

Predicción de la ocurrencia de depósitos minerales tipo pórfido usando técnicas de aprendizaje automático

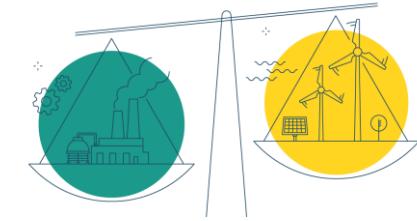


Autora: Ana Gabriela Mantilla Dulcey



Director: Yesid Paul Goyes Peñafiel
Geólogo, PhD (c)

JUSTIFICACIÓN



Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2
ANN
RF
SVM

Fase 3
Predicción
Propuesta

Conclusiones

Impacto

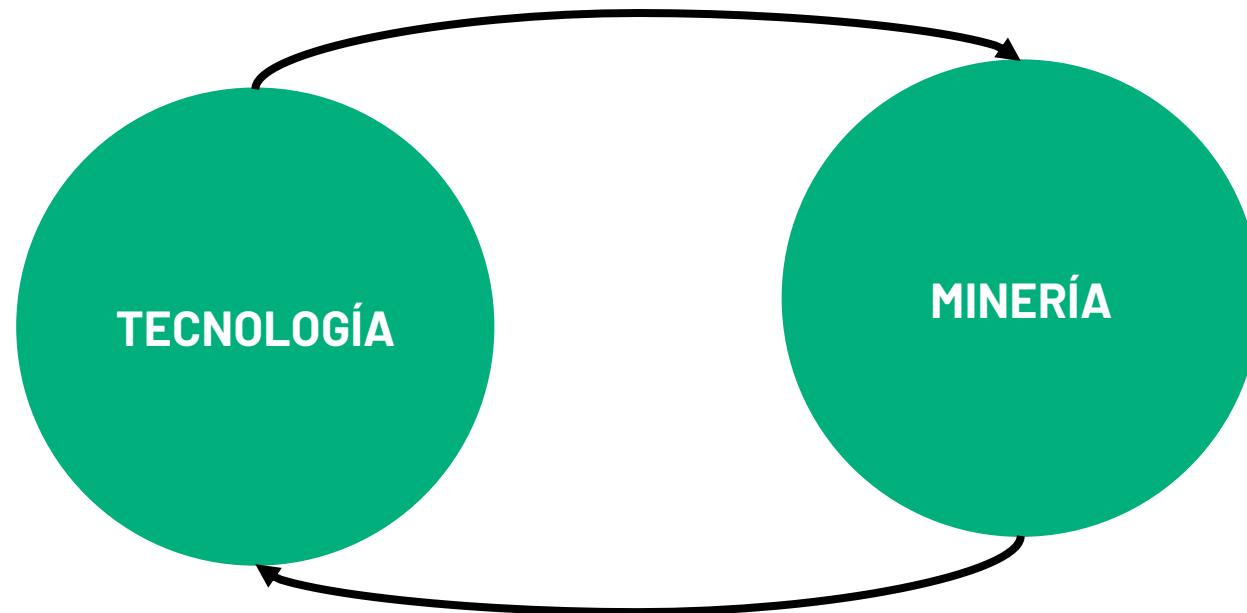


Cobre

Mina Ahmeek, USA



Litio



Níquel

Atlanta, USA



JUSTIFICACIÓN

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

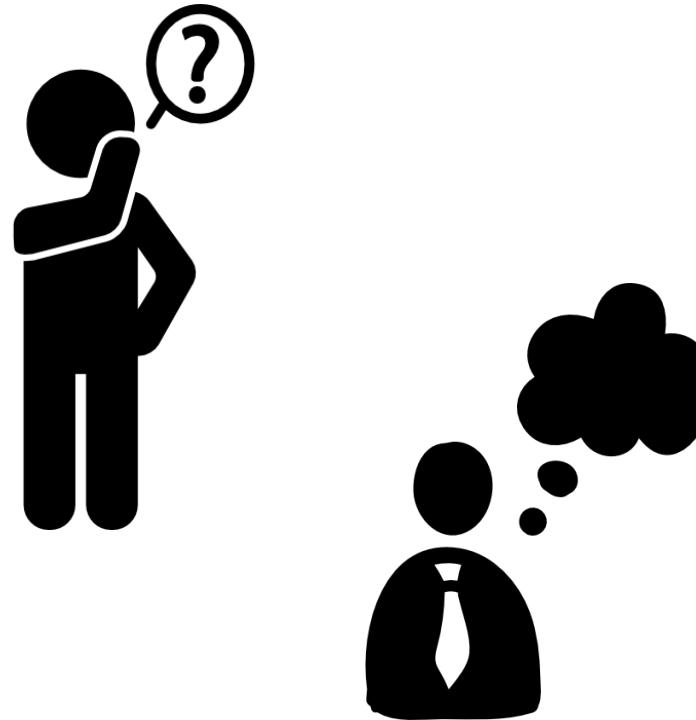
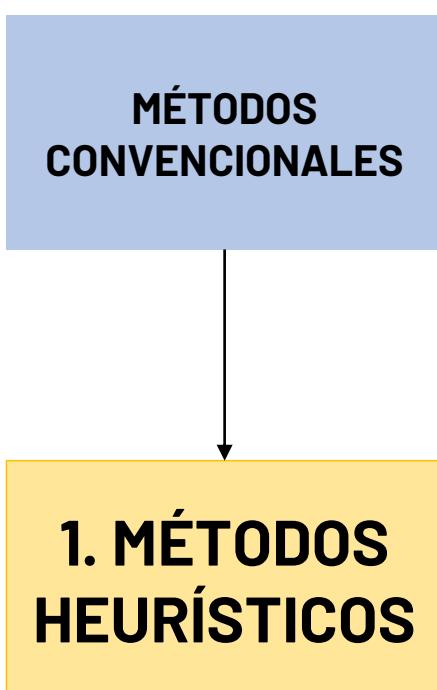
Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto



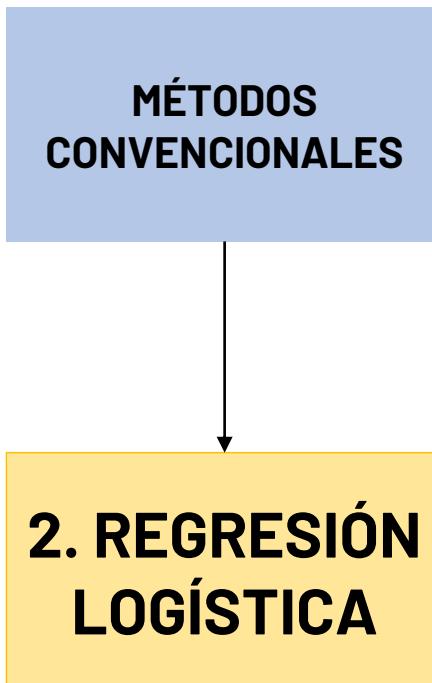
¿CUÁL ES EL
PROBLEMA DE
ESTOS MÉTODOS?

