

Contenidos

| | |
|---|------|
| RESUMEN | ii |
| ABSTRACT | iii |
| AGRADECIMIENTOS | iv |
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | ix |
| ÍNDICE DE TABLAS | xvii |
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Descripción del problema..... | 1 |
| 1.2 Objetivo general..... | 3 |
| 1.3 Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.4 Alcances..... | 3 |
| CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO | 4 |
| 2.1 Contaminación de suelos en minería | 4 |
| 2.2 Drenaje ácido de minas | 5 |
| 2.2.1 Fuentes potencialmente generadoras de drenaje ácido minero..... | 5 |
| 2.2.2 Formación del drenaje ácido de minas..... | 6 |
| 2.2.3 Minerales y elementos asociados al drenaje ácido minero..... | 8 |
| 2.2.4 Consecuencias del drenaje ácido minero..... | 9 |
| 2.2.5 Predicción de drenaje ácido minero..... | 11 |
| 2.3 Legislación ambiental | 12 |
| 2.4 Métodos de estimación | 14 |
| 2.5 Método determinista | 14 |
| 2.6 Geoestadística | 15 |
| 2.6.1 Etapas claves en un estudio de contaminación..... | 16 |
| 2.6.1.1 Información básica y selección de variables..... | 16 |
| 2.6.1.2 Análisis exploratorio de datos..... | 17 |
| 2.6.1.3 Análisis estructural y cálculo..... | 20 |
| 2.6.1.3.1 Variograma..... | 20 |
| 2.6.1.3.1.1 Variograma experimental..... | 21 |
| 2.6.1.3.1.2 Variograma modelado..... | 21 |
| 2.6.1.3.1.2.1 Efecto pepita..... | 23 |
| 2.6.1.3.1.2.2 Modelo esférico..... | 23 |

| | |
|--|-----------|
| 2.6.1.3.1.2.3 Modelo exponencial | 24 |
| 2.6.1.3.1.2.4 Modelo gaussiano..... | 25 |
| 2.6.1.3.1.2.5 Modelo anidados | 25 |
| 2.6.1.3.2 Comportamiento direccional | 26 |
| 2.6.1.4 Selección del método | 27 |
| 2.6.1.4.1 Kriging | 27 |
| 2.6.1.4.2 Kriging simple..... | 27 |
| 2.6.1.4.3 Kriging ordinario..... | 29 |
| 2.6.1.4.4 Kriging de indicadores | 31 |
| 2.6.1.4.5 Validación del kriging..... | 31 |
| 2.6.1.4.6 Simulación condicional gaussiana | 31 |
| 2.6.1.5 Interpretación de los resultados | 32 |
| 2.7 Machine learning..... | 32 |
| 2.7.1 Aprendizaje supervisado..... | 33 |
| 2.7.1.2 Redes neuronales artificiales..... | 33 |
| 2.7.1.2.1 Función de activación..... | 34 |
| 2.7.1.2.2 Entrenar redes neuronales | 35 |
| 2.7.2 Evaluación de modelos supervisados | 36 |
| 2.7.3 Aprendizaje no supervisado..... | 37 |
| CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA..... | 38 |
| CAPÍTULO 4: DESARROLLO | 41 |
| 4.1 Caso estudio | 41 |
| 4.2 Análisis exploratorio de datos | 41 |
| 4.2.1 Análisis bivariado | 48 |
| 4.3 Selección del método de estimación | 48 |
| 4.4 Variogramas | 50 |
| 4.5 Construcción de modelo machine learning | 54 |
| CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 57 |
| 5.1 Estimación kriging ordinario..... | 57 |
| 5.2 Estimación kriging de indicadores | 63 |
| 5.3 Estimación simulaciones condicionales gaussianas | 65 |
| 5.4 Zonas contaminadas métodos geoestadísticos | 67 |

| | |
|---|------------|
| 5.4.1 Superficies de contaminación..... | 72 |
| 5.5 Estimación machine learning | 76 |
| 5.5.1 Estimación variables continuas | 77 |
| 5.5.2 Estimación variables categóricas..... | 84 |
| 5.6 Zonas contaminadas método machine learning | 95 |
| 5.6.1 Superficies de contaminación..... | 103 |
| 5.7 Comparación modelos..... | 107 |
| Conclusión..... | 113 |
| Referencias bibliográficas..... | 117 |
| Apéndice A: Análisis exploratorio de datos inicial..... | 122 |
| Apéndice B: Variogramas | 127 |
| Apéndice C: Análisis exploratorio de estimaciones geoestadísticas..... | 137 |
| Apéndice D: Análisis exploratorio de estimaciones machine learning..... | 142 |
| Apéndice E: Estimación geoestadística..... | 151 |
| Apéndice F: Estimación machine learning..... | 162 |
| Apéndice G: Entrenamiento y prueba modelos machine learning | 163 |
| Apéndice H: Zonas contaminadas métodos geoestadísticos | 174 |
| Apéndice I: Zonas contaminadas método machine learning..... | 176 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| Ilustración 1: Etapas en la generación de DAM, según la oxidación de la pirita (SERNAGEOMIN,2015). | 8 |
| Ilustración 2: Diagrama resumen para implementación del proceso geoestadístico (Cely et al.,2002). | 16 |
| Ilustración 3: Esquema de muestreo sistemático regular (izquierda) y muestreo aleatorio (derecha) (Godoy,2017). | 17 |
| Ilustración 4: Representación gráfica del histograma (Godoy,2017). | 18 |
| Ilustración 5: Ejemplo de un gráfico de cajas y bigotes (Godoy,2017). | 19 |
| Ilustración 6: Ejemplo de gráfico Q-Q normal (Godoy,2017). | 19 |
| Ilustración 7: Ejemplo de diagrama de dispersión (Emery,2007). | 20 |
| Ilustración 8: Parámetros del variograma (Giraldo,s/f). | 22 |
| Ilustración 9: Modelo de variograma teórico para variable sin correlación espacial (Emery,2007). | 23 |
| Ilustración 10: Variograma esférico (Emery,2007). | 24 |
| Ilustración 11: Variograma exponencial (Emery,2007). | 24 |
| Ilustración 12: Variograma gaussiano (Emery,2007). | 25 |
| Ilustración 13: Variograma anidado obtenido por suma de efecto pepita y dos modelos esféricos (Emery,2007). | 26 |
| Ilustración 14: Variogramas calculado en diferentes direcciones (Alfaro,2007). | 26 |
