



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MODELO ESPACIAL DE LEY DE CU  
DE CONCENTRADO DE FLOTACIÓN ROUGHER

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

BRAULIO EDUARDO OSSES GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:  
JULIÁN ORTIZ CABRERA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
WILLY KRACHT GAJARDO  
EDUARDO MAGRI VARELA

SANTIAGO DE CHILE  
2014

## RESUMEN

En general, la secuencia de extracción de un yacimiento de Cu se define a partir de un modelo de bloques de ley de Cu in situ, sin embargo esto no significa que aquella secuencia se traduzca en el mejor resultado para el negocio, ya que muchas veces los materiales con mayores rendimientos en planta difieren de aquellos que poseen las mayores leyes de Cu in situ. Por lo tanto, en vez de estimar la ley de Cu in situ, es más conveniente estimar la ley de Cu de concentrado *rougher* resultante de los procesos desarrollados en la planta de flotación, y posteriormente realizar el secuenciamiento correspondiente.

Con tal propósito, en la presente memoria se espera construir un modelo de bloques de ley de Cu de concentrado *rougher* a partir de ensayos de flotación a escala de laboratorio para el yacimiento de Escondida Norte, para lo que se proponen dos metodologías. La primera de ellas, aplicable sólo a variables aditivas, plantea el uso de cosimulaciones de la ley de Cu *rougher* (variable no aditiva) en conjunto con otras variables correlacionadas, a las que se les llama variables explicativas. Mientras que el otro procedimiento, independiente de la aditividad de la variable, consiste en modelar una función multivariable de la ley de Cu *rougher* a partir de las variables explicativas, con la cual se calcula un modelo de ley de Cu *rougher* evaluando en ella el resultado de las cosimulaciones de la primera metodología para las variables explicativas.

La función multivariable se define mediante un enfoque no paramétrico llamado *kernel smoothing*. Mediante una validación por *jack-knife* llevada a cabo entre los datos estimados y los datos reales, se constata la obtención de buenos coeficientes de correlación y  $R^2$ , de 0.86 y 0.75 respectivamente. Sin embargo, el error porcentual de la media no es despreciable, ya que es cercano al 10%.

A continuación, se construyen modelos de bloque a escala puntual con ambas metodologías, de tal manera que la aditividad de las variables no se vea involucrada en el proceso, estos son los modelos M1 y M2. De esta forma los resultados son favorables para el modelo M1 calculado cosimulando la ley de Cu *rougher*, mientras que para el modelo M2 calculado con la función de varias variables, el resultado es menos satisfactorio, pero sigue dentro de los rangos aceptables.

Finalmente, se obtienen modelos a escala de bloque con las dos metodologías, estos son los modelos M3 y M4. Para la primera metodología se obtiene el modelo M3, para el que desciende la representatividad de la realidad comparada con el modelo M1, no obstante sigue siendo un modelo aceptable, obteniéndose coeficientes de correlación de 0.58 en el *jack-knife* realizado y una reproducción de la incertidumbre local levemente subestimada. Al contrario, para el modelo M4 la desviación de la realidad deja de ser adecuada para un modelo de bloques de este tipo, ya que presenta una sobreestimación porcentual de la media cercana al 30% y la incertidumbre local es excesivamente subestimada. Lo anterior se atribuye a la función de varias variables definida, la cual sobreestima demasiado los valores de la ley de Cu *rougher*, además de no representar su dispersión de manera correcta.

## ABSTRACT

In general, the extraction sequence of a deposit is defined from an in situ copper grade block model, however this does not mean that sequence leads to the best results to the business, because there are cases where the materials high performance in plant are different that higher in situ copper grade. Therefore, instead of estimate the in situ copper grade, it's more suitable estimating the concentrate rougher copper grade resulting of the process developed on the flotation plant and then do the appropriate sequencing.

For that purpose, in this work is expected to build a concentrate rougher copper grade block model from laboratory scale flotation assays, for which two methodologies are proposed. The first one, only applicable to additive variables, proposes to use co-simulations between concentrate copper grade (non-additive variable) and other correlated variables, called explanatory variables. While the other process that does not depend of the variable additivity, consists to model a multivariable function of concentrate copper grade, from to explanatory variables, with which a concentrate copper grade model is calculated by evaluating the first methodology results for the explanatory variables.

The multivariable function is defined by a non-parametric approach called kernel smoothing. Through jack-knife between the real and the estimate data are verified obtaining acceptable correlation coefficient and r-squared of 0.86 and 0.75 respectively. However, the mean percentage error is not negligible, because its value is about 10 %.

Then, block models are constructed at point scale with both methodologies, so the variables additivity is not involved in the process, these are models M1 and M2. Thus the results are favorable to the M1 model calculated by simulating the concentrate rougher copper grade, while for the M2 model calculated with multivariable function, the result is less satisfactory but still within acceptable ranges.

Finally, block scale models were built with both methodologies, these are models M3 and M4. For the first methodology the M3 model is obtained, whose reality representation decreases compared to the M1 model. Nevertheless it is still acceptable, because the correlation coefficient achieves a value equal to 0.63 in jack-knife process, while the uncertainty reproduction is slightly underestimated. Furthermore, the M4 model deviates too much from reality, by having a mean percentage overestimation of about 30% and the local uncertainty is excessively underestimated. This is attributed to the multivariable function defined, which overestimated values of concentrate rougher copper grade, besides not represent dispersion correctly.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre, a mi hermana, a mi padre y a mis hermanos, por todos los valores que me entregaron desde pequeño, los cuales han ayudado hasta ahora a mi formación como persona y profesional. Además, agradecerles por el apoyo incondicional que me han dado en cada uno de los proyectos que he emprendido en mi vida.

A mis sobrinos, por permitirme ser su ejemplo a seguir en lo académico y por motivarme a ser cada día mejor persona.

A Anita, por todos los momentos maravillosos que hemos vivido juntos y por ser la mejor compañera todo este tiempo.

A mis amigos de toda la vida: Claudio, Juan Pablo y Diego, porque a pesar de que a veces no nos sobra el tiempo, siempre hay una instancia para recordar y reír de los momentos de infancia.

A los grandes amigos que hice en mi paso por la universidad, en especial a Gabriela, Ernesto, Sebastián, Rafael, René, Gonzalo, Leopoldo, Valentina, Alejandra y Emilio. Por todos los momentos vividos y todas las alegrías concedidas, como también por el gran apoyo que recibí de ustedes en momentos difíciles.

A “Los Refinos”, equipo con el cual celebramos grandes triunfos en reiteradas ocasiones y lloramos dolorosas derrotas en otras pocas.

A Sebastián Ávalos, Yerko Martínez y Cristián Pérez, por toda la ayuda académica y moral brindada durante esta etapa.

A los profesores miembros de la comisión, por la gran colaboración entregada durante la realización de este trabajo. En especial, agradezco al profesor Julián Ortiz, por su constante preocupación en esta memoria y por la pedagogía empleada para resolver todas las dudas imaginables.

A Minera Escondida Ltda, por la posibilidad de ser parte del proyecto en el cual se enmarca este trabajo y por el financiamiento para el mismo.

A Codelco, por los 4 años en los cuales fui beneficiario de la Beca Codelco de Excelencia Académica.

A todos ustedes, muchas gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Motivación del trabajo .....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.2.1	Objetivo General.....	1
1.2.2	Objetivos Específicos .....	1
1.3	Alcances.....	2
2	Antecedentes.....	3
2.1	Noción de soporte .....	3
2.2	Aditividad .....	3
2.3	Medidas de la correlación lineal entre variables.....	4
2.3.1	Matriz de correlación.....	4
2.3.2	Nube de dispersión .....	5
2.4	Unidades de estimación .....	5
2.4.1	Criterio geológico.....	5
2.4.2	Criterio estadístico.....	5
2.4.3	Criterio espacial.....	7
2.4.4	Metodología de indicadores para variables categóricas .....	7
2.5	Función multivariable .....	8
2.6	Kernel smoothing.....	9
2.7	Estimación multivariable .....	9
2.7.1	Variografía multivariable .....	9
2.7.2	Simulación multivariable.....	11
2.7.3	USGSIM .....	12
2.8	GamSim .....	13
2.9	Accuracy plots .....	14
2.10	Jack-Knife .....	15
2.11	Escalamiento .....	15
2.11.1	Arcillas .....	16
2.11.2	Razón Cu/Fe .....	16
3	METODOLOGÍA.....	17
3.1	Análisis exploratorio de datos.....	17
3.2	Definición de Unidades de Estimación.....	17
3.3	Determinación de relaciones entre variables explicativa y respuesta.....	17
3.4	Construcción de modelos de bloques a soporte puntual .....	17
3.5	Construcción de modelos de bloques a soporte de bloque .....	18

3.6	Validación de resultados .....	18
4	CASO DE ESTUDIO: ESCONDIDA NORTE .....	19
4.1	Descripción geológica del yacimiento .....	19
4.2	Análisis exploratorio de datos.....	20
4.2.1	Visualización de los sondajes .....	21
4.2.2	Histogramas de ley de Cu de concentrado rougher .....	22
4.2.3	Estadísticas básicas variables .....	23
4.2.4	Correlaciones entre variables.....	23
4.2.5	Conclusión capítulo análisis exploratorio.....	24
4.3	Definición de unidades de estimación .....	26
4.3.1	Criterios de definición de unidades de estimación .....	26
4.3.2	Aplicación de criterios.....	29
4.3.3	Definición de unidades de estimación .....	37
4.3.4	Kriging de indicadores.....	41
4.3.5	Conclusión capítulo definición de unidades de estimación.....	43
4.4	Determinación de relaciones entre variables explicativa y respuesta.....	44
4.4.1	Estimación de Ley de Cu rougher en los márgenes del dominio de las variables explicativas .....	44
4.4.2	Estimación en sectores con baja densidad de datos.....	45
4.4.3	Validación cruzada función de varias variables .....	48
4.4.4	Conclusión capítulo determinación de función multivariable.....	49
4.5	Simulación .....	50
4.5.1	Variografía unidades.....	50
4.5.2	Construcción de modelos de bloques a soporte puntual.....	58
4.5.3	Construcción de modelos a soporte de bloque .....	58
4.5.4	Comparación entre modelos .....	59
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	60
5.1	Validación modelo M1 .....	60
5.1.1	Validación Estadística modelo M1 .....	60
5.1.2	Verificación reproducción de variogramas modelo M1 .....	60
5.1.3	Validaciones mediante scatterplots modelo M1 .....	63
5.2	Validación modelo M2 .....	64
5.2.1	Validación estadística modelo M2 .....	64
5.3	Comparación modelos a soporte puntual con datos reales .....	65
5.3.1	Jack-knife para modelo M1 .....	65
5.3.2	Jack-knife para modelo M2 .....	65

5.3.3	Scatterplot contra datos excluidos modelos M1 y M2 .....	66
5.3.4	Accuracy plots modelos M1 y M2 .....	66
5.4	Conclusiones modelos a soporte puntual .....	68
5.5	Validación modelo M3 .....	69
5.5.1	Validación estadística modelo M3 .....	69
5.6	Validación modelo M4 .....	69
5.6.1	Validación estadística modelo M4 .....	69
5.7	Comparación modelos a soporte de bloque con datos reales .....	70
5.7.1	Jack-knife para modelo M3 .....	70
5.7.1	Jack-knife para modelo M4 .....	70
5.7.2	Accuracy plots .....	71
5.7.3	Gráficos de derivas espaciales según coordenada .....	72
5.8	Conclusiones modelos a soporte de bloque .....	73
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	75
7	BIBLIOGRAFÍA .....	78
ANEXO A .....		79
1	Histogramas variables preliminares .....	79
2	Estadísticas básicas variables preliminares .....	81
3	Nubes de dispersión .....	83
4	Gráficos de derivas espaciales por característica geológica .....	85
4.1	Litologías .....	85
4.2	Alteraciones .....	87
4.3	Zonas minerales .....	89
5	Boxplots variables explicativas .....	91
5.1	Litologías .....	91
5.2	Alteraciones .....	91
5.3	Zonas minerales .....	92
6	probability plots por ue's preliminares .....	93
7	probability plots por ue's finales .....	94
8	variogramas de indicadores por unidad .....	95
9	Mapas variográficos por unidad .....	96
9.1	Unidad 316 .....	96
9.2	Unidad 17 .....	97
9.3	Unidad 27 .....	98
9.4	Unidad 18 .....	99
9.5	Unidad 28 .....	100
10	Ajuste variográfico por unidad .....	101
10.1	Unidad 516 .....	101
10.1.1	Cucabeza .....	101

10.1.2	Cucabeza-Curougher .....	101
10.1.3	Cucabeza-Cufe.....	101
10.1.4	Cucabeza-Cuoxidado.....	102
10.1.5	Curougher-Cufe .....	102
10.1.6	Curougher-Cuoxidado .....	102
10.1.7	Cufe .....	103
10.1.8	Cufe-Cuoxidado .....	103
10.1.9	Cuoxidado.....	103
10.2	Unidad 316.....	104
10.2.1	Cucabeza.....	104
10.2.2	Cucabeza-Curougher .....	104
10.2.3	Cucabeza-Cufe.....	105
10.2.4	Cucabeza-cuoxidado.....	105
10.2.5	Curougher-Cufe .....	105
10.2.6	Curougher-Cuoxidado .....	106
10.2.7	Cufe .....	106
10.2.8	Cufe-Cuoxidado .....	106
10.2.9	Cuoxidado.....	107
10.3	Unidad 17.....	107
10.3.1	Cucabeza .....	107
10.3.2	Cucabeza-Curougher .....	108
10.3.3	Cucabeza-Cufe.....	108
10.3.4	Cucabeza-Cuoxidado.....	108
10.3.5	Curougher-Cufe .....	109
10.3.6	Curougher-Cuoxidado .....	109
10.3.7	Cufe .....	109
10.3.8	Cufe-Cuoxidado .....	110
10.3.9	Cuoxidado.....	110
10.4	Unidad 18.....	111
10.4.1	Cucabeza.....	111
10.4.2	Cucabeza-Curougher .....	111
10.4.3	Cucabeza-Cufe.....	111
10.4.4	Curougher-Cufe .....	112
10.4.5	Cufe .....	112
10.5	Unidad 27.....	113

10.5.1	Cucabeza.....	113
10.5.2	Cucabeza-Curougher .....	113
10.5.3	Cucabeza-Cufe.....	113
10.5.4	Curougher-Cufe .....	114
10.5.5	Cufe .....	114
10.6	Unidad 28.....	115
10.6.1	Cucabeza.....	115
10.6.2	Cucabeza-Curougher .....	115
10.6.3	Cucabeza-Cufe.....	116
10.6.4	Curougher-Cufe .....	116
10.6.5	Cufe .....	116
11	Modelos variográficos por unidad.....	117
11.1	Unidad 316.....	117
11.2	Unidad 17 .....	117
11.3	Unidad 18.....	118
11.4	Unidad 27 .....	118
11.5	Unidad 28.....	118
12	validación BOXPLOTS.....	119
12.1	Ley de Cu cabeza .....	119
12.2	Razón CuFe.....	119
12.3	Ley de Cu oxidado .....	120
13	validación variogramas por unidad.....	121
13.1	Unidad 516.....	121
13.1.1	Cucabeza.....	121
13.1.2	Cucabeza-Curougher .....	121
13.1.3	Cucabeza-Cufe.....	121
13.1.4	Cucabeza-Cuoxidado.....	122
13.1.5	Curougher-Cufe .....	122
13.1.6	Curougher-Cuoxidado .....	122
13.1.7	Cufe .....	123
13.1.8	Cufe-Cuoxidado .....	123
13.1.9	Cuoxidado.....	123
13.2	Unidad 316.....	124
13.2.1	Cucabeza.....	124
13.2.2	Cucabeza-Curougher .....	124
13.2.3	Cucabeza-Cufe.....	124

13.2.4	Cucabeza-Cuoxidado.....	125
13.2.5	Curougher-Cufe.....	125
13.2.6	Curougher-Cuoxidado.....	125
13.2.7	Cufe.....	126
13.2.8	Cufe-Cuoxidado.....	126
13.2.9	Cuoxidado.....	126
13.3	Unidad 17.....	127
13.3.1	Cucabeza.....	127
13.3.2	Cucabeza-Curougher.....	127
13.3.3	Cucabeza-Cufe.....	127
13.3.4	Cucabeza-Cuoxidado.....	128
13.3.5	Curougher-Cufe.....	128
13.3.6	Curougher-Cuoxidado.....	128
13.3.7	Cufe.....	129
13.3.8	Cufe-Cuoxidado.....	129
13.3.9	Cuoxidado.....	129
13.4	Unidad 18.....	130
13.4.1	Cucabeza.....	130
13.4.2	Cucabeza-Curougher.....	130
13.4.3	Cucabeza-Cufe.....	130
13.4.4	Curougher-Cufe.....	131
13.4.5	Cufe.....	131
13.5	Unidad 27.....	131
13.5.1	Cucabeza.....	131
13.5.2	Cucabeza-Curougher.....	132
13.5.3	Cucabeza-Cufe.....	132
13.5.4	Curougher-Cufe.....	132
13.5.5	Cufe.....	133
13.6	Unidad 28.....	133
13.6.1	Cucabeza.....	133
13.6.2	Cucabeza-Curougher.....	133
13.6.3	Cucabeza-Cufe.....	134
13.6.4	Curougher-Cufe.....	134
13.6.5	Cufe.....	134
14	Scatterplots reproducción de datos condicionantes modelo M1.....	135

14.1	Unidad 516.....	135
14.2	Unidad 316.....	136
14.3	Unidad 17.....	137
14.4	Unidad 18.....	138
14.5	Unidad 27.....	139
14.6	Unidad 28.....	140
15	Gráficos de derivas espaciales para ley de Cu rougher.....	141
15.1	Modelo M3.....	141
15.2	Modelo M4.....	142
ANEXO B.....		143
1	Bloques de parámetros USGSIM.....	143
2	Parámetros mapas variográficos por unidad.....	144
2.1	Unidad 516.....	144
2.2	Unidad 316.....	144
2.3	Unidad 17.....	145
2.4	Unidad 27.....	145
2.5	Unidad 18.....	146
2.6	Unidad 28.....	146
3	Códigos función multivariable.....	147
3.1	Función kernel smoothing 3 variables explicativas.....	147
3.2	Script función multivariable 3 variables explicativas.....	150

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Ejemplo de boxplot .....	6
Ilustración 2: Representación del concepto de función multivariable.....	8
Ilustración 3: Ubicación Escondida Norte.....	19
Ilustración 4: Vista isométrica sondajes Escondida Norte .....	21
Ilustración 5: Vista en Planta sondajes Escondida Norte .....	21
Ilustración 6: Vista perfil Oeste-Este sondajes Escondida Norte .....	22
Ilustración 7: Vista perfil Norte-Sur sondajes Escondida Norte .....	22
Ilustración 8: Despliegue de litologías en sondajes.....	27
Ilustración 9: Despliegue de alteraciones en sondajes .....	28
Ilustración 10: Despliegue de sondajes por zona mineral .....	28
Ilustración 11: Códigos unidades de estimación .....	38
Ilustración 12: Despliegue sondajes por UE finales.....	40
Ilustración 13: Modelo preliminar obtenido mediante kriging de indicadores .....	43
Ilustración 14 : Corte en planta cota 2950 modelo de roca final.....	43
Ilustración 15 : Corte en plano Norte-Cota modelo roca final .....	43
Ilustración 16: Convención ejes cartesianos .....	51
Ilustración 17: Leyenda Mapas variográficos Ley de Cu rougher gaussiano .....	51
Ilustración 18: Mapa variográfico XY unidad 516 .....	51
Ilustración 19: Mapa variográfico YZ unidad 516.....	51
Ilustración 20: Mapa variográfico XZ unidad 516.....	52
Ilustración 21: Cálculo distancia para asignación de datos a nodos.....	63
Ilustración 22: Mapa variográfico XY unidad 316 .....	96
Ilustración 23: Mapa variográfico YZ unidad 316.....	96
Ilustración 24: Mapa variográfico XZ unidad 316.....	96
Ilustración 25: Mapa variográfico XY unidad 17 .....	97
Ilustración 26: Mapa variográfico YZ unidad 17.....	97
Ilustración 27: Mapa variográfico XZ unidad 17.....	97
Ilustración 28: Mapa variográfico XY unidad 27 .....	98
Ilustración 29: Mapa variográfico YZ unidad 27.....	98
Ilustración 30: Mapa variográfico XZ unidad 27.....	98
Ilustración 31: Mapa variográfico XY unidad 18 .....	99
Ilustración 32: Mapa variográfico YZ unidad 18.....	99
Ilustración 33: Mapa variográfico XZ unidad 18.....	99
Ilustración 34: Mapa variográfico XY unidad 28 .....	100
Ilustración 35: Mapa variográfico YZ unidad 28.....	100
Ilustración 36: Mapa variográfico YZ unidad 28.....	100
Ilustración 37: Parámetros mapas variográficos unidad 516.....	144
Ilustración 38: Parámetros mapas variográficos unidad 316.....	144
Ilustración 39: Parámetros mapas variográficos unidad 17.....	145
Ilustración 40: Parámetros mapas variográficos unidad 27.....	145
Ilustración 41: Parámetros mapas variográficos unidad 18.....	146
Ilustración 42: Parámetros mapas variográficos unidad 28.....	146

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ejemplo de matriz de correlación .....	5
Tabla 2: Bloque de parámetros principal USGSIM .....	13
Tabla 3: Bloque de parámetros de búsqueda.....	13
Tabla 4: Bloque de parámetros variográficos.....	13
Tabla 5: Estadísticas básicas ley de Cu de concentrado rougher .....	23
Tabla 6: Matriz de correlación entre todas las variables .....	24
Tabla 7: Códigos por litología.....	26
Tabla 8: Códigos por alteración .....	26
Tabla 9: Códigos por zona mineral .....	27
Tabla 10: Estadística descriptiva básica por litología .....	29
Tabla 11: Estadística descriptiva básica por alteración.....	29
Tabla 12: Estadística descriptiva básica por zona mineral.....	30
Tabla 13: Número de datos por UE preliminar .....	38
Tabla 14: Descripción códigos unidades de estimación finales .....	40
Tabla 15: Prioridades para unidades de estimación según importancia en el negocio.....	42
Tabla 16: Proporciones por unidad de estimación .....	42
Tabla 17: Validación cruzada kernel smoothing con 2 variables explicativas.....	48
Tabla 18: Validación cruzada kernel smoothing con 3 variables explicativas.....	49
Tabla 19: Matriz correlación unidad 516 .....	52
Tabla 20: Modelo variográfico 3D unidad 516.....	53
Tabla 21: Matriz de correlación Unidad 316.....	53
Tabla 22: Matriz de correlación unidad 17 .....	54
Tabla 23: Matriz de correlación unidad 18 .....	55
Tabla 24: Matriz de correlación unidad 27 .....	55
Tabla 25: Matriz de correlación unidad 28 .....	56
Tabla 26: Jack-knife modelo M1 .....	65
Tabla 27: Jack-knife modelo M2 .....	65
Tabla 28: Resultados jack-knife modelo M3 .....	70
Tabla 29: Resultado Jack-Knife para modelo M4.....	70
Tabla 30: Estadísticas básicas Ley de Fe cabeza [%] .....	81
Tabla 31: Estadísticas básicas Ley de Cu oxidado [%].....	81
Tabla 32: Estadísticas básicas Ley de Fe en el relave [%].....	82
Tabla 33: Estadísticas básicas Ley de Fe en el concentrado rougher [%].....	82
Tabla 34: Estadísticas básicas velocidad de sedimentación [cm/s].....	82
Tabla 35: Estadísticas básicas Ley de Cu en el relave [%] .....	82
Tabla 36: Estadísticas básicas razón CuFe.....	82
Tabla 37: Modelo variográfico 3D unidad 316.....	117
Tabla 38: Modelo variográfico 3D unidad 17 .....	117
Tabla 39: Modelo variográfico 3D unidad 18.....	118
Tabla 40: Modelo variográfico 3D unidad 27 .....	118
Tabla 41: Modelo variográfico 3D unidad 28.....	118
Tabla 42: Bloque de parámetros de datos condicionantes.....	143
Tabla 43: Bloque de parámetros de transformación.....	143
Tabla 44: Bloque de parámetros de derivas .....	143
Tabla 45: Bloque de parámetros de variables secundarios.....	143
Tabla 46: Bloque de parámetros de tipo de roca .....	143
Tabla 47: Bloque de parámetros multivariados.....	143

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Ejemplo de nube de dispersión o correlación .....	5
Gráfico 2: Ejemplo de gráfico de derivas de ley de Cu rougher y proporciones espaciales .....	6
Gráfico 3: Ejemplo de probability plot .....	7
Gráfico 4: Ejemplo de accuracy plot incertidumbre local bien modelada .....	14
Gráfico 5: Ejemplo de accuracy plot con sobreestimación de la incertidumbre local .....	15
Gráfico 6: Ejemplo de accuracy plot con subestimación de la incertidumbre local.....	15
Gráfico 7: Histograma Ley de Cu de concentrado rougher.....	23
Gráfico 8: Nube de correlación ley de Cu rougher VS ley de Cu cabeza .....	24
Gráfico 9: Deriva espacial y proporciones Litologías coordenada X.....	31
Gráfico 10: Número de datos Litologías coordenada X.....	31
Gráfico 11: Deriva espacial y proporciones coordenada X.....	32
Gráfico 12: Número de datos coordenada X.....	32
Gráfico 13: Deriva espacial y proporciones por zona mineral coordenada X.....	33
Gráfico 14: Número de datos por zona mineral coordenada X.....	33
Gráfico 15: Boxplots Ley de Cu rougher por litologías .....	34
Gráfico 16: Boxplots ley de Cu rougher por alteración .....	34
Gráfico 17: Boxplots de Ley de Cu rougher por zona mineral .....	35
Gráfico 18: Probability plot todas las litologías.....	36
Gráfico 19: Probability plots agrupación de litologías.....	36
Gráfico 20: Probability plot todas las alteraciones.....	36
Gráfico 21: Probability plots agrupación de alteraciones .....	36
Gráfico 22: Probability plot todas las zonas minerales .....	37
Gráfico 23: Probability plot ley Cu rougher por UE preliminares .....	39
Gráfico 24: Probability plot para Cu rougher por UE finales .....	39
Gráfico 25: Variograma de indicadores unidad 516 .....	41
Gráfico 26: Media y desviación estándar para Ley de Cu rougher .....	44
Gráfico 27: Ejemplo de kernel smoothing unidimensional con y sin corrección en los bordes.....	45
Gráfico 28: Resultado Kernel smoothing ZONA 1 .....	46
Gráfico 29: Resultado Kernel smoothing ZONA 2.....	47
Gráfico 30: Resultado Kernel smoothing ZONA 3.....	47
Gráfico 31: Nube de dispersión ley de Cu rougher real contra datos estimados, 2 variables explicativas ..	49
Gráfico 32: Nube de dispersión ley de Cu rougher real contra datos estimados, 3 variables explicativas ..	49
Gráfico 33: Variograma directo Ley de Cu rougher dirección Y unidad 516.....	53
Gráfico 34: Variograma directo Ley de Cu rougher plano XZ unidad 516 .....	53
Gráfico 35: Variograma directo Ley de Cu rougher omnidireccional unidad 316.....	54
Gráfico 36: Variograma directo Ley de Cu rougher omnihorizontal unidad 17 .....	54
Gráfico 37: Variograma directo Ley de Cu rougher vertical unidad 17.....	54
Gráfico 38: Variograma directo Ley de Cu rougher omnihorizontal unidad 18 .....	55
Gráfico 39: Variograma directo Ley de Cu rougher vertical unidad 18.....	55
Gráfico 40: Variograma directo Ley de Cu rougher omnidireccional unidad 27.....	56
Gráfico 41: Variograma directo Ley de Cu rougher omnidireccional unidad 28.....	56
Gráfico 42: Boxplots Ley de Cu rougher por unidad de estimación datos condicionantes.....	60
Gráfico 43: Boxplots Ley de Cu rougher por unidad de estimación modelo M1 .....	60
Gráfico 44: Validación variogramas omnihorizontales Ley de Cu rougher unidad 516.....	61
Gráfico 45: Validación variogramas verticales Ley de Cu rougher unidad 516 .....	61
Gráfico 46: Validación variogramas Ley de Cu rougher unidad 316 .....	61
Gráfico 47: Validación variogramas Ley de Cu rougher omnihorizontal unidad 18 .....	61
Gráfico 48: Validación variogramas Ley de Cu rougher vertical unidad 18 .....	61
Gráfico 49: Validación variogramas Ley de Cu rougher omnihorizontales unidad 17.....	62
Gráfico 50: Validación variogramas Ley de Cu rougher verticales unidad 17 .....	62

Gráfico 51: Validación variogramas Ley de Cu rougher unidad 27 .....	62
Gráfico 52: Validación variogramas Ley de Cu rougher unidad 28 .....	62
Gráfico 53: Scatterplot Ley de Cu rougher simulado y muestras unidad 516.....	64
Gráfico 54: Boxplots Ley de Cu rougher por unidad de estimación datos condicionantes.....	64
Gráfico 55: Boxplots Ley de Cu rougher por unidad de estimación modelo M2 .....	64
Gráfico 56: Scatterplot modelo M1 contra datos excluidos .....	66
Gráfico 57: Scatterplot modelo M2 contra datos excluidos .....	66
Gráfico 58: Accuracy plot modelo M1 .....	67
Gráfico 59: Accuracy plot modelo M2 .....	67
Gráfico 60: Boxplots ley de Cu rougher por unidad de estimación datos condicionantes .....	69
Gráfico 61: Boxplots ley de Cu rougher por unidad de estimación modelo M3.....	69
Gráfico 62: Boxplots ley de Cu rougher por unidad de estimación para datos condicionantes .....	69
Gráfico 63: Boxplots ley de Cu rougher por unidad de estimación modelo M4.....	69
Gráfico 64: Accuracy plot modelo M3 .....	71
Gráfico 65: Accuracy plot modelo M4 .....	71
Gráfico 66: Derivas espaciales modelo M3 coordenada Z.....	72
Gráfico 67: Derivas espaciales modelo M4 coordenada Z.....	72
Gráfico 68: Histograma Ley de Cu cabeza .....	79
Gráfico 69: Histograma Ley de Fe cabeza .....	79
Gráfico 70: Histograma Ley de Cu oxidado .....	79
Gráfico 71: Histograma Ley de Cu en el relave.....	80
Gráfico 72: Histograma Ley de Fe en el relave.....	80
Gráfico 73: Histograma velocidad de sedimentación.....	80
Gráfico 74: Histograma de Ley de Fe rougher.....	81
Gráfico 75: Histograma de razón Cu-Fe .....	81
Gráfico 76: Nube de correlación Ley de Cu rougher v/s Ley de Fe cabeza.....	83
Gráfico 77: Nube de correlación Ley de Cu rougher v/s Razón Cu-Fe .....	83
Gráfico 78: Nube de correlación Ley de Cu rougher v/s Ley de Cu oxidado .....	83
Gráfico 79: Nube de correlación Ley de Cu rougher v/s Ley de Cu en el relave .....	84
Gráfico 80: Nube de correlación Ley de Cu rougher v/s Ley de Fe en el relave .....	84
Gráfico 81: Nube de correlación Ley de Cu rougher v/s Velocidad de sedimentación .....	84
Gráfico 82: Nube de correlación Ley de Cu rougher v/s Ley de Fe rougher .....	85
Gráfico 83: Deriva espacial y proporciones por Litología coordenada Y.....	85
Gráfico 84: Número de datos por litología coordenada Y .....	85
Gráfico 85: Deriva espacial y proporciones por litología coordenada Z.....	86
Gráfico 86: Número de datos por litología coordenada Z.....	86
Gráfico 87: Deriva espacial y proporciones por alteración coordenada Y.....	87
Gráfico 88: Número de datos por alteración coordenada Y.....	87
Gráfico 89: Deriva espacial y proporciones por alteración coordenada Z .....	88
Gráfico 90: Número de datos por alteración coordenada Z .....	88
Gráfico 91: Deriva espacial y proporciones por zona mineral coordenada Y .....	89
Gráfico 92: Número de datos por zona mineral coordenada Y .....	89
Gráfico 93: Deriva espacial y proporciones por zona mineral coordenada Y.....	90
Gráfico 94: Número de datos por zona mineral coordenada Y .....	90
Gráfico 95: Boxplots Cu cabeza por litología .....	91
Gráfico 96: Boxplots Razón Cu-Fe por litología .....	91
Gráfico 97: Boxplots Cu oxidado por litologías .....	91
Gráfico 98: Boxplots Cu cabeza por alteración.....	91
Gráfico 99: Boxplots Razón Cu-Fe por alteración.....	91
Gráfico 100: Boxplots Cu oxidado por alteración.....	92
Gráfico 101: Boxplots Cu cabeza por zona mineral.....	92
Gráfico 102: Boxplots Razón Cu-Fe por zona mineral.....	92

Gráfico 103: Boxplots Cu oxidado por zona mineral.....	92
Gráfico 104: Probability plot Cu cabeza .....	93
Gráfico 105: Probability plot Razón Cu-Fe .....	93
Gráfico 106: Probability plot Cu oxidado .....	93
Gráfico 107: Probability plot Cu cabeza .....	94
Gráfico 108: Probability plot Razón Cu-Fe .....	94
Gráfico 109: Probability plots Cu oxidado.....	94
Gráfico 110: Variograma de indicadores unidad 17 .....	95
Gráfico 111: Variograma de indicadores unidad 27 .....	95
Gráfico 112: Variograma de indicadores unidad 18 .....	95
Gráfico 113: Variograma de indicadores unidad 28 .....	95
Gráfico 114: Variograma de indicadores unidad 316 .....	95
Gráfico 115: Variograma directo Ley de Cu cabeza dirección Y unidad 516 .....	101
Gráfico 116: Variograma directo Ley de Cu cabeza plano XZ unidad 516.....	101
Gráfico 117: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza- Ley de Cu rougher dirección Y unidad 516.....	101
Gráfico 118: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher plano XZ unidad 516.....	101
Gráfico 119: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza- Razón CuFe dirección Y unidad 516.....	101
Gráfico 120: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Razón CuFe plano XZ unidad 516.....	101
Gráfico 121: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu oxidado dirección Y unidad 516.....	102
Gráfico 122: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu oxidado plano XZ unidad 516.....	102
Gráfico 123: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Razón CuFe dirección Y unidad 516.....	102
Gráfico 124: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Razón CuFe plano XZ unidad 516.....	102
Gráfico 125: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Ley de Cu oxidado dirección Y unidad 516.....	102
Gráfico 126: Variograma cruzado Ley de Cu rougher- Ley de Cu oxidado plano XZ unidad 516.....	102
Gráfico 127: Variograma directo Razón CuFe dirección Y unidad 516.....	103
Gráfico 128: Variograma directo Razón CuFe plano XZ unidad 516.....	103
Gráfico 129: Variograma cruzado Razón CuFe-Ley de Cu oxidado dirección Y unidad 516.....	103
Gráfico 130: Variograma cruzado Razón CuFe-Ley de Cu oxidado plano XZ unidad 516.....	103
Gráfico 131: Variograma directo Ley de Cu oxidado dirección Y unidad 516 .....	103
Gráfico 132: Variograma directo Ley de Cu oxidado plano XZ unidad 516.....	103
Gráfico 133: Variograma directo Ley de Cu cabeza omnidireccional unidad 316 .....	104
Gráfico 134: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher omnidireccional unidad 316 ..	104
Gráfico 135: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza- Razón Cu-Fe omnidireccional unidad 316 .....	105
Gráfico 136: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza- Ley de Cu oxidado omnidireccional unidad 316..	105
Gráfico 137: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Razón CuFe omnidireccional unidad 316.....	105
Gráfico 138: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Ley de Cu oxidado omnidireccional unidad 316.	106
Gráfico 139: Variograma directo Razón CuFe omnidireccional unidad 316.....	106
Gráfico 140: Variograma cruzado Razón CuFe-Ley de Cu oxidado omnidireccional unidad 316.....	106
Gráfico 141: Variograma directo Ley de Cu oxidado omnidireccional unidad 316 .....	107
Gráfico 142: Variograma directo Ley de Cu cabeza omnihorizontal unidad 17.....	107
Gráfico 143: Variograma directo Ley de Cu cabeza vertical unidad 17 .....	107
Gráfico 144: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher omnihorizontal unidad 17 .....	108
Gráfico 145: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher vertical unidad 17 .....	108
Gráfico 146: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Razón CuFe omnihorizontal unidad 17 .....	108
Gráfico 147: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Razón CuFe vertical unidad 17 .....	108
Gráfico 148: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de CU oxidado omnihorizontal unidad 17.....	108
Gráfico 149: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu oxidado vertical unidad 17.....	108
Gráfico 150: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Razón CuFe omnihorizontal unidad 17 .....	109
Gráfico 151: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Razón CuFe vertical unidad 17.....	109
Gráfico 152: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Ley de Cu oxidado omnihorizontal unidad 17.....	109
Gráfico 153: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Ley de Cu oxidado vertical unidad 17 .....	109
Gráfico 154: Variograma directo Razón CuFe omnihorizontal unidad 17 .....	109

Gráfico 155: Variograma directo Razón CuFe vertical unidad 17.....	109
Gráfico 156: Variograma cruzado Razón CuFe-Ley de Cu oxidado homnihorizontal unidad 17.....	110
Gráfico 157: Variograma cruzado Razón CuFe-Ley de Cu oxidado vertical unidad 17.....	110
Gráfico 158: Variograma directo Ley de Cu oxidado homnihorizontal unidad 17.....	110
Gráfico 159: Variograma directo Ley de Cu oxidado vertical unidad 17.....	110
Gráfico 160: Variograma directo Ley de Cu cabeza omnihorizontal unidad 18.....	111
Gráfico 161: Variograma directo Ley de Cu cabeza vertical unidad 18.....	111
Gráfico 162: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher omnihorizontal unidad 18.....	111
Gráfico 163: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher vertical unidad 18.....	111
Gráfico 164: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Razón CuFe omnihorizontal unidad 18.....	111
Gráfico 165: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Razón CuFe vertical unidad 18.....	111
Gráfico 166: Variograma cruzado Ley de Cu rougher -Razón CuFe omnihorizontal unidad 18.....	112
Gráfico 167: Variograma cruzado Ley de Cu rougher -Razón CuFe vertical unidad 18.....	112
Gráfico 168: Variograma directo Razón CuFe omnihorizontal unidad 18.....	112
Gráfico 169: Variograma directo Razón CuFe vertical unidad 18.....	112
Gráfico 170: Variograma directo Ley de Cu cabeza omnidireccional unidad 27.....	113
Gráfico 171: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher unidad 27.....	113
Gráfico 172: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Razón CuFe omnidireccional unidad 27.....	113
Gráfico 173: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Razón CuFe omnidireccional unidad 27.....	114
Gráfico 174: Variograma directo Razón CuFe omnidireccional unidad 27.....	114
Gráfico 175: Variograma directo Ley de Cu cabeza omnidireccional unidad 28.....	115
Gráfico 176: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher omnidireccional unidad 28.....	115
Gráfico 177: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Razón CuFe omnidireccional unidad 28.....	116
Gráfico 178: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Razón CuFe omnidireccional unidad 28.....	116
Gráfico 179: Variograma directo CuFe omnidireccional unidad 28.....	116
Gráfico 180: Boxplots Ley de Cu cabeza por unidad de estimación datos condicionantes.....	119
Gráfico 181: Boxplots Ley de Cu cabeza por unidad de estimación Modelo M1.....	119
Gráfico 182: Boxplots Razón CuFe por unidad de estimación datos condicionantes.....	119
Gráfico 183: Boxplots Razón CuFe por unidad de estimación Modelo M1.....	119
Gráfico 184: Boxplots Ley de Cu oxidado por unidad de estimación datos condicionantes.....	120
Gráfico 185: Boxplots Ley de Cu oxidado por unidad de estimación Modelo M1.....	120
Gráfico 186: Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza unidad 516.....	121
Gráfico 187 Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza unidad 516.....	121
Gráfico 188: Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza- Ley de Cu rougher unidad 516.....	121
Gráfico 189: Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza- Ley de Cu rougher unidad 516.....	121
Gráfico 190: Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza-Razón CuFe unidad 516.....	121
Gráfico 191: Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza-Razón CuFe unidad 516.....	121
Gráfico 192: Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza- Ley de Cu oxidado unidad 516.....	122
Gráfico 193: Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza- Ley de Cu oxidado unidad 516.....	122
Gráfico 194: Validación variogramas XZ Ley de Cu rougher- Razón CuFe unidad 516.....	122
Gráfico 195: Validación variogramas XZ Ley de Cu rougher- Razón CuFe unidad 516.....	122
Gráfico 196: Validación variogramas XZ Ley de Cu rougher- Ley de Cu oxidado unidad 516.....	122
Gráfico 197: Validación variogramas XZ Ley de Cu rougher- Ley de Cu oxidado unidad 516.....	122
Gráfico 198: Validación variogramas dirección Y Razón CuFe unidad 516.....	123
Gráfico 199: Validación variogramas XZ Razón CuFe unidad 516.....	123
Gráfico 200: Validación variogramas dirección Y Razón CuFe-Ley de Cu oxidado unidad 516.....	123
Gráfico 201: Validación variogramas XZ Razón CuFe-Ley de Cu oxidado unidad 516.....	123
Gráfico 202: Validación variogramas dirección Y Ley de Cu oxidado unidad 516.....	123
Gráfico 203: Validación variogramas XZ Ley de Cu oxidado unidad 516.....	123
Gráfico 204: Validación variogramas Ley de Cu cabeza unidad 316.....	124
Gráfico 205: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher unidad 316.....	124
Gráfico 206: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Razón CuFe unidad 316.....	124

Gráfico 207: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Ley de Cu oxidado unidad 316 .....	125
Gráfico 208: Validación variogramas Ley de Cu rougher- Razón CuFe unidad 316 .....	125
Gráfico 209: Validación variogramas Ley de Cu rougher- Ley de Cu oxidado unidad 316.....	125
Gráfico 210: Validación variogramas Razón de CuFe unidad 316.....	126
Gráfico 211: Validación variogramas Razón de CuFe- Ley de Cu oxidado unidad 316 .....	126
Gráfico 212: Validación variogramas Ley de Cu oxidado unidad 316 .....	126
Gráfico 213: Validación variogramas Ley de Cu cabeza omnihorizontales unidad 17 .....	127
Gráfico 214: Validación variogramas Ley de Cu cabeza verticales unidad 17.....	127
Gráfico 215: Validación variogramas Ley de Cu cabeza- Ley de Cu rougher omnihorizontales unidad 17 .....	127
Gráfico 216: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher verticales unidad 17 .....	127
Gráfico 217: Validación variogramas Ley de Cu cabeza- Razón CuFe omnihorizontales unidad 17 .....	127
Gráfico 218: Validación variogramas Ley de Cu cabeza- Razón CuFe verticales unidad 17.....	127
Gráfico 219: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Ley de Cu oxidado omnihorizontales unidad 17 .....	128
Gráfico 220: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Ley de Cu oxidado verticales unidad 17 .....	128
Gráfico 221: Validación variogramas Ley de Cu rougher-Razón CuFe omnihorizontales unidad 17.....	128
Gráfico 222: Validación variogramas Ley de Cu rougher-Razón CuFe verticales unidad 17 .....	128
Gráfico 223: Validación variogramas Ley de Cu rougher-Ley de Cu oxidado omnihorizontales unidad 17 .....	128
Gráfico 224: Validación variogramas Ley de Cu rougher-Ley de Cu oxidado verticales unidad 17 .....	128
Gráfico 225: Validación variogramas Razón CuFe omnihorizontales unidad 17.....	129
Gráfico 226: Validación variogramas Razón CuFe verticales unidad 17 .....	129
Gráfico 227: Validación variogramas Razón CuFe-Ley Cu oxidado omnihorizontales unidad 17 .....	129
Gráfico 228: Validación variogramas Razón CuFe-Ley Cu oxidado verticales unidad 17 .....	129
Gráfico 229: Validación variogramas Ley Cu oxidado omnihorizontales unidad 17 .....	129
Gráfico 230: Validación variogramas Ley Cu oxidado verticales unidad 17.....	129
Gráfico 231: Validación variogramas Ley de Cu cabeza omnihorizontales unidad 18 .....	130
Gráfico 232: Validación variogramas Ley de Cu cabeza verticales unidad 18.....	130
Gráfico 233: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher omnihorizontales unidad 18 .....	130
Gráfico 234: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher verticales unidad 18 .....	130
Gráfico 235: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Razón CuFe omnihorizontales unidad 18 .....	130
Gráfico 236: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Razón CuFe verticales unidad 18.....	130
Gráfico 237: Validación variogramas Ley de Cu rougher -Razón CuFe omnihorizontal unidad 18.....	131
Gráfico 238: Validación variogramas Ley de Cu rougher -Razón CuFe verticales unidad 18.....	131
Gráfico 239: Validación variogramas Razón CuFe omnihorizontales unidad 18.....	131
Gráfico 240: Validación variogramas Razón CuFe verticales unidad 18 .....	131
Gráfico 241: Validación variogramas Ley de Cu cabeza unidad 27 .....	131
Gráfico 242: Validación variogramas Ley de Cu cabeza- Ley de Cu rougher unidad 27.....	132
Gráfico 243: Validación variogramas Ley de Cu cabeza- Razón CuFe unidad 27.....	132
Gráfico 244: Validación variogramas Ley de Cu rougher- Razón CuFe unidad 27 .....	132
Gráfico 245: Validación variogramas Razón CuFe unidad 27.....	133
Gráfico 246: Validación variogramas Ley de Cu cabeza unidad 28.....	133
Gráfico 247: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher unidad 28.....	133
Gráfico 248: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Razón CuFe unidad 28.....	134
Gráfico 249: Validación variogramas Ley de Cu rougher-Razón CuFe unidad 28 .....	134
Gráfico 250: Validación variogramas Razón CuFe unidad 28.....	134
Gráfico 251: Scatterplot Ley de Cu cabeza simulado y muestras unidad 516 .....	135
Gráfico 252: Scatterplot Razón CuFe simulado y muestras unidad 516.....	135
Gráfico 253: Scatterplot Ley de Cu oxidado simulado y muestras unidad 516 .....	135
Gráfico 254: Scatterplot Ley de Cu cabeza simulado y muestras unidad 316 .....	136

Gráfico 255: Scatterplot Ley de Cu rougher simulado y muestras unidad 316.....	136
Gráfico 256: Scatterplot razón CuFe simulado y muestras unidad 316 .....	136
Gráfico 257: Scatterplot Ley de Cu oxidado simulado y muestras unidad 316 .....	136
Gráfico 258: Scatterplot Ley de Cu cabeza simulado y muestras unidad 17 .....	137
Gráfico 259: Scatterplot Ley de Cu rougher simulado y muestras unidad 17.....	137
Gráfico 260: Scatterplot razón CuFe simulado y muestras unidad 17 .....	137
Gráfico 261: Scatterplot Ley de Cu oxidado simulado y muestras unidad 17 .....	137
Gráfico 262: Scatterplot Ley de Cu rougher simulado y muestras unidad 18.....	138
Gráfico 263: Scatterplot Ley de Cu cabeza simulado y muestras unidad 18 .....	138
Gráfico 264: Scatterplot Razón CuFe simulado y muestras unidad 18.....	138
Gráfico 265: Scatterplot Ley de Cu rougher simulados y muestras unidad 27 .....	139
Gráfico 266: Scatterplot Ley de Cu cabeza simulados y muestras unidad 27.....	139
Gráfico 267: Scatterplot Razón CuFe simulados y muestras unidad 27 .....	139
Gráfico 268: Scatterplot Ley de Cu rougher simulados y muestras unidad 28 .....	140
Gráfico 269: Scatterplot Ley de Cu cabeza simulados y muestras unidad 28.....	140
Gráfico 270: Scatterplot razón CuFe simulados y muestras unidad 28.....	140
Gráfico 271: Deriva espacial para ley de Cu rougher modelo M3 coordenada X.....	141
Gráfico 272: Deriva espacial para ley de Cu rougher modelo M3 coordenada Y.....	141
Gráfico 273: Deriva espacial para ley de Cu rougher modelo M4 coordenada X.....	142
Gráfico 274: Deriva espacial para ley de Cu rougher modelo M4 coordenada Y.....	142

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Fórmula de variograma de indicadores .....	8
Ecuación 2: Fórmula ponderador de Kernel Smoothing .....	9
Ecuación 3: Variograma cruzado .....	9
Ecuación 4: Matriz de variogramas.....	9
Ecuación 5: Modelo lineal de correogionalización .....	10
Ecuación 6: Condición de positividad.....	10
Ecuación 7: Fórmula empírica de producción en función de Cu/Fe .....	16
Ecuación 8: Sistema ecuaciones para acoplar modelos de masa de fino y ley de Cu rougher.....	76

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación del trabajo

La evaluación de yacimientos no se remite solamente a nuevos yacimientos, ésta también se puede llevar a cabo en sectores de una mina que se encuentra en explotación con el fin de caracterizar de mejor manera los recursos disponibles, para posteriormente con esa información efectuar planes de producción que conduzcan al mejor negocio.

Para caracterizar de la mejor manera un sector de un yacimiento sulfurado que ya se encuentra en explotación no es suficiente conocer la ley de cobre in situ, pues los materiales deben ser procesados en plantas de flotación que tienen ciertos desempeños ante diferentes características de materiales, independientes de la ley que éstos presenten. Por lo tanto, hay que ir más allá y tratar de estimar la ley de Cu de concentrado *rougher* resultante de todos los procesos llevados a cabo en planta, de tal manera de que la secuencia de extracción definida se traduzca finalmente en los mejores resultados.

Sin embargo, una vez que se cuenta con datos de pruebas de laboratorio de ley de concentrado *rougher* la construcción de un modelo de bloques no es un proceso simple, debido a la naturaleza no aditiva que posee la variable. Lo anterior se traduce en la necesidad de definir una metodología especial para la construcción de un modelo de este tipo.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

- Construcción de un modelo de bloques de ley de concentrado *rougher* calculada a partir de ensayos de flotación *rougher*.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Encontrar entre los datos disponibles las variables explicativas para un modelo de regresión multivariable.
- Metodología de ajuste de una función multivariable de la ley de concentrado *rougher*.
- Construcción de un modelo a soporte puntual de ley de concentrado *rougher* a partir de ensayos de flotación *rougher*.

### 1.3 Alcances

Este trabajo se enmarca en medio de un convenio de colaboración entre el laboratorio ALGES y BHP Billiton, dentro del cual se han abierto nuevas posibilidades para la investigación en el ámbito de la Geometalurgia.

Se cuenta con datos de pruebas de flotación *rougher* de laboratorio realizadas sobre sondajes de Escondida Norte. Esta base de datos, además de entregar la ley de concentrado *rougher*, entrega otras variables cuyas relaciones con la variable de control deben ser determinadas. La cantidad de datos facilitados, a priori, pareciera ser suficiente para obtener resultados concluyentes, sin embargo el ajuste de una regresión de varias variables le da incertidumbre a esta afirmación, ya que su confiabilidad depende mucho del número de variables explicativas que sean consideradas.<sup>1</sup>

Con esta investigación se busca desarrollar una metodología para la construcción de modelos de ley de flotación *rougher* mediante la determinación de correlaciones entre variables. Además, se busca sentar las bases para la realización de un futuro escalamiento de las leyes de concentrado *rougher*, desde escala de laboratorio a industrial. No se llevará a cabo el escalamiento, pues no se cuenta con una cantidad suficiente de datos de planta para definir una función estadísticamente confiable.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Variables explicativas se les llama a las variables que componen el vector de entrada de la regresión multivariable de la ley de concentrado *rougher*.

<sup>2</sup> Se cuenta con sólo 7 datos de planta.

## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 Noción de soporte

El volumen sobre el cual se considera la variable regionalizada se denomina soporte. En general, el soporte de las mediciones es muy pequeño, mientras que el que interesa en la práctica puede ser más voluminoso (por ejemplo, las unidades selectivas de explotación en evaluación minera). Esta noción es esencial debido a la dependencia que existe entre el soporte y la distribución estadística de los valores, conocida como efecto de soporte: los soportes voluminosos presentan una menor cantidad de valores extremos y una mayor cantidad de valores intermedios que los soportes puntuales.[1]

### 2.2 Aditividad

Cuando se construye un modelo de bloques de una variable regionalizada muchas veces se prefiere estimar su valor a soporte de bloque, de tal manera de obtener el valor de la variable al soporte de la unidad selectiva de explotación. Sin embargo, para la utilización apropiada de esta técnica es necesario que las variables cumplan con ciertas propiedades. Una de estas propiedades corresponde a la aditividad. Una variable regionalizada es aditiva cuando conociendo su valor en dos soportes distintos  $V_1$  y  $V_2$ , con valores medios respectivos  $z_1$  y  $z_2$ , el valor promedio de la variable en el soporte homogeneizado  $V_1 \cup V_2$  es igual al promedio ponderado de  $z_1$  y  $z_2$ . Por lo tanto, conceptualmente es erróneo calcular variables no aditivas usando técnicas de interpolación a soporte de bloque, ya que al llevar a cabo este cambio de soporte se necesita realizar promedios ponderados de los valores de las variables.

S. Dunham *et al* [2] propone un marco de clasificación para los distintos tipos de variables, en el cual se clasifica a las variables en primarias y de respuesta. Por un lado las variables primarias son atributos de la roca que pueden ser medidos directamente, tales como masa, densidad de la roca, color o tamaño del grano. La mayoría son aditivas o son fácilmente manipulables para ser tratadas como aditivas, por ejemplo las leyes de metal por unidad de masa. Mientras que por otro lado están las variables de respuesta, las cuales son atributos de la roca que describen las respuestas de ésta frente a diferentes procesos, por ejemplo el rendimiento y la recuperación. Debido a la naturaleza multivariable se pueden obtener distribuciones de datos medidos que pueden ser complejas (no-normales, bi-modales), y por lo tanto, no pueden ser usados estimadores de promedios aritméticos. Las variables de respuesta generalmente son complejas y típicamente no-lineales. Luego, cuando se estiman valores de variables no-lineales con métodos como el *kriging*, ocurre que se sobreestiman o subestiman valores.

En el caso de estudio, se puede reconocer claramente la ley de concentrado *rougher* a escala de laboratorio como una variable de respuesta, ya que corresponde a una respuesta de la roca con ciertas propiedades frente al proceso de la flotación estándar a escala de laboratorio. Por lo tanto, no corresponde a una variable regionalizada que pueda ser tratada como aditiva.

Carrasco, P. *et al* [3], muestra cómo la aditividad puede o no tener impacto en los resultados de la estimación, dependiendo de la variabilidad de las cantidades involucradas y de la escala del cálculo. Para concluir lo anterior, se realizan dos experimentos de cálculo de la recuperación metalúrgica (variable no aditiva) a partir de muestras de sondajes. Los experimentos se realizan a escala global, en un dominio con dimensiones en las coordenadas Norte, Este y Elevación de

1300[m]x3900[m]x1400[m], como también a escala local cuyo dominio posee análogamente dimensiones de 200[m]x200[m]x50[m]. Para realizar la estimación y comparar, se llevan a cabo dos metodologías, una correcta y otra incorrecta para la aplicación a variables no aditivas. La primera de ellas consiste en obtener mediante promedio simple la ley de alimentación y la ley recuperada in situ para todo el dominio considerado, y posteriormente calcular la recuperación metalúrgica mediante el cociente entre estas cantidades. Por otro lado, la otra metodología aplicable sólo a variables aditivas, consiste en promediar directamente la recuperación de cada muestra y así obtener la recuperación del dominio considerado.

Como resultado de la aplicación de ambas metodologías, se obtienen resultados muy distintos. Para el caso de escala global la diferencia entre las recuperaciones calculadas alcanza un valor de 0.5%, valor que no se puede despreciar. Mientras que a escala local esta diferencia sí resultó ser despreciable. Si bien según el estudio desarrollado por P. Carrasco *et al*, se da que para soportes pequeños la estimación de variables no aditivas mediante promedios ponderados resulta no traducirse en grandes diferencias, esto depende de la variabilidad espacial de la variable regionalizada. Por lo tanto, se prefiere para este trabajo desarrollar una metodología en la cual se evite el cambio de soporte de la variable ley de Cu de concentrado *rougher* desde escala de muestra a escala de bloque.

En este mismo trabajo se menciona un error de metodología que se comete de manera recurrente, éste consiste en que los geólogos hacen *kriging* con las leyes de alimentación ( $Z_H$ ) y obtienen un modelo de bloques. Luego, los ingenieros de procesos hacen *kriging* de las recuperaciones usando unos pocos test de laboratorio. Finalmente, la recuperación de ley in situ ( $Z_R$ ) es obtenida multiplicando ambos estimadores. El procedimiento correcto es el uso de cosimulaciones de variables aditivas, tales como la ley de cabeza, ley recuperada in-situ o la recuperación en peso. Entonces, si interesa estimar las recuperaciones por bloques, se deben promediar  $Z_R$  y  $Z_H$  sobre cada bloque y dividir. Es decir, se evade la estimación errónea de una variable no aditiva usando *kriging*, mediante la estimación correcta por *kriging* de las variables aditivas y el cálculo de la variable no aditiva a nivel de bloque a través de una función. En el caso de este trabajo esa función no está definida, por lo que el resultado del mismo depende mucho del correcto ajuste de la función de varias variables.

## 2.3 Medidas de la correlación lineal entre variables

### 2.3.1 Matriz de correlación

La relación entre dos variables puede ser resumida a través de un coeficiente, llamado coeficiente de correlación lineal, que mide el grado de ajuste mediante una recta entre ambas variables. Este coeficiente tiene un valor entre -1 y 1 (estos extremos corresponden al caso en el cual las variables son exactamente proporcionales entre sí, con un coeficiente de proporcionalidad negativo o positivo, respectivamente). Cuando existen más de dos variables, se puede construir una matriz de correlación. En la intersección de la fila  $i$  con la columna  $j$ , se coloca el valor del coeficiente de correlación entre las variables  $x_i$  y  $x_j$ . En la Tabla 1 se muestra un ejemplo de una matriz de correlación.[1]

Tabla 1: Ejemplo de matriz de correlación

	Variable 1	Variable 2	Variable 3
Variable 1	1.00	0.26	0.58
Variable 2	0.26	1.00	0.48
Variable 3	0.58	0.48	1.00

### 2.3.2 Nube de dispersión

Esta nube consiste en visualizar los valores de una variable en función de otra, lo cual requiere que ambas variables hayan sido medidas en los mismos sitios. Sirve para ver la relación par a par de ambas variables, así como para detectar datos atípicos.[1]

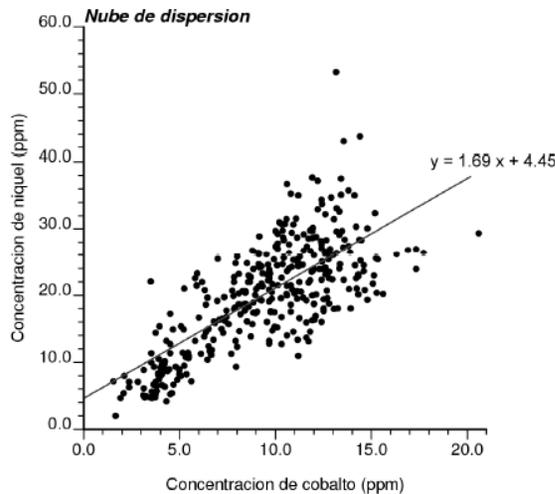


Gráfico 1: Ejemplo de nube de dispersión o correlación.  
Fuente: Xavier Emery, 2011, "Geoestadística".

## 2.4 Unidades de estimación

Corresponden a diferentes volúmenes dentro de un yacimiento definidos con el fin de obtener mejores resultados en la estimación al realizar el análisis variográfico de manera diferenciada. Dicha separación se lleva a cabo usando criterios geológicos, estadísticos y espaciales.