JUSTIFICACIÓN

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM

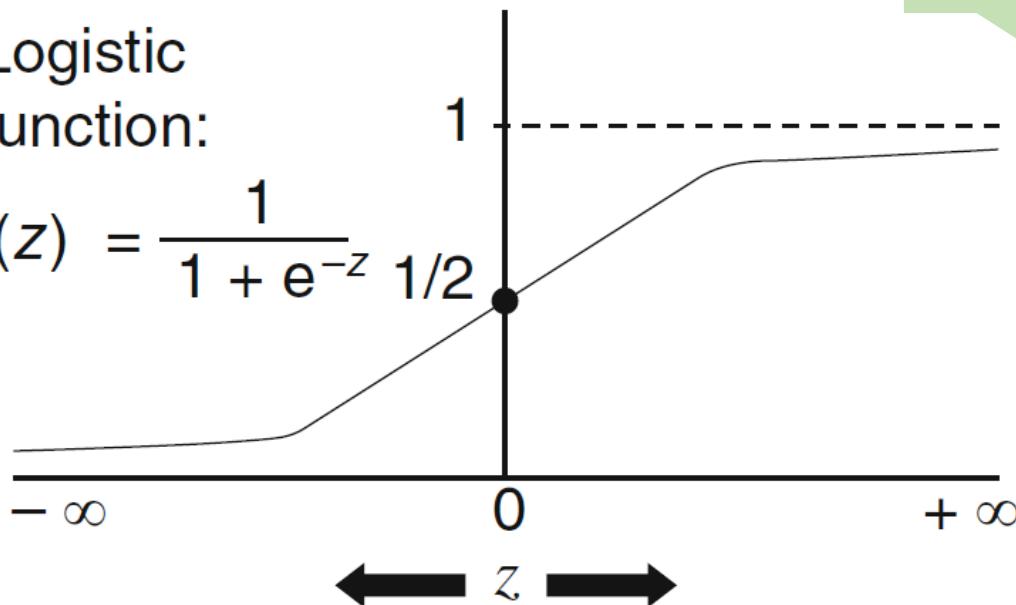
Fase 3
Predicción
Propuesta

Conclusiones
Impacto



Logistic function:

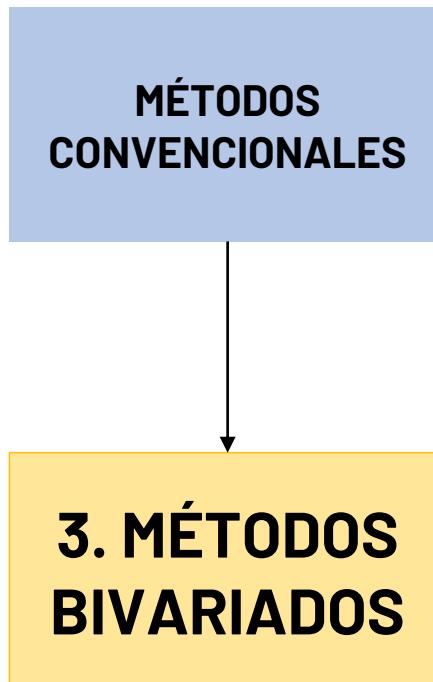
$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$



¿CUÁL ES EL PROBLEMA DE ESTOS MÉTODOS?

JUSTIFICACIÓN

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto



¿CUÁL ES EL
PROBLEMA DE
ESTOS MÉTODOS?

**se deben clasificar las capas de
valores continuos a valores
categóricos o nominales**

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

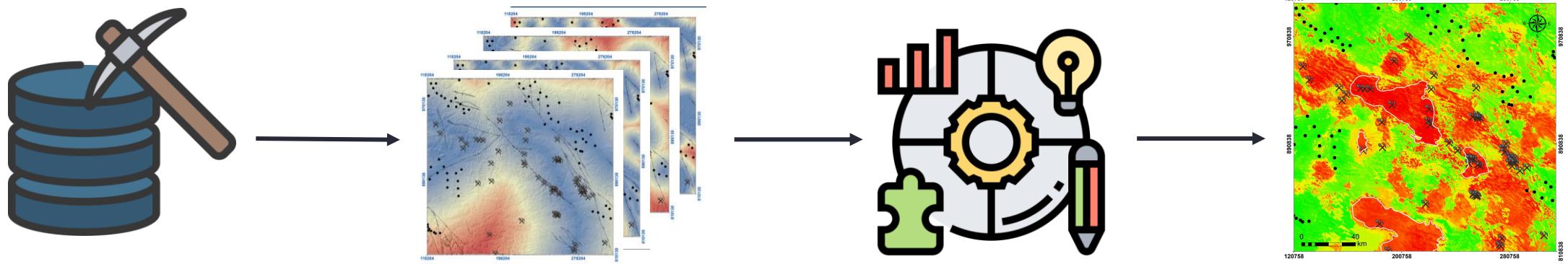
Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto

¿Cómo aplicar una metodología que integre la información geológica de naturaleza continua explotando las características de estas con un objetivo de exploración mineral?



OBJETIVOS

Objetivo general

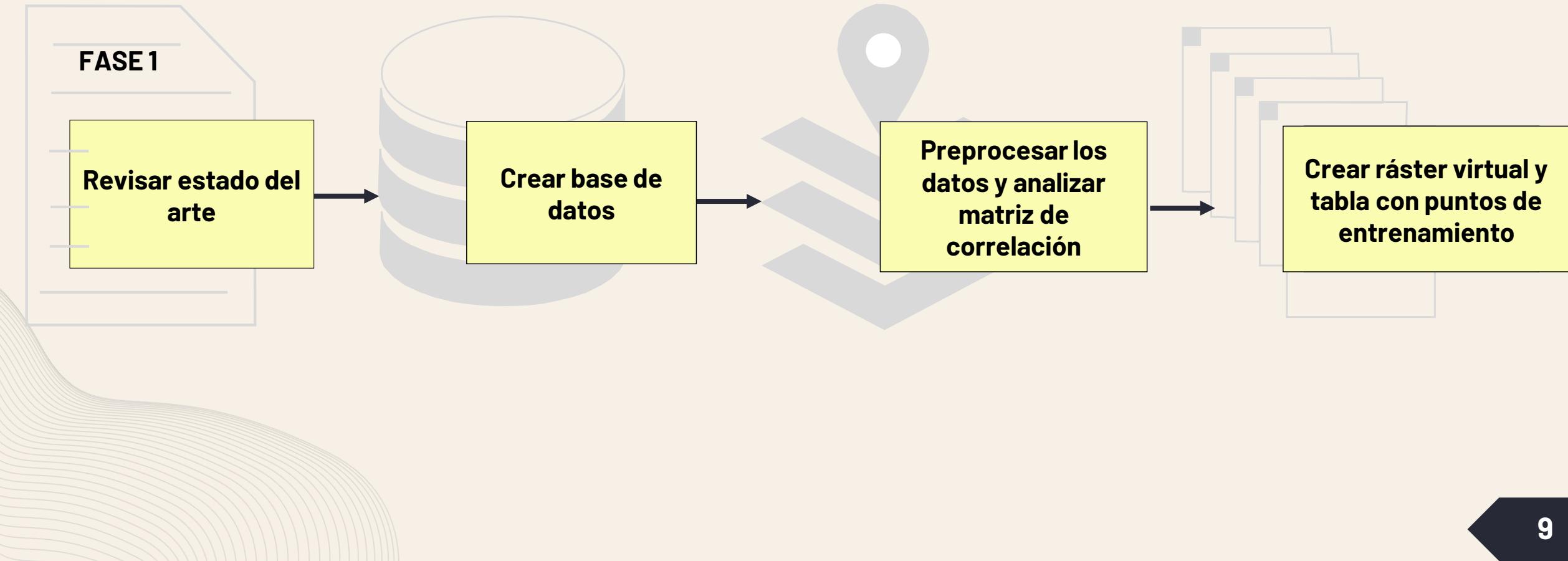
Predecir la ocurrencia de depósitos minerales tipo pórfido a partir de la integración de información geológica, geoquímica y geofísica usando técnicas de aprendizaje automático.

