio sulfuro secundario débil usando la base de datos A (izq) y la base de datos B (der)

Finalmente, para el dominio sulfuro primario con ley (Figura 5-12), los valores relacionados al cobre total son similares, siendo nuevamente visible el suavizamiento de los interpoladores. Se puede ver también que, los valores de las razones de solubilidad obtenidos mediante el EDA están muy cerca de las obtenidas con la base de datos A, pero las sobrepasan cuando se compara con las resultantes de la base de datos desagrupada y con capping (incluso por más del 100% en el caso de la razón relacionada al cobre soluble). Por otro lado, si estas razones se comparan con las obtenidas por la realización de los casos, es visible la gran variación según la base de datos que está siendo usada, especialmente para la razón de cobre cianurable.

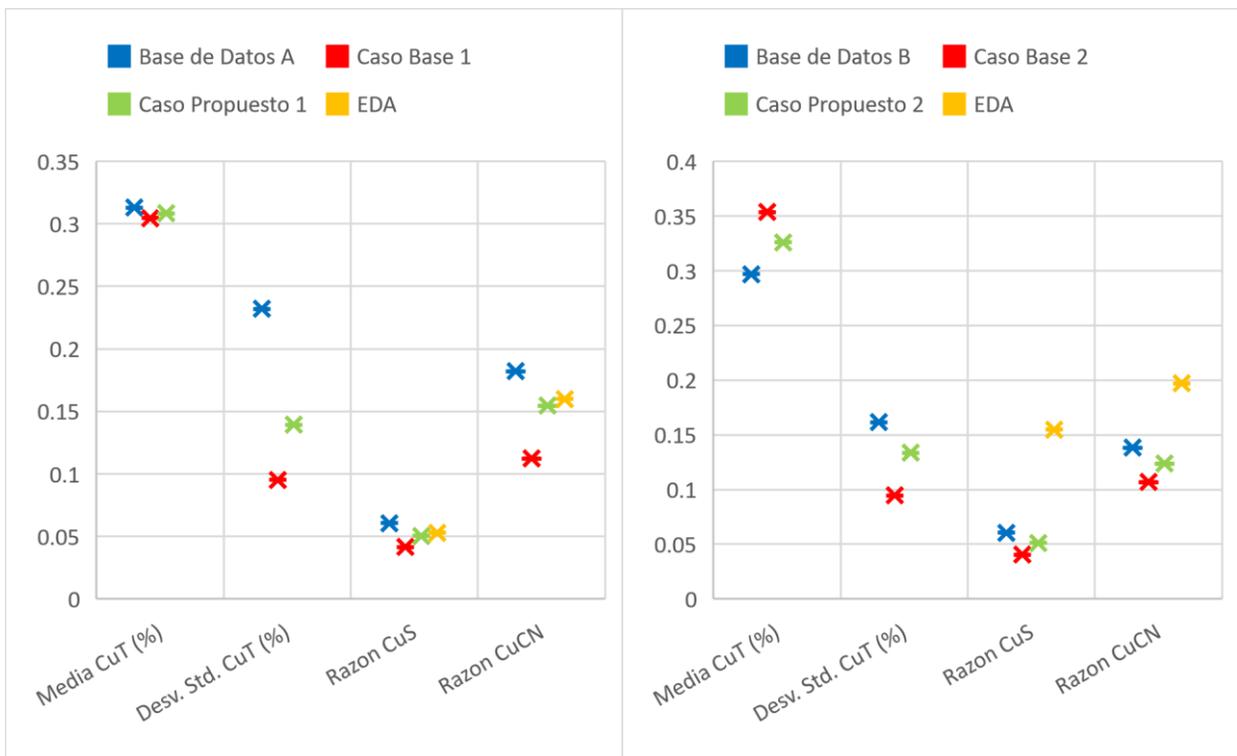


Figura 5-12: Comparación estadística de los casos en el dominio sulfuro primario con ley usando la base de datos A (izq) y la base de datos B (der)

5.3. Análisis de Resultados

A partir de toda la información generada es posible realizar un análisis de varios de los elementos, los cuales han aparecido en cada una de las etapas de estudio.

Primeramente, respecto a los parámetros de consistencia de las estimaciones y completitud del total de variables requeridas. Claramente, los valores porcentuales de inconsistencias que entregan los casos bases son muy elevados (Tabla 4-14 y Tabla 4-15), si bien el desagrupamiento y capping redujeron las cifras para el sulfuro secundario fuerte, la aumentaron para el sulfuro secundario débil, por lo que su efecto no sería generalizable. Dado lo anterior, podría conjeturarse que, particularmente para el depósito, las leyes altas de cobre total, que eventualmente están asociadas a leyes altas de cobres lixiviables, no necesariamente generan las estimaciones inconsistentes. En contra parte, la metodología propuesta reduce drásticamente en los tres dominios analizados estos porcentajes, relacionados a las tres desigualdades que se deben cumplir (Tabla 4-17 y Tabla 4-19). En los dominios sulfuro secundario fuerte y sulfuro primario con ley, estas reducciones son del 100% para las tres desigualdades, mientras que para el dominio sulfuro secundario débil depende de la base de datos con la que se realiza la estimación, sin embargo, en promedio éstas están en torno al 65%,

87% y 72% respectivamente al tipo de desigualdad que se observa en las tablas. En estas mismas se puede observar un efecto positivo del capping de las muestras, dado que en los dominios que redujeron totalmente las cifras, no se produjo un aumento, pero sí una reducción en el sulfuro secundario débil, mostrando en este punto que éste es el dominio más complicado de estimar en el depósito. En términos de la completitud de la estimación de las tres variables, si bien los porcentajes no eran elevados para los casos base, el solo hecho de la naturaleza del estimador de los casos propuestos, reduce estos valores al 100%. Cabe mencionar que para la metodología de los casos base, en teoría basta cambiar los planes de estimación para eliminar este último efecto, no obstante, dependiendo de las variables y modelos geoestadísticos propios, esto podría no ser válido en términos de las prácticas habituales de la industria.

En lo que concierne al efecto de obtener estimaciones con leyes negativas en los casos propuestos, se pueden realizar varios análisis. Primero cabe notar que éstas aparecen principalmente en las variables primarias (CuS y CuCN), lo cual se podría entender por el hecho de que las leyes de cobre total son más altas, por lo que, si a éstas se les calcula un ponderador negativo, es muy probable obtener este tipo de valores en las leyes estimadas. En general, para los dos casos propuestos (Tabla 4-16 y Tabla 4-18), los porcentajes son relativamente bajos, siendo el del cobre cianurable en el sulfuro secundario débil el valor crítico. Sobre este elemento, se observa que el uso de la base de datos B, no tiene un efecto generalizado claro, más que tal vez haber reducido ligeramente la ley media de cobre total a la que están asociados estos bloques.

Además de las comparaciones directas de los resultados de estimación, existe un elemento particular desde el punto de vista de la utilidad de los modelos de bloques. Considerando que en cualquiera de los casos se debe configurar los modelos para ser utilizables en el cálculo de Recursos Minerales, es interesante analizar el potencial efecto de las técnicas de actualización de las leyes sobre los casos de estudio. Este análisis es complementario al que se debe realizar con los resultados de las cubicaciones dentro de los pits de Recursos Minerales.

Si se considera que la forma de actualizar las leyes de los bloques con inconsistencias o leyes negativas puede ser mediante la aplicación de un “*proxí*” lineal (obtenidas usando las razones de solubilidad medias o ecuaciones de regresiones dependientes del cobre total), entonces es valioso observar el comportamiento de las leyes en estos bloques. Para el caso base 1 (Figura 4-10 y Figura 4-11), las leyes medias de cobre total relacionadas a las leyes inconsistentes de cobre soluble y cianurable son de 0.21% y 0.43% en el secundario fuerte, y de 0.06% y 0.15% en el secundario débil, respectivamente. En contra posición, para el caso propuesto 1 (Figura 4-14), que contiene inconsistencias únicamente en el secundario débil, las

medias de cobre total relacionadas al cobre soluble y cianurable son de 0.06% y 0.13%, respectivamente. Comparando estos casos, es factible indicar que en general, cualquiera sea la técnica aplica, las leyes de los cobres lixiviables se reducirán respecto a las que entrega la estimación (Tabla 4-23 y Tabla 4-25), sin embargo, los cambios se traducirán en efectos más visibles para el caso base 1, dada la mayor cantidad de bloques y las altas leyes de cobre total que presentan en promedio. En otras palabras, los resultados obtenidos por la metodología propuesta son menos sensibles a este tipo de técnicas para actualizar leyes (probablemente la más común). Observando los resultados del caso base 2 (Figura 4-12 y Figura 4-13) y del caso propuesto 2 (Figura 4-15), el mismo efecto se repite, dado que los cambios promedio de leyes no son grandes. Por el lado de las leyes negativas, cuestión que únicamente ocurre en los casos propuestos, se puede observar relaciones entre las leyes (CuS/CuT y CuCN/CuT), diferentes a las que presentan los bloques con inconsistencias. Las obtenidas en el caso propuesto 1 (Anexo 8-13 y Anexo 8-14) muestran una relación de leyes negativas muy cercanas a cero, con leyes de cobre total que se mueven en un amplio rango, llegando a valores relativamente altos. El hecho de que estas leyes negativas sean cercanas a cero, tienen relación con el sistema de ecuaciones de interpolación y los datos usados.

Considerando que el cokriging captura la información local de las muestras, sin hacer una revisión detallada, puede suponerse que las leyes negativas se obtienen en zonas donde los valores de cobre soluble y cianurable son particularmente bajos. Sin perjuicio de lo anterior, si se aplicara una técnica de actualización de valores como la descrita anteriormente, se ve que las leyes promedio aumentarían en las estadísticas generales. Una consideración importante sobre este punto, del cual se tiene conocimiento en el proyecto, es el uso de una ley de corte crítica. En este sentido, si este valor está dado por el cobre total (en este proyecto se sabe está definido así y tiene un valor de 0.15%), el efecto de aplicar correcciones a las leyes negativas sobre la calidad de los Recursos, sería reducido importantemente. Para el caso propuesto 2 (Anexo 7-15 y Anexo 7-16), este mismo análisis se puede realizar, siendo incluso más favorable, dado que se observa que la base de datos desagrupada y con capping entrega un rango más estrecho de leyes de cobre total relacionado, particularmente para el cobre cianurable en el dominio sulfuro secundario fuerte. El análisis anterior muestra que el efecto de marcar las leyes negativas con valor cero, no debiera ser problemático en términos de subestimar la calidad de los Recursos Minerales, soportando por tanto la técnica para la obtención de modelos de bloques consistentes.

Como se mencionó, el cálculo de los Recursos considera muchos parámetros y elementos clave, como el tipo de clasificación del material y la inclusión de los dominios no estudiados, sin embargo, al ser todos éstos similares para los cuatro casos, los resultados únicamente reflejan

el efecto propio de las estimaciones de cada caso. Respecto a los resultados, es particularmente difícil analizar cada dominio separadamente, dado que guardan una relación entre ellos definida por la forma física de extracción minera, no obstante, sí se puede relacionar algunas de las cifras estudiadas a los resultados de estimación. Para el dominio sulfuro secundario fuerte (Tabla 4-28), todos los casos muestran un tonelaje similar al interior de la envolvente, consistente con las leyes estimadas que se observan en los gráficos de deriva, excepto por el caso propuesto 2. Esta diferencia es importante, ya que implica que existe una zona del dominio que potencialmente tienen la valorización suficiente para ser incluida (aumento de Recursos Minerales). Revisando las envolventes, efectivamente la diferencia se explica por una subida de ley de cobre de los casos que usan la base de “datos B”, como se puede observar en la deriva en dirección este (Anexo 8-33), a partir de la coordenada 239350E. Lo anterior también se da respecto a las otras variables. Sin perjuicio de lo anterior, los casos muestran valores variados de leyes promedio, no obstante, los casos base 2 y propuesto 2 entregan mayor cantidad de metal extraíble. Para el dominio sulfuro secundario débil, los casos propuestos consideran un menor tonelaje que los casos base, lo cual tiene relación directa con las menores leyes de cobre soluble y cianurable que se estima con el cokriging, que es fácilmente observable en los gráficos de deriva correspondientes. Respecto a las leyes medias, éstas varían menos que las del dominio anterior, pero se traducen en el mismo efecto, haciendo que para los casos base 2 y propuesto 2 se calcule una mayor cantidad de metal extraíble, comparándolos con los otros dos casos restantes. Para el dominio sulfuro primario con ley, la variable de tonelaje varía fuertemente, siendo mayor para los casos que ocupan la base de “datos B”. Las leyes de cobre soluble y cianurable son bajas en promedio para todos los casos, pero el aporte de metal tiene el mismo comportamiento que en los otros dos dominios anteriores. Por último, en el dominio sulfuro primario estéril, en el cual se esperaba cambios insignificantes, se observa que los casos propuestos entregan en general, mayores valores de los siete parámetros calculados. Al revisar las envolventes, parece que las diferencias se explican por zonas del dominio muy cercanas a los cuerpos con mejores leyes, las cuales probablemente, por un efecto de contaminación de muestras y modelamiento geológico, generan cúmulos de altas leyes de cobre total, más aun, la metodología propuesta tiende a estimar leyes más altas también de las otras variables de cobre. Lo anterior también se da en el sulfuro primario con ley, posiblemente por efecto de las relaciones lineales impuestas.

Dado los puntos anteriores, es importante analizar el efecto de las muestras usadas sobre las leyes estimadas, particularmente respecto a las relaciones que se imponen para la aplicación del cokriging en los casos propuestos. Como se logró ver en el primer subcapítulo, en general para los tres dominios relevantes del depósito, las estimaciones de cobre total son similares para los casos obtenidos median kriging ordinario y cokriging con medias relacionadas, sin embargo,

para las otras dos variables la metodología propuesta en general estima localmente menores leyes tanto en el sulfuro secundario fuerte (Figura 5-2 y Figura 5-3) y débil (Figura 5-5 y Figura 5-6). Curiosamente, lo anterior no es válido para el dominio primario con ley (Figura 5-8 y Figura 5-9), dado que se observa que en varios tramos las leyes son incluso mayores que aquellas obtenidas con la técnica del vecino más cercano "*nearest neighbor*".

Es posible que esto tenga que ver con las muestras de cada uno de estos dominios. Si bien porcentualmente el muestreo de valores de cobre soluble y cianurable es similar para el sulfuro secundario débil y sulfuro primario con ley (Tabla 4-5), a partir de la validación visual quedó en evidencia que las especies de cobre en el primario con ley están concentradas en la parte superior del cuerpo (Figura 4-20), mientras que en el secundario débil (Figura 4-18), están bien distribuidas al interior del dominio. Considerando lo anterior, puede ser factible suponer que las razones de solubilidad obtenidas en el EDA contengan un sesgo, que puede ser producto de un muestreo preferencial en el depósito (por lo menos sobre una de las especies de cobre). Considerando lo anterior, se debe ser cuidadoso con las comparaciones de las estimaciones mediante cokriging, particularmente en el primario con ley (posiblemente también en el secundario débil), respecto a las leyes obtenidas por la técnica de "*nearest neighbor*", porque incluso este método puede no desagrupar perfectamente la información y corregir un eventual muestreo preferencial, por lo que mostraría información distorsionada. Una observación que puede validar este análisis, es que el efecto (disimilitud del cobre soluble y cianurable entre las expresadas por el cokriging y "*nearest neighbor*") parece disminuir con el uso de la base de datos desagrupada y con capping, a la luz de lo que se ve en los gráficos de las estadísticas comparadas (Figura 5-12) y los gráficos de deriva (Anexo 8-40 y Anexo 8-41). En este sentido, es factible pensar que el cokriging mejora la estimación de variables muestreadas preferencialmente (cobre soluble y cianurable), cuando se incluyen covariables muestreadas no preferencialmente (cobre total). Esto se podría validar probablemente revisando las derivas de cobre insoluble de las distintas fuentes.

Finalmente, las comparaciones estadísticas muestran claramente dos diferencias importantes entre los casos bases y propuestos, en forma general. Por un lado, el cokriging con medias relacionadas parece suavizar más que el kriging ordinario (Figura 5-10 y Figura 5-11), pudiendo depender de la calidad de datos, porque particularmente no se cumple para el primario con ley (Figura 5-12), probablemente por el efecto descrito anteriormente o la diferencia en la estrategia de estimación del cokriging (una pasada únicamente). Por otro lado, es bastante claro que las razones de solubilidad en las estimaciones de los casos base sean altas en los sulfuros secundarios, lo que es reflejo del problema de estimar bloques con inconsistencias.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo, se realiza un estudio geoestadístico en base a datos de sondajes de un proyecto minero de cobre que consta de la extracción a cielo abierto como método de explotación y la lixiviación en pilas y ROM como método de extracción metalúrgica. En éste, se establecen cuatro casos de estudio para comparar los resultados de dos tipos de metodologías de interpolación, respecto a la estimación de tres variables geológicas (CuT, CuS y CuCN) y las condiciones que deben cumplir ($CuT > CuS$ y $CuT > CuCN$ y $CuT > CuS + CuCN$), así como las consecuentes cifras de los Recursos Minerales que se obtienen a partir de ellas (tonelaje, ley media de las especies, metal contenido y metal recuperado).

Los casos están separados en dos grupos, en el primero están los de base, que aplican el interpolador tradicional de kriging ordinario (OK), y los propuestos, que usan un interpolador nuevo denominado cokriging con medias relacionadas (CKM). A su vez, estos grupos se dividen en función de la base de datos que utilizan, donde se tiene un base de datos A, sin desagrupamiento ni capping, y una base de datos B, la que si cuenta con estas modificaciones. La secuencia de estudio para la interpolación es básica y tradicional en la industria, al igual que el cálculo de Recursos Minerales.

Primeramente, los ejercicios de validación (validación cruzada y estadísticas), muestran que la metodología propuesta (CKM) tiene valores muy parecidos a la metodología tradicional (OK), respecto a los indicadores básicos (esperanza y varianza del error, esperanza del error estandarizado), sin embargo, presenta diferencias en la varianza del error estandarizado, la cual se explica por los valores bajos de varianza de estimación que entrega la metodología. Lo anterior se relaciona con la construcción matemática del interpolador y la diferencia de modelos geoestadísticos, lo que implica que se debe ser cuidadoso al momento de analizar la incertidumbre real de las estimaciones. Sin perjuicio de lo anterior, se concluye que la metodología propuesta está correctamente validada y sus resultados no están sujetos a errores de los parámetros y modelos geoestadísticos.

Respecto a la interpolación, la metodología propuesta reduce drásticamente los porcentajes de bloques que no cumplen las condiciones descritas, entregando particularmente para el dominio más importante del proyecto (sulfuro secundario fuerte), una reducción del 100%. Además, a pesar de ser esperable la existencia de leyes estimadas negativas, los porcentajes son bajos (la mayoría nulos), únicamente observables para el cobre soluble y cobre cianurable, y están asociados a valores bajos de leyes medias de cobre total, por lo que en términos prácticos, si se considera una ley de corte operacional, se tendría una menor sensibilidad respecto a la

aplicación de cualquier técnica de actualización de leyes y por ende tendría un efecto menor sobre el cálculo de los Recursos Minerales. Un beneficio directo del método propuesto, es que cualquier bloque estimado presentará siempre valores para las tres leyes. Respecto a la estadística global de las leyes y su comportamiento local, la variable primaria cobre total es muy similar para los dos grupos de casos, generalmente con estimaciones más suavizadas en aquellos que usan la metodología propuesta (excepto en el primario con ley). Lo anterior no se cumple con las otras dos variables de estudio. En general, la metodología propuesta estima menores leyes de cobre soluble y cianurable, siendo diferente en el primario con ley, consecuencia de un eventual sesgo por el muestreo de las variables de cobre lixiviables. Lo anterior sirve para concluir que el cokriging puede corregir/controlar en las estimaciones de cobre soluble y cianurable, los efectos del muestreo preferencial que éstas contienen, cuando se incluyen covariables muestreadas no preferencialmente, como lo es el cobre total.