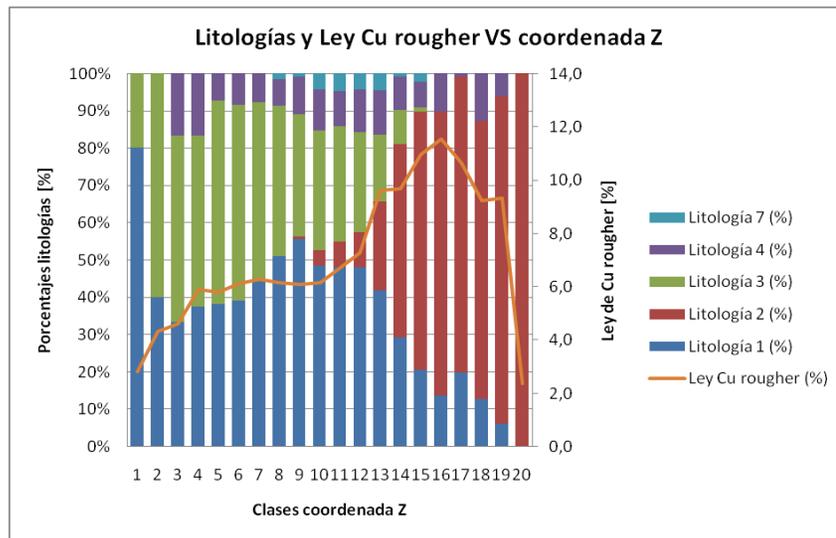
### 2.4.1 Criterio geológico

A partir de las características geológicas de las cuáles se disponga se tiene una idea preliminar de la definición de unidades. Este criterio se sustenta fuertemente en la experiencia y sirve principalmente para reafirmar relaciones evidenciadas con el criterio estadístico.

### 2.4.2 Criterio estadístico

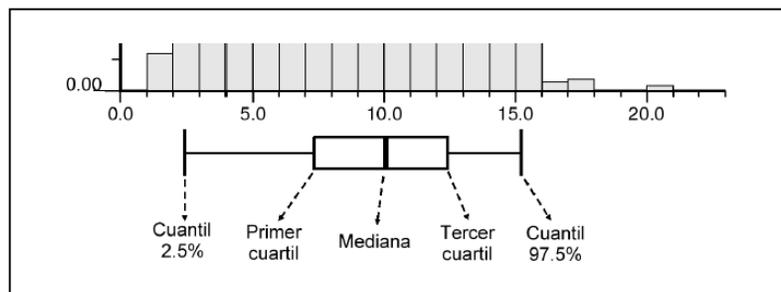
Corresponden a herramientas utilizadas para comparar poblaciones de datos. Si bien son herramientas más concretas, deben ser complementadas con los dos otros criterios para la obtención de resultados satisfactorios. Los que se utilizan en este estudio son:

- Estadística descriptiva básica por característica geológica: media, varianza, histogramas, etc.
- Gráficos de proporciones de las 3 características geológicas y deriva espacial de la variable ley de Cu *rougher*: En estos gráficos se trata de visualizar si alguna de las características geológicas controla el comportamiento de la variable ley de Cu de concentrado *rougher* en el espacio. Se trata de gráficos con dos ejes verticales, en los que se muestra la proporción de la característica geológica en conjunto con la ley promedio de Cu del concentrado *rougher*, ambas variables en función de la coordenada, como se muestra en el Gráfico 2.



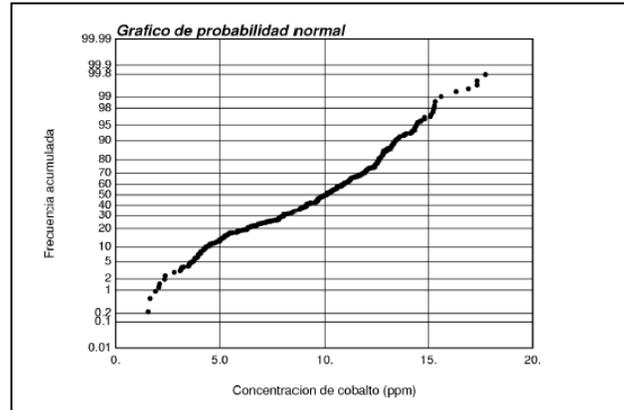
**Gráfico 2: Ejemplo de gráfico de derivas de ley de Cu rougher y proporciones espaciales**

- Diagramas de caja o *boxplots*, donde en un solo eje se representan cinco cuantiles: Los cuantiles 2.5% y 97.5%, el primer y tercer cuartil y la mediana. El diagrama permite resumir características de la distribución, tales como simetría y dispersión. En la Ilustración 1 se muestra un ejemplo de *boxplot*. [1]



**Ilustración 1: Ejemplo de boxplot**  
Fuente: Xavier Emery, 2011, "Geoestadística".

- *Probability plots*, en ellos se compara una distribución de datos experimental con una de referencia, que en general corresponde a una normal o lognormal. De esta forma se puede determinar si un conjunto de datos se comportan como parte de la misma población. En el Gráfico 3 se muestra un ejemplo de *probability plot*, donde se compara datos de concentración de Cobalto vs una distribución normal.[1]



**Gráfico 3: Ejemplo de probability plot**  
Fuente: Xavier Emery, 2011, "Geoestadística".

### 2.4.3 Criterio espacial

A medida que se definen las unidades de estimación es necesario corroborar los resultados mediante un criterio espacial. Si bien ciertas unidades pueden corresponder a volúmenes no conexos, no es práctica la definición de unidades demasiado dispersas. Por lo tanto, el criterio espacial también entra en juego entre la elección de las características geológicas que definen las unidades de estimación. Al final de este proceso es necesario realizar un suavizamiento de los volúmenes, de modo que la mezcla entre diferentes unidades sea la menor posible.

### 2.4.4 Metodología de indicadores para variables categóricas

El *kriging* de indicadores corresponde a un método de estimación aplicado a datos binarios, llamados indicadores, que codifican probabilidades de pertenecer a un tipo de roca. La metodología aplicada a la estimación de variables categóricas utilizada en la realización de este estudio es la siguiente:

- Se asume que se tiene un número  $K$  de categorías exhaustivo y mutuamente exclusivo, es decir, a todo punto se le puede asignar una y sólo una categoría del conjunto  $s_1, \dots, s_K$ .
- Se parte codificando cada punto muestreado y asignándole un vector de  $K$  indicadores (0 si la categoría  $k$ -ésima no está presente y 1 si lo está):

$$I_k(\mathbf{u}; s_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } s_k \text{ está presente en } \mathbf{u} \\ 0 & \text{si } s_k \text{ no está presente en } \mathbf{u} \end{cases} \quad \text{con } k = 1, \dots, K$$

- El indicador se interpreta como la probabilidad de una categoría de prevalecer en un punto del espacio

- Se calcula el variograma de indicadores para cada categoría  $k$ , utilizando el valor del indicador en cada punto muestreado. La fórmula para calcular el variograma de indicadores de las categorías es la siguiente:

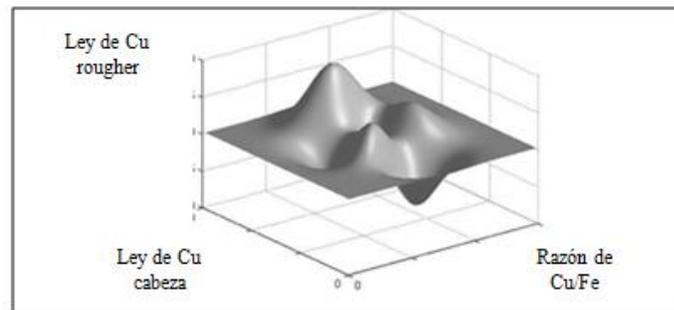
$$\hat{\gamma}_I(h; s_k) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} [I(u; s_k) - I(u + h; s_k)]^2 \quad k = 1, \dots, K$$

**Ecuación 1: Fórmula de variograma de indicadores**

- Se lleva a cabo la estimación del indicador en cada punto del espacio y para cada categoría mediante *kriging* simple u ordinario.
- La suma de los indicadores en un punto debe ser igual a 1, ya que corresponde a una probabilidad. Por lo tanto, se normalizan los indicadores en cada posición estimada.
- Finalmente, la categoría que se asigna a cada posición se condiciona por las proporciones globales de las respectivas categorías. Esto se aplica ordenando de manera descendente las categorías según su importancia para el negocio (en este caso por el valor de la ley de Cu *rougher*). Luego, a las posiciones que posean los mayores valores de los indicadores y mantengan la proporción global se les asigna la pertenencia a tal categoría.

## 2.5 Función multivariable

Se pretende definir una función multivariable de la ley de concentrado *rougher*, cuyo vector de entrada sea un vector que tenga como componentes a aquellas variables que presentan grandes correlaciones con la ley *rougher*. En la Ilustración 2 se representa la idea que hay detrás de la definición de una función multivariable, considerando que sólo 2 de las variables estudiadas están correlacionadas con la ley de concentrado *rougher*.



**Ilustración 2: Representación del concepto de función multivariable**

Para la definición de función se considera la siguiente metodología tratada por Klemelä [4] respecto a la determinación de este tipo de funciones de  $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ .

## 2.6 Kernel smoothing

Una manera de estimar densidades, basada en el cálculo de promedios ponderados, es mediante la utilización de un *Kernel*. Este método de aproximación utiliza una media móvil ponderada, con pesos que declinan cuando los valores observados se alejan del valor a estimar. Para calcular el valor estimado  $S(x_i)$ , la observación  $j$ -ésima recibe el peso:

$$w_{ij} = \frac{c_i}{\lambda} d\left(\frac{|x_i - x_j|}{\lambda}\right)$$

Ecuación 2: Fórmula ponderador de Kernel Smoothing

Donde  $d(\cdot)$  es una función,  $\lambda$  es una constante de ajuste llamada ancho de banda, y  $c_i$  es una constante de normalización de tal manera que los pesos sumen 1 para cada  $x_i$  estimado.

## 2.7 Estimación multivariable

Cuando se cuenta con información de más de una variable regionalizada sobre una zona, se puede llevar a cabo un estudio conjunto de todas las variables y sus relaciones espaciales, y de esa forma utilizar la información aportada por las variables auxiliares en la realización de un estudio más elaborado sobre la variable de interés principal.

### 2.7.1 Variografía multivariable

#### 2.7.1.1 Variogramas directos y cruzados. [1]

Para el caso multivariable es necesario calcular variogramas directos y cruzados, los primeros miden la correlación espacial de una variable consigo misma, mientras que los segundos miden la dependencia espacial de la variable en función de las demás. El variograma cruzado entre las funciones aleatorias  $Z_i$  y  $Z_j$  para un vector  $h$  se define como:

$$\begin{aligned}\gamma_{ij} &= \frac{1}{2} cov\{Z_i(x+h) - Z_i(x), Z_j(x+h) - Z_j(x)\} \\ &= \frac{1}{2} E\{[Z_i(x+h) - Z_i(x)][Z_j(x+h) - Z_j(x)]\}\end{aligned}$$

Ecuación 3: Variograma cruzado

El variograma simple o directo corresponde al caso  $i = j$ . De esa forma se puede definir la matriz de variogramas:

$$\Gamma(h) = [\gamma_{ij}(h)]_{i,j=1\dots N}$$

Ecuación 4: Matriz de variogramas

Los variogramas simples y cruzados tienen las siguientes propiedades:

- Simetría:  $\gamma_{ij}(h) = \gamma_{ji}(h)$  y  $\gamma_{ij}(h) = \gamma_{ij}(-h)$
- Signo: Los variogramas simples son funciones positivas, pero los variogramas cruzados no lo son necesariamente.
- Desigualdad de Cauchy-Schwarz:  $\forall i, j \in \{1 \dots N\}, \gamma_{ii}(h)\gamma_{jj}(h) \geq |\gamma_{ij}(h)|^2$

### 2.7.1.2 Modelo Lineal de correogionalización [1]

Los variogramas simples y cruzados de un conjunto de variables no pueden modelarse independientemente, pues entre ellos existen restricciones matemáticas (en particular, la matriz  $\Gamma(h)$  debe ser simétrica y de tipo positivo para todo vector  $h$ ). En la práctica, para satisfacer estas restricciones, se recurre al llamado *modelo lineal de correogionalización*, que generaliza el concepto de modelo anidado al caso multivariable.

Se supone que los variogramas simples y cruzados son combinaciones de un mismo conjunto de modelos de base:

$$\forall i, j \in \{1 \dots N\}, \gamma_{ij}(h) = \sum_{u=1}^S b_{ij}^u g_u(h)$$

o sea, matricialmente

$$\Gamma(h) = \sum_{u=1}^S B_u g_u(h)$$

**Ecuación 5: Modelo lineal de correogionalización**

donde  $\Gamma(h) = [\gamma_{ij}(h)]_{i,j=1\dots N}$  es la matriz de los variogramas simples y cruzados,  $g_u(h)$  es un modelo básico de variograma y  $B_u = [b_{ij}^u]_{i,j=1\dots N}$  se llama *matriz de correogionalización*. Una condición suficiente para que el modelo así definido sea matemáticamente válido es que cada una de las matrices de correogionalización  $\{B_u, u = 1 \dots S\}$  sea simétrica de tipo positivo. Esto es muy fácil de controlar: todos los valores propios de  $B_u$  deben ser positivos o nulos. En el caso de dos variables ( $Z_1$  y  $Z_2$ ), la condición de positividad se cumple si:

$$\forall u \in [1, S], |b_{12}^u| \leq \sqrt{b_{11}^u b_{22}^u}$$

**Ecuación 6: Condición de positividad**

Esta desigualdad implica que un modelo básico que aparece en el variograma cruzado con una meseta no nula, presenta forzosamente una meseta no nula en los dos variogramas simples. En la práctica, el usuario tiene que definir el número y el tipo de modelo anidado que desea utilizar para el ajuste de los variogramas experimentales. Luego, tiene que buscar los parámetros

(alcances, matrices de correogionalización) que conducen a un buen ajuste, verificando que se cumple la desigualdad anterior para cada modelo anidado.

En el caso de tres o más variables, el chequeo es más difícil, puesto que la desigualdad anterior ya no es suficiente para asegurar que las matrices de correogionalización sean de tipo positivo, sino que se debe calcular sus valores propios para comprobar si son positivos o no.

### 2.7.1.3 Varfit

Este programa se utiliza para ajustar de manera semi-automática los variogramas experimentales calculados para una variable regionalizada, mediante la minimización de las diferencias cuadráticas y de tal manera que define un modelo variográfico lícito. El proceso que se lleva a cabo es de carácter iterativo, y en cierto grado, busca imitar lo que hace un geoestadístico con experiencia a la hora de modelar un variograma experimental. Además, posee la ventaja de realizar el ajuste para las 3 direcciones de manera simultánea y permitir al usuario fijar las componentes del variograma que sean necesarias (mesetas, efecto pepa y alcances), dándole al ajuste el carácter de semi-automático y obligando a un grado mayor de supervisión.[6]

### 2.7.2 Simulación multivariable

Cuando los métodos de simulación condicional son extendidos al ámbito multivariable, entonces se habla de co-simulaciones. A continuación se presenta la receta utilizada para llevar a cabo una simulación secuencial conjunta:

- Transformar los datos desagrupados a Gaussianos
- Se parte definiendo una secuencia aleatoria sobre todos los sitios a simular. Luego en cada sitio:
  - Buscar los datos condicionantes y ya simulados cercanos, para todas las variables.
  - Cuando se trata de una sola variable se realiza un *kriging* simple, calculándose la media condicional  $y^*$  y la varianza de *kriging*  $\sigma^2_{SK}$ . Luego, extrae un valor de la distribución condicional normal no estándar  $N(y^*, \sigma^2_{SK})$  por Monte-Carlo.
  - En el caso multivariable existen diferentes aproximaciones de las variables secundarias.
    - Independiente: Cada variable es simulada independientemente, aplicando *kriging* simple varias veces.
    - Colocalizado: Cada variable es simulada sucesivamente, usando todas las variables anteriores en la misma ubicación como datos condicionantes.
    - Stepwise: Las variables son transformadas de una manera condicional paso a paso y son transformadas inversamente en el orden contrario, para preservar la perfecta correlación. Las variables transformadas son esencialmente simuladas independientemente.
    - Full Cokriging: Se utiliza un modelo de correogionalización para simular las variables con una estructura de correlación específica, en este caso se requiere que todos los variogramas sean ajustados con un modelo de correogionalización lícito definido positivo.

- Transformación inversa de todos los valores simulados
- Repetir el procedimiento completo con un número semilla aleatorio diferente.

### 2.7.3 USGSIM [7]

Este programa es una implementación flexible, testeada y documentada de simulaciones gaussianas secuenciales. Permite cosimular múltiples variables en diferentes tipos de roca simultáneamente. Es un programa del estilo de *Gslib*, en el cual los parámetros se ingresan en un archivo de texto, donde se organizan en bloques. Entre tales bloques, los que se utilizan se describen a grandes rasgos a continuación:

- MAIN: En él se define el número de realizaciones, el número de variables a simular y la grilla de bloques.
- SRCH: En él se especifican las opciones de búsqueda tales como número de datos por variable, radios de búsqueda, etc.
- VARG: En él se ingresan los modelos variográficos, por tipo de roca y por variable.
- DATA: En este bloque se ingresa el nombre del archivo con datos condicionantes.
- TRAN: En él se especifican los valores mínimos y máximos de las variables simuladas por tipo de roca para llevar a cabo la transformación inversa de la función anamorfosis gaussiana
- ROCK: En este bloque se ingresa el archivo con el modelo de roca y los tipos de roca que serán considerados en la simulación. Además, la grilla de este modelo debe ser la misma en la cual se lleva a cabo la simulación.
- MULT: En él se ingresan las opciones de simulación multivariable, tales como el tipo de simulación que se utilizará y las matrices de correlación por tipo de roca.

Tabla 2: Bloque de parámetros principal USGSIM

MAIN block of parameters.

Line		
1	START OF MAIN:	
2	1	-number of realizations to generate
3	2	-number of variables being simulated
4	78412	-random number seed
5	260 1.0 1.0	-nx,xmn,xsiz
6	300 1.0 1.0	-ny,ymn,ysiz
7	1 0.5 1	-nz,zmn,zsiz
8	usgsim.out	-file for simulation output
9	0	-output format: (0=reg, 1=coord, 2=bin)
10	1	-debugging level: 0,1,2,3
11	sgsim.dbg	-file for debugging output

Tabla 3: Bloque de parámetros de búsqueda

SRCH block of parameters.

Line				
1	START OF SRCH:			
2	20			-number of data to use per variable
3	1			-multiple grid search (0=no, 1=yes)
4	0	3		-octant search (0=no, 1=yes), number
5	500.0	500.0	500.0	-maximum search radii (hmax,hmin,vert)
6	0.0	0.0	0.0	-angles for search ellipsoid

Tabla 4: Bloque de parámetros variográficos

VARG block of parameters; note for full cokriging, an LMC must be input.

Line						
1	START OF VARG:					
2	9					-number of variograms
3	1	1				-rock type, variable 1, variable 2
4	1	0.0				- nst, nugget effect
5	1	1.0	90.0	0.0	0.0	- it,cc,ang1,ang2,ang3
6			100.0	25.0	25.0	- a_hmax,a_hmin,a_vert

## 2.8 GamSim

Corresponde a un programa del formato *GSlib*, el cual se utiliza para llevar a cabo el cálculo de variogramas experimentales en grillas densas de datos y, a diferencia del programa *Gamv*, tarda

considerablemente menos en esta tarea. A lo largo de este estudio se utiliza especialmente en la etapa de verificación de la reproducción de variogramas.

## 2.9 Accuracy plots

Se trata de nubes de dispersión utilizadas para validar la incertidumbre local de un modelo de simulación respecto a la realidad. Se parte determinando la densidad de probabilidad local de la variable en cada sitio con dato, a partir de los datos circundantes restantes. Luego, para diferentes probabilidades  $p_i \in [0,1]$  se evalúa en las funciones de distribución definidas determinando un intervalo de confianza en cada posición. Finalmente, se compara la proporción de datos del modelo de simulación que efectivamente caen dentro del intervalo de confianza definido por todos los  $p_i$ , y se grafican en forma de nube de correlación. En el Gráfico 4 se muestra un ejemplo de *accuracy-plot*, en el cual la incertidumbre local se adecúa casi perfectamente a la realidad. En aquellos casos donde los puntos se ubican sobre la diagonal, tal como en el Gráfico 5 la incertidumbre local es sobreestimada, y por lo tanto se dice que el modelo es conservador, mientras que como se observa en el Gráfico 6, la incertidumbre puede ser subestimada, caso en el cual se obtiene un modelo demasiado optimista respecto a la incertidumbre.[1]

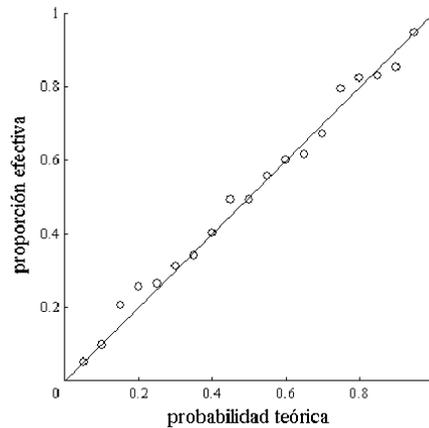


Gráfico 4: Ejemplo de accuracy plot incertidumbre local bien modelada

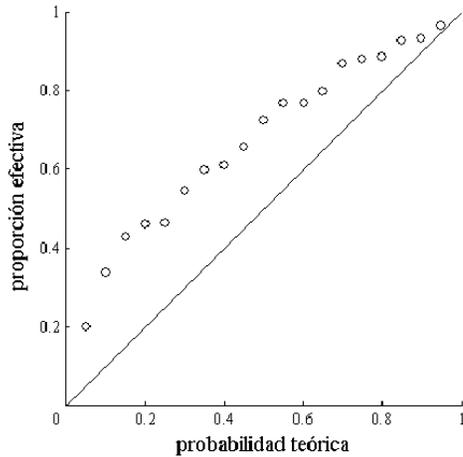


Gráfico 5: Ejemplo de accuracy plot con sobreestimación de la incertidumbre local

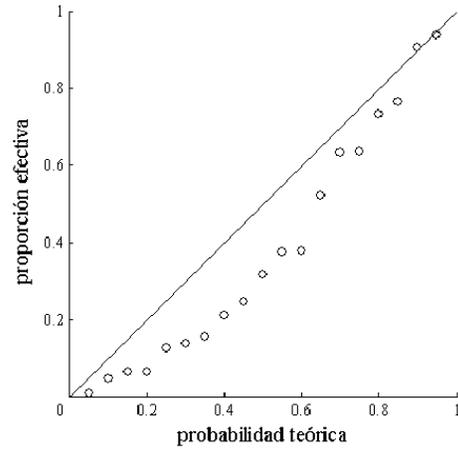


Gráfico 6: Ejemplo de accuracy plot con subestimación de la incertidumbre local

## 2.10 Jack-Knife

Corresponde a una técnica de verificación de la adecuación entre la realidad y los parámetros modelados. En primer lugar, se aparta aleatoriamente cierto porcentaje de los datos condicionantes (del orden del 10%). Luego, usando el resto de los datos se llevan a cabo todas las etapas necesarias de modelamiento de parámetros tales como variogramas y radios de búsqueda. Finalmente, se compara mediante diferentes indicadores los resultados de las realizaciones en los sitios donde se ubican los datos que fueron apartados en un principio [1]. A continuación se presentan algunos indicadores de la adecuación de las realizaciones:

- Insesgo global, el cual se mide mediante la diferencia de las medias de las leyes simuladas y reales. El valor más cercano a cero indica un menor sesgo global.
- Insesgo condicional, el cual se representa con la pendiente de la regresión lineal de los datos de leyes estimadas y leyes reales. Mientras más cercana sea ésta a 1, mayor es el insesgo condicional.
- Correlación de los datos, el que se cuantifica mediante el  $R^2$ . Aquel con el coeficiente más cercano a 1, es el de mayor correlación.

## 2.11 Escalamiento

En esta etapa del trabajo se busca sentar las bases para la futura realización de un escalamiento de los datos estimados de ley de flotación *rougher* de pruebas de laboratorio a escala industrial. Para ello es necesario determinar los aspectos en los que las pruebas de laboratorio no reproducen lo que ocurre en la planta. Como primera aproximación al escalamiento, a continuación se resumen los antecedentes recopilados para diferentes temas que impactan en planta de manera diferente que en laboratorio:

### 2.11.1 Arcillas

El término arcilla se refiere a un material ocurrido naturalmente compuesto principalmente de minerales de grano fino, el cual es generalmente plástico ante apropiadas condiciones de agua y se vuelve duro al secarlo o quemarlo. Aunque las arcillas contienen filosilicatos habitualmente, pueden contener otros materiales que impartan plasticidad y dureza cuando sean secadas o quemadas. Fases asociadas a las arcillas pueden incluir materiales que no aporten plasticidad y materia orgánica. [8]

Willy Kracht [9] menciona cómo la presencia de arcillas afecta negativamente a la flotación, pues éstas:

- Reducen la selectividad y recuperación, esta última debido a la formación de una capa de lamarcillas que recubre a partículas y burbujas desfavoreciendo la unión partícula-burbuja.
- Aumentan el consumo de reactivos por afinidad mayor con éstos.
- Generación de espumas de mala calidad que afectan la recuperación. El tipo de espuma formada depende del tipo de arcilla. Pudiéndose tener espumas estables pero muy viscosas (difíciles de descargar), espumas secas y sin textura, o ausencia total de espuma.
- Producción de gran cantidad de lamarcillas que son transferidas al concentrado afectando la ley de éste (reducción de selectividad).

Por todas las razones anteriores, no se puede realizar un escalamiento consistente sin considerar las arcillas que presenta el mineral que ingresa a flotación y de alguna manera se debe castigar aquellas leyes de concentrado *rougher* que se encuentren en lugares de la mina con contenidos de arcilla más altos.

### 2.11.2 Razón Cu/Fe

A partir de un caso de estudio realizado en Minera Escondida por Miguel Jiménez *et al* [9], donde se evalúa el impacto en los planes de producción anuales, mensuales y semanales, de la razón Cu/Fe, se puede dimensionar el impacto que tiene en la productividad el descenso de esta razón bajo el valor 0.5. Pues según datos históricos del procesamiento de las concentradoras (desde Dic-2009 hasta Nov-2010) se determinó la ecuación que se muestra a continuación, según la cual, cuando la razón es menor a 0.5 la productividad baja drásticamente. Lo anterior, se debe a cambios reológicos en la pulpa de mineral, ya que al disminuir la razón Cu/Fe aumenta su viscosidad y causa problemas de acordonamiento en los ciclones del circuito de molienda, traspasando mineral grueso al circuito de flotación, con efectos potenciales sobre la recuperación, que en casos extremos puede provocar el rebalse de pulpa.

$$Tph = 4000 * \left(\frac{Cu}{Fe}\right) + 2900 \quad 0.2 < \frac{Cu}{Fe} < 0.5$$

Ecuación 7: Fórmula empírica de producción en función de Cu/Fe

### 3 METODOLOGÍA

Este estudio tiene como objetivo principal cuantificar el impacto de elaborar un modelo de bloques mediante un procedimiento aplicable a variables aditivas con una variable que no lo es, tal como lo es la ley de Cu de concentrado *rougher*. En teoría, las variables no aditivas no pueden ser estimadas mediante *kriging* a escala de bloque. Por ende se efectúan 2 metodologías, una que respeta la aditividad y otra que no, y ambas se realizan a soporte puntual y a escala de bloque.

La primera de las metodologías consiste en modelar una función de la ley de Cu *rougher* a partir de las variables explicativas más correlacionadas. Luego, se fabrican modelos de bloques de estas variables consistentemente, dado que sí son aditivas. Finalmente, es posible ocupar la función multivariable modelada para calcular el valor de la variable ley de Cu *rougher* en el espacio, sin violar la restricción que impone la aditividad.

La metodología errónea consiste en realizar la estimación de la ley de Cu *rougher* a escala de bloque de manera directa, infringiendo la restricción ya mencionada.

Los pasos generales para llevar a cabo esta memoria se mencionan a continuación:

#### 3.1 Análisis exploratorio de datos

- Chequear la base de datos
- Realizar estadísticas globales tanto a variables explicativas como a la ley de Cu de concentrado *rougher*
- Realizar cruce de datos de sondeos con modelo de geología
- Determinar variables explicativas

#### 3.2 Definición de Unidades de Estimación

- Utilización de criterios geológico, estadístico y espacial en la definición de UE's
- Agrupamiento preliminar de características geológicas
- Análisis estadístico exhaustivo por unidad de estimación preliminar
- Definición final de unidades de estimación

#### 3.3 Determinación de relaciones entre variables explicativa y respuesta

- Definir una función multivariable de las variables explicativas que entregue el valor de la ley de concentrado *rougher*

#### 3.4 Construcción de modelos de bloques a soporte puntual

- Construir modelo de bloque para ley *rougher* a soporte puntual directamente de cosimulaciones (M1)

- Construir modelo de bloque a soporte puntual para variables explicativas mediante cosimulaciones
- Usando la regresión multivariable y los modelos obtenidos para las variables explicativas, se obtiene modelo de ley *rougher* a soporte puntual (M2)
- Comparar los resultados de M1 y M2

### 3.5 Construcción de modelos de bloques a soporte de bloque

- Construir modelo de bloque para ley *rougher* a soporte de bloque directamente a partir de cosimulaciones (M3).
- Construir modelo de bloque a soporte puntual para variables explicativas mediante cosimulaciones.
- Rebloquear modelos de bloques de variables explicativas.
- Usando la regresión multivariable y los modelos rebloqueados, se obtiene modelo de ley *rougher* a soporte de bloque (M4).
- Comparar los resultados de M3 y M4.

### 3.6 Validación de resultados

- Validación estadística mediante boxplots.
- Validación de reproducción de la variabilidad espacial calculando variogramas de las simulaciones y comparándolos con los experimentales.
- Validación estadística en los sitios con datos mediante *scatterplots*.
- En caso de obtener un error aceptable se obtendría el modelo de ley de Cu en concentrado *rougher* buscado.

## 4 CASO DE ESTUDIO: ESCONDIDA NORTE

### 4.1 Descripción geológica del yacimiento

Escondida Norte se ubica en la Región de Antofagasta, Chile, a 170 km. al sureste de la ciudad de Antofagasta y a 3.100 m sobre el nivel del mar.

Escondida Norte es uno de los 4 principales depósitos de Cu que conforman el distrito Escondida, que además se compone de Zaldívar, Pinta Verde y Escondida, que es el de mayor envergadura y el que da el nombre al distrito. La evolución hidrotermal de estos depósitos está asociada al emplazamiento, durante el Eoceno tardío y Oligoceno temprano, de un stock intrusivo complejo compuesto de al menos tres fases intrusivas y hospedadas por andesitas del Paleoceno. Escondida Norte se ubica en el límite Este de la cordillera de Domeyko, la cual tiene un ancho de unos 50 kms, y se forma por montañas estiradas en dirección N-S y cuencas poco profundas rellenas de gravilla.

La evolución de estos sistemas porfíricos está caracterizada por la sobreposición de alteraciones y mineralizaciones pervasivas y asociadas a venillas, las cuales se pueden agrupar en 3 etapas hidrotermales principales. La etapa temprana contiene magnetita, calcopirita y bornita, con menos del 0,5% del volumen de sulfuros y una ley de Cu hipógeno menos a 0,2%. La segunda etapa hidrotermal está representada por zonas de clorita-sericita y cuarzo-sericita, las cuales contienen volúmenes de sulfuros de 0,5 a 2% y una ley de Cu que varía entre 0,4 y 0,6 %. Mientras que la última etapa hidrotermal corresponde a un evento ácido-sulfatado, donde los sulfuros de este evento conforman la sobrecarga de los sulfuros previos, por lo cual el rango de leyes de Cu primario va desde 0,6 a 1,0%. [5]



Ilustración 3: Ubicación Escondida Norte

## 4.2 Análisis exploratorio de datos

Se cuenta con una base de datos de Escondida Norte de sondajes compositados entre 14 y 16 m de largo, los cuales fueron sometidos a análisis de laboratorio para determinar el valor de una serie de variables de interés. A continuación se enumeran dichas variables:

- Ley de Cu cabeza
- Ley de Cu concentrado *rougher*
- Ley de Fe cabeza
- Ley de Fe concentrado *rougher*
- Razón Cu/Fe
- Ley de Cu oxidado
- Ley de Cu en relave
- Ley de Fe en relave
- Velocidad de sedimentación

Además, se cuenta con modelos de bloques para todo el yacimiento de las siguientes características geológicas:

- Litología
- Alteración
- Zona mineral

Por lo tanto, previo a realizar el análisis exploratorio se asigna las características geológicas proporcionadas por los modelos de bloques a cada uno de los sondajes mediante un cruce de datos, esto es, mediante un algoritmo se asocia a cada muestra de sondaje un valor de litología, alteración y mineralización, según su ubicación en el espacio. Para lo anterior, se supone la ubicación de los sondajes como la del punto central de cada uno.

#### 4.2.1 Visualización de los sondajes

En las ilustraciones se visualiza la variable ley de Cu concentrado *rougher* para los sondajes de Escondida Norte.

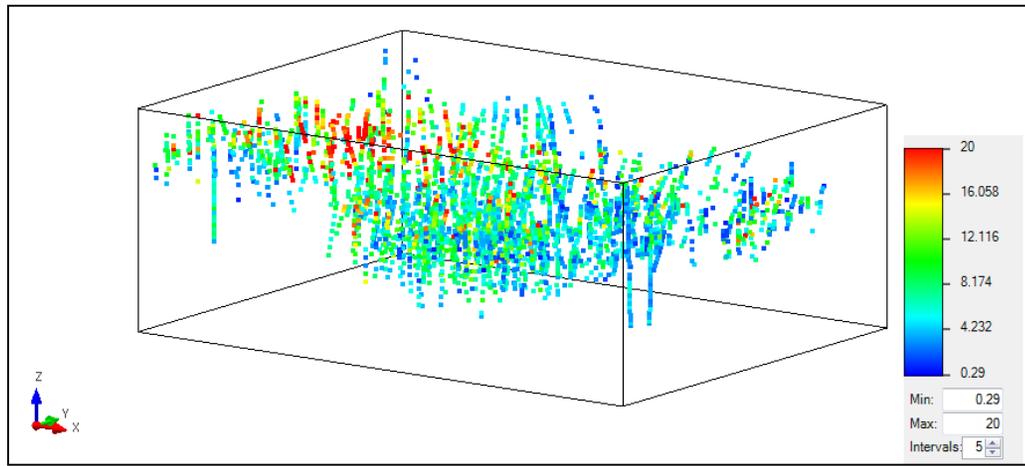


Ilustración 4: Vista isométrica sondajes Escondida Norte

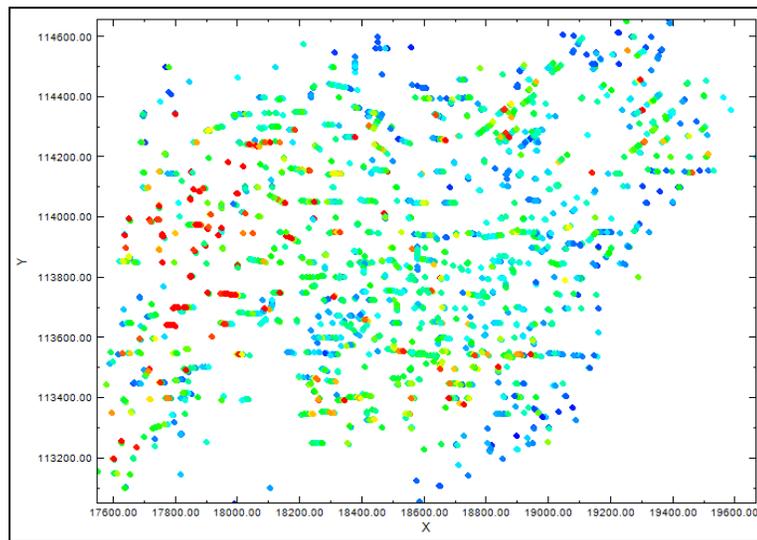
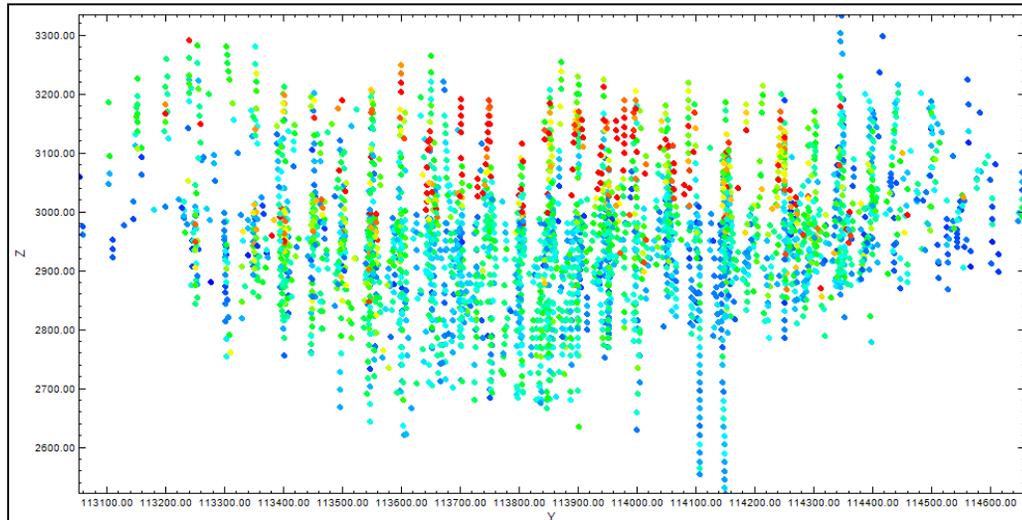
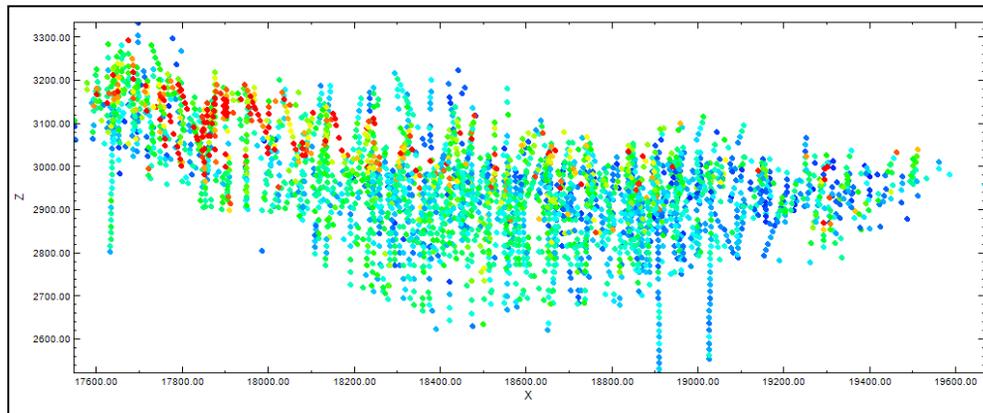


Ilustración 5: Vista en Planta sondajes Escondida Norte



**Ilustración 6: Vista perfil Oeste-Este sondajes Escondida Norte**

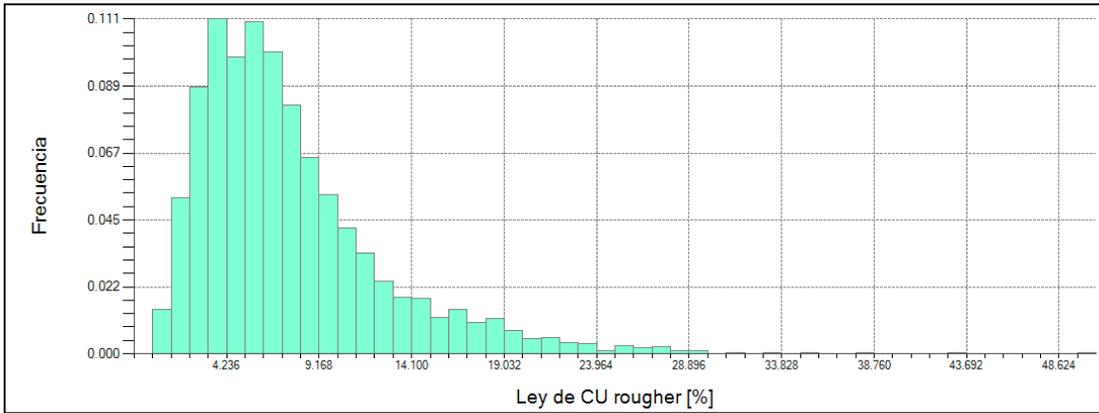


**Ilustración 7: Vista perfil Norte-Sur sondajes Escondida Norte**

En las visualizaciones se observa que el tamaño del dominio sobre el cual se trabaja es bastante extenso, aproximadamente  $2000 \times 1300 \times 800 [m^3]$ . Además, de inmediato se pueden advertir sectores del dominio que podrían definir unidades de estimación más adelante, dadas las marcadas diferencias entre los valores de variable ley de Cu *rougher*. Es así, que se presenta una zona superior de leyes altas, mientras que en general las leyes más bajas se sitúan en la base del dominio. Por otro lado, la malla de sondajes es de aproximadamente de  $100 \times 100 [m^2]$ , con un tamaño de compósito que varía entre 14 y 16 m, y con largos de sondajes variables que son del orden de los 400 [m].

#### 4.2.2 Histogramas de ley de Cu de concentrado *rougher*

En el Gráfico 7 se muestra el histograma de la variable ley de Cu de concentrado *rougher*, donde se puede apreciar preliminarmente que la variable sigue una distribución lognormal. Los histogramas para el resto de las variables se encuentran en el Anexo A-1. Para las demás variables se observa que se distribuyen de manera lognormal, con excepción de la ley de Fe cabeza y la velocidad de sedimentación, las cuales presentan distribuciones diferentes.



**Gráfico 7: Histograma Ley de Cu de concentrado rougher**

#### 4.2.3 Estadísticas básicas variables

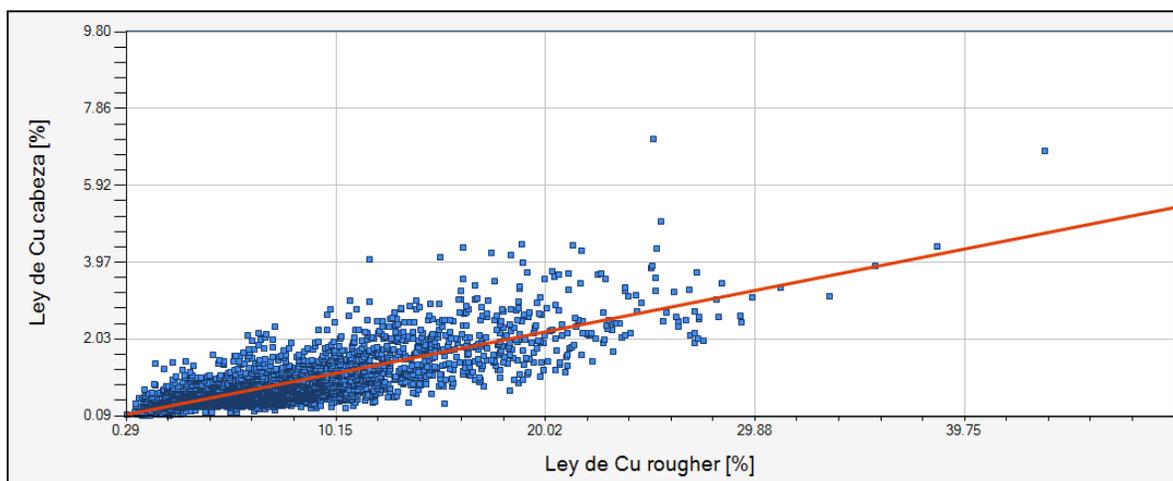
En la Tabla 5 se presentan las estadísticas básicas para la variable ley de Cu de concentrado *rougher*, en el Anexo A-2 se muestran las estadísticas para el resto de las variables.

**Tabla 5: Estadísticas básicas ley de Cu de concentrado rougher**

Ley de Cu de concentrado rougher [%]	
N° datos	3422
Media	7.61
Mínimo	0.26
Máximo	49.61
Desviación estándar	5.02
Varianza	25.2

#### 4.2.4 Correlaciones entre variables

Como se mencionó en el capítulo de metodología, es necesario determinar cuáles son las variables que tienen correlación con la variable ley de Cu de concentrado *rougher*. Por lo tanto, se generan nubes de correlación entre todas las variables y la ley de Cu de concentrado *rougher*, y se calcula la respectiva matriz de correlación. En el Gráfico 8, se muestra la nube de correlación entre las variables ley de Cu *rougher* y ley de Cu cabeza, mientras que el resto de ellas se presentan en el anexo A-3.



**Gráfico 8: Nube de correlación ley de Cu rougher VS ley de Cu cabeza**

En las nubes de dispersión se puede apreciar que las variables que muestran mejores correlaciones con la ley de Cu *rougher* son la ley de Cu cabeza, Razón Cu/Fe, ley de Cu oxidado y ley de Cu en el relave. Una vez que ya se tiene una idea de aquellas variables con mayores correlaciones, una medida más cuantitativa de la misma corresponde al coeficiente de correlación, por lo tanto se calcula una matriz de correlación con el fin de determinar cuáles son las variables que más se correlacionan con la ley de Cu *rougher*.

**Tabla 6: Matriz de correlación entre todas las variables**

	Cu-cabeza	Cu-rougher	Fe-cabeza	Cu/Fe	Cu-oxidado	Cu-relave	Fe-relave	V. Sed.	Fe-rougher
Cu-cabeza	1.00								
Cu-rougher	<b>0.79</b>	1.00							
Fe-cabeza	-0.04	-0.28	1.00						
Cu/Fe	<b>0.71</b>	<b>0.76</b>	-0.44	1.00					
Cu-oxidado	<b>0.72</b>	<b>0.59</b>	-0.05	<b>0.53</b>	1.00				
Cu-relave	<b>0.60</b>	0.41	0.03	0.35	-0.03	1.00			
Fe-relave	-0.20	-0.15	<b>0.50</b>	-0.35	0.03	0.16	1.00		
V. Sed.	0.17	0.20	-0.01	0.14	0.18	0.15	-0.03	1.00	
Fe-rougher	-0.12	-0.18	<b>0.63</b>	-0.44	0.09	-0.22	0.05	0.01	1.00

En la Tabla 6 se observa que las variables más correlacionadas linealmente con la variable ley de Cu *rougher* son la ley de Cu cabeza (0.79), ley de Cu oxidado (0.59) y razón Cu/Fe (0.76). Cabe destacar que dichas variables son escogidas de manera arbitraria como aquellas cuyo valor de coeficiente de correlación respecto a la ley de Cu *rougher* es mayor al valor de 0.5. Por lo tanto, se dejan de lado el resto de las variables para la estimación de los modelos de bloques.

#### 4.2.5 Conclusión capítulo análisis exploratorio

En este capítulo se cumple con presentar el caso de estudio, el cual se sitúa en Escondida Norte, un yacimiento de Cu ubicado en la cordillera de Domeyko, 170 kms al sureste de Antofagasta con abundantes cuerpos intrusivos. Se presenta la información disponible, que corresponde a 3,422 datos de análisis de laboratorio hechos a sondajes compositados entre 14 y 16 m. Aquellos análisis dan cuenta del valor de una serie de variables que podrían ser útiles en el desarrollo del trabajo posterior.

Posteriormente, se lleva a cabo un análisis exploratorio mediante el cual se determina que las principales distribuciones de datos corresponden a lognormales, y se calcula una serie de estadísticas para cada una de las variables presentes disponibles. Además, se visualiza la variable ley de Cu *rougher* en los sondeos, gracias a lo que se advierte una notoria diferenciación del dominio en estratos, lo que hace pensar que es necesaria la definición posterior de distintas unidades de estimación.

Finalmente, se determina cuáles son las variables que están más correlacionadas con la variable ley de Cu *rougher*, a las cuales se les apoda a partir de este punto como variables explicativas. Ellas son la ley de Cu cabeza, la ley de Cu oxidado y la razón Cu/Fe. Los criterios usados para su determinación corresponden a nubes y matrices de correlación.

### 4.3 Definición de unidades de estimación

En esta etapa se separa el yacimiento en ciertos volúmenes donde la o las variables en estudio presentan un comportamiento homogéneo. La idea es separar las poblaciones de datos que evidencien claras diferencias en su regularidad espacial. Es una etapa muy importante ya que todo el trabajo posterior de variografía se debe realizar para cada unidad de estimación (UE<sup>3</sup>) definida. Por lo tanto, se requiere que la definición de las mismas esté muy bien justificada, de tal manera que se encuentren manifiestas diferencias entre las poblaciones de datos, y por ende la repetición del trabajo no sea en vano.

#### 4.3.1 Criterios de definición de unidades de estimación

Para definir las unidades de estimación las características geológicas que se estudian son la litología, la alteración y la zona mineral. Los criterios utilizados para dicha labor son una combinación entre geológicos, espaciales y estadísticos.

##### 4.3.1.1 Criterios Geológicos

En las tablas N°7, 8 y 9 se muestran los códigos asociados a cada característica geológica. Con ellos se pueden corroborar asociaciones entre poblaciones de datos que no son muy claras o reafirmar aquellas que sí lo son.

Tabla 7: Códigos por litología

Característica geológica	Código	Definición
Litología	1	Porfido Feldespatico
	2	Porfido Riolitico (Enorte) - Porfido cuarcifero (Escondida)
	3	Andesita
	4	Brechas
	6	Gravas
	7	Pórfido Grueso (Norte)

Tabla 8: Códigos por alteración

Característica geológica	Código	Definición
Alteración	1	QSC ( Cuarzo, sericita, arcilla)
	2	SCC (Clorita, sericita, arcilla)
	3	Potasico

<sup>3</sup> A lo largo de todo el documento se utiliza esta abreviación para referirse a las Unidades de Estimación.

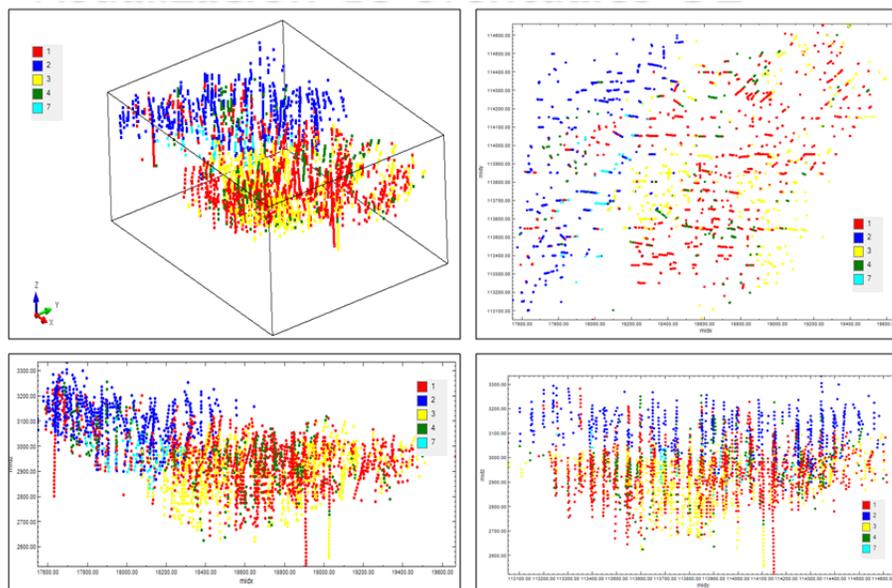
**Tabla 9: Códigos por zona mineral**

Característica geológica	Código	Definición
Zona mineral	0	Lixiviado
	1	Óxidos
	2	Cuprita / Cu Nativo
	4	Parcial Lixiviado
	5	Mixto
	6	HE (Alto Enriquecido)
	7	LE (Bajo Enriquecido)
	8	Primario (Primario)

#### 4.3.1.2 Criterios espaciales

En las siguientes figuras se despliegan los sondajes en el espacio para cada una de las características geológicas estudiadas.

##### 4.3.1.2.1 Litologías



**Ilustración 8: Despliegue de litologías en sondajes**

En este caso, se tienen 3 pórfidos (litologías 1, 2 y 7) y 2 cuerpos intrusivos de Andesita (litología 3) y de Brechas (litología 4).

### 4.3.1.2.2 Alteraciones

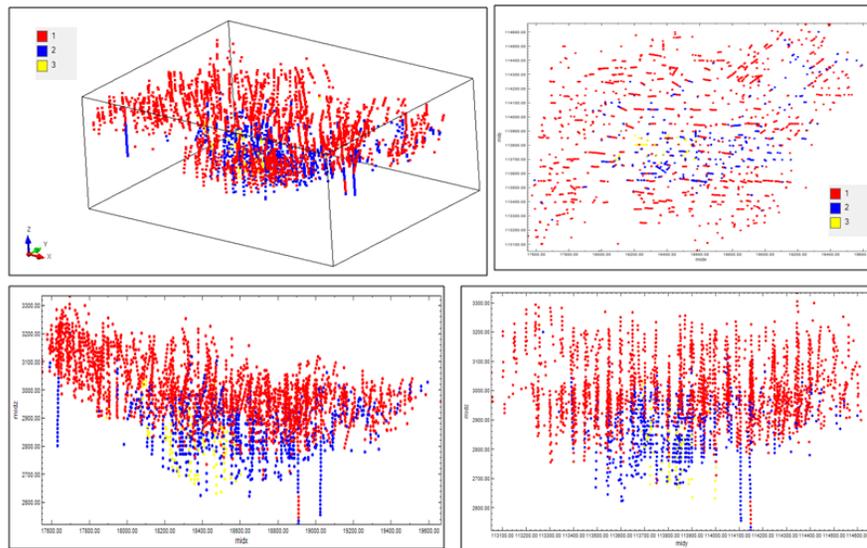


Ilustración 9: Despliegue de alteraciones en sondajes

Llama la atención en este caso la diferencia en la cantidad de datos para cada una de las alteraciones, primando notoriamente las alteraciones 1 y 2 (Sericita-Arcilla).

### 4.3.1.2.3 Zona mineral

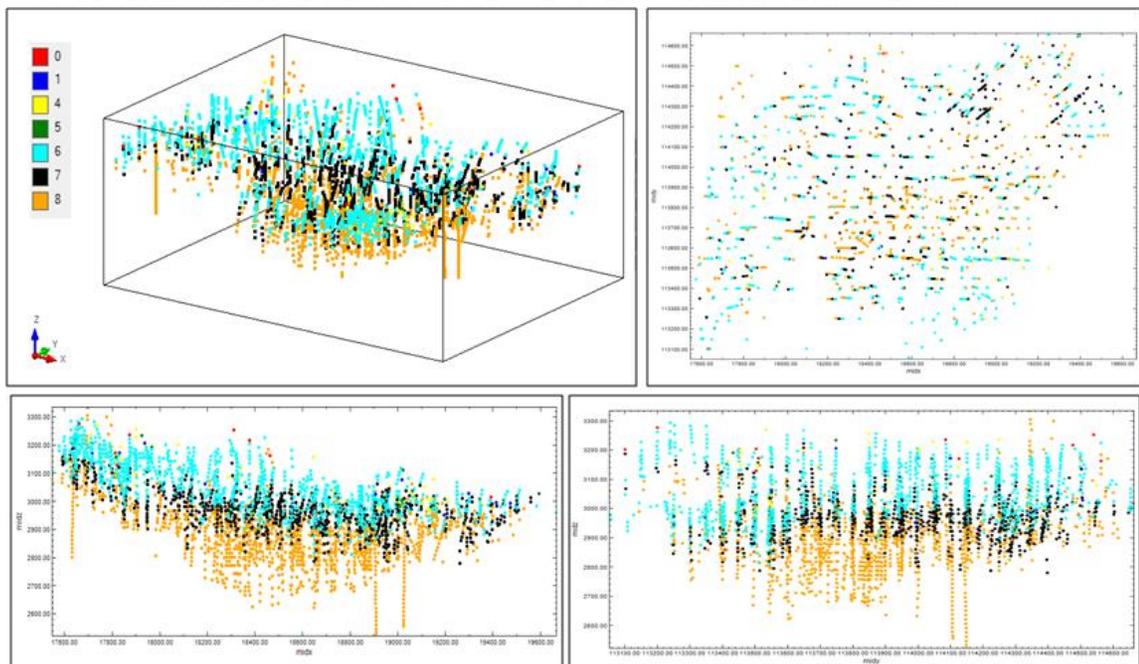


Ilustración 10: Despliegue de sondajes por zona mineral

Las zonas minerales que vale la pena considerar en el estudio son la 6, 7 y 8, que corresponden a Alto enriquecido, Bajo enriquecido y Primario, respectivamente. En este caso cada una de las zonas está muy bien delimitada en estratos bien definidos.

#### 4.3.1.3 Criterios estadísticos

Corresponden a herramientas utilizadas para comparar poblaciones de datos. Los que se utilizan en este estudio son:

- Estadística descriptiva básica por característica geológica
- Gráficos de proporciones de las 3 características geológicas y deriva espacial de la variable ley de Cu *rougher*
- Diagramas de caja o *boxplots*
- *Probability plots*

#### 4.3.2 Aplicación de criterios

##### 4.3.2.1 Estadística descriptiva básica por característica geológica

Tabla 10: Estadística descriptiva básica por litología

Ley de Cu rougher						
Litología	Nombre	Media	Desviación estándar	Número datos	Curtosis	Coefficiente asimetría
1	Pórfido Feldespático	7.53	4.86	1436	8.40	1.99
2	Pórfido Riolítico	9.56	6.02	671	0.50	0.96
3	Andesita	5.76	3.01	893	2.76	1.20
4	Brechas	8.85	6.10	329	1.21	1.24
7	Pórfido Grueso	8.38	4.16	93	7.57	2.36

En la Tabla 10 se observa que las Andesitas son las que presentan mayores diferencias con el resto respecto a media y desviación estándar. Por otro lado, la cantidad de datos del Pórfido Grueso no parece ser suficiente para un estudio robusto.

Tabla 11: Estadística descriptiva básica por alteración

Ley de Cu rougher						
Alteración	Nombre	Media	Desviación estándar	Número datos	Curtosis	Coefficiente asimetría
1	Cuarzo, Sericita, Arcilla (QSC)	8.16	5.61	2434	3.28	1.45
2	Clorita, Sericita, Arcilla (SCC)	6.14	2.59	868	1.58	0.97
3	Potasio	7.22	3.17	120	5.69	1.63

En la Tabla 11 se puede ver que las alteraciones QSC y SCC se diferencian en su media y desviación estándar, mientras que la alteración potásica, de un comportamiento intermedio, comprende una cantidad de datos muy baja para un análisis concluyente.

**Tabla 12: Estadística descriptiva básica por zona mineral**

Ley de concentrado rougher						
Mínzone	Nombre	Media	Desviación estándar	Número de datos	Curtosis	Coefficiente de asimetría
0	Lixiviado	6.8	4.8	15	-1.37	0.42
1	Óxidos	12.4	5.1	10	0.69	1.05
4	Parcial Lixiviado	8.2	4.2	49	-0.66	0.28
5	Mixto	9.1	5.1	17	-0.96	0.44
6	HE (Alto Enriquecido)	11.1	6.3	1037	2.13	1.03
7	LE (Bajo Enriquecido)	6.6	3.9	920	3.76	1.56
8	Primario	4.8	2.3	1374	-0.13	0.52

En la Tabla 12 se puede apreciar que son 3 las zonas minerales con una cantidad suficiente de datos para realizar estudios consistentes. Éstas son las zonas primaria, alto enriquecido y bajo enriquecido, las cuales presentan diferencias sustanciales entre ellas, en especial la zona de alto enriquecimiento.

#### **4.3.2.2 Gráficos de deriva espacial de ley de Cu rougher**

La finalidad de estos gráficos es estudiar de manera preliminar cómo se comporta la variable ley de Cu del concentrado *rougher* de acuerdo a las proporciones de cierta variable categórica en el espacio. A continuación se muestran los gráficos de deriva espacial de la coordenada X para cada una de las características geológicas. Además, se opta por mostrar la cantidad de datos a partir de la cuál fue calculada cada proporción como una medida de la robustez del resultado. Los gráficos para las direcciones Z e Y se encuentran en el anexo A-4.