Objetivos específicos

1. **Analizar los diferentes insumos** geológicos, geoquímicos y geofísicos que se relacionen con la ocurrencia de depósitos minerales pórfido.
2. **Comparar el rendimiento y capacidad de predicción** de depósitos minerales tipo pórfido de los **modelos de aprendizaje automático** usando redes neuronales artificiales, bosques aleatorios y máquinas de soporte vectorial.
3. **Implementar una metodología** utilizando los modelos de aprendizaje automático y la información geológica, geoquímica y geofísica para predecir la ocurrencia de depósitos minerales tipo pórfido.

RESULTADOS

FASE 1. OBJETIVO 1

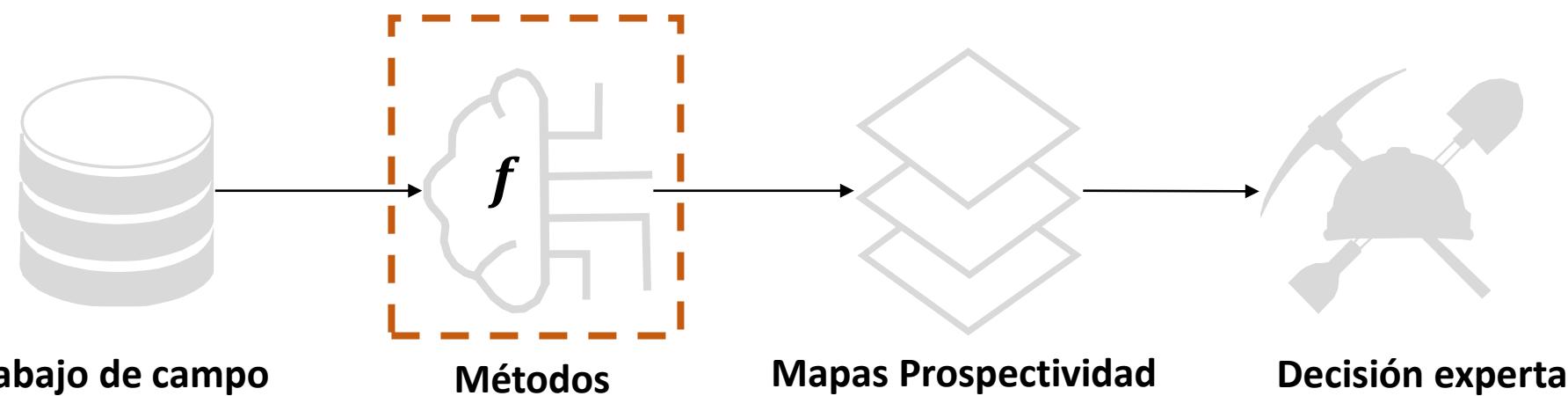
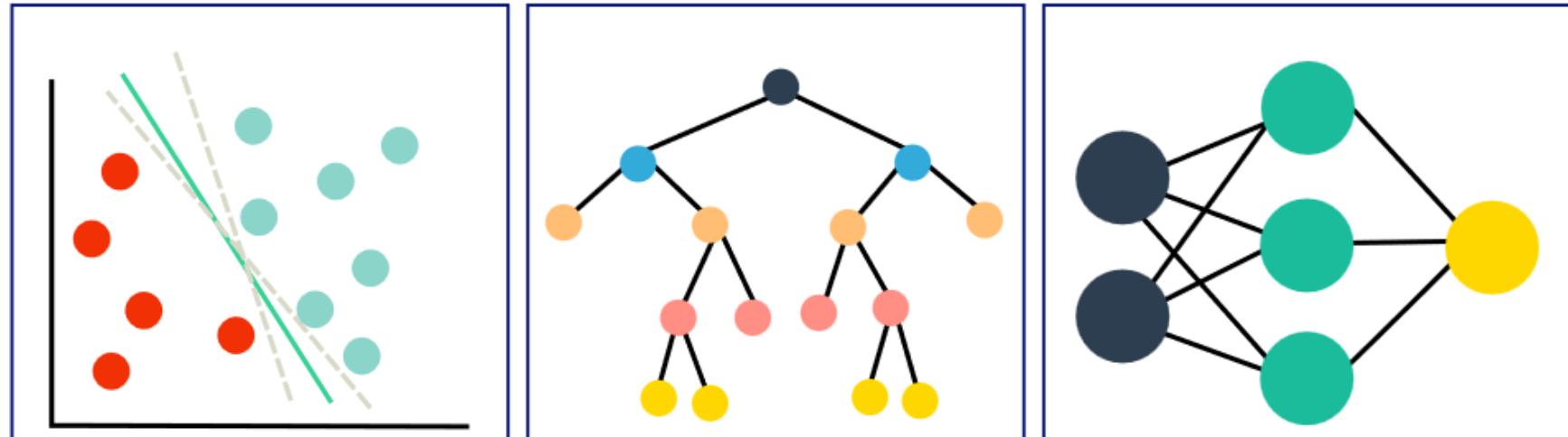