El análisis de los casos muestra que no existe un efecto generalizable del uso de una base de datos específica, respecto al cumplimiento de condiciones, pero sí sobre la estimación de las variables y por ende en los Recursos Minerales calculados. A razón de lo anterior se puede concluir que la ventaja de la propuesta es que mejora la coherencia de las predicciones sin sacrificar calidad y precisión, reduciendo además el riesgo de generar sobrevalorización de sectores en los dominios de estimación, incluso cuando se debe aplicar técnicas de actualización de las leyes.

Finalmente, se tiene que los diferentes casos producen cambios en los Recursos Minerales. Para los sulfuros secundarios, en los casos propuestos se reducen las leyes medias, reduciendo el metal que se considera extraíble, sin embargo, se deja en evidencia la posibilidad de la incorporación de un sector en el pit de Recursos. En el dominio sulfuro secundario débil, los tonelajes varían entre 2.1 y 3.1 [Mt], sin embargo, hay un impacto importante en el tonelaje de metal fino que se estima al interior de éste, siendo los casos que usan la base de “datos B” la que estiman una mayor cantidad. Para los sulfuros primarios en conjunto, la metodología propuesta indica que puede existir un aumento tanto de tonelaje de material como de metal, manteniendo más o menos las leyes medias de las especies. En conclusión, la metodología propuesta tiende a una reducción del valor del proyecto si se considera la base A, pero a un aumento si se usa la base B, la que particularmente muestra una zona con potencial económico en sulfuro secundario fuerte y un incremento de las leyes de las especies solubles en el primario con ley.

6.1. Recomendaciones

A partir de los trabajos desarrollados y las observaciones realizadas, existe un conjunto de observaciones particularmente enfocadas en lograr una mejor aplicación de la metodología propuesta.

Específicamente para este proyecto, es recomendable intentar realizar las estimaciones por cokriging en el dominio sulfuro secundario débil, considerando fronteras suaves con los dominios sulfuro secundario fuerte y sulfuro primario con ley, para observar si el aumento de muestras logra reducir aún más los porcentajes de bloques con inconsistencias.

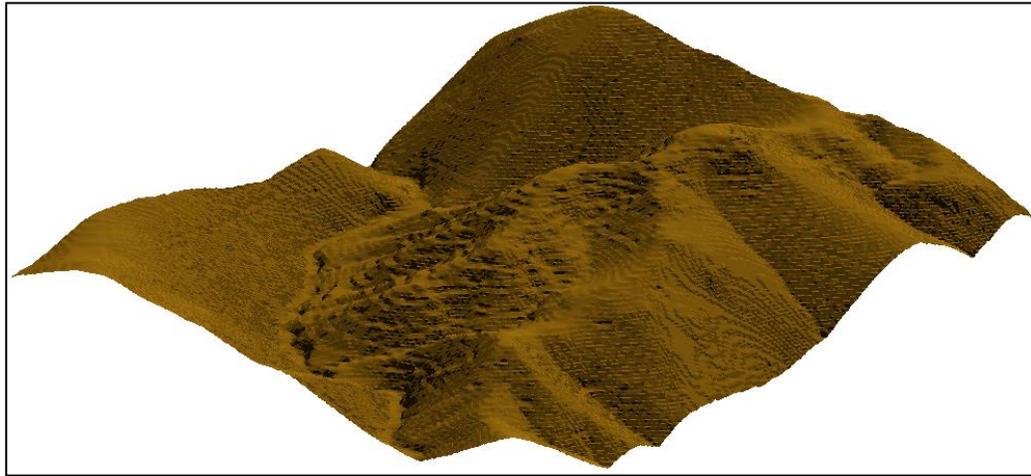
La segunda recomendación para esta metodología es la realización profunda del estudio de los datos de estimación (aplicable a cualquier proyecto de estudio), para saber si las muestras en los distintos dominios con los que se trabaja son representativas y exhaustivas (muestreo lo más homogéneamente distribuidas al interior del dominio), ya que, de no ser así, el interpolador propuesto puede distorsionar los valores, sustentándose particularmente en la variable primaria, como se concluye paso en los dominios primarios de este proyecto.

A partir del estudio del sulfuro secundario débil y sus dificultades (geoestadísticas), es recomendable que en cualquier estimación usando el interpolador propuesto, se considere un valor de efecto pepa lo más grande posible (ajustar la matriz tal que los valores no sean muy chicos pero que se ajusten lo más que se pueda a los datos) y modelos que sean, en lo posible, no parabólicos en el origen de los variogramas (evitando, en particular, el uso del modelo cúbico). Con lo anterior se espera que las inconsistencias sean mayoritariamente bajas y se tenga menos problemas con los valores de los errores estandarizados.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Coward, S., Vann, J., Dunham, S., Stewart, M., 2009. The Primary-Response Framework for Geometallurgical Variables. En: Seventh international mining geology conference: 17 al 19 de agosto del 2009. Perth, Australia.
- [2] David, D., 2003. Geometallurgical guidelines for miners, geologists and process engineer – Design to discovery. En: Second AUSIMM international geometallurgy conference: 30 de septiembre al 2 de octubre del 2003. Brisbane, Australia.
- [3] Emery, X., 2012. Cokriging random fields with means related by known linear combinations. *Computers & Geosciences* 38, 136-144.
- [4] Fustos, T., R. M. 2017. Descubrimiento de unidades geometalúrgicas por medio de análisis de conglomerados geoestadísticos. Tesis para optar al título de Doctor en Ingeniería de Minas. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [5] Goovaerts, P., 1998. Ordinary cokriging revisited. *Mathematical Geology* 30 (1), 21-42
- [6] Hohn, M.E., 1999. *Geostatistics and Petroleum Geology*, 2ª ed. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, 235pp.
- [7] Maleki, M., Emery, X., 2020. Geostatistics in the presence of geological boundaries: Exploratory tools for contact analysis. *Ore Geology Reviews*, Vol. 120, article 103397.
- [8] Matheron, G., 1979, Recherche de simplification dans un problema de cokrigeage, N-628: Centre de Geostatistique, Fontainebleau. France.
- [9] Myers, D.E., 1992. Kriging, cokriging, radial basis functions and the role of positive definiteness. *Computer Math. Applic.* Vol. 24, No. 12, pp. 139-148. Print: Great Britain.
- [10] Pan, G., Moss K., Heiner, T., Carr, J.R., 1992. A FORTRAN program for three-dimensional cokriging with case demonstration. *Computer & Geosciences* 18 (5), 557-578.
- [11] Rivoirard, J., 2003. Course on multivariate geostatistics. Fontainebleau, Centre de géostatistique, 10p.
- [12] Wackernagel, H., 2003. *Multivariate Geostatistics : an Introduction with Applications*. Springer, Berlin.
- [13] Yalçın, E., 2005. Cokriging and its effect on the estimation precision. *The journal of the south African institute of mining and metallurgy*. 105.

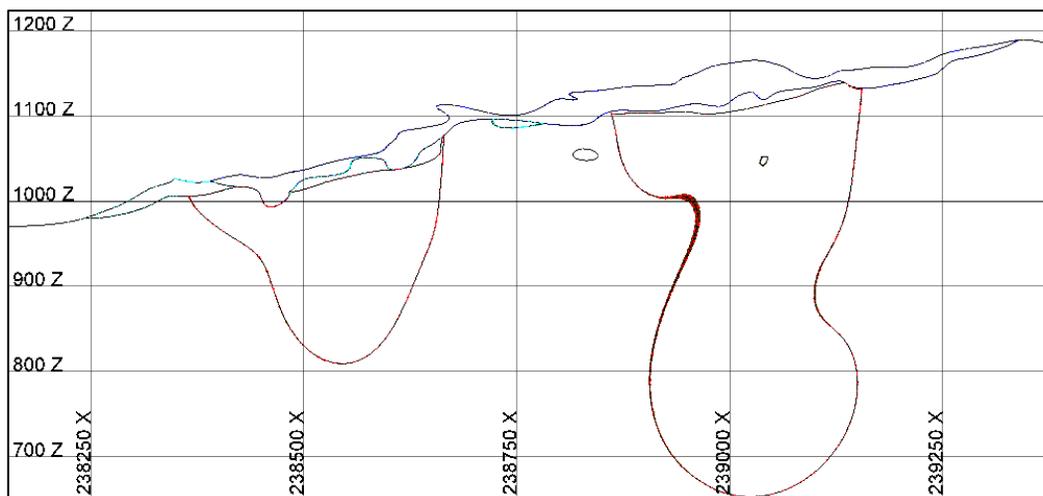
8. ANEXOS



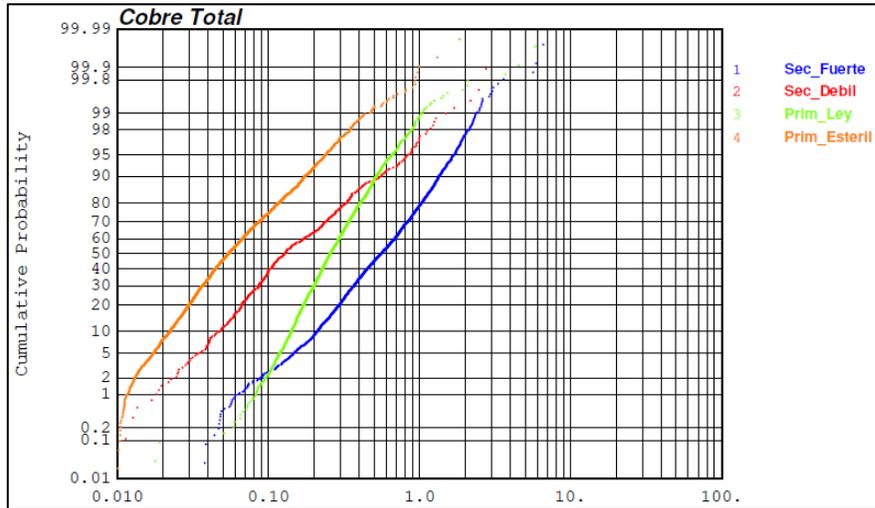
Anexo 8-1: Vista isométrica de la topografía del proyecto

Anexo 8-2: Resumen del material por zona mineralizada al interior del pit de reserva preliminar del proyecto

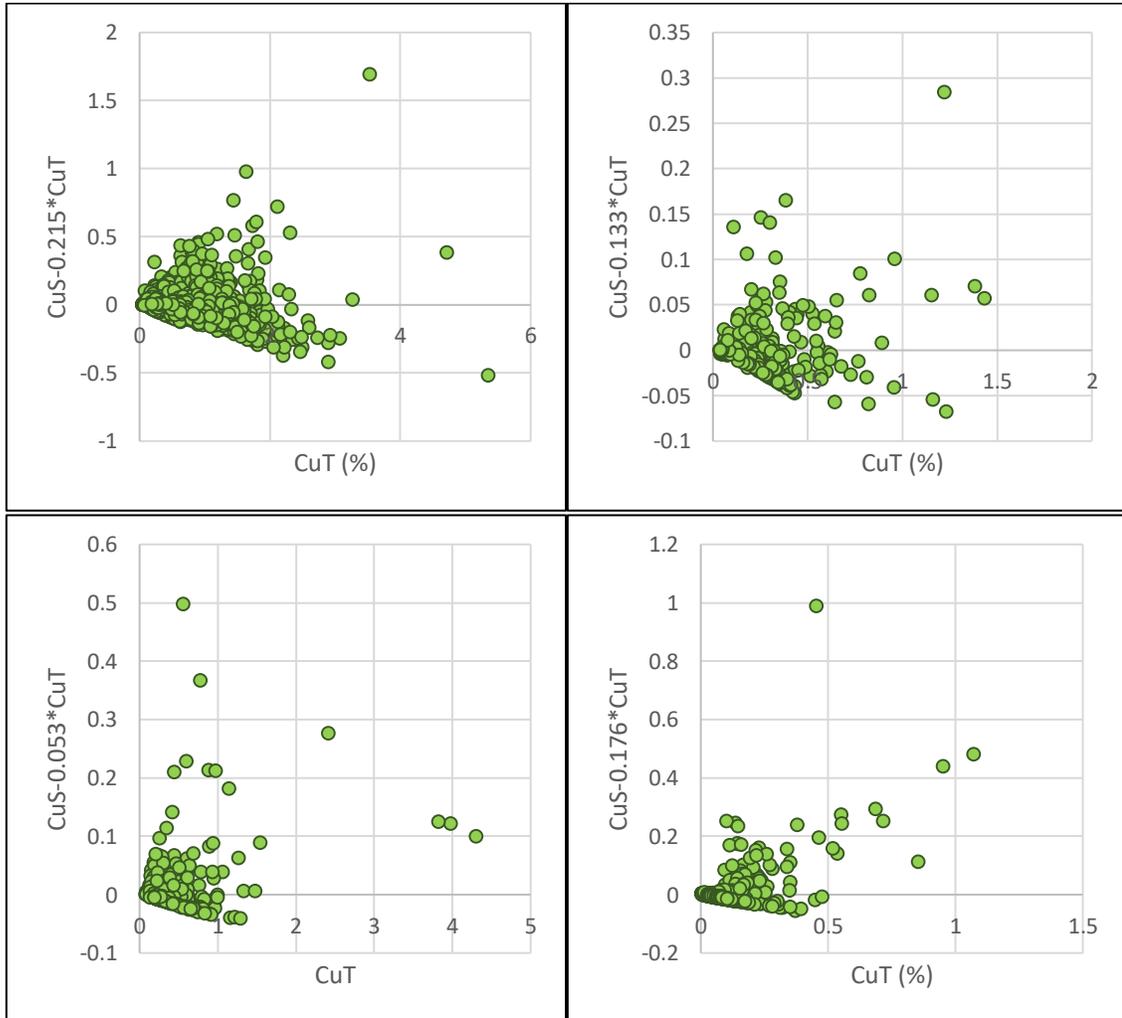
Zona Mineralizada	Porcentaje Volumétrico [%]	Tonelaje [Mt]	Ley Media CuT [%]
Lixiviado con Ley	8.74	5.35	0.28
Lixiviado Estéril	57.75	35.42	0.09
Óxidos con Ley	2.33	1.42	0.30
Óxidos Estériles	2.42	1.48	0.19
Secundario con Ley	18.98	11.62	0.79
Primario con Ley	7.00	4.27	0.43
Primario Estéril	2.79	1.70	0.30



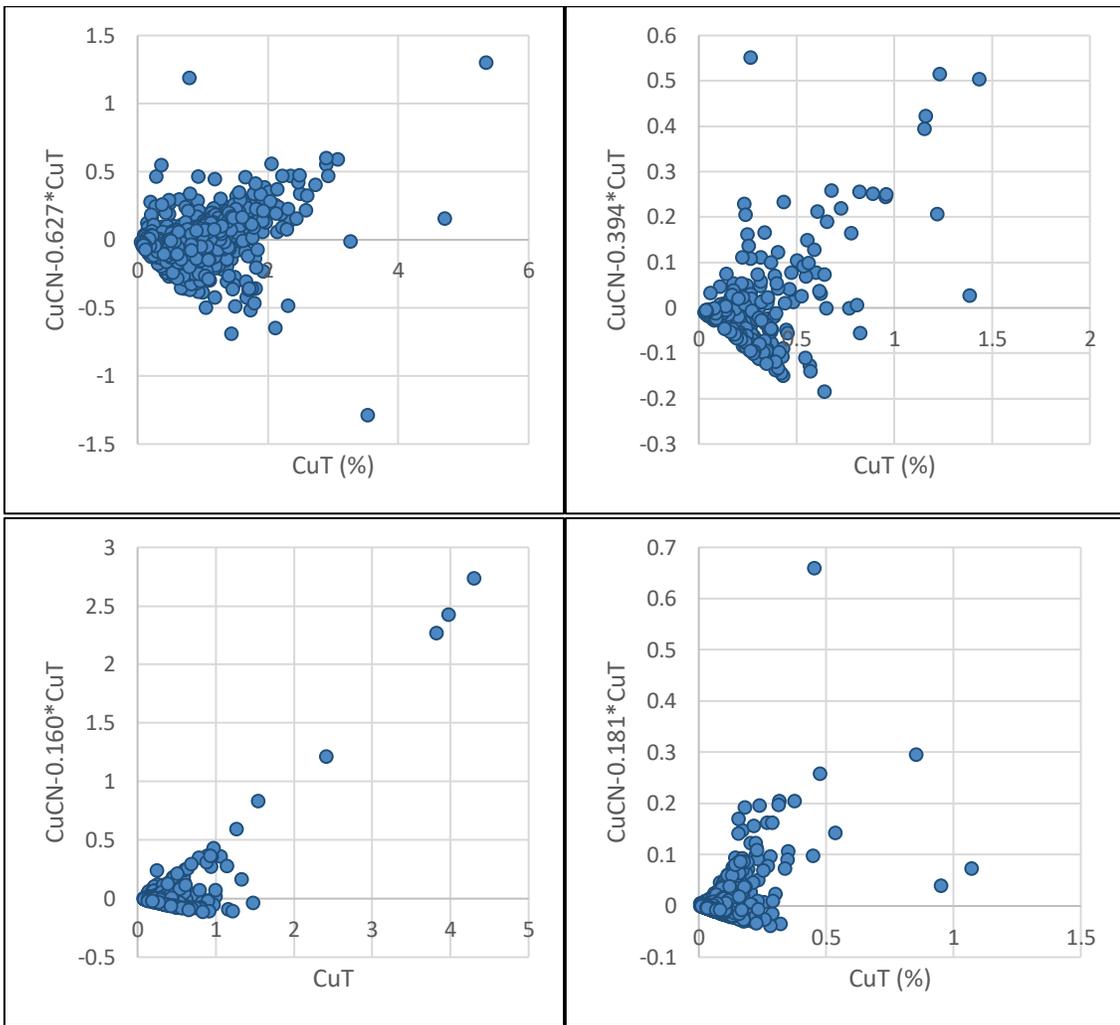
Anexo 8-3: Corte A-A' de los dominios secundario fuerte (azul), secundario débil (celeste) y primario con ley (rojo)