### 4.3.2.2.1 Litologías

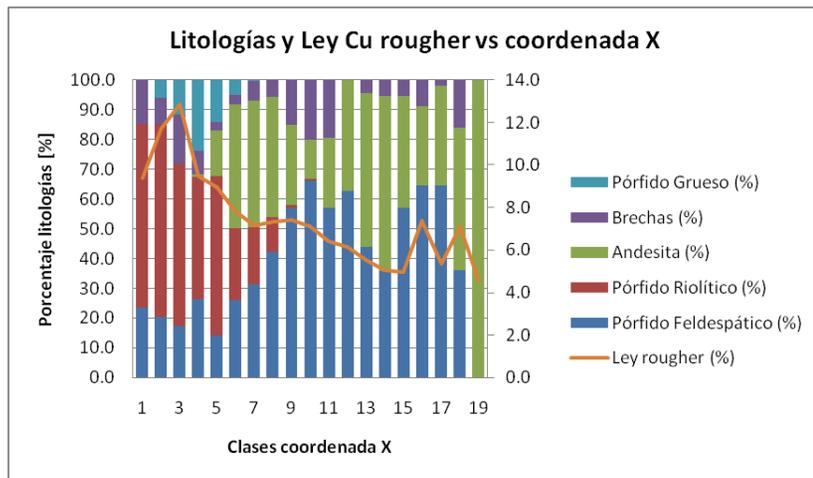


Gráfico 9: Deriva espacial y proporciones Litologías coordenada X

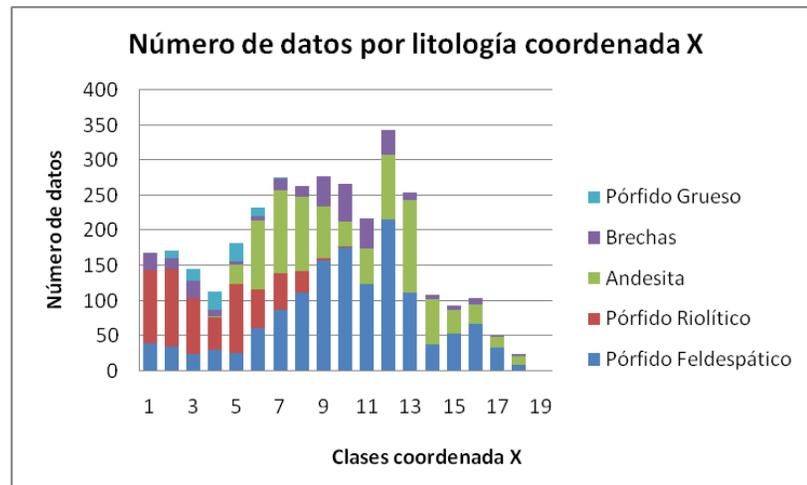


Gráfico 10: Número de datos Litologías coordenada X

Se puede apreciar en los gráficos Gráfico 9 y Gráfico 10, cómo la ley *rougher* es mayor cuando la litología Pórfido Riolítico está en una mayor proporción, mientras que disminuye con las litologías Pórfido Feldespático y Andesita. Sin embargo, para la coordenada Y (ver anexo A-4.1) el comportamiento antes mencionado no se ve reflejado de manera tan clara, lo cual se puede atribuir a que el comportamiento de la ley de concentrado *rougher* podría no estar gobernado sólo por la litología.

### 4.3.2.2.2 Alteraciones

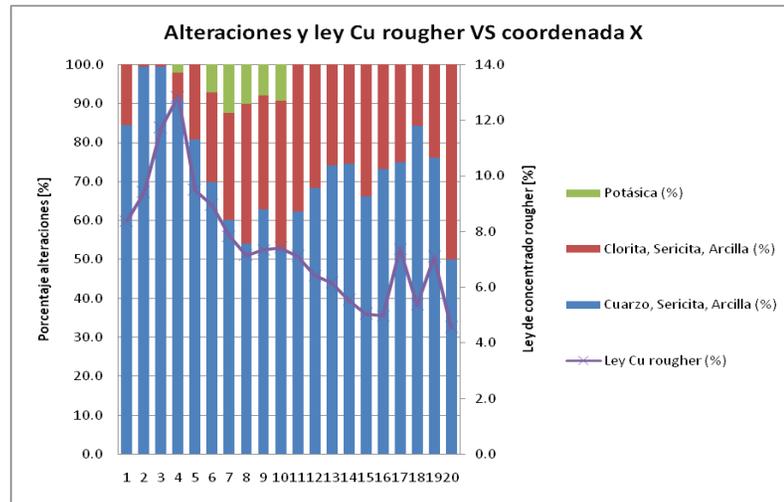


Gráfico 11: Deriva espacial y proporciones coordenada X

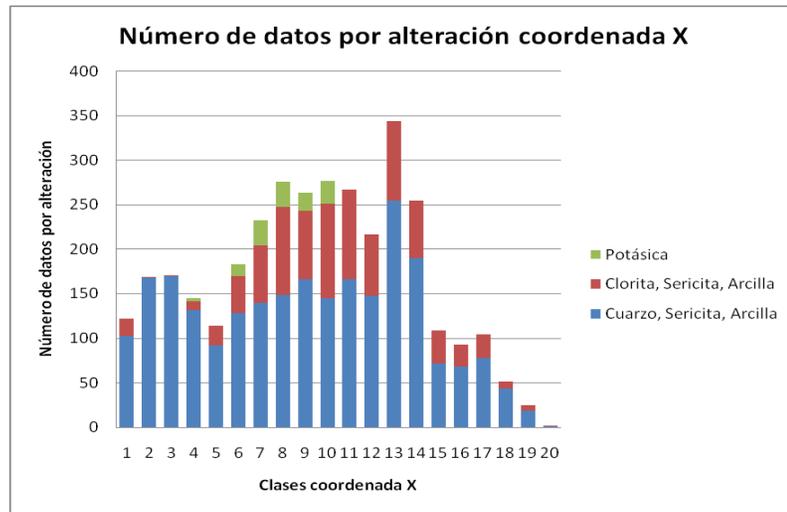


Gráfico 12: Número de datos coordenada X

Se aprecia que tanto para la coordenada X, como para la coordenada Z (ver anexo A-4.2) la alteración Cuarzo-Sericita-Arcilla es la que produce un aumento de la ley de Cu *rougher*, mientras que la alteración Clorita-Sericita-Arcilla es la que la disminuye. Sin embargo, al igual que en el caso de las litologías, ocurre que para la coordenada Y este comportamiento no es tan claro.

### 4.3.2.2.3 Zonas minerales

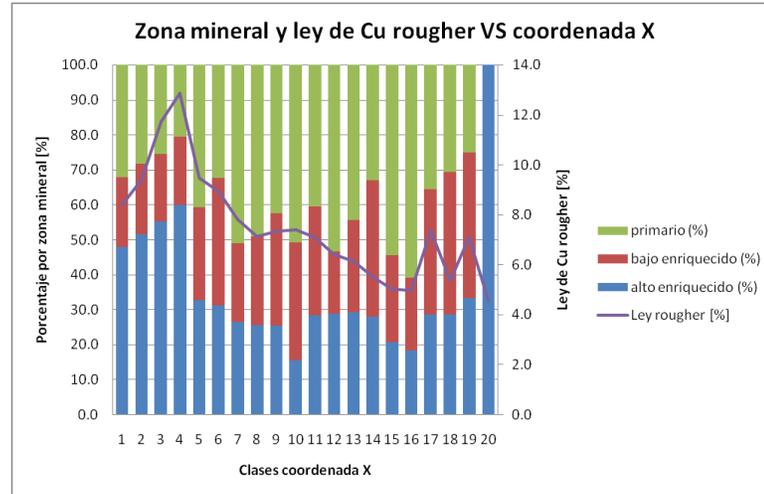


Gráfico 13: Deriva espacial y proporciones por zona mineral coordenada X

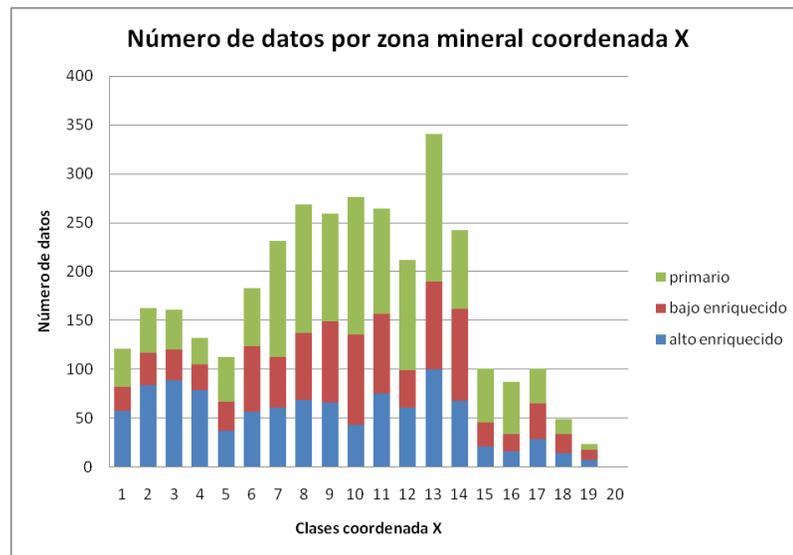


Gráfico 14: Número de datos por zona mineral coordenada X

En este caso se muestran sólo las zonas de mineral primario, alto enriquecido y bajo enriquecido, las cuales tienen la cantidad suficiente de datos para un análisis consistente. Tal como para el resto de las características geológicas, existe una zona mineral relacionada a una ley de Cu *rougher* mayor que el resto, la cual corresponde a la zona de alto enriquecimiento tal como es de esperar. Lo anterior se ve reflejado claramente para las coordenadas X y Z, mientras que para la coordenada Y no existe un comportamiento claro. Para las coordenadas Z e Y ver anexo A-4.3.

### 4.3.2.3 Boxplots

Se generan diagramas de caja o *boxplots*, con la intención de comparar de manera visual las poblaciones de datos, tanto de las variables explicativas como de la ley de concentrado *rougher*, asociándolas por característica geológica. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la variable ley de Cu de concentrado *rougher*, mientras que en el Anexo A-5 se puede encontrar los diagramas de caja para el resto de las variables.

#### 4.3.2.3.1 Litologías

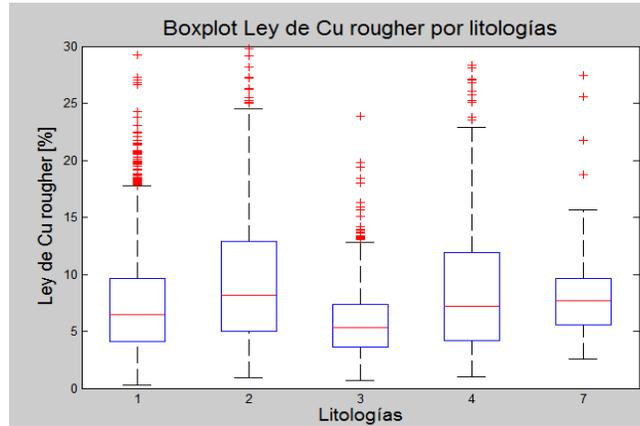


Gráfico 15: Boxplots Ley de Cu rougher por litologías

Se puede observar que las grandes diferencias entre las poblaciones están entre las litologías 3 (Andesitas), 7 (Pórfido Grueso) y el resto. Lo anterior también se observa para las variables explicativas (Ver Anexo A-5.1).

#### 4.3.2.3.2 Alteraciones

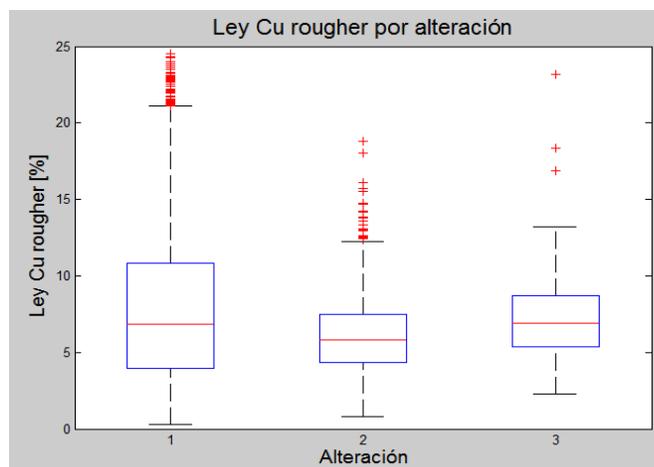


Gráfico 16: Boxplots ley de Cu rougher por alteración

En este caso la alteración 1 (Cuarzo-Sericita-Arcilla) difiere considerablemente de las 2 (Clorita-Sericita-Arcilla) y 3 (Potásica), en especial para las variables explicativas (Ver Anexo A-5.2). Cabe destacar que el número de datos disponibles para la alteración 3 (Potásica) es de sólo 120, número muy inferior comparado con el resto de las alteraciones.

#### 4.3.2.3.3 Zonas minerales

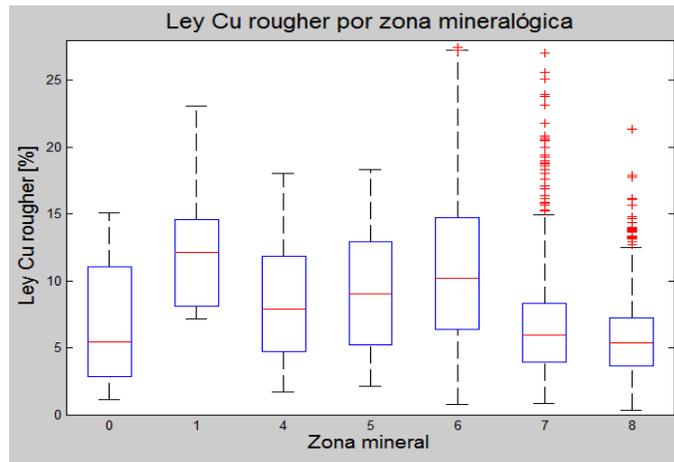


Gráfico 17: Boxplots de Ley de Cu rougher por zona mineral

En este caso las zonas minerales 6, 7 y 8 son las únicas que vale la pena considerar en el estudio debido a la cantidad de datos que poseen (Alto enriquecido, Bajo enriquecido y Primario, respectivamente). Aclarado eso, se observa que la zona mineral de alto enriquecimiento se diferencia bastante en su comportamiento con el resto, tanto para la ley de Cu *rougher* como para las variables explicativas (ver Anexo A-5.3). Lo anterior se debe a que los minerales de Cu que se presentan en esta zona corresponden mayoritariamente a Calcosina y Covelina, a diferencia de las zonas minerales Primaria y de bajo enriquecimiento, donde las especies minerales de Cu más abundantes son Calcopirita y Bornita.

#### 4.3.2.4 Probability plots

En ellos se compara una distribución lognormal con las distribuciones de las poblaciones de datos para las variables explicativas y ley de Cu *rougher*, de tal manera de poder apreciar dos cosas:

- Si se dibuja una recta, entonces los datos pertenecen a la misma población y con una distribución lognormal.
- Si dos poblaciones de datos se solapan, entonces siguen la misma distribución y conviene agruparlas para el análisis posterior.

#### 4.3.2.4.1 Litologías

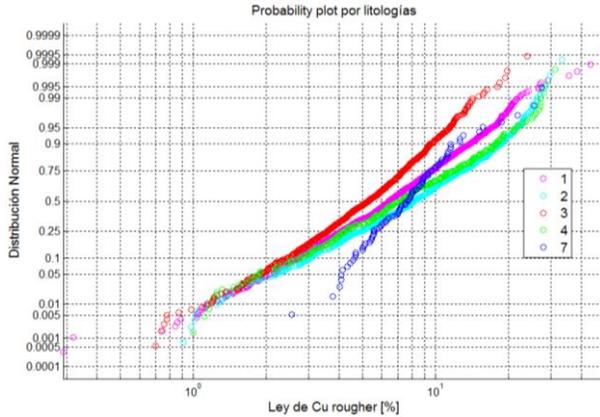


Gráfico 18: Probability plot todas las litologías

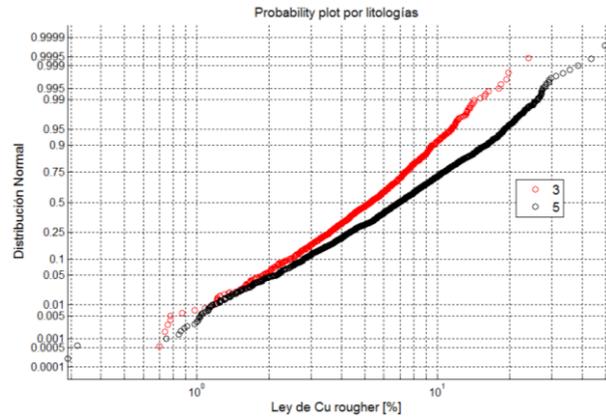


Gráfico 19: Probability plots agrupación de litologías

En el Gráfico 18 se observa que al igual que para los *boxplots*, la litología que más se diferencia corresponde a la 3 (Andesitas). Por ende, se decide agrupar las demás litologías en una sola (litología 5), la cual sigue una distribución lognormal fielmente como se aprecia en el Gráfico 19.

#### 4.3.2.4.2 Alteraciones

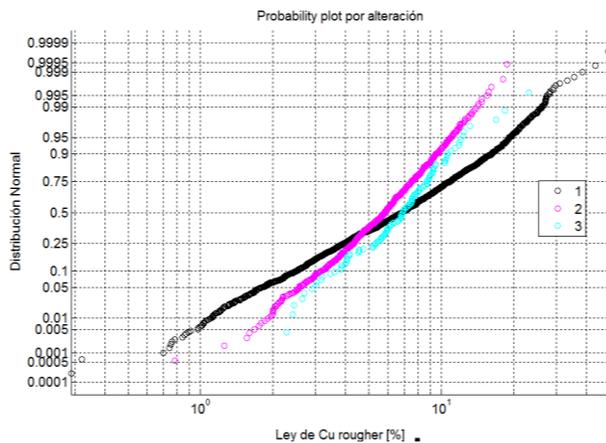


Gráfico 20: Probability plot todas las alteraciones

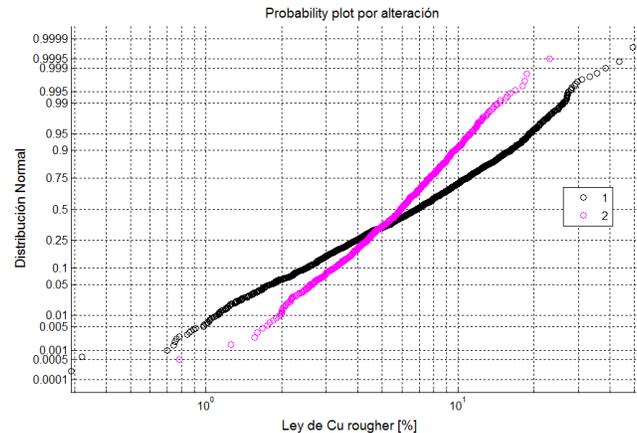


Gráfico 21: Probability plots agrupación de alteraciones

En el Gráfico 20 se aprecia que las alteraciones 2 (Clorita-Sericita-Arcilla) y 3 (Potásica) presentan una distribución bastante similar, y se diferencian claramente de la alteración 1 (Cuarzo-Sericita-Arcilla). Por lo cual, se decide unir a la alteración 2 los datos de la alteración 3, como se observa en el Gráfico 21. Además, se aprecia que ambas poblaciones de datos presentan distribuciones lognormales muy bien definidas.

#### 4.3.2.4.3 Zonas minerales

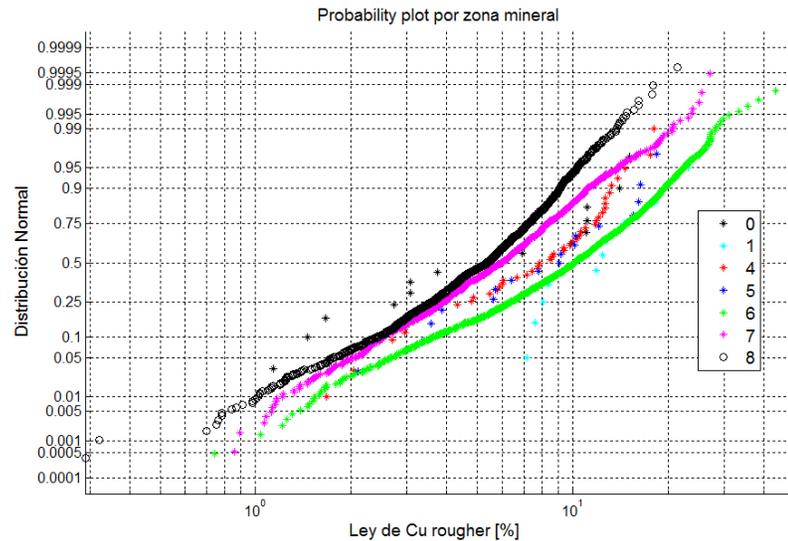


Gráfico 22: Probability plot todas las zonas minerales

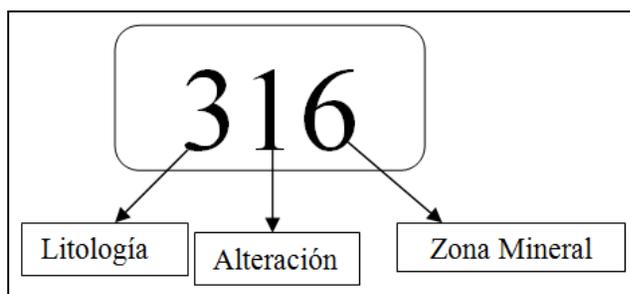
En este caso, las unidades con una cantidad de datos suficiente para la definición de unidades de estimación son la 6, 7 y 8 (Alto enriquecido, Bajo enriquecido y Primario, respectivamente). Además, se observa que las 3 definen poblaciones de datos diferentes, por lo tanto no se agrupan como en los casos anteriores.

#### 4.3.3 Definición de unidades de estimación

Se lleva a cabo un agrupamiento de algunas de las características geológicas y con ello la reducción de las posibles combinaciones entre estas características para la definición final de unidades de estimación. Lo anterior se logra utilizando las conclusiones conseguidas gracias a la aplicación de criterios como los *boxplots* y *probability plots*, como también a criterios geológicos. El agrupamiento de características geológicas es el siguiente:

- Litologías: Se agrupan en las litologías 5 (1 2 4 7) y litología 3 (Andesitas). La litología 5 se constituye a partir de las litologías Pórfido Feldespático, Pórfido Riolítico, Brechas y Pórfido Grueso. Además de considerar los criterios estadísticos, para este caso también se consideró que la mayoría de las litologías agrupadas en la nueva litología 5 corresponden a pórfidos (exceptuando las Brechas).
- Alteraciones: Se agrupan en alteración 1 y alteración 2. Esta última incluye a las alteraciones Clorita-Sericita-Arcilla y Potásica.
- Zonas minerales: Se eliminan las zonas con pocos datos, quedando con las restantes zonas minerales Alto enriquecido, Bajo enriquecido y Primario. Una razón por la cual no se agrupan las zonas minerales Bajo enriquecido y Primario, de comportamiento estadístico parecido, corresponde a que los procesos metalúrgicos aplicados posteriormente son diferentes.

Los nuevos códigos para identificar las nuevas unidades de estimación a definir, se explican en la siguiente figura:



**Ilustración 11: Códigos unidades de estimación**

Una vez que ya se reduce el número de combinaciones entre características geológicas, es necesario estudiar la robustez de las poblaciones de datos definidas. En la Tabla 13 se muestran las cantidades de datos que poseen cada una de las unidades de estimación preliminares, de esta forma se descartan del análisis posterior las UE's 326 y 526 debido a su escasa cantidad de datos.

**Tabla 13: Número de datos por UE preliminar**

Unidad	Nº datos	Unidad	Nº datos
316	115	516	913
<b>326</b>	<b>2</b>	<b>526</b>	<b>7</b>
317	140	517	591
327	83	527	106
318	109	518	482
328	418	528	365

Se generan nuevamente *probability plots* para ver la similitud entre las poblaciones definidas y de esa manera poder realizar nuevos agrupamientos de ellas.

### 4.3.3.1 Probability plots para unidades de estimación preliminares

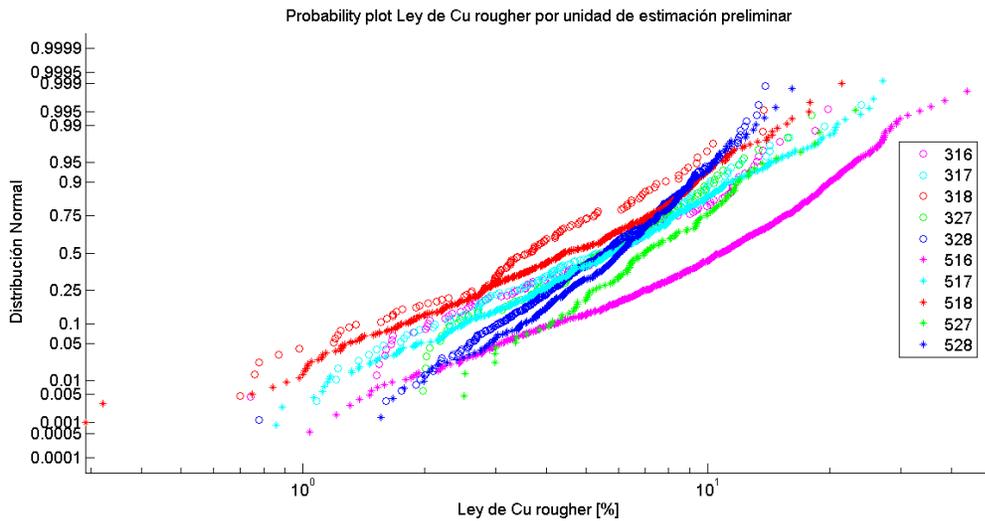


Gráfico 23: Probability plot ley Cu rougher por UE preliminares

En el Gráfico 23 se visualiza que la UE 516 se diferencia considerablemente del resto de las unidades. Además, se puede observar que para los pares de unidades 317-517, 318-518, 327-527 y 328-528 existe un solapamiento importante entre sus distribuciones, y por lo tanto se decide dejar de lado la diferenciación por litología en aquellos casos, dando paso a la definición de las unidades 17, 18, 27 y 28, respectivamente. Esto es reafirmado por los *probability plots* para las variables explicativas (ver Anexo A-6), donde además se aprecia que la UE 316 define una unidad aparte.

### 4.3.3.2 Probability plots para unidades de estimación finales

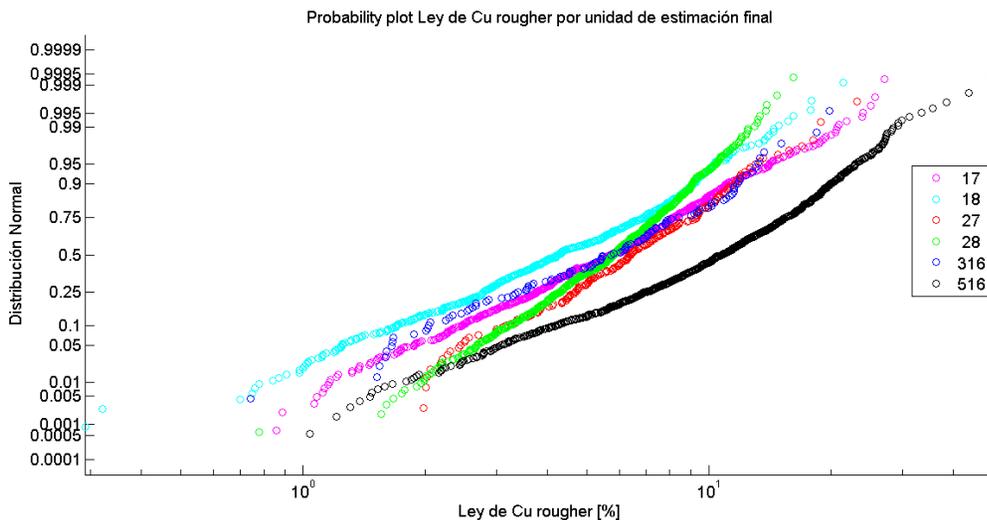


Gráfico 24: Probability plot para Cu rougher por UE finales

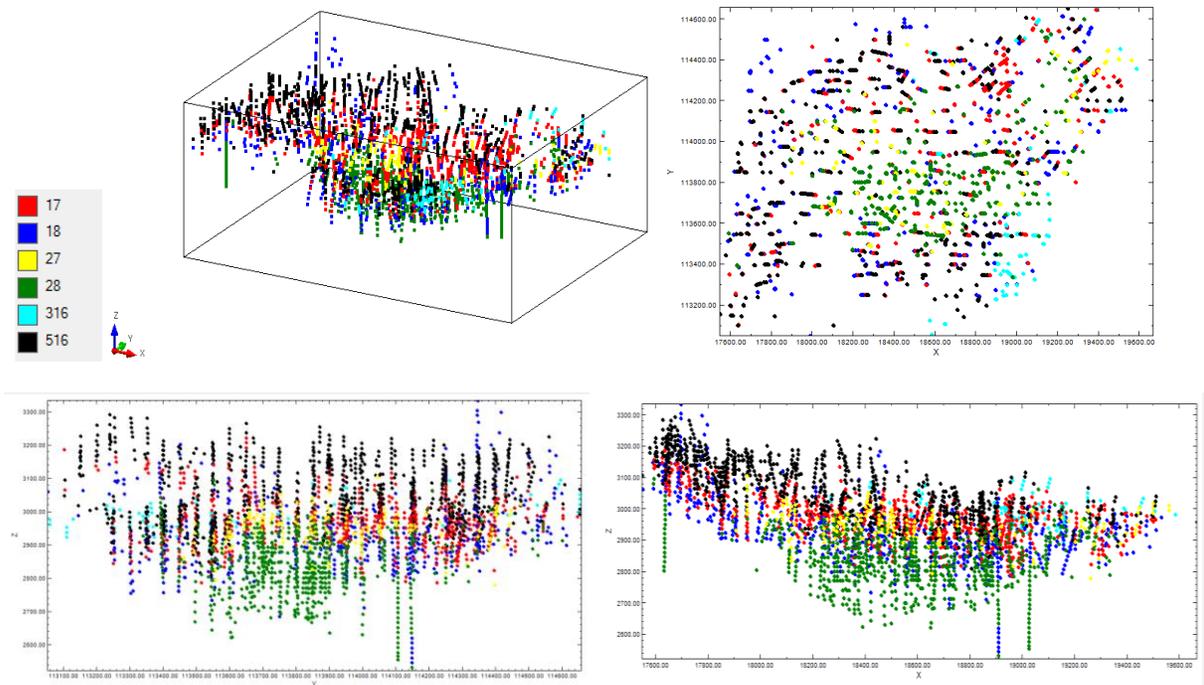
En el Gráfico 24 se observan las claras diferencias entre las poblaciones de datos definidas. Si bien en este gráfico se evidencia un solapamiento entre las distribuciones de las UE 316 y 17,

para el resto de las variables explicativas este solapamiento no se manifiesta de la misma manera y por ello no es pertinente agrupar estas UE en una nueva (ver Anexo A-7). En la Tabla 14 se presenta la descripción de los códigos las unidades de estimación finales.

**Tabla 14: Descripción códigos unidades de estimación finales**

Unidad	Descripción			
	Litología	Alteración	Zona mineral	Ley Cu rougher promedio [%]
516	Pórfidos+Brechas	Cuarzo-Sericita-Arcilla	Alto enriquecido	11.66
316	Andesitas	Cuarzo-Sericita-Arcilla	Alto enriquecido	6.36
17	Todas	Cuarzo-Sericita-Arcilla	Bajo enriquecido	6.50
18	Todas	Cuarzo-Sericita-Arcilla	Primario	5.05
27	Todas	Clorita-Sericita-Arcilla+Potásica	Bajo enriquecido	7.10
28	Todas	Clorita-Sericita-Arcilla+Potásica	Primario	6.03

Finalmente, en la Ilustración 12 se visualizan las UE finales, donde se puede advertir que no todos los límites se encuentran definidos de manera clara. Por lo anterior, posterior a este proceso de definición de UE's es necesario llevar a cabo un proceso de suavizamiento de los límites de las mismas, el cual se basa principalmente en la realización de un *kriging* de indicadores.



**Ilustración 12: Despliegue sondajes por UE finales**

#### 4.3.4 Kriging de indicadores

Hasta aquí se cuenta con la definición de las unidades de estimación sólo en algunas ubicaciones del espacio que corresponden a las muestras de sondajes, sin embargo para los pasos venideros es necesario contar con un modelo de bloques que posea la unidad a la cual pertenece cada punto del espacio. Es para esto que se lleva a cabo la metodología para la estimación de variables categóricas explicada en el capítulo de Antecedentes 2.4.4.

##### 4.3.4.1 Variogramas de indicadores experimentales y modelados

Se parte calculando variogramas de indicadores experimentales para todas las unidades en las direcciones omnihorizontal y vertical. En el Gráfico 25 se muestran los variogramas de indicadores experimentales y modelados para la unidad 516, el resto de los variogramas se muestran en el anexo A-8.

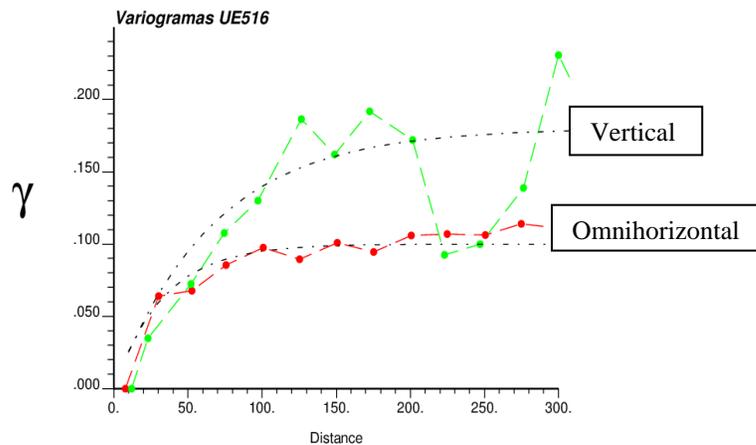


Gráfico 25: Variograma de indicadores unidad 516

##### 4.3.4.2 Modelo preliminar obtenido mediante kriging de indicadores

Una vez que se determina la continuidad espacial de los indicadores para todas las unidades, se lleva a cabo la estimación de los mismos en todo el espacio mediante *kriging*. Luego, se determina la prioridad de las unidades de acuerdo a la importancia que tiene cada una de ellas para el negocio, la que en este caso está directamente asociada al valor de la ley de *Cu rougher*. En la Tabla 15 se muestra el orden de prioridades definido de acuerdo a dicho criterio. Posteriormente, según el orden de prioridades se va manteniendo las proporciones de las unidades respecto al total, dejando dentro de cada una de ellas aquellos puntos con los mayores valores de los indicadores.

**Tabla 15: Prioridades para unidades de estimación según importancia en el negocio**

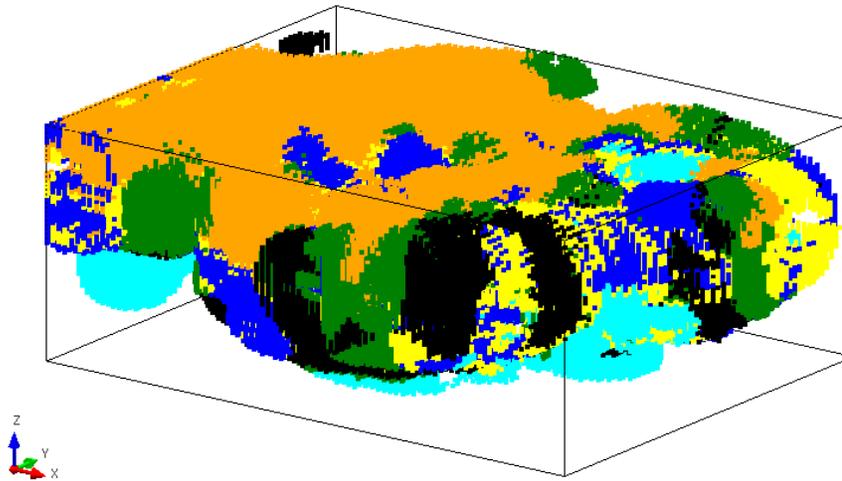
Ley de Cu rougher				
Unidad	Media	Desviación estándar	N° datos	Prioridad para el negocio
516	11.66	6.38	882	1
316	6.36	3.85	112	4
17	6.50	3.97	728	3
18	5.05	3.07	588	6
27	7.10	3.52	188	2
28	6.03	2.34	783	5

#### 4.3.4.3 Modelo final obtenido mediante suavizamiento con MAPS

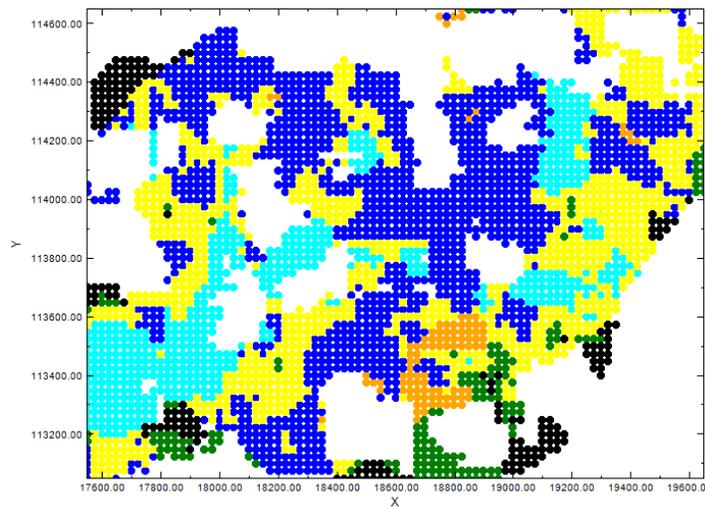
Una vez que ya se determina un modelo de roca preliminar mediante kriging de indicadores, éste es suavizado utilizando el programa MAPS, en el cual es necesario detallar la ventana de suavizamiento en las 3 dimensiones y las unidades de estimación con sus respectivas proporciones globales, las cuales se detallan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** De esta forma es que se obtiene el modelo que se muestra en las ilustraciones 13, 14 y 15.

**Tabla 16: Proporciones por unidad de estimación**

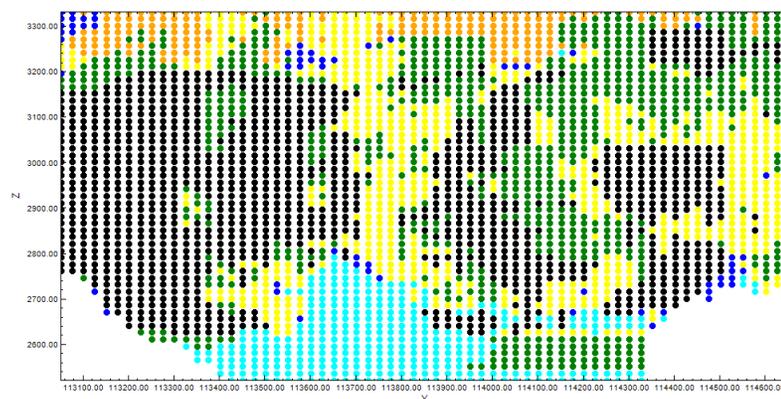
Unidad de estimación	Proporción
516	0.27
316	0.03
17	0.22
27	0.06
18	0.18
28	0.24



**Ilustración 13: Modelo preliminar obtenido mediante kriging de indicadores**



**Ilustración 14 : Corte en planta cota 2950 modelo de roca final**



**Ilustración 15 : Corte en plano Norte-Cota modelo roca final**

#### 4.3.5 Conclusión capítulo definición de unidades de estimación

El proceso de definición de unidades de estimación toma gran relevancia en estudios de este tipo, dado su alto impacto en el trabajo posterior de variografía, ya que si las unidades de estimación

son definidas deficientemente todo el trabajo posterior, a pesar de llevarse a cabo correctamente, puede ser realizado en vano. Por lo tanto, fue llevado a cabo de manera íntegra y con la alta exigencia requerida.

En el desarrollo de este capítulo se llega a la definición de 6 unidades de estimación, de las cuales las que más se diferencian son las unidad 516 y 18, siendo las de mayor y menor ley de Cu *rougher*, respectivamente. Se podría pensar que las unidades con distribuciones de ley de Cu *rougher* similar debieran ser fusionadas en una gran unidad, sin embargo esto no es posible dado que además de criterios estadísticos, fueron considerados criterios geometalúrgicos en la definición de las unidades. El Gráfico 26 detalla el valor de la media y desviación estándar para la ley de Cu *rougher* por unidad.

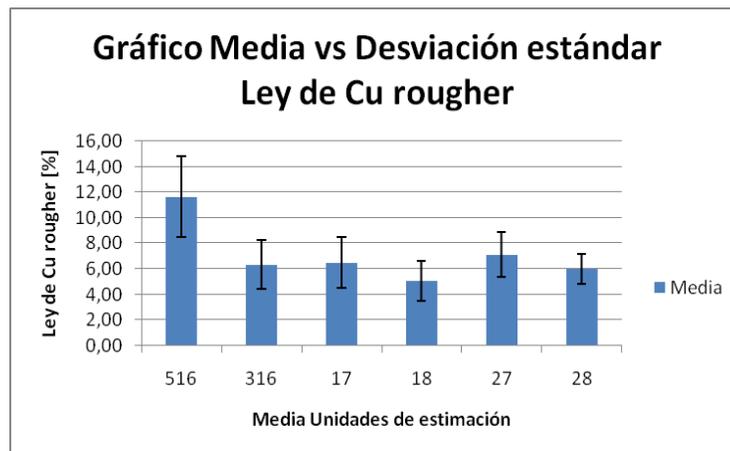


Gráfico 26: Media y desviación estándar para Ley de Cu rougher

#### 4.4 Determinación de relaciones entre variables explicativa y respuesta

En esta fase del estudio se busca determinar una función de varias variables que determine el valor de la ley de Cu *rougher* a partir de las variables explicativas determinadas anteriormente, es decir, la ley de Cu cabeza, ley de Cu oxidado y razón Cu/Fe. Esto, a partir de la información proporcionada por los 3,281 datos de sondajes, que dan cuenta de la relación entre las variables explicativas y la ley de Cu *rougher*. Para concretar aquello, se utiliza un método de suavizamiento de densidades de datos denominado “*kernel smoothing*”, explicado en el capítulo de Antecedentes 2.6.

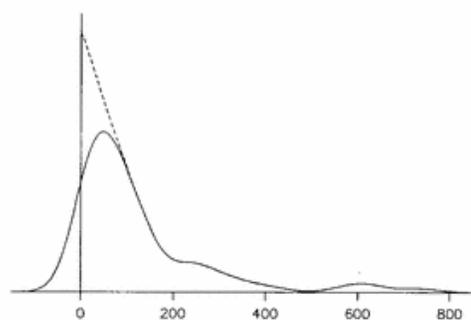
Para llevar a cabo esto, se utilizó el software *Matlab*, en el cual se programó un algoritmo para calcular el valor de la variable ley de Cu *rougher* para todas las combinaciones de variables explicativas, cuyo código es presentado en el Anexo B-3.

Los principales problemas que se presentaron a la hora de programar este algoritmo y sus soluciones se presentan a continuación:

##### 4.4.1 Estimación de Ley de Cu rougher en los márgenes del dominio de las variables explicativas

En los bordes de los dominios de las variables explicativas no se sigue la tendencia de la variable ley de Cu *rougher* cuando se hace la estimación por *kernel smoothing*. Esto ocurre porque el

algoritmo toma en cuenta una vecindad centrada en el punto de interés, y por ende en los bordes los puntos usados para calcular el nuevo valor de ley de Cu *rougher* caen en una sola mitad, mientras que la otra mitad queda sin puntos, y por ende no se sigue la tendencia de la variable a estimar. Por lo anterior, es que la variable se sobreestima o subestima en aquellas posiciones tal como muestra el Gráfico 27, que ilustra un ejemplo de un *kernel* unidimensional, donde la línea sólida representa una estimación sin corrección en los bordes y en la que se observa cómo la variable se subestima. Al contrario, en el caso de la línea punteada se sigue la tendencia de la variable a estimar, ya que se extrapola el valor de la variable a medida que se acerca al eje en vez de calcular un promedio ponderado de los valores.



**Gráfico 27: Ejemplo de kernel smoothing unidimensional con y sin corrección en los bordes.**  
**FUENTE: Simple Boundary Correction for Kernel Density Estimation, M.C. Jones, 1993.**

La manera en que se soluciona este problema es definir un sector en los bordes de los dominios de las variables explicativas donde se estime un hiper-plano utilizando los puntos de la vecindad, de tal manera que la variable en estudio sea estimada con la tendencia correcta.

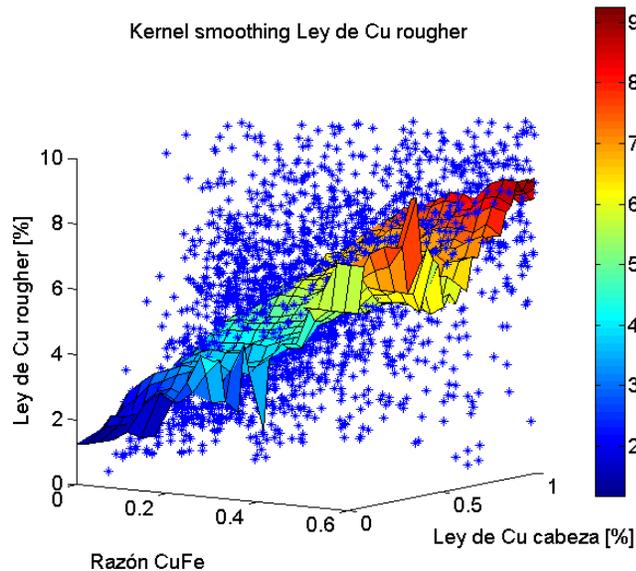
#### 4.4.2 Estimación en sectores con baja densidad de datos

Las 3 variables explicativas presentan distribuciones lognormales, por lo tanto existen ciertos puntos muy alejados de la mayor concentración de datos. Esto ocasiona que al ocupar anchos de banda apropiados para la zona de mayor concentración, existan muchas posiciones que quedan sin estimar en la zona de menor concentración de datos, y que por lo tanto la función no esté definida en todo el dominio de las variables explicativas.

Para corregir esto se lleva a cabo la estimación de 3 funciones de  $a$ , diferenciando 3 zonas de estimación mediante la observación de los histogramas de cada una de las variables explicativas, ver anexo A-1. Para cada una de estas zonas, se definen los respectivos límites para las variables explicativas, como también las precisiones para cada una de ellas.

- Zona 1: Esta zona se limita por los siguientes intervalos para cada variable:
  - Ley de Cu cabeza (%): [ 0 ; 1.0 ]
  - Razón de CuFe: [ 0 ; 0.6 ]
  - Ley de Cu oxidado (%): [ 0 ; 0.1 ]

En esta zona se utiliza un ancho de banda muy pequeño, dado que en ella se encuentra más del 80% de los datos, además de usar una zona muy acotada del dominio completo de la función. De esta manera, se aprovecha la gran cantidad de información y se reducen los tiempos de cálculo, ya que el cálculo se sitúa sólo en la región donde hay gran concentración de datos. En el Gráfico 28 se muestra el resultado del *kernel smoothing* para la variable ley de Cu *rougher* en función de las variables ley de Cu cabeza y razón Cu/Fe. Tanto en este gráfico como en los siguientes, no se puede apreciar la ley de Cu *rougher* en función de la ley de Cu oxidado, ya que de otra forma no se podría ilustrar el resto de las dependencias a través de un gráfico 3D.

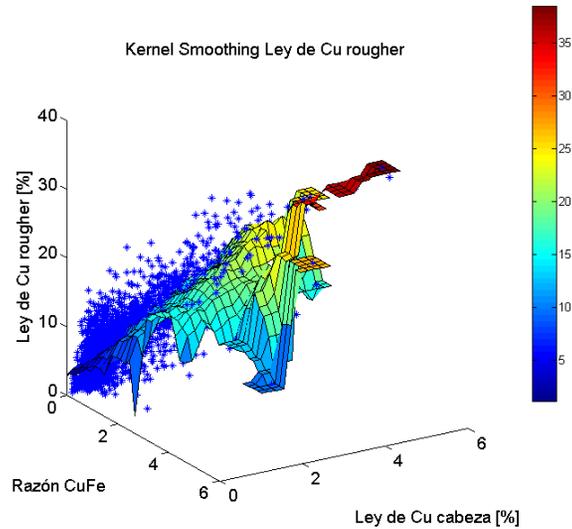


**Gráfico 28: Resultado Kernel smoothing ZONA 1**

En el Gráfico 28 se observa que la superficie representa la tendencia de los datos, sin embargo los datos poseen una gran variabilidad, por lo cual resulta muy difícil obtener un ajuste mejor al realizado.

- Zona 2: Esta zona se limita por las siguientes intervalos para cada variable:
  - Ley de Cu cabeza (%): [ 0 ; 6.0 ]
  - Razón de CuFe: [ 0 ; 6.0 ]
  - Ley de Cu oxidado (%): [ 0 ; 0.3 ]

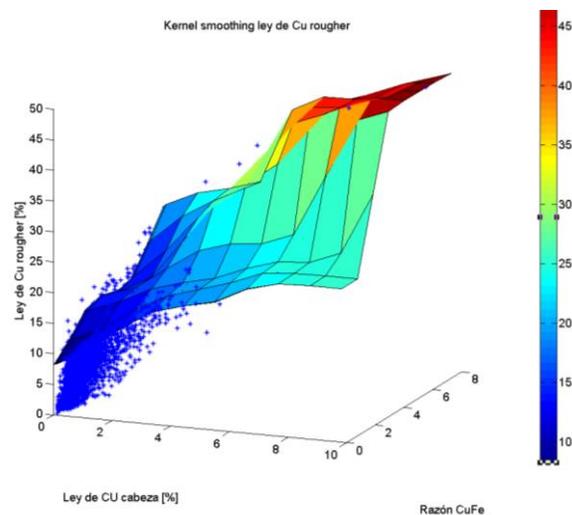
Esta zona abarca desde el 0 hasta el límite superior del histograma, sin considerar los datos que se escapan de este. En ella se implementan anchos de banda algo mayores, de tal manera de acelerar los tiempos de cálculo, pero sin suavizar demasiado el dominio, tal como se muestra en el Gráfico 29.



**Gráfico 29: Resultado Kernel smoothing ZONA 2**

- Zona 3: Esta zona se limita por las siguientes intervalos para cada variable:
  - Ley de Cu cabeza (%): [ 0 ; 9.81 ]
  - Razón de CuFe: [ 0 ; 6.32 ]
  - Ley de Cu oxidado (%): [ 0 ; 1.35 ]

Esta zona está limitada por los valores máximos de cada variable explicativa, los que se alejan bastante de los histogramas. Por lo tanto, en ellos es necesario utilizar anchos de banda más extensos de tal manera de cubrir todo el dominio, resultando en una función bastante suavizada y que sobreestima deliberadamente la ley de Cu *rougher* en el origen como se observa en el Gráfico 30.



**Gráfico 30: Resultado Kernel smoothing ZONA 3**

Finalmente, para obtener el valor de la ley de Cu *rougher* para cada uno de los bloques de las realizaciones efectuadas, se utilizan los resultados de *kernel* para las 3 zonas en el orden de prioridad en que fueron presentados. Esto significa, que primero se busca el valor de ley de Cu *rougher* en la zona 1, si no se encuentra se busca en la zona 2, y finalmente en la zona 3 de manera secuencial. De tal manera que todos los puntos del dominio posean su correspondiente resultado de ley de Cu *rougher*.

#### 4.4.3 Validación cruzada función de varias variables

Para validar la función de varias variables se parte dejando fuera el 10% de los datos de muestras de sondaje (328 datos) y se lleva a cabo la estimación de la ley de Cu *rougher* mediante *kernel smoothing* para todo el dominio de las variables explicativas. Posteriormente, para los datos apartados se estima el valor de la ley de Cu *rougher* evaluando sus variables explicativas en la función recién modelada. Finalmente, se contrasta la variable ley de Cu *rougher* obtenida gracias al *kernel smoothing* con el valor real de la variable.

En las tablas 16 y 17 se muestran los resultados de la validación cruzada de la función de varias variables, para 2 y 3 variables explicativas<sup>4</sup>, respectivamente, la cual es bastante satisfactoria para los parámetros analizados. Mientras que en los gráficos 31 y 32, se observa la dispersión de los datos, que se ajusta de una manera aceptable.

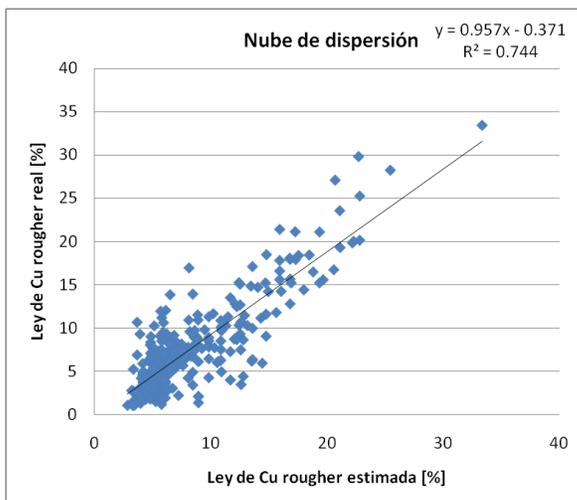
Tabla 17: Validación cruzada kernel smoothing con 2 variables explicativas

	Media	Desviación estándar	Error porcentual	Pendiente de la regresión	Coficiente R <sup>2</sup>	Coficiente correlación
Estimados	8.11	4.66	8.79	0.96	0.74	0.86
Muestras	7.40	5.17				

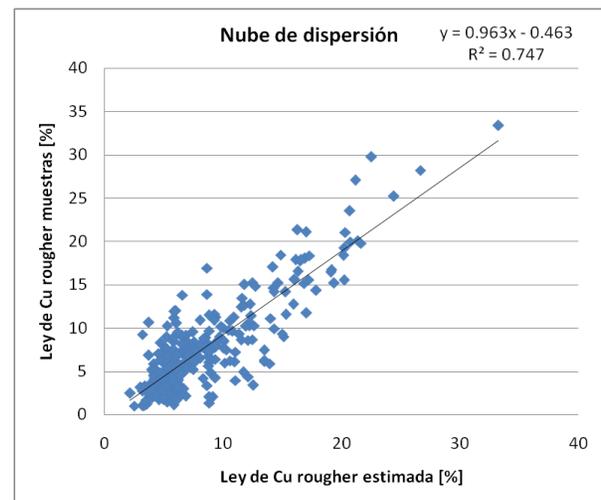
<sup>4</sup> Es necesario modelar funciones con 2 y 3 variables explicativas debido a que, como se explica en detalle en la sección Mapas Variográficos 4.5.1.1, existen unidades de estimación donde la variable ley de Cu oxidado es dejada fuera del estudio

**Tabla 18: Validación cruzada kernel smoothing con 3 variables explicativas**

	Media	Desviación estándar	Error porcentual	Pendiente de la recta	Coefficiente R <sup>2</sup>	Coefficiente correlación
Estimados	8.15	4.64	9.29 %	0.96	0.75	0.86
Muestras	7.40	5.17				



**Gráfico 31: Nube de dispersión ley de Cu roughner real contra datos estimados, 2 variables explicativas**



**Gráfico 32: Nube de dispersión ley de Cu roughner real contra datos estimados, 3 variables explicativas**

#### 4.4.4 Conclusión capítulo determinación de función multivariable

La metodología empleada en la definición de la función multivariable corresponde a un enfoque no paramétrico bastante usado en matemáticas para el ajuste de densidades. A pesar de lo eficaz del método, fue necesario acomodarlo a los datos y a los recursos disponibles, ya que la estimación por *kernel smoothing* usando precisiones y anchos de banda demasiado pequeños requiere de mucho tiempo, por lo tanto, fue necesario crear una metodología con tiempos de cálculo razonables y con resultados válidos para ser usados en un modelo de esta índole. Si bien los resultados obtenidos son bastante convincentes, sobreestiman en un porcentaje del 10% los datos de las muestras según la validación cruzada realizada, por lo tanto se debe tener especial cuidado en la aplicación de la función de varias variables y en los resultados obtenidos a partir de la aplicación de ella.

## 4.5 Simulación

En este estudio se opta por llevar a cabo el proceso de cosimulación gaussiana secuencial para una mejor simulación de la variable ley de Cu *rougher*, con el objeto de aprovechar al máximo la información proporcionada por las variables explicativas. El *software* que se utiliza corresponde a *USGSIM*, el que se explica con mayor detalle en el capítulo de Antecedentes 2.7.3.

A pesar de la gran flexibilidad que ofrece *USGSIM* en cuanto a simulaciones multivariadas, ésta no es suficiente para el objetivo de esta memoria, ya que no permite cosimular un número diferente de variables en distintas unidades. Se menciona dicho punto, pues más adelante se observa que existen unidades donde la variable explicativa ley de Cu oxidado pierde correlación con las demás variables, y por lo tanto, conviene dejarla fuera del análisis debido a que más que aportar información, complica el análisis variográfico. Por ende, en estos escenarios lo que se hace es cosimular las unidades con igual número de variables en la misma corrida y hacer lo propio en otra, para las demás unidades.

Lo denso de la grilla a simular también constituye un punto crítico dentro de la simulación en *USGSIM*, pues está directamente relacionado con el tiempo empleado en cada corrida. En esta memoria se presentan dos situaciones: simulación a soporte puntual y a soporte de bloque, en la primera de ellas se emplea una grilla de  $25 \times 25 \times 15$  [ $m^3$ ] con un número de 303,875 puntos, mientras que en el otro caso se utiliza una de  $8, \bar{3} \times 8, \bar{3} \times 5$  [ $m^3$ ], con un número de 8,204,625 puntos, que posteriormente son ponderados a soporte de bloque. Por lo tanto, en el caso de simulaciones a soporte de bloque los tiempos de simulación son bastante elevados y es conveniente realizar un número menor de corridas. Se decide así hacer 100 corridas para los modelos a soporte puntual y 20 corridas para el caso a soporte de bloque. Además, es necesario discretizar el modelo de roca obtenido en el capítulo 4.3 “Definición de unidades de estimación”, ya que la grilla a simular debe coincidir con la grilla del modelo de roca.

Sin duda, uno de los inputs más importantes dentro de los mencionados anteriormente lo constituye la variografía de las unidades de estimación, ya que ella define la manera en que la simulación modelará la continuidad de las variables en el espacio. Sin embargo, previo a su realización es necesario desagrupar los datos, y posteriormente, mediante un proceso denominado anamorfosis, transformarlos en datos gaussianos. A continuación, se aborda en detalle la variografía de los datos gaussianos.

### 4.5.1 Variografía unidades

Con el fin de caracterizar el comportamiento espacial de la variable ley de Cu *rougher* y de las variables explicativas se realiza un exhaustivo análisis variográfico para cada una de las unidades de estimación. Este análisis parte obteniendo mapas variográficos de las unidades en los planos de referencia típicos (XY, YZ y XZ), para determinar con ellos las direcciones principales de anisotropías de la variable de interés, ley de Cu *rougher*. Luego, se calculan los respectivos variogramas experimentales en las direcciones de máxima anisotropía, en caso de haberla, y finalmente se modelan variogramas que respeten las propiedades de tales funciones.

### 4.5.1.1 Mapas variográficos

Para llevar a cabo la determinación de las direcciones de máxima anisotropía se generan mapas variográficos de la ley de Cu *rougher* en los planos XY, XZ e YZ. En primer lugar, cabe destacar que en los mapas variográficos se sigue la convención que se muestra en la Ilustración 16, relativa a los nombres de los ejes cartesianos. Además, se utiliza la leyenda de la Ilustración 17 para representar la continuidad espacial.

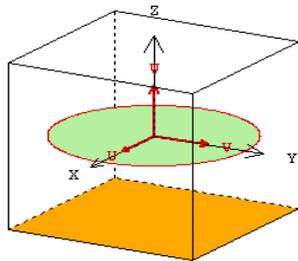


Ilustración 16: Convención ejes cartesianos

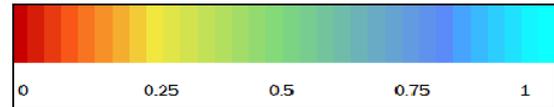


Ilustración 17: Leyenda Mapas variográficos Ley de Cu *rougher* gaussiano

A continuación se presentan los mapas variográficos y su análisis para la unidad 516 obtenidos mediante el software *Isatis*, mientras que en el anexo A-9 se hace lo propio para el resto de las unidades. Además en el anexo B-2, se detallan los parámetros de cálculo de los mapas variográficos para todas las unidades de estimación.

#### 4.5.1.1.1 Unidad 516

En este caso se aprecia una clara diferencia en la continuidad de la variable ley de Cu *rougher* en la dirección del eje Y respecto a las otras 2 direcciones, por lo cual se decide calcular los variogramas en la dirección del eje Y y del plano XZ.