RESULTADOS

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM

Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto

Modelos de Aprendizaje Automático



RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

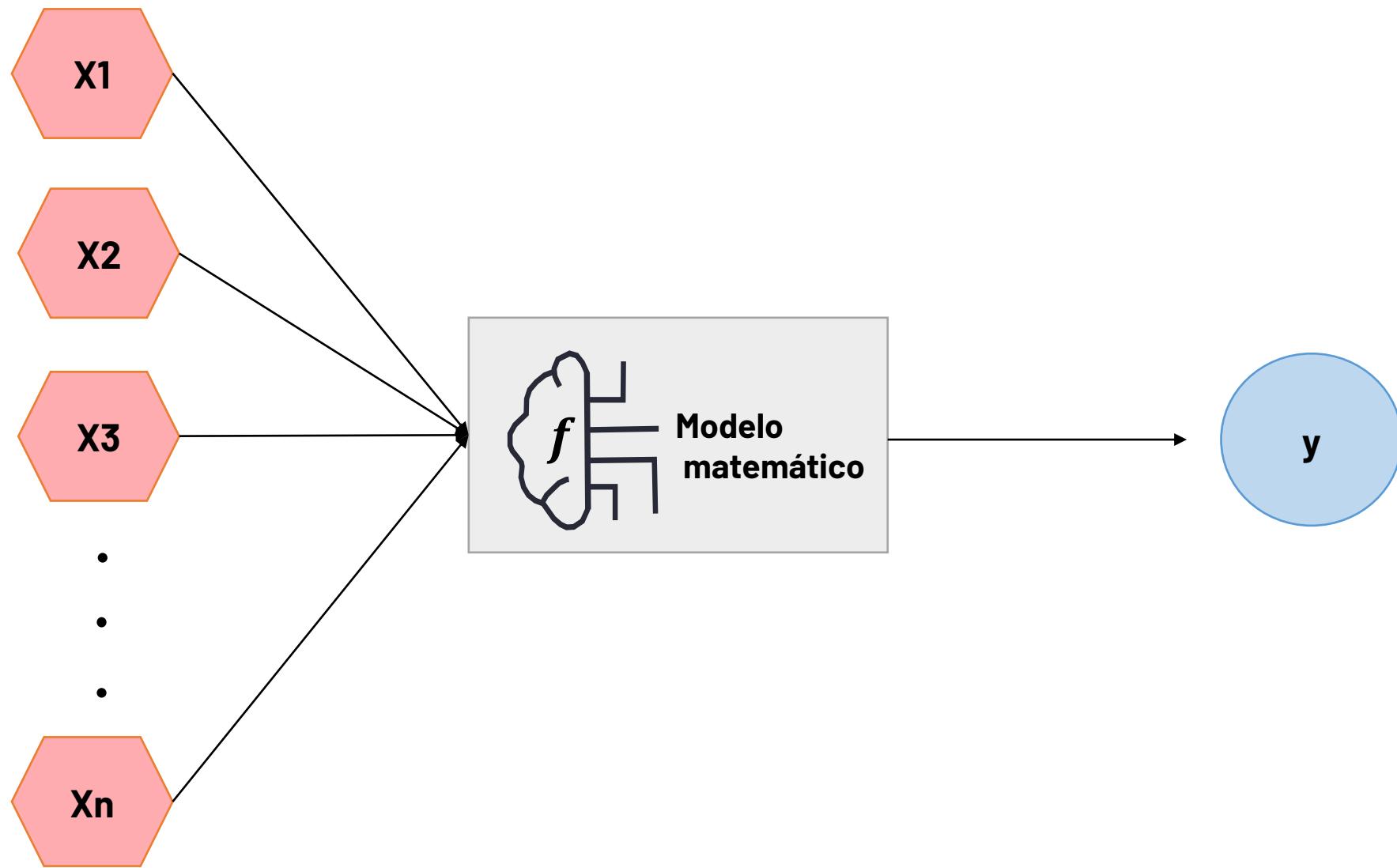
Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto



RESULTADOS

Revisar
estado del
arte

Justificación
Objetivos

Resultados

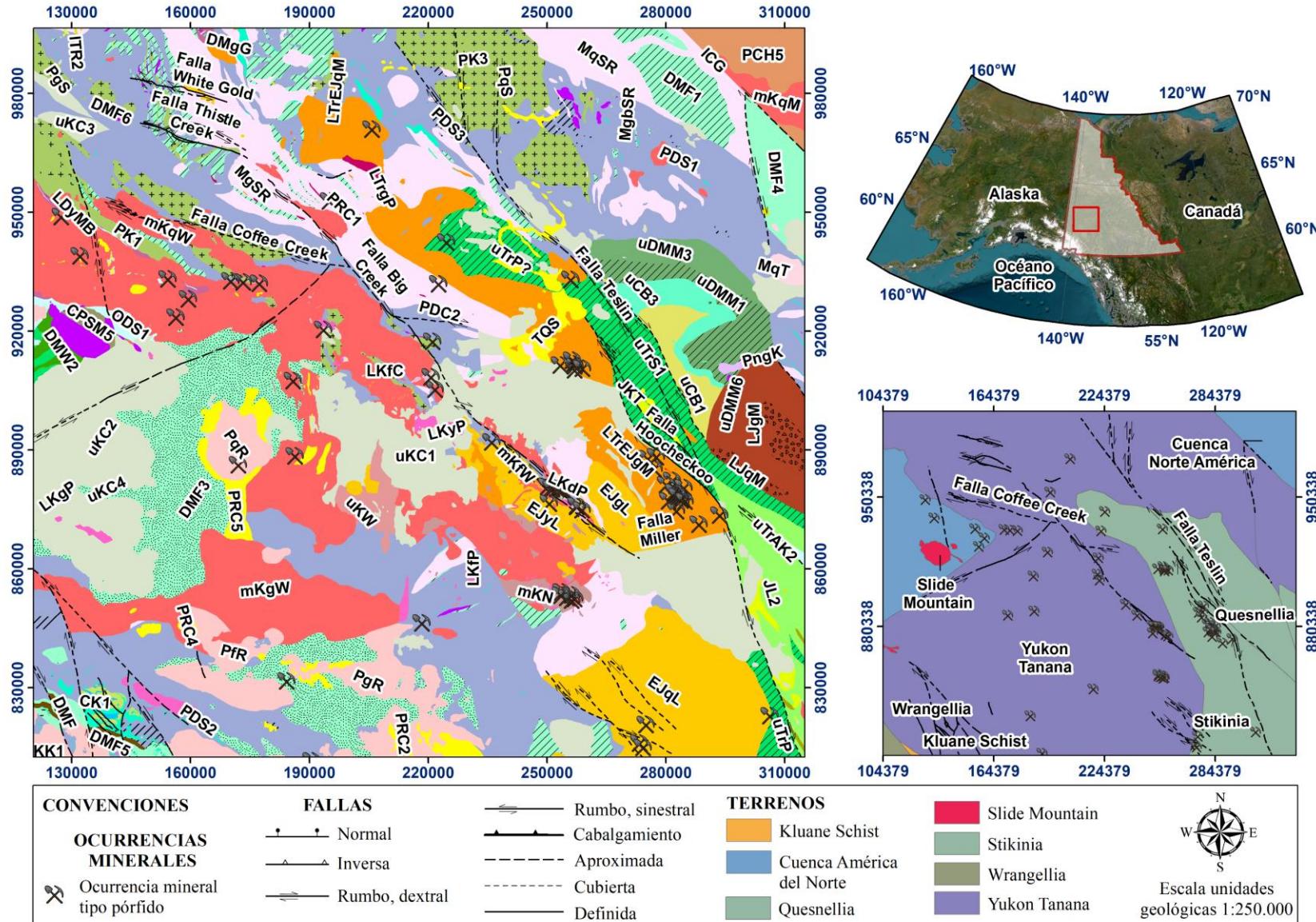
Fase 1

Fase 2
ANN
RF
SVM

Fase 3
Predicción
Propuesta

Conclusiones

Impacto



Zona de estudio:
Yukón, Canadá

RESULTADOS:

Revisar
estado del
arte

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

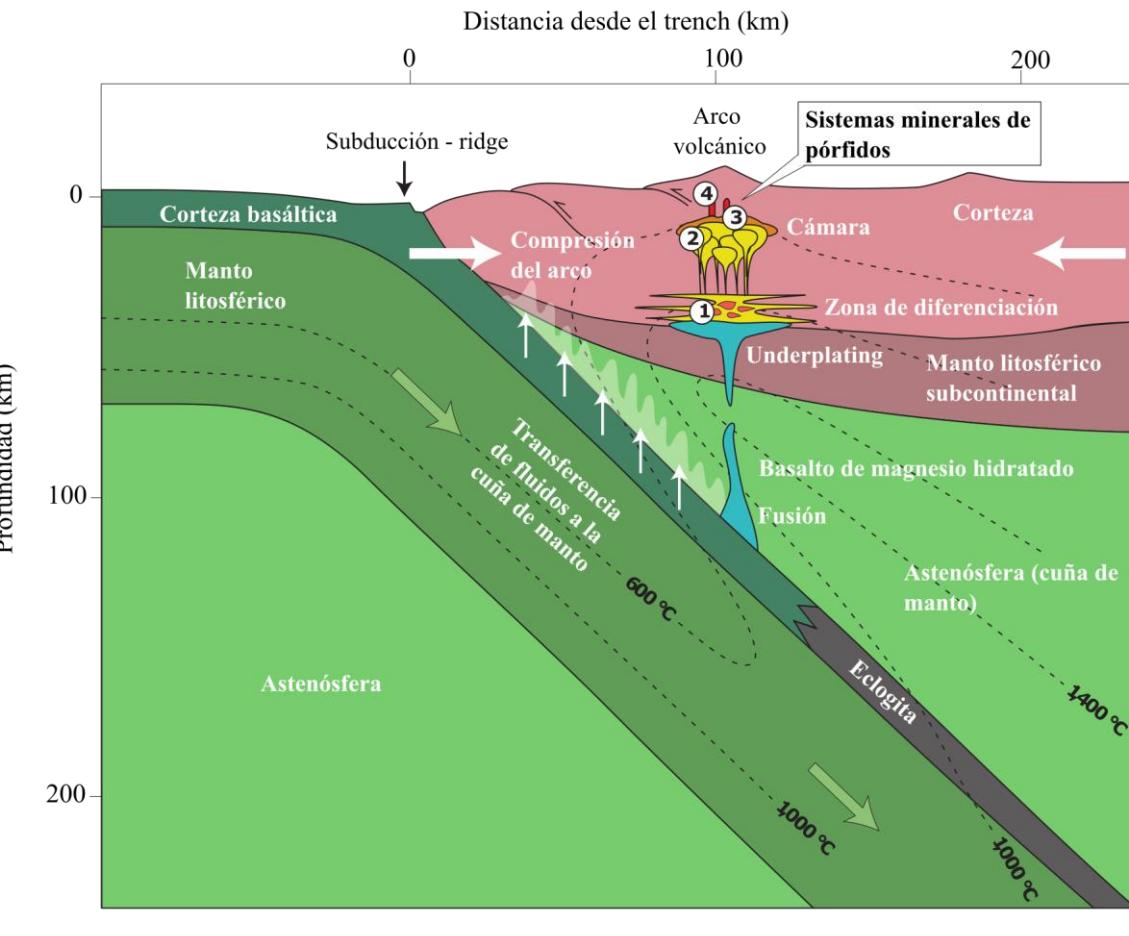
Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto



Wilkinson (2013)

FUENTE

TRANSPORTE

TRAMPA

PRECIPITACIÓN

CRITERIO 1. ENFOQUE YACIMIENTOS MINERALES

RESULTADOS

Revisar
estado del
arte

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

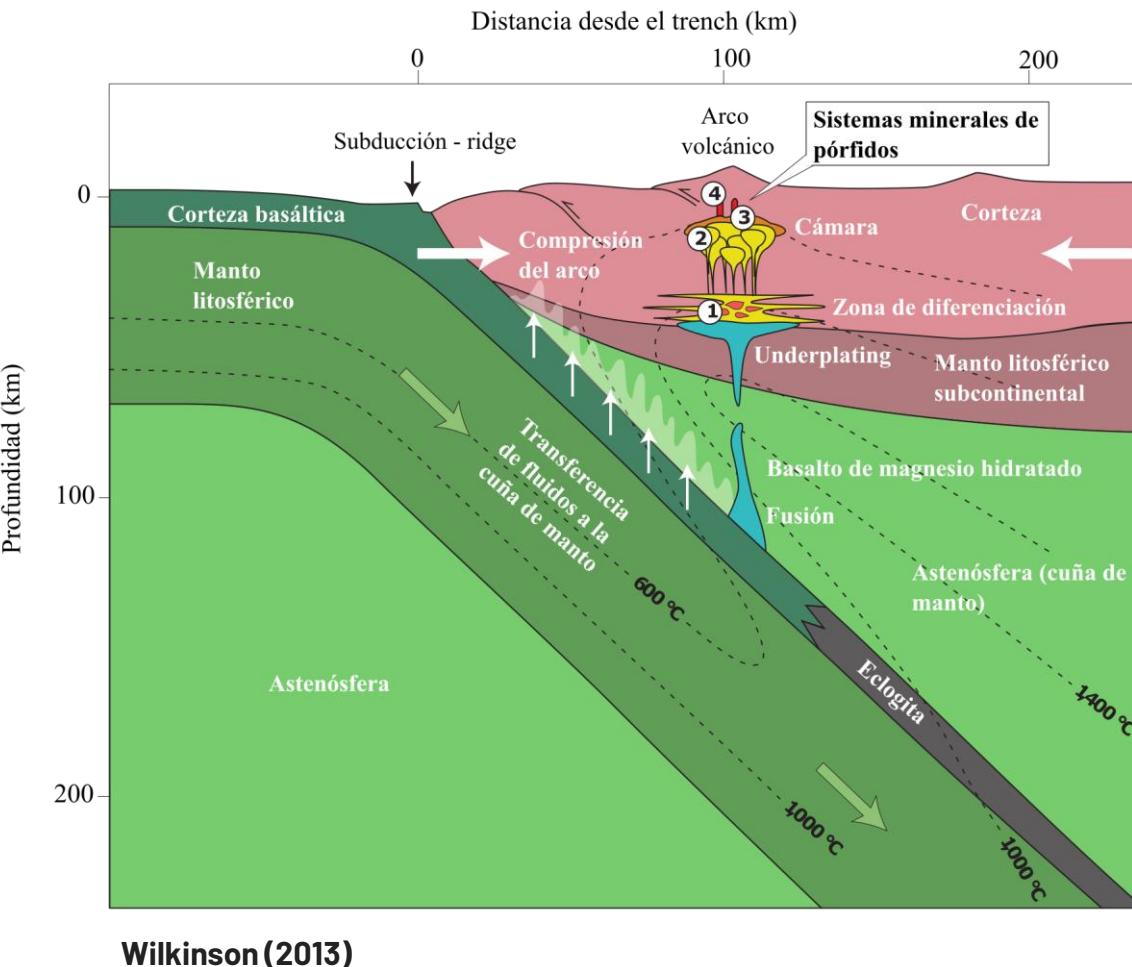
Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto



FUENTE

Emplazamiento de cuerpos intrusivos
y vulcanismo en la corteza

**Criterios mapeables de estos
procesos:**

Rocas volcánicas

Rocas plutónicas

RESULTADOS

Revisar
estado del
arte

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

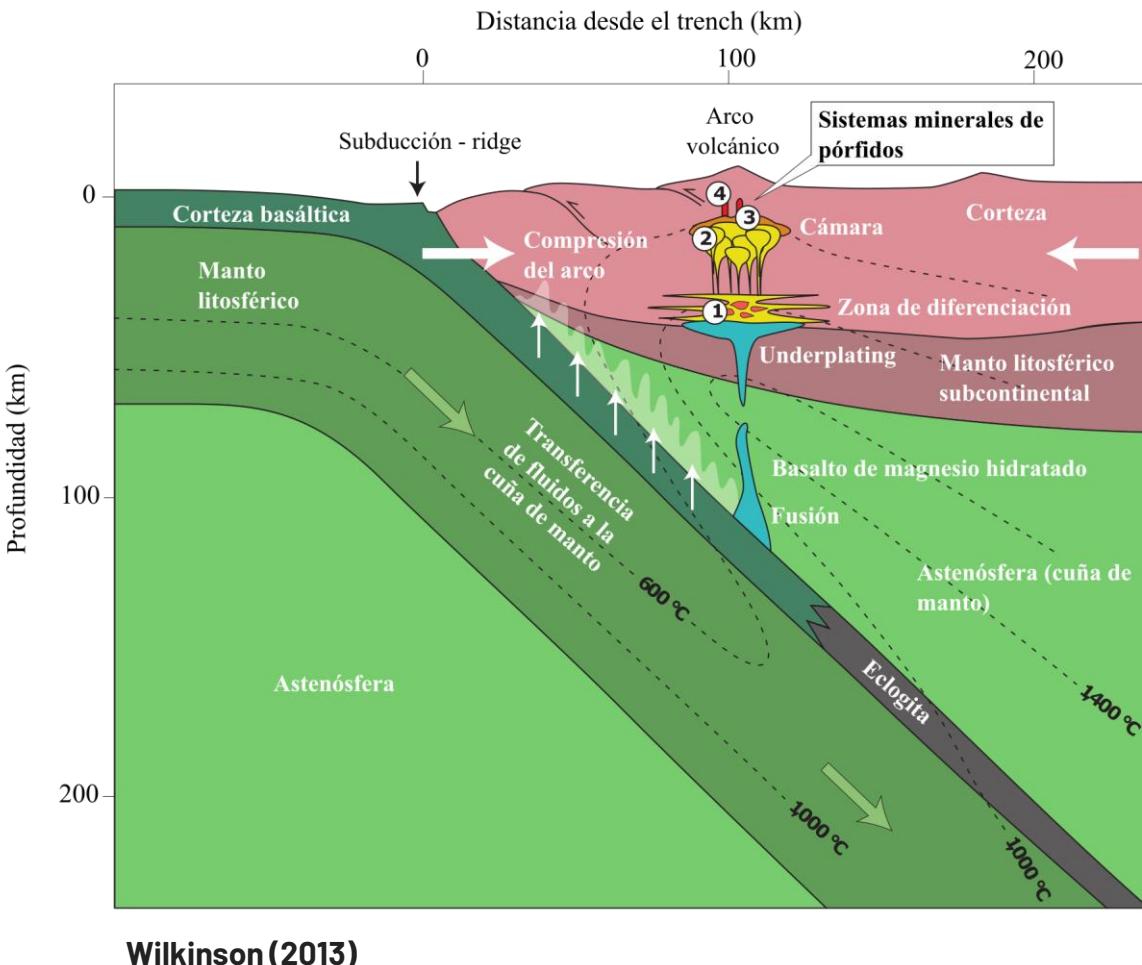
Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto



TRANSPORTE

Actividad de fallas y terrenos
litotectónicos

**Criterios mapeables de estos
procesos:**

Fallas geológicas

Contactos litotectónicos

CRITERIO 1. ENFOQUE YACIMIENTOS MINERALES

RESULTADOS

Revisar
estado del
arte

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

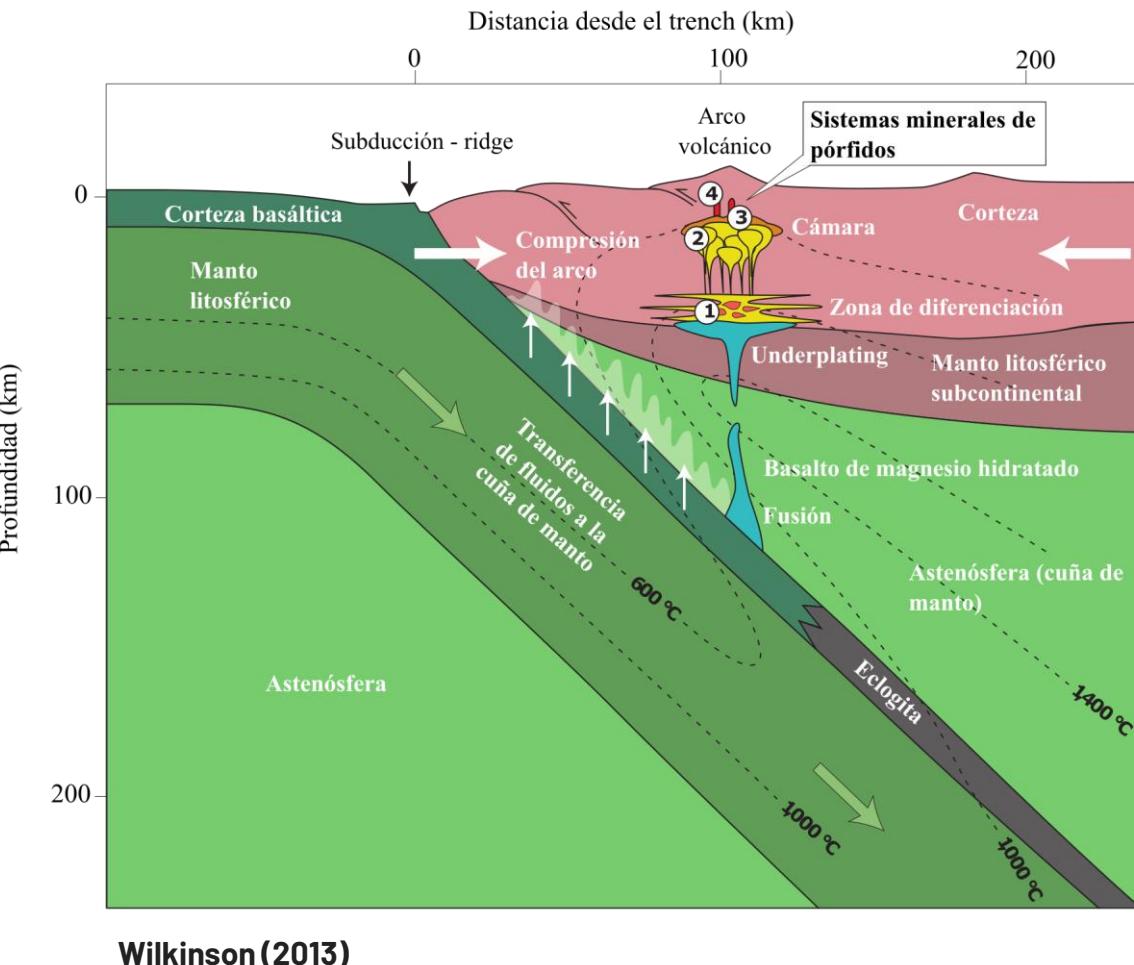
Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto



TRAMPA

Contrastes litológicos y
respuestas magnéticas

**Criterios mapeables de estos
procesos:**

Contactos litológicos

Geofísica (magnetometría)

CRITERIO 1. ENFOQUE YACIMIENTOS MINERALES

RESULTADOS

Revisar
estado del
arte

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

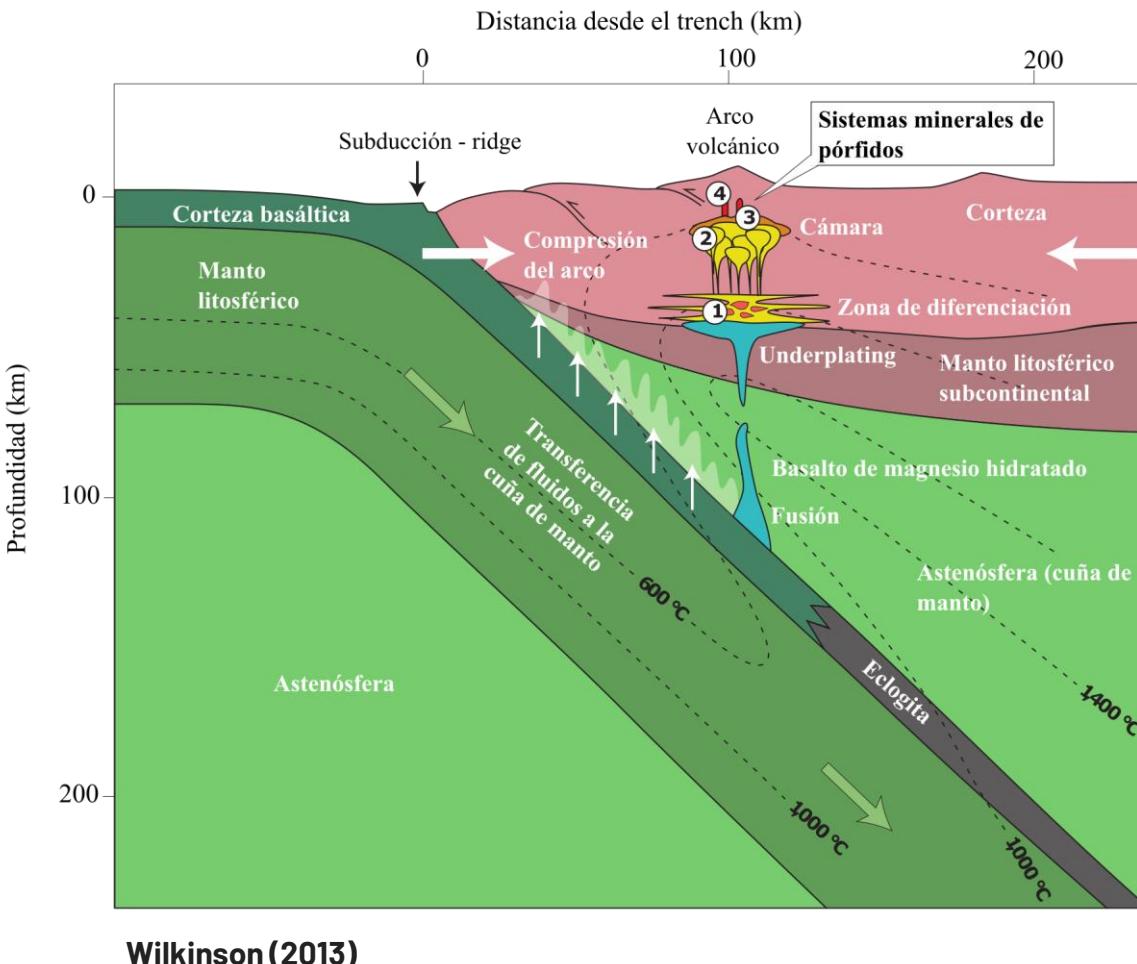
Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto



PRECIPITACIÓN

Halos de dispersión química.

Criterios mapeables de estos procesos:

Concentración geoquímica de Au, Pb, Zn, Cu, Ag, Mo

RESULTADOS

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM

Fase 3
Predicción
Propuesta

Conclusiones

Impacto

CRITERIO YACIMIENTOS MINERALES	
	Proximidad a rocas plutónicas
	Proximidad a rocas volcánicas
	Proximidad a fallas geológicas
	Proximidad a contactos de terrenos litotectónicos
	Proximidad a contactos litológicos
	Campo magnético residual
	Primera derivada del campo magnético residual
	Concentración geoquímica de Au
	Concentración geoquímica de Cu
	Concentración geoquímica de Pb
	Concentración geoquímica de Zn
	Concentración geoquímica de Mo

RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto

CRITERIO YACIMIENTOS MINERALES	
	Proximidad a rocas plutónicas
	Proximidad a rocas volcánicas
	Proximidad a fallas geológicas
	Proximidad a contactos de terrenos litotectónicos
	Proximidad a contactos litológicos
	Campo magnético residual
	Primera derivada del campo magnético residual
	Concentración geoquímica de Au
	Concentración geoquímica de Cu
	Concentración geoquímica de Pb
	Concentración geoquímica de Zn
	Concentración geoquímica de Mo

CRITERIO REVISIÓN DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS
Proximidad a rocas intrusivas y a fallas geológicas
Mapas geofísicos (magnetometría y aeromagnetometría)
Mapa de alteraciones hidrotermales de argílica y óxidos de Fe
Geoquímica de sedimentos de corriente
Intersecciones con fallas de alto ángulo
Buffer a rocas intrusivas (500 m), zonas alteración (3000 m), diques (2500 m)
Distancia, densidad y dirección de fallas
Geoquímica de elementos: Au, Ag, Cu, Mo, Pb, Zn
Geoquímica de concentración de metales (Cu, Pb y Mo)
Primera derivada vertical magnética
Distancia a intrusivos, fallas y roca caja en intervalos de 500 m
Distancia a márgenes batolíticos de granodiorita, diorita
Distancia a fallas/fracturas de tendencia NS, SE, NW, EW
Geoquímica de Cu y Zn