| Ilustración 15: Anisotropía geométrica (izquierda) y anisotropía zonal (derecha) (Emery,2007). | 27 |
| Ilustración 16: Ejemplo red neuronal totalmente conectada (Matich,2001). | 34 |
| Ilustración 17: Función sigmoide (Rodríguez-Sahagún,2018). | 35 |
| Ilustración 18: Función tangente hiperbólica (Rodríguez-Sahagún,2018). | 35 |
| Ilustración 19: Muestreo en área de estudio (Elaboración propia). | 42 |
| Ilustración 20: Distribución espacial HC (Elaboración propia). | 43 |
| Ilustración 21: Distribución espacial Ni (Elaboración propia). | 43 |
| Ilustración 22: Histograma HC (Elaboración propia). | 45 |
| Ilustración 23: Histograma Ni (Elaboración propia). | 46 |
| Ilustración 24: Diagrama de cajas y bigotes HC (Elaboración propia). | 47 |
| Ilustración 25: Diagrama de cajas y bigotes Ni (Elaboración propia). | 47 |
| Ilustración 26: Diagrama de dispersión HC vs espesor (Elaboración propia). | 48 |
| Ilustración 27: Diagrama de dispersión Ni vs espesor (Elaboración propia). | 48 |
| Ilustración 28: Variograma experimental 45° HC (Elaboración propia). | 52 |
| Ilustración 29: Variograma experimental 135° HC (Elaboración propia). | 52 |
| Ilustración 30: Variograma modelado 45° HC (Elaboración propia). | 53 |
| Ilustración 31: Variograma modelado 135° HC (Elaboración propia). | 53 |
| Ilustración 32: Diagrama modelo red neuronal Orange Canvas (Elaboración propia). | 56 |
| Ilustración 33: Estimación kriging ordinario HC para bloques 2x2. | 57 |
| Ilustración 34: Estimación kriging ordinario HC, caso sin datos atípicos bloques 2x2 (Elaboración propia). | 58 |
| Ilustración 35: Estimación kriging ordinario HC, caso sin datos atípicos bloques 10x10 (Elaboración propia). | 59 |
| Ilustración 36: Varianza kriging ordinario HC, caso sin datos atípicos bloques 2x2 (Elaboración propia). | 60 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 37: Varianza kriging ordinario HC, caso sin datos atípicos bloques 10x10 (Elaboración propia). | 60 |
| Ilustración 38: Histograma de estimación kriging ordinario HC, caso sin datos atípicos bloques 2x2 | 61 |
| Ilustración 39: Estimación kriging ordinario Ni bloques 2x2 (Elaboración propia). | 62 |
| Ilustración 40: Varianza kriging ordinario Ni bloques 2x2 (Elaboración propia). | 63 |
| Ilustración 41: Estimación kriging de indicadores HC bloques 2x2 (Elaboración propia). | 64 |
| Ilustración 42: Estimación kriging de indicadores Ni bloques 2x2 (Elaboración propia). | 65 |
| Ilustración 43: Estimación simulación condicional gaussiana HC bloques 2x2 (Elaboración propia). | 66 |
| Ilustración 44: Zonas que superan criterio de contaminación establecido, caso sin datos atípicos HC bloques 2x2 (Elaboración propia). | 68 |
| Ilustración 45: Zonas que superan criterio de contaminación establecido, kriging ordinario Ni bloques 2x2 (Elaboración propia). | 68 |
| Ilustración 46: Zona con bajo riesgo de contaminación, kriging de indicadores HC (Elaboración propia). | 69 |
| Ilustración 47: Zonas con alto riesgo de contaminación, kriging de indicadores HC (Elaboración propia). | 70 |
| Ilustración 48: Zonas de incertidumbre, kriging de indicadores HC (Elaboración propia). | 70 |
| Ilustración 49: Zonas con bajo riesgo de contaminación, simulaciones condicionales HC (Elaboración propia). | 71 |
| Ilustración 50: Zonas con alto riesgo de contaminación, simulaciones condicionales HC (Elaboración propia). | 71 |
| Ilustración 51: Zonas de incertidumbre, simulaciones condicionales HC (Elaboración propia). | 72 |
| Ilustración 52: Superficie de contaminación en percentiles (Elaboración propia). | 76 |
| Ilustración 53: Estimación modelo NN 100_200, variables continuas HC (Elaboración propia). | 79 |
| Ilustración 54: Estimación modelo NN 1000_200, variables continuas HC (Elaboración propia). | 80 |
| Ilustración 55: Estimación modelo NN 100_2000, variables continuas HC (Elaboración propia). | 80 |
| Ilustración 56: Estimación modelo NN 1000_2000, variables continuas HC (Elaboración propia). | 81 |
| Ilustración 57: Estimación modelo NN 100_2000, variables continuas Ni (Elaboración propia). | 83 |
| Ilustración 58: Estimación modelo NN 1000_2000, variables continuas Ni (Elaboración propia). | 83 |
| Ilustración 59: Estimación modelo NN 100_2000, variables categóricas HC (Elaboración propia). | 84 |
| Ilustración 60: Estimación modelo NN 1000_2000, variables categóricas HC (Elaboración propia). | 85 |
| Ilustración 61: Estimación modelo NN 100_2000, variables categóricas Ni (Elaboración propia). | 86 |
| Ilustración 62: Estimación modelo NN 1000_2000, variables categóricas Ni (Elaboración propia). | 86 |
| Ilustración 63: Zona de estudio con nuevos puntos agregados (Google earth, 2020). | 87 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración 64: Estimación modelo NN 100_2000 HC caso 210 muestras (Elaboración propia). | 88 |
| Ilustración 65: Estimación modelo NN 1000_2000 HC caso 210 muestras (Elaboración propia). | 88 |
| Ilustración 66: Sesgos hacia las muestras de HC (Elaboración propia). | 89 |
| Ilustración 67: Muestras de entrenamiento con grilla (Elaboración propia). | 90 |