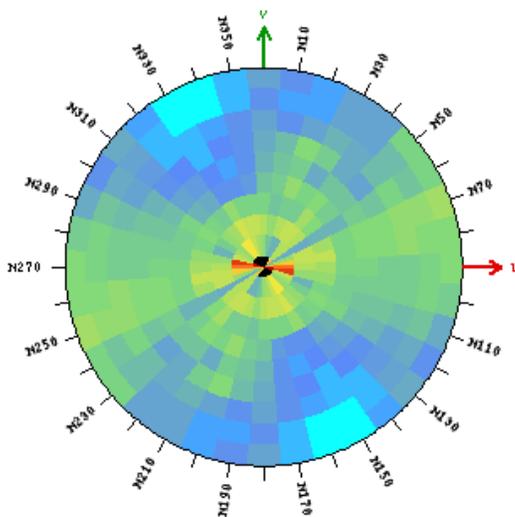


Ilustración 18: Mapa variográfico XY unidad 516

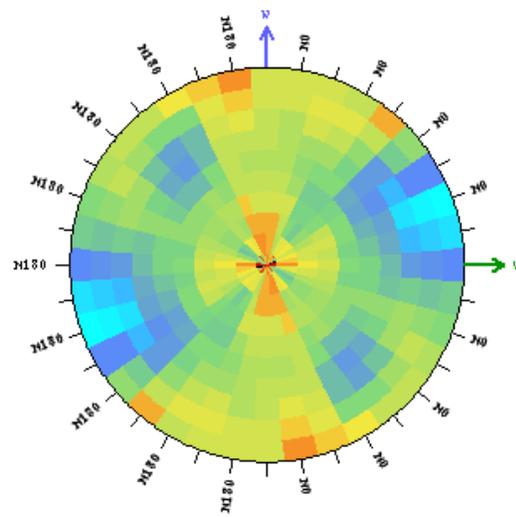


Ilustración 19: Mapa variográfico YZ unidad 516

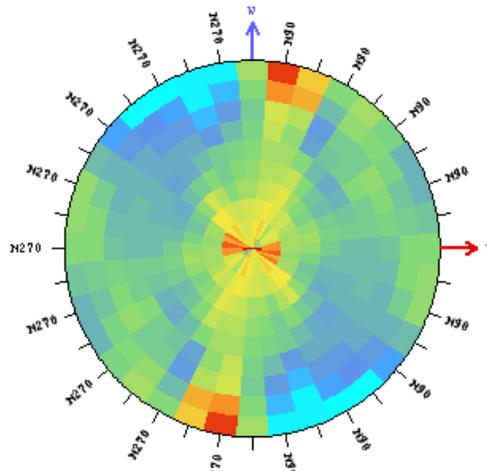


Ilustración 20: Mapa variográfico XZ unidad 516

#### 4.5.1.2 Variogramas experimentales y modelados

Una vez que se definen las direcciones de anisotropías en cada una de las unidades de estimación, se calculan los variogramas experimentales y se modelan utilizando el programa *VARFIT*. En seguida, se presenta el análisis variográfico llevado a cabo para cada una de las unidades de estimación previamente definidas. En él se muestra el ajuste realizado para el variograma directo de la variable ley de Cu *rougher*, mientras que los variogramas para el resto de las variables se presentan en el anexo A-10.

##### 4.5.1.2.1 Unidad 516

En la Tabla 19 se presenta la matriz de correlación para la unidad 516, en la cual se observa que las variables poseen una correlación mayor a 0.5 con las demás, en general. Por lo tanto, es necesario incluir a las 3 variables explicativas en el análisis variográfico. Por otro lado, se presentan diferencias en la continuidad espacial para la variable ley de Cu *rougher* entre los planos XZ y la dirección Y, por lo que fue necesario modelar los variogramas en el plano XZ (azul) y en la dirección Y (verde), como lo muestran los gráficos 33 y 34. Además, en la Tabla 20 se enseña el modelo variográfico tridimensional obtenido para la unidad 516, para el cual cada una de las matrices de contribuciones de mesetas son semidefinidas positivas. El resto de los modelos variográficos se muestran en el anexo A-11.

Tabla 19: Matriz correlación unidad 516

	cucabeza	curougher	cufe	cuoxidado
cucabeza	1.00			
curougher	0.80	1.00		
Cufe	0.67	0.80	1.00	
cuoxidado	0.61	0.54	0.36	1.00

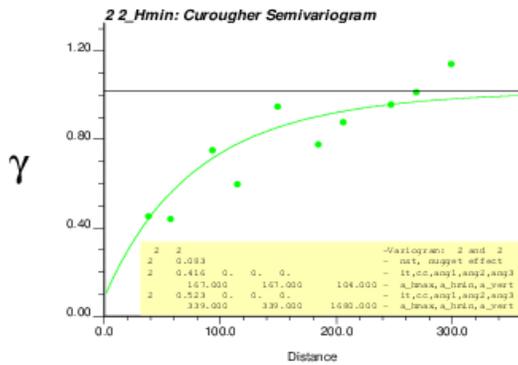


Gráfico 33: Variograma directo Ley de Cu rougher dirección Y unidad 516

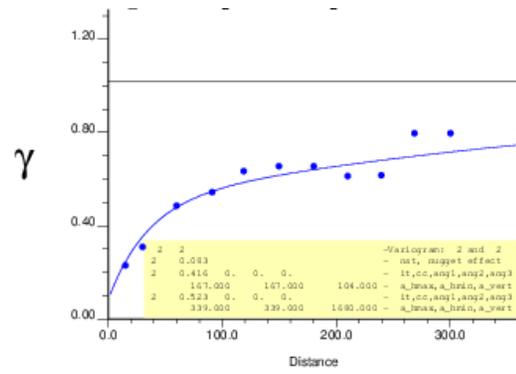


Gráfico 34: Variograma directo Ley de Cu rougher plano XZ unidad 516

Tabla 20: Modelo variográfico 3D unidad 516

		cucabeza	curougher	cufe	cuoxidado
PEPA	Cucabeza	0.088	0	0.079	0.113
	Curougher		0	0	0.11
	Cufe			0.068	0.005
	Cuoxidado				0.285
esf(100,190,100)	Cucabeza	0.456	0.395	0.232	0.3
	Curougher		0.465	0.376	0.181
	Cufe			0.555	0.136
	Cuoxidado				0.504
esf(1380,280,1380)	Cucabeza	0.599	0.524	0.402	0.314
	Curougher		0.561	0.457	0.347
	Cufe			0.422	0.254
	Cuoxidado				0.328

#### 4.5.1.2.2 Unidad 316

Para la unidad 316, la mayoría de las variables poseen una correlación mayor a 0.5 entre ellas, como se aprecia en la Tabla 21. Sin embargo, lo estrecho de la unidad en la vertical no justifica el cálculo de un variograma vertical debido a la poca cantidad de datos, por lo tanto se modeló un variograma omnidireccional para esta unidad.

Tabla 21: Matriz de correlación Unidad 316

	Cucabeza	Curougher	Cufe	Cuoxidado
Cucabeza	1.00			
Curougher	0.78	1.00		
Cufe	0.72	0.69	1.00	
Cuoxidado	0.63	0.48	0.38	1.00

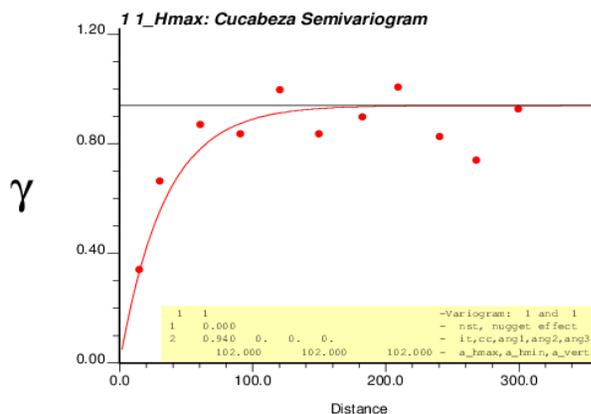


Gráfico 35: Variograma directo Ley de Cu rougher omnidireccional unidad 316

### 4.5.1.2.3 Unidad 17

En este caso, en general las variables poseen una correlación mayor a 0.5 con las demás, como se muestra en la Tabla 22 . Además, se presentan diferencias entre el plano horizontal y la vertical, por lo que fue necesario modelar los variogramas omnihorizontal (rojo) y vertical (azul).

Tabla 22: Matriz de correlación unidad 17

	Cucabeza	Curougher	Cufe	Cuoxidado
Cucabeza	1.00			
Curougher	0.67	1.00		
Cufe	0.57	0.62	1.00	
Cuoxidado	0.59	0.53	0.24	1.00

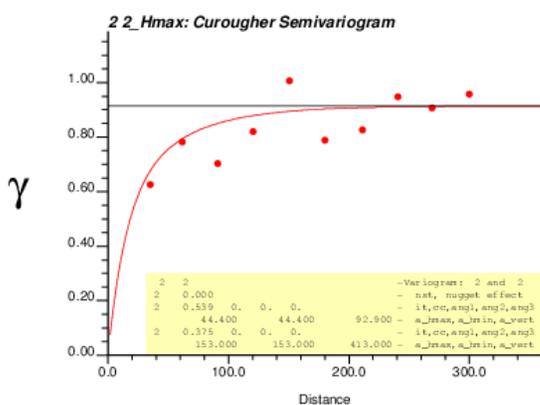


Gráfico 36: Variograma directo Ley de Cu rougher omnihorizontal unidad 17

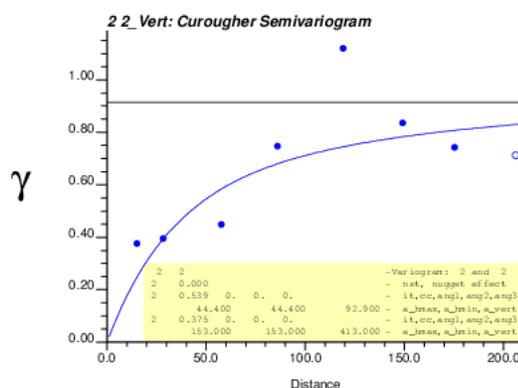


Gráfico 37: Variograma directo Ley de Cu rougher vertical unidad 17

#### 4.5.1.2.4 Unidad 18

Como se observa en la Tabla 23, la variable Cu oxidado aporta muy poca información para la simulación de las demás variables, por lo tanto fue excluida del análisis para el caso de la unidad 18. Mientras que respecto al modelamiento del variograma, sí se justifica la utilización de un variograma omnihorizontal (rojo) y uno vertical (azul), debido a la anisotropía observada en los mapas variográficos.

Tabla 23: Matriz de correlación unidad 18

	Cucabeza	Curougher	Cufe	Cuoxidado
Cucabeza	1.00			
Curougher	0.68	1.00		
Cufe	0.64	0.71	1.00	
Cuoxidado	0.36	0.18	0.09	1.00

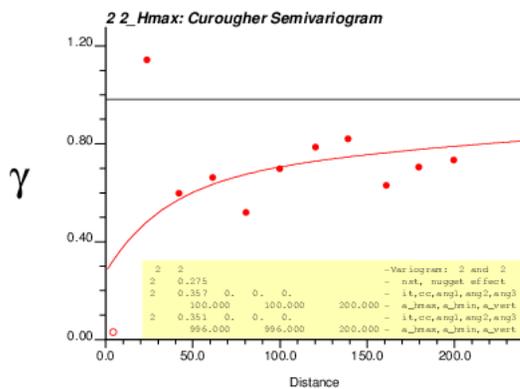


Gráfico 38: Variograma directo Ley de Cu rougher omnihorizontal unidad 18

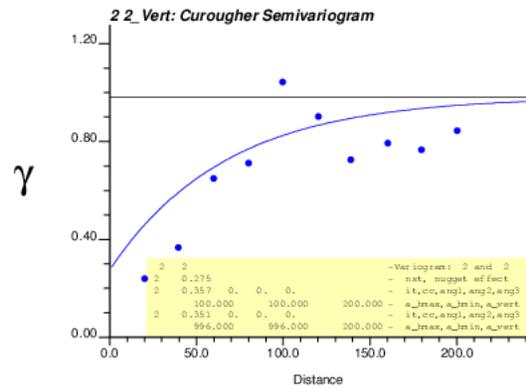


Gráfico 39: Variograma directo Ley de Cu rougher vertical unidad 18

#### 4.5.1.2.5 Unidad 27

Para esta unidad las bajas correlaciones de la variable ley de Cu oxidado con el resto, conducen a dejarla fuera del análisis variográfico, como se muestra en la Tabla 24. Además, lo estrecho de la unidad en la vertical no justifica el cálculo de un variograma vertical debido a la poca cantidad de datos, por lo tanto se modeló un variograma omnidireccional para esta unidad.

Tabla 24: Matriz de correlación unidad 27

	Cucabeza	Curougher	Cufe	Cuoxidado
Cucabeza	1.00			
Curougher	0.60	1.00		
Cufe	0.76	0.73	1.00	
Cuoxidado	0.55	0.36	0.33	1.00



### **4.5.1.3 Conclusión capítulo variografía**

La etapa de variografía que se desarrolla en este capítulo es bastante extensa, ya que se efectúa para las 6 unidades de estimación definidas anteriormente. En ella se justifica todo el trabajo previamente realizado en la definición de las unidades de estimación, ya que si la caracterización de la continuidad espacial de la variable es realizada de manera pobre, entonces todo el trabajo previo es desechado. Dada la gran cantidad de unidades para las cuales se efectúa esta labor, sólo se estudia la continuidad espacial en las direcciones de los ejes principales, con el fin de simplificar el trabajo.

Una determinación importante fue el dejar fuera a las variables explicativas que perdieran correlación al separar los datos por unidad de estimación, ya que estas variables fueron definidas tomando en cuenta todos los datos y no separando por unidad. De esta manera, se deja fuera del estudio a la variable ley de Cu oxidado para las unidades 18, 27 y 28, debido a su baja correlación con el resto de las variables. Por lo cual se simplifica en parte el proceso de variografía para estas unidades.

Respecto a las direcciones de anisotropías encontradas, para las unidades 316, 27 y 28 no se encontró ninguna relevante. Por otro lado, para las unidades 17 y 18 se determinó la existencia de anisotropía vertical, por lo que se calculan variogramas experimentales omnihorizontales y verticales. Mientras que para la unidad 516 se encontró una anisotropía poco convencional en la dirección Y, por lo que se calculan variogramas en el plano XZ y en la dirección Y.

## 4.5.2 Construcción de modelos de bloques a soporte puntual

Esta etapa del trabajo consiste en la confección de 2 modelos espaciales de ley de Cu *rougher* a soporte puntual, el primero de ellos se obtiene al cosimular la variable ley de Cu *rougher* junto a las variables explicativas (modelo M1). Mientras que el segundo de los modelos se obtiene al evaluar las variables explicativas cosimuladas en la función de varias variables para cada punto del modelo (modelo M2). El hecho de que se simule a soporte puntual significa que cada bloque del modelo es considerado sólo como un punto, y por esto la grilla que se emplea es de  $25 \times 25 \times 15$  [ $m^3$ ], lo que implica un número de 303,875 puntos por modelo.

### 4.5.2.1 Modelo de bloque a soporte puntual directo M1

Este modelo se obtiene de cosimular mediante *USGSIM* las variables explicativas en conjunto con la ley de Cu *rougher* y de esta manera obtener el modelo espacial deseado. Se llevan a cabo 100 realizaciones para este modelo, con la finalidad de poder cuantificar la incertidumbre asociada a los valores simulados.

Para este modelo se espera que los resultados sean satisfactorios, ya que los procedimientos empleados son teóricamente correctos, pues al estimar a soporte puntual no es necesario realizar promedios ponderados de la variable ley de Cu *rougher*, y por lo tanto no es requisito que las variables sean aditivas.

### 4.5.2.2 Modelo de ley de Cu rougher indirecto M2

Este modelo es el resultado de aplicar la función multivariable modelada, a los modelos de bloques de las variables explicativas que se obtienen al mismo tiempo que el modelo M1. Sin embargo, al contrario del modelo M1, los resultados son más inciertos, ya que dependen del buen ajuste logrado para la función de varias variables modelada.

## 4.5.3 Construcción de modelos a soporte de bloque

En esta fase del estudio es necesario construir 2 modelos de ley de Cu *rougher* a soporte de bloque. El modelo M3 se obtiene directamente de la cosimulación de la variable ley de Cu *rougher* junto con las variables explicativas, de manera similar al modelo M1. Mientras que en el caso del modelo M4, se vuelve a utilizar la función de varias variables y el valor de las variables explicativas a escala de bloque, es decir, una vez que ya fue promediado.

### 4.5.3.1 Modelo a soporte de bloque directo M3

Este modelo se obtiene de cosimular mediante *USGSIM* las variables explicativas en conjunto con la ley de Cu *rougher*, al igual que el modelo M1. No obstante, para obtener el valor de las variables a soporte de bloque es necesario desarrollar un procedimiento algo más complejo. En primer lugar, es necesario simular a una grilla más densa que la usada para el modelo M1, por lo cual se opta por discretizar cada bloque en pequeños bloques de  $8, \bar{3} \times 8, \bar{3} \times 5$  [ $m^3$ ]. Lo anterior, se traduce en mayores tiempos de espera al momento de realizar las simulaciones, es por esta razón que en este estudio se realizaron 20 simulaciones a escala de bloque y no 100 como en el caso puntual. Posteriormente, una vez que el valor de las variables cosimuladas es entregado, se debe

promediar el valor de los puntos simulados dentro de cada bloque, para así obtener su valor a soporte de bloque. Sin embargo, aquí es donde se comete el error para la ley de Cu *rougher*, ya que se utiliza un procedimiento aplicable sólo a variables aditivas con una variable que no lo es. Por lo anterior, a priori se piensa que el modelo M3 debiera presentar ciertas desviaciones de la realidad.

#### 4.5.3.2 Modelo a soporte de bloque indirecto M4

Este modelo es generado al evaluar la función multivariable de ley de Cu *rougher*, usando los valores de las variables explicativas a soporte de bloque, las cuales son obtenidas de la misma manera que se obtiene la ley de Cu *rougher* para el modelo M3. Este modelo no transgrede ninguna norma teórica, ya que elude el cálculo de leyes de Cu *rougher* directamente a soporte de bloque gracias a la evaluación de la función multivariable. Sin embargo, al igual que el modelo M2, el éxito de sus resultados depende mucho de qué tan bien sea ajustado el *kernel* de la función multivariable.

#### 4.5.4 Comparación entre modelos

Las maneras que se escogen para cuantificar cuál de los modelos reproduce mejor la realidad son dos: *jack-knife* y *accuracy-plots*. Por un lado, a través de un *jack-knife* se puede contrastar los resultados obtenidos con la realidad, mientras que mediante los *accuracy-plots* se busca verificar si la incertidumbre local es modelada correctamente.

A pesar de la pretensión de llevar a cabo un *jack-knife*, en las etapas previas a la variografía no se dejó fuera un grupo de los datos condicionantes para realizar tal validación. Por lo tanto, se decide utilizar la misma variografía, pasando por alto el hecho de que incluye aquellos datos, basándose en que ésta no debería sufrir grandes variaciones al desarrollarla sin un pequeño grupo de datos condicionantes (del orden de 10% de los datos). A diferencia de la variografía, sí es necesario efectuar las simulaciones sin incluir aquellos datos. De esta manera una vez que se obtienen los resultados se puede comparar los datos simulados en los sitios de los datos excluidos y aplicar diferentes criterios de validación, los cuales son enunciados en el capítulo de Antecedentes 2.10.

## 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Validación modelo M1

#### 5.1.1 Validación Estadística modelo M1

Se generan *boxplots* para las variables ley de *Cu rougher* y explicativas obtenidas para el modelo M1, con el fin de comparar si las simulaciones reproducen la distribución estadística de los datos condicionantes para cada una de las unidades de estimación. Cabe destacar que para el caso de las unidades 18, 27 y 28, la variable ley de *Cu oxidado* no es reproducida ya que fue sacada del análisis. En los gráficos 42 y 43, se muestran los *boxplots* para la ley de *Cu rougher* por unidad de estimación, para los datos condicionantes y para una realización del modelo M1, respectivamente. En ellos se observa claramente la buena reproducción de la distribución de datos por parte del modelo M1, ya que para la realización que se muestra, tanto las medias como todos los cuantiles que son destacados por los *boxplots* son consecuentes con los datos reales. Los *boxplots* para las variables explicativas se muestran en el anexo A-12.

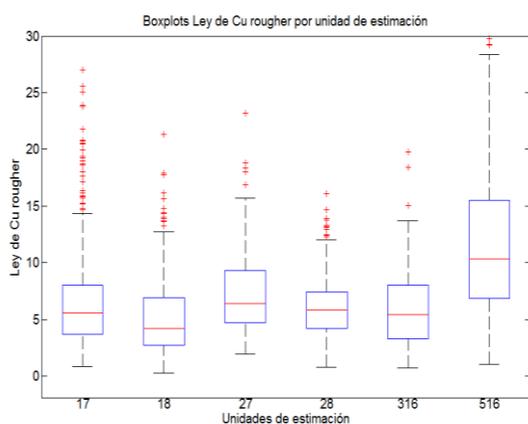


Gráfico 42: Boxplots Ley de Cu rougher por unidad de estimación datos condicionantes

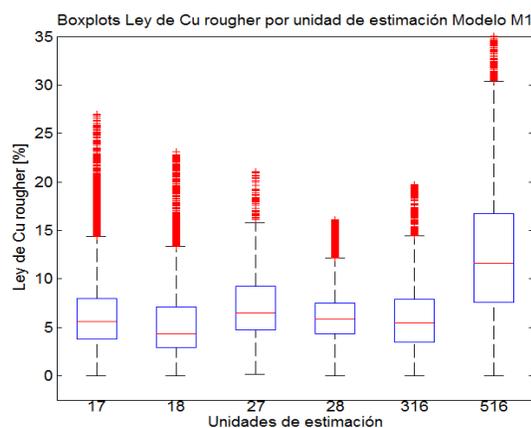


Gráfico 43: Boxplots Ley de Cu rougher por unidad de estimación modelo M1

#### 5.1.2 Verificación reproducción de variogramas modelo M1

Cuando un modelo variográfico lícito se ajusta al variograma experimental y se lleva a cabo el proceso de simulación, no se considera la incertidumbre asociada. Por lo tanto, es necesario corroborar que las simulaciones reproduzcan el modelo variográfico de manera adecuada. Es por eso que mediante el uso del programa *GamSim* (Capítulo de Antecedentes 2.8), se calculan variogramas de las simulaciones realizadas a cada una de las unidades y se comparan con los variogramas modelados, con el fin de verificar que las simulaciones respeten los modelos variográficos que fueron ajustados previos a la simulación. En los gráficos siguientes se presentan las validaciones para los variogramas directos de ley de *Cu rougher*, mientras que las validaciones hechas para el resto de los variogramas se presentan en el Anexo A-13.

### 5.1.2.1 Unidad 516

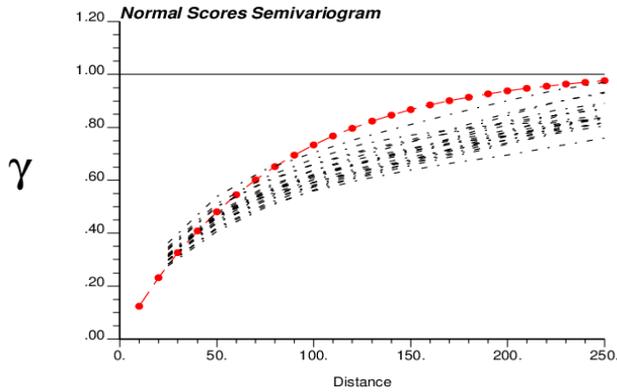


Gráfico 44: Validación variogramas omnihorizontales Ley de Cu rougher unidad 516

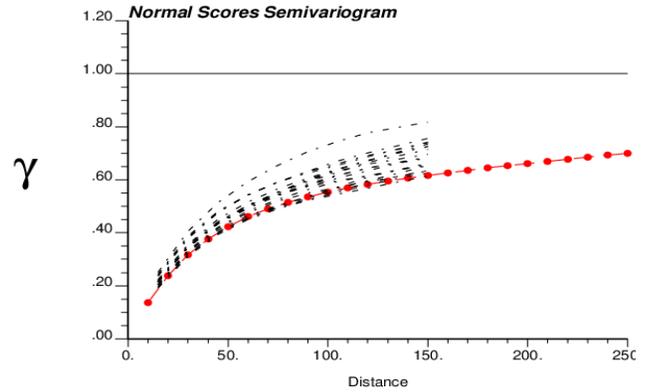


Gráfico 45: Validación variogramas verticales Ley de Cu rougher unidad 516

### 5.1.2.2 Unidad 316

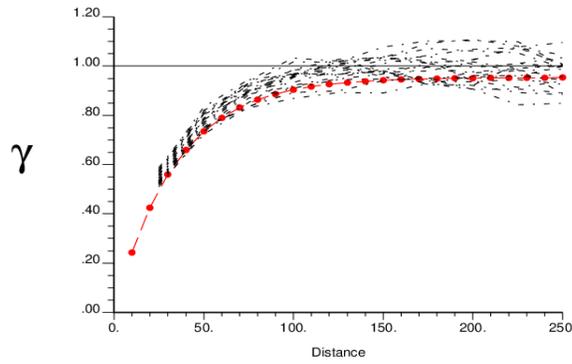


Gráfico 46: Validación variogramas Ley de Cu rougher unidad 316

### 5.1.2.3 Unidad 18

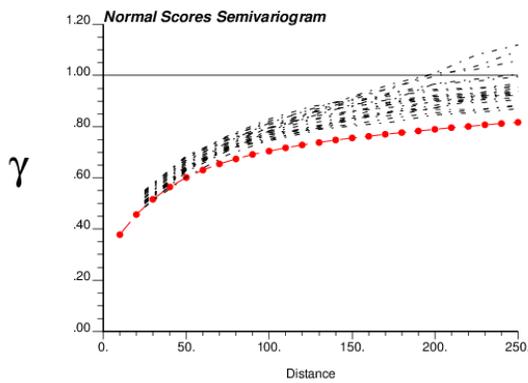


Gráfico 47: Validación variogramas Ley de Cu rougher omnihorizontal unidad 18

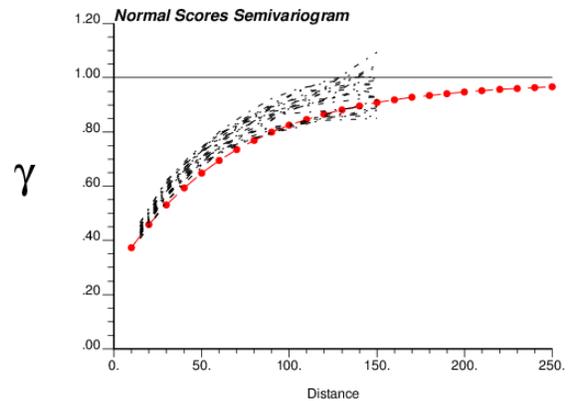


Gráfico 48: Validación variogramas Ley de Cu rougher vertical unidad 18

### 5.1.2.4 Unidad 17

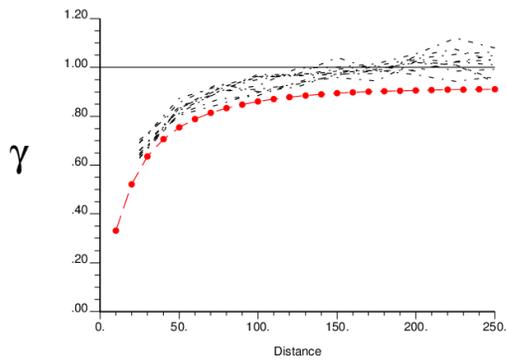


Gráfico 49: Validación variogramas Ley de Cu rougher omnihorizontales unidad 17

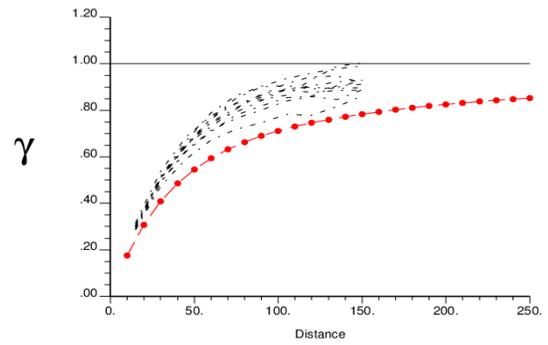


Gráfico 50: Validación variogramas Ley de Cu rougher verticales unidad 17

### 5.1.2.5 Unidad 27

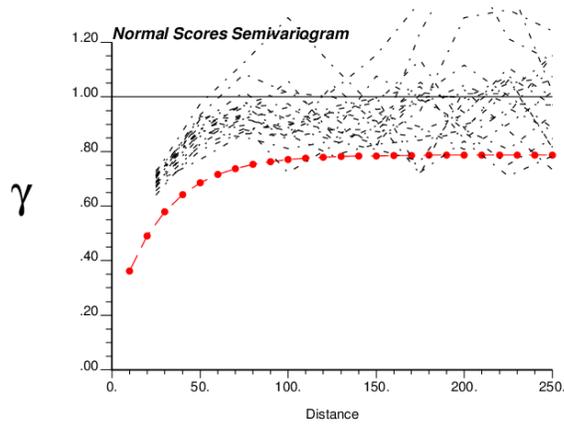


Gráfico 51: Validación variogramas Ley de Cu rougher unidad 27

### 5.1.2.6 Unidad 28

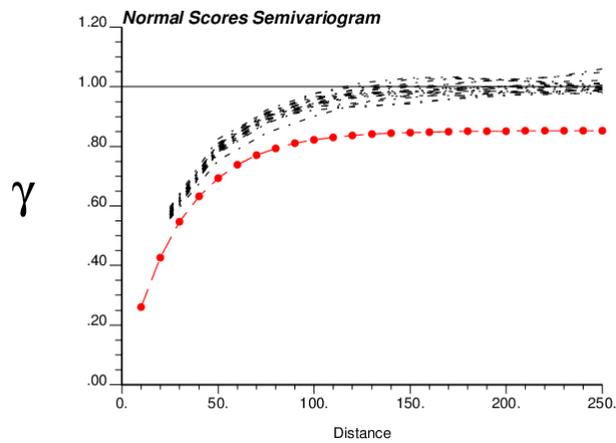


Gráfico 52: Validación variogramas Ley de Cu rougher unidad 28

En los gráficos anteriores se observa que las simulaciones del modelo M1 reproducen la continuidad espacial modelada por el ajuste variográfico, sin embargo dicha reproducción no es completa. Más aún, se observa que en general los variogramas de las variables simuladas dan cuenta de una menor correlación espacial que la que fue modelada. Lo anterior se puede explicar tomando en cuenta que al adicionar datos condicionantes a las simulaciones se está modificando la continuidad espacial de las variables modeladas, y por lo tanto, al agregar esta restricción las simulaciones no logran reproducir de manera perfecta los modelos variográficos. Sin embargo, las validaciones son satisfactorias, dada la complejidad del modelo variográfico empleado.

### 5.1.3 Validaciones mediante scatterplots modelo M1

Una vez que se han obtenido las realizaciones, se corrobora si los datos condicionantes han sido preservados en los sitios correspondientes. Para ello, es que mediante el programa *Getpairs* se determinan los pares de datos que se ubican en las mismas posiciones, considerando cierta holgura. Esta holgura depende de la separación de los puntos en el modelo, los que en este caso cubren un espacio de  $25 \times 25 \times 15$  [ $m^3$ ], es por eso que se utiliza una holgura equivalente a la distancia entre un punto ubicado en el centro del paralelepípedo y un nodo cualquiera, como se muestra en la Ilustración 21. En el Gráfico 53 se muestra la nube de dispersión de la variable ley de Cu *rougher* para la unidad 516, mientras que las nubes de dispersión para las demás variables y unidades se muestran en el Anexo A-14.

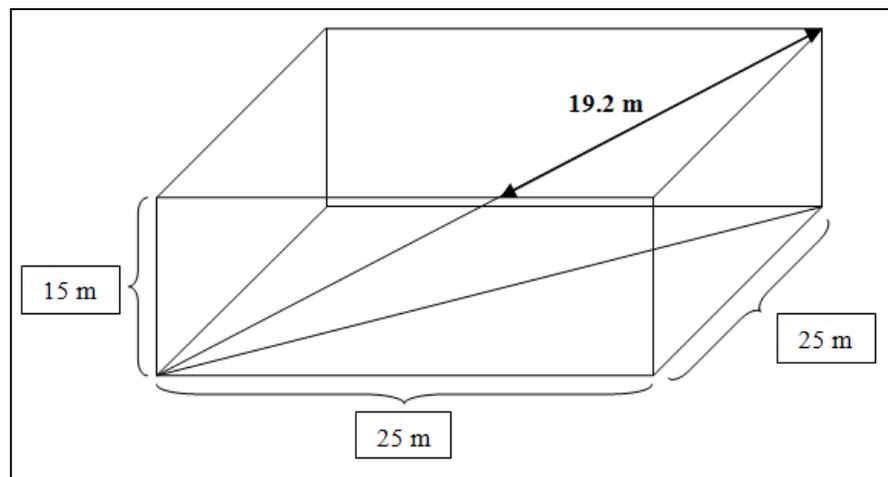


Ilustración 21: Cálculo distancia para asignación de datos a nodos

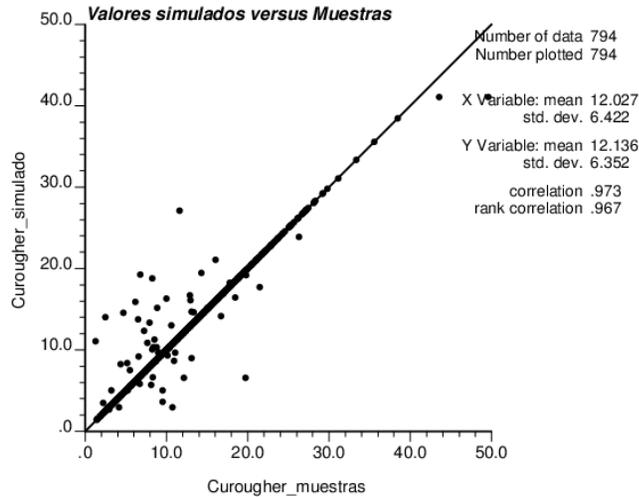


Gráfico 53: Scatterplot Ley de Cu rougher simulado y muestras unidad 516

En los gráficos de dispersión se ve claramente que los datos condicionantes son reproducidos de manera fehaciente por las realizaciones generadas, pues la mayoría de los datos se ubican en la recta de pendiente 1. Es así que tanto el coeficiente de correlación como el coeficiente  $R^2$  son bastante cercanos a 1, por ende, existe una buena representatividad de los datos condicionantes. Además, la media y la varianza presentan gran similitud en la mayoría de los casos.

## 5.2 Validación modelo M2

### 5.2.1 Validación estadística modelo M2

En los gráficos 54 y 55, se muestran los *boxplots* para la ley de Cu rougher por unidad de estimación, para los datos condicionantes y para una realización del modelo M2, en ellos se aprecia que en general ocurre una sobreestimación y un angostamiento de la distribución de la variable ley de Cu rougher para el modelo M2.

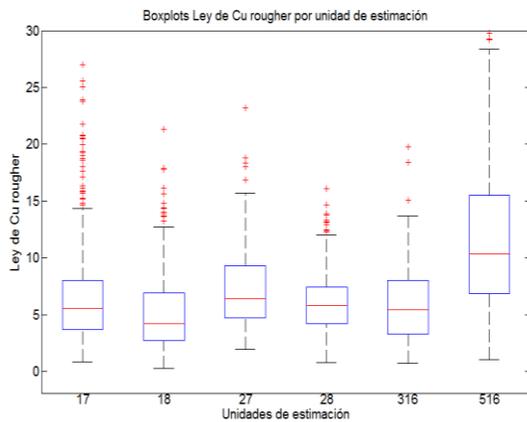


Gráfico 54: Boxplots Ley de Cu rougher por unidad de estimación datos condicionantes

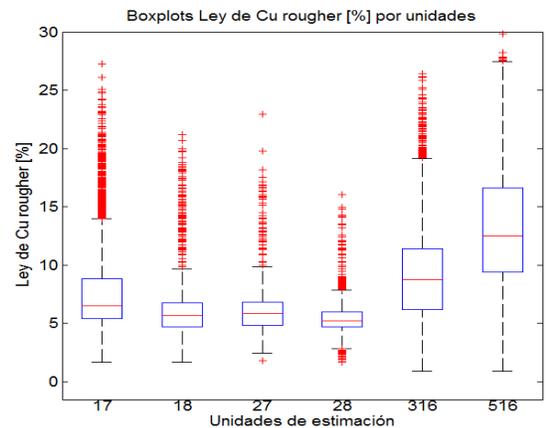


Gráfico 55: Boxplots Ley de Cu rougher por unidad de estimación modelo M2

### 5.3 Comparación modelos a soporte puntual con datos reales

A continuación se muestran los resultados para el *jack-knife* de los modelos M1 y M2, respecto a 328 datos que fueron apartados de manera totalmente aleatoria.

#### 5.3.1 Jack-knife para modelo M1

Tabla 26: Jack-knife modelo M1

	Media	Desviación Estándar	Error porcentual	Pendiente regresión	R <sup>2</sup> ajustado	Coefficiente de correlación
Sondajes	8.47	5.44	0.85 %	0.63	0.58	0.76
Simulados	8.40	4.53				

En la Tabla 26 se muestra el resultado del *jack-knife* del modelo M1, en ella se aprecia que la media se mantiene dentro de un rango aceptable, con una diferencia porcentual menor al 1%, lo que indica la baja presencia de sesgo global. Así mismo, el coeficiente de correlación de 0.76 indica una buena dependencia lineal entre las variables. Distinto ocurre para el coeficiente  $R^2$  ajustado y para la pendiente de la regresión, ya que un valor de  $R^2 = 0.58$  indica un ajuste bastante regular, mientras que una pendiente de 0.63 da cuenta de la presencia de sesgo condicional.

#### 5.3.2 Jack-knife para modelo M2

Tabla 27: Jack-knife modelo M2

	Media	Desviación estándar	Error porcentual	Pendiente regresión	R <sup>2</sup> ajustado	Coefficiente de correlación
Sondajes	8.47	5.44	4.92 %	0.55	0.51	0.71
Simulados	8.91	4.19				

En la Tabla 27 se muestra el resultado de la validación cruzada para el modelo M2, donde se observa un empeoramiento del modelo relativo a lo mostrado por el modelo M1. En primer lugar, existe una leve sobreestimación en la media que cercana al 5%, lo que señala la existencia de sesgo global aceptable. De igual manera, se observa una disminución del coeficiente de correlación a un valor de 0.71, por lo que, si bien hay una pérdida de la proporcionalidad

comparado con el modelo M1, todavía se mantiene en rangos satisfactorios. Por otro lado, el coeficiente  $R^2$  disminuye a un valor de 0.51, de modo que los valores simulados se ajustan de peor manera respecto a los reales. Finalmente, la pendiente de la regresión, cuyo valor es de  $m=0.55$ , indica la presencia de un sesgo condicional levemente mayor.

### 5.3.3 Scatterplot contra datos excluidos modelos M1 y M2

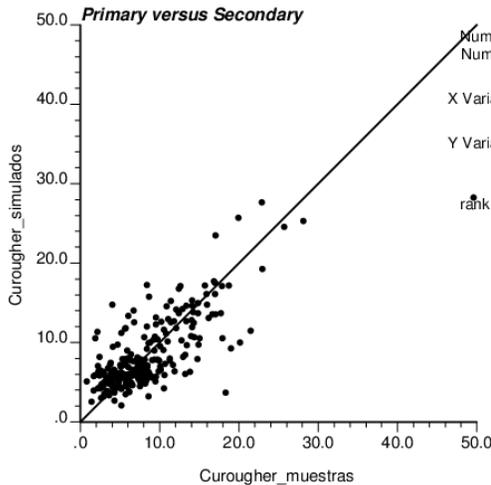


Gráfico 56: Scatterplot modelo M1 contra datos excluidos

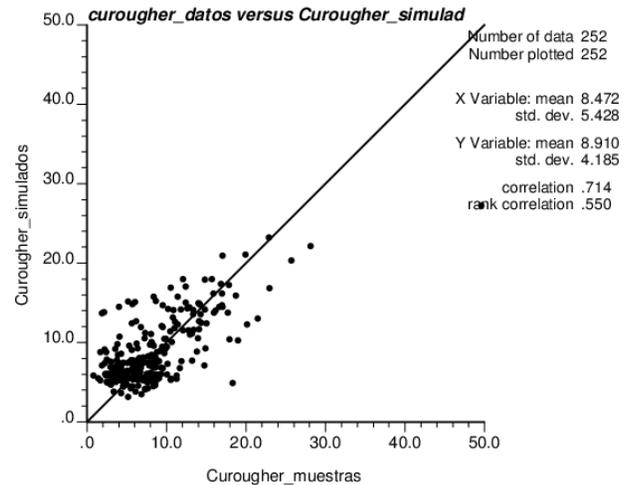
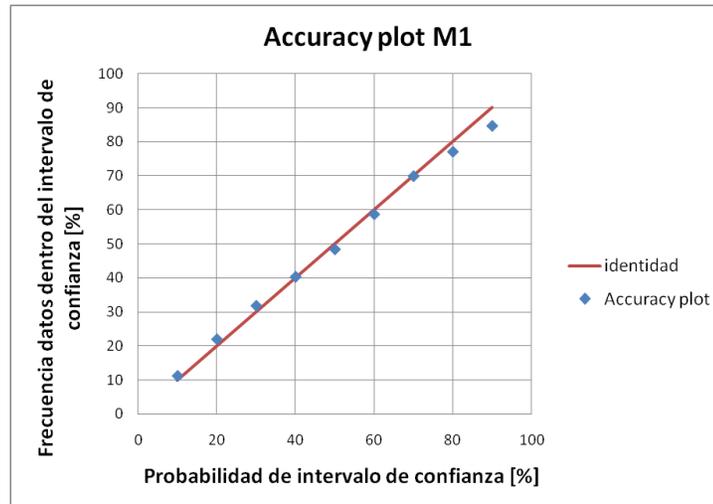


Gráfico 57: Scatterplot modelo M2 contra datos excluidos

En el Gráfico 56 se aprecia que los datos simulados para el modelo M1 se correlacionan de buena manera con los datos excluidos, llegando un coeficiente de correlación lineal de 0.76. Mientras que para el modelo M2, se genera el Gráfico 57, donde se observa una muy buena correlación con un valor de 0.71, sin embargo se aprecia una sobreestimación de los valores inferiores, lo cual presumiblemente puede ocurrir por un mal ajuste de la variable ley de Cu *rougher* estimada a partir de la función de varias variables, y que además puede explicar el aumento del promedio de los valores simulados de ley de Cu *rougher*.

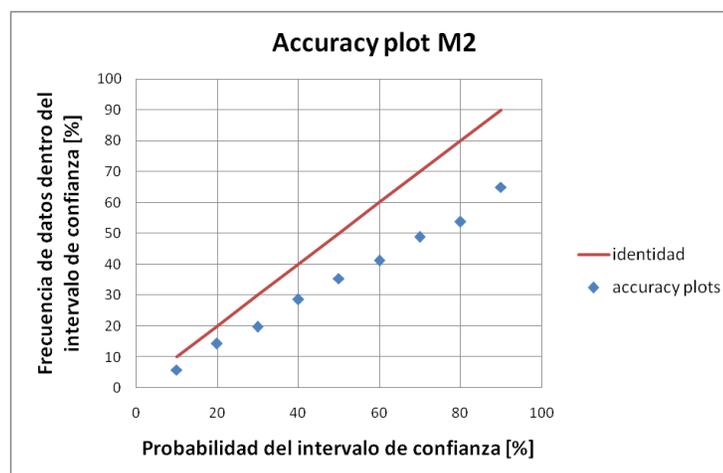
### 5.3.4 Accuracy plots modelos M1 y M2

Se obtienen *accuracy-plots* para los modelos M1 y M2, con el fin de averiguar cuál de ellos modela más adecuadamente la incertidumbre local de la variable ley de Cu *rougher*.



**Gráfico 58: Accuracy plot modelo M1**

En el Gráfico 58 se aprecia lo bien que la probabilidad de los intervalos de confianza es reproducida por las realizaciones obtenidas, ya que se ajusta prácticamente de manera perfecta a la recta identidad. Esto indica que la incertidumbre local del modelo M1 es consecuente con la realidad.



**Gráfico 59: Accuracy plot modelo M2**

En el Gráfico 59 se puede ver que a medida que aumenta la probabilidad del intervalo de confianza disminuye la frecuencia de los datos que caen dentro de éste. Por ende, se puede afirmar que el modelo M2 subestima la incertidumbre local real, resultando en un modelo demasiado optimista, ya que supone que los resultados obtenidos para el modelo M2 son más precisos de lo que realmente son.

#### 5.4 Conclusiones modelos a soporte puntual

A partir de las herramientas estadísticas calculadas, se puede comparar los modelos a soporte puntual y decidir cuál de los ellos es más representativo de la realidad, además de explicar por qué se obtienen ciertos resultados no tan satisfactorios.

- En primer lugar, la media de los datos es mejor estimada por parte del modelo M1, con un error porcentual menor al 1%, muy inferior al 5% para el modelo M2. Lo anterior, puede ser explicado por la sobreestimación de los valores inferiores por parte de la función de varias variables, lo que se traduce en que no existan valores cercanos a cero que disminuyan el valor de la media.
- Por otro lado, la desviación estándar disminuye para ambos modelos respecto a la realidad. Sin embargo, para el modelo M2 esta disminución es levemente mayor, pues la función de varias variables no mantiene la misma dispersión que los datos condicionantes (ver Gráfico 28, 29 y 30), y por ende, provoca que disminuya la dispersión de los valores simulados para el modelo M2.
- Respecto a la pendiente de la regresión, se obtiene un valor mayor para el modelo M1 con una pendiente de 0.67, mientras que para el modelo M2 el valor llega a 0.55. Por lo anterior, se puede afirmar que el modelo M1 tiene un menor sesgo condicional que el modelo M2, lo cual puede ser debido a la escasa reproducción de datos con valor de ley *rougher* cercanos a cero por parte del modelo M2.
- Relativo al coeficiente  $R^2$ , se obtiene un valor de 0.58 para el caso del modelo M1, el cual es levemente mayor al 0.51 para el modelo M2. Por lo tanto, el modelo M1 reproduce de mejor manera la realidad que el modelo M2. Esto también puede deberse a una reproducción deficiente de los valores por parte de la función de varias variables.
- De la misma manera, el coeficiente de correlación lineal es mayor para el modelo M1 que para M2, con 0.76 por sobre 0.71. Lo que significa que la correlación lineal es satisfactoria para ambos modelos, con una leve superioridad del modelo M1.
- Finalmente, los resultados para los *accuracy plots* difieren bastante entre un modelo y otro. Por un lado, el modelo M1 posee una reproducción de la incertidumbre local casi perfecta, mientras que para el modelo M2, la reproducción es bastante pobre, ya que se subestima demasiado la incertidumbre para este modelo.

En general, los indicadores estudiados en el *jack-knife* validan la reproducción de la realidad por parte del modelo M1. Mientras que para el modelo M2 no se puede hacer tal aseveración con la misma seguridad, ya que posee una disminución de la confiabilidad respecto al modelo M1, en especial respecto a la reproducción de la incertidumbre.

## 5.5 Validación modelo M3

### 5.5.1 Validación estadística modelo M3

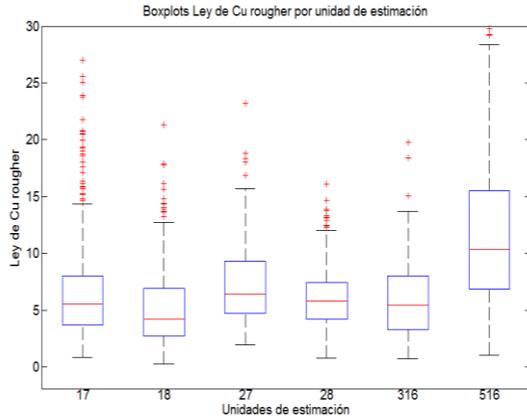


Gráfico 60: Boxplots ley de Cu rougher por unidad de estimación datos condicionantes

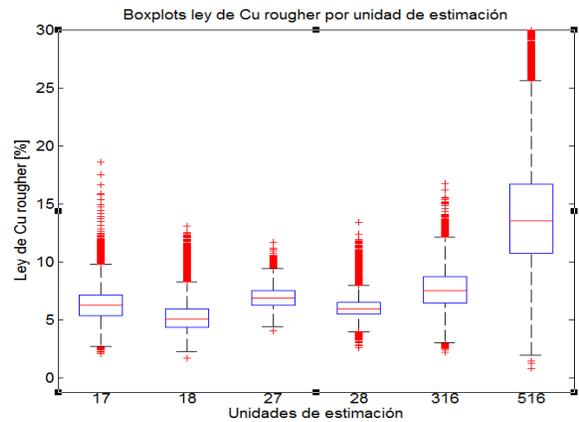


Gráfico 61: Boxplots ley de Cu rougher por unidad de estimación modelo M3

En los gráficos 60 y 61 se muestran los *boxplots* para la variable ley de Cu rougher por unidad de estimación, para los datos condicionantes y para el modelo M3. En ellos se observa cómo al realizar la simulación a soporte de bloque las distribuciones se suavizan de manera considerable, lo cual implica que los valores extremos se acerquen a la media y que se conserve el valor de la misma.

## 5.6 Validación modelo M4

### 5.6.1 Validación estadística modelo M4

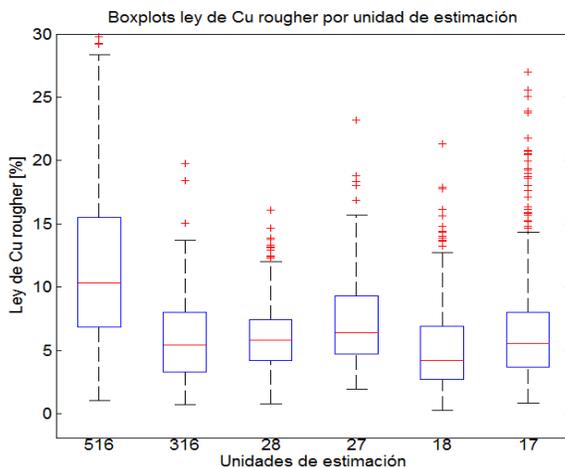


Gráfico 62: Boxplots ley de Cu rougher por unidad de estimación para datos condicionantes

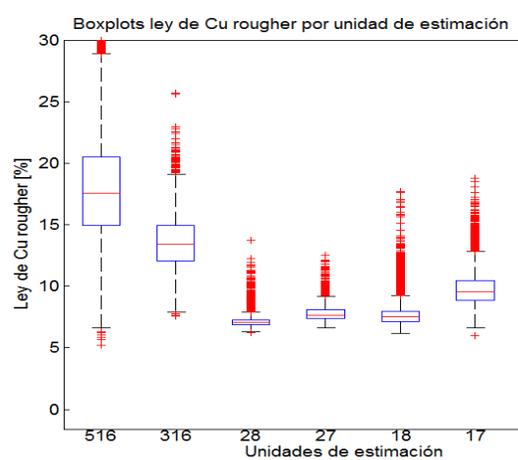


Gráfico 63: Boxplots ley de Cu rougher por unidad de estimación modelo M4

En los gráficos 62 y 63 se observan los *boxplots* para la variable ley de Cu rougher por unidad de estimación para los datos condicionantes y para el modelo M4. En ellos se aprecia una sobreestimación bastante pronunciada de la variable ley de Cu rougher, al mismo tiempo que un estrechamiento exagerado de las distribuciones para todas las unidades.

## 5.7 Comparación modelos a soporte de bloque con datos reales

Al igual que para los modelos a soporte puntual, los modelos M3 y M4 se comparan mediante un *jack-knife* y *accuracy-plots*.

### 5.7.1 Jack-knife para modelo M3

Tabla 28: Resultados jack-knife modelo M3

	Media	Desviación estándar	Error porcentual	Pendiente regresión	R <sup>2</sup> ajustado	Coefficiente de correlación
Sondajes	8.47	5.44	7.98%	0.56	0.34	0.58
Simulados	9.21	5.23				

En la Tabla 28 se muestra el resultado del *jack-knife* del modelo M3, en ella se aprecia que la media presenta una diferencia no menor respecto a los datos condicionantes, la cual se acerca al 8%, lo que indica la presencia de sesgo global. Mientras que para el resto de los indicadores se produce un descenso que no se puede despreciar, en especial para el coeficiente  $R^2$  ajustado. Razón por la cual el modelo pierde algo de confiabilidad respecto al modelo equivalente a soporte puntual M1.

### 5.7.1 Jack-knife para modelo M4

Tabla 29: Resultado Jack-Knife para modelo M4

	Muestras	Desviación estándar	Diferencia porcentual	Pendiente regresión	Coefficiente R <sup>2</sup>	Coefficiente de correlación
Sondajes	8.47	5.44	29.5%	0.61	0.35	0.59
Simulados	12.02	5.65				

La Tabla 29 muestra el resultado del *jack-knife* hecho para el modelo M4, en donde se observa una sobreestimación importante de la variable ley de Cu *rougher*, que alcanza casi el 30%. De la misma forma, el resto de los indicadores presentan valores que no alcanzan los estándares necesarios para validar el modelo.

### 5.7.2 Accuracy plots

Se generan *accuracy-plots* para los modelos M3 y M4, con el fin de averiguar cuál de ellos modela más adecuadamente la incertidumbre local de la variable ley de Cu rougher.

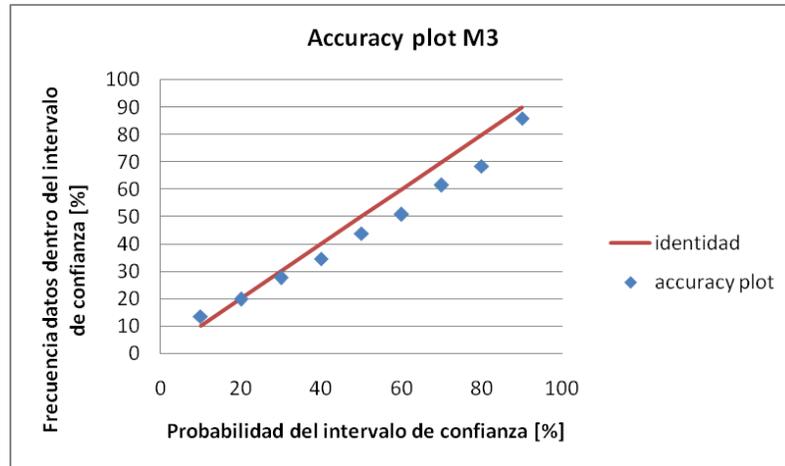


Gráfico 64: Accuracy plot modelo M3

En el Gráfico 64 se observa cómo la incertidumbre local es levemente subestimada por parte de las realizaciones obtenidas, no obstante aquello el error se encuentra dentro de un rango aceptable, ya que el error es del 5,6% promedio.

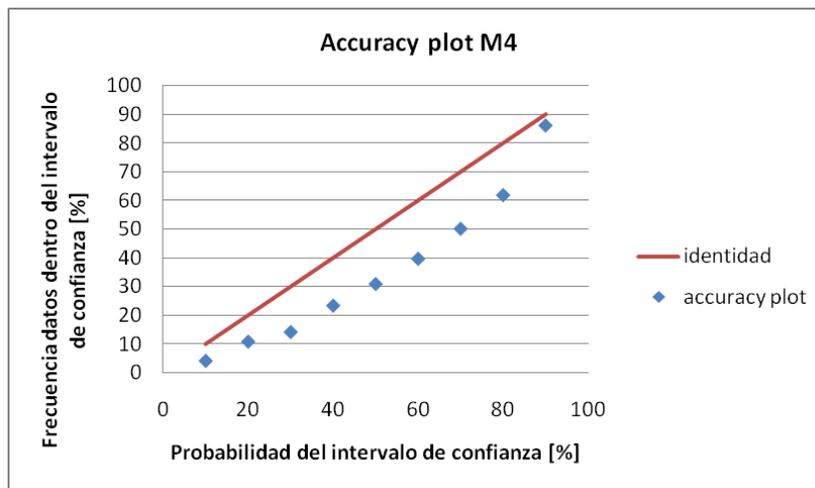


Gráfico 65: Accuracy plot modelo M4

En el Gráfico 65 se muestra que en el modelo M4 la incertidumbre local se subestima bastante, comparado con los datos reales. Por lo tanto, el modelo M3 es mucho más representativo de la realidad que el modelo M4 en este sentido, ya que la subestimación que presenta es mucho menor.

### 5.7.3 Gráficos de derivas espaciales según coordenada

Con el fin de determinar si los valores simulados siguen la misma tendencia espacial que los datos muestreados, se generan gráficos de derivas espaciales en los cuales se contrasta la ley de *Cu rougher* simulada con la de las muestras de sondaje. En los gráficos 66 y 67 se muestran las derivas espaciales en la coordenada Z para los modelos M3 y M4 respectivamente, mientras que en el Anexo A-15 se presentan los gráficos para las coordenadas X e Y.

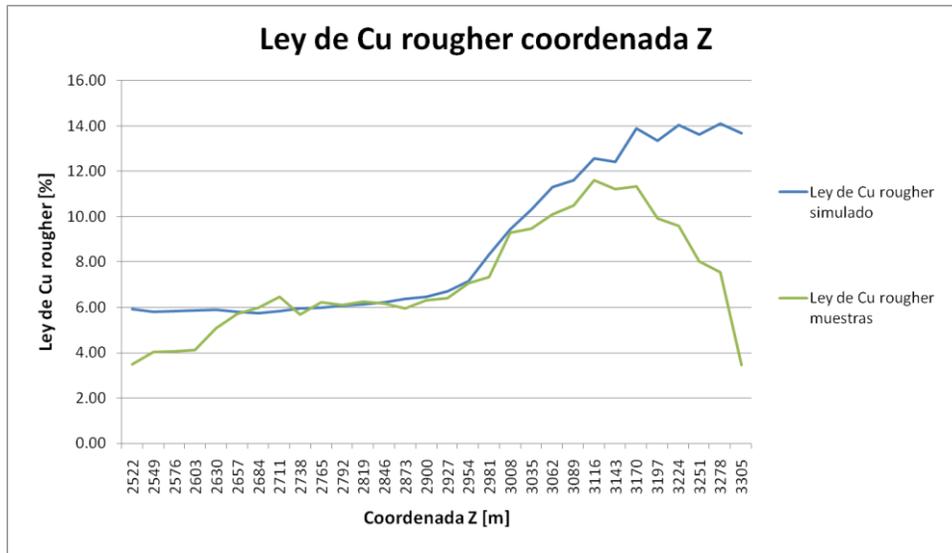


Gráfico 66: Derivas espaciales modelo M3 coordenada Z

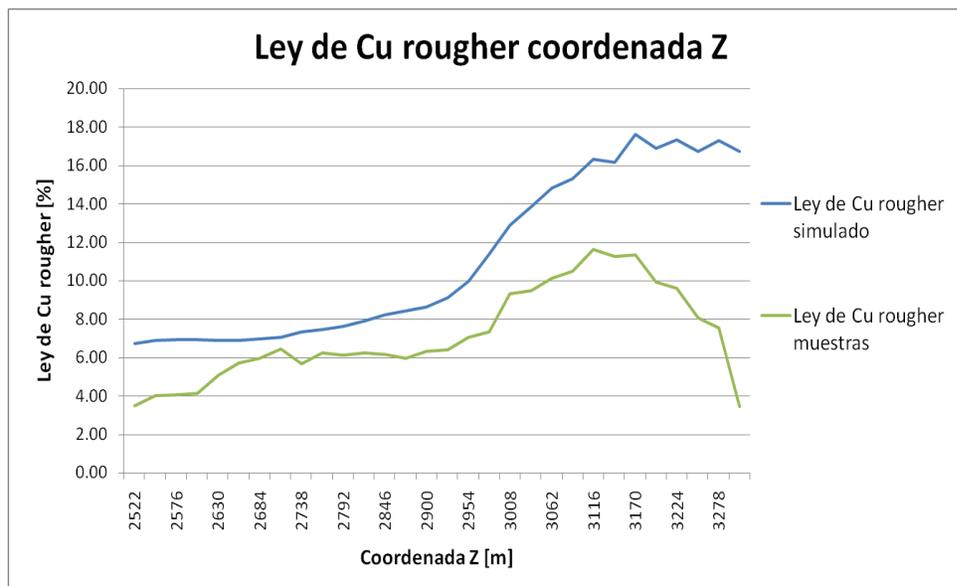


Gráfico 67: Derivas espaciales modelo M4 coordenada Z

En el gráfico 66 se aprecia cómo la ley de *Cu rougher* simulada sigue la tendencia de la ley de *Cu rougher* de los datos de sondajes para la coordenada Z, y como es de esperar para un modelo a un soporte mayor, se aprecia un suavizamiento de la variable ley de *Cu rougher*. Por el contrario, en el gráfico 67 se aprecia una evidente sobreestimación de los valores simulados para el modelo M4.

