

Tabla de Contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Motivación del Trabajo	1
1.2.	Objetivos	3
1.2.1.	Objetivo General	3
1.2.2.	Objetivos Específicos	3
2.	Antecedentes	3
2.1.	Antecedentes Generales de la Geoestadística	3
2.2.	Momentos.....	4
2.3.	Variograma.....	6
2.4.	Alcances	6
2.4.1.	Variograma Teórico	7
2.4.2.	Variograma Experimental	7
2.4.3.	Variograma Generalizado.....	7
2.4.3.1.	Relación entre Variograma Generalizado y Covarianza Generalizada	10
2.5.	Modelamiento de Variograma Experimental	10
2.5.1.	Efecto Pepita	10
2.5.2.	Modelo Esférico	11
2.5.3.	Modelo Exponencial	12
2.5.4.	Modelo Gaussiano.....	12
2.6.	Kriging	13
2.6.1.	Kriging Simple	14
2.6.2.	Kriging Ordinario.....	15
2.6.3.	Kriging Universal.....	16
3.	Metodología	18
3.1.	Programación en Matlab	18
3.2.	Caso de Estudio 1: Base de Datos Sintéticos	18
3.3.	Caso de Estudio 2: Base de datos reales.....	18
4.	Desarrollo.....	20
4.1.	Programación en Matlab	20
4.1.1.	Programa Variograma Experimental Generalizado (VEG).....	20
4.1.2.	Programa Variograma Generalizado Modelado.....	20
4.2.	Caso de Estudio 1: Base de Datos Sintéticos	21

4.2.1.	Muestreo de Datos Sintéticos	22
4.2.2.	Cálculo de Variograma Experimental Tradicional y Generalizado en Yacimientos Sintéticos	23
4.3.	Caso de Estudio 2: Base de datos Reales	23
5.	Resultados y análisis	27
5.1.	Caso Sintético.....	27
5.2.	Caso Real	30
5.2.1.	Variografía	30
5.2.1.1.	Variograma Tradicional Experimental y Modelado.....	31
5.2.1.2.	Variograma Generalizado.....	33
5.2.2.	Estimación y Validación Cruzada.....	35
5.2.2.1.	Kriging Universal.....	36
5.2.2.2.	Kriging Ordinario.....	46
5.2.3.	Análisis de Resultados	56
6.	Conclusiones	58
7.	Bibliografía	59
8.	Anexos.....	60
8.1.	Programas.....	60
8.1.1.	Programa Variograma Experimental Generalizado.....	60
8.1.2.	Programa Variograma Modelado Generalizado.....	61
8.2.	Estadísticas Básicas.....	62
8.2.1.	Yacimientos Sintéticos.....	62
8.2.2.	Yacimiento Real.....	64

Índice de Tablas

Tabla 1. Estadísticas básicas del muestreo del promedio de las 100 simulaciones.....	23
Tabla 2. Estadísticas básicas de cobre total en yacimiento real.	24
Tabla 3. Estadísticas básicas de solubilidad de cobre en yacimiento real.....	25
Tabla 4. Estructuras en modelamiento de variograma experimental promedio de las 100 simulaciones.	27
Tabla 5. Estructuras en modelamiento del variograma experimental generalizado del promedio de las 100 simulaciones.	28
Tabla 6. Estructuras usadas para modelación del variograma experimental de la ley de cobre total.....	31
Tabla 7. Estructuras usadas para modelación del variograma experimental tradicional para la solubilidad.	32
Tabla 8. Estructuras usadas para modelación del variograma experimental generalizado de la ley de cobre total.....	33
Tabla 9. Estructuras usadas para modelación del variograma experimental generalizado de la solubilidad.	34
Tabla 10. Coordenadas de grilla para kriging.	35
Tabla 11. Parámetros vecindad móvil para kriging (en metros).	35
Tabla 12. Parámetros toma de datos en vecindad móvil en kriging.....	35
Tabla 13. Resultados de validación cruzada para kriging universal con el variograma tradicional.....	36
Tabla 14. Estadística básica de mejor estimación de CuT en kriging universal con variograma tradicional.	37
Tabla 15. Estadística básica de mejor estimación de solubilidad de cobre en kriging universal con variograma tradicional.....	39
Tabla 16. Resultados de validación cruzada para kriging universal con el variograma generalizado.	41
Tabla 17.. Estadística básica de mejor estimación de CuT en kriging universal con variograma generalizado.	42
Tabla 18. Estadística básica de mejor estimación de solubilidad en kriging universal con variograma generalizado.	44
Tabla 19. Resultados de validación cruzada para kriging ordinario con variograma tradicional.....	46
Tabla 20. Estadística básica de mejor estimación de CuT en kriging ordinario con variograma tradicional.	47
Tabla 21. Estadística básica de mejor estimación de solubilidad en kriging ordinario con variograma tradicional.....	49
Tabla 22. Estadística básica de mejor estimación de CuT en kriging ordinario con variograma generalizado.	52
Tabla 23. Estadística básica de mejor estimación de solubilidad en kriging ordinario con variograma generalizado.	54
Tabla 24. Resultados condensados de mejores estimaciones de CuT en caso real.	56
Tabla 25. Resultados condensados de mejores estimaciones de solubilidad en caso real.....	56
Tabla 26. Valores extremos de CuT y Solubilidad, y tonelaje de mineral en estimaciones.....	56
Tabla 27. Estadísticas de base de datos CuT en las coordenadas elegidas para estimación.	70
Tabla 28. Estadísticas de base de datos de solubilidad en las coordenadas elegidas para estimación.	70