| Ilustración 68: Muestras de prueba con grilla (Elaboración propia). | 91 |
| Ilustración 69: Distribución espacial muestras con grilla (Elaboración propia). | 92 |
| Ilustración 70: Estimación modelo NN 100_2000, caso HC muestreado con grilla (Elaboración propia). | 92 |
| Ilustración 71: Estimación modelo NN 1000_2000, caso HC muestreado con grilla (Elaboración propia). | 93 |
| Ilustración 72: Estimación variable continua modelo NN 1000_2000 HC con distancia entre puntos | 94 |
| Ilustración 73: Estimación variable categórica modelo NN 1000_2000 HC muestreado con grilla y distancia entre puntos (Elaboración propia). | 94 |
| Ilustración 74: Zonas que superan criterio de contaminación establecido modelo NN 1000_2000 HC | 95 |
| Ilustración 75: Zonas que superan criterio de contaminación establecido modelo NN 1000_2000 Ni | 96 |
| Ilustración 76: Zonas que superan criterio de contaminación establecido modelo NN 1000_2000 HC con distancia entre puntos (Elaboración propia) | 96 |
| Ilustración 77: Zonas con bajo riesgo de contaminación modelo NN 1000_2000 HC (Elaboración propia). | 97 |
| Ilustración 78: Zonas con alto riesgo de contaminación modelo NN 1000_2000 HC (Elaboración propia). | 97 |
| Ilustración 79: Zonas de incertidumbre modelo NN 1000_2000 HC (Elaboración propia). | 98 |
| Ilustración 80: Zonas con bajo riesgo de contaminación modelo NN 1000_2000 HC caso 210 muestras (Elaboración propia). | 98 |
| Ilustración 81: Zonas con alto riesgo de contaminación modelo NN 1000_2000 HC caso 210 muestras | 99 |
| Ilustración 82: Zonas de incertidumbre modelo NN 1000_2000 HC caso 210 muestras (Elaboración propia). | 99 |
| Ilustración 83: Zonas con bajo riesgo de contaminación modelo NN 1000_2000, caso HC muestreado con grilla (Elaboración propia). | 100 |
| Ilustración 84: Zonas con alto riesgo de contaminación modelo NN 1000_2000, caso HC muestreado con grilla (Elaboración propia). | 100 |
| Ilustración 85: Zonas de incertidumbre modelo NN 1000_2000, caso HC muestreado con grilla | 101 |
| Ilustración 86: Zonas con bajo riesgo de contaminación modelo NN 1000_2000, caso HC muestreado con grilla con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 101 |
| Ilustración 87: Zonas con alto riesgo de contaminación modelo NN 1000_2000, caso HC muestreado con grilla con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 102 |
| Ilustración 88: Zonas de incertidumbre modelo NN 1000_2000, caso HC muestreado con grilla con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 102 |
| Ilustración 89: Estimación geoestadística (izquierda) vs estimación machine learning con distancia entre puntos (derecha) usando variables continuas (Elaboración propia). | 107 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración 90: Histograma de estimación geoestadística con 80% de datos, caso sin datos atípicos HC (Elaboración propia). | 108 |
| Ilustración 91: Histograma de estimación machine learning, caso sin datos atípicos HC (Elaboración propia). | 108 |
| Ilustración 92: Estimación geoestadística (izquierda) vs estimación machine learning con distancia entre puntos (derecha) usando variables categóricas (Elaboración propia). | 110 |
| Ilustración 93: Histograma de estimación geoestadístico, probabilidad de superar criterio HC | 111 |
| Ilustración 94: Histograma de estimación machine learning, probabilidad de superar criterio HC | 111 |
| Ilustración A. 1: Histograma espesor de la muestra (Elaboración propia). | 122 |
| Ilustración A. 2: Histograma HC caso kriging de indicadores (Elaboración propia). | 123 |
| Ilustración A. 3: Histograma Ni caso kriging de indicadores (Elaboración propia). | 124 |
| Ilustración A. 4: Histograma HC caso simulaciones condicionales gaussianas (Elaboración propia). | 125 |
| Ilustración A. 5: Histograma HC caso sin datos atípicos (Elaboración propia). | 126 |
| Ilustración A. 6: Histograma HC caso sin datos atípicos (Elaboración propia). | 127 |
| Ilustración B. 1: Variograma experimental 45° Ni (Elaboración propia). | 127 |
| Ilustración B. 2: Variograma experimental 135° Ni (Elaboración propia). | 128 |
| Ilustración B. 3: Variograma modelado 45° Ni (Elaboración propia). | 128 |
| Ilustración B. 4: Variograma modelado 135° Ni (Elaboración propia). | 129 |
| Ilustración B. 5: Variograma experimental omnidireccional espesor (Elaboración propia). | 129 |
| Ilustración B. 6: Variograma modelado omnidireccional espesor (Elaboración propia). | 130 |
| Ilustración B. 7: Variograma experimental 45° HC caso kriging de indicadores (Elaboración propia). | 130 |
| Ilustración B. 8: Variograma experimental 135° HC caso kriging de indicadores (Elaboración propia). | 131 |
| Ilustración B. 9: Variograma modelado 45° HC caso kriging de indicadores (Elaboración propia). | 131 |
| Ilustración B. 10: Variograma modelado 135° HC caso kriging de indicadores (Elaboración propia). | 132 |
| Ilustración B. 11: Variograma experimental 45° Ni caso kriging de indicadores (Elaboración propia). | 132 |
| Ilustración B. 12: Variograma experimental 135° Ni caso kriging de indicadores (Elaboración propia). | 132 |