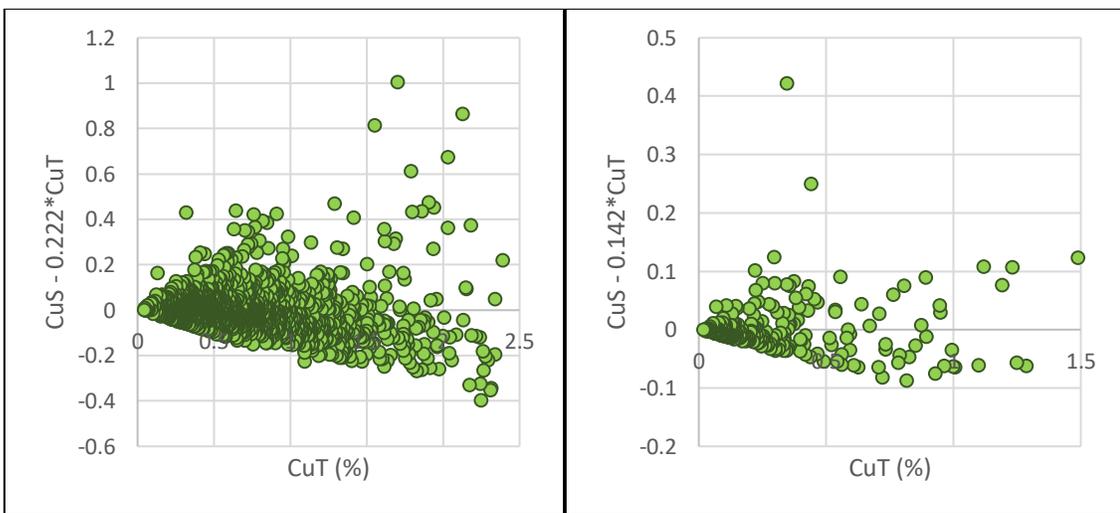
Anexo 8-4: Probabilidad acumulada de cobre total de los compósitos declusterizados en los dominios de estimación

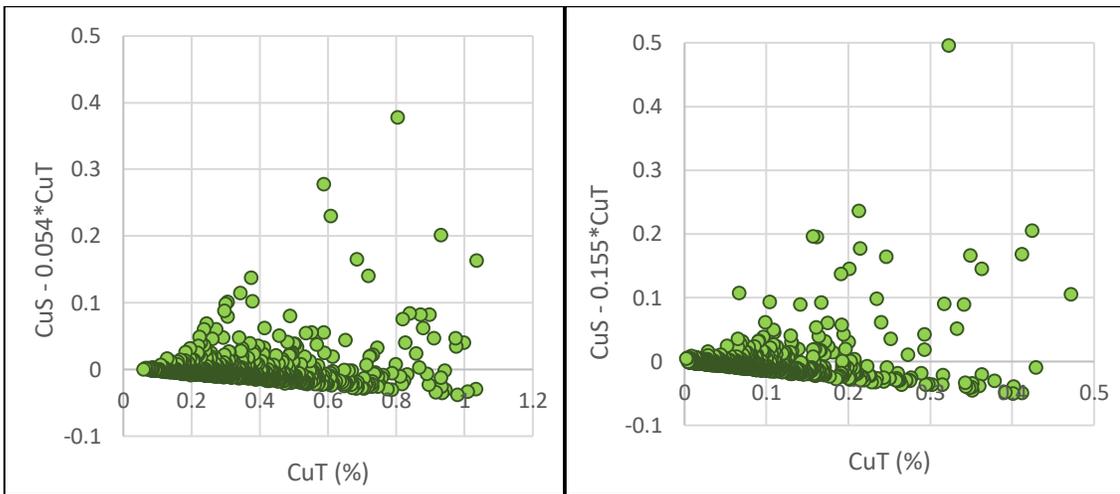


Anexo 8-5: Dispersión de la variable de estimación del coeficiente para la relación entre CuS y CuT con los datos A, en el secundario fuerte (izq-sup), secundario débil (der-sup), primario con ley (izq-inf) y primario estéril (der-inf)

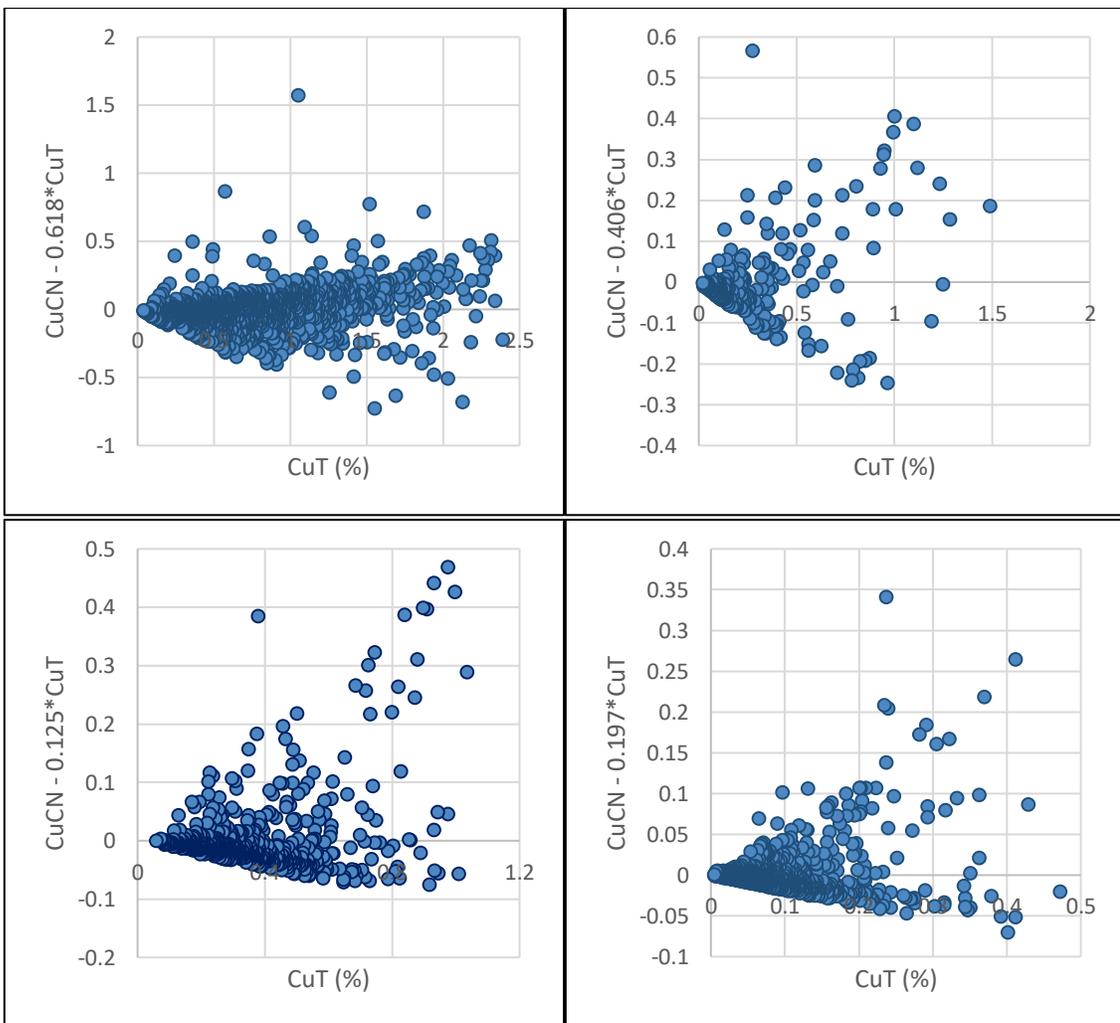


Anexo 8-6: *Dispersión de la variable de estimación del coeficiente para la relación entre CuCN y CuT con los datos A, en el secundario fuerte (izq-sup), secundario débil (der-sup), primario con ley (izq-inf) y primario estéril (der-inf)*

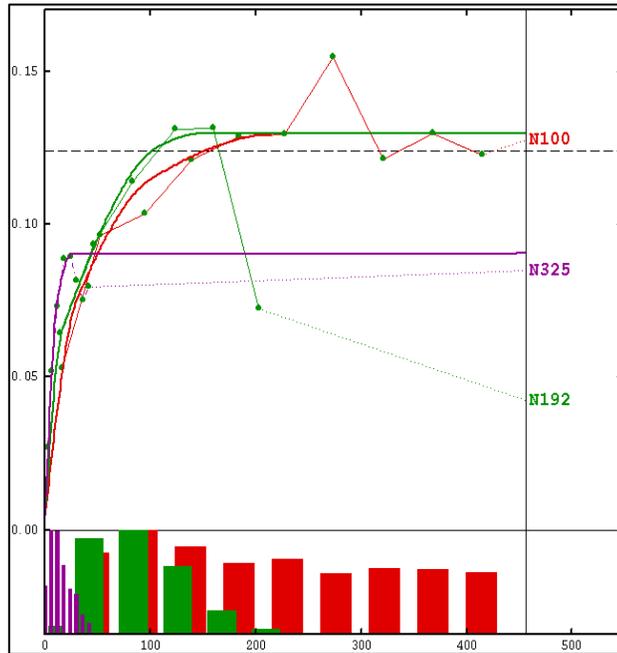
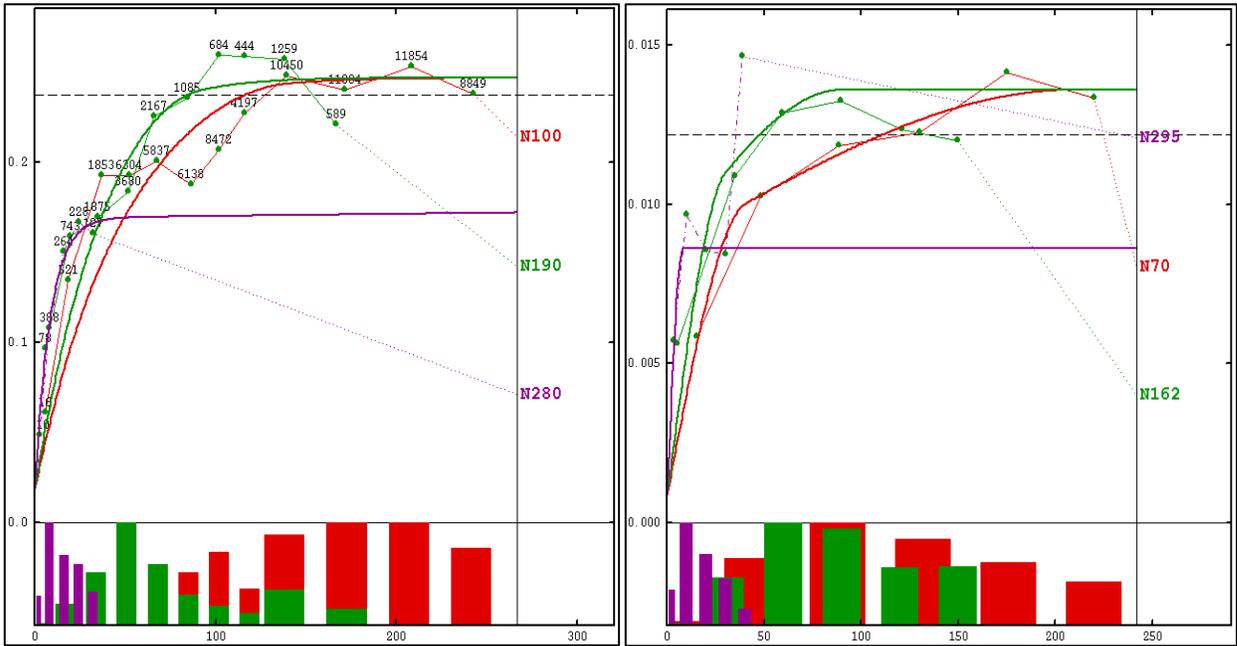




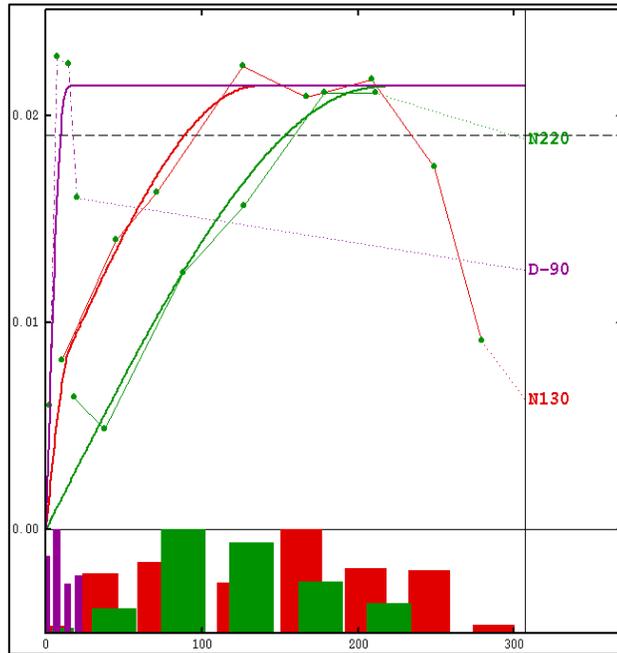
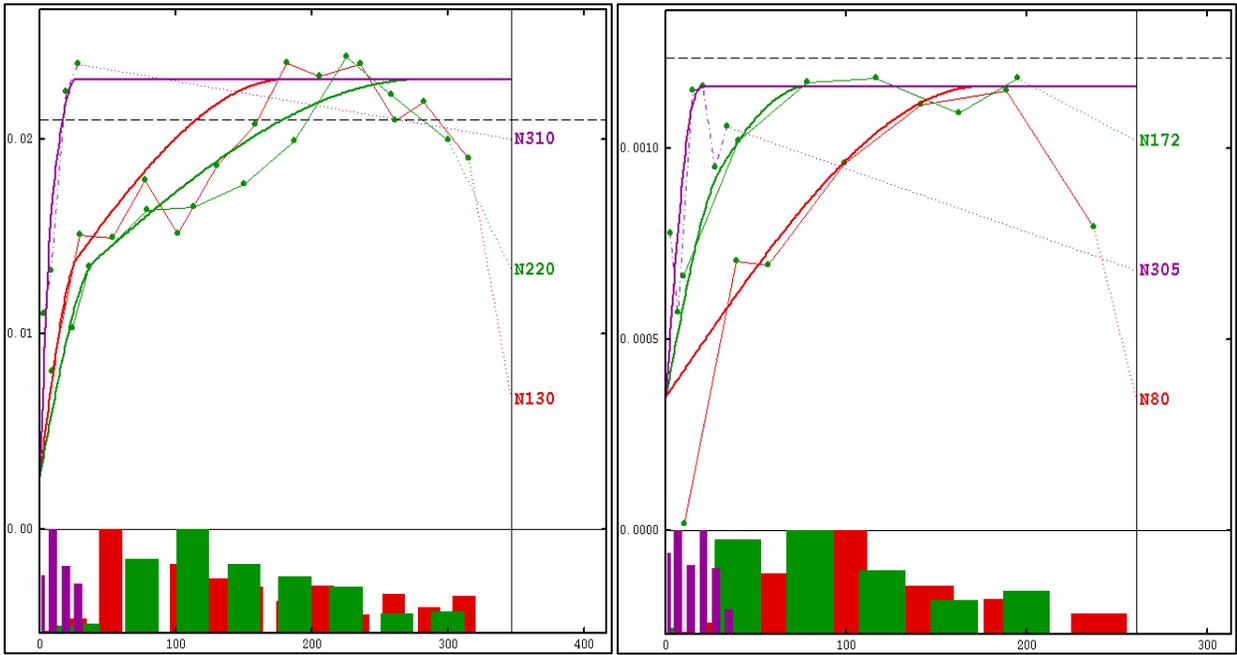
Anexo 8-7: *Dispersión de la variable de estimación del coeficiente para la relación entre CuS y CuT con los datos B, en el secundario fuerte (izq-sup), secundario débil (der-sup), primario con ley (izq-inf) y primario estéril (der-inf)*



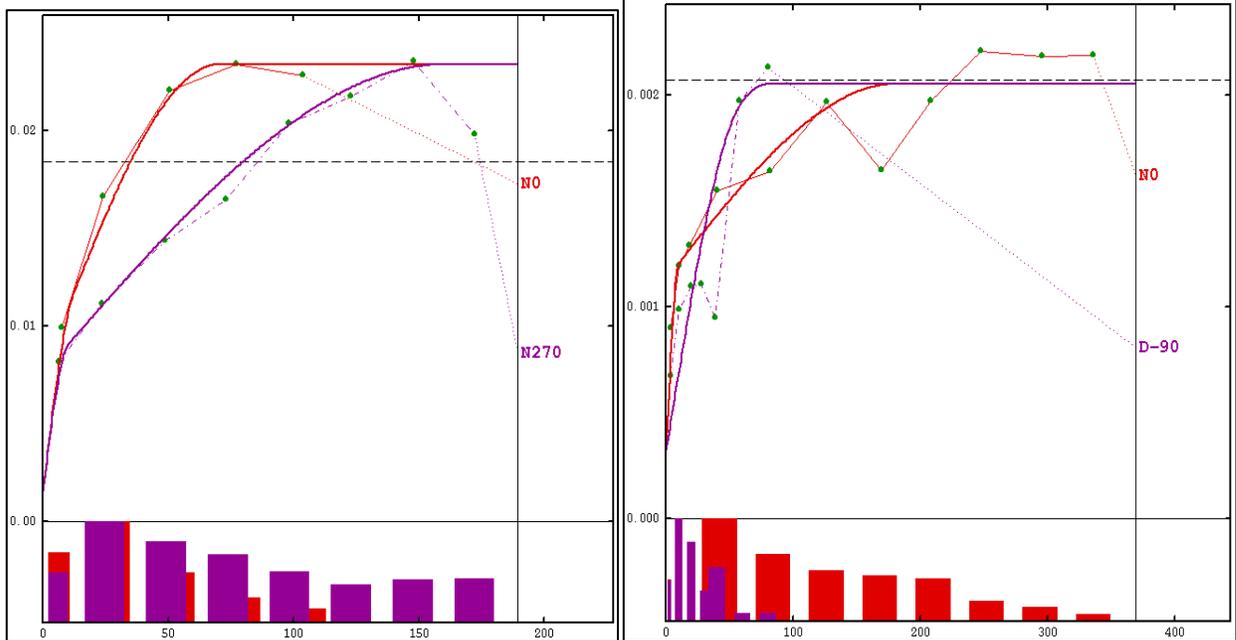
Anexo 8-8: *Dispersión de la variable de estimación del coeficiente para la relación entre CuCN y CuT con los datos B, en el secundario fuerte (izq-sup), secundario débil (der-sup), primario con ley (izq-inf) y primario estéril (der-inf)*



Anexo 8-9: Variogramas modelados del dominio sulfuro secundario fuerte para el cobre total (sup-izq), el cobre soluble (sup-der) y el cobre cianurable (inf)