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Cálculo de variograma experimental.....	9
Ilustración 2. Cálculo de variograma experimental generalizado.....	9
Ilustración 3. Demostración de yacimiento con efecto pepita.....	11
Ilustración 4. Demostración de yacimiento con modelo esférico.....	11
Ilustración 5. Demostración de yacimiento con modelo exponencial.....	12
Ilustración 6. Demostración de yacimiento con modelo gaussiano.	12
Ilustración 7. Descomposición de variable en kriging universal.....	16
Ilustración 8. Vista 2D de promedio de las 100 simulaciones.	21
Ilustración 9. Histograma de los promedios de las 100 simulaciones.....	22
Ilustración 10. Muestreo de yacimientos sintéticos.....	22
Ilustración 11. Vista isométrica de la ley de cobre total en yacimiento cuprífero.	24
Ilustración 12. Histograma de ley de cobre total en yacimiento cuprífero.....	25
Ilustración 13. Vista isométrica de solubilidad de cobre en yacimiento cuprífero.....	26
Ilustración 14. Histograma de solubilidad de cobre en yacimiento cuprífero.	26
Ilustración 15. Variograma promedio experimental de las 100 simulaciones.....	27
Ilustración 16. Variograma promedio generalizado de las 100 simulaciones.	28
Ilustración 17. Modelo del variograma experimental tradicional en contraste con el variograma real de los yacimientos sintéticos.	29
Ilustración 18. Modelo del variograma experimental generalizado en contraste con variograma generalizado real.	29
Ilustración 19. Modelo del variograma experimental tradicional para la ley de cobre total.	31
Ilustración 20. Variograma modelado del variograma experimental tradicional para la solubilidad.....	32
Ilustración 21. Modelo del variograma experimental generalizado para la ley de cobre total.....	33
Ilustración 22. Modelo del variograma experimental generalizado para la solubilidad.....	34
Ilustración 23. Scatterplot a1d3 de la ley estimada v/s ley real de CuT en kriging universal con variograma tradicional.....	37
Ilustración 24. Histograma a1d3 de CuT estimado del kriging universal con variograma tradicional.	37
Ilustración 25. Boxplot a1d3 de CuT estimado del kriging universal con variograma tradicional.....	38
Ilustración 26. Ley media v/s ley de corte CuT y fracción de tonelaje de cobre fino vs ley de corte CuT para a1d3 del kriging universal con variograma tradicional.	38
Ilustración 27. Scatterplot a1d2 de solubilidad estimada v/s solubilidad real en kriging universal con variograma tradicional.....	39
Ilustración 28. Histograma a1d2 de solubilidad de cobre del kriging universal con variograma tradicional.	39
Ilustración 29. Boxplot a1d2 de solubilidad de cobre del kriging universal con variograma tradicional. ...	40
Ilustración 30. Scatterplot a1d3 de la ley estimada v/s ley real de CuT en kriging universal con variograma generalizado.	42
Ilustración 31. Histograma a1d3 estimado de CuT del kriging universal con variograma generalizado.	42
Ilustración 32. Boxplot a1d3 de CuT estimado del kriging universal con variograma generalizado.....	43
Ilustración 33. Ley media v/s ley de corte CuT y fracción de tonelaje de cobre fino vs ley de corte CuT para a1d3 del kriging universal con variograma generalizado.....	43