| Ilustración B. 13: Variograma modelado 45° Ni caso kriging de indicadores (Elaboración propia). | 133 |
| Ilustración B. 14: Variograma modelado 135° Ni caso kriging de indicadores (Elaboración propia). | 133 |
| Ilustración B. 15: Variograma experimental 45° HC caso simulaciones condicionales gaussianas | 134 |
| Ilustración B. 16: Variograma experimental 135° HC caso simulaciones condicionales gaussianas | 134 |
| Ilustración B. 17: Variograma modelado 45° HC caso simulaciones condicionales gaussianas | 135 |
| Ilustración B. 18: Variograma modelado 135° HC caso simulaciones condicionales gaussianas | 135 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración B. 19: Variograma experimental 45° HC caso sin datos atípicos (Elaboración propia). | 136 |
| Ilustración B. 20: Variograma experimental 135° HC caso sin datos atípicos (Elaboración propia). | 136 |
| Ilustración B. 21: Variograma modelado 45° HC caso sin datos atípicos (Elaboración propia). | 137 |
| Ilustración B. 22: Variograma modelado 135° HC caso sin datos atípicos (Elaboración propia). | 137 |
| Ilustración C. 1: Histograma de estimación kriging ordinario HC caso sin datos atípicos bloques 10x10 (Elaboración propia). | 138 |
| Ilustración C. 2: Histograma de estimación kriging ordinario Ni bloques 2x2 (Elaboración propia). | 138 |
| Ilustración C. 3: Histograma de estimación kriging ordinario Ni bloques 10x10 (Elaboración propia). | 139 |
| Ilustración C. 4: Histograma de estimación kriging ordinario espesor bloques 2x2 (Elaboración propia). | 139 |
| Ilustración C. 5: Histograma de estimación kriging ordinario espesor bloques 10x10 (Elaboración propia). | 140 |
| Ilustración C. 6: Histograma de estimación kriging de indicadores HC bloques 2x2 (Elaboración propia). | 140 |
| Ilustración C. 7: Histograma de estimación kriging de indicadores Ni bloques 2x2 (Elaboración propia). | 141 |
| Ilustración C. 8: Histograma de probabilidad de superar criterio HC bloques 2x2 (Elaboración propia). | 141 |
| Ilustración C. 9: Histograma de estimación concentración media de simulaciones realizadas HC bloques 2x2 (Elaboración propia). | 142 |
| Ilustración D. 1: Histograma de estimación modelo NN 100_200 HC variable continua (Elaboración propia). | 142 |
| Ilustración D. 2: Histograma de estimación Modelo NN 1000_200 HC variable continua (Elaboración propia). | 143 |
| Ilustración D. 3: Histograma de estimación Modelo NN 100_2000 HC variable continua (Elaboración propia). | 143 |
| Ilustración D. 4: Histograma de estimación Modelo NN 100_2000 HC variable continua (Elaboración propia). | 143 |
| Ilustración D. 5: Histograma de estimación Modelo NN 100_2000 Ni variable continua (Elaboración propia). | 144 |
| Ilustración D. 6: Histograma de estimación Modelo NN 1000_2000 Ni variable continua (Elaboración propia). | 144 |
| Ilustración D. 7: Histograma de estimación Modelo NN 100_2000 HC variable categórica (Elaboración propia). | 145 |
| Ilustración D. 8: Histograma de estimación Modelo NN 1000_2000 HC variable categórica (Elaboración propia). | 145 |
| Ilustración D. 9: Histograma de estimación Modelo NN 100_2000 Ni variable categórica (Elaboración propia). | 146 |
| Ilustración D. 10: Histograma de estimación Modelo NN 1000_2000 Ni variable categórica (Elaboración propia). | 146 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración D. 11: Histograma de estimación Modelo NN 100_2000 caso HC 210 muestras (Elaboración propia)..... | 147 |
| Ilustración D. 12: Histograma de estimación Modelo NN 1000_2000 caso HC 210 muestras (Elaboración propia)..... | 147 |
| Ilustración D. 13: Histograma de estimación Modelo NN 100_2000 caso HC muestreado con grilla | 148 |
| Ilustración D. 14: Histograma de estimación Modelo NN 1000_2000 caso HC muestreado con grilla | 148 |
| Ilustración D. 15: Histograma de estimación Modelo NN 1000_2000 variable continua, caso HC distancia entre muestras (Elaboración propia). | 149 |
| Ilustración D. 16: Histograma de estimación Modelo NN 1000_2000 variable continua, caso Ni distancia entre muestras (Elaboración propia). | 149 |
| Ilustración D. 18: Histograma de estimación Modelo NN 1000_2000 variable categórica, caso Ni distancia entre muestras (Elaboración propia). | 149 |
| Ilustración D. 19: Histograma de estimación Modelo NN 1000_2000 variable categórica, caso HC 210 muestras y distancia entre muestras (Elaboración propia). | 150 |
| Ilustración D. 20: Histograma de estimación Modelo NN 1000_2000 variable categórica, caso HC muestreado con grilla y distancia entre muestras (Elaboración propia)..... | 150 |
| Ilustración E. 1: Estimación kriging ordinario Ni bloques 10x10 (Elaboración propia)..... | 151 |
| Ilustración E. 2: Varianza kriging ordinario Ni bloques 10x10 (Elaboración propia)..... | 151 |
| Ilustración E. 3: Estimación kriging ordinario espesor bloques 2x2 (Elaboración propia). | 152 |
| Ilustración E. 4: Varianza kriging ordinario espesor bloques 2x2 (Elaboración propia)..... | 152 |
| Ilustración E. 5: Estimación kriging ordinario espesor bloques 10x10 (Elaboración propia). .. | 152 |
| Ilustración E. 6: Varianza kriging ordinario espesor bloques 10x10 (Elaboración propia)..... | 153 |