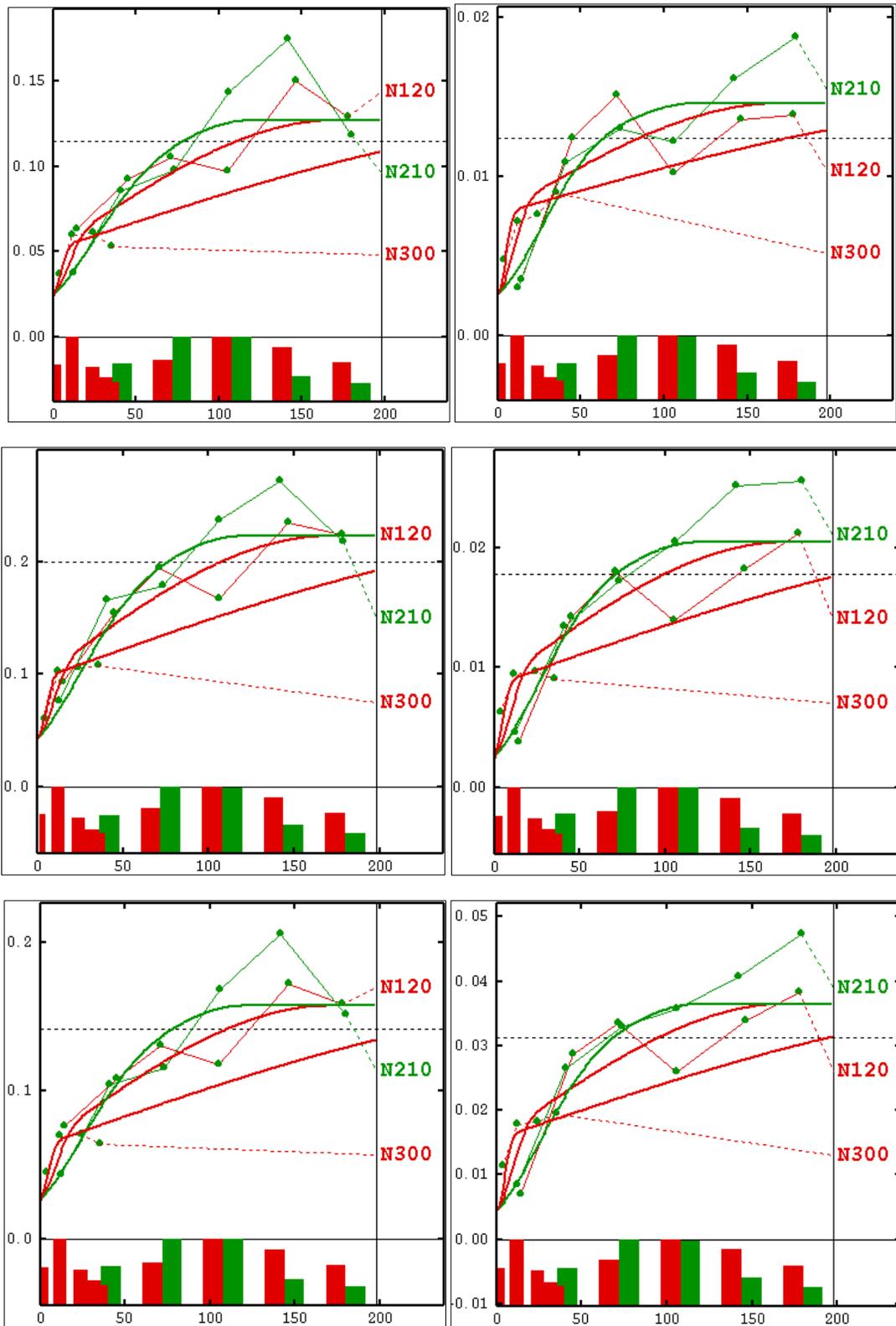
Anexo 8-10: Variogramas modelados del dominio sulfuro secundario débil para el cobre total (sup-izq), el cobre soluble (sup-der) y el cobre cianurable (inf)



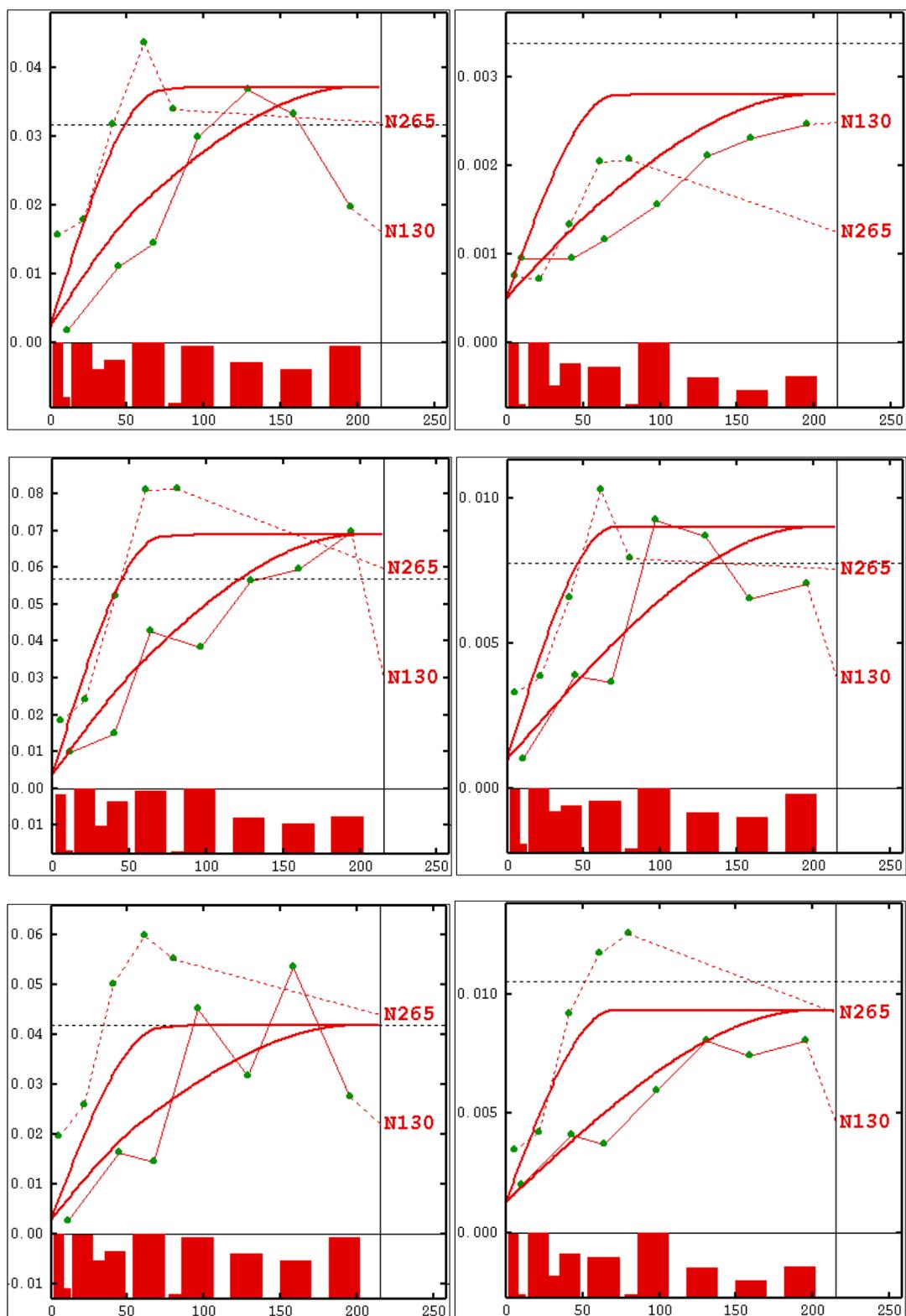
Anexo 8-11: Variogramas modelados para el cobre total en primario con ley (izq) y estéril (der)

Anexo 8-12: Resumen de la interpolación de leyes de los casos base 1 y 2

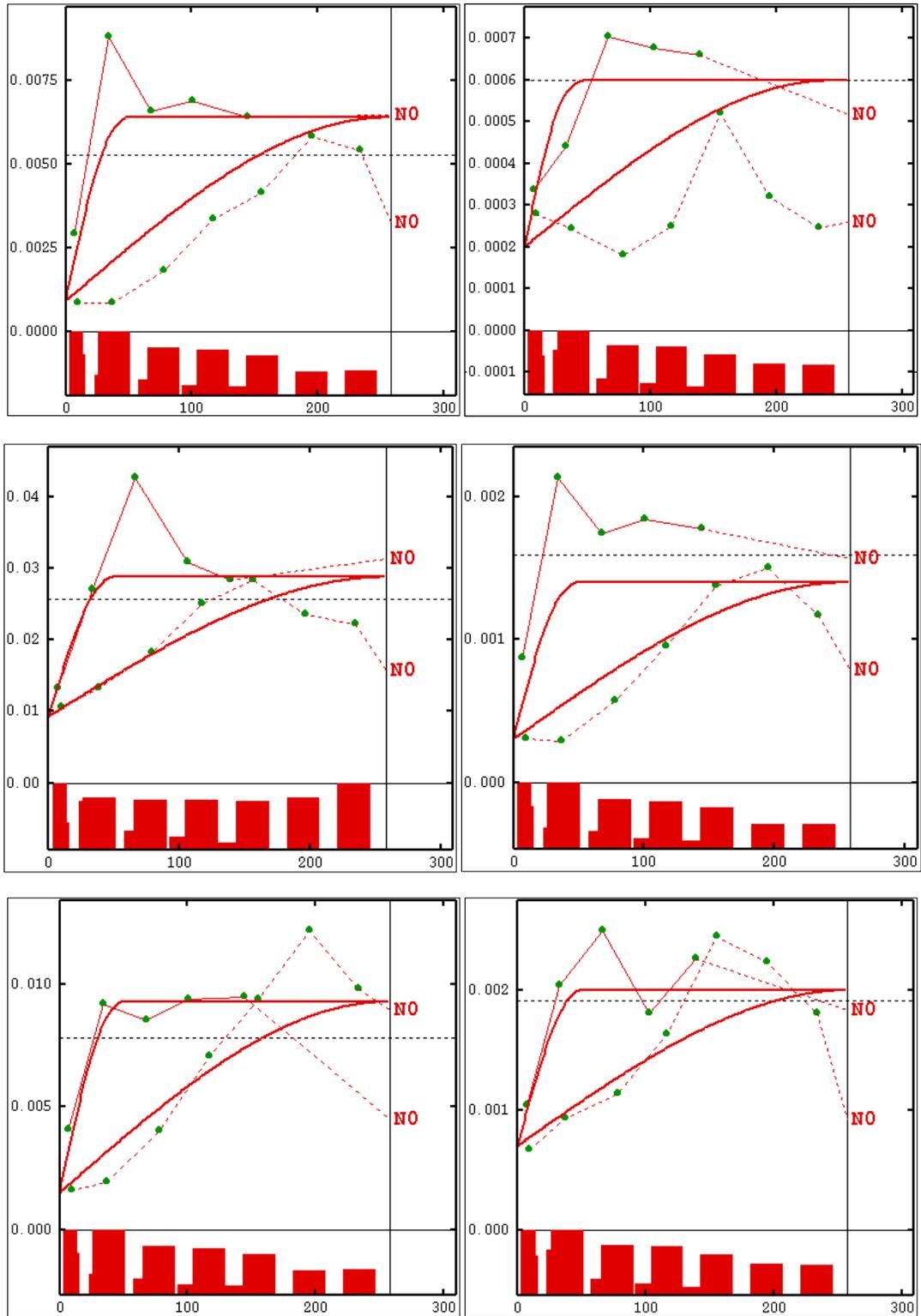
Especie Mineral	Dominio de Estimación	Pasada No 1		Pasada No 2		Pasada No 3	
		Porcentaje Estimado (%)		Porcentaje Estimado (%)		Porcentaje Estimado (%)	
		InPit	OutPit	InPit	OutPit	InPit	OutPit
Cobre Total (CuT)	Sec. Fuerte	67.6	9.6	10.0	3.4	0.2	1.6
	Sec. Débil	44.0	48.3	4.2	2.7	0.6	0.1
	Prim con Ley	5.8	4.3	6.9	48.8	0.1	33.1
	Prim Estéril	0.1	6.4	0.1	23.2	0.0	42.4
Cobre Soluble (CuS)	Sec. Fuerte	72.1	10.3	5.4	3.4	0.3	0.8
	Sec. Débil	23.1	7.1	21.5	35.4	3.8	8.1
	Prim con Ley	11.8	13.6	1.0	39.0	0.0	34.0
	Prim Estéril	0.0	1.3	0.1	11.6	0.1	33.8
Cobre Cianurable (CuCN)	Sec. Fuerte	74.7	11.8	2.6	2.0	0.3	2.2
	Sec. Débil	23.5	18.0	22.2	27.9	3.0	5.2
	Prim con Ley	9.3	5.0	3.5	42.6	0.0	38.9
	Prim Estéril	0.0	0.7	0.1	12.5	0.1	38.1



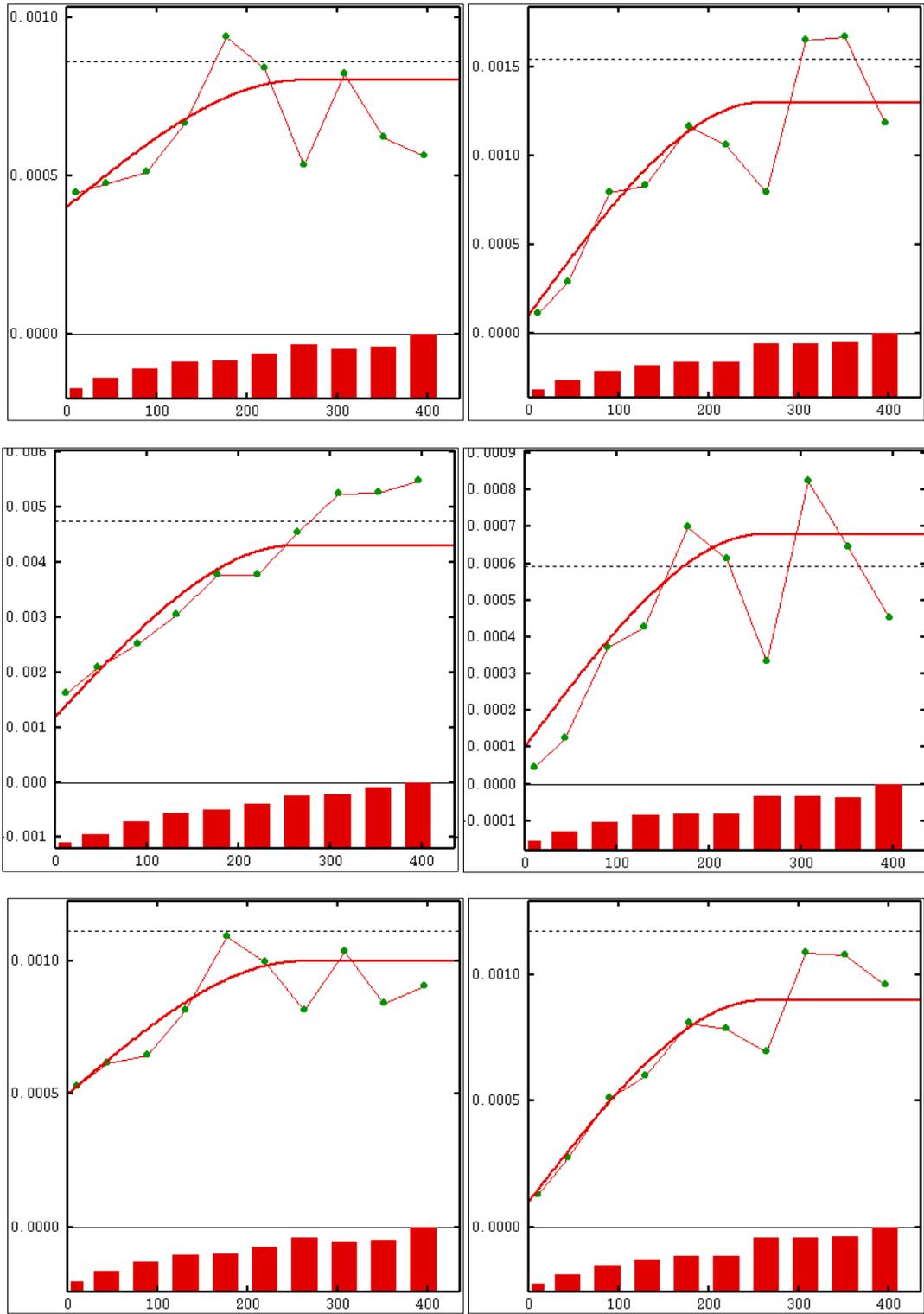
Anexo 8-13: Variogramas directos y cruzados modelados del dominio sulfuro secundario fuerte para el cobre total (sup-izq), el cobre soluble (sup-der), el cobre cianurable (med-izq), el cobre soluble/cobre cianurable (med-der), cobre total/cobre cianurable (inf-izq) y el cobre total/cobre soluble (inf-der)



Anexo 8-14: Variogramas directos y cruzados modelados del dominio sulfuro secundario débil para el cobre total (sup-izq), el cobre soluble (sup-der), el cobre cianurable (med-izq), el cobre soluble/cobre cianurable (med-der), cobre total/cobre cianurable (inf-izq) y el cobre total/cobre soluble (inf-der)



Anexo 8-15: Variogramas directos y cruzados modelados del dominio sulfuro primario con ley para el cobre total (sup-izq), el cobre soluble (sup-der), el cobre cianurable (med-izq), el cobre soluble/cobre cianurable (med-der), cobre total/cobre cianurable (inf-izq) y el cobre total/cobre soluble (inf-der)



Anexo 8-16: Variogramas directos y cruzados modelados del dominio sulfuro primario estéril para el cobre total (sup-izq), el cobre soluble (sup-der), el cobre cianurable (med-izq), el cobre soluble/cobre cianurable (med-der), cobre total/cobre cianurable (inf-izq) y el cobre total/cobre soluble (inf-der)

Anexo 8-17: Parámetros de estimación por cokriging en el sulfuro secundario débil

```

START OF PARAMETERS:
1 % type of cokriging: 0=gridded locations; 1=scattered locations
SSD.csv % if =1: file with coordinates of locations for cokriging
1 2 3 % columns for location coordinates
5.0 5.0 5.0 % if =0: x0, y0, z0
52 42 20 % nx, ny, nz
10.0 10.0 10.0 % dx, dy, dz
2 2 2 % block discretization (1 1 1 for point-support cokriging)
comp_ssd.csv % file with conditioning data
1 2 3 % columns for coordinates
4 5 6 % columns for data values
0 1e21 % trimming limits for data values
2 % number of constraints on the mean values of the form sum{a_ki*m_i} = b_k
0.133 -1 0 0 % 1st constraint: coefficients a_ki and b_k for k=1
0.394 0 -1 0 % 2nd constraint: coefficients a_ki and b_k for k=1
2 % number of nested structures
1 60 100 100 130 10 10 1 % 1st structure: it a1 a2 a3 angl ang2 ang3 b
0.0051 0.0 0.005 0.0 0.0001 0.0 0.005 0.0 0.005 % variance-covariance matrix
1 200 80 80 130 10 10 1 % 2nd structure: it a1 a2 a3 angl ang2 ang3 b
0.06 0.008 0.034 0.008 0.0022 0.008 0.0340 0.008 0.03 % variance-covariance matrix
0.0039 0.0013 0.0028 0.0013 0.0005 0.001 0.0028 0.001 0.0022 % nugget effect variance-covariance matrix
0 0 0 0 % filter out mean, nugget and/or other nested structures? 1=yes, 0=no
1 % cross-validation? 1=yes, 0=no
100 50 50 % maximum search radii in the rotated system
130 10 10 % angles for search ellipsoid
1 % divide into octants? 1=yes, 0=no
4 % optimal number of data per octant (if octant=1) or in total (if 0)
ssd_woodV2_cv.out % name of output file
3 % number of decimals for values in the output file
1 % create a header in the output file? 1=yes, 0=no