## 5.8 Conclusiones modelos a soporte de bloque

Tal como para los modelos a soporte puntual, se comparan los resultados de las validaciones para los modelos a soporte de bloque para obtener conclusiones que ayuden a decidir cuál de ellos representa mejor la realidad y de esa forma definir cuál metodología es conveniente a la hora de definir un modelo de ley de Cu *rougher* a escala de bloque.

- En primer lugar, para ninguno de los dos modelos la media de los datos es bien estimada. Por un lado, para el modelo M3 la media se sobreestima en un 8%, mientras que para el modelo M4 se sobreestima deliberadamente hasta casi un 30%. Si bien resulta difícil explicar a qué se debe la sobreestimación de la ley de Cu *rougher* para el modelo M3, era de esperar que para el modelo M4 el resultado fuera peor, ya que la función de varias variables utilizada es la misma empleada para el modelo a soporte puntual M2, para el cual la sobreestimación de la variable fue mayor que para el modelo M1.
- Por otro lado, la desviación estándar se comporta de manera bastante particular, pues al pasar a un soporte mayor es de esperar que la desviación estándar de los datos disminuya. A pesar de lo anterior, sólo para el modelo M3 se produce una disminución de la desviación estándar, mientras que para el modelo M4 existe un leve aumento de la misma. Por lo tanto, se puede advertir que el modelo M4 presenta ciertas inconsistencias.
- Respecto a la pendiente de la regresión, los valores obtenidos para ambos modelos son similares, con una leve superioridad del modelo M3 (0.61) sobre el modelo M4 (0.56). Por lo que, de la misma manera que para los modelos puntuales, ambos modelos presentan sesgo condicional, siendo éste mayor en el caso del modelo M4, lo cual puede ser debido a la escasa reproducción de datos con valor de ley *rougher* cercanos a cero por parte del modelo M4.
- Relativo al coeficiente  $R^2$ , se obtiene un valor de 0.34 para el caso del modelo M3, mientras que para el modelo M4 se obtiene un valor de 0.35. Ambos valores, que son prácticamente iguales, son insuficientes para asegurar una buena reproducción de la realidad por parte de los modelos a escala de bloque.
- Por otro lado, los coeficientes de correlación son cercanos a 0.6 para ambos modelos. Lo que significa que la correlación lineal es poco satisfactoria para los modelos a soporte de bloque.
- Al igual que para los modelos a soporte puntual, los resultados para los *accuracy plots* marcan grandes diferencias entre los modelos M3 y M4. Por un lado, el modelo M3 posee una reproducción de la incertidumbre local aceptable, sobre todo para intervalos de confianza pequeños. Mientras que para el modelo M4, se subestima la incertidumbre local en la gran mayoría de los intervalos de confianza.

- Los gráficos de derivas espaciales evidencian una mejor reproducción de la tendencia de la ley de Cu *rougher* por parte del modelo M3, mientras que para el modelo M4 se observa una sobreestimación constante en el espacio. Lo cual se debe a la sobreestimación que produce la función de varias variables en el modelo M4. Por otro lado, para el modelo M3 se puede apreciar que la tendencia se ve más suavizada, como es de esperar para un modelo a soporte mayor que las muestras.

Por lo anterior, se puede afirmar que la metodología empleada para definir el modelo M3 de ley de Cu *rougher* es aceptable, ya que la gran mayoría de los indicadores generan resultados convincentes. Por otro lado, los resultados obtenidos para el modelo M4 no convencen de la misma manera, en especial por el hecho de que se sobreestima demasiado la ley de Cu *rougher* y existe una mala reproducción de la incertidumbre local de las realizaciones.

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se desarrollan dos metodologías destinadas a construir un modelo de ley de Cu de concentrado *rougher* a soporte puntual y de bloque, cada una de las cuales posee características a favor y en contra. La primera de ellas consiste en obtener el modelo de bloques directamente (M1 y M3) a partir de la cosimulación de la variable ley de Cu *rougher* en conjunto con un grupo de variables explicativas, el problema de este procedimiento es que la variable simulada no es aditiva, y por lo tanto, en teoría no es apta para desarrollar simulaciones a escala de bloque. Mientras que por otro lado, la segunda metodología aprovecha las variables explicativas cosimuladas junto a la ley de Cu *rougher*, y a través de una función de varias variables definida previamente, se obtiene el valor de la ley de Cu *rougher* para cada bloque del modelo (M2 y M4). Se presume que con la segunda metodología se podrían obtener mejores resultados ya que no utiliza procedimientos aditivos en variables no aditivas como la ley de Cu *rougher*, sin embargo, la función de varias variables que se define agrega incertidumbre al resultado final, ya que puede que su determinación no haya sido lo suficientemente exhaustiva o que las correlaciones entre las variables no permitan que lo sea.

Las grandes etapas que se desarrollan en la construcción de ambos modelos de bloque son: análisis exploratorio de datos, determinación de variables explicativas, definición de unidades de estimación y variografía. A las cuales se debe agregar la definición de la función de varias variables de ley de concentrado de Cu *rougher*, para los modelos indirectos M2 y M4. Posterior a todas estas etapas, se lleva a cabo la validación de los resultados mediante *jack-knifes* y *accuracy plots*, tanto para los modelos a soporte puntual como de bloque.

En primer lugar, para los modelos a soporte puntual los resultados son algo diferentes. Para el modelo M1, los resultados son satisfactorios, ya que presenta una buena reproducción de *boxplots*, un sesgo global insignificante y un coeficiente de correlación de 0.76 entre otros indicadores, obteniéndose así un modelo de ley de Cu *rougher* a soporte puntual bastante confiable. Por otro lado, para el modelo M2, calculado de manera indirecta mediante la función de varias variables, si bien los resultados no son tan favorables como es el caso del modelo M1, sigue siendo un modelo con una representatividad importante de la realidad, y sus deficiencias son atribuidas principalmente a la definición de la función de varias variables, entre ellas una escasa reproducción de la incertidumbre local.

En cuanto a los modelos a soporte de bloque, existen claras diferencias entre los resultados obtenidos para los modelos M3 y M4, al igual que para el caso puntual. Si bien ambos modelos se ajustan de peor manera que sus variantes a soporte puntual, para el caso del modelo M4 hay varios indicadores muy lejanos al óptimo. Por una parte, existe una sobreestimación exagerada de la variable ley de Cu *rougher* que lleva incluso a que en la validación exista un error porcentual de las medias superior al 30%, lo cual es inaceptable para un modelo de este tipo. Además, se observa en los *accuracy plots* del modelo M4 que no existe gran representatividad de la incertidumbre local. Por lo tanto, el modelo M3 es el que presenta los resultados más aceptables.

El principal objetivo del trabajo se cumple, ya que se demostró que la metodología aplicada al modelo directo M3, que en teoría no llevaría a resultados favorables, fue capaz de generar un resultado satisfactorio. Por otro lado, la metodología aplicada al modelo M4, no puede ser descartada del todo, ya que su principal error radica en la modelación de la función multivariable, y en ese sentido pueden apuntar las nuevas investigaciones que surjan a partir de este trabajo.

Los objetivos específicos se cumplen de manera parcial, pues por un lado sí se obtiene un modelo altamente confiable de ley de Cu *rougher* a soporte puntual. Sin embargo, no cabe duda de que los resultados de los modelos construidos a partir de la función multivariable no fueron los más favorables, y por lo tanto es necesario al menos cuestionar la definición de la misma. A pesar de lo anterior, se pudo identificar que existe posibilidad de mejora, dado que la principal falla que presenta la función de varias variables es su definición deficiente cerca del origen del dominio, la cual es probablemente la razón por la cual los modelos M2 y M4, sobreestiman la variable ley de Cu *rougher*. Sin embargo, no es raro que el resultado del ajuste de la función de varias variables no haya sido el mejor, pues en innumerables ocasiones se ha tratado de encontrar correlaciones entre la ley de Cu *rougher* y la ley de Cu de alimentación sin la obtención de buenos resultados, lo cual se atribuye a que la ley de Cu *rougher* depende de otros factores además de las consideradas en el trabajo, tales como la recuperación metalúrgica y la recuperación en peso.

En cuanto al trabajo desarrollado en la construcción de modelos de bloques, independiente de lo acertado de sus resultados finales, se puede reconocer a las etapas de “Definición de unidades de estimación” y “Variografía” como aquellas que toman la mayor cantidad de tiempo en su desarrollo, lo cual es muy acorde a su importancia dentro del estudio. Es importante reconocer los buenos resultados obtenidos para los modelos de bloque directos a soporte puntual M1 y de bloque M3, como producto de la exhaustividad con la cual se desarrollaron las etapas antes mencionadas.

Como recomendaciones para continuar el trabajo realizado, es muy importante averiguar qué pasaría con el resultado de los modelos M2 y M4 utilizando funciones de ley de Cu *rougher* con mejores ajustes en el origen. Además, una manera de corregir el ajuste de la regresión de varias variables es diferenciarlo por unidad de estimación, esto es, utilizar los datos condicionantes de manera diferenciada para cada una de las unidades de estimación.

Otra recomendación para este estudio es abordarlo usando otra metodología. En vez de utilizar la variable ley de Cu *rougher* que no es aditiva, se puede trabajar con una variable que esté relacionada con ella de manera simple, como por ejemplo la masa de fino, la cual si bien no es aditiva en todos los casos, sí lo es en un rango pequeño. Por lo tanto, se puede hacer modelos de bloque usando esta variables y luego calcular la ley de Cu *rougher* de manera simple. Cabe destacar que ambos modelos se pueden acoplar usando las siguientes ecuaciones.

$$M_{fino} = Ley_{Cu-alimentación} \times R_{Cu} \times M_{alimentación}$$

$$R_{Cu} = \frac{Y * ley_{concentrado}}{ley_{alimentación}}$$

**Ecuación 8: Sistema ecuaciones para acoplar modelos de masa de fino y ley de Cu rougher**

Por otro lado, se debe tener en cuenta que el resultado de este estudio es un modelo de bloque de ley de Cu *rougher* a escala de laboratorio, por lo cual aún existe una limitante para la utilización de los resultados directamente en la aplicación en planes de producción, ya que nada asegura que los rendimientos en planta sean los mismos que a escala de laboratorio. Lo anterior toma gran importancia cuando se habla de la razón Cu/Fe, ya que existen efectos negativos sobre el rendimiento en planta para valores menores a 0.5 de la razón Cu/Fe, como también en presencia

de arcillas. Es por eso que los nuevos trabajos debieran orientarse a la búsqueda de escalamientos de modelos como este, tomando en cuenta este tipo de antecedentes.

Finalmente, cabe destacar que en el caso de lograr un modelo de ley de concentrado de Cu *rougher* a soporte de bloque escalado a planta con alta confiabilidad aún existiría un problema. Pues por más que se confeccione un plan de producción óptimo, muchas veces a planta son enviados materiales diferentes a lo presupuestado, lo que puede ocurrir por contratiempos tales como fallas de equipos o imprevistos geomecánicos, como también a raíz de malas prácticas por parte de los operadores, quienes con el afán de cumplir metas de producción utilizan materiales de acopios con otras propiedades metalúrgicas y muchas veces con leyes de alimentación diferentes a las previstas. Por lo tanto, a menos que se logre corregir estos problemas, no se puede considerar que los rendimientos de ley de concentrado de Cu *rougher* en planta se cumplirán exhaustivamente, ya que sería atribuirle una responsabilidad injustificada a quienes trabajan en ella, puesto que existen una serie de factores externos involucrados.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Xavier Emery. 2011 .“*Geoestadística*”.
- [2] S. Coward, J. Vann, S. Dunham y M. Stewart. “*The Primary-Response Framework for Geometallurgical Variables*”.
- [3] Pedro Carrasco, Jean Paul Chilès y Serge Séguret, S., 2008. “*Additivity, Metallurgical recovery, and Grade*”.
- [4] Jussi Klemelä. “*Smoothing of Multivariate Data. Density Estimation and Visualization*”.
- [5] Ruben Padilla, Spencer Titley, Francisco Pimentel. “*Geology of the Escondida Porphyry Copper Deposit, Antofagasta Region*” 2001.
- [6] Paula Larrondo, Chad T. Neufeld y Clayton V. Deutsch. “*VARFIT: A program for Semi-Automatic Variogram Modelling*”.
- [7] John G. Manchuk, Clayton V. Deutsch. “*A flexible sequential Gaussian simulation program: USGSIM*”.
- [8] Stephen Guggenheim, R. T. Martin. “*Definition of clay and clay mineral: joint report of the AIPEA nomenclature and CMS nomenclature committees*”.
- [9] Willy Kracht. 2012. “*Apunte Curso Ingeniería de procesamiento de minerales, Universidad de Chile*”.
- [10] Miguel Jiménez, Rodrigo Ramírez, Christian Osorio. “*Evaluación de la razón Cu/Fe y su efecto en los planes de producción Anual, Mensual y Semanal en Minera Escondida*”

## ANEXO A

### 1 HISTOGRAMAS VARIABLES PRELIMINARES

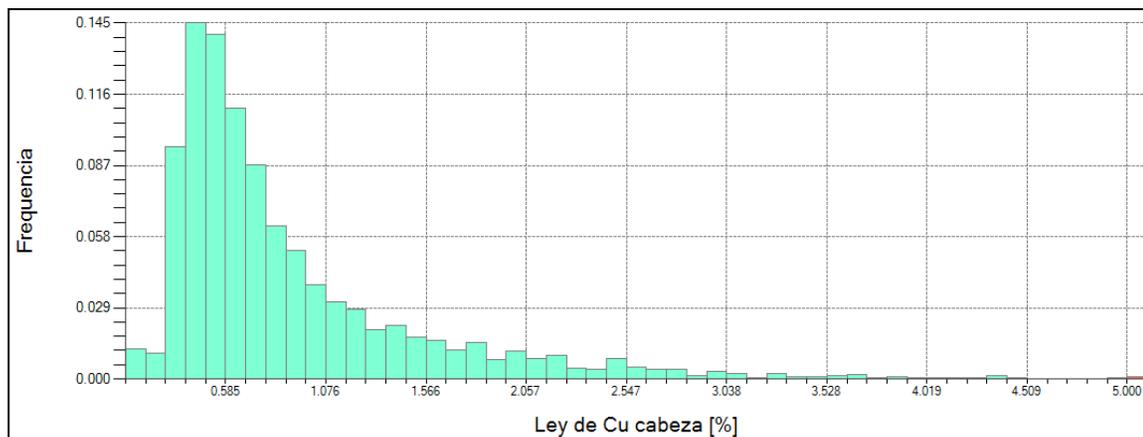


Gráfico 68: Histograma Ley de Cu cabeza

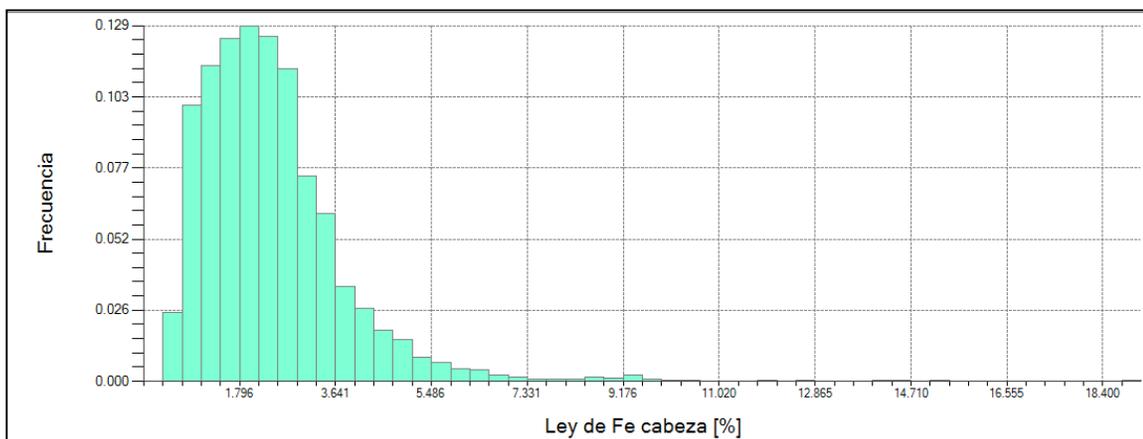


Gráfico 69: Histograma Ley de Fe cabeza

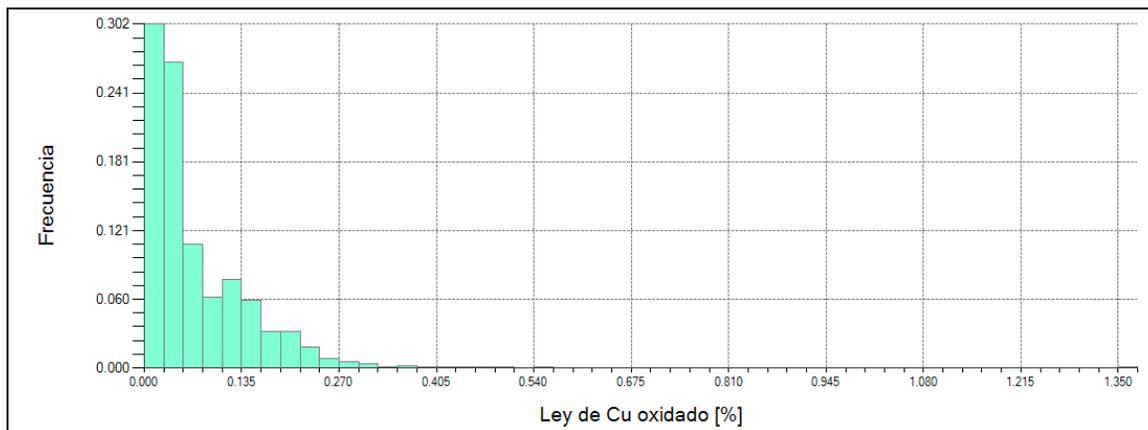


Gráfico 70: Histograma Ley de Cu oxidado

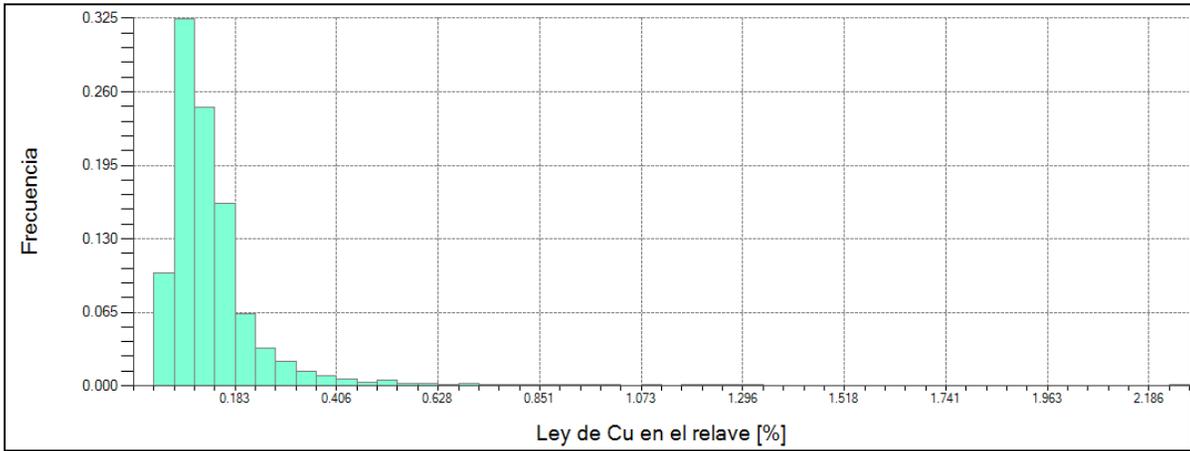


Gráfico 71: Histograma Ley de Cu en el relave

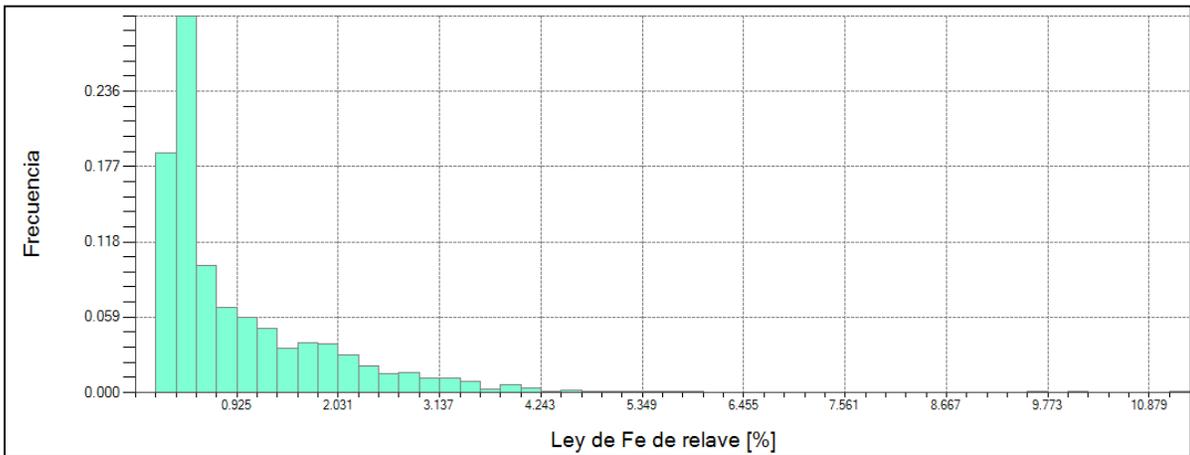
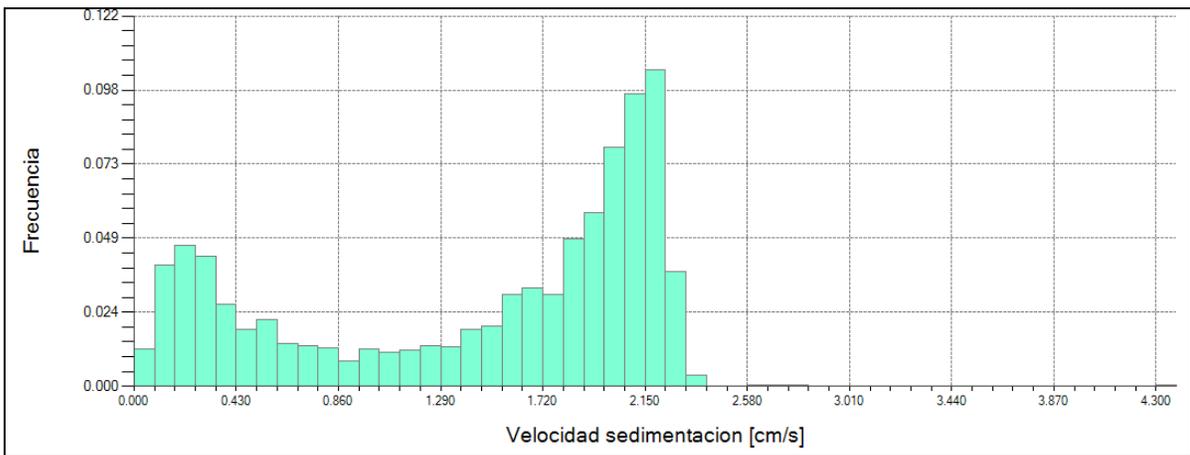


Gráfico 72: Histograma Ley de Fe en el relave



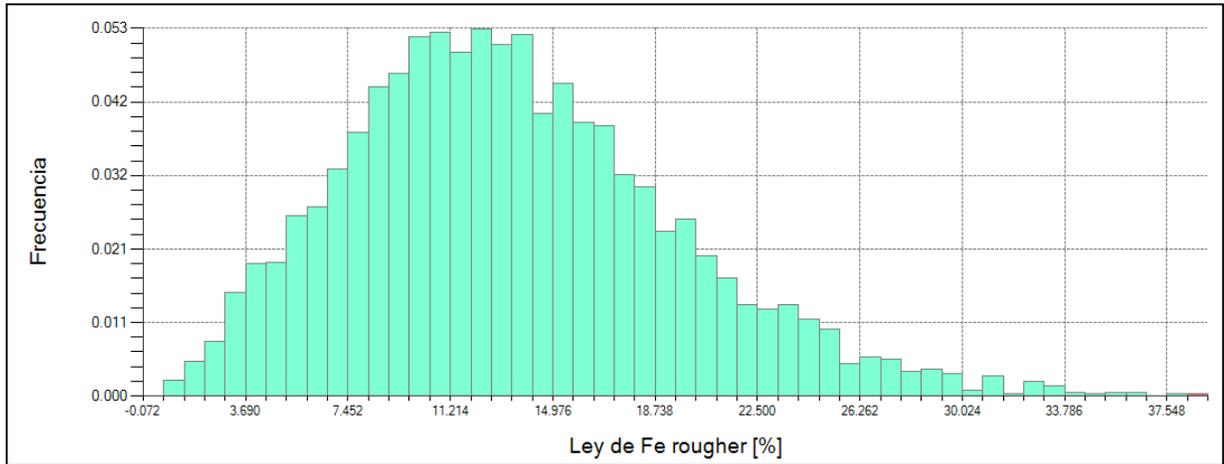


Gráfico 74: Histograma de Ley de Fe rougher

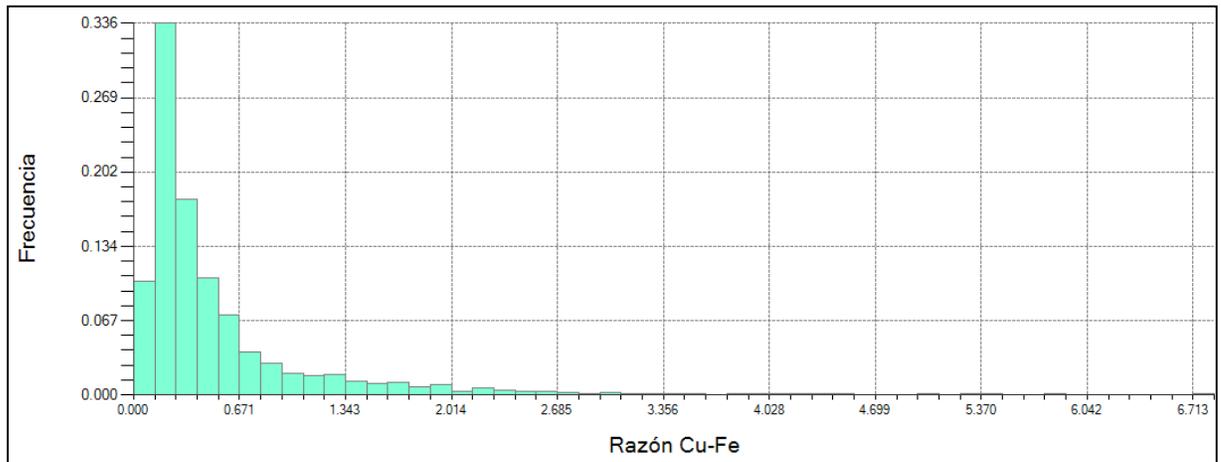


Gráfico 75: Histograma de razón Cu-Fe

## 2 ESTADÍSTICAS BÁSICAS VARIABLES PRELIMINARES

Ley de Fe cabeza [%]	
N° datos	3281
Media	2.42
Mínimo	0.32
Máximo	18.77
Desviación estándar	1.44
varianza	2.06

Tabla 30: Estadísticas básicas Ley de Fe cabeza [%]

Ley de Cu oxidado [%]	
N° datos	3281
Media	0.072
Mínimo	0.01
Máximo	1.35
Desviación estándar	0.073
varianza	0.005

Tabla 31: Estadísticas básicas Ley de Cu oxidado [%]

Ley de Fe relave [%]	
N° datos	3281
Media	0.96
Mínimo	0.04
Máximo	11.1
Desviación estándar	0.97
varianza	0.94

**Tabla 32: Estadísticas básicas Ley de Fe en el relave [%]**

Ley de Fe de concentrado rougher [%]	
N° datos	3281
Media	13.49
Mínimo	0.68
Máximo	38.3
Desviación estándar	6.04
varianza	36.52

**Tabla 33: Estadísticas básicas Ley de Fe en el concentrado rougher [%]**

Velocidad de sedimentación [cm/min]	
N° datos	3005
Media	1.48
Mínimo	0.01
Máximo	4.3
Desviación estándar	0.76
varianza	0.57

**Tabla 34: Estadísticas básicas velocidad de sedimentación [cm/s]**

Ley de Cu relave [%]	
N° datos	3281
Media	0.133
Mínimo	0.005
Máximo	2.23
Desviación estándar	0.122
varianza	0.015

**Tabla 35: Estadísticas básicas Ley de Cu en el relave [%]**

Razón Cu-Fe	
N° datos	3281
Media	0.53
Mínimo	0.02
Máximo	6.71
Desviación estándar	0.6
varianza	0.35

**Tabla 36: Estadísticas básicas razón CuFe**

### 3 NUBES DE DISPERSIÓN

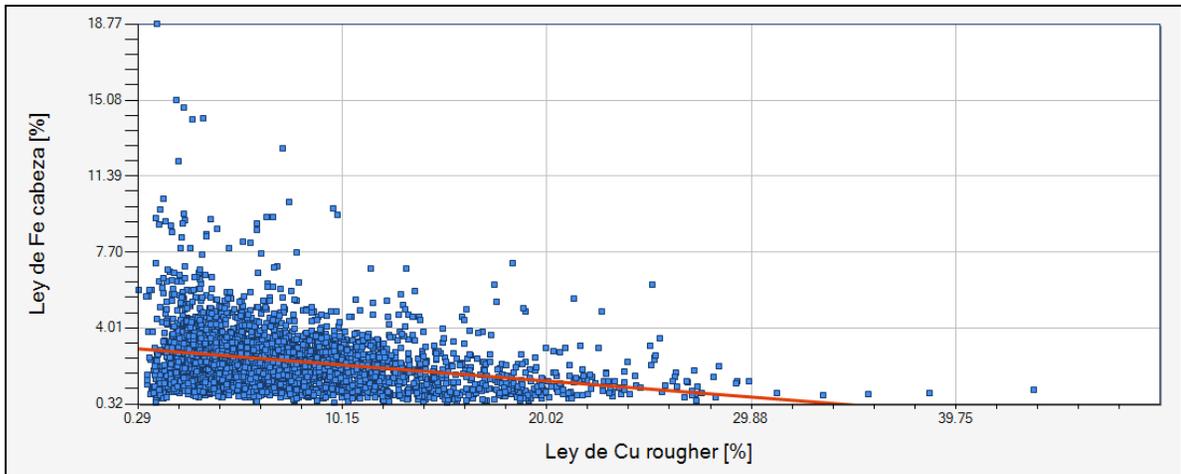


Gráfico 76: Nube de correlación Ley de Cu rougher v/s Ley de Fe cabeza

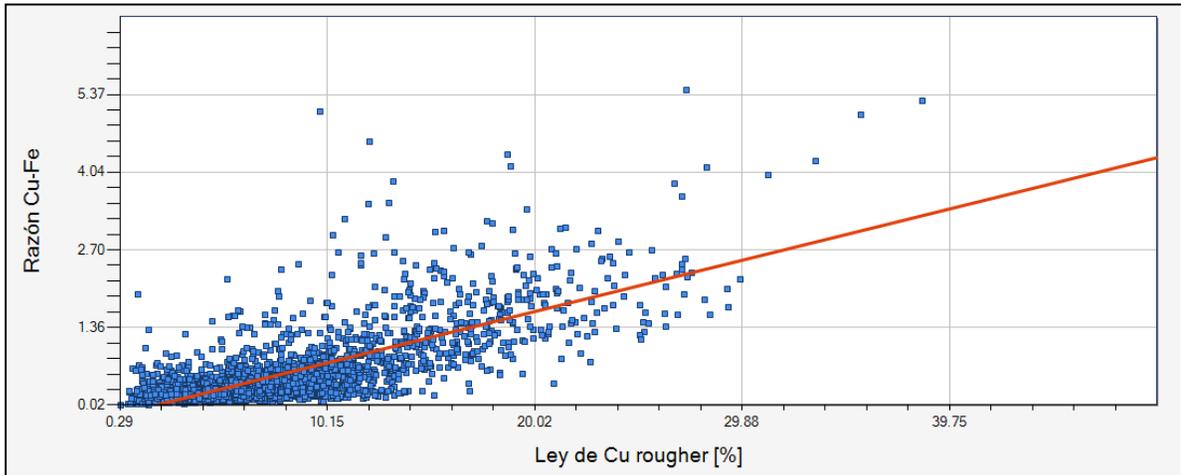


Gráfico 77: Nube de correlación Ley de Cu rougher v/s Razón Cu-Fe

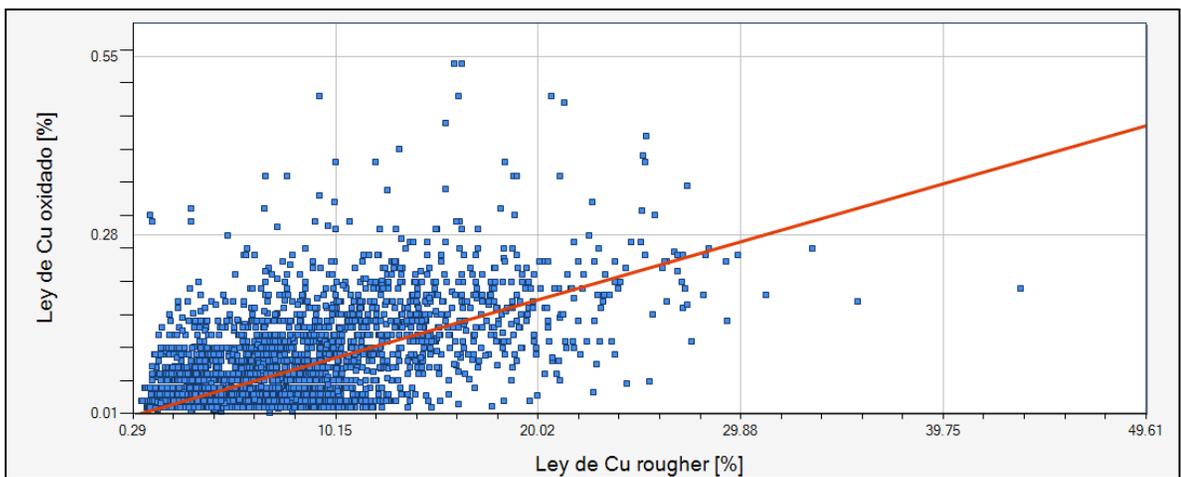
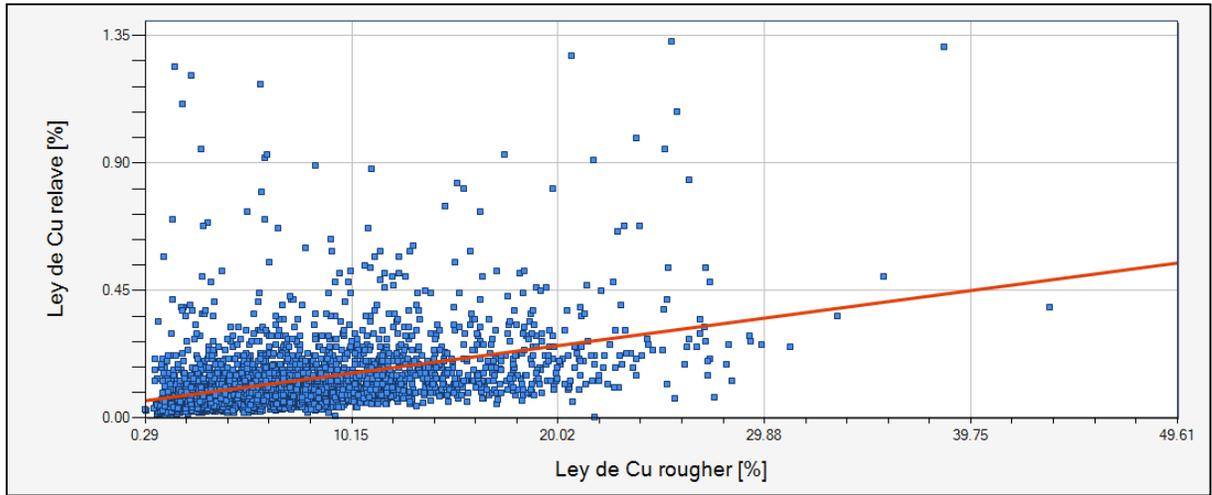
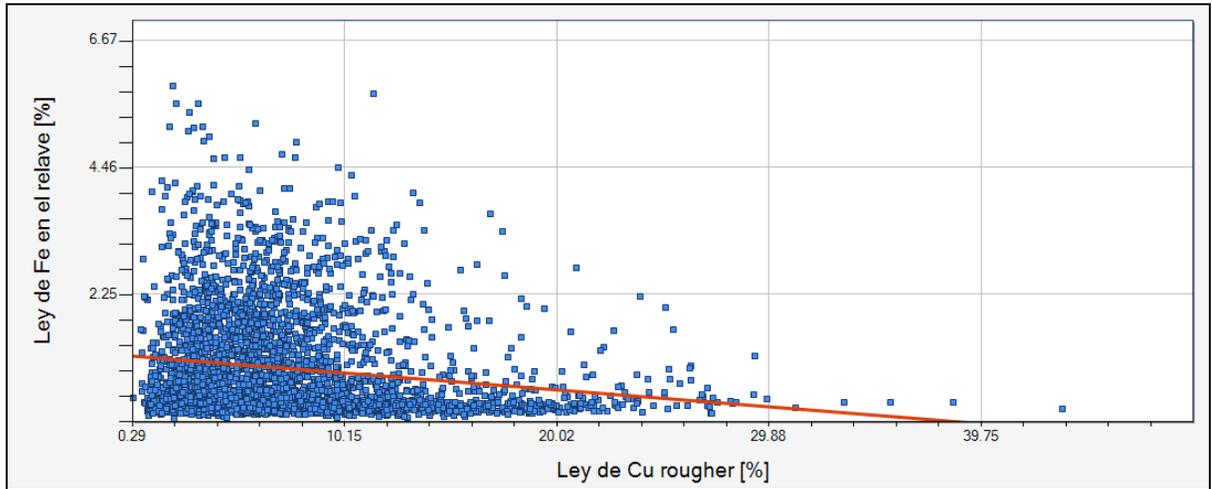


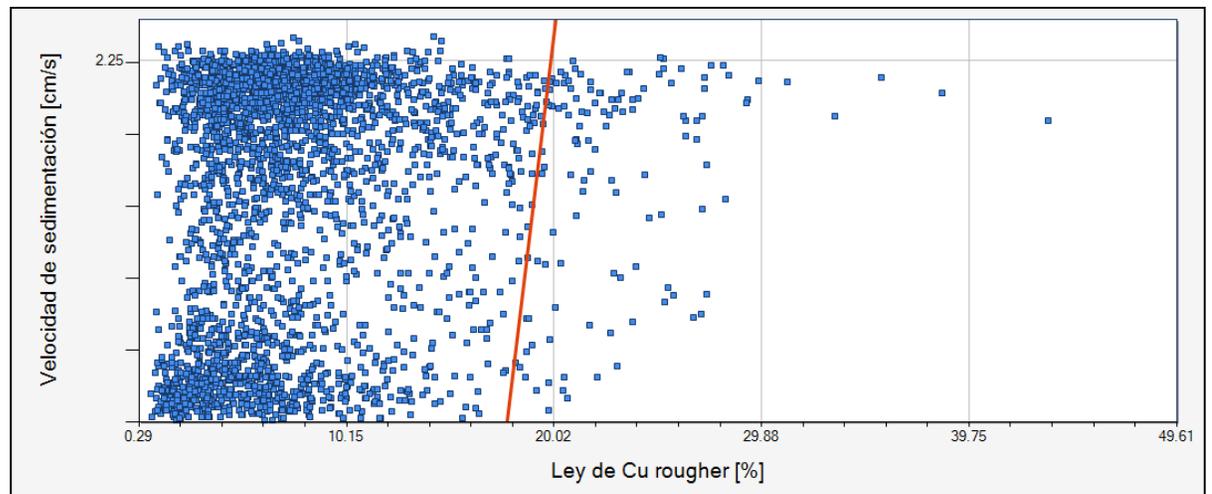
Gráfico 78: Nube de correlación Ley de Cu rougher v/s Ley de Cu oxidado



**Gráfico 79: Nube de correlación Ley de Cu rougher v/s Ley de Cu en el relave**



**Gráfico 80: Nube de correlación Ley de Cu rougher v/s Ley de Fe en el relave**



**Gráfico 81: Nube de correlación Ley de Cu rougher v/s Velocidad de sedimentación**

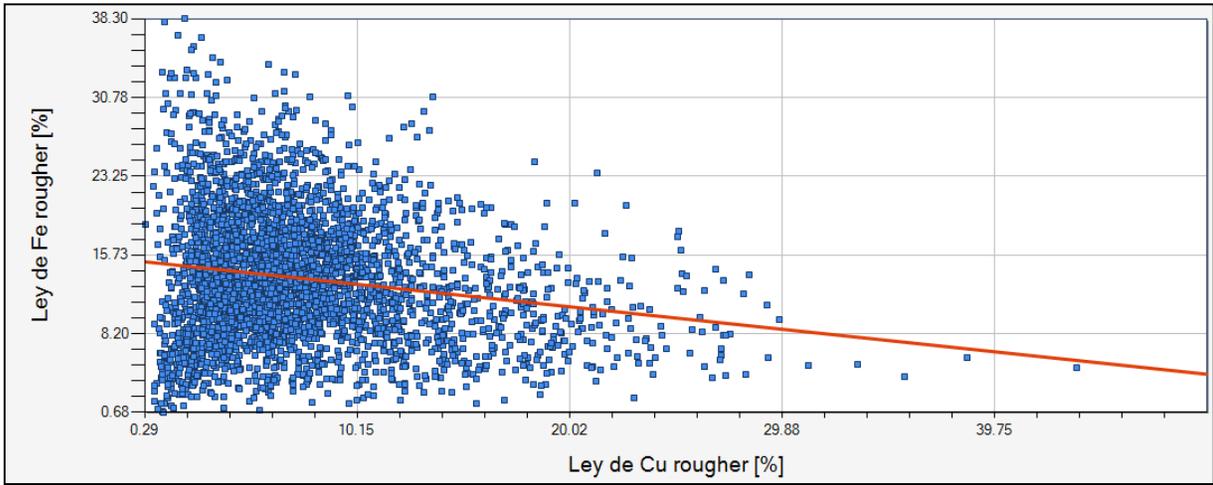


Gráfico 82: Nube de correlación Ley de Cu rougher v/s Ley de Fe rougher

## 4 GRÁFICOS DE DERIVAS ESPACIALES POR CARACTERÍSTICA GEOLÓGICA

### 4.1 Litologías

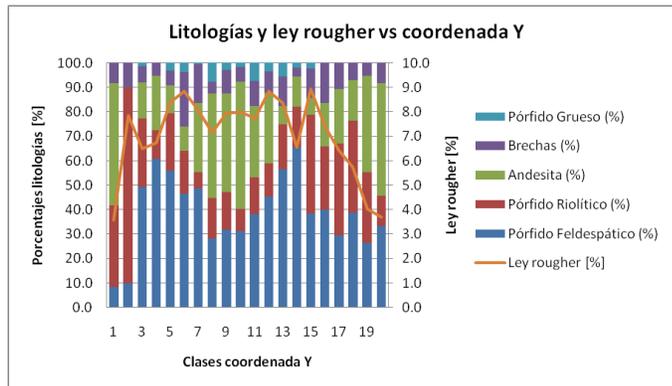


Gráfico 83: Deriva espacial y proporciones por Litología coordenada Y

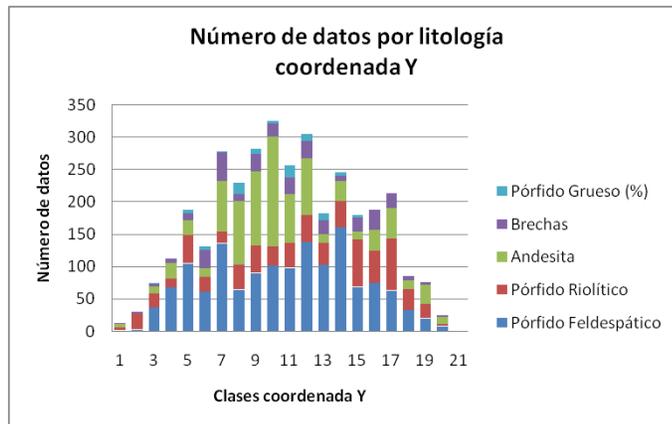
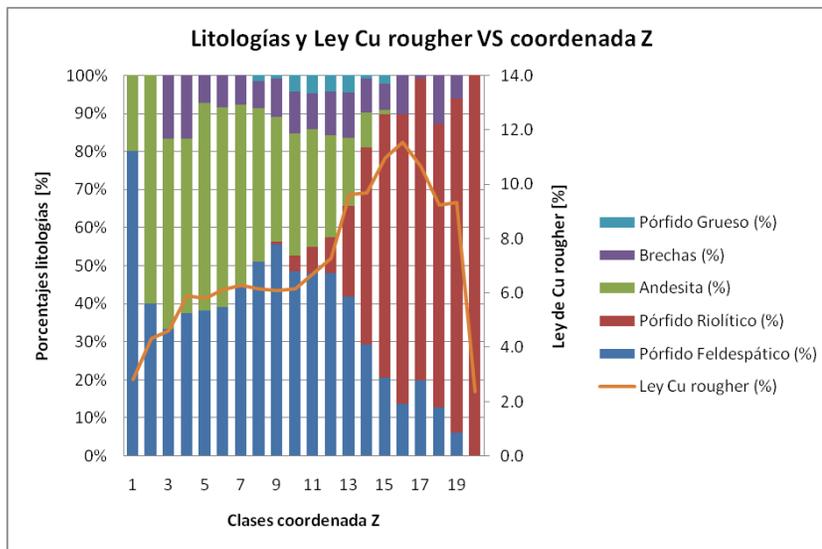
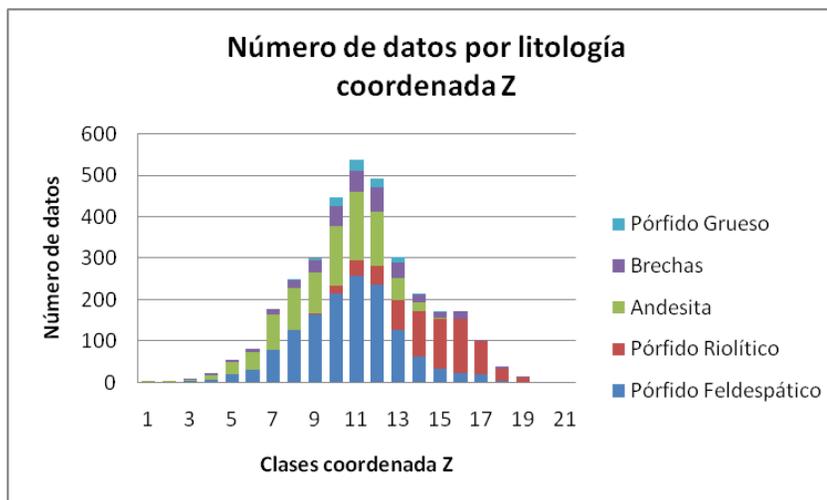


Gráfico 84: Número de datos por litología coordenada Y



**Gráfico 85: Deriva espacial y proporciones por litología coordenada Z**



**Gráfico 86: Número de datos por litología coordenada Z**

## 4.2 Alteraciones

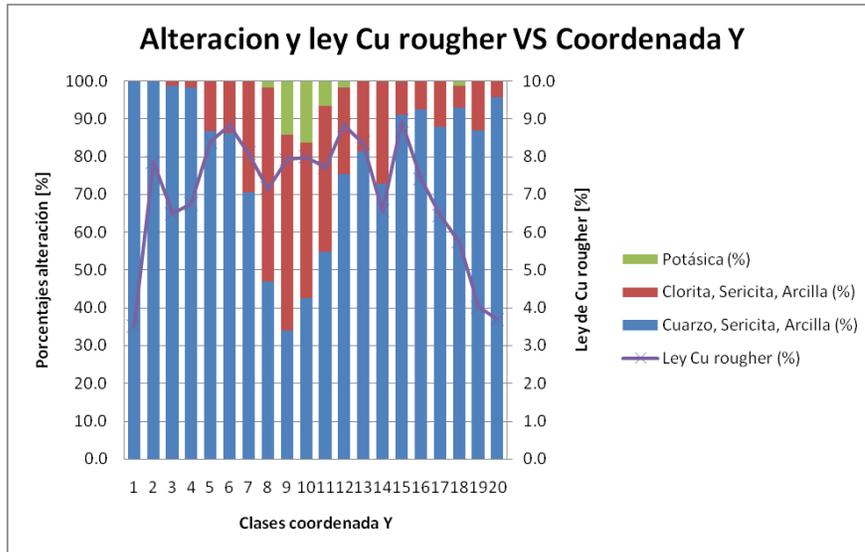


Gráfico 87: Deriva espacial y proporciones por alteración coordenada Y

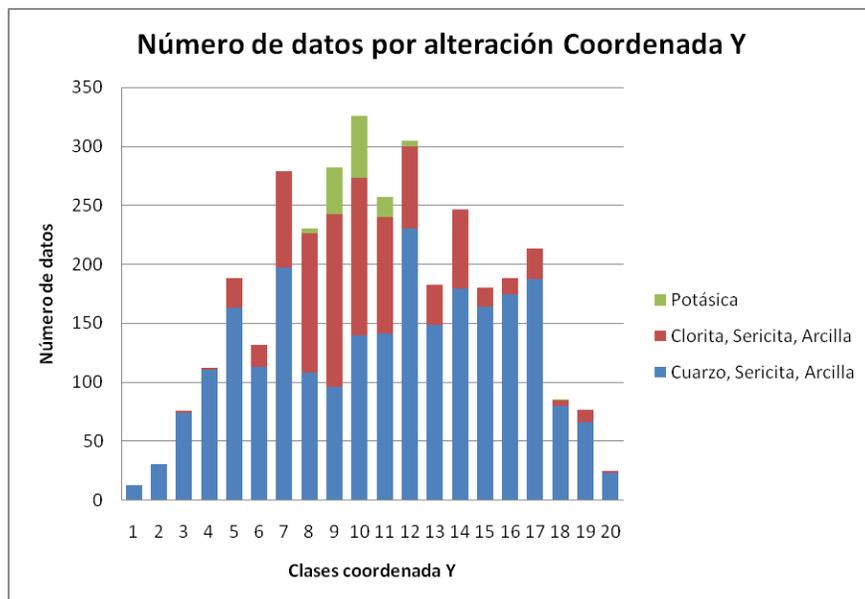
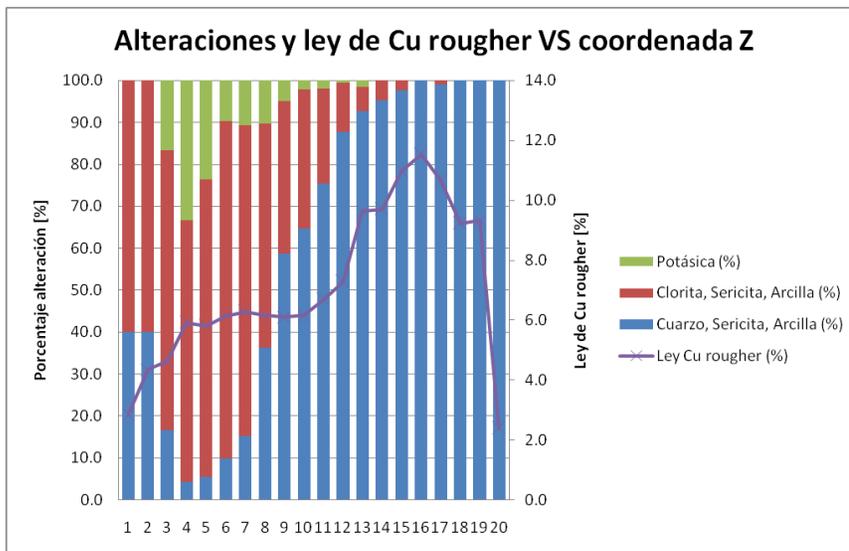
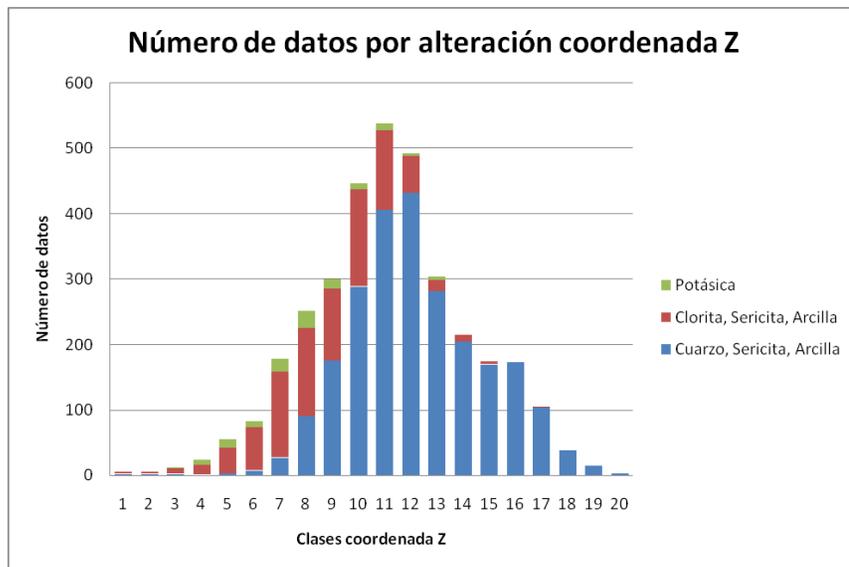


Gráfico 88: Número de datos por alteración coordenada Y



**Gráfico 89: Deriva espacial y proporciones por alteración coordenada Z**



**Gráfico 90: Número de datos por alteración coordenada Z**

### 4.3 Zonas minerales

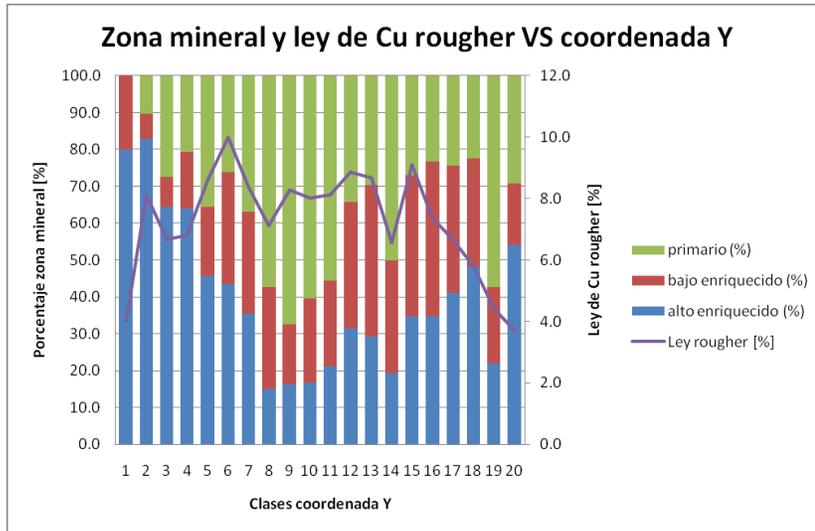


Gráfico 91: Deriva espacial y proporciones por zona mineral coordenada Y

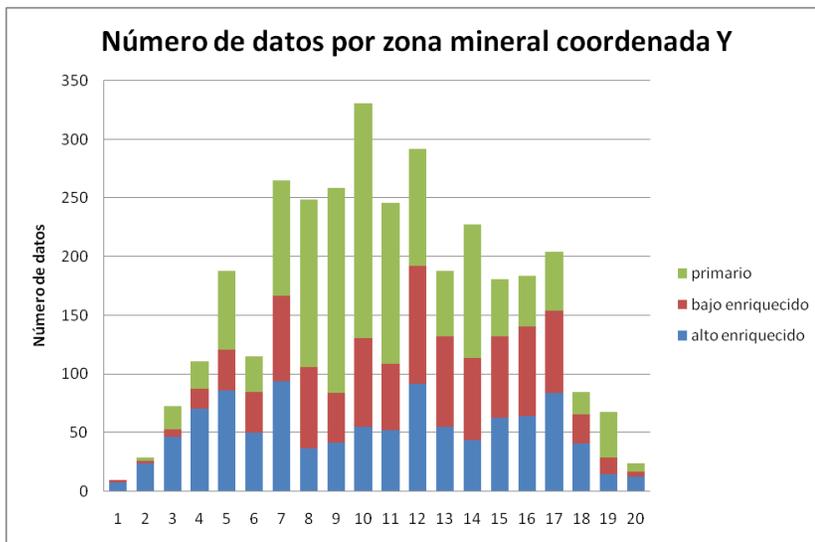
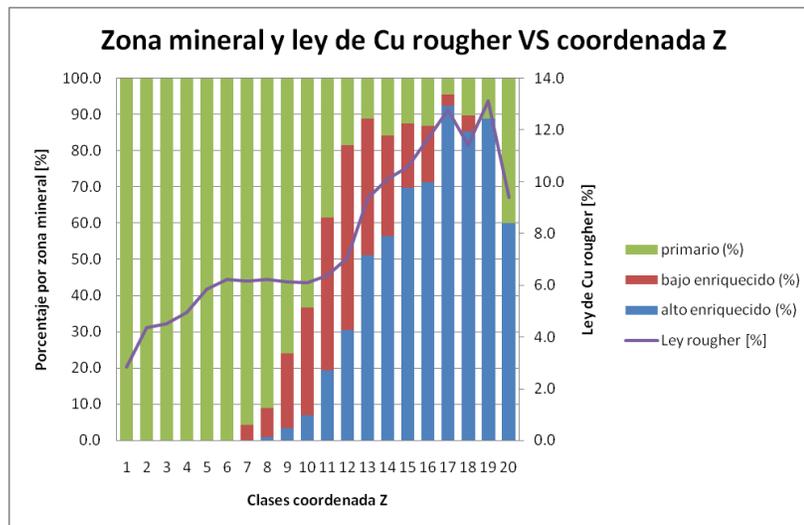
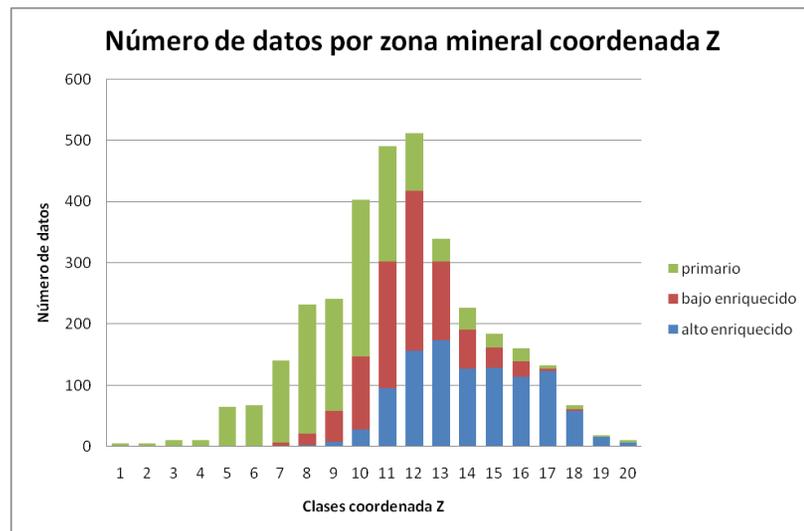