| Ilustración E. 7: Simulación condicional 1 (izquierda) y simulación condicional 2 (derecha) (Elaboración propia)..... | 153 |
| Ilustración E. 8: Simulación condicional 3 (izquierda) y simulación condicional 4 (derecha) (Elaboración propia)..... | 153 |
| Ilustración E. 9: Simulación condicional 5 (izquierda) y simulación condicional 6 (derecha) (Elaboración propia)..... | 154 |
| Ilustración E. 10: Simulación condicional 7 (izquierda) y simulación condicional 8 (derecha) (Elaboración propia)..... | 154 |
| Ilustración E. 11: Simulación condicional 9 (izquierda) y simulación condicional 10 (derecha) | 154 |
| Ilustración E. 12: Simulación condicional 11 (izquierda) y simulación condicional 12 (derecha) | 155 |
| Ilustración E. 13: Simulación condicional 13 (izquierda) y simulación condicional 14 (derecha) | 155 |
| Ilustración E. 14: Simulación condicional 15 (izquierda) y simulación condicional 16 (derecha) | 155 |
| Ilustración E. 15: Simulación condicional 17 (izquierda) y simulación condicional 18 (derecha) | 156 |
| Ilustración E. 16: Simulación condicional 19 (izquierda) y simulación condicional 20 (derecha) | 156 |
| Ilustración E. 17: Simulación condicional 21 (izquierda) y simulación condicional 22 (derecha) | 156 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración E. 18: Simulación condicional 23 (izquierda) y simulación condicional 24 (derecha) | 157 |
| Ilustración E. 19: Simulación condicional 25 (izquierda) y simulación condicional 26 (derecha) | 157 |
| Ilustración E. 20: Simulación condicional 27 (izquierda) y simulación condicional 28 (derecha) | 157 |
| Ilustración E. 21: Simulación condicional 29 (izquierda) y simulación condicional 30 (derecha) | 158 |
| Ilustración E. 22: Simulación condicional 31 (izquierda) y simulación condicional 32 (derecha) | 158 |
| Ilustración E. 23: Simulación condicional 33 (izquierda) y simulación condicional 34 (derecha) | 158 |
| Ilustración E. 24: Simulación condicional 35 (izquierda) y simulación condicional 36 (derecha) | 159 |
| Ilustración E. 25: Simulación condicional 37 (izquierda) y simulación condicional 38 (derecha) | 159 |
| Ilustración E. 26: Simulación condicional 39 (izquierda) y simulación condicional 40 (derecha) | 159 |
| Ilustración E. 27: Simulación condicional 41 (izquierda) y simulación condicional 42 (derecha) | 160 |
| Ilustración E. 28: Simulación condicional 43 (izquierda) y simulación condicional 44 (derecha) | 160 |
| Ilustración E. 29: Simulación condicional 45 (izquierda) y simulación condicional 46 (derecha) | 160 |
| Ilustración E. 30: Simulación condicional 47 (izquierda) y simulación condicional 48 (derecha) | 161 |
| Ilustración E. 31: Simulación condicional 49 (izquierda) y simulación condicional 50 (derecha) | 161 |
| Ilustración E. 32: Estimación concentración media HC bloques 2x2 (Elaboración propia)..... | 161 |
| Ilustración F. 1: Estimación modelo NN 1000_2000 variable continua Ni, caso distancia entre puntos como entrada (Elaboración propia)..... | 162 |
| Ilustración F. 3: Estimación modelo NN 1000_2000 variable categórica Ni, caso distancia entre puntos como entrada (Elaboración propia) | 162 |
| Ilustración F. 4: Estimación modelo NN 1000_2000 variable categórica HC, caso 210 muestras con distancia entre puntos como entrada (Elaboración propia) | 163 |
| Ilustración G. 1: Zonas que superan criterio de contaminación establecido, caso sin datos atípicos HC bloques 10x10 (Elaboración propia)..... | 174 |
| Ilustración G. 2: Zonas que superan criterio de contaminación establecido Ni bloques 10x10 (Elaboración propia)..... | 174 |
| Ilustración G. 3: Zonas con bajo riesgo de contaminación, kriging de indicadores Ni (Elaboración propia) | 175 |
| Ilustración G. 4: Zonas con alto riesgo de contaminación, kriging de indicadores Ni (Elaboración propia) | 175 |
| Ilustración G. 5: Zonas de incertidumbre, kriging de indicadores Ni (Elaboración propia)..... | 175 |
| Ilustración I. 1: Zonas con bajo riesgo de contaminación, modelo NN 1000_2000 variables categóricas Ni (Elaboración propia)..... | 176 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración I. 2: Zonas con alto riesgo de contaminación, modelo NN 1000_2000 variables categóricas Ni (Elaboración propia)..... | 176 |
| Ilustración I. 3: Zonas de incertidumbre, modelo NN 1000_2000 variables categóricas Ni (Elaboración propia)..... | 177 |
| Ilustración I. 4: Zonas con bajo riesgo de contaminación, modelo NN 1000_2000 variables categóricas HC con distancia entre muestras (Elaboración propia)..... | 177 |
| Ilustración I. 5: Zonas con alto riesgo de contaminación, modelo NN 1000_2000 variables categóricas HC con distancia entre muestras (Elaboración propia)..... | 178 |
| Ilustración I. 6: Zonas de incertidumbre, modelo NN 1000_2000 variables categóricas HC con distancia entre muestras (Elaboración propia). | 178 |
| Ilustración I. 7: Zonas con bajo riesgo de contaminación, modelo NN 1000_2000 variables categóricas Ni con distancia entre muestras (Elaboración propia). | 179 |