```

Anexo 8-18: Parámetros de estimación por cokriging en el sulfuro primario con ley

```

START OF PARAMETERS:
1 % type of cokriging: 0=gridded locations; 1=scattered locations
SPL.csv % if =1: file with coordinates of locations for cokriging
1 2 3 % columns for location coordinates
5.0 5.0 5.0 % if =0: x0, y0, z0
52 42 20 % nx, ny, nz
10.0 10.0 10.0 % dx, dy, dz
2 2 2 % block discretization (1 1 1 for point-support cokriging)
comp_spl.csv % file with conditioning data
1 2 3 % columns for coordinates
4 5 6 % columns for data values
0 1e21 % trimming limits for data values
2 % number of constraints on the mean values of the form sum{a_ki*m_i} = b_k
0.053 -1 0 0 % 1st constraint: coefficients a_ki and b_k for k=1
0.160 0 -1 0 % 2nd constraint: coefficients a_ki and b_k for k=1
2 % number of nested structures
1 35 35 230 0 10 0 1 % 1st structure: it a1 a2 a3 angl ang2 ang3 b
0.0015 0.0 0.001 0.0 0.0002 0.0002 0.001 0.0002 0.0010 % variance-covariance matrix
1 50 50 260 0 10 0 1 % 2nd structure: it a1 a2 a3 angl ang2 ang3 b
0.0180 0.0013 0.0068 0.0013 0.0002 0.0009 0.0068 0.0009 0.0045 % variance-covariance matrix
0.0093 0.0007 0.0015 0.0007 0.0002 0.0003 0.0015 0.0003 0.0009 % nugget effect variance-covariance matrix
0 0 0 0 % filter out mean, nugget and/or other nested structures? 1=yes, 0=no
0 % cross-validation? 1=yes, 0=no
25 25 130 % maximum search radii in the rotated system
0 10 0 % angles for search ellipsoid
1 % divide into octants? 1=yes, 0=no
4 % optimal number of data per octant (if octant=1) or in total (if 0)
spl_woodV2.out % name of output file
3 % number of decimals for values in the output file
1 % create a header in the output file? 1=yes, 0=no

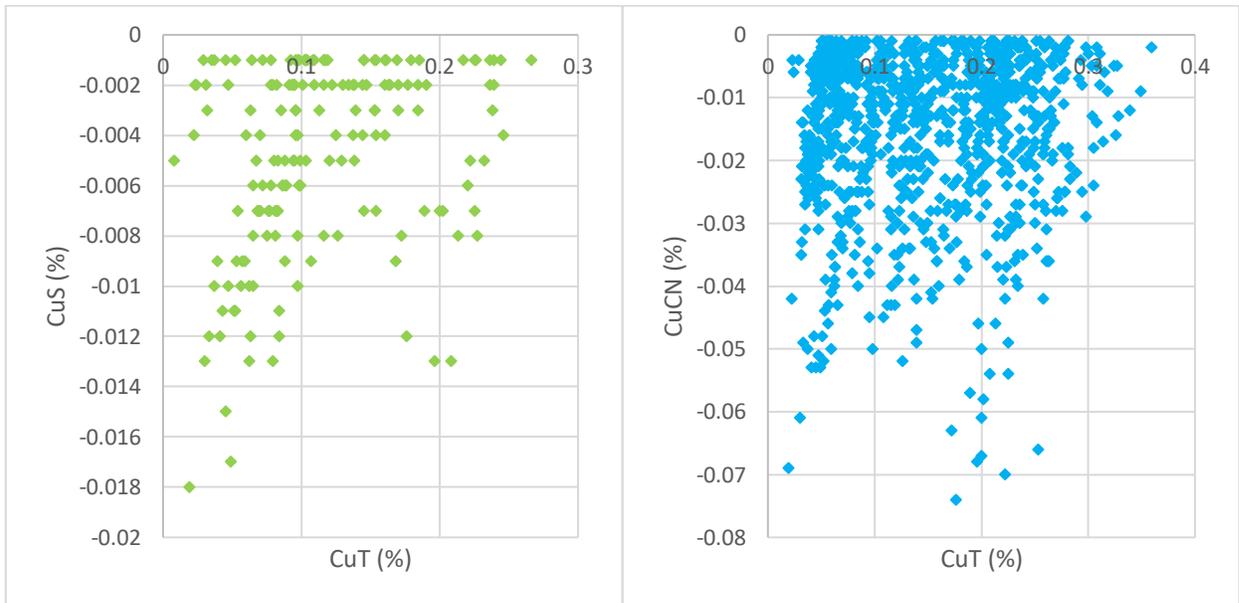
```

Anexo 8-19: Parámetros de estimación por cokriging en el sulfuro primario estéril

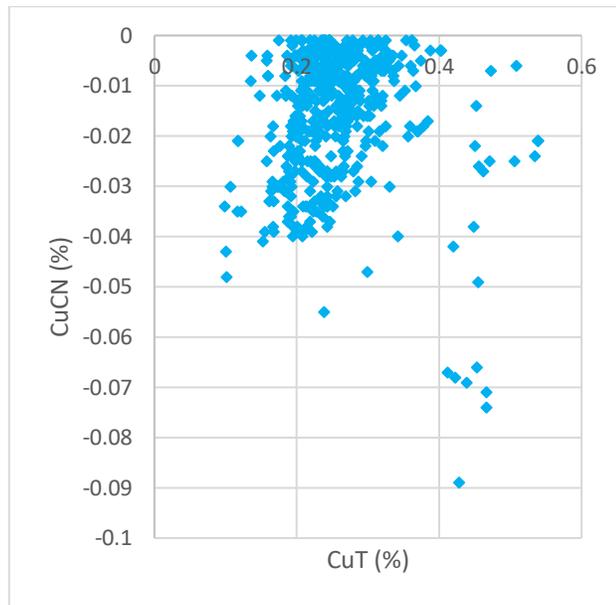
```

START OF PARAMETERS:
1                                     % type of cokriging: 0=gridded locations; 1=scattered locations
spe_blocks.csv                       % if =1: file with coordinates of locations for cokriging
1 2 3                                 % columns for location coordinates
5.0 5.0 5.0                          % if =0: x0, y0, z0
52 42 20                             % nx, ny, nz
10.0 10.0 10.0                       % dx, dy, dz
2 2 2                                 % block discretization (1 1 1 for point-support cokriging)
comp_spe.csv                          % file with conditioning data
1 2 3                                 % columns for coordinates
4 5 6                                 % columns for data values
0          1e21                       % trimming limits for data values
2                                     % number of constraints on the mean values of the form sum{a_ki*m_i} = b_k
0.176 -1 0 0                         % 1st constraint: coefficients a_ki and b_k for k=1
0.181 0 -1 0                         % 2nd constraint: coefficients a_ki and b_k for k=1
1                                     % number of nested structures
1 260 260 260 0 0 0 1               % 1st structure: it a1 a2 a3 angl ang2 ang3 b
0.0031 0.0008 0.0005 0.0008 0.0012 0.0006 0.0005 0.0006 0.0004           % variance-covariance matrix
0.0012 0.0001 0.0005 0.0001 0.0001 0.0001 0.0005 0.0001 0.0004           % nugget effect variance-covariance matrix
0 0 0 0                               % filter out mean, nugget and/or other nested structures? 1=yes, 0=no
0                                     % cross-validation? 1=yes, 0=no
130 130 130                          % maximum search radii in the rotated system
0 0 0                                  % angles for search ellipsoid
1                                     % divide into octants? 1=yes, 0=no
4                                     % optimal number of data per octant (if octant=1) or in total (if 0)
spe_woodV1.out                        % name of output file
3                                     % number of decimals for values in the output file
1                                     % create a header in the output file? 1=yes, 0=no

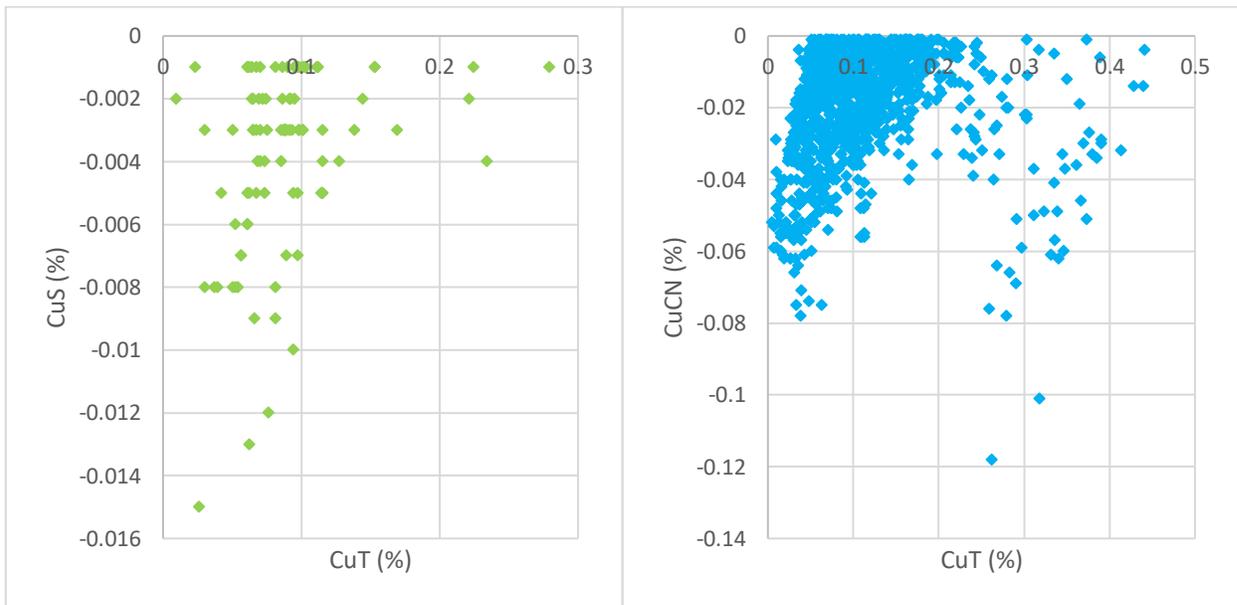
```



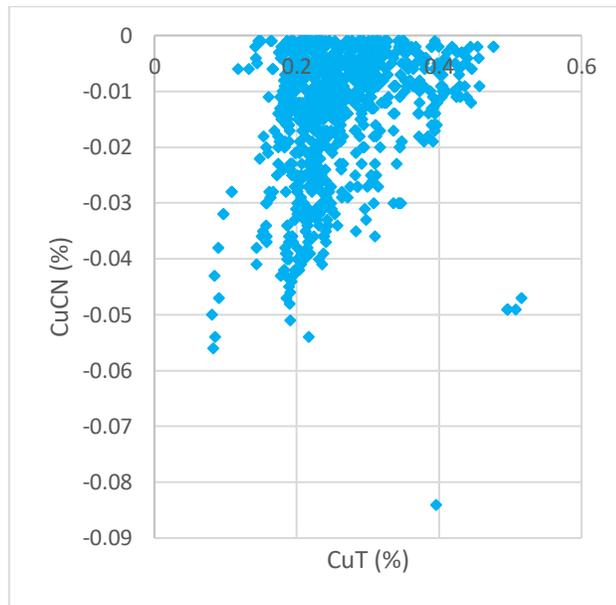
Anexo 8-20: Relación entre el CuT y las leyes negativas de CuS en el secundario fuerte del caso propuesto 1



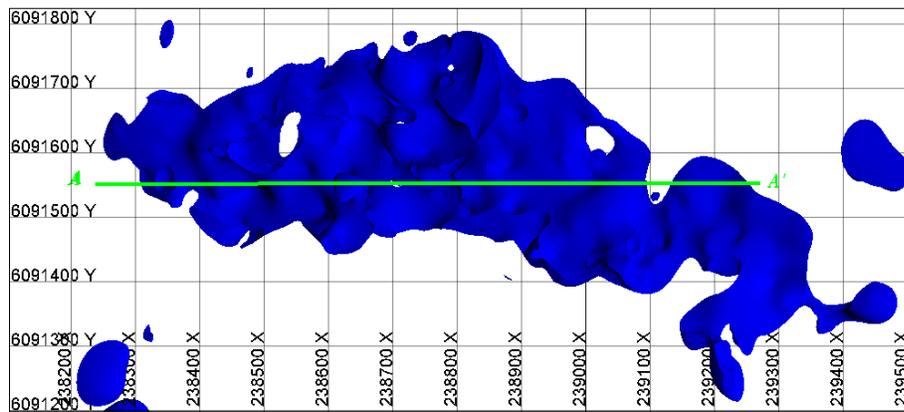
Anexo 8-21: Relación entre el CuT y las leyes negativas de CuS en el primario con ley del caso propuesto 1



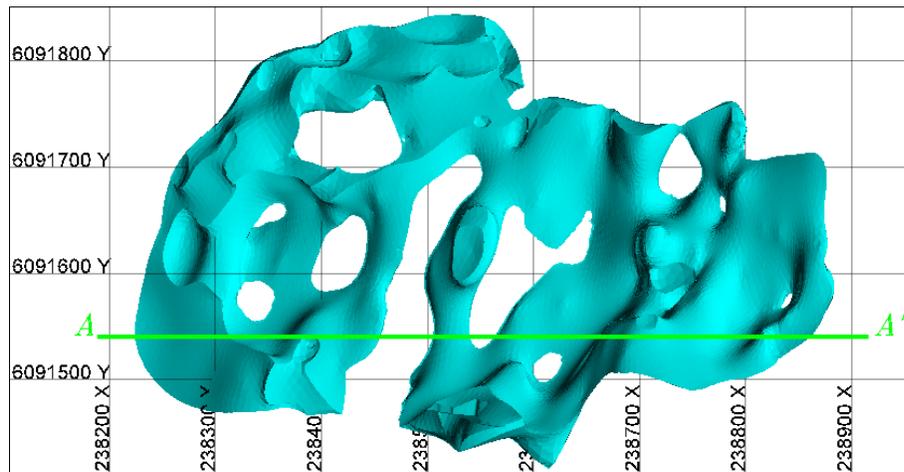
Anexo 8-22: Relación entre el CuT y las leyes negativas de CuS en el secundario fuerte del caso propuesto 2



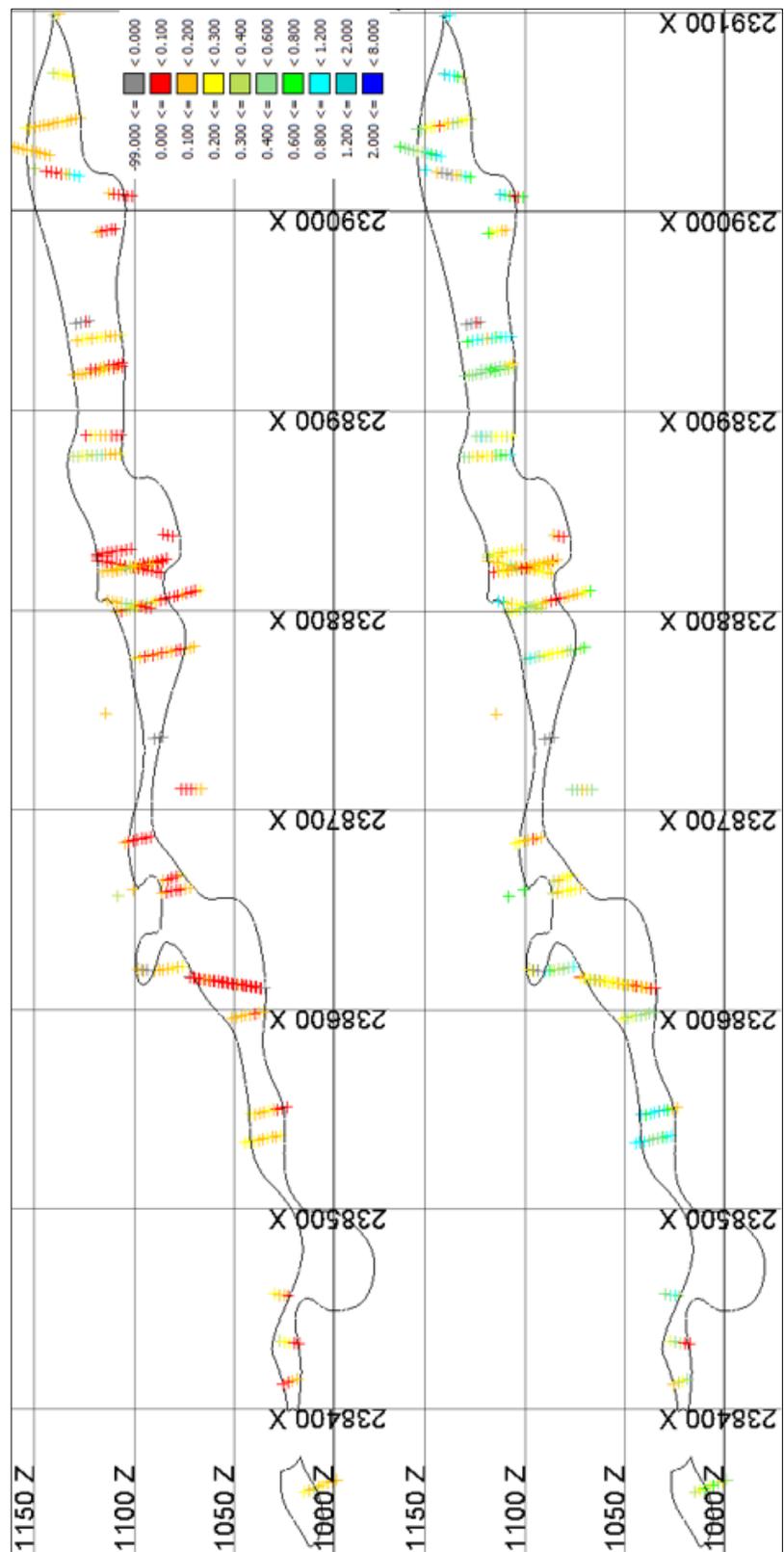
Anexo 8-23: Relación entre el CuT y las leyes negativas de CuS en el primario con ley del caso propuesto 2