CRITERIO 2. ENFOQUE REVISIÓN DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto

CRITERIO YACIMIENTOS MINERALES	
Proximidad a rocas plutónicas	
Proximidad a rocas volcánicas	
Proximidad a fallas geológicas	
Proximidad a contactos de terrenos litotectónicos	
Proximidad a contactos litológicos	
Campo magnético residual	
Primera derivada del campo magnético residual	
Concentración geoquímica de Au	
Concentración geoquímica de Cu	
Concentración geoquímica de Pb	
Concentración geoquímica de Zn	
Concentración geoquímica de Mo	

CRITERIO REVISIÓN DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS
Proximidad a rocas intrusivas y a fallas geológicas
Mapas geofísicos (magnetometría y aeromagnetometría)
Mapa de alteraciones hidrotermales de argílica y óxidos de Fe
Geoquímica de sedimentos de corriente
Intersecciones con fallas de alto ángulo
Buffer a rocas intrusivas (500 m), zonas alteración (3000 m), diques (2500 m)
Distancia, densidad y dirección de fallas
Geoquímica de elementos: Au, Ag, Cu, Mo, Pb, Zn
Geoquímica de concentración de metales (Cu, Pb y Mo)
Primera derivada vertical magnética
Distancia a intrusivos, fallas y roca caja en intervalos de 500 m
Distancia a márgenes batolíticos de granodiorita, diorita
Distancia a fallas/fracturas de tendencia NS, SE, NW, EW
Geoquímica de Cu y Zn

RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto

CRITERIO YACIMIENTOS MINERALES	
Proximidad a rocas plutónicas	
Proximidad a rocas volcánicas	
Proximidad a fallas geológicas	
Proximidad a contactos de terrenos litotectónicos	
Proximidad a contactos litológicos	
Campo magnético residual	
Primera derivada del campo magnético residual	
Concentración geoquímica de Au	
Concentración geoquímica de Cu	
Concentración geoquímica de Pb	
Concentración geoquímica de Zn	
Concentración geoquímica de Mo	

CRITERIO REVISIÓN DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS
Proximidad a rocas intrusivas y a fallas geológicas
Mapas geofísicos (magnetometría y aeromagnetometría)
Mapa de alteraciones hidrotermales de argílica y óxidos de Fe
Geoquímica de sedimentos de corriente
Intersecciones con fallas de alto ángulo
Buffer a rocas intrusivas (500 m), zonas alteración (3000 m), diques (2500 m)
Distancia, densidad y dirección de fallas
Geoquímica de elementos: Au, Ag, Cu, Mo, Pb, Zn
Geoquímica de concentración de metales (Cu, Pb y Mo)
Primera derivada vertical magnética
Distancia a intrusivos, fallas y roca caja en intervalos de 500 m
Distancia a márgenes batolíticos de granodiorita, diorita
Distancia a fallas/fracturas de tendencia NS, SE, NW, EW
Geoquímica de Cu y Zn

RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto

CRITERIO YACIMIENTOS MINERALES	
	Proximidad a rocas plutónicas
	Proximidad a rocas volcánicas
	Proximidad a fallas geológicas
	Proximidad a contactos de terrenos litotectónicos
	Proximidad a contactos litológicos
	Campo magnético residual
	Primera derivada del campo magnético residual
	Concentración geoquímica de Au
	Concentración geoquímica de Cu
	Concentración geoquímica de Pb
	Concentración geoquímica de Zn
	Concentración geoquímica de Mo

CRITERIO REVISIÓN DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS
Proximidad a rocas intrusivas y a fallas geológicas
Mapas geofísicos (magnetometría y aeromagnetometría)
Mapa de alteraciones hidrotermales de argílica y óxidos de Fe
Geoquímica de sedimentos de corriente
Intersecciones con fallas de alto ángulo
Buffer a rocas intrusivas (500 m), zonas alteración (3000 m), diques (2500 m)
Distancia, densidad y dirección de fallas
Geoquímica de elementos: Au, Ag, Cu, Mo, Pb, Zn
Geoquímica de concentración de metales (Cu, Pb y Mo)
Primera derivada vertical magnética
Distancia a intrusivos, fallas y roca caja en intervalos de 500 m
Distancia a márgenes batolíticos de granodiorita, diorita
Distancia a fallas/fracturas de tendencia NS, SE, NW, EW
Geoquímica de Cu y Zn

RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto

CRITERIO YACIMIENTOS MINERALES	
	Proximidad a rocas plutónicas
	Proximidad a rocas volcánicas
	Proximidad a fallas geológicas
	Proximidad a contactos de terrenos litotectónicos
	Proximidad a contactos litológicos
	Campo magnético residual
	Primera derivada del campo magnético residual
	Concentración geoquímica de Au
	Concentración geoquímica de Cu
	Concentración geoquímica de Pb
	Concentración geoquímica de Zn
	Concentración geoquímica de Mo

CRITERIO REVISIÓN DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS
Proximidad a rocas intrusivas y a fallas geológicas
Mapas geofísicos (magnetometría y aeromagnetometría)
Mapa de alteraciones hidrotermales de argílica y óxidos de Fe
Geoquímica de sedimentos de corriente
Intersecciones con fallas de alto ángulo
Buffer a rocas intrusivas (500 m), zonas alteración (3000 m), diques (2500 m)
Distancia, densidad y dirección de fallas
Geoquímica de elementos: Au, Ag, Cu, Mo, Pb, Zn
Geoquímica de concentración de metales (Cu, Pb y Mo)
Primera derivada vertical magnética
Distancia a intrusivos, fallas y roca caja en intervalos de 500 m
Distancia a márgenes batolíticos de granodiorita, diorita
Distancia a fallas/fracturas de tendencia NS, SE, NW, EW
Geoquímica de Cu y Zn

RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto

CRITERIO YACIMIENTOS MINERALES	
Proximidad a rocas plutónicas	
Proximidad a rocas volcánicas	
Proximidad a fallas geológicas	
Proximidad a contactos de terrenos litotectónicos	
Proximidad a contactos litológicos	
Campo magnético residual	
Primera derivada del campo magnético residual	
Concentración geoquímica de Au	
Concentración geoquímica de Cu	
Concentración geoquímica de Pb	
Concentración geoquímica de Zn	
Concentración geoquímica de Mo	

CRITERIO REVISIÓN DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS
Proximidad a rocas intrusivas y a fallas geológicas
Mapas geofísicos (magnetometría y aeromagnetometría)
Mapa de alteraciones hidrotermales de argílica y óxidos de Fe
Geoquímica de sedimentos de corriente
Intersecciones con fallas de alto ángulo
Buffer a rocas intrusivas (500 m), zonas alteración (3000 m), diques (2500 m)
Distancia, densidad y dirección de fallas
Geoquímica de elementos: Au, Ag, Cu, Mo, Pb, Zn
Geoquímica de concentración de metales (Cu, Pb y Mo)
Primera derivada vertical magnética
Distancia a intrusivos, fallas y roca caja