| Ilustración I. 8: Zonas con alto riesgo de contaminación, modelo NN 1000_2000 variables categóricas Ni con distancia entre muestras (Elaboración propia). | 179 |
| Ilustración I. 9: Zonas de incertidumbre, modelo NN 1000_2000 variables categóricas Ni con distancia entre muestras (Elaboración propia). | 180 |
| Ilustración I. 10: Zonas con bajo riesgo de contaminación, modelo NN 1000_2000 variables categóricas caso HC 210 muestras conociendo distancia entre muestras (Elaboración propia). . | 180 |
| Ilustración I. 11: Zonas con alto riesgo de contaminación, modelo NN 1000_2000 variables categóricas caso HC 210 muestras conociendo distancia entre muestras (Elaboración propia). . | 181 |
| Ilustración I. 12: Zonas de incertidumbre, modelo NN 1000_2000 variables categóricas caso HC 210 muestras conociendo distancia entre muestras (Elaboración propia)..... | 181 |
| Ilustración I. 13: Zonas que superan criterio de contaminación establecido, variable continua Ni con distancia entre muestras (Elaboración propia). | 182 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Fuentes potencialmente generadoras de DAM durante la operación y al cierre de una faena minera (SERNAGEOMIN,2015). | 6 |
| Tabla 2: Principales minerales secundarios formados en procesos de generación de DAM (SERNAGEOMIN,2015). | 8 |
| Tabla 3: Metales típicos presentes en DAM,DMN y DMAL (SERNAGEOMIN,2015)..... | 9 |
| Tabla 4: Riesgos e impactos asociados en cada fuente potencialmente generadora de DAM (SERNAGEOMIN,2015). | 10 |
| Tabla 5: Límites máximos permisibles de normas mexicana y canadiense (Elaboración propia). | 13 |
| Tabla 6: Matriz de confusión (Elaboración propia). | 36 |
| Tabla 7: Estadísticas descriptivas elementos contaminantes (Elaboración propia). | 44 |
| Tabla 8: Estadísticas descriptivas base de datos (Elaboración propia). | 49 |
| Tabla 9: Parámetros malla (Elaboración propia). | 49 |
| Tabla 10: Parámetros lags variogramas experimentales (Elaboración propia). | 51 |
| Tabla 11: Parámetros direccionales variogramas experimentales (Elaboración propia). | 51 |
| Tabla 12: Parámetros redes neuronales (Elaboración propia)..... | 55 |
| Tabla 13: Estadísticas descriptivas estimación, kriging ordinario HC caso sin datos atípicos bloques 2x2 (Elaboración propia). | 61 |
| Tabla 14: Estadísticas descriptivas estimación kriging de indicadores bloques 2x2 (Elaboración propia). | 65 |
| Tabla 15: Estadísticas descriptivas estimación de la concentración media de simulaciones realizadas bloques 2x2 (Elaboración propia). | 67 |
| Tabla 16: Superficie de contaminación kriging ordinario HC (Elaboración propia)..... | 72 |
| Tabla 17: Superficie de contaminación kriging ordinario Ni (Elaboración propia). | 73 |
| Tabla 18: Volumen de contaminación kriging ordinario HC (Elaboración propia). | 73 |
| Tabla 19: Volumen de contaminación kriging ordinario Ni (Elaboración propia)..... | 73 |
| Tabla 20: Superficie de contaminación probable, kriging de indicadores elementos contaminantes (Elaboración propia). | 74 |
| Tabla 21: Superficie de contaminación probable, simulaciones condicionales HC (Elaboración propia). | 74 |
| Tabla 22: Superficie de contaminación simulaciones condicionales HC (Elaboración propia). .. | 75 |
| Tabla 23: Entrenamiento redes neuronales HC (Elaboración propia). | 77 |
| Tabla 24: Matriz de confusión modelo NN 100_200 con datos de entrenamiento HC (Elaboración propia). | 78 |
| Tabla 25: Matriz de confusión modelo NN 1000_200 con datos de entrenamiento HC (Elaboración propia). | 78 |
| Tabla 26: Matriz de confusión modelo NN 100_2000 con datos de entrenamiento HC (Elaboración propia). | 78 |
| Tabla 27: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de entrenamiento HC (Elaboración propia)..... | 78 |
| Tabla 28: Prueba redes neuronales HC (Elaboración propia). | 81 |
| Tabla 29: Matriz de confusión modelo NN 100_200 con datos de prueba HC (Elaboración propia). | 81 |
| Tabla 30: Matriz de confusión modelo NN 1000_200 con datos de prueba HC (Elaboración propia). | 82 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 31: Matriz de confusión modelo NN 100_2000 con datos de prueba HC (Elaboración propia). | 82 |
| Tabla 32: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de prueba HC (Elaboración propia). | 82 |
| Tabla 33: Estadísticas descriptivas estimación redes neuronales HC (Elaboración propia). | 82 |
| Tabla 34: Superficie de contaminación de variables continuas, modelos redes neuronales (Elaboración propia). | 103 |
| Tabla 35: Volumen de contaminación variables continuas, modelos redes neuronales (Elaboración propia). | 104 |
| Tabla 36: Superficie de contaminación probable, redes neuronales caso datos de inicio sin distancia entre puntos (Elaboración propia). | 104 |
| Tabla 37: Superficie de contaminación probable, redes neuronales caso 210 muestras sin distancia entre puntos (Elaboración propia). | 105 |
| Tabla 38: Superficie de contaminación probable, redes neuronales caso grilla sin distancia entre puntos (Elaboración propia). | 105 |
| Tabla 39: Superficie de contaminación probable, redes neuronales caso datos de inicio con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 106 |