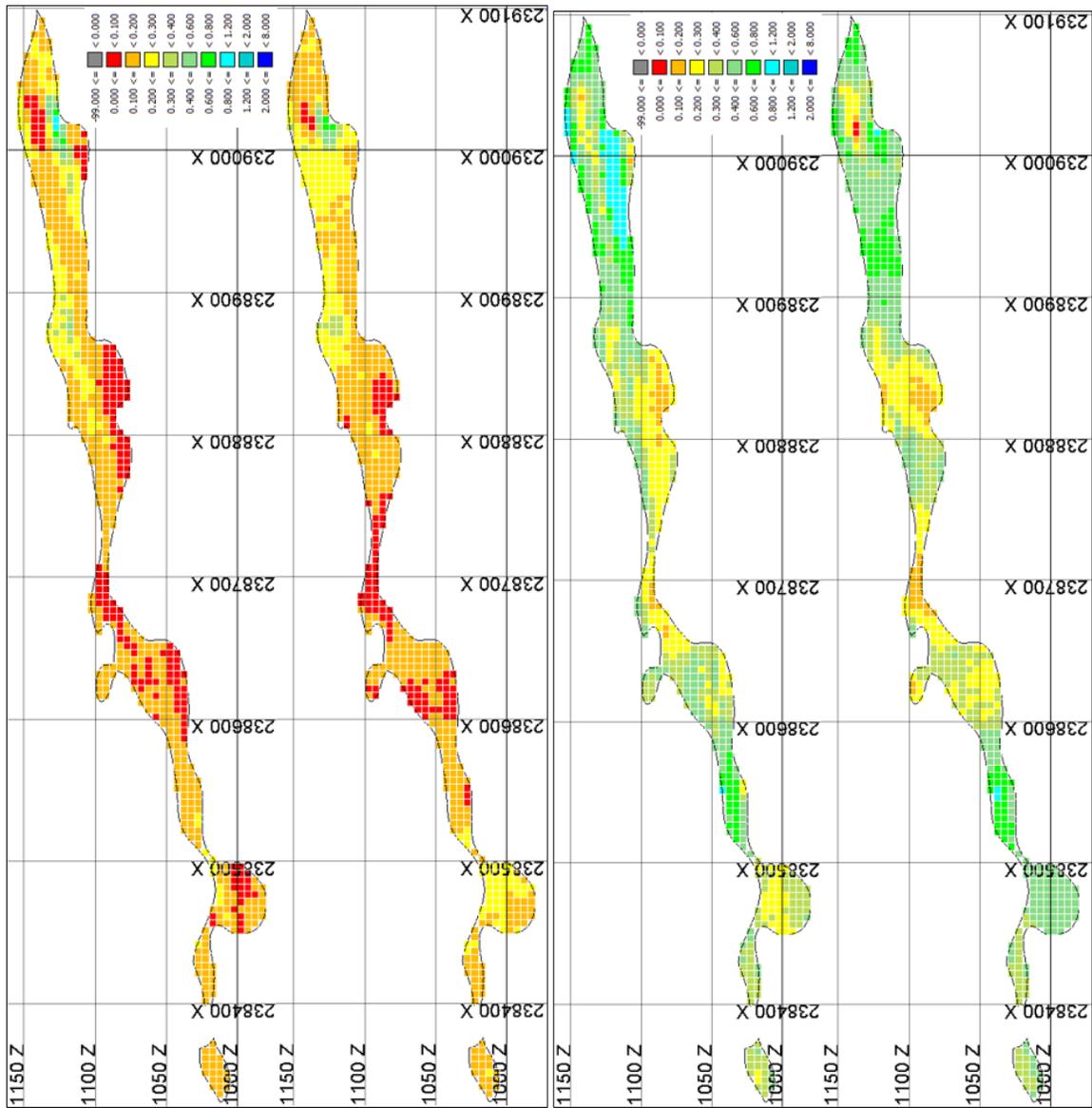
Anexo 8-24: Dominio secundario fuerte mostrando la línea de corte A-A'



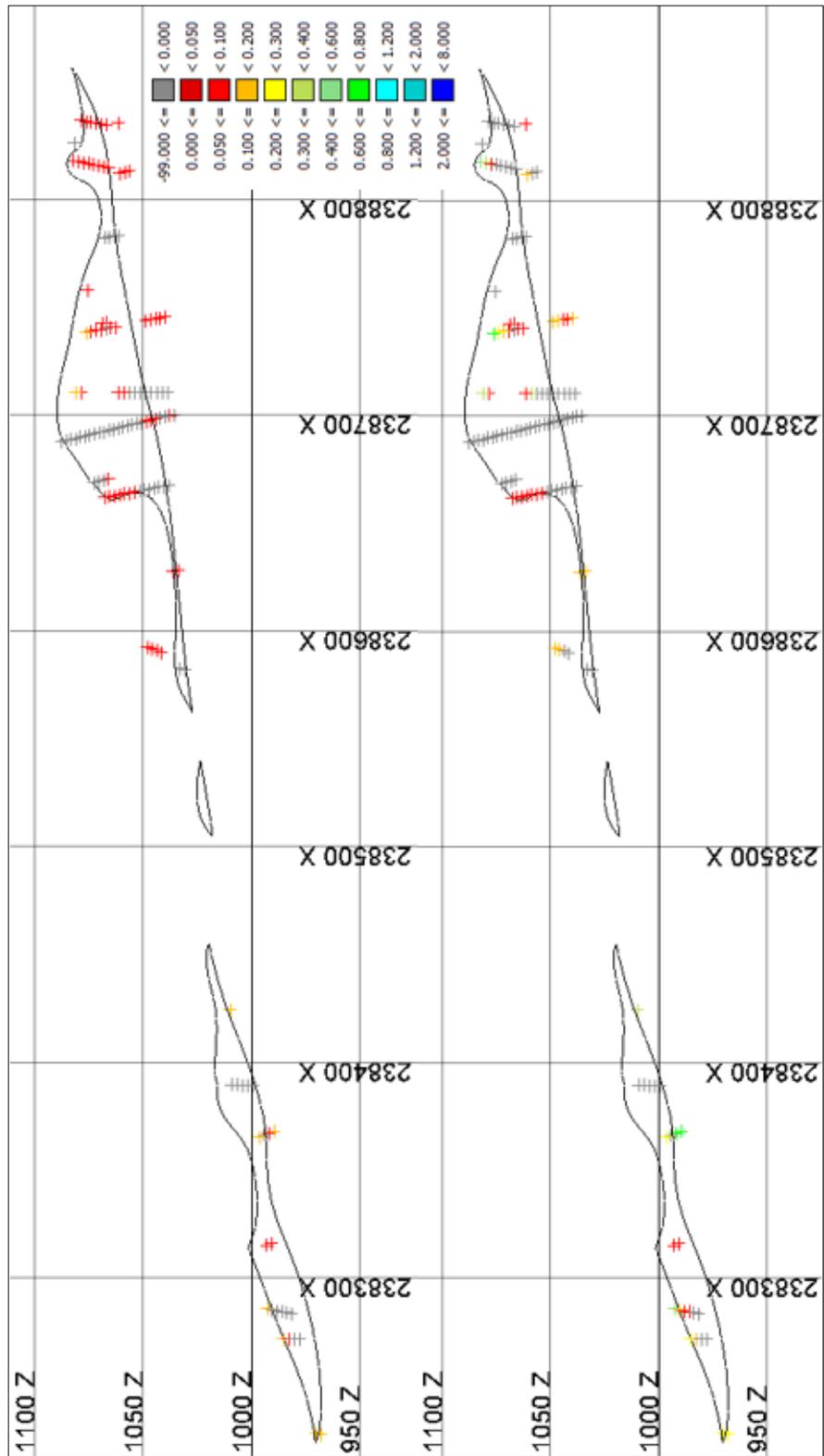
Anexo 8-25: Dominio secundario débil mostrando la línea de corte A-A'



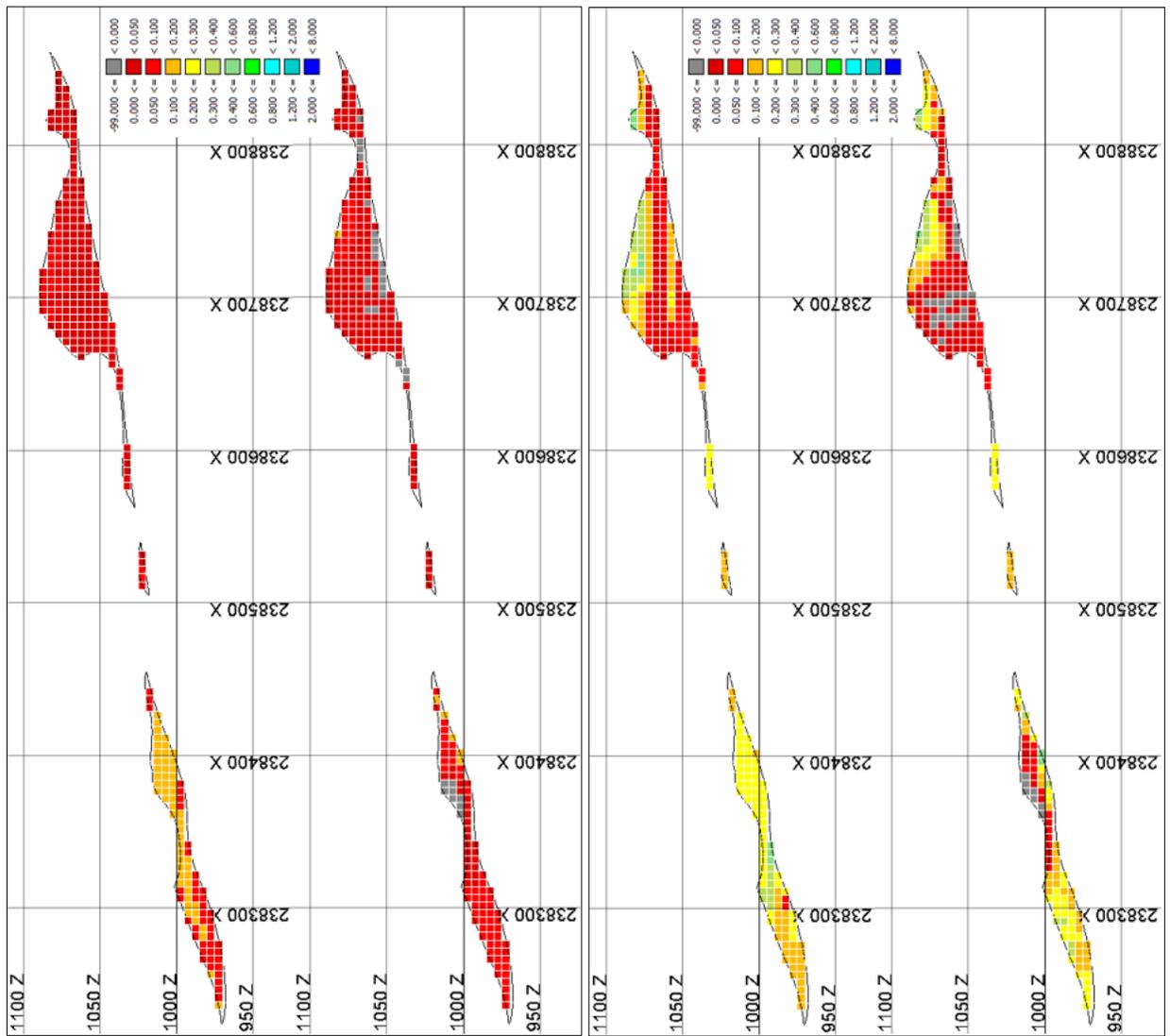
Anexo 8-26: Corte A-A' en el dominio secundario fuerte mostrando las leyes de cobre soluble (sup) y cobre cianurable (inf) de las muestras de la base de datos B



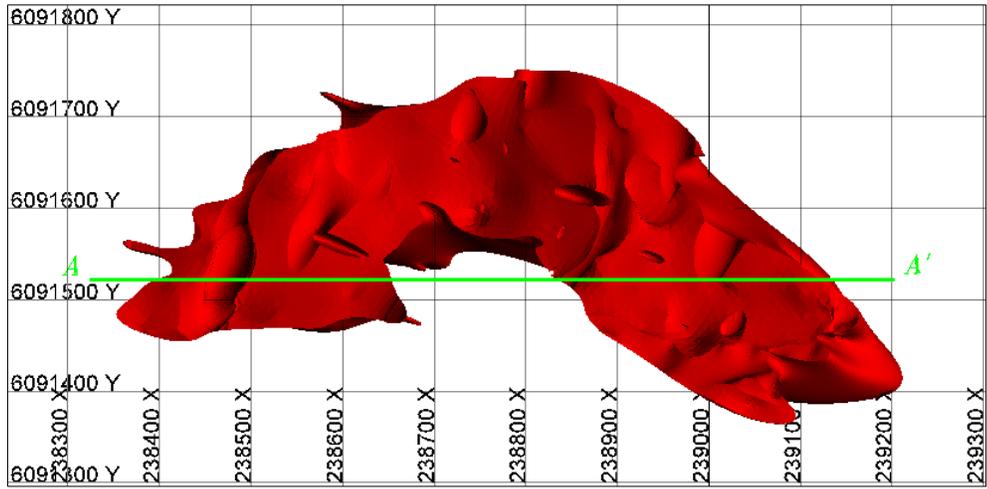
Anexo 8-27: Corte A-A' en el secundario fuerte mostrando las leyes de bloque del cobre soluble [izq] en el caso base 2 (sup) y propuesto 2 (inf) y del cobre cianurable [der] en el caso base 2 (sup) y propuesto 2 (inf)



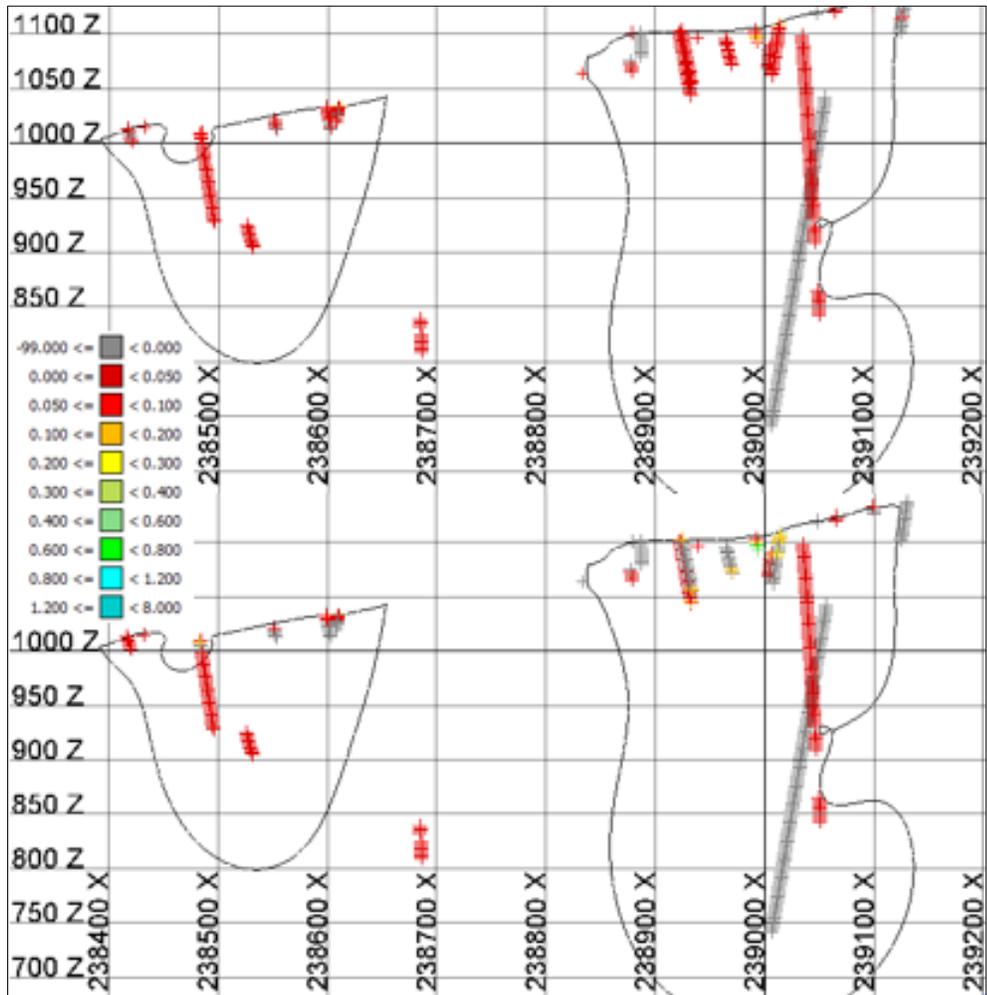
Anexo 8-28: Corte A-A' en el dominio secundario debil mostrando las leyes de cobre soluble (sup) y cobre cianurable (inf) de las muestras de la base de datos B



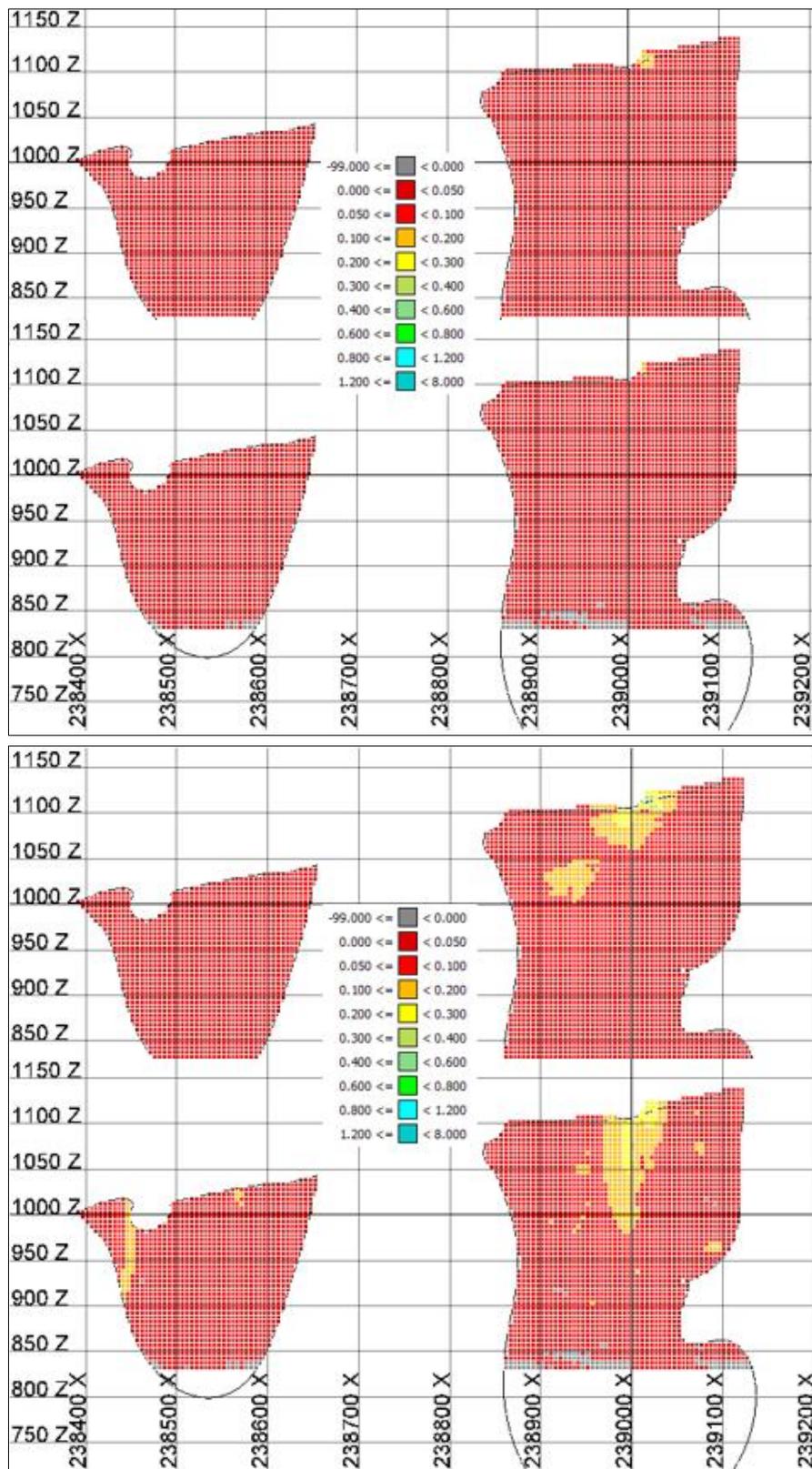
Anexo 8-29: Corte A-A' en el secundario débil mostrando las leyes de bloque del cobre soluble [izq] en el caso base 2 (sup) y propuesto 2 (inf) y del cobre cianurable [der] en el caso base 2 (sup) y propuesto 2 (inf)