Gráfico 92: Número de datos por zona mineral coordenada Y



**Gráfico 93: Deriva espacial y proporciones por zona mineral coordenada Y**



**Gráfico 94: Número de datos por zona mineral coordenada Y**

## 5 BOXPLOTS VARIABLES EXPLICATIVAS

### 5.1 Litologías

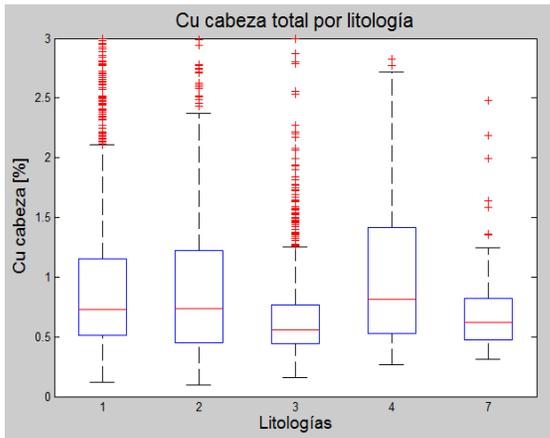


Gráfico 95: Boxplots Cu cabeza por litología

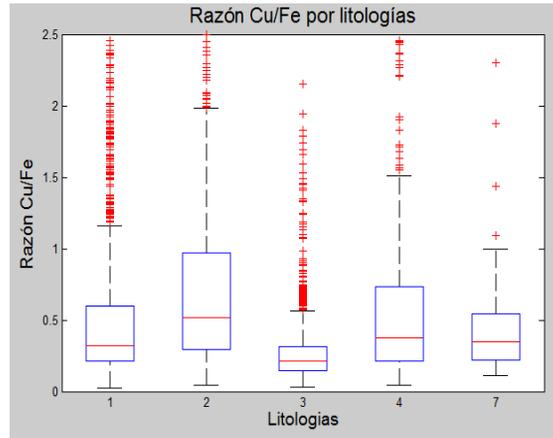


Gráfico 96: Boxplots Razón Cu-Fe por litología

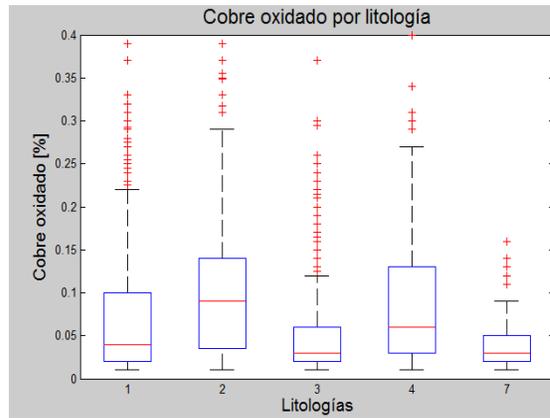


Gráfico 97: Boxplots Cu oxidado por litologías

### 5.2 Alteraciones

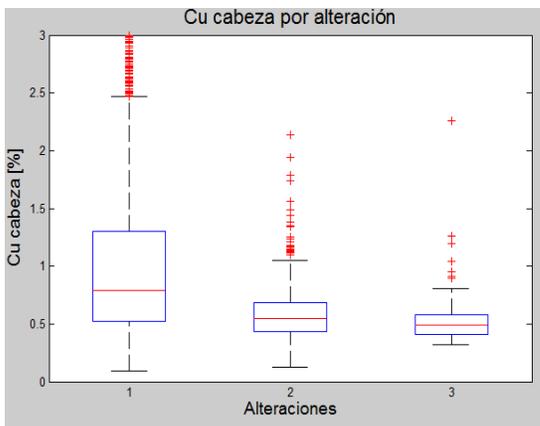


Gráfico 98: Boxplots Cu cabeza por alteración

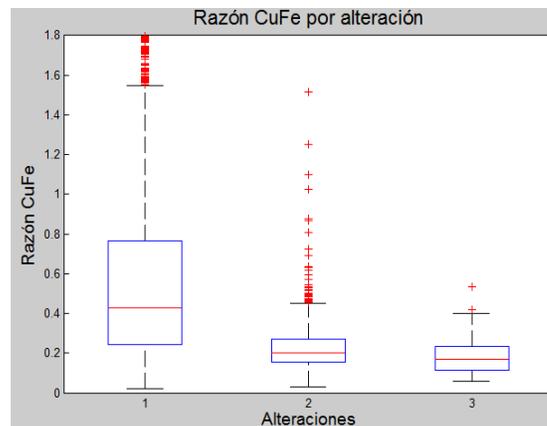
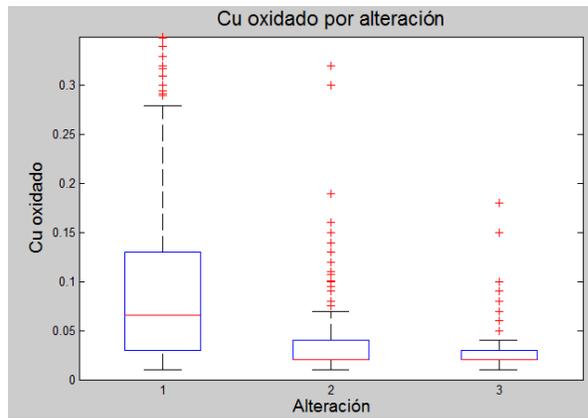
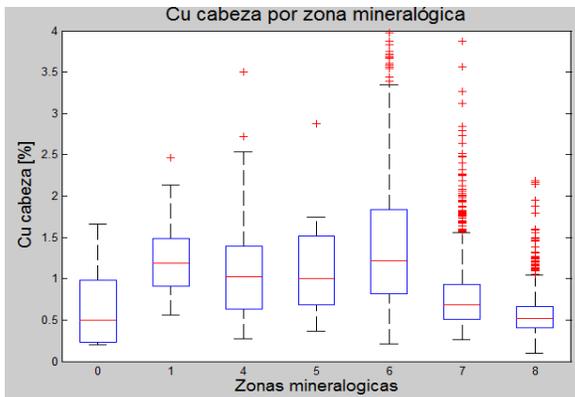


Gráfico 99: Boxplots Razón Cu-Fe por alteración

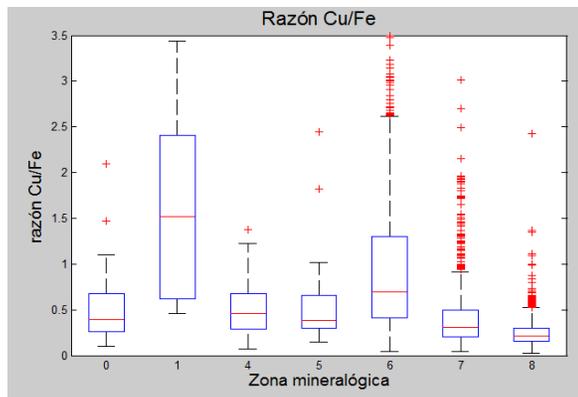


**Gráfico 100: Boxplots Cu oxidado por alteración**

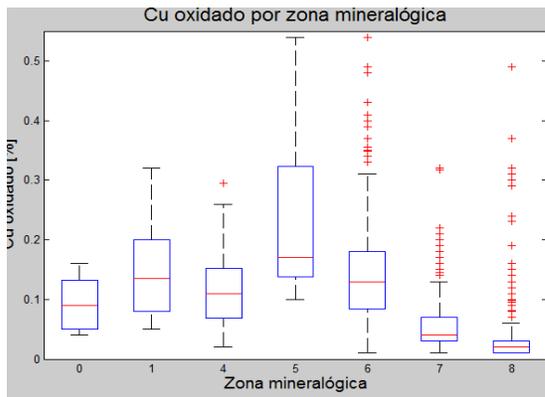
### 5.3 Zonas minerales



**Gráfico 101: Boxplots Cu cabeza por zona mineral**



**Gráfico 102: Boxplots Razón Cu-Fe por zona mineral**



**Gráfico 103: Boxplots Cu oxidado por zona mineral**

## 6 PROBABILITY PLOTS POR UE'S PRELIMINARES

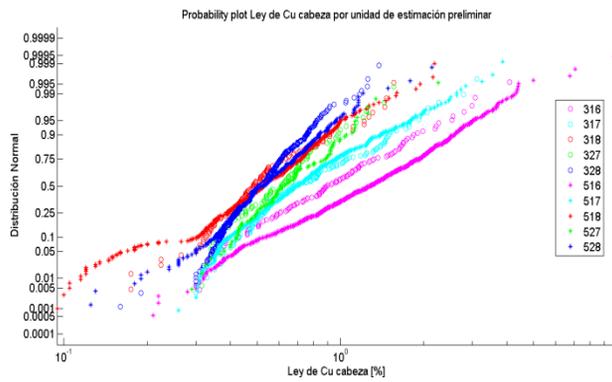


Gráfico 104: Probability plot Cu cabeza

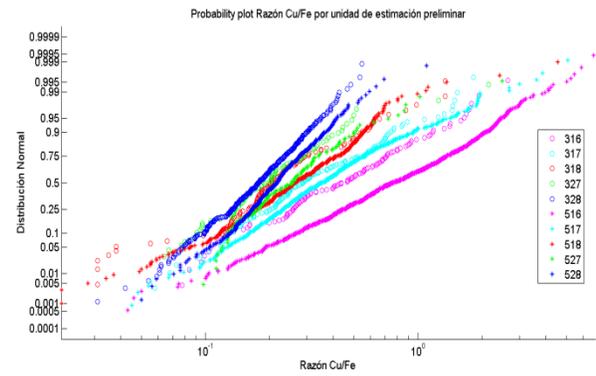


Gráfico 105: Probability plot Razón Cu-Fe

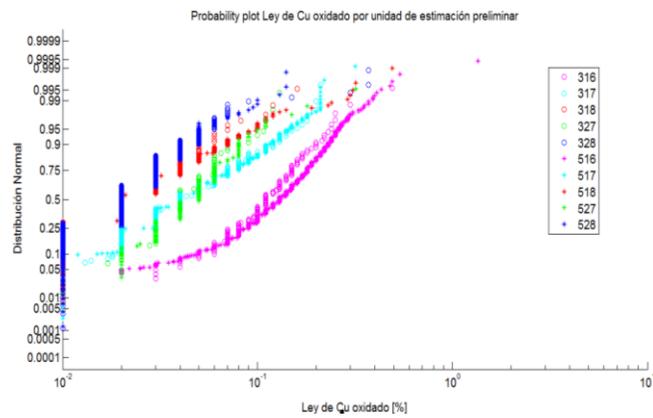


Gráfico 106: Probability plot Cu oxidado

## 7 PROBABILITY PLOTS POR UE'S FINALES

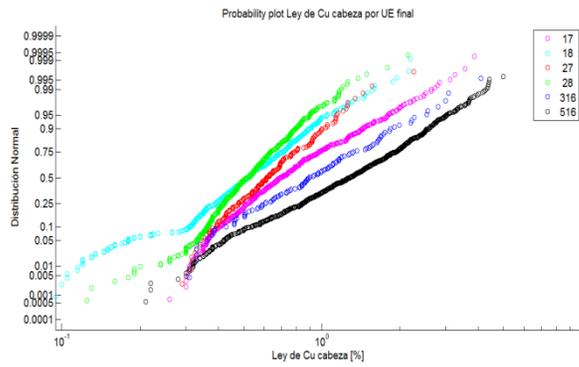


Gráfico 107: Probability plot Cu cabeza

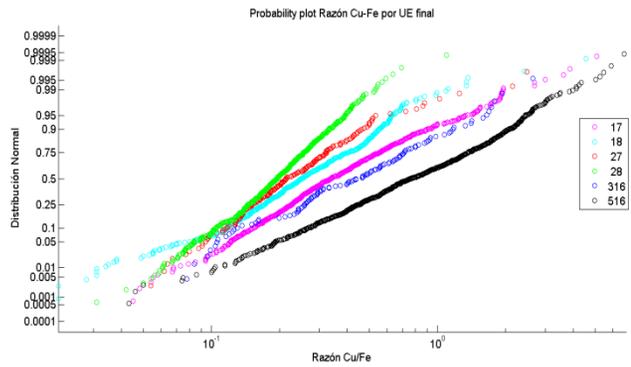


Gráfico 108: Probability plot Razón Cu-Fe

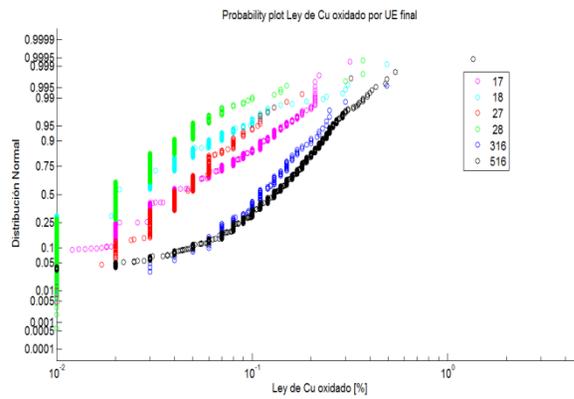


Gráfico 109: Probability plots Cu oxidado

## 8 VARIOGRAMAS DE INDICADORES POR UNIDAD

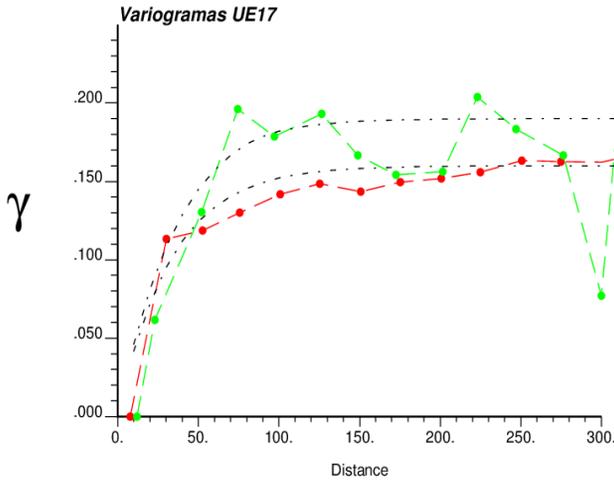


Gráfico 110: Variograma de indicadores unidad 17

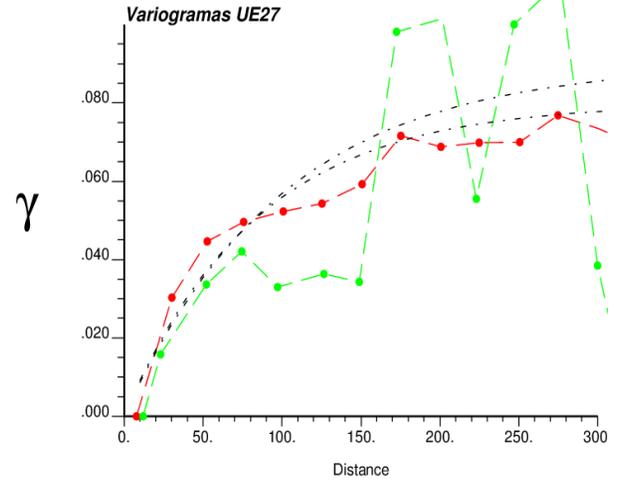


Gráfico 111: Variograma de indicadores unidad 27

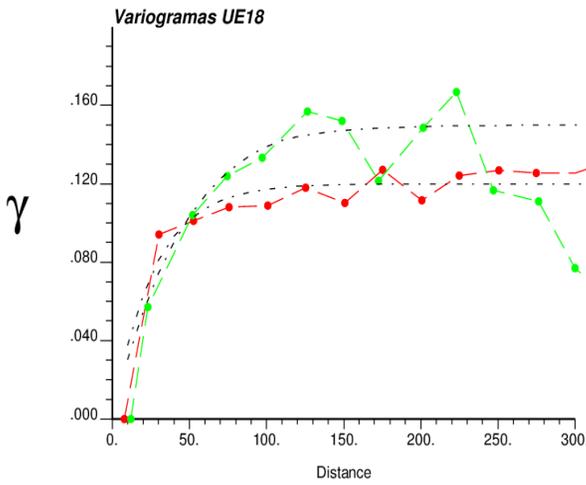


Gráfico 112: Variograma de indicadores unidad 18

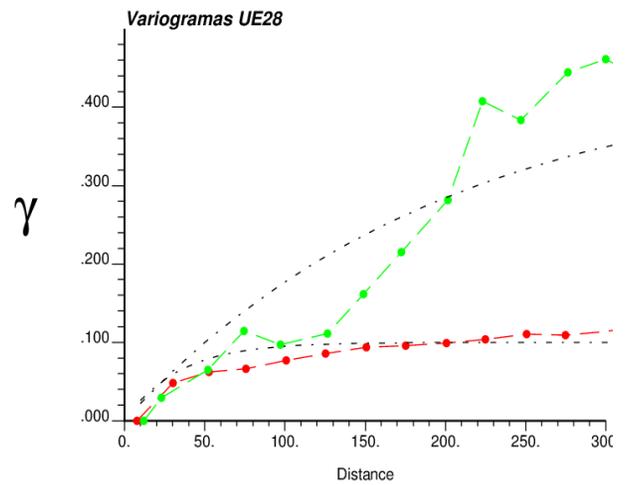


Gráfico 113: Variograma de indicadores unidad 28

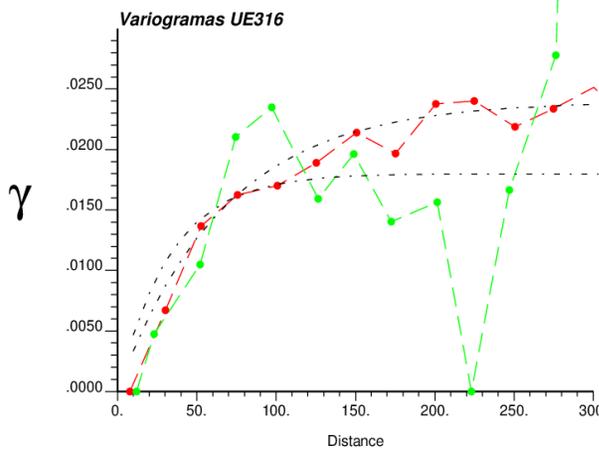


Gráfico 114: Variograma de indicadores unidad 316

## 9 MAPAS VARIOGRÁFICOS POR UNIDAD

### 9.1 Unidad 316

Para esta unidad se puede observar que en el plano XY se visualiza una dirección preferencial de anisotropía, sin embargo debido a la escasa cantidad de datos se opta por no darle demasiada importancia a esto y a calcular el variograma experimental omnidireccional.

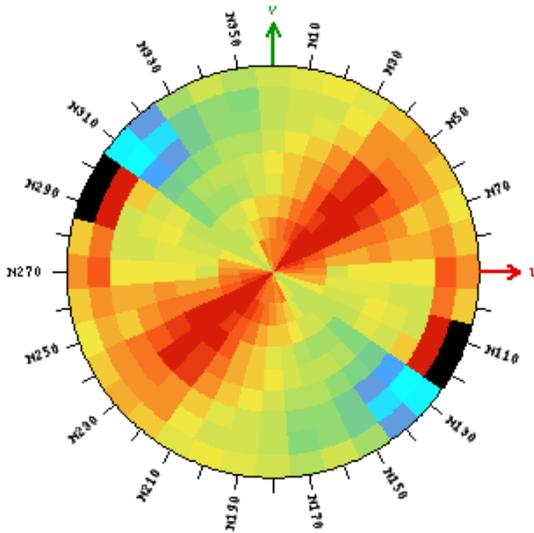


Ilustración 22: Mapa variográfico XY unidad 316

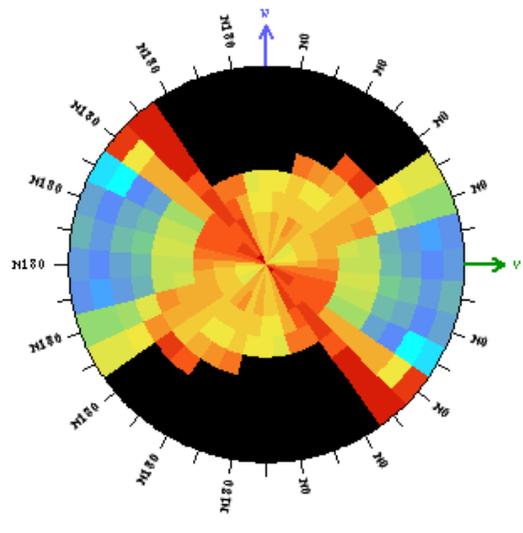


Ilustración 23: Mapa variográfico YZ unidad 316

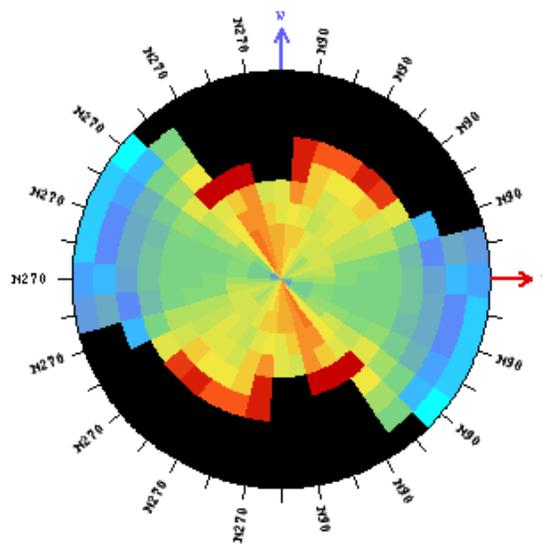


Ilustración 24: Mapa variográfico XZ unidad 316

## 9.2 Unidad 17

En este caso se observa una notoria diferencia en la continuidad espacial en la dirección Z, por lo tanto se decide realizar un variograma omnihorizontal y otro vertical.

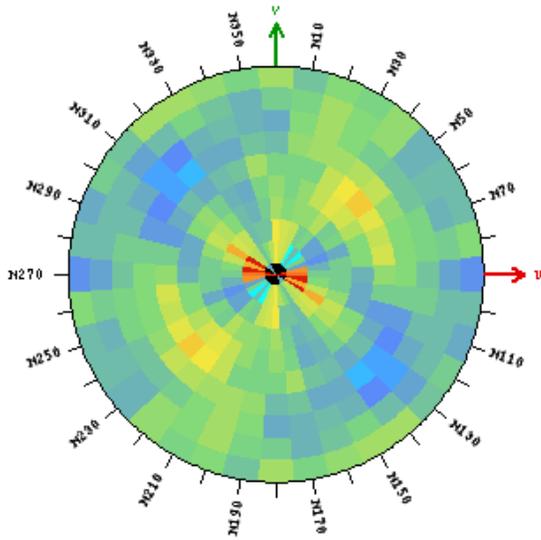


Ilustración 25: Mapa variográfico XY unidad 17

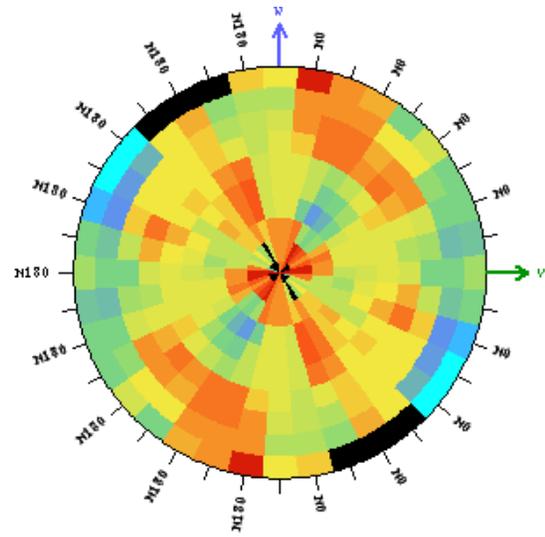


Ilustración 26: Mapa variográfico YZ unidad 17

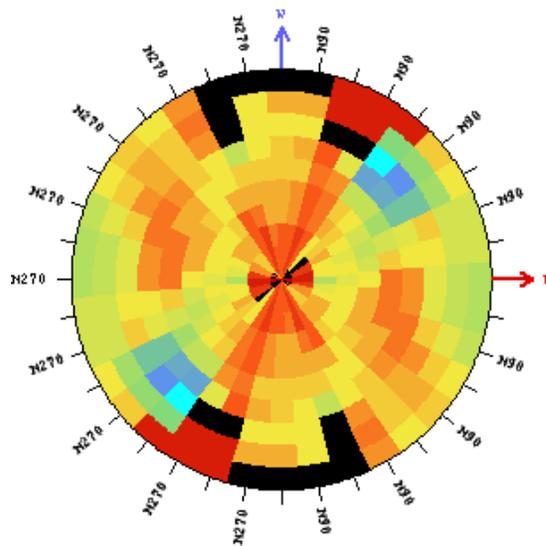


Ilustración 27: Mapa variográfico XZ unidad 17

### 9.3 Unidad 27

En esta unidad, si bien no se pudo calcular el variograma para todas direcciones y pasos, no se observan direcciones preferentes de anisotropías y por ende se opta por un variograma experimental omnidireccional.

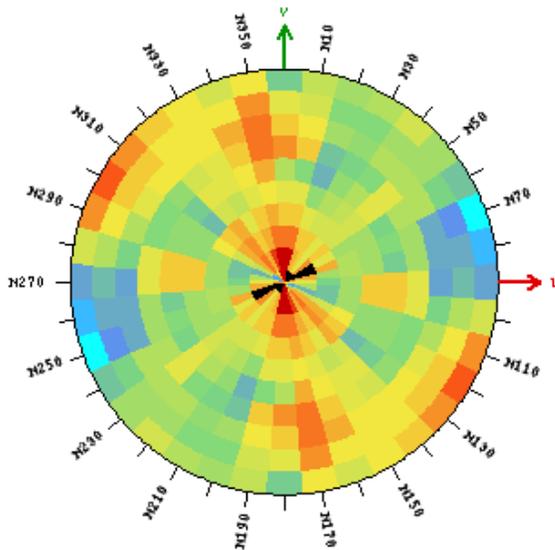


Ilustración 28: Mapa variográfico XY unidad 27

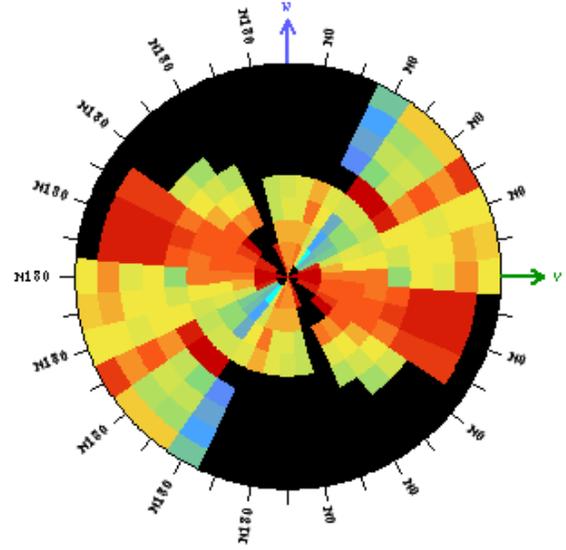


Ilustración 29: Mapa variográfico YZ unidad 27

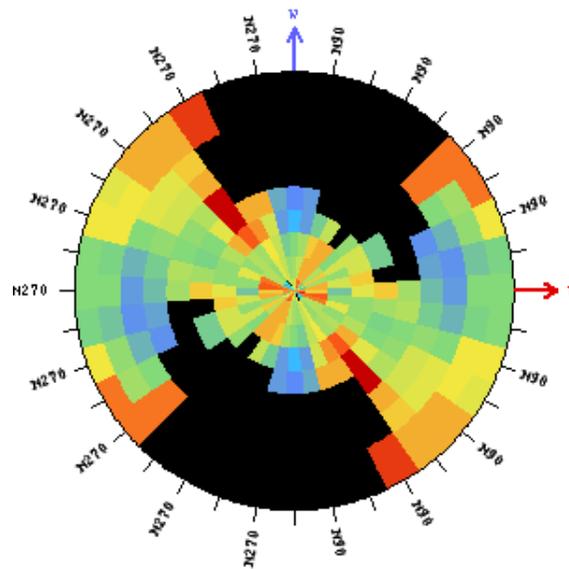


Ilustración 30: Mapa variográfico XZ unidad 27

## 9.4 Unidad 18

En ella se observa una notoria diferencia entre el plano XY y los otros dos, por lo tanto se opta por calcular un variograma omnihorizontal y otro vertical.

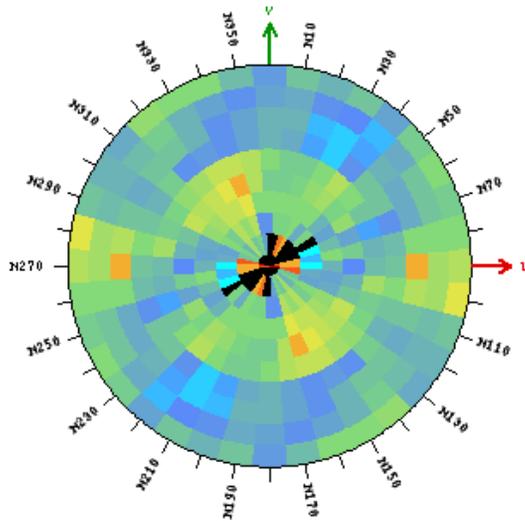


Ilustración 31: Mapa variográfico XY unidad 18

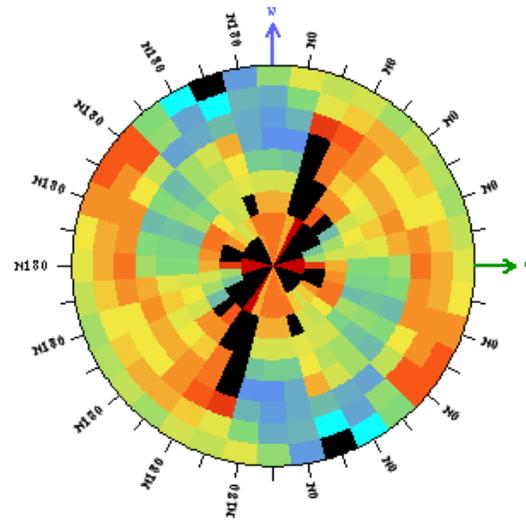


Ilustración 32: Mapa variográfico YZ unidad 18

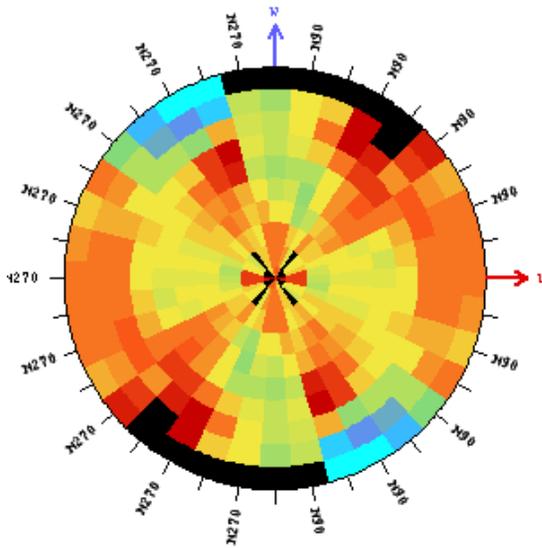


Ilustración 33: Mapa variográfico XZ unidad 18

## 9.5 Unidad 28

En este caso no se observan grandes diferencias en la continuidad espacial entre los planos representados, por lo tanto se decide realizar un variograma omnidireccional.

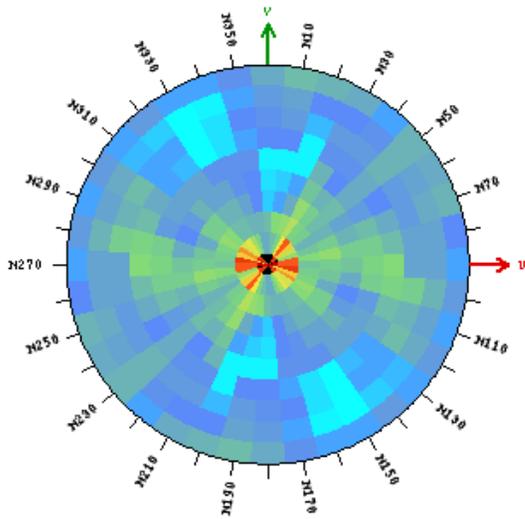


Ilustración 34: Mapa variográfico XY unidad 28

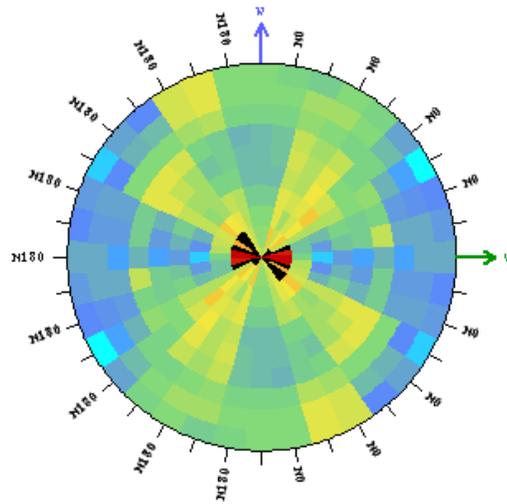


Ilustración 35: Mapa variográfico YZ unidad 28

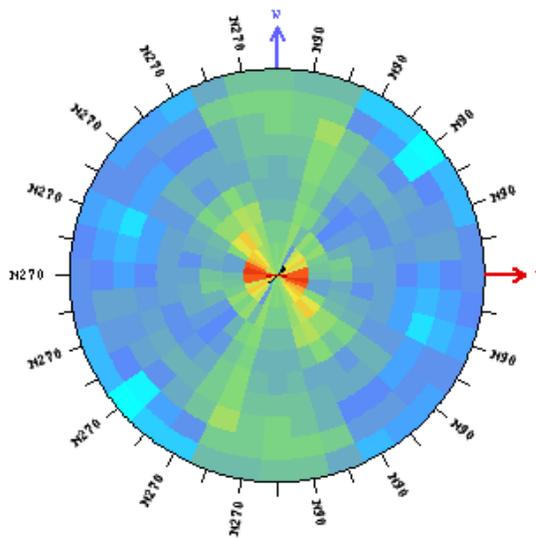


Ilustración 36: Mapa variográfico YZ unidad 28



### 10.1.4 Cucabeza-Cuoxidado

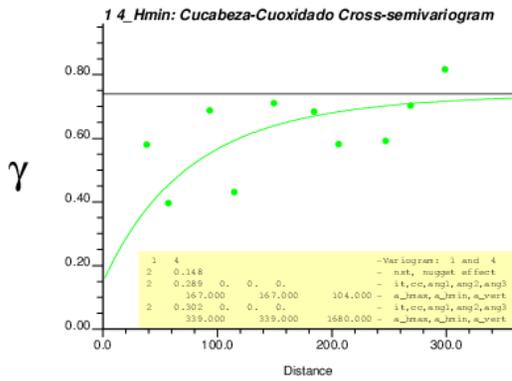


Gráfico 121: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu oxidado dirección Y unidad 516

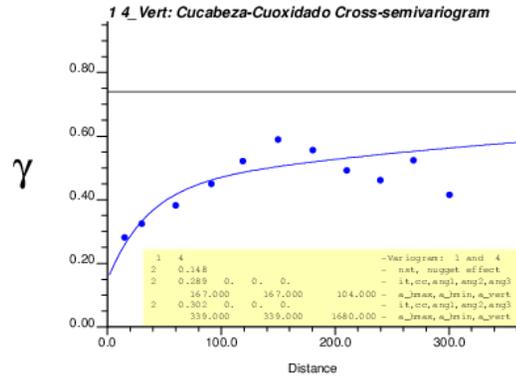


Gráfico 122: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu oxidado plano XZ unidad 516

### 10.1.5 Curougher-Cufe

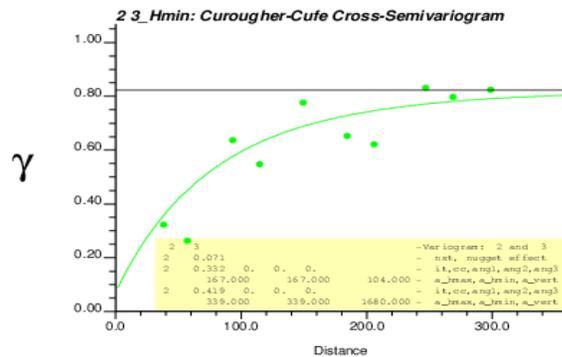


Gráfico 123: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Razón CuFe dirección Y unidad 516

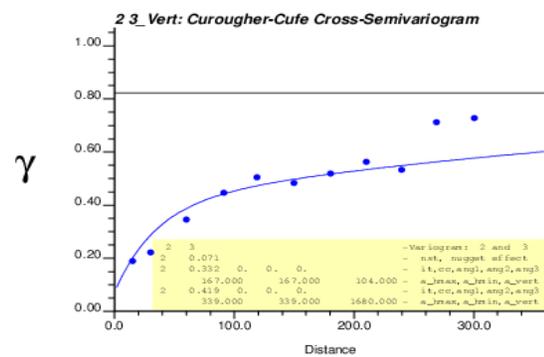


Gráfico 124: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Razón CuFe plano XZ unidad 516

### 10.1.6 Curougher-Cuoxidado

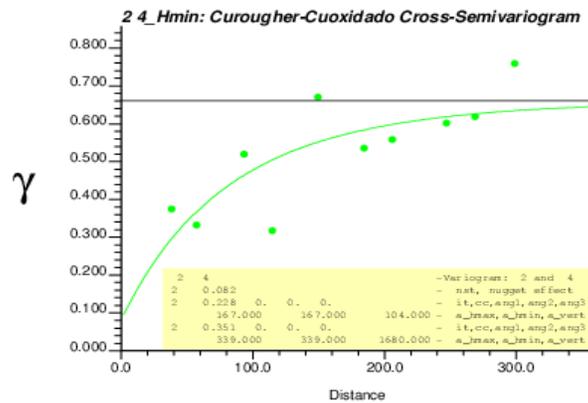


Gráfico 125: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Ley de Cu oxidado dirección Y unidad 516

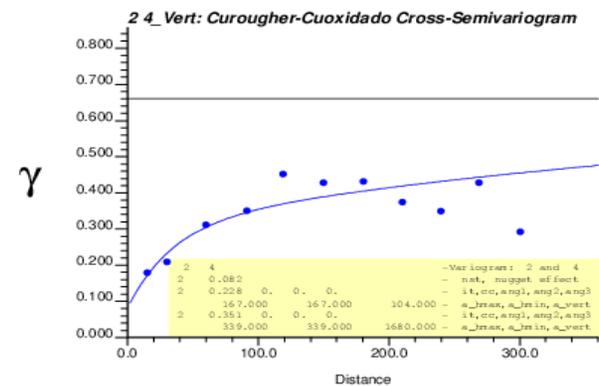


Gráfico 126: Variograma cruzado Ley de Cu rougher- Ley de Cu oxidado plano XZ unidad 516

### 10.1.7 Cufe

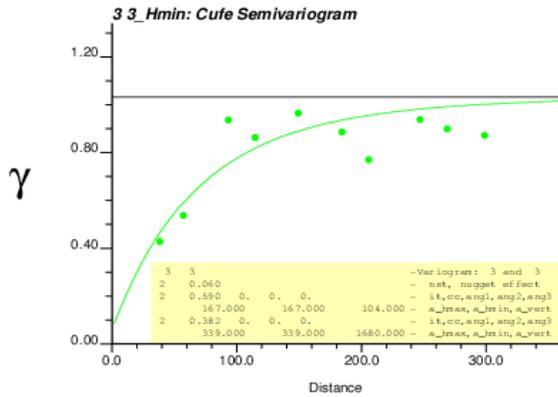


Gráfico 127: Variograma directo Razón CuFe dirección Y unidad 516

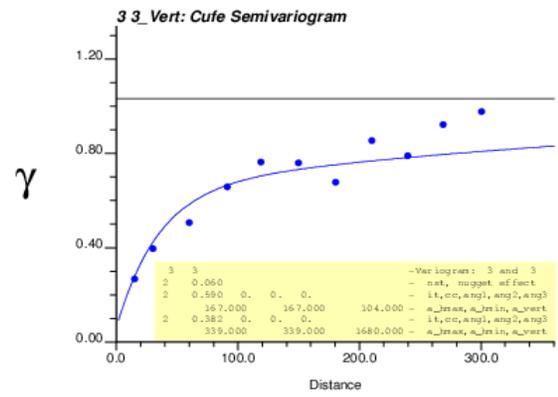


Gráfico 128: Variograma directo Razón CuFe plano XZ unidad 516

### 10.1.8 Cufe-Cuoxidado

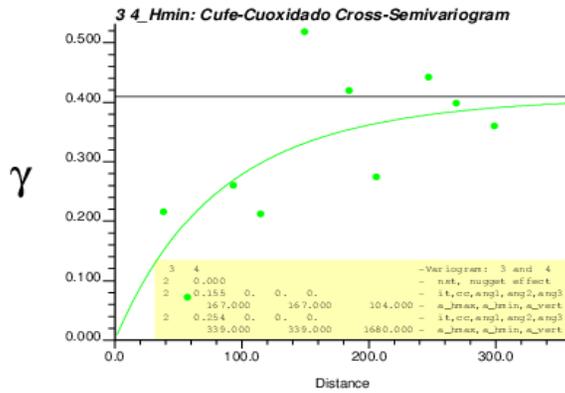


Gráfico 129: Variograma cruzado Razón CuFe-Ley de Cu oxidado dirección Y unidad 516

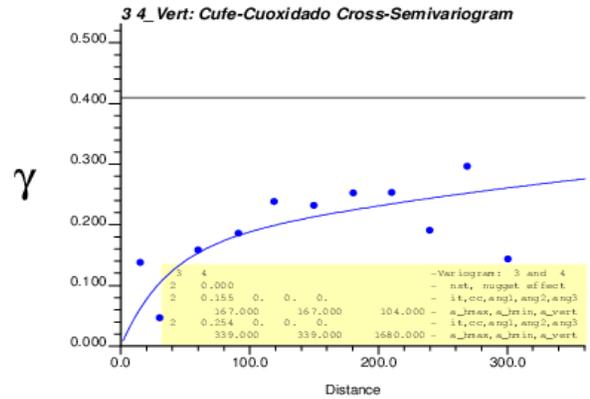


Gráfico 130: Variograma cruzado Razón CuFe-Ley de Cu oxidado plano XZ unidad 516

### 10.1.9 Cuoxidado

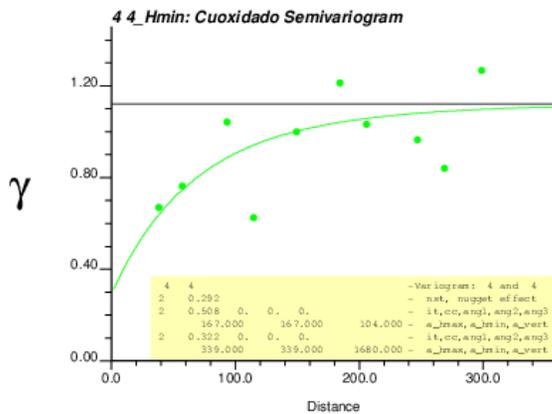


Gráfico 131: Variograma directo Ley de Cu oxidado dirección Y unidad 516

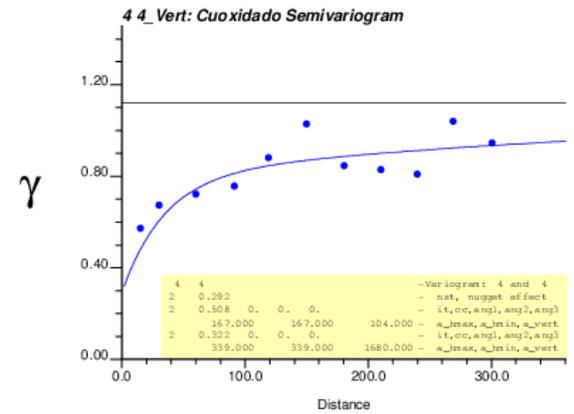


Gráfico 132: Variograma directo Ley de Cu oxidado plano XZ unidad 516



### 10.2.3 Cucabeza-Cufe

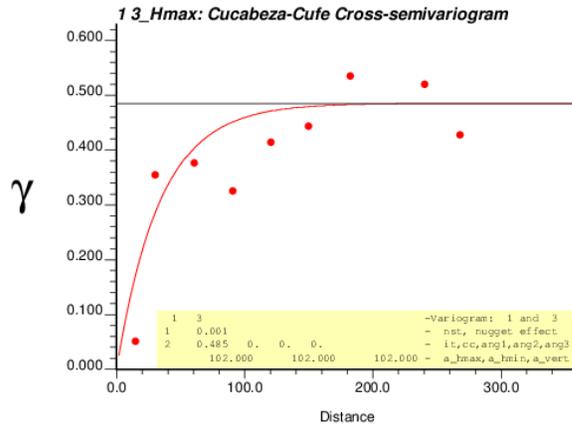


Gráfico 135: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza- Razón Cu-Fe omnidireccional unidad 316

### 10.2.4 Cucabeza-cuoxidado

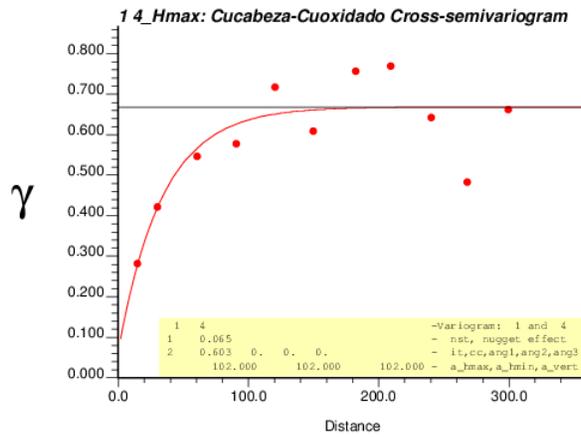


Gráfico 136: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza- Ley de Cu oxidado omnidireccional unidad 316

### 10.2.5 Curougher-Cufe

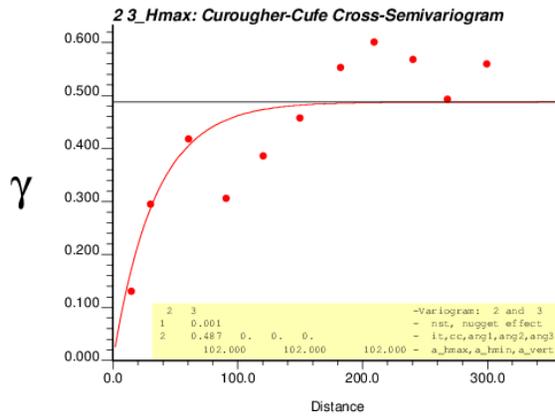


Gráfico 137: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Razón CuFe omnidireccional unidad 316

## 10.2.6 Curougher-Cuoxidado

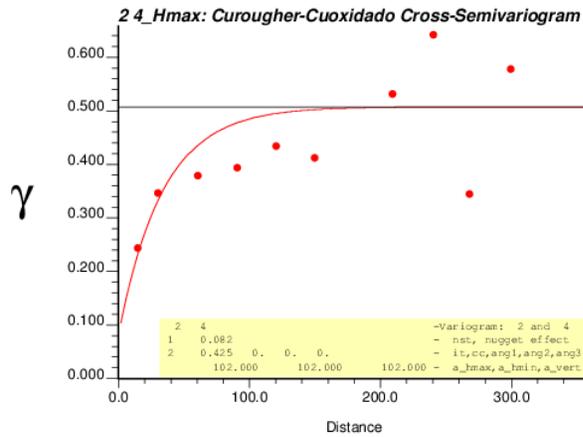


Gráfico 138: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Ley de Cu oxidado omnidireccional unidad 316

## 10.2.7 CuFe

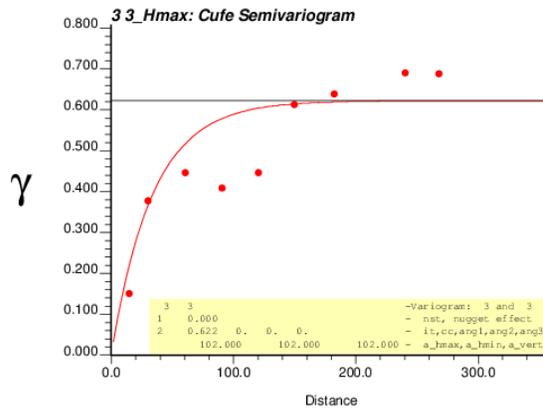


Gráfico 139: Variograma directo Razón CuFe omnidireccional unidad 316

## 10.2.8 CuFe-Cuoxidado

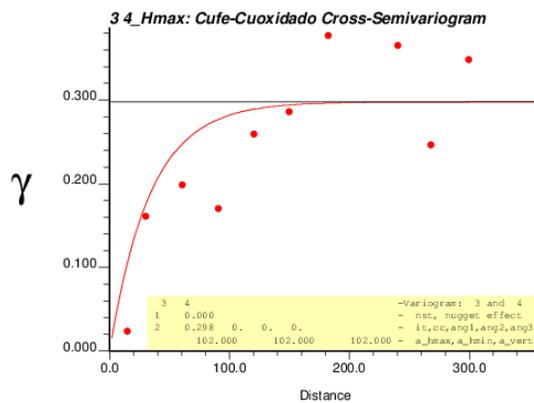


Gráfico 140: Variograma cruzado Razón CuFe-Ley de Cu oxidado omnidireccional unidad 316

## 10.2.9 Cu oxidado

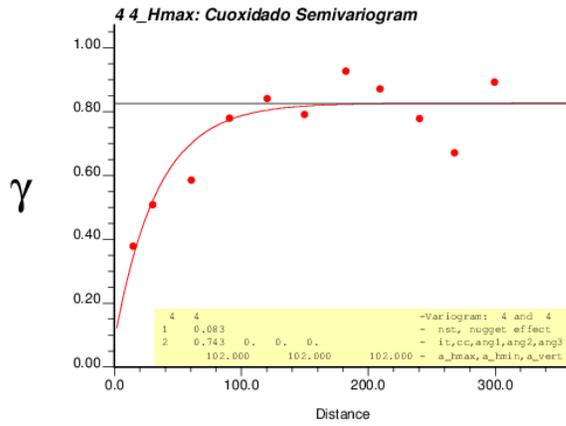


Gráfico 141: Variograma directo Ley de Cu oxidado omnidireccional unidad 316

## 10.3 Unidad 17

### 10.3.1 Cucabeza

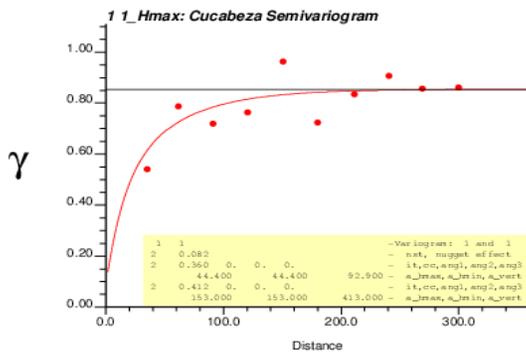


Gráfico 142: Variograma directo Ley de Cu cabeza omnihorizontal unidad 17

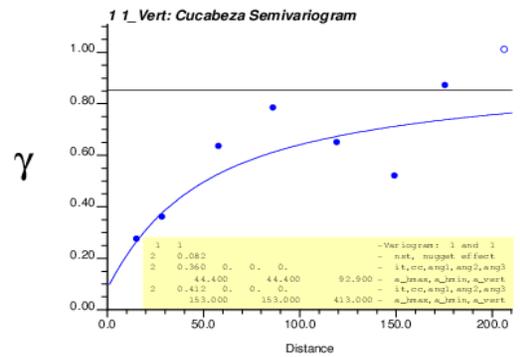


Gráfico 143: Variograma directo Ley de Cu cabeza vertical unidad 17





### 10.3.8 CuFe-Cuoxidado

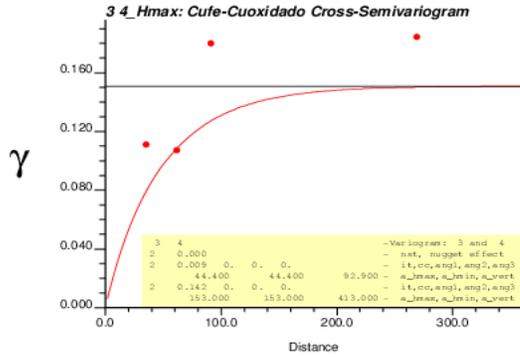


Gráfico 156: Variograma cruzado Razón CuFe-Ley de Cu oxidado homnihorizontal unidad 17

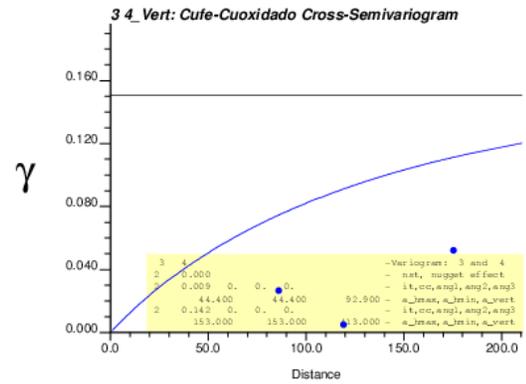


Gráfico 157: Variograma cruzado Razón CuFe-Ley de Cu oxidado vertical unidad 17

### 10.3.9 Cuoxidado

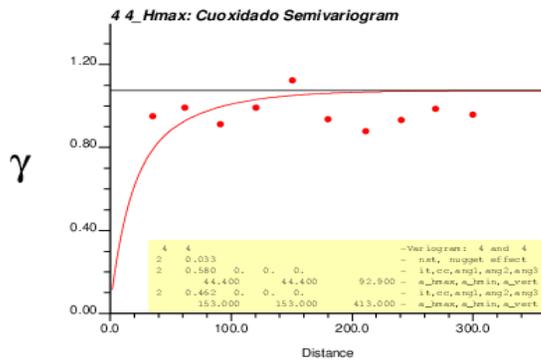


Gráfico 158: Variograma directo Ley de Cu oxidado homnihorizontal unidad 17

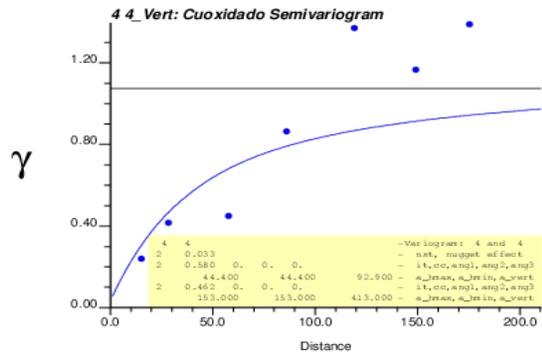


Gráfico 159: Variograma directo Ley de Cu oxidado vertical unidad 17

## 10.4 Unidad 18

### 10.4.1 Cucabeza

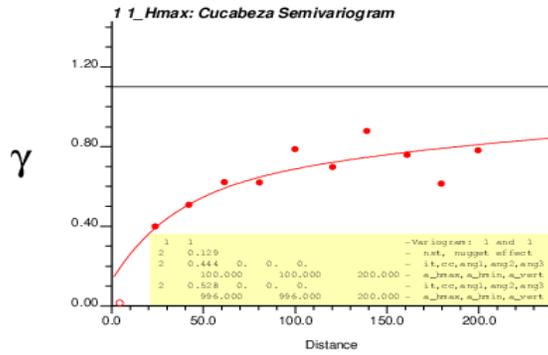


Gráfico 160: Variograma directo Ley de Cu cabeza omnihorizontal unidad 18

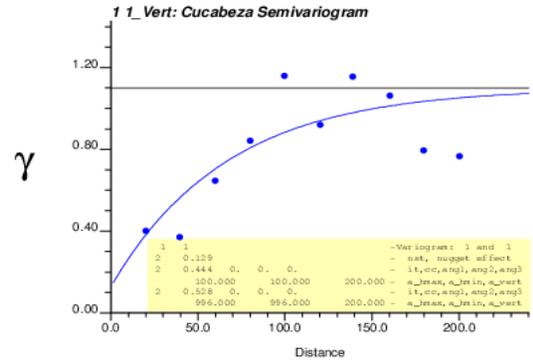


Gráfico 161: Variograma directo Ley de Cu cabeza vertical unidad 18

### 10.4.2 Cucabeza-Curougher

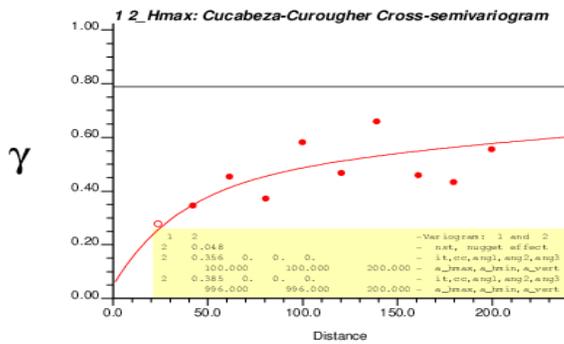


Gráfico 162: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher omnihorizontal unidad 18

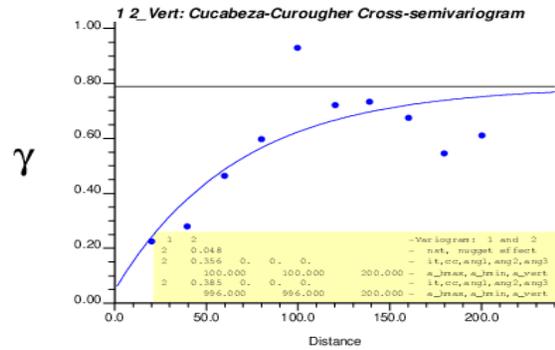


Gráfico 163: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher vertical unidad 18

### 10.4.3 Cucabeza-Cufe

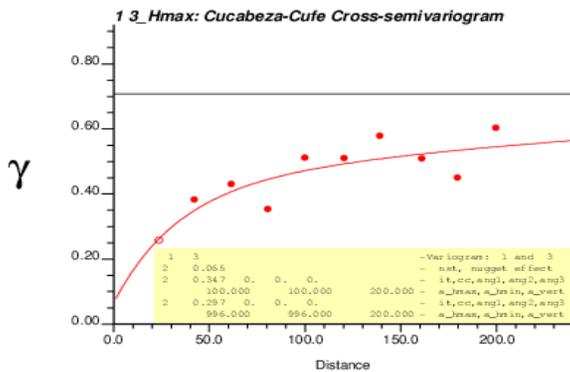


Gráfico 164: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Razón CuFe omnihorizontal unidad 18

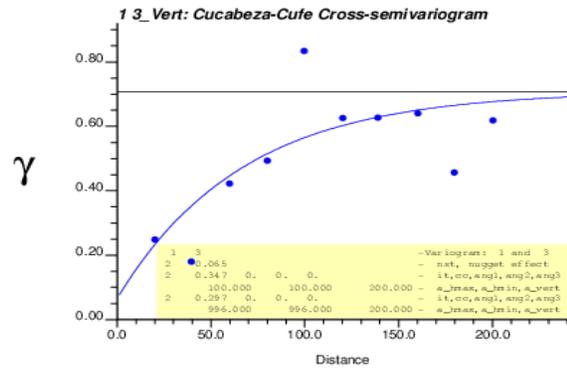


Gráfico 165: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Razón CuFe vertical unidad 18

### 10.4.4 Curougher-Cufe

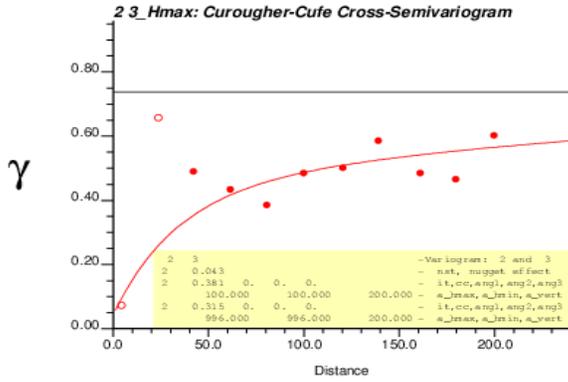


Gráfico 166: Variograma cruzado Ley de Cu rougher -Razón CuFe omnihorizontal unidad 18