Ilustración 34. Scatterplot a1d2 estimado de solubilidad estimada v/s solubilidad real en kriging universal con variograma generalizado.	44
Ilustración 35. Histograma a1d2 estimado de solubilidad de Cobre del kriging universal con variograma generalizado.	44
Ilustración 36. Boxplot a1d2 estimado de solubilidad de cobre del kriging universal con variograma generalizado.	45
Ilustración 37. Scatterplot a1d3 de la ley estimada v/s ley real de CuT en kriging ordinario con variograma tradicional.	47
Ilustración 38. Histograma a1d3 estimado de CuT del kriging ordinario con variograma tradicional.	47
Ilustración 39. Boxplot a1d3 estimado de CuT del kriging ordinario con variograma tradicional.	48
Ilustración 40. Ley media v/s ley de corte CuT y fracción de tonelaje de cobre fino vs ley de corte CuT para a1d3 del kriging ordinario con variograma tradicional.	48
Ilustración 41. Scatterplot a1d3 de solubilidad estimada v/s solubilidad real en kriging ordinario con variograma tradicional.	49
Ilustración 42. Histograma a1d3 estimado de solubilidad de cobre del kriging ordinario con variograma tradicional.	49
Ilustración 43. Boxplot a1d3 estimado de solubilidad de cobre del kriging ordinario con variograma tradicional.	50
Ilustración 44. Resultados de validación cruzada para kriging ordinario con variograma tradicional.	51
Ilustración 45. Scatterplot a1d3 de la ley estimada v/s ley real de CuT en kriging ordinario con variograma generalizado.	51
Ilustración 46. Histograma a1d3 de CuT del kriging ordinario con variograma generalizado.	52
Ilustración 47. Ley media v/s Ley de corte CuT y fracción de tonelaje de cobre fino vs ley de corte CuT para a1d3 del kriging ordinario con variograma generalizado.	53
Ilustración 48. Histograma a1d3 de solubilidad de cobre del kriging ordinario con variograma generalizado.	54
Ilustración 49. Boxplot a1d3 de solubilidad de cobre del kriging ordinario con variograma generalizado.	55
Ilustración 50. Diagrama de Caja de Cu del Promedio del Muestreo de las 100 realizaciones.	62
Ilustración 51. Histograma acumulativo del Cu del promedio de Muestreo de las 100 realizaciones.	62
Ilustración 52. Promedio de ley de Cu v/s ley de corte del promedio del muestreo de las 100 realizaciones.	63
Ilustración 53. Tonelaje v/s ley de corte del promedio del muestreo de las 100 realizaciones.	63
Ilustración 54. Vista Norte-Este de cobre total en yacimiento cuprífero.	64
Ilustración 55. Vista Este-Elevación de cobre total en yacimiento cuprífero.	64
Ilustración 56. Vista Norte-Elevación de cobre total en yacimiento cuprífero.	64
Ilustración 57. Regresión condicional (deriva) entre los datos de CuT y las coordenadas Norte a), Este b) y la Elevación Z c).	65
Ilustración 58. Diagrama de caja del CuT del yacimiento cuprífero.	66
Ilustración 59. Histograma acumulado del CuT del yacimiento cuprífero.	66
Ilustración 60. Ley media v/s ley de corte del CuT del yacimiento cuprífero.	66
Ilustración 61. Tonelaje v/s ley de corte del CuT del yacimiento cuprífero.	67
Ilustración 62. Vista Norte-Este de solubilidad de cobre en yacimiento cuprífero.	67
Ilustración 63. Vista Elevación-Este de solubilidad de cobre en yacimiento cuprífero.	67
Ilustración 64. Vista Elevación-Norte de solubilidad de cobre en yacimiento cuprífero.	68

Ilustración 65. Regresión condicional (deriva) entre los datos de solubilidad y las coordenadas al Norte a), Este b) y Elevación Z c).....	68
Ilustración 66. Diagrama de cajas de la solubilidad de cobre del yacimiento cuprífero.	69
Ilustración 67. Histograma acumulativo de la solubilidad de cobre del yacimiento cuprífero.	69
Ilustración 68. Histograma de base de datos de CuT en las coordenadas elegidas para estimación.	70
Ilustración 69. Histograma de base de datos de solubilidad en las coordenadas elegidas para estimación .	71

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Variograma teórico general.....	1
Ecuación 2: Variograma teórico con media constante.....	2
Ecuación 3: Variograma experimental.....	2
Ecuación 4: Esperanza	4
Ecuación 5: Varianza.....	5
Ecuación 6: Covarianza.....	5
Ecuación 7: Correlograma	5
Ecuación 8: Variograma.....	5
Ecuación 9: Relación de variograma y covarianza en estacionaridad.....	5
Ecuación 10: Variograma generalizado de orden K	7
Ecuación 11: Variograma generalizado general de orden 1	7
Ecuación 12: Variograma generalizado simplificado de orden 1	8
Ecuación 13: Relación entre el variograma generalizado teórico y el variograma teórico.	8
Ecuación 14: Variograma experimental generalizado	8
Ecuación 15: Relación variograma generalizado con covarianza generalizada	10
Ecuación 16: Modelo de efecto pepita	10
Ecuación 17: Modelo esférico.....	11
Ecuación 18: Modelo exponencial	12
Ecuación 19: Modelo gaussiano.....	12
Ecuación 20: Restricción de linealidad del kriging	13
Ecuación 21: Restricción de insesgo en kriging	14
Ecuación 22: Restricción de optimalidad del kriging	14
Ecuación 23: Expresión para el estimador lineal del kriging simple	14
Ecuación 24: Expresión para la varianza del kriging simple	15
Ecuación 25: Expresión para el estimador lineal del kriging ordinario	15
Ecuación 26: Expresión para la varianza del kriging ordinario.....	15
Ecuación 27: Expresión para el estimador lineal del kriging universal	17
Ecuación 28: Expresión para la varianza del kriging universal	17