| Tabla 40: Superficie de contaminación probable, redes neuronales caso 210 muestras con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 106 |
| Tabla 41: Superficie de contaminación probable, redes neuronales caso grilla con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 106 |
| Tabla 42: Estadísticas descriptivas de estimación, modelo geoestadístico vs machine learning (Elaboración propia). | 108 |
| Tabla 43: Bloques que superan criterio de contaminación, modelo geoestadístico vs machine learning (Elaboración propia). | 109 |
| Tabla 44: Evaluación modelo geoestadístico vs machine learning con variables continuas (Elaboración propia). | 109 |
| Tabla 45: Matriz de confusión modelo geoestadístico vs machine learning con variables continuas (Elaboración propia). | 109 |
| Tabla 46: Comparación de superficies probables de contaminación mediante modelo geoestadístico y machine learning (Elaboración propia). | 110 |
| Tabla 47: Evaluación modelo geoestadístico vs machine learning con variables categóricas (Elaboración propia). | 111 |
| Tabla 48: Matriz de confusión modelo geoestadístico vs machine learning con variables categóricas (Elaboración propia). | 112 |
| Tabla A. 1: Estadísticas descriptivas espesor (Elaboración propia). | 122 |
| Tabla A. 2: Estadísticas descriptivas elementos contaminantes caso kriging de indicadores (Elaboración propia). | 123 |
| Tabla A. 3: Estadísticas descriptivas HC caso simulación condicional gaussiana (Elaboración propia). | 124 |
| Tabla A. 4: Estadísticas descriptivas HC caso sin datos atípicos (Elaboración propia). | 125 |
| Tabla A. 5: Estadísticas descriptivas HC caso muestreado con grilla (Elaboración propia). | 126 |
| Tabla C. 1: Estadísticas descriptivas estimación kriging ordinario HC caso sin datos atípicos bloques 10x10 (Elaboración propia). | 137 |
| Tabla C. 2: Estadísticas descriptivas estimación kriging ordinario Ni (Elaboración propia). | 138 |
| Tabla C. 3: Estadísticas descriptivas estimación kriging ordinario espesor (Elaboración propia). | 139 |

| | |
|---|-----|
| Tabla C. 4: Estadísticas descriptivas estimación probabilidad de superar criterio de contaminación HC (Elaboración propia). | 141 |
| Tabla D. 1: Estadísticas descriptivas estimación redes neuronales Ni (Elaboración propia). | 144 |
| Tabla D. 2: Estadísticas descriptivas estimación redes neuronales variables categóricas (Elaboración propia). | 145 |
| Tabla D. 3: Estadísticas descriptivas estimación redes neuronales variables categóricas, caso HC 210 muestras (Elaboración propia). | 146 |
| Tabla D. 4: Estadísticas descriptivas estimación redes neuronales variables categóricas, caso HC muestreado con grilla (Elaboración propia). | 147 |
| Tabla D. 5: Estadísticas descriptivas estimación redes neuronales, caso distancia entre muestras (Elaboración propia). | 148 |
| Tabla G. 1: Entrenamiento redes neuronales Ni variables continuas (Elaboración propia). | 163 |
| Tabla G. 2: Matriz de confusión modelo NN 100_2000 con datos de entrenamiento Ni variables continuas (Elaboración propia). | 163 |
| Tabla G. 3: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de entrenamiento Ni variables continuas (Elaboración propia). | 164 |
| Tabla G. 4: Prueba redes neuronales Ni variables continuas (Elaboración propia). | 164 |
| Tabla G. 5: Matriz de confusión modelo NN 100_2000 con datos de prueba Ni variables continuas (Elaboración propia). | 164 |
| Tabla G. 6: Matriz de confusión modelo NN 100_2000 con datos de prueba Ni variables continuas (Elaboración propia). | 164 |
| Tabla G. 7: Entrenamiento redes neuronales HC variables categóricas (Elaboración propia). .. | 164 |
| Tabla G. 8: Matriz de confusión modelo NN 100_2000 con datos de entrenamiento HC variables categóricas (Elaboración propia). | 165 |
| Tabla G. 9: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de entrenamiento HC variables categóricas (Elaboración propia). | 165 |
| Tabla G. 10: Prueba redes neuronales HC variables categóricas (Elaboración propia). | 165 |
| Tabla G. 11: Matriz de confusión modelo NN 100_2000 con datos de prueba HC variables categóricas (Elaboración propia). | 165 |
| Tabla G. 12: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de prueba HC variables categóricas (Elaboración propia). | 165 |
| Tabla G. 13: Entrenamiento redes neuronales Ni variables categóricas (Elaboración propia). . | 166 |
| Tabla G. 14: Matriz de confusión modelo NN 100_2000 con datos de entrenamiento Ni variables categóricas (Elaboración propia). | 166 |
| Tabla G. 15: Matriz de confusión modelo NN 1000_200 con datos de entrenamiento Ni variables categóricas (Elaboración propia). | 166 |
| Tabla G. 16: Prueba redes neuronales Ni variables categóricas (Elaboración propia). | 166 |
| Tabla G. 17: Matriz de confusión modelo NN 100_2000 con datos de prueba Ni variables categóricas (Elaboración propia). | 166 |
| Tabla G. 18: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de prueba Ni variables categóricas (Elaboración propia). | 167 |
| Tabla G. 19: Entrenamiento redes neuronales caso HC 210 muestras (Elaboración propia). | 167 |