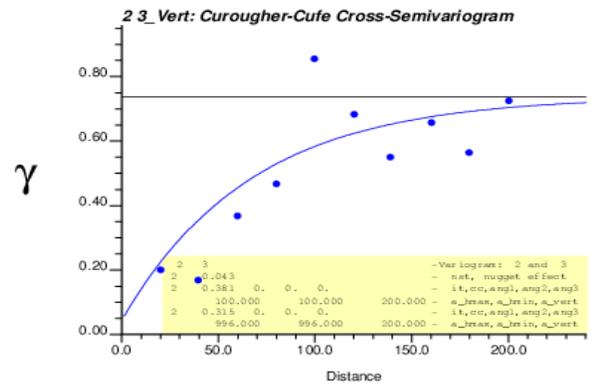


Gráfico 167: Variograma cruzado Ley de Cu rougher -Razón CuFe vertical unidad 18

### 10.4.5 Cufe

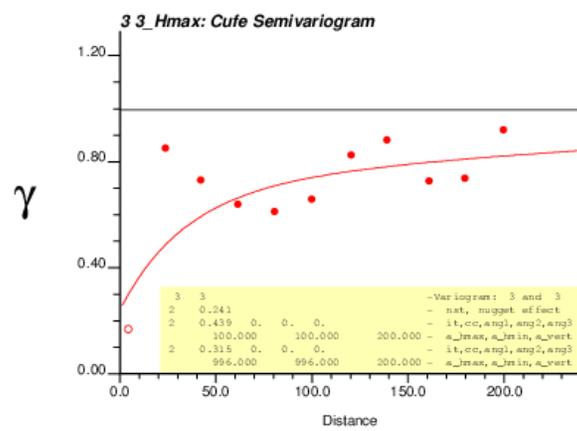


Gráfico 168: Variograma directo Razón CuFe omnihorizontal unidad 18

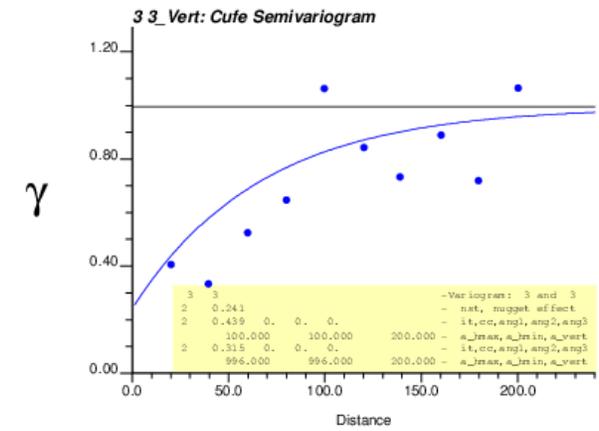


Gráfico 169: Variograma directo Razón CuFe vertical unidad 18

10.5 Unidad 27  
 10.5.1 Cucabeza

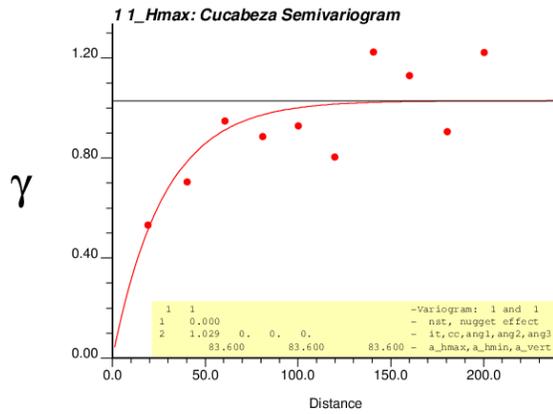


Gráfico 170: Variograma directo Ley de Cu cabeza omnidireccional unidad 27

10.5.2 Cucabeza-Curougher

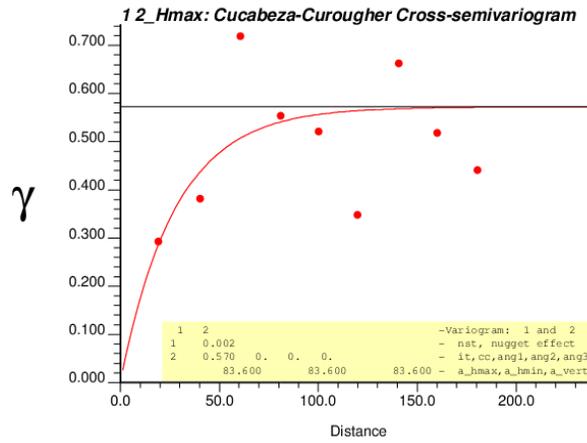


Gráfico 171: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher unidad 27

10.5.3 Cucabeza-Cufe

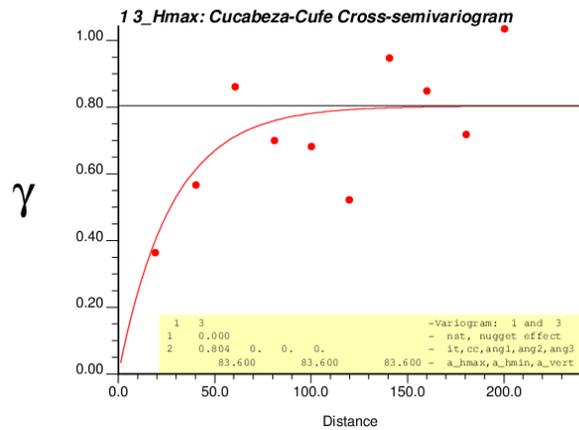


Gráfico 172: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Razón CuFe omnidireccional unidad 27

### 10.5.4 Curougher-Cufe

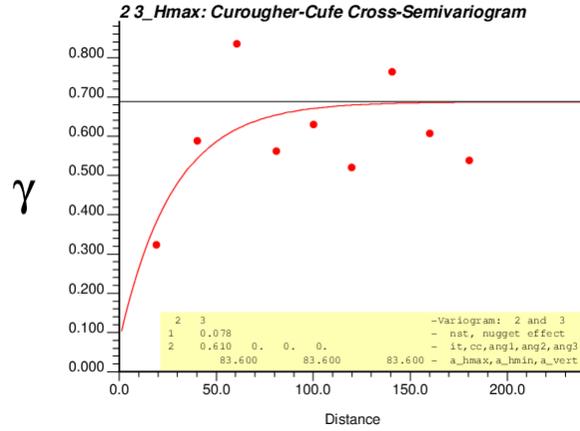


Gráfico 173: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Razón CuFe omnidireccional unidad 27

### 10.5.5 Cufe

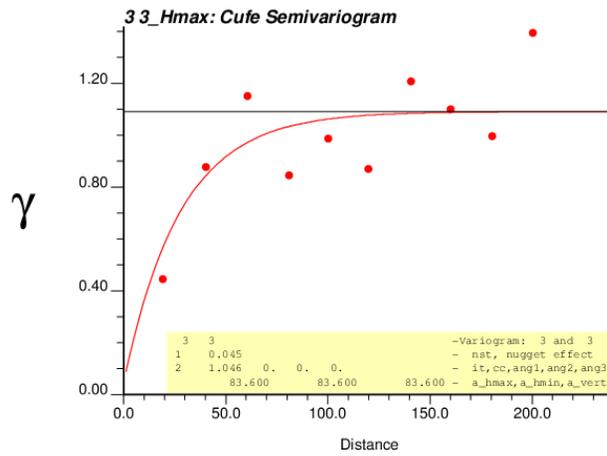


Gráfico 174: Variograma directo Razón CuFe omnidireccional unidad 27

## 10.6 Unidad 28

### 10.6.1 Cucabeza

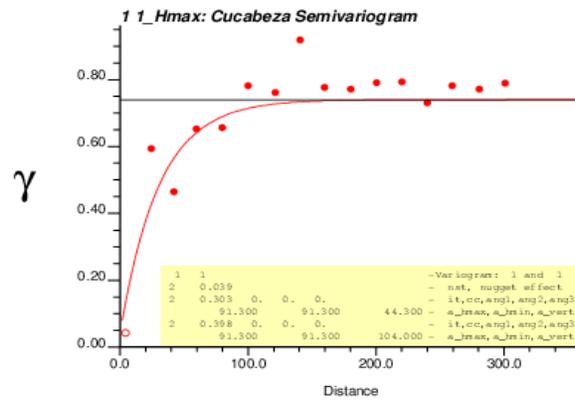


Gráfico 175: Variograma directo Ley de Cu cabeza omnidireccional unidad 28

### 10.6.2 Cucabeza-Curougher

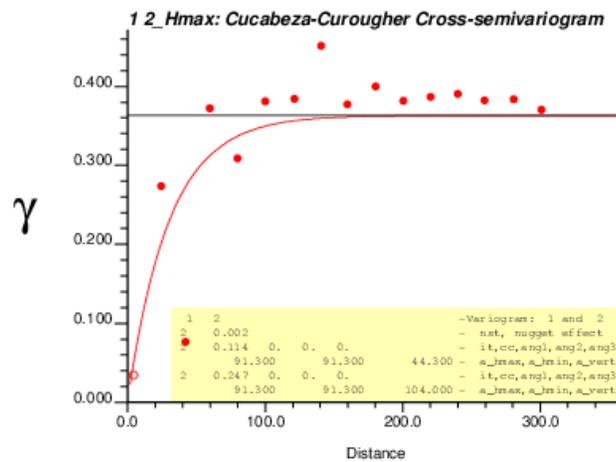


Gráfico 176: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Ley de Curougher omnidireccional unidad 28

### 10.6.3 Cucabeza-Cufe

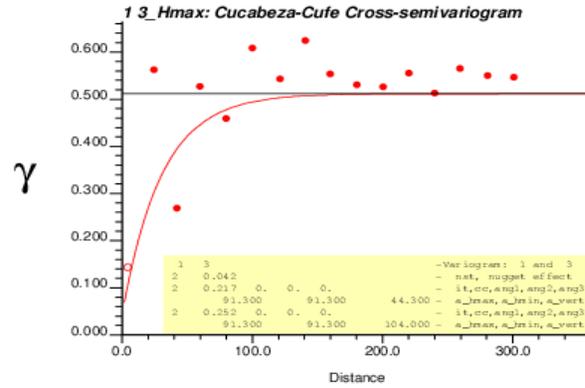


Gráfico 177: Variograma cruzado Ley de Cu cabeza-Razón CuFe omnidireccional unidad 28

### 10.6.4 Curougher-Cufe

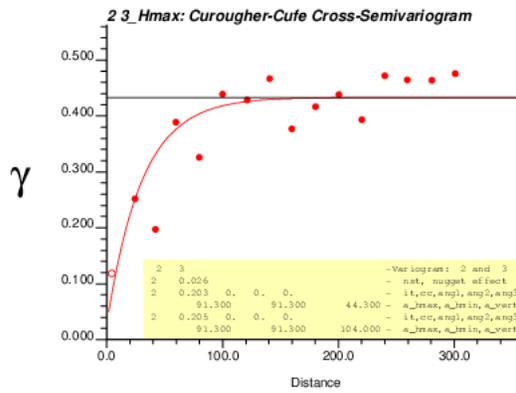


Gráfico 178: Variograma cruzado Ley de Cu rougher-Razón CuFe omnidireccional unidad 28

### 10.6.5 Cufe

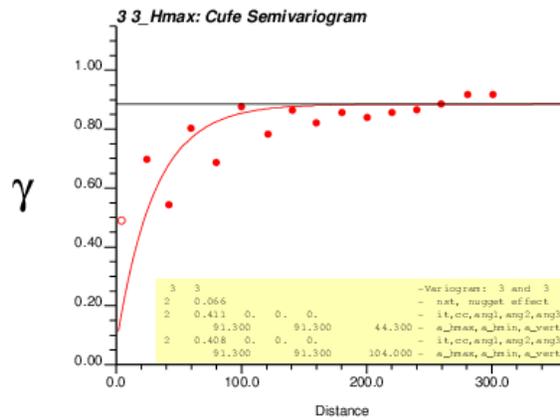


Gráfico 179: Variograma directo CuFe omnidireccional unidad 28

## 11 MODELOS VARIOGRÁFICOS POR UNIDAD

### 11.1 Unidad 316

PEPA		cucabeza	curougher	cufe	cuoxidado
	cucabeza	0.000	0.000	0.001	0.065
	curougher		0.000	0.001	0.082
	cufe			0.000	0.000
	cuoxidado				0.083
esf(100,100,100)		cucabeza	curougher	cufe	cuoxidado
	cucabeza	0.940	0.657	0.485	0.603
	curougher		0.954	0.487	0.425
	cufe			0.622	0.298
	cuoxidado				0.743

Tabla 37: Modelo variográfico 3D unidad 316

### 11.2 Unidad 17

PEPA		Cucabeza	curougher	cufe	cuoxidado
	cucabeza	0.082	0.000	0.026	0.000
	curougher		0.000	0.000	0.001
	cufe			0.008	0.000
	cuoxidado				0.033
esf(45,45,90)		Cucabeza	curougher	cufe	cuoxidado
	cucabeza	0.360	0.372	0.145	0.317
	curougher		0.539	0.184	0.241
	cufe			0.304	0.009
	cuoxidado				0.58
esf(150,150,410)		Cucabeza	curougher	cufe	cuoxidado
	cucabeza	0.412	0.292	0.310	0.304
	curougher		0.375	0.352	0.319
	cufe			0.537	0.142
	cuoxidado				0.462

Tabla 38: Modelo variográfico 3D unidad 17

### 11.3 Unidad 18

PEPA		cucabeza	curougher	cufe
	cucabeza	0.129	0.048	0.065
	curougher		0.275	0.043
	cufe			0.241
esf(100,100,200)		cucabeza	curougher	cufe
	cucabeza	0.444	0.356	0.347
	curougher		0.357	0.381
	cufe			0.439
esf(999,999,200)		cucabeza	curougher	cufe
	cucabeza	0.528	0.385	0.297
	curougher		0.351	0.315
	cufe			0.315

**Tabla 39: Modelo variográfico 3D unidad 18**

### 11.4 Unidad 27

PEPA		cucabeza	curougher	cufe
	cucabeza	0.000	0.002	0.000
	curougher		0.178	0.078
	cufe			0.045
esf(80,80,80)		cucabeza	curougher	cufe
	cucabeza	1.029	0.570	0.804
	curougher		0.609	0.610
	cufe			1.046

**Tabla 40: Modelo variográfico 3D unidad 27**

### 11.5 Unidad 28

PEPA		cucabeza	curougher	cufe
	cucabeza	0.059	0.000	0.085
	curougher		0.020	0.423
	cufe			0.162
esf(100,100,100)		cucabeza	curougher	cufe
	cucabeza	0.732	0.388	0.481
	curougher		0.877	0.423
	cufe			0.708

**Tabla 41: Modelo variográfico 3D unidad 28**

## 12 VALIDACIÓN BOXPLOTS

### 12.1 Ley de Cu cabeza

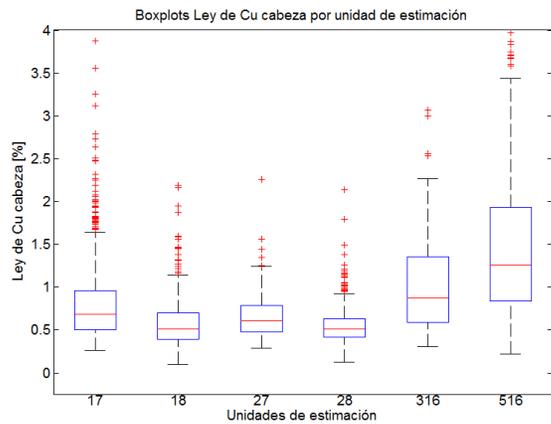


Gráfico 180: Boxplots Ley de Cu cabeza por unidad de estimación datos condicionantes

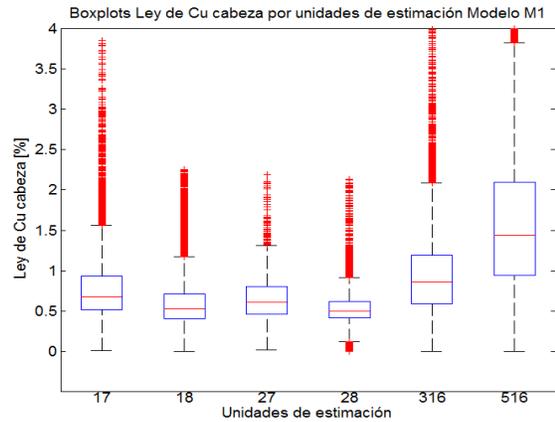


Gráfico 181: Boxplots Ley de Cu cabeza por unidad de estimación Modelo M1

### 12.2 Razón CuFe

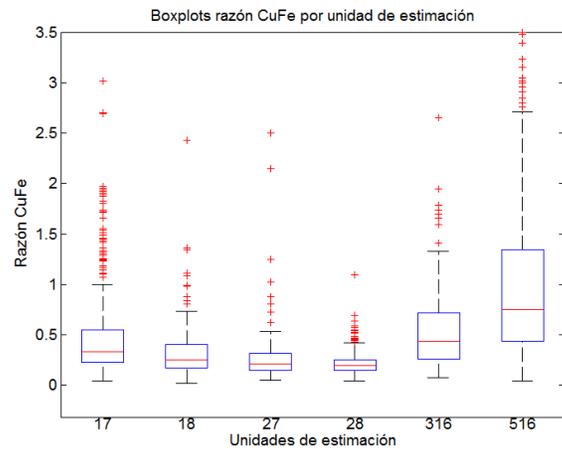


Gráfico 182: Boxplots Razón CuFe por unidad de estimación datos condicionantes

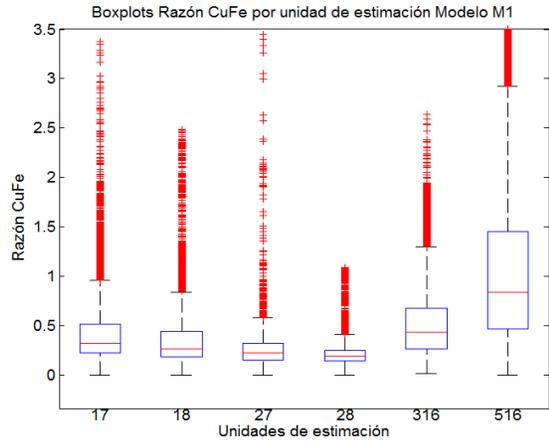


Gráfico 183: Boxplots Razón CuFe por unidad de estimación Modelo M1

### 12.3 Ley de Cu oxidado

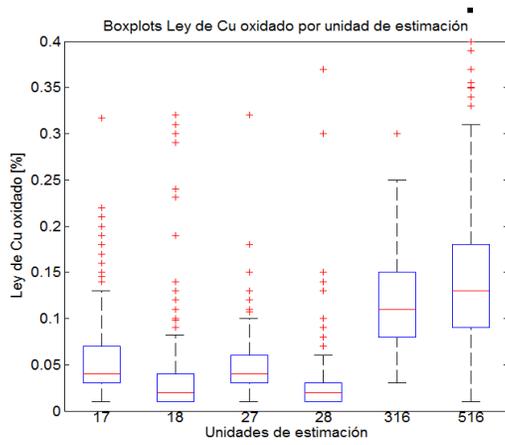


Gráfico 184: Boxplots Ley de Cu oxidado por unidad de estimación datos condicionantes

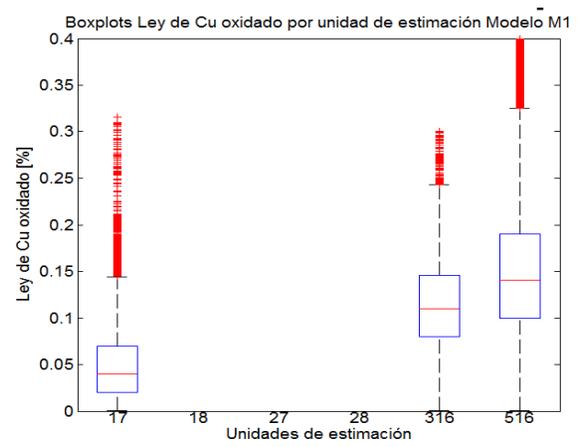


Gráfico 185: Boxplots Ley de Cu oxidado por unidad de estimación Modelo M1

## 13 VALIDACIÓN VARIOGRAMAS POR UNIDAD

### 13.1 Unidad 516

#### 13.1.1 Cucabeza

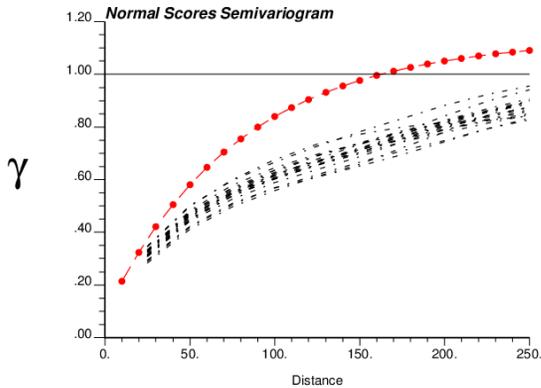


Gráfico 186: Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza unidad 516

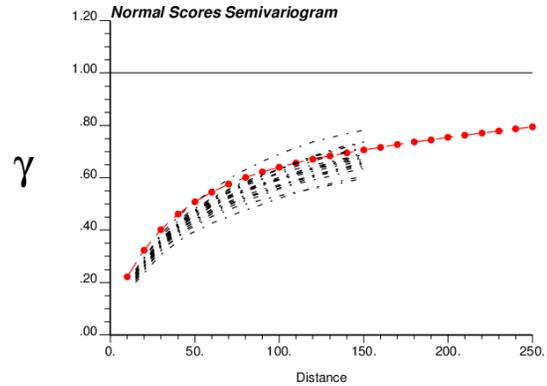


Gráfico 187 Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza unidad 516

#### 13.1.2 Cucabeza-Curougher

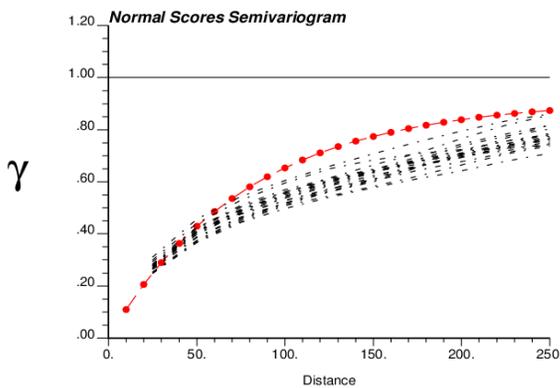


Gráfico 188: Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher unidad 516

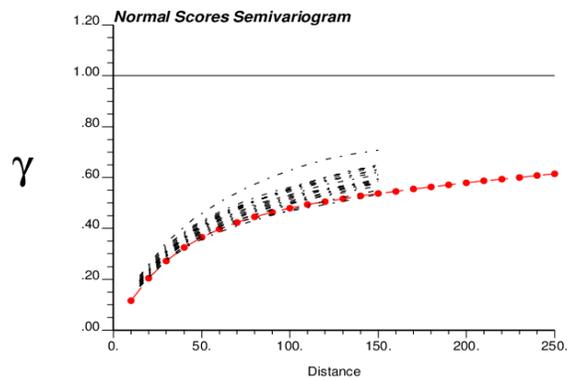


Gráfico 189: Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher unidad 516

#### 13.1.3 Cucabeza-Cufe

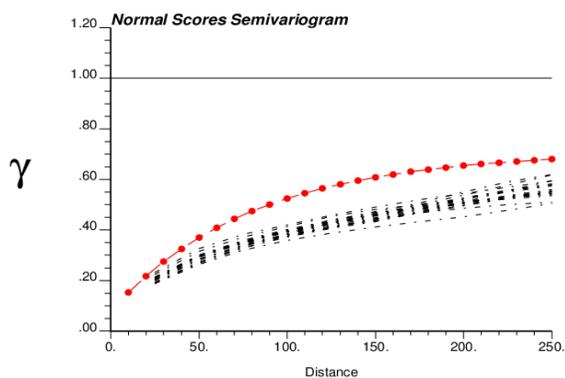


Gráfico 190: Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza-Razón CuFe unidad 516

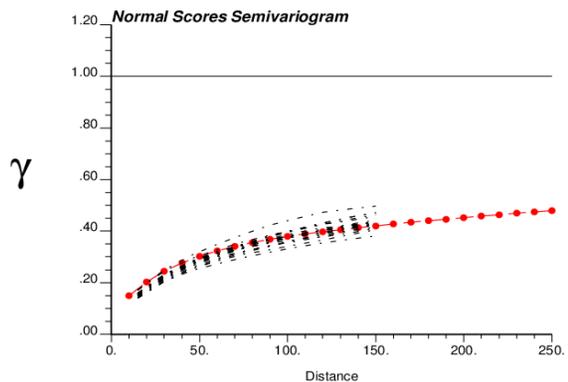


Gráfico 191: Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza-Razón CuFe unidad 516

### 13.1.4 Cucabeza-Cuoxidado

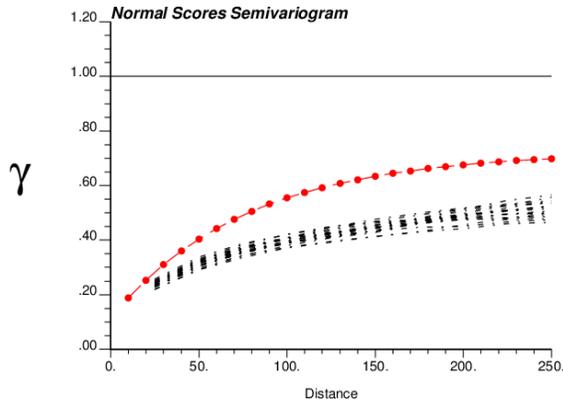


Gráfico 192: Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza-Ley de Cu oxidado unidad 516

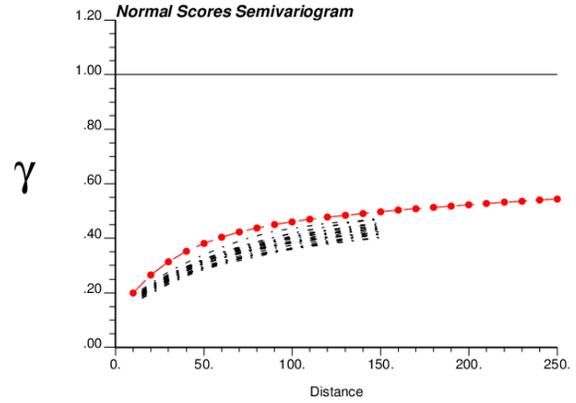


Gráfico 193: Validación variogramas XZ Ley de Cu cabeza-Ley de Cu oxidado unidad 516

### 13.1.5 Curougher-Cufe

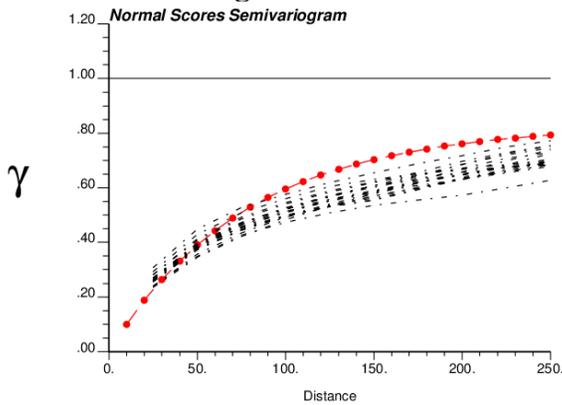


Gráfico 194: Validación variogramas XZ Ley de Cu rougher-Razón CuFe unidad 516

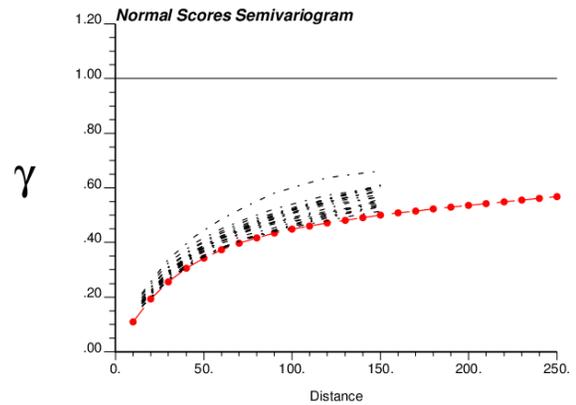


Gráfico 195: Validación variogramas XZ Ley de Cu rougher-Razón CuFe unidad 516

### 13.1.6 Curougher-Cuoxidado

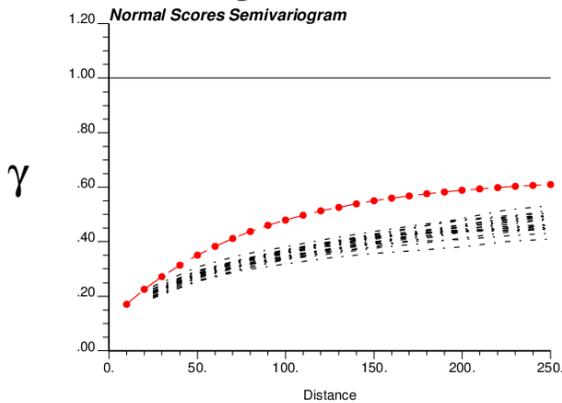


Gráfico 196: Validación variogramas XZ Ley de Cu rougher-Ley de Cu oxidado unidad 516

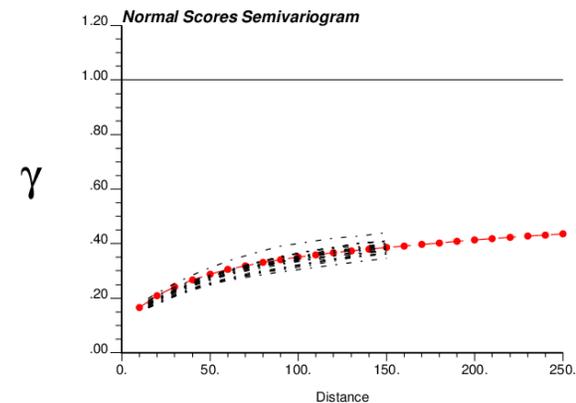


Gráfico 197: Validación variogramas XZ Ley de Cu rougher-Ley de Cu oxidado unidad 516

### 13.1.7 CuFe

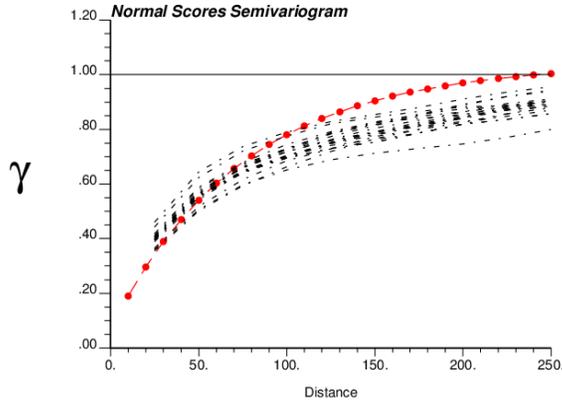


Gráfico 198: Validación variogramas dirección Y Razón CuFe unidad 516

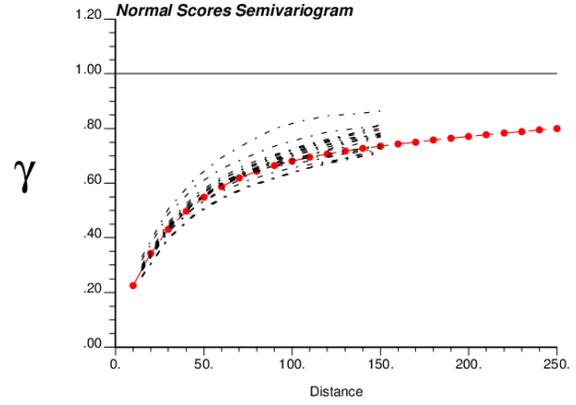


Gráfico 199: Validación variogramas XZ Razón CuFe unidad 516

### 13.1.8 CuFe-Cuoxidado

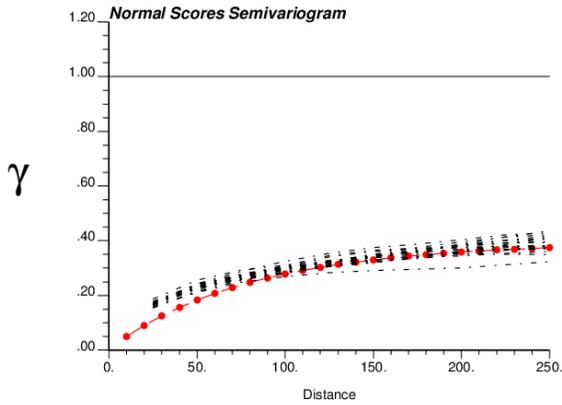


Gráfico 200: Validación variogramas dirección Y Razón CuFe-Ley de Cu oxidado unidad 516

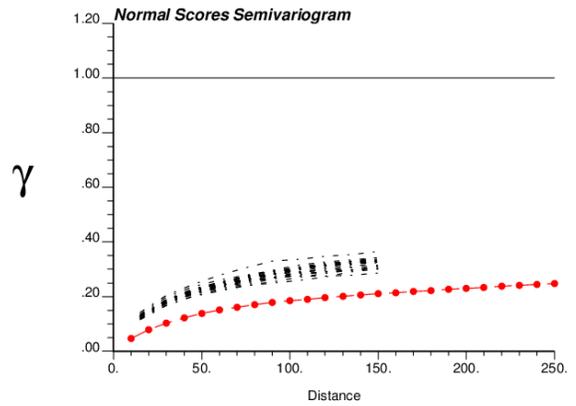


Gráfico 201: Validación variogramas XZ Razón CuFe-Ley de Cu oxidado unidad 516

### 13.1.9 Cuoxidado

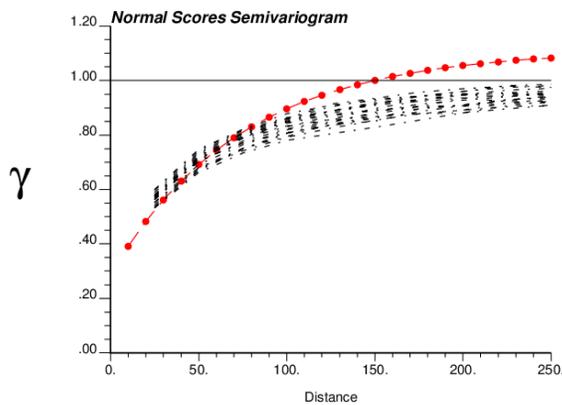


Gráfico 202: Validación variogramas dirección Y Ley de Cu oxidado unidad 516

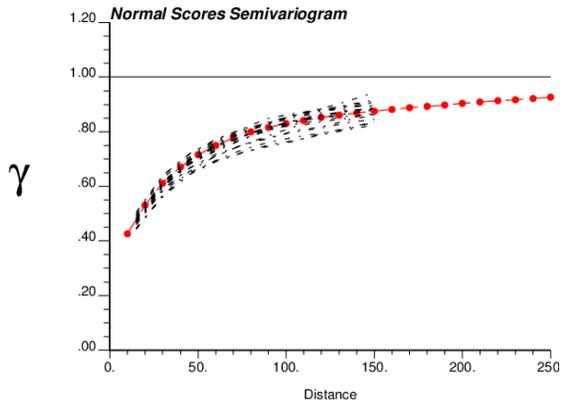


Gráfico 203: Validación variogramas XZ Ley de Cu oxidado unidad 516

## 13.2 Unidad 316

### 13.2.1 Cucabeza

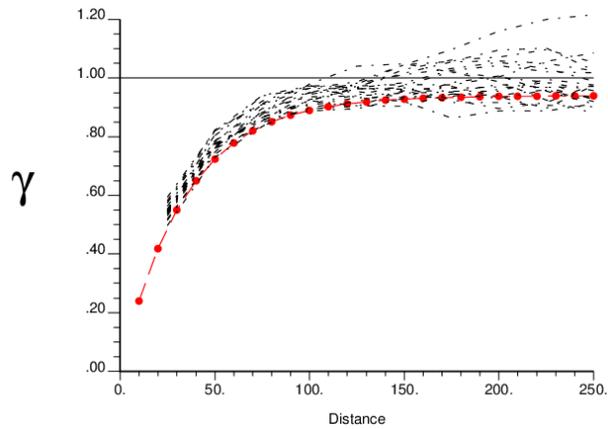


Gráfico 204: Validación variogramas Ley de Cu cabeza unidad 316

### 13.2.2 Cucabeza-Curougher

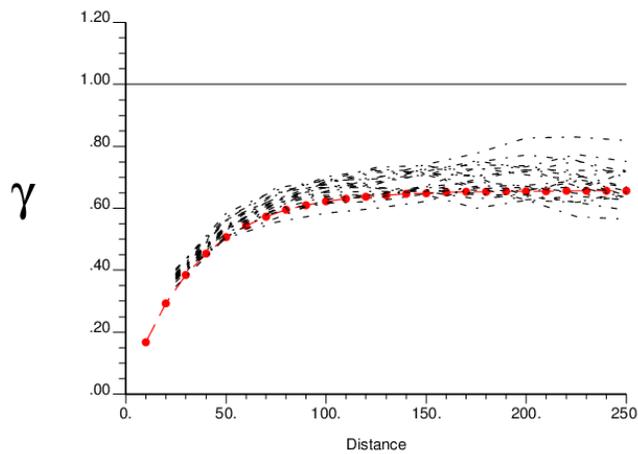


Gráfico 205: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher unidad 316

### 13.2.3 Cucabeza-Cufe

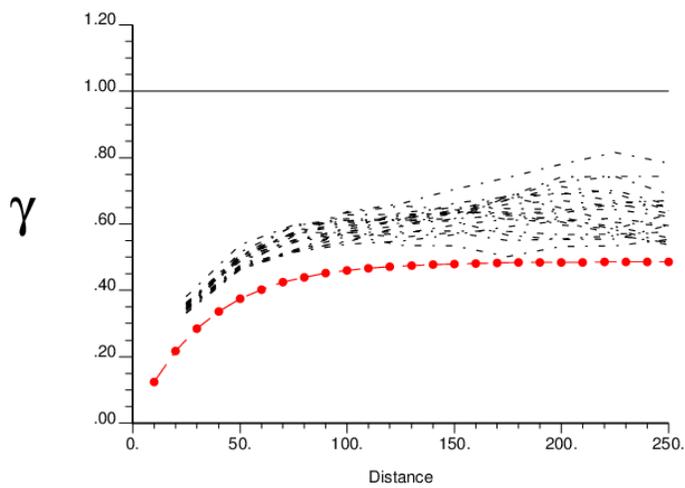


Gráfico 206: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Razón CuFe unidad 316

### 13.2.4 Cucabeza-Cuoxidado

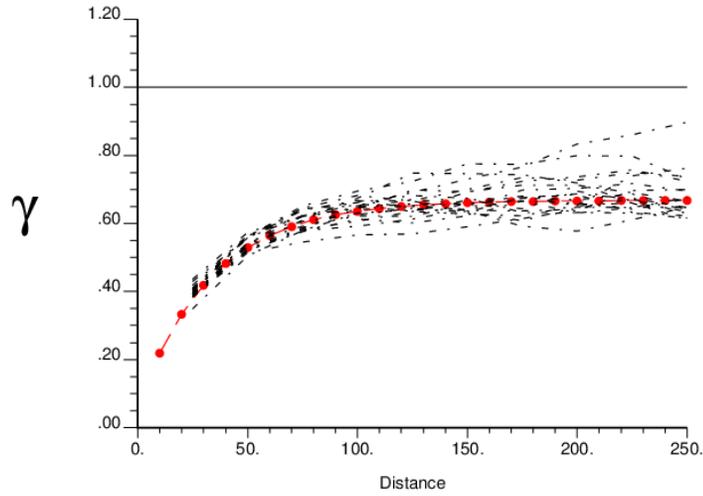


Gráfico 207: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Ley de Cu oxidado unidad 316

### 13.2.5 Curougher-Cufe

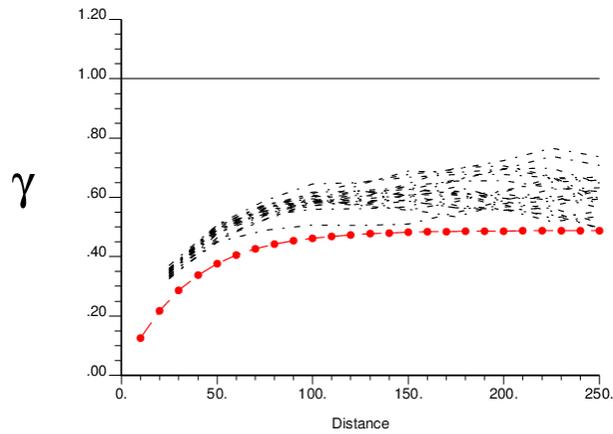


Gráfico 208: Validación variogramas Ley de Cu rougher- Razón CuFe unidad 316

### 13.2.6 Curougher-Cuoxidado

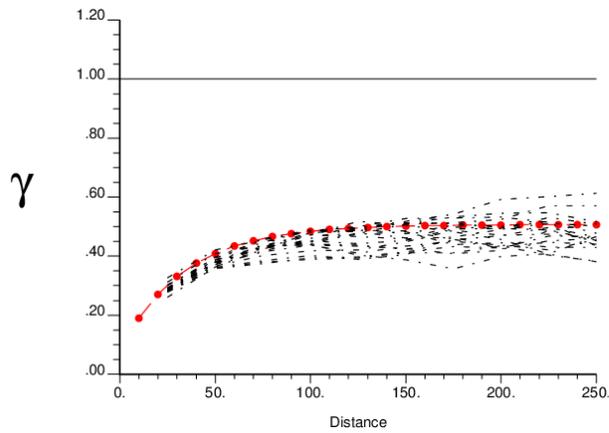


Gráfico 209: Validación variogramas Ley de Cu rougher- Ley de Cu oxidado unidad 316

### 13.2.7 CuFe

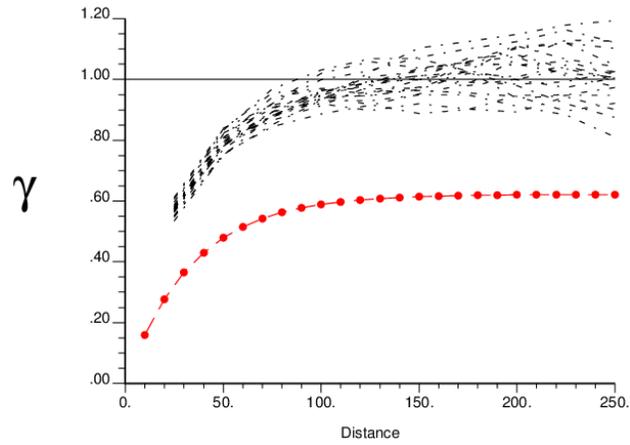


Gráfico 210: Validación variogramas Razón de CuFe unidad 316

### 13.2.8 CuFe-Cuoxidado

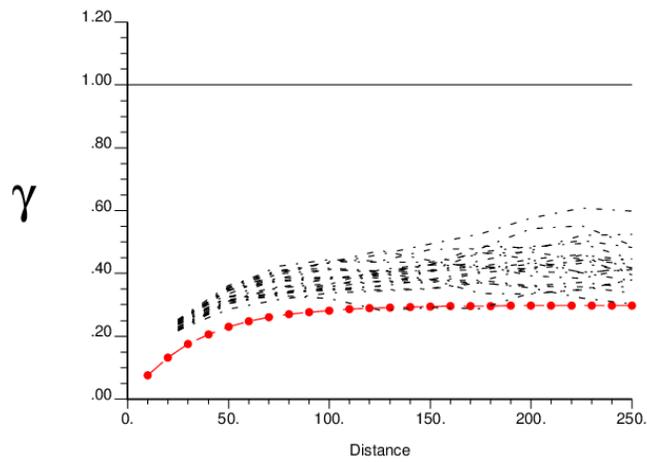


Gráfico 211: Validación variogramas Razón de CuFe- Ley de Cu oxidado unidad 316

### 13.2.9 Cuoxidado

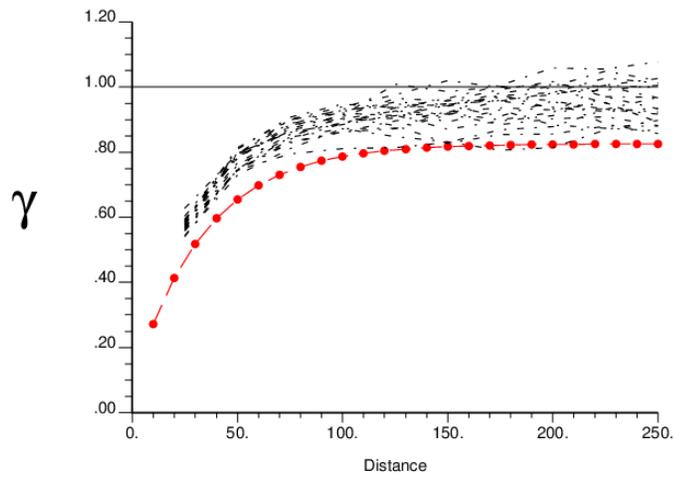


Gráfico 212: Validación variogramas Ley de Cu oxidado unidad 316

### 13.3 Unidad 17

#### 13.3.1 Cucabeza

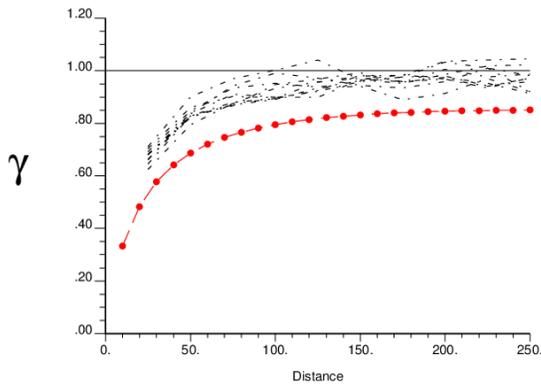


Gráfico 213: Validación variogramas Ley de Cu cabeza omnihorizontales unidad 17

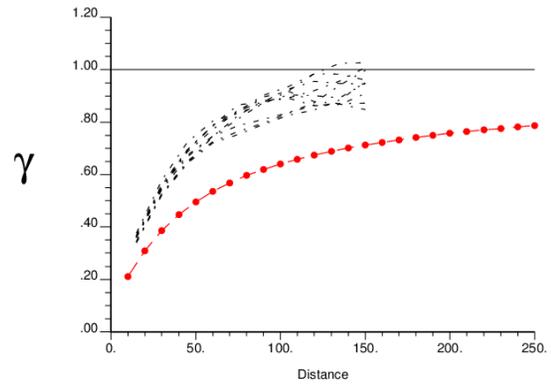


Gráfico 214: Validación variogramas Ley de Cu cabeza verticales unidad 17

#### 13.3.2 Cucabeza-Curougher

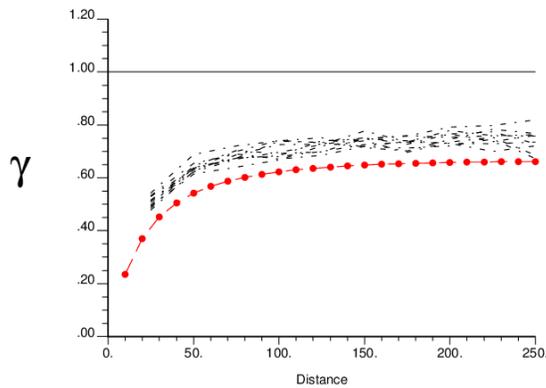


Gráfico 215: Validación variogramas Ley de Cu cabeza- Ley de Cu rougher omnihorizontales unidad 17

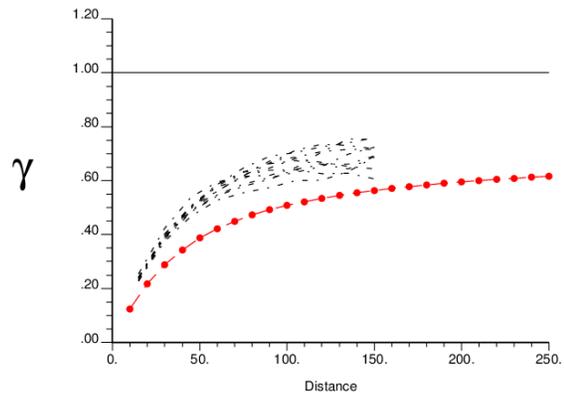


Gráfico 216: Validación variogramas Ley de Cu cabeza- Ley de Cu rougher verticales unidad 17

#### 13.3.3 Cucabeza-Cufe

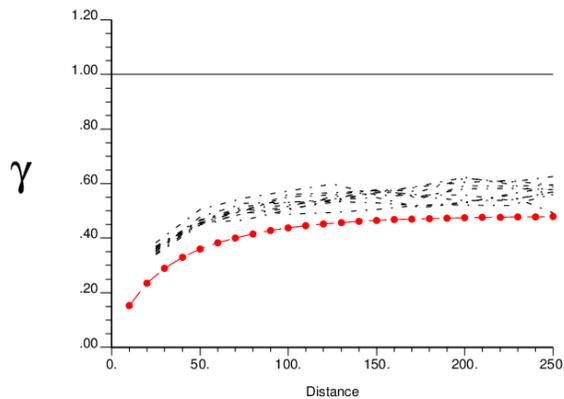


Gráfico 217: Validación variogramas Ley de Cu cabeza- Razón CuFe omnihorizontales unidad 17

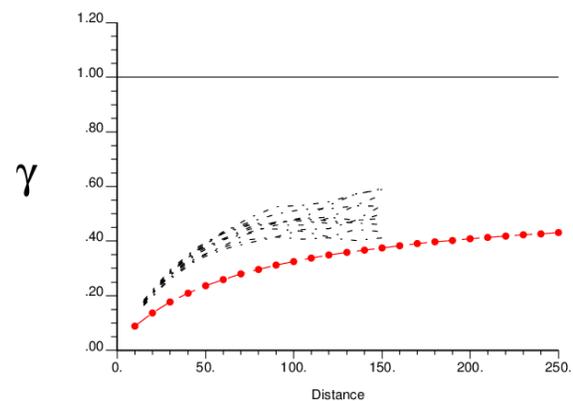


Gráfico 218: Validación variogramas Ley de Cu cabeza- Razón CuFe verticales unidad 17

### 13.3.4 Cucabeza-Cuoxidado

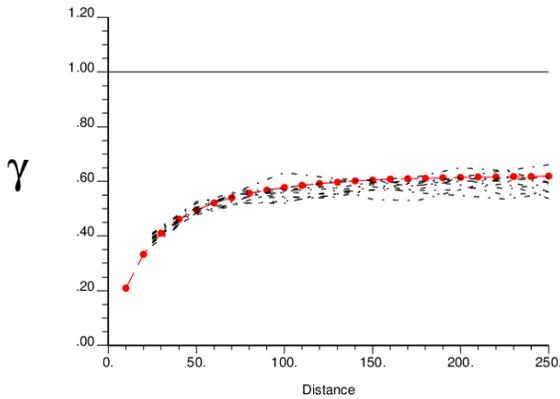


Gráfico 219: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Ley de Cu oxidado omnihorizontales unidad 17

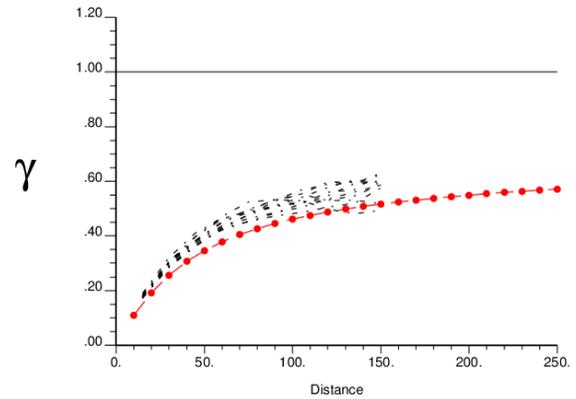


Gráfico 220: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Ley de Cu oxidado verticales unidad 17

### 13.3.5 Curougher-Cufe

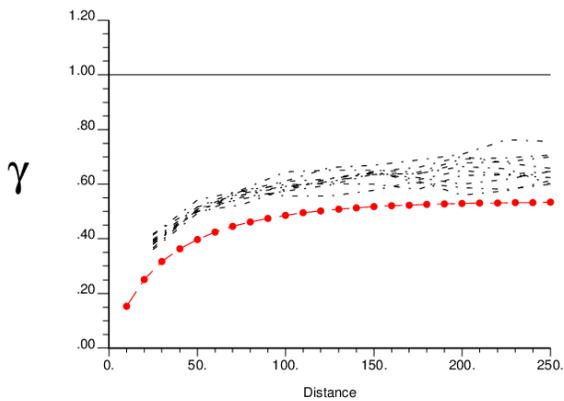


Gráfico 221: Validación variogramas Ley de Cu rougher-Razón CuFe omnihorizontales unidad 17

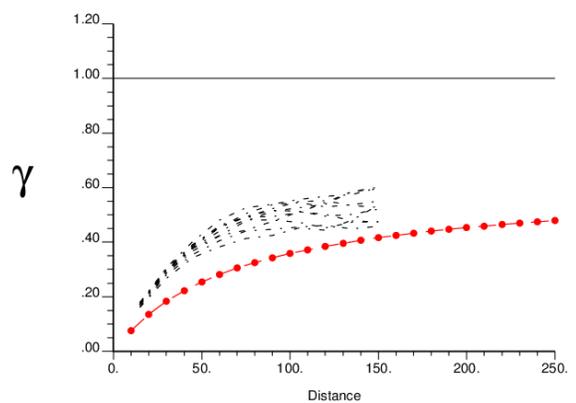


Gráfico 222: Validación variogramas Ley de Cu rougher-Razón CuFe verticales unidad 17

### 13.3.6 Curougher-Cuoxidado

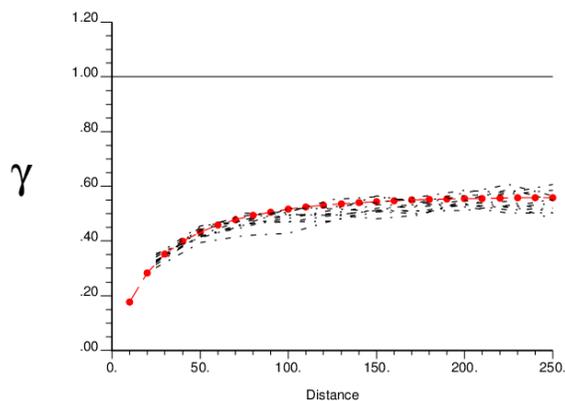


Gráfico 223: Validación variogramas Ley de Cu rougher-Ley de Cu oxidado omnihorizontales unidad 17

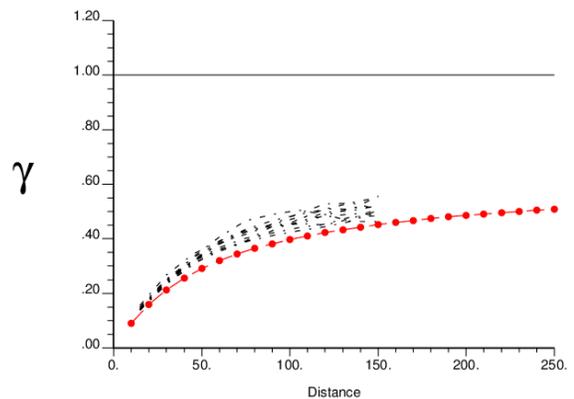


Gráfico 224: Validación variogramas Ley de Cu rougher-Ley de Cu oxidado verticales unidad 17

### 13.3.7 CuFe

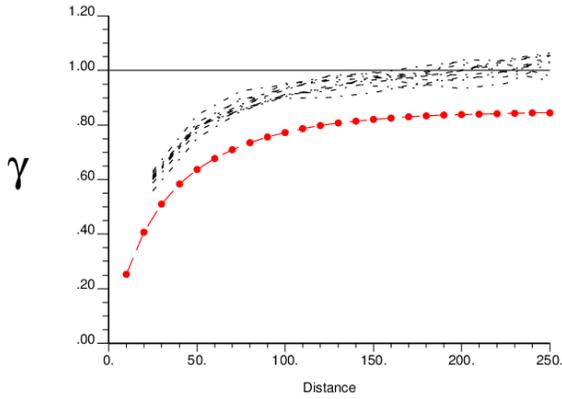


Gráfico 225: Validación variogramas Razón CuFe omnihorizontales unidad 17

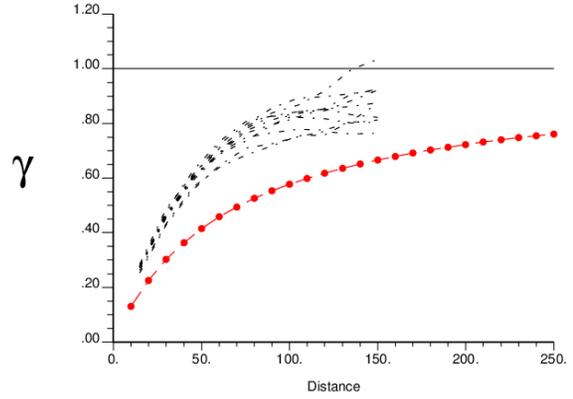


Gráfico 226: Validación variogramas Razón CuFe verticales unidad 17

### 13.3.8 CuFe-Cuoxidado

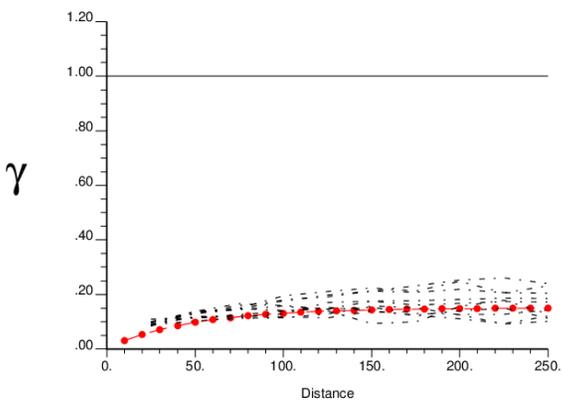


Gráfico 227: Validación variogramas Razón CuFe-Ley Cu oxidado omnihorizontales unidad 17

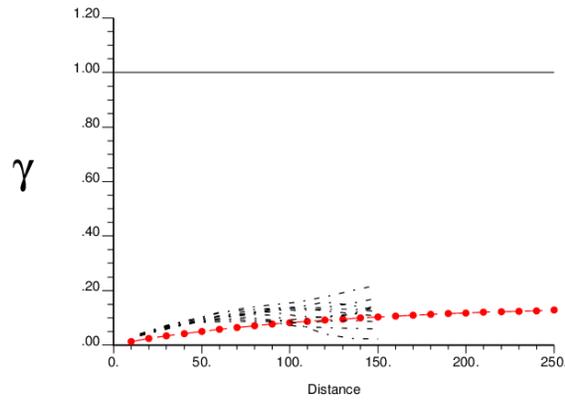


Gráfico 228: Validación variogramas Razón CuFe-Ley Cu oxidado verticales unidad 17

### 13.3.9 Cuoxidado

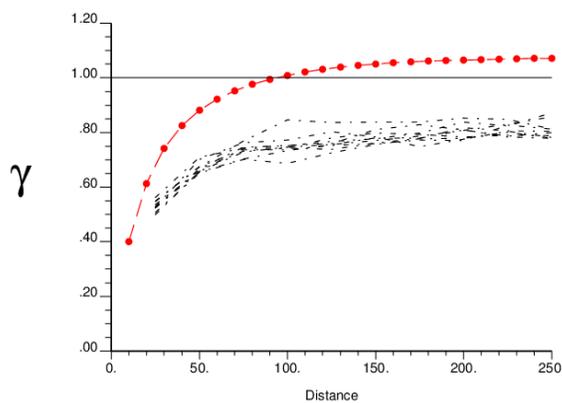


Gráfico 229: Validación variogramas Ley Cu oxidado omnihorizontales unidad 17

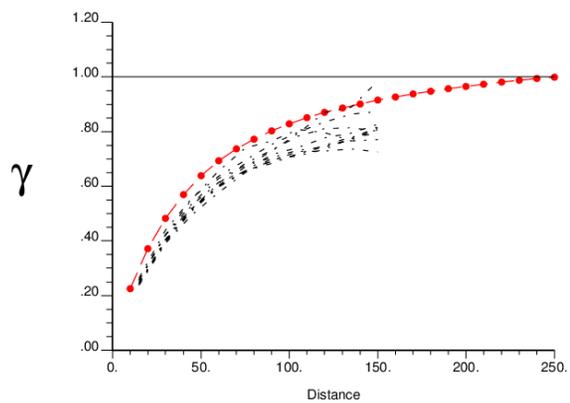


Gráfico 230: Validación variogramas Ley Cu oxidado verticales unidad 17

## 13.4 Unidad 18

### 13.4.1 Cucabeza

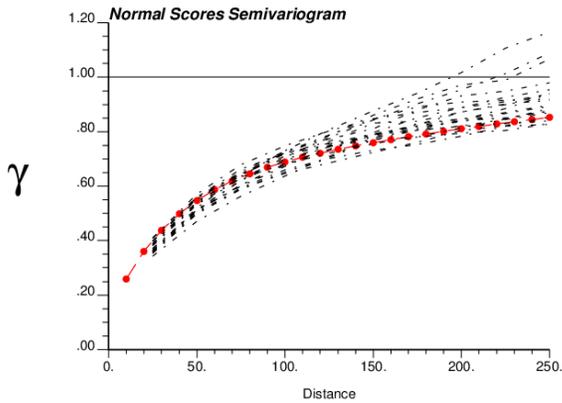


Gráfico 231: Validación variogramas Ley de Cu cabeza omnihorizontales unidad 18

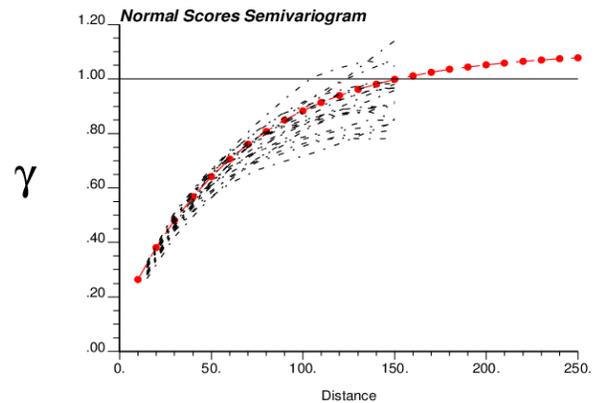


Gráfico 232: Validación variogramas Ley de Cu cabeza verticales unidad 18

### 13.4.2 Cucabeza-Curougher

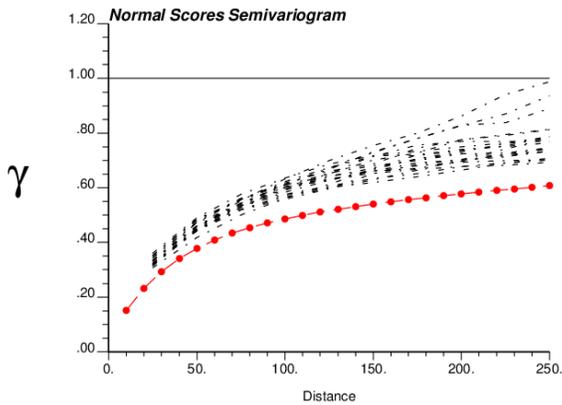


Gráfico 233: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher omnihorizontales unidad 18