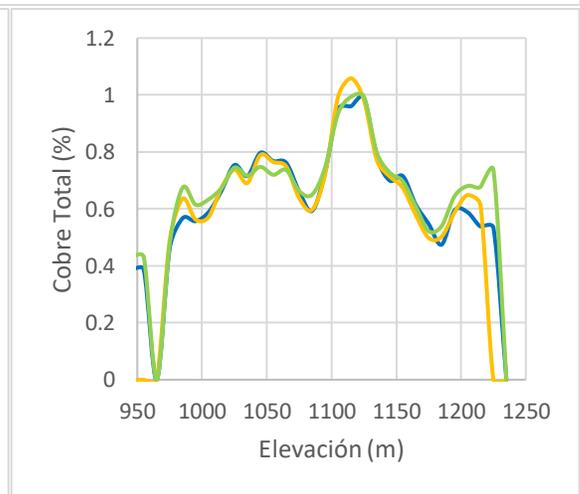
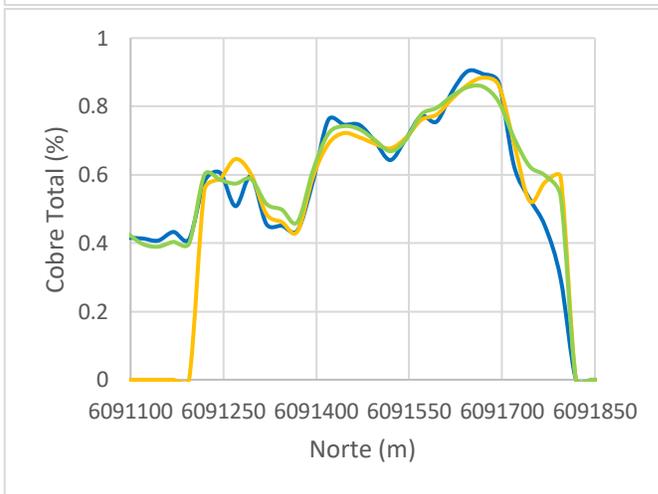
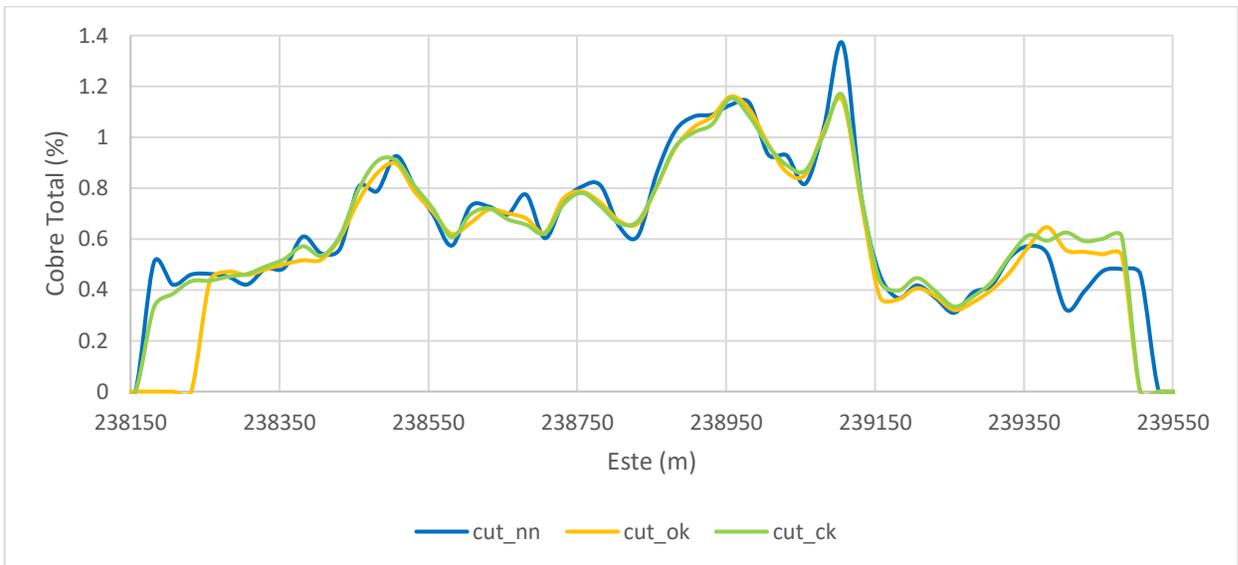
Anexo 8-30: Dominio primario con ley mostrando la línea de corte A-A'



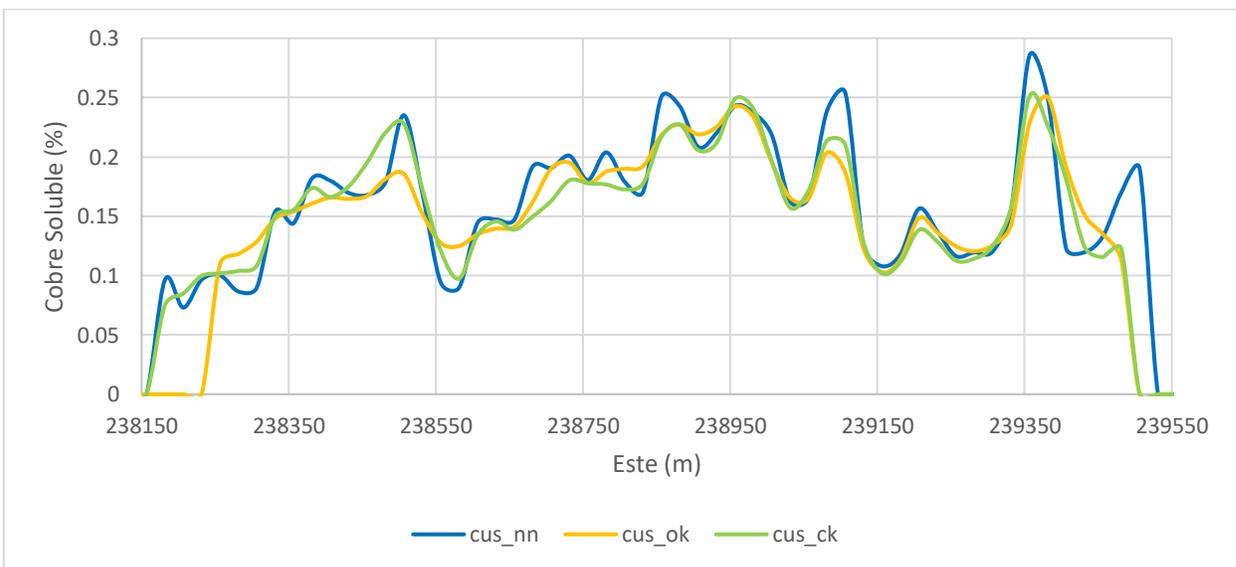
Anexo 8-31: Corte A-A' en el dominio primario con ley mostrando las leyes de cobre soluble (sup) y cobre cianurable (inf) de las muestras de la base de datos B

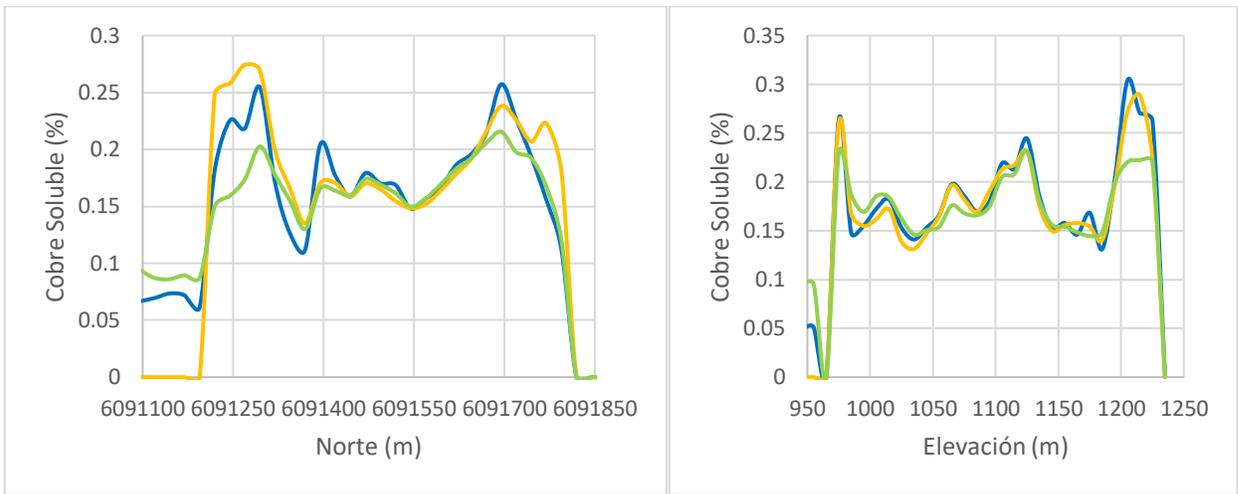


Anexo 8-32: Corte A-A' en el primario con ley mostrando las leyes de bloque del cobre soluble [izq] en el caso base 2 (sup) y propuesto 2 (inf) y del cobre cianurable [der] en el caso base 2 (sup) y propuesto 2 (inf)

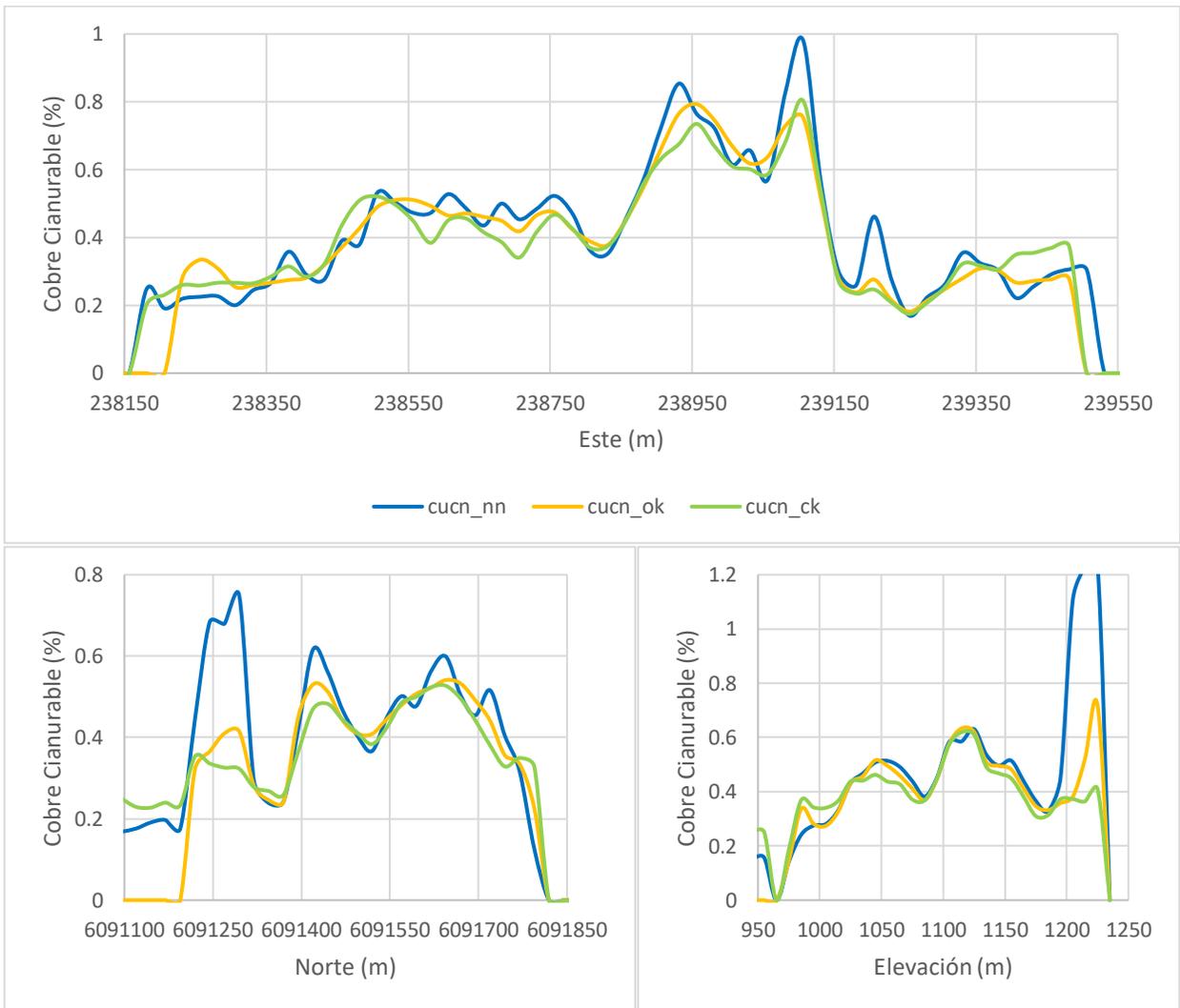


Anexo 8-33: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuT en el secundario fuerte con los datos B

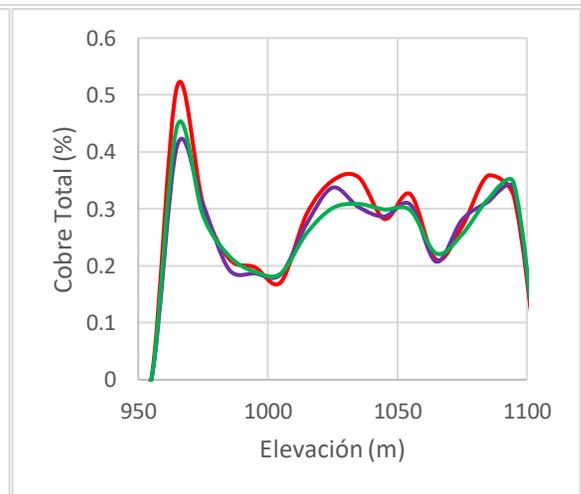
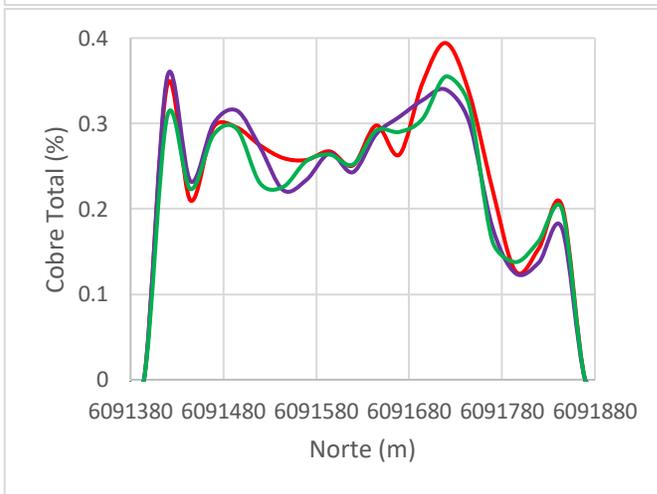
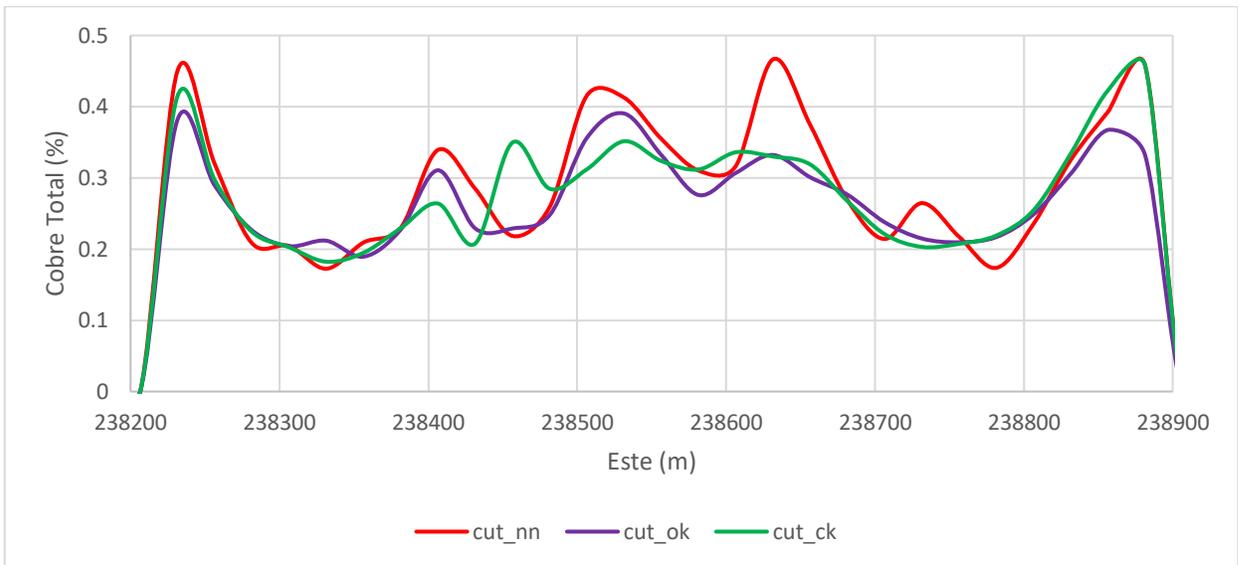




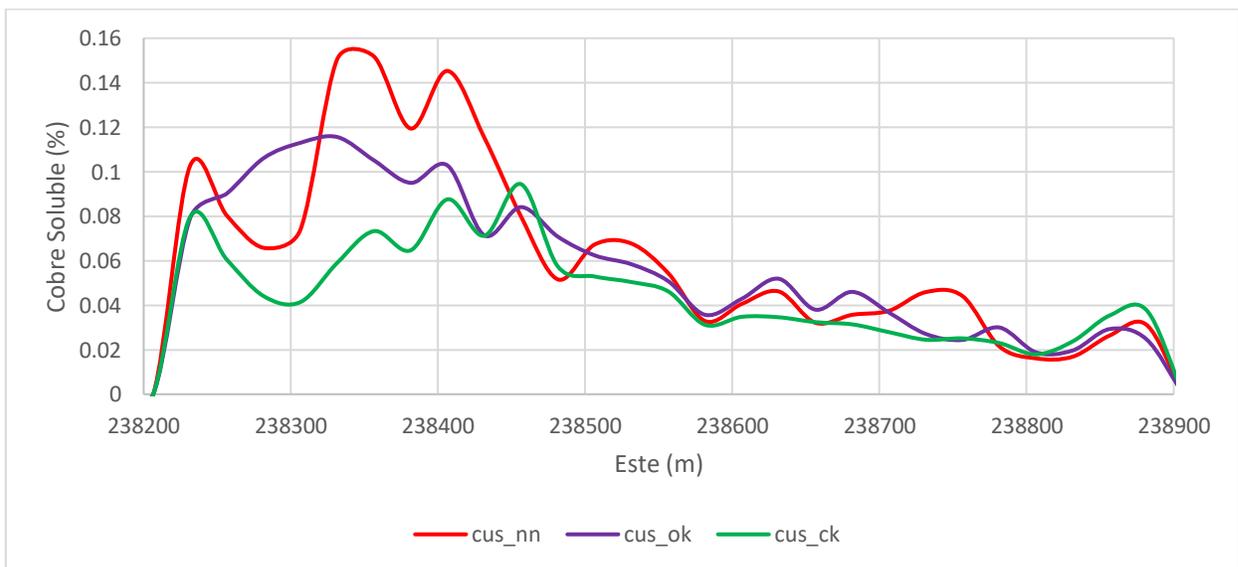
Anexo 8-34: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuS en el secundario fuerte con los datos B