| Tabla G. 20: Matriz de confusión modelo NN 100_2000 con datos de entrenamiento, caso HC 210 muestras (Elaboración propia). | 167 |
| Tabla G. 21: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de entrenamiento, caso HC 210 muestras (Elaboración propia). | 167 |

| | |
|---|-----|
| Tabla G. 22: Prueba redes neuronales, caso HC 210 muestras (Elaboración propia). | 167 |
| Tabla G. 23: Matriz de confusión modelo NN 100_2000 con datos de prueba, caso HC 210 muestras (Elaboración propia). | 168 |
| Tabla G. 24: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de prueba, caso HC 210 muestras (Elaboración propia). | 168 |
| Tabla G. 25: Entrenamiento redes neuronales caso HC muestreado con grilla (Elaboración propia). | 168 |
| Tabla G. 26: Matriz de confusión modelo NN 100_2000 con datos de entrenamiento, caso HC muestreado con grilla (Elaboración propia). | 168 |
| Tabla G. 27: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de entrenamiento, caso HC muestreado con grilla (Elaboración propia). | 168 |
| Tabla G. 28: Prueba redes neuronales, caso HC muestreado con grilla (Elaboración propia).. | 169 |
| Tabla G. 29: Matriz de confusión modelo NN 100_2000 con datos de prueba, caso HC muestreado con grilla (Elaboración propia). | 169 |
| Tabla G. 30: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de prueba, caso HC muestreado con grilla (Elaboración propia). | 169 |
| Tabla G. 31: Entrenamiento redes neuronales variable continua HC con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 169 |
| Tabla G. 32: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de entrenamiento, variable continua HC con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 169 |
| Tabla G. 33: Prueba redes neuronales variable continua HC con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 170 |
| Tabla G. 34: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de prueba, variable continua HC con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 170 |
| Tabla G. 35: Entrenamiento redes neuronales variable continua Ni con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 170 |
| Tabla G. 36: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de entrenamiento, variable continua Ni con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 170 |
| Tabla G. 37: Prueba redes neuronales variable continua Ni con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 170 |
| Tabla G. 38: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de prueba, variable continua Ni con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 170 |
| Tabla G. 39: Entrenamiento redes neuronales variable categórica HC con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 170 |
| Tabla G. 40: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de entrenamiento, variable categórica HC con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 171 |
| Tabla G. 41: Prueba redes neuronales variable categórica HC con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 171 |
| Tabla G. 42: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de prueba, variable categórica HC con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 171 |
| Tabla G. 43: Entrenamiento redes neuronales variable categórica Ni con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 171 |
| Tabla G. 44: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de entrenamiento, variable categórica Ni con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 171 |
| Tabla G. 45: Prueba redes neuronales, variable categórica Ni con distancia entre puntos (Elaboración propia). | 171 |

| | |
|--|-----|
| Tabla G. 46: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de prueba, variable categórica Ni con distancia entre puntos (Elaboración propia)..... | 172 |
| Tabla G. 47: Entrenamiento redes neuronales variable categórica caso HC 210 muestras con distancia entre puntos (Elaboración propia)..... | 172 |
| Tabla G. 48: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de entrenamiento, variable categórica caso HC 210 muestras con distancia entre puntos (Elaboración propia)..... | 172 |
| Tabla G. 49: Prueba redes neuronales, variable categórica caso HC 210 muestras con distancia entre puntos (Elaboración propia)..... | 172 |
| Tabla G. 50: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de prueba, variable categórica caso HC 210 muestras con distancia entre puntos (Elaboración propia)..... | 172 |
| Tabla G. 51: Entrenamiento redes neuronales variable categórica caso HC muestreado con grilla y con distancia entre puntos (Elaboración propia)..... | 172 |
| Tabla G. 52: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de entrenamiento, variable categórica caso HC muestreado con grilla y con distancia entre puntos (Elaboración propia)..... | 173 |
| Tabla G. 53: Prueba redes neuronales, variable categórica caso HC muestreado con grilla y con distancia entre puntos (Elaboración propia)..... | 173 |
| Tabla G. 54: Matriz de confusión modelo NN 1000_2000 con datos de prueba, variable categórica caso HC muestreado con grilla y con distancia entre puntos (Elaboración propia)..... | 173 |