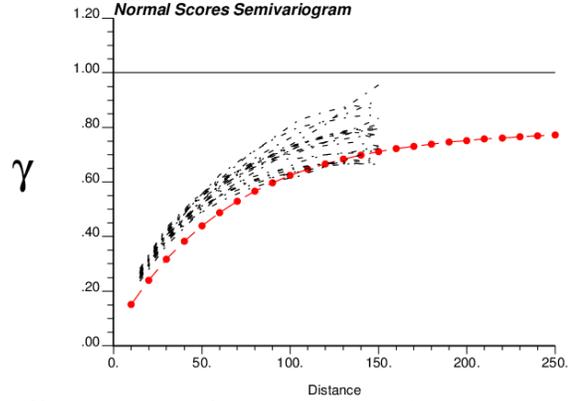


Gráfico 234: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher verticales unidad 18

### 13.4.3 Cucabeza-Cufe

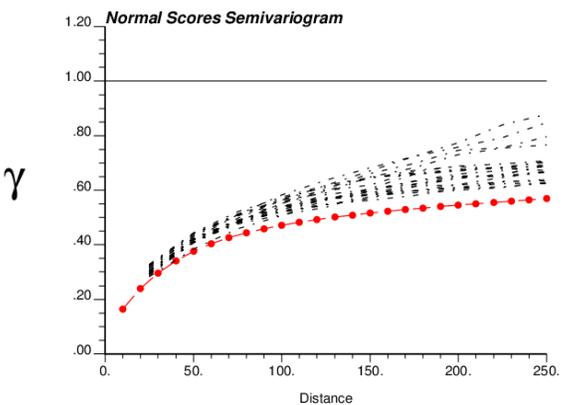


Gráfico 235: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Razón CuFe omnihorizontales unidad 18

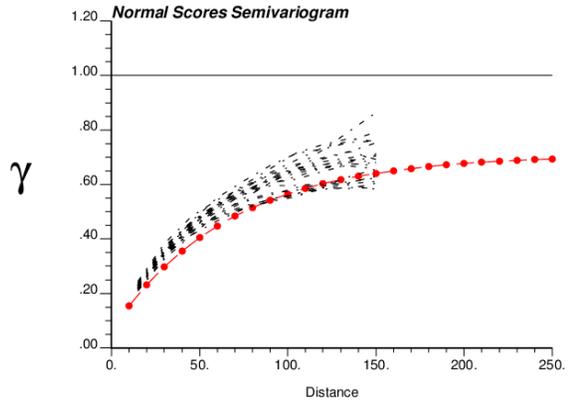


Gráfico 236: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Razón CuFe verticales unidad 18

### 13.4.4 Curougher-Cufe

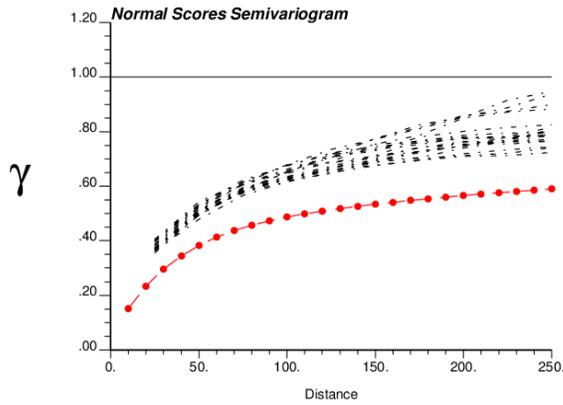


Gráfico 237: Validación variogramas Ley de Cu rougher - Razón CuFe omnihorizontal unidad 18

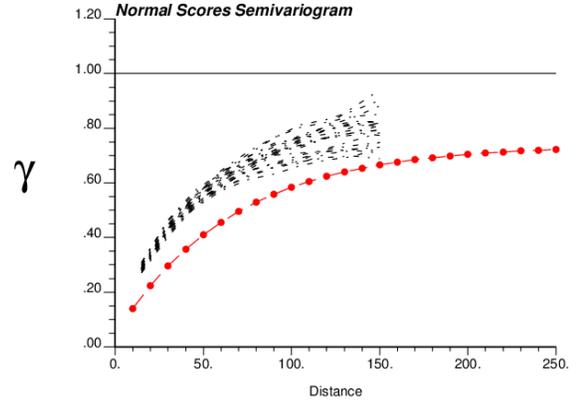


Gráfico 238: Validación variogramas Ley de Cu rougher - Razón CuFe verticales unidad 18

### 13.4.5 Cufe

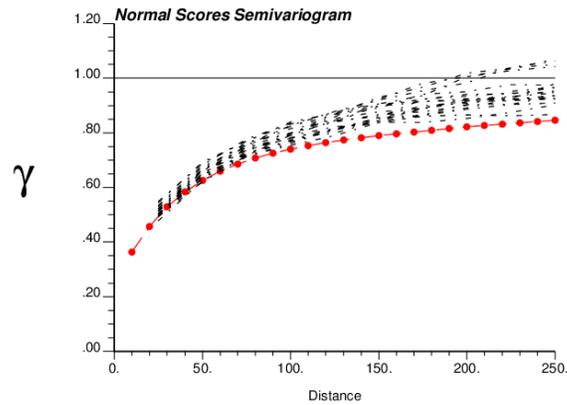


Gráfico 239: Validación variogramas Razón CuFe omnihorizontales unidad 18

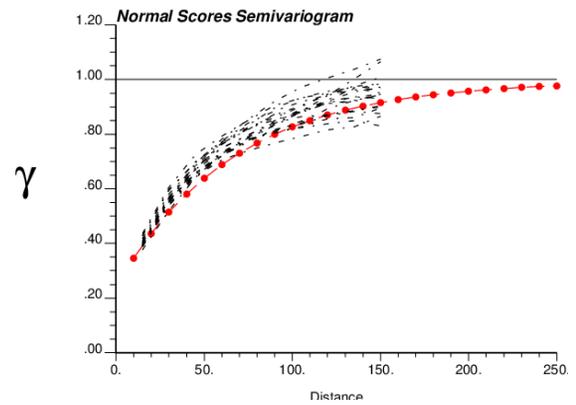


Gráfico 240: Validación variogramas Razón CuFe verticales unidad 18

## 13.5 Unidad 27

### 13.5.1 Cucabeza

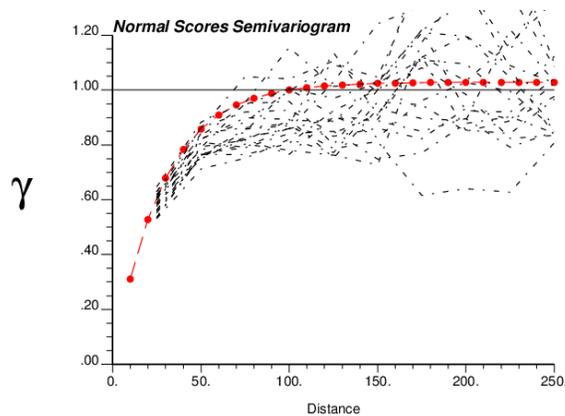


Gráfico 241: Validación variogramas Ley de Cu cabeza unidad 27

### 13.5.2 Cucabeza-Curougher

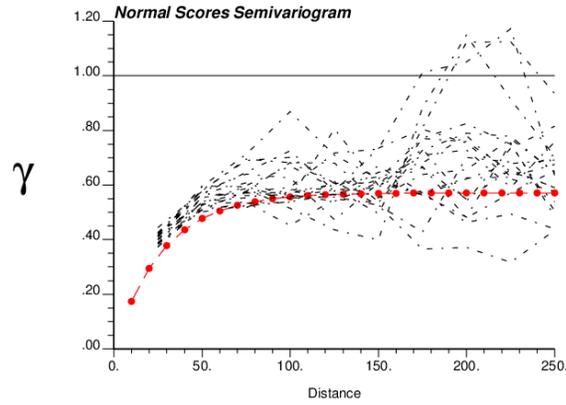


Gráfico 242: Validación variogramas Ley de Cu cabeza- Ley de Cu rougher unidad 27

### 13.5.3 Cucabeza-Cufe

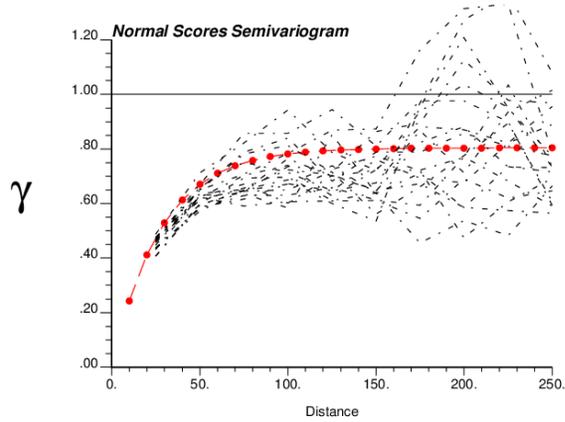


Gráfico 243: Validación variogramas Ley de Cu cabeza- Razón CuFe unidad 27

### 13.5.4 Curougher-Cufe

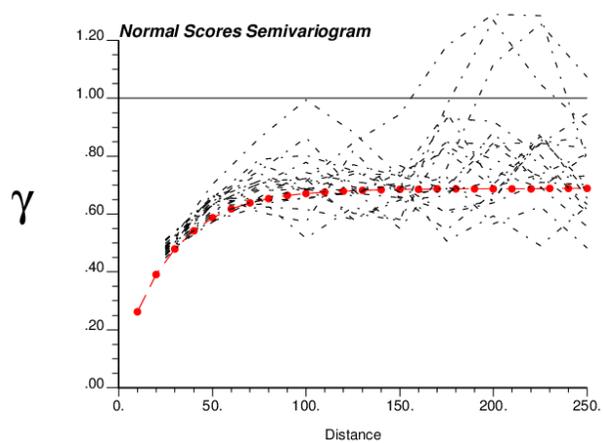


Gráfico 244: Validación variogramas Ley de Cu rougher- Razón CuFe unidad 27

### 13.5.5 CuFe

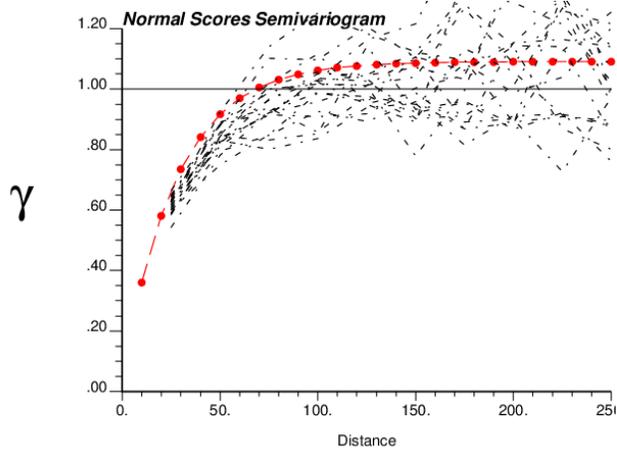


Gráfico 245: Validación variogramas Razón CuFe unidad 27

## 13.6 Unidad 28

### 13.6.1 Cucabeza

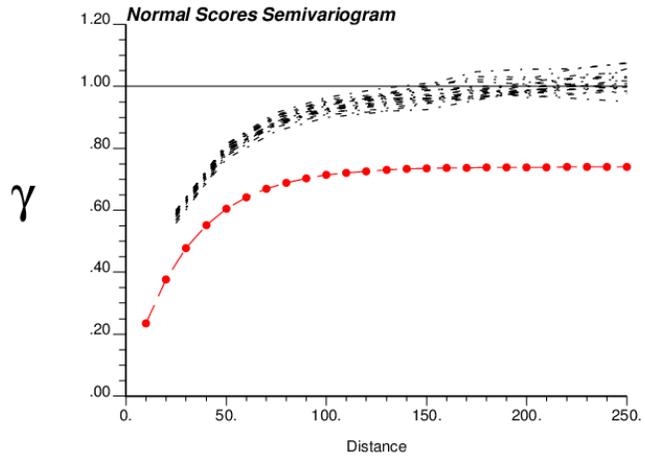


Gráfico 246: Validación variogramas Ley de Cu cabeza unidad 28

### 13.6.2 Cucabeza-Curougher

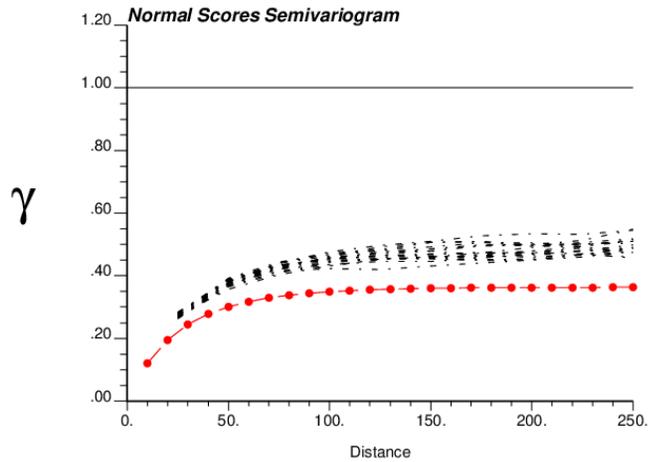


Gráfico 247: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Ley de Cu rougher unidad 28

### 13.6.3 Cucabeza-Cufe

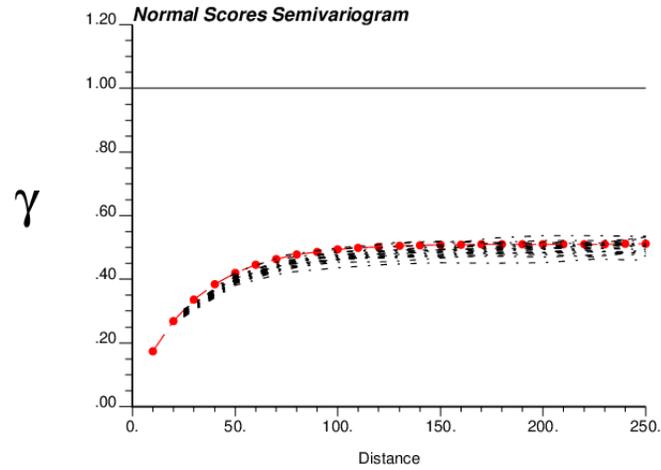


Gráfico 248: Validación variogramas Ley de Cu cabeza-Razón CuFe unidad 28

### 13.6.4 Curougher-Cufe

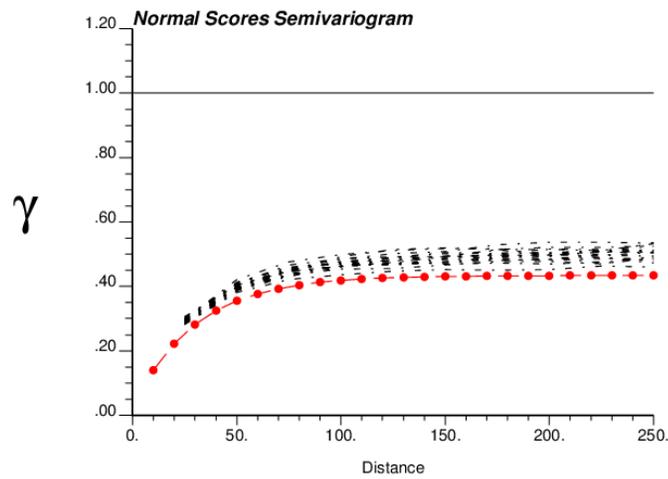


Gráfico 249: Validación variogramas Ley de Cu rougher-Razón CuFe unidad 28

### 13.6.5 Cufe

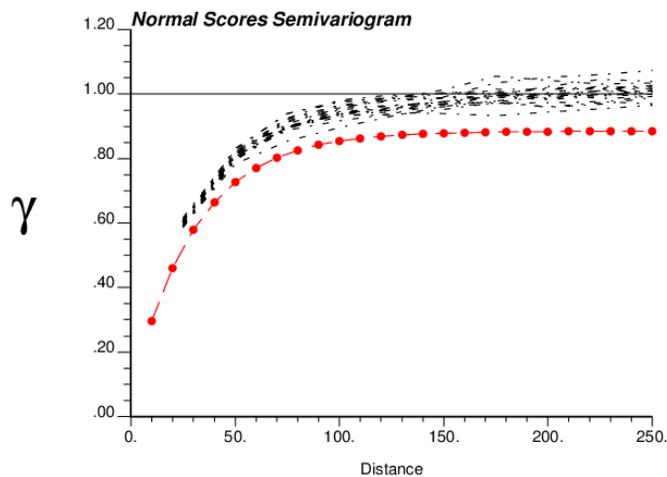


Gráfico 250: Validación variogramas Razón CuFe unidad 28

# 14 SCATTERPLOTS REPRODUCCIÓN DE DATOS CONDICIONANTES MODELO M1

## 14.1 Unidad 516

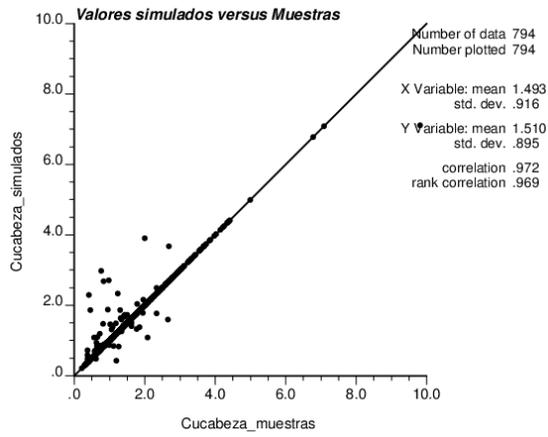


Gráfico 251: Scatterplot Ley de Cu cabeza simulado y muestras unidad 516

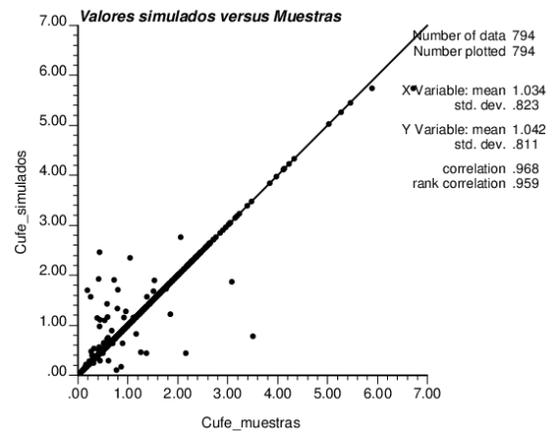


Gráfico 252: Scatterplot Razón CuFe simulado y muestras unidad 516

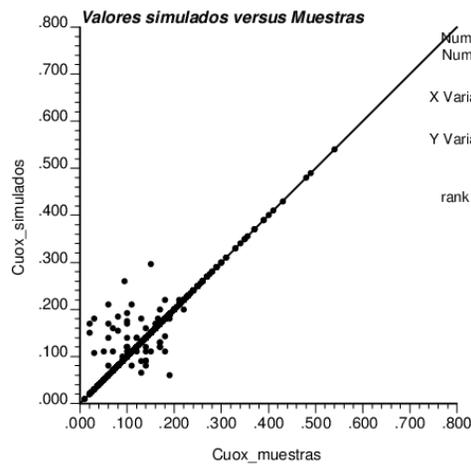
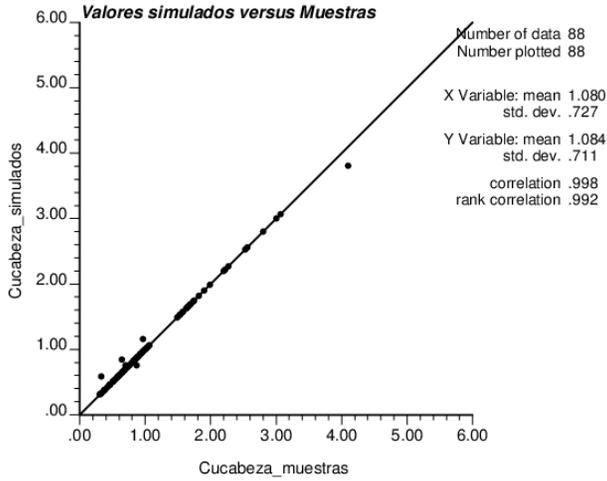
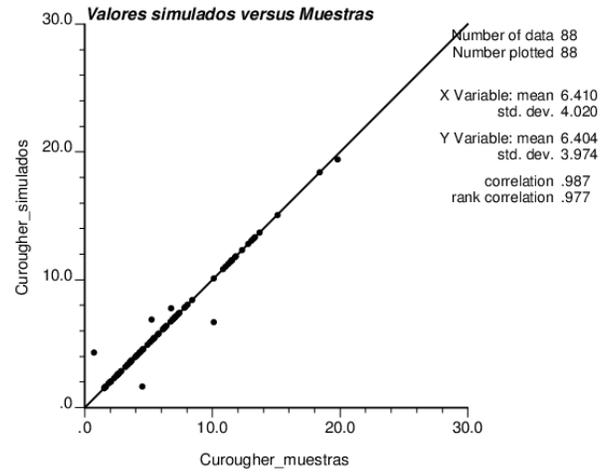


Gráfico 253: Scatterplot Ley de Cu oxidado simulado y muestras unidad 516

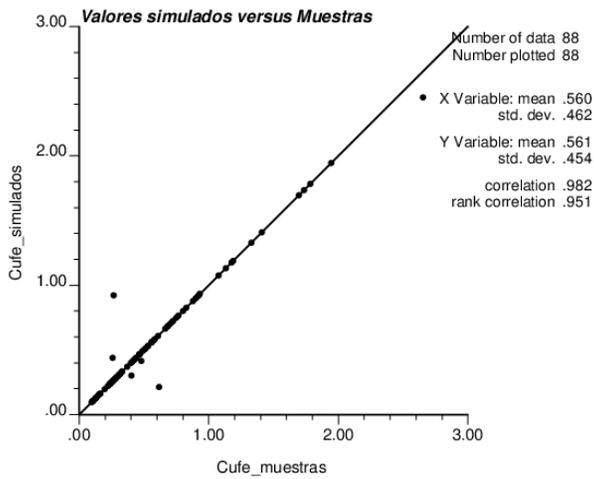
## 14.2 Unidad 316



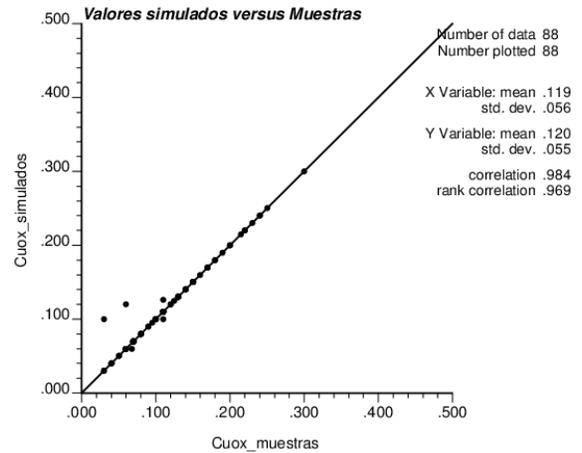
**Gráfico 254: Scatterplot Ley de Cu cabeza simulado y muestras unidad 316**



**Gráfico 255: Scatterplot Ley de Cu rougher simulado y muestras unidad 316**

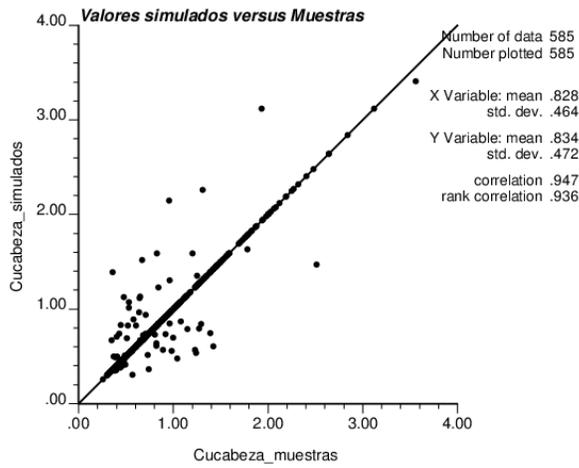


**Gráfico 256: Scatterplot razón CuFe simulado y muestras unidad 316**

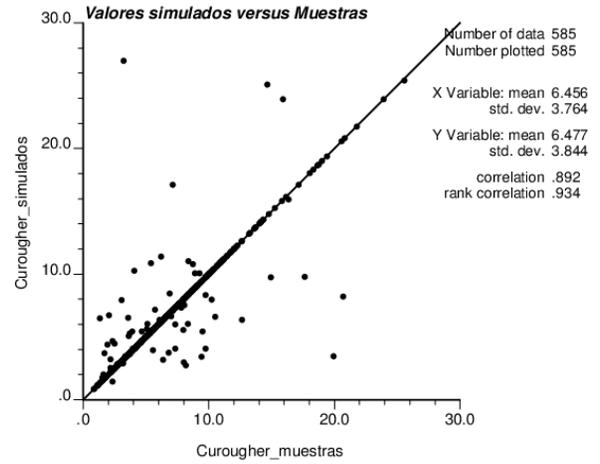


**Gráfico 257: Scatterplot Ley de Cu oxidado simulado y muestras unidad 316**

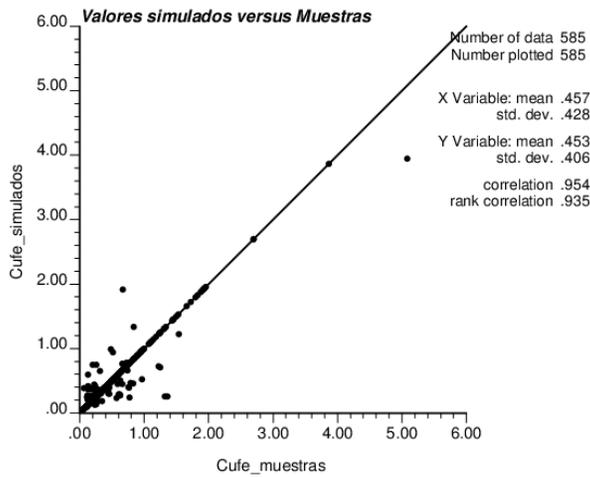
### 14.3 Unidad 17



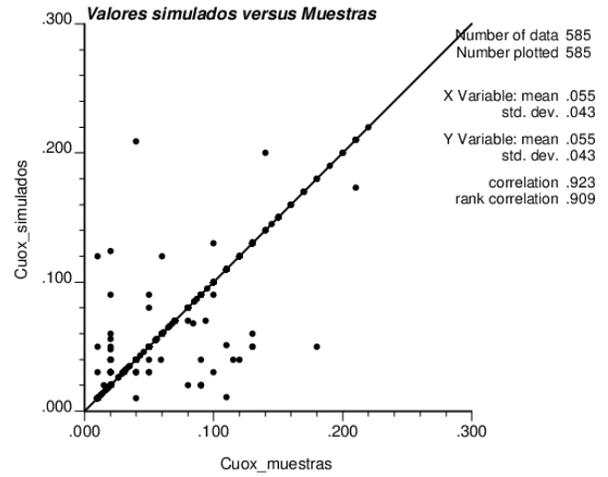
**Gráfico 258: Scatterplot Ley de Cu cabeza simulado y muestras unidad 17**



**Gráfico 259: Scatterplot Ley de Cu rougher simulado y muestras unidad 17**



**Gráfico 260: Scatterplot razón CuFe simulado y muestras unidad 17**



**Gráfico 261: Scatterplot Ley de Cu oxidado simulado y muestras unidad 17**

## 14.4 Unidad 18

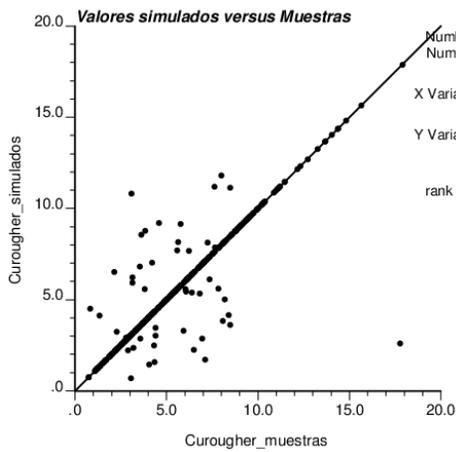


Gráfico 262: Scatterplot Ley de Cu rougher simulado y muestras unidad 18

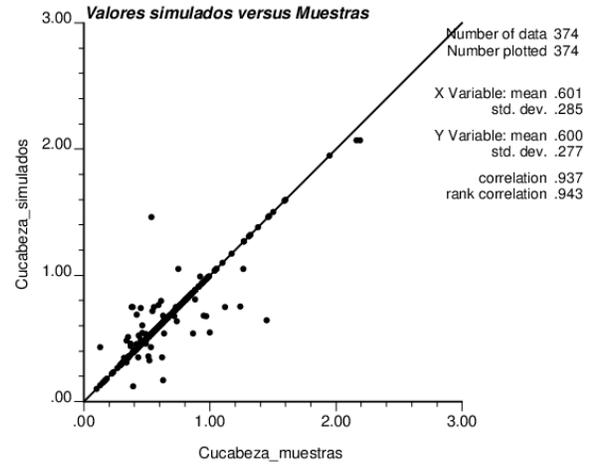


Gráfico 263: Scatterplot Ley de Cu cabeza simulado y muestras unidad 18

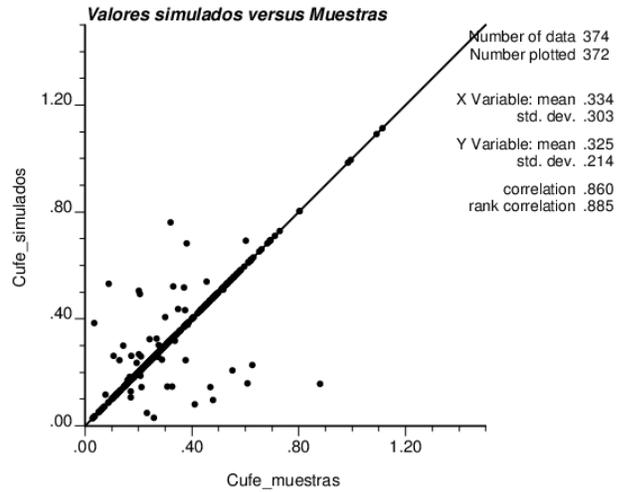
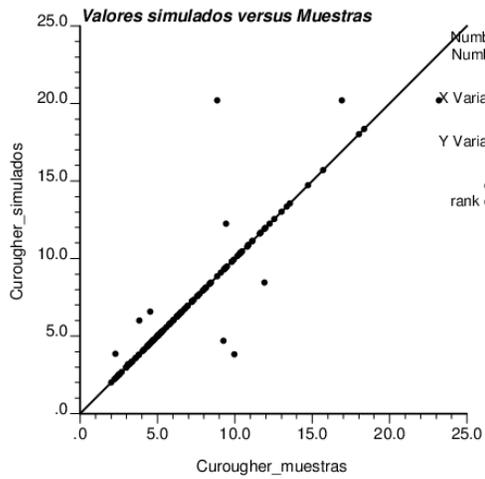
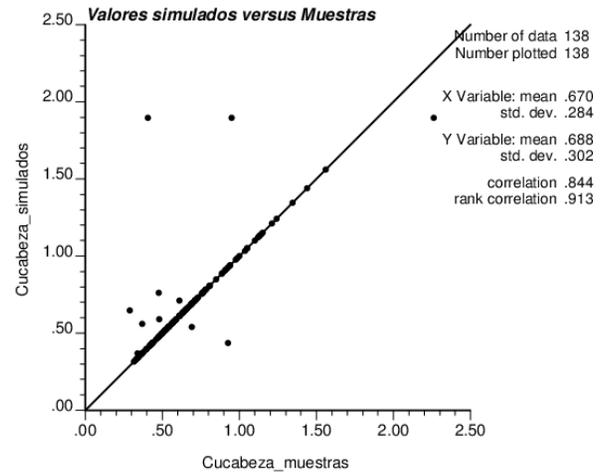


Gráfico 264: Scatterplot Razón CuFe simulado y muestras unidad 18

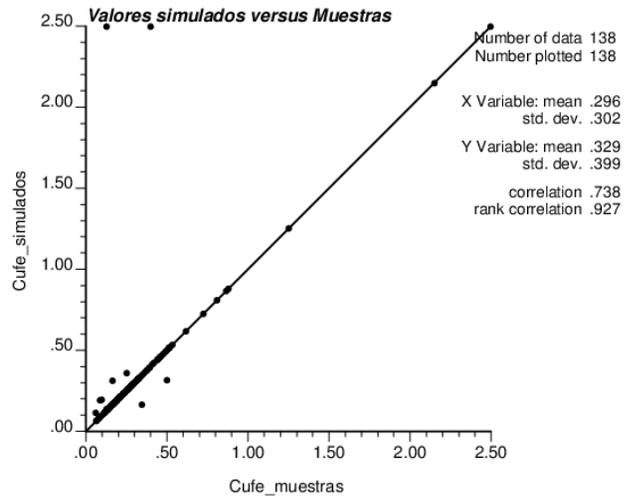
## 14.5 Unidad 27



**Gráfico 265: Scatterplot Ley de Cu rougher simulados y muestras unidad 27**

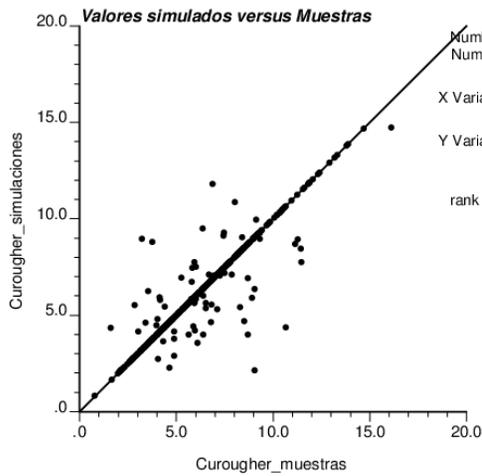


**Gráfico 266: Scatterplot Ley de Cu cabeza simulados y muestras unidad 27**

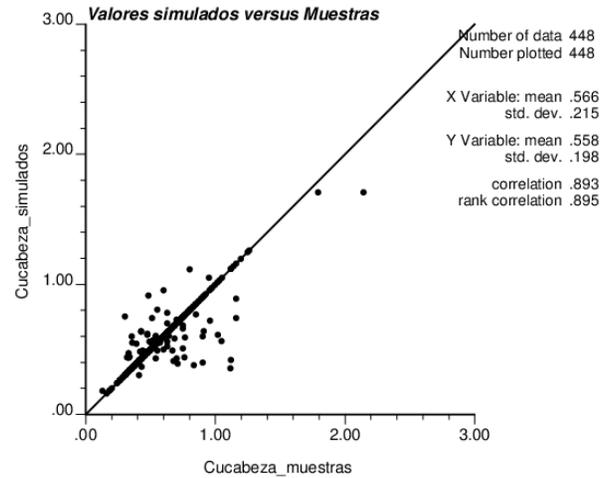


**Gráfico 267: Scatterplot Razón CuFe simulados y muestras unidad 27**

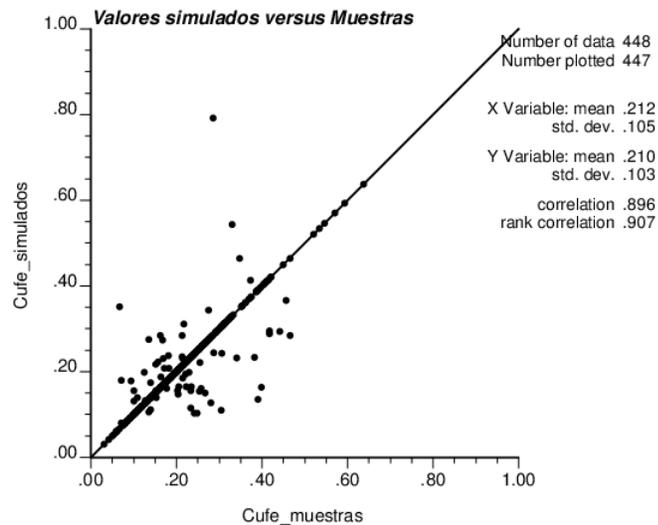
## 14.6 Unidad 28



**Gráfico 268: Scatterplot Ley de Cu rougher simulados y muestras unidad 28**



**Gráfico 269: Scatterplot Ley de Cu cabeza simulados y muestras unidad 28**



**Gráfico 270: Scatterplot razón CuFe simulados y muestras unidad 28**

# 15 GRÁFICOS DE DERIVAS ESPACIALES PARA LEY DE CU ROUGHER

## 15.1 Modelo M3

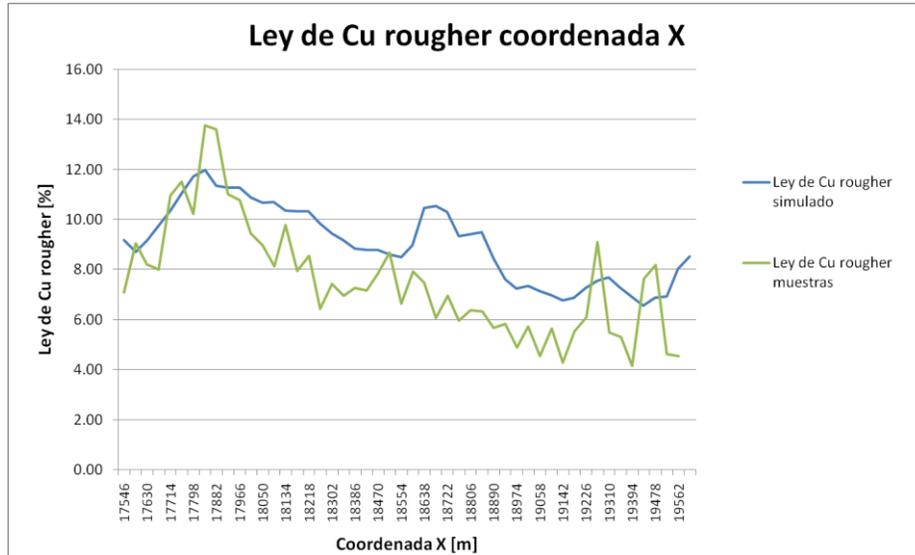


Gráfico 271: Deriva espacial para ley de Cu rougher modelo M3 coordenada X

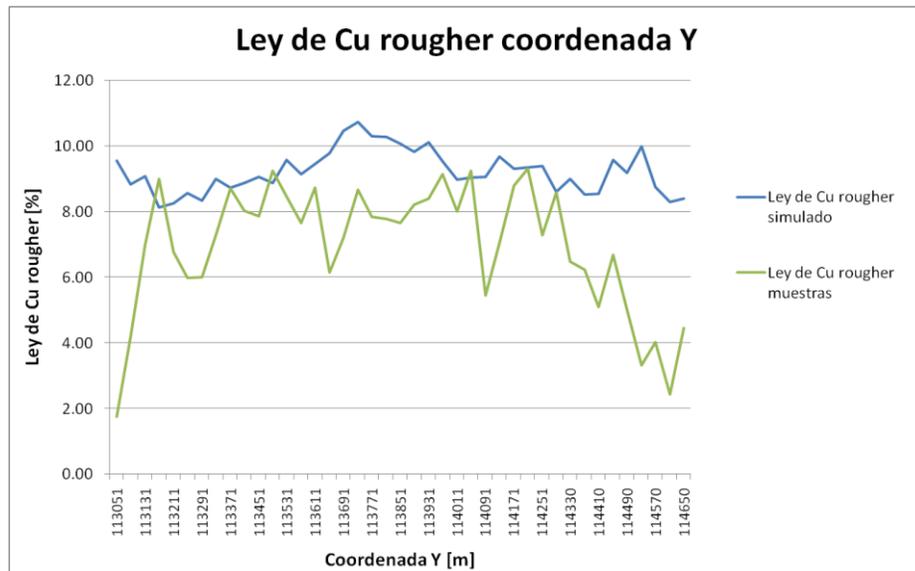


Gráfico 272: Deriva espacial para ley de Cu rougher modelo M3 coordenada Y

## 15.2 Modelo M4

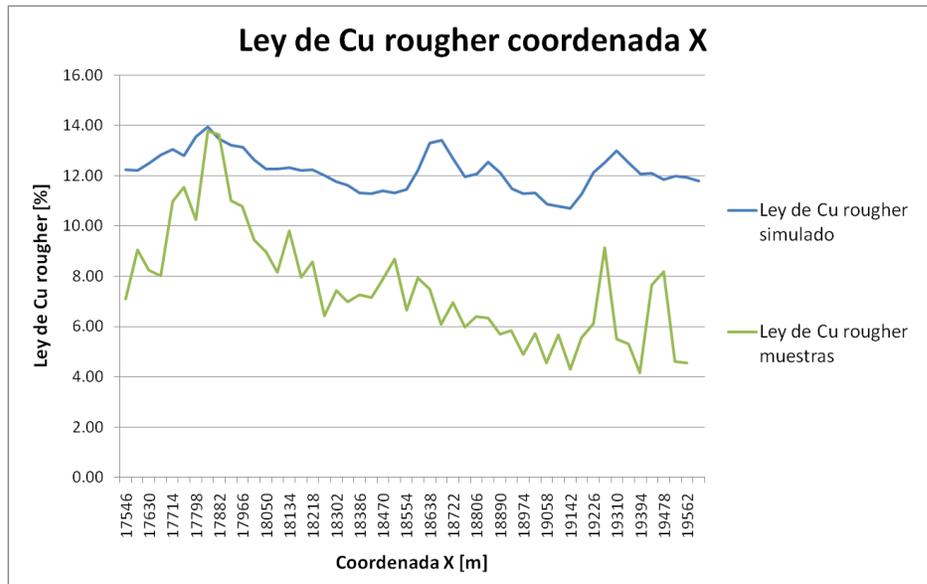


Gráfico 273: Deriva espacial para ley de Cu rougher modelo M4 coordenada X

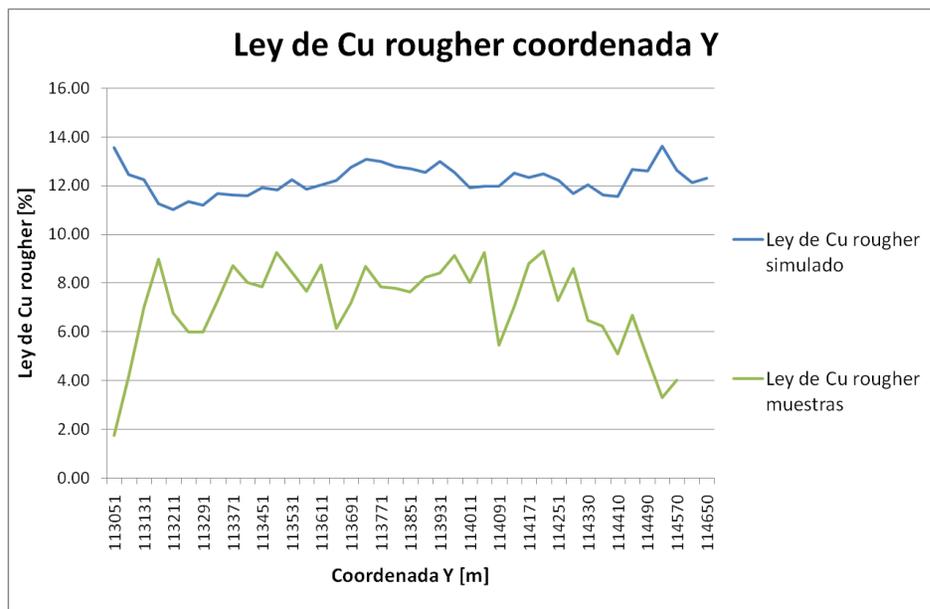


Gráfico 274: Deriva espacial para ley de Cu rougher modelo M4 coordenada Y

## ANEXO B

### 1 BLOQUES DE PARÁMETROS USGSIM

DATA block of parameters.

Line					
1	START OF DATA:				
2	data.dat			-file with primary data	
3	2	3	0	0	6 - columns for X,Y,Z,wt, rock type
4	4	5			- columns for variables
5	-998.	1.0e11			- trimming limits

Tabla 42: Bloque de parámetros de datos condicionantes

TRAN block of parameters.

Line				
1	START OF TRAN:			
2	1			-transform the data (0=no, 1=yes)
3	200			-number of quantiles to keep (default=200)
4	0			-number of min/max values
5	0			-number of reference distributions
6	11			- rock type number, primary variable no.
7	data01.dat			- file with ref. Distribution
8	10			- columns for value and weight

Tabla 43: Bloque de parámetros de transformación

TRND block of parameters.

Line				
1	START OF TRND:			
2	0			-consider ordinary kriging (0=no, 1=yes)
3	1			-number of locally varying means
4	11			- rock type number, primary variable no.
5	Lvmfile11.dat			- file with local mean
6	1			- column for value

Tabla 44: Bloque de parámetros de derivas

SECV block of parameters.

Line				
1	START OF SECV:			
2	3			-number of secondary variables to consider
3	secondary.dat			-file 1 with secondary variables
4	123			- columns for values
5	1			-transform secondary variables

Tabla 45: Bloque de parámetros de variables secundarios

ROCK block of parameters.

Line				
1	START OF ROCK:			
2	3			-number of rock types to model
3	123			-the rock types to model
4	rocktype.dat			-file with rock types
5	1			-column for rock type

Tabla 46: Bloque de parámetros de tipo de roca

MULT block of parameters.

Line					
1	START OF MULT:				
2	64				-multivariate option
3	0				-number of classes for stepwise
4	stepwise.dat				-file with transformation data
5	45678910				- columns for variables
6	0				- column for weight
7	1				-rock type for correlation matrix
8	0.87	0.26	0.86	0.46	-matrix: 1-2, 1-3, 1-sec1, 1-sec2
9		0.23	0.83	0.41	- 2-3, 2-sec1, 2-sec2
10			0.31	0.47	- 3-sec1, 3-sec2
11				0.30	- sec1-sec2

Tabla 47: Bloque de parámetros multivariables

## 2 PARÁMETROS MAPAS VARIOGRÁFICOS POR UNIDAD

### 2.1 Unidad 516

The dialog box is divided into two sections: "Variogram Definition" and "Slice Parameters".

**Variogram Definition:**

- Number of Directions: 18
- Number of Lags: 10
- Lag Value: 20 m
- Tolerance on Lags: 1 lags
- Tolerance on Directions: 1 sectors
- Min Nb of Pairs per Cell: 5

**Slice Parameters:**

- Slice Thickness: 10 m
- Reference Point: X = [ ] m, Y = [ ] m, Z = 1 m
- Minimum Lag Value: 0 m

Ilustración 37: Parámetros mapas variográficos unidad 516

### 2.2 Unidad 316

The dialog box is divided into two sections: "Variogram Definition" and "Slice Parameters".

**Variogram Definition:**

- Number of Directions: 18
- Number of Lags: 10
- Lag Value: 30 m
- Tolerance on Lags: 2 lags
- Tolerance on Directions: 2 sectors
- Min Nb of Pairs per Cell: 3

**Slice Parameters:**

- Slice Thickness: 15 m
- Reference Point: X = [ ] m, Y = [ ] m, Z = 1 m
- Minimum Lag Value: 0 m

Ilustración 38: Parámetros mapas variográficos unidad 316

### 2.3 Unidad 17

The dialog box is divided into two sections: Variogram Definition and Slice Parameters. The Variogram Definition section includes: Number of Directions (18), Number of Lags (10), Lag Value (20 m), Tolerance on Lags (1 lags), Tolerance on Directions (1 sectors), and Min Nb of Pairs per Cell (5). The Slice Parameters section includes: Slice Thickness (10 m), Reference Point (X, Y, Z) (all empty), and Minimum Lag Value (0 m).

Parameter	Value	Unit
Number of Directions	18	
Number of Lags	10	
Lag Value	20	m
Tolerance on Lags	1	lags
Tolerance on Directions	1	sectors
Min Nb of Pairs per Cell	5	
Slice Thickness	10	m
Reference Point X		m
Reference Point Y		m
Reference Point Z		m
Minimum Lag Value	0	m

Ilustración 39: Parámetros mapas variográficos unidad 17

### 2.4 Unidad 27

The dialog box is divided into two sections: Variogram Definition and Slice Parameters. The Variogram Definition section includes: Number of Directions (18), Number of Lags (10), Lag Value (30 m), Tolerance on Lags (1 lags), Tolerance on Directions (1 sectors), and Min Nb of Pairs per Cell (3). The Slice Parameters section includes: Slice Thickness (15 m), Reference Point (X, Y, Z) (all empty), and Minimum Lag Value (0 m).

Parameter	Value	Unit
Number of Directions	18	
Number of Lags	10	
Lag Value	30	m
Tolerance on Lags	1	lags
Tolerance on Directions	1	sectors
Min Nb of Pairs per Cell	3	
Slice Thickness	15	m
Reference Point X		m
Reference Point Y		m
Reference Point Z		m
Minimum Lag Value	0	m

Ilustración 40: Parámetros mapas variográficos unidad 27

## 2.5 Unidad 18

The image shows a software dialog box with two sections: "Variogram Definition" and "Slice Parameters". Each parameter is accompanied by a spin button (up and down arrows) and a text input field.

Variogram Definition	
Number of Directions:	18
Number of Lags:	10
Lag Value:	20 m
Tolerance on Lags:	1 lags
Tolerance on Directions:	1 sectors
Min Nb of Pairs per Cell:	5

Slice Parameters	
Slice Thickness:	10 m
Reference Point: X =	m
Y =	m
Z =	m
Minimum Lag Value:	0 m

Ilustración 41: Parámetros mapas variográficos unidad 18

## 2.6 Unidad 28

The image shows a software dialog box with two sections: "Variogram Definition" and "Slice Parameters". Each parameter is accompanied by a spin button (up and down arrows) and a text input field.

Variogram Definition	
Number of Directions:	18
Number of Lags:	10
Lag Value:	20 m
Tolerance on Lags:	1 lags
Tolerance on Directions:	1 sectors
Min Nb of Pairs per Cell:	5

Slice Parameters	
Slice Thickness:	10 m
Reference Point: X =	m
Y =	m
Z =	m
Minimum Lag Value:	0 m

Ilustración 42: Parámetros mapas variográficos unidad 28

### 3 CÓDIGOS FUNCIÓN MULTIVARIABLE

#### 3.1 Función kernel smoothing 3 variables explicativas

```
function [ ley x y u ] = kernel4var( var1, var2, var3, var4, max1, max2, max3,
prec1, prec2, prec3, h1, h2, h3, ha, hb, hc )
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
%Determinar los mínimos de los datos
min1=min(var1);
min2=min(var2);
min3=min(var3);
%crear ejes de la grilla
x=[0 min1:prec1:max1+prec1];
y=[0 min2:prec2:max2+prec2];
u=[0 min3:prec3:max3+prec3];
%calculo la longitud de cada eje
lx=length(x);
ly=length(y);
lu=length(u);
%creo celda de dimensiones lx*ly*lu
z=cell(lx,ly,lu);
w=zeros(lx,ly,lu); %contador de datos en cada celda
for k=1:length(var1)
    for i=1:lx
        for j=1:ly
            for m=1:lu
                %hacer grilla a precision fina SOLAMENTE
                if (x(i)<=var1(k) && x(i)+prec1>var1(k))
                    if (y(j)<=var2(k) && y(j)+prec2>var2(k))
                        if (u(m)<=var3(k) && u(m)+prec3>var3(k))
                            w(i,j,m)=w(i,j,m)+1;
                            v=z{i,j,m};
                            z{i,j,m}=[v var4(k)];
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
%KERNEL SMOOTHING CON CONTORNOS
%aquí se ingresa el ancho de banda que queremos que considere para calcular
hreal1=fix(h1/prec1); %aproxima al entero inferior el ancho de banda real
hreal2=fix(h2/prec2);
hreal3=fix(h3/prec3);
b=0;
ley=zeros(lx,ly,lu); %Crear matriz con leyes rougher finales
for i=1:lx
    for j=1:ly
        for m=1:lu
            % Definir ancho de banda real 1era variable
            if i<=hreal1
                holg1a=i-1;
            else
                holg1a=hreal1;
            end
            if i>lx-hreal1
                holg1b=lx-i;
            else
                holg1b=hreal1;
            end
            % Definir ancho de banda real 2da variable
            if j<hreal2+1
                holg2a=j-1;
```

```

else
    holg2a=hreal2;
end
if j>ly-hreal2
    holg2b=ly-j;
else
    holg2b=hreal2;
end
% Definir ancho de banda real 3da variable
if m<hreal3+1
    holg3a=m-1;
else
    holg3a=hreal3;
end
if m>lu-hreal3
    holg3b=lu-m;
else
    holg3b=hreal3;
end
%if isempty(z{i,j}) %verifica que no haya dato de ley rougher en
ese punto
    for k=i-holg1a:i+holg1b %limites de vecindad móvil
        for l=j-holg2a:j+holg2b
            for n=m-holg3a:m+holg3b
                if ~isempty(z{k,l,n})
                    c=mean(z{k,l,n});
                    kg=1/(2*pi())*exp(-1/2*((x(i)-x(k))^2+(y(j)-
y(l))^2+(u(m)-u(n))^2));
                    ley(i,j,m)=c*kg+ley(i,j,m);%se suma a las leyes
rougher ponderadas por el factor Gaussiano
                    b=b+kg;
                end
            end
        end
    end
    ley(i,j,m)=ley(i,j,m)/b; %se calcula el promedio de la ley
rougher
    b=0;
else
    % ley(i,j)=mean(z{i,j});
end
%Modificar el valor de ley rougher cercana a los bordes
%inferiores
if i<=holg1a||j<=holg2a||m<=holg3a||i>lx-holg1b||j>ly-holg2b||m>lu-
holg3b %Definir cuales son los bordes
    %Determinar 4 puntos para definir hiperplano en una
    %vecindad del punto determinado
    h=1;%Contador de puntos encontrados
    puntos=zeros(4,3);%matriz con 4 columnas(1 por variable) y 4
filas ( 1 por punto)
    for k=i-holg1a:i+holg1b %limites de vecindad móvil
        for l=j-holg2a:j+holg2b
            for n=m-holg3a:m+holg3b
                if ~isempty(z{k,l,n})%verificamos que el punto
tenga datos
                    puntos(h,4)=u(n);%guardamos cufe
                    puntos(h,3)=y(l);%guardamos cufe
                    puntos(h,2)=x(k);%guardamos cucabeza
                    puntos(h,1)=mean(z{k,l,n});%promediamos todos
los valores de ley rougher presente
                    h=h+1; %sumo 1 a los puntos encontrados
                end
            end
        end
    end
    if h==4
        break % salimos del for si se encuentran 4
puntos

```

```

                                end
                            end
                        end
                    end
                if h==4 %solo calculo cuando hay 4 puntos, sino lo dejo como
estaba
                    syms rougher
                    A=[rougher-puntos(1,1),x(i)-puntos(1,2),y(j)-
puntos(1,3),u(m)-puntos(1,4);puntos(2,1)-puntos(1,1),puntos(2,2)-
puntos(1,2),puntos(2,3)-puntos(1,3),puntos(2,4)-puntos(1,4);puntos(3,1)-
puntos(1,1),puntos(3,2)-puntos(1,2),puntos(3,3)-puntos(1,3),puntos(3,4)-
puntos(1,4);puntos(4,1)-puntos(1,1),puntos(4,2)-puntos(1,2),puntos(4,3)-
puntos(1,3),puntos(4,4)-puntos(1,4)];
                    f=det(A);
                    if f~=0
                        ley(i,j,m)=solve([char(f) '=0'],'rougher');
                    end
                end
            end
        end
    end
end
%Rellenar matriz ley en posiciones donde ley=NaN
nan=isnan(ley);%Determinar posiciones donde hay NaN
hreal1=fix(ha/prec1);
hreal2=fix(hb/prec2);
hreal3=fix(hc/prec3);
b=0;
for i=1:lx
    for j=1:ly
        for m=1:lu
            if nan(i,j,m)==1
                %determinar holguras
                % Definir ancho de banda real 1era variable
                if i<=hreal1
                    holg1a=i-1;
                else
                    holg1a=hreal1;
                end
                if i>lx-hreal1
                    holg1b=lx-i;
                else
                    holg1b=hreal1;
                end
                % Definir ancho de banda real 2da variable
                if j<hreal2+1
                    holg2a=j-1;
                else
                    holg2a=hreal2;
                end
                if j>ly-hreal2
                    holg2b=ly-j;
                else
                    holg2b=hreal2;
                end
                % Definir ancho de banda real 3ra variable
                if m<hreal3+1
                    holg3a=m-1;
                else
                    holg3a=hreal3;
                end
                if m>lu-hreal3
                    holg3b=lu-m;
                else
                    holg3b=hreal3;
                end
            end
        end
    end
end

```



```

%kernel smoothing a escala media
%Asignar los máximos del segundo dominio
max11=6;
max22=6;
max33=0.3;
%Dar la precisión por variable
prec11=prec1*6;
prec22=prec2*6;
prec33=prec3*3;
%Definir los anchos de banda por variable
h11=prec11*3;
h22=prec22*3;
h33=prec33*3;
haa=10*prec11;
hbb=10*prec22;
hcc=10*prec33;
[ley1 x1 y1 u1]=kernel4var( var1, var2, var3, var4, max11, max22, max33,
prec11, prec22, prec33, h11, h22, h33, haa, hbb, hcc );
%kernel smoothing a escala mayor
%Asignar los máximos del tercer dominio
max111=max(var1);
max222=max(var2);
max333=max(var3);
%Dar la precisión por variable
prec111=prec11*7;
prec222=prec22*7;
prec333=prec33*7;
%Definir los anchos de banda por variable
h111=prec111*4;
h222=prec222*4;
h333=prec333*4;
haaa=50*prec111;
hbbb=50*prec222;
hccc=50*prec333;
[ley11 x11 y11 u11]=kernel4var( var1, var2, var3, var4, max111, max222, max333,
prec111, prec222, prec333, h111, h222, h333, haaa, hbbb, hccc);
%Graficar las 3 superficies
surf(y,x,ley(:, :, 4));
hold on
surf(y1,x1,ley1(:, :, 4));
hold on
surf(y11,x11,ley11(:, :, 4));
hold on
plot3(var2,var1,var4,'*');
hold off
lx=length(x);
ly=length(y);
lu=length(u);
lx1=length(x1);
ly1=length(y1);
lu1=length(u1);
lx11=length(x11);
ly11=length(y11);
lu11=length(u11);
for a=1:100 %Número de realizaciones para calcular ley rougher
yy=['realizacion' int2str(a) '.txt'];
matriz2=dlmread(yy, '\t', 0, 0);
%Asignar variables sin valores -999 a vectores
cucabeza1=matriz2(:, 4);
cufe1=matriz2(:, 5);
cuox1=matriz2(:, 6);
sin9=find(cucabeza1~=-999&cufe1~=-999&cuox1~=-999);
%Crear vector para guardar valor de ley de Cu rougher suavizada
ley_rougher=zeros(328,1);
ley_rougher(:,1)=-999;

```



```

                                break
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
matriz3(:,1:3)=matriz2(:,1:3);
matriz3(:,4)=leyrougher_parcial(:,1);
matriz3(sinlr1,4)=ley_rougher11(sinlr1,1);
matriz3(nan22,4)=ley_rougher11(nan22,1);
dlmwrite(['ley_rougher_'                                int2str(a)
'.txt'],matriz3,'roffset',6,'coffset',0,'delimiter','\t','precision',8);
end

```