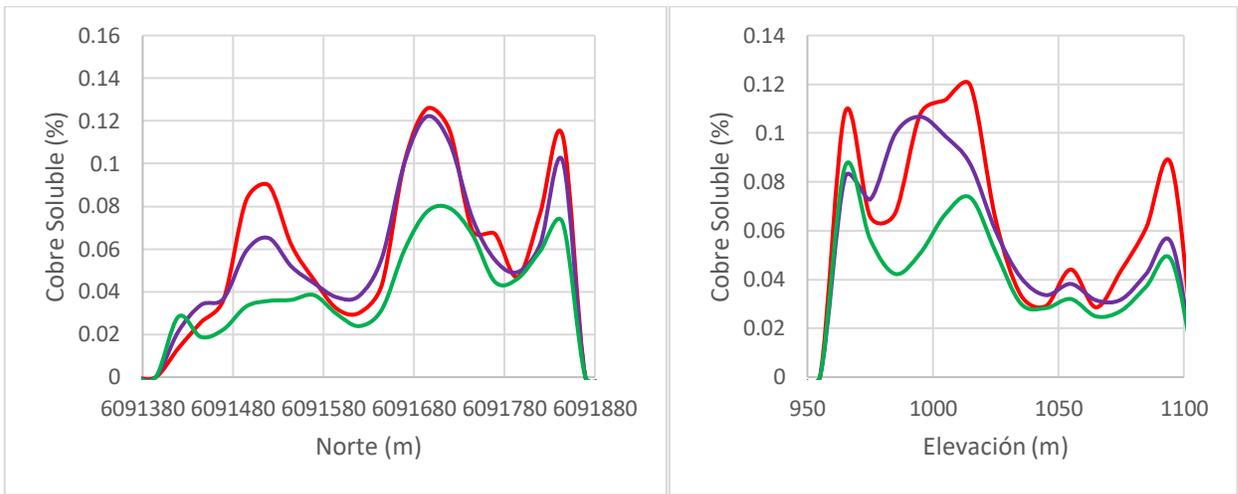


Anexo 8-35: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuCN en el secundario fuerte con los datos B

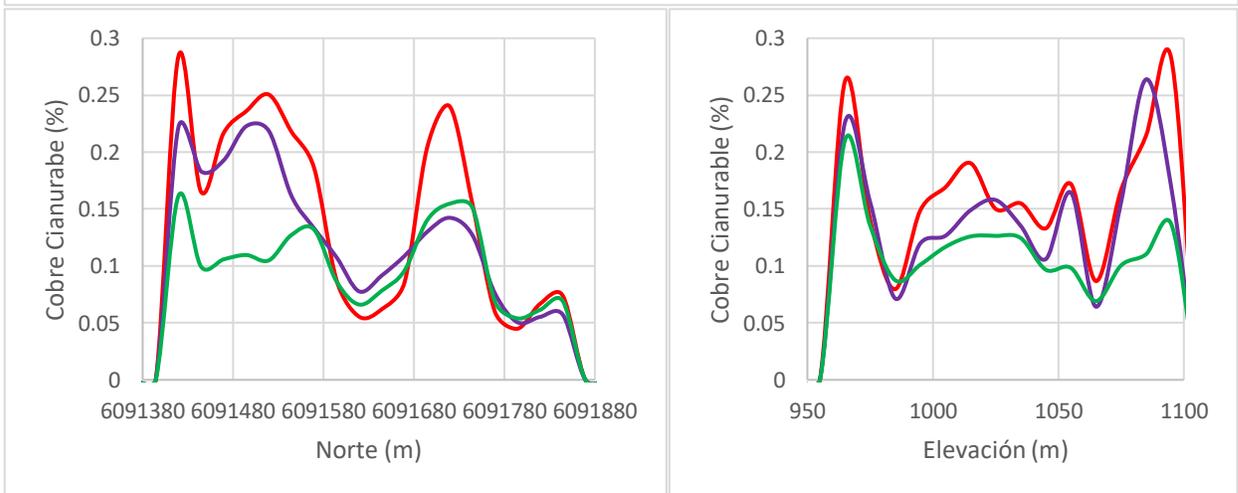
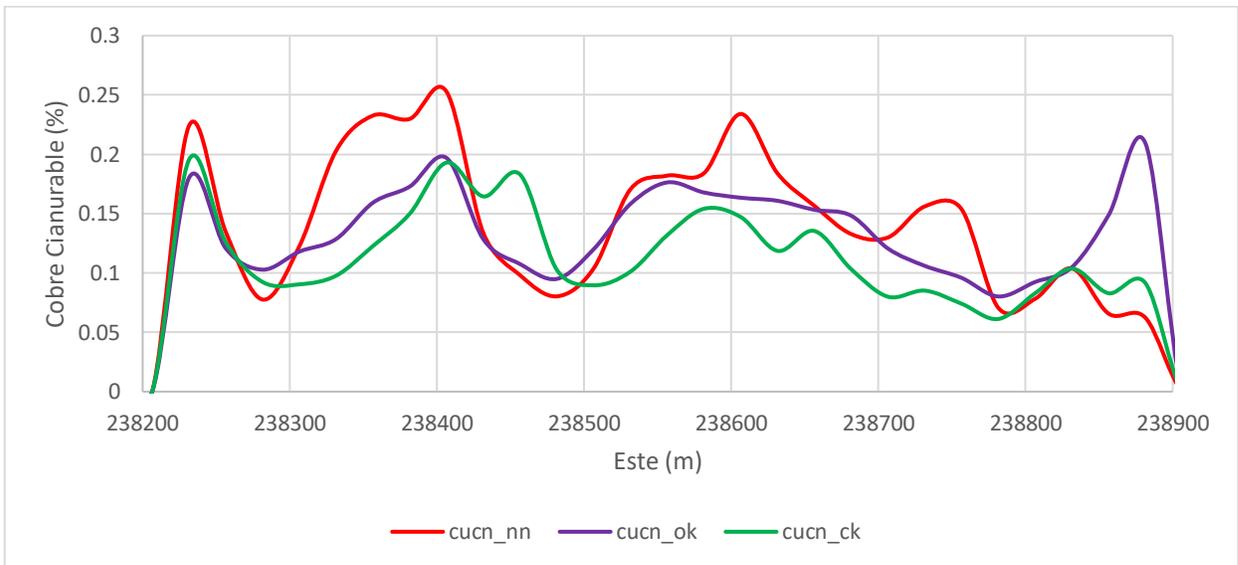


Anexo 8-36: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuT en el secundario débil con los datos B

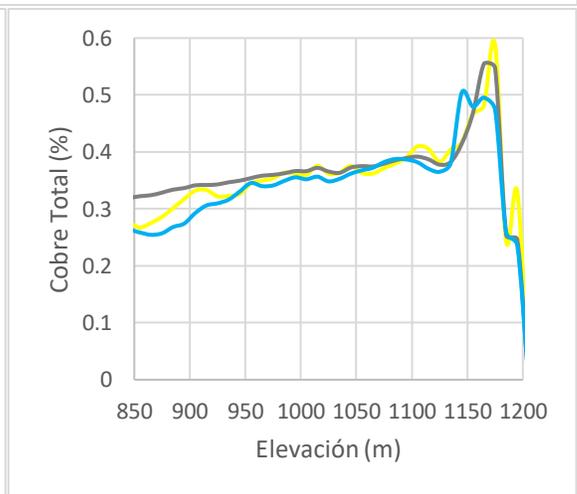
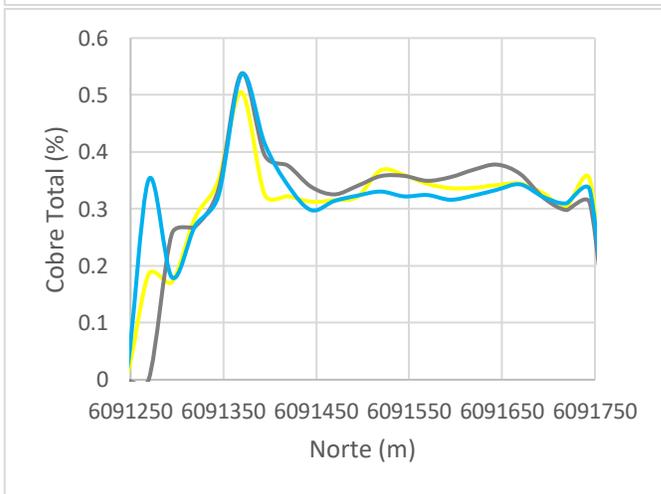
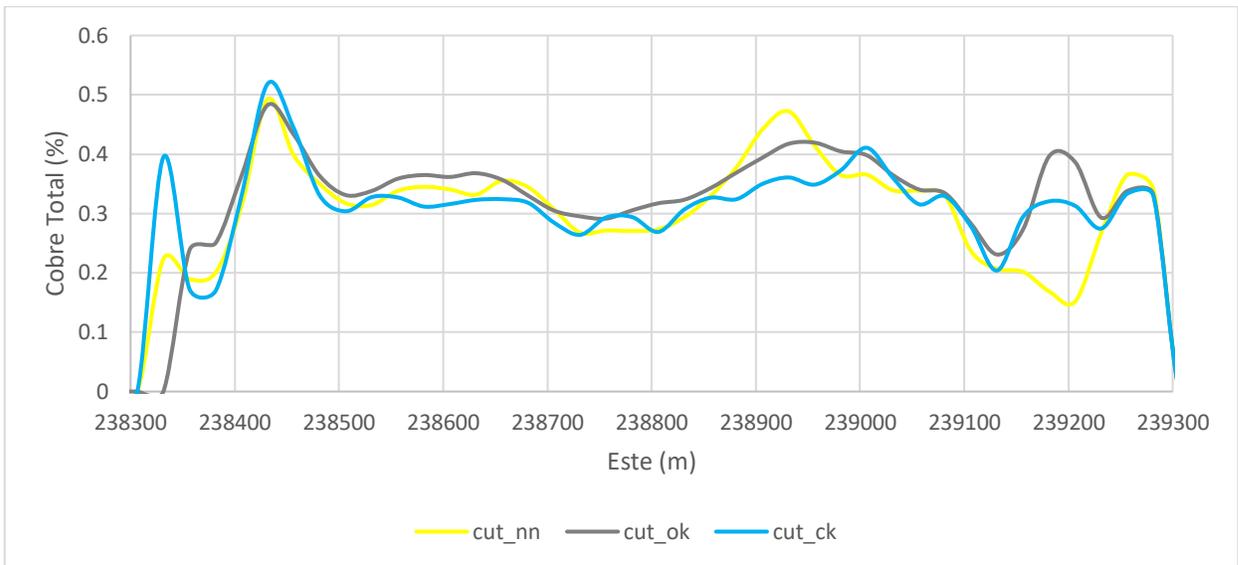




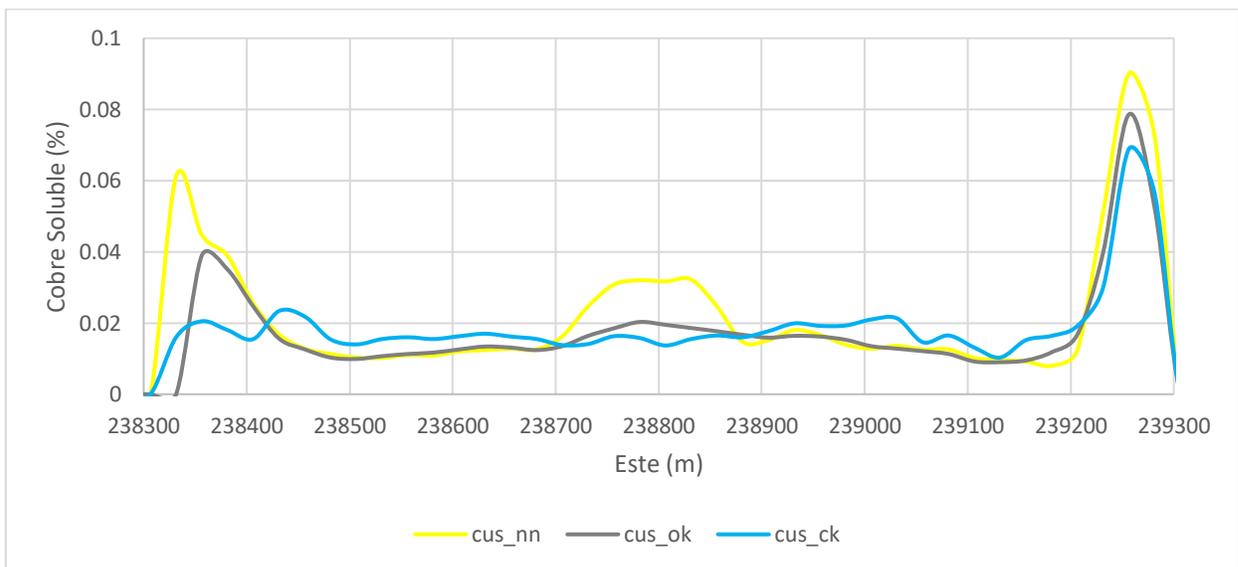
Anexo 8-37: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuS en el secundario débil con los datos B

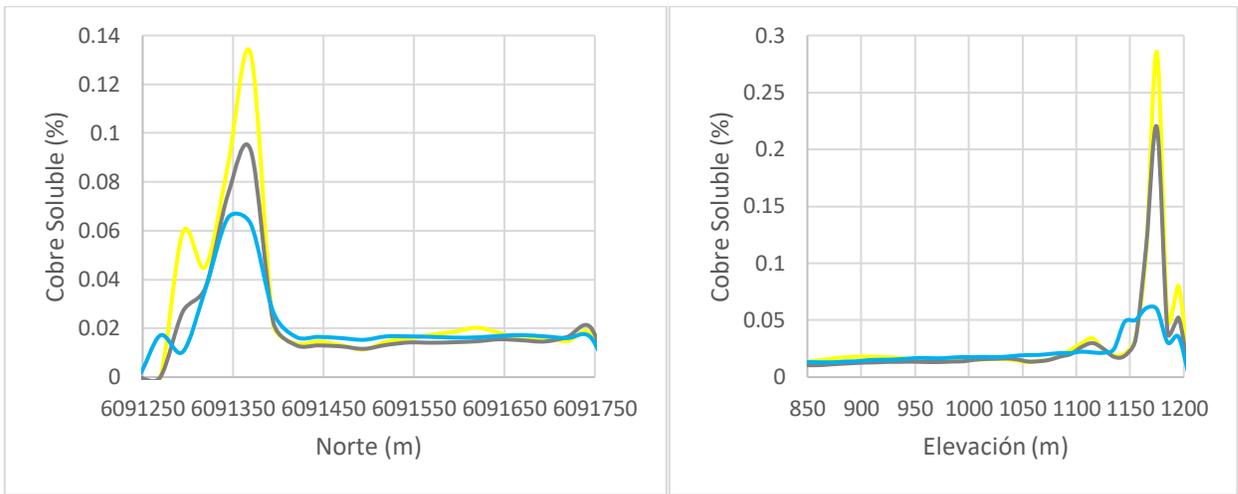


Anexo 8-38: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuCN en el secundario débil con los datos B

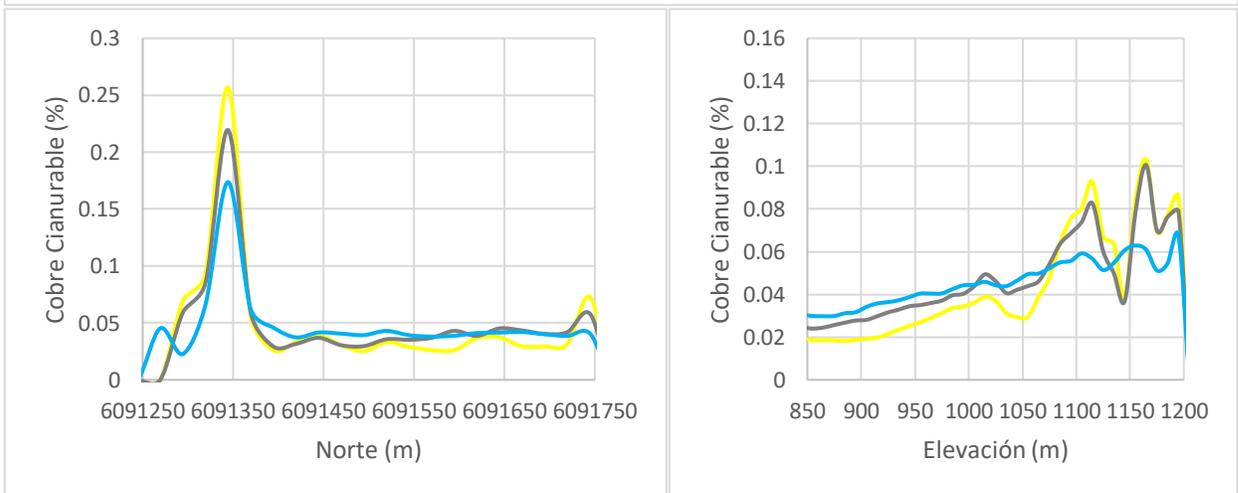
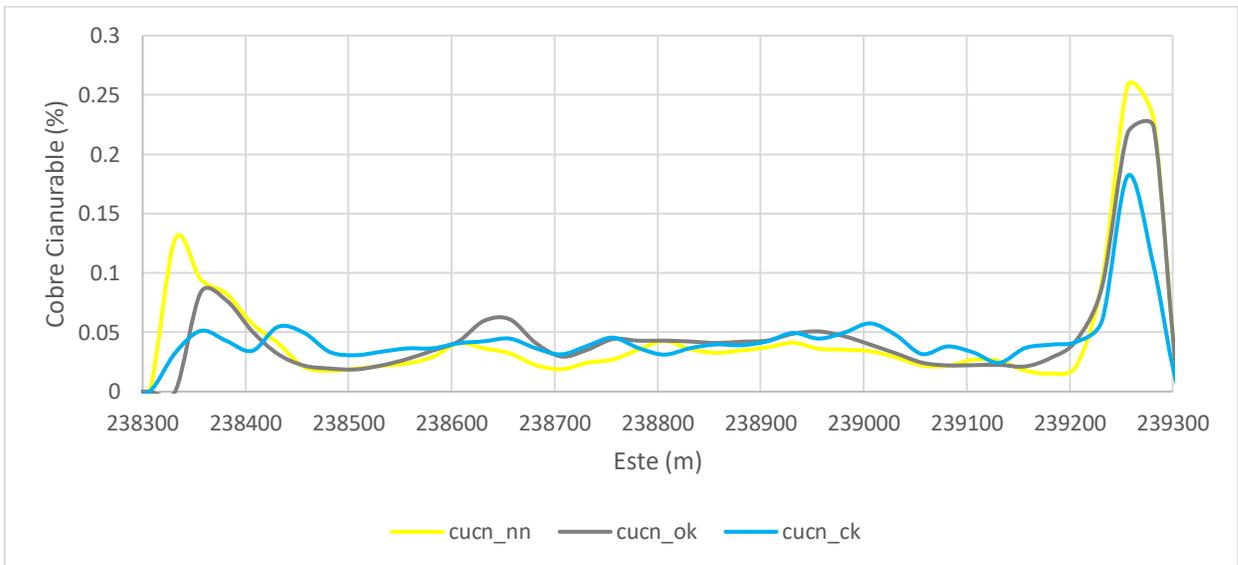


Anexo 8-39: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuT en el primario con ley con los datos B





Anexo 8-40: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuS en el primario con ley con los datos B



Anexo 8-41: Deriva este (sup), norte (inf-izq) y en elevación (inf-der) del CuCN en el primario con ley con los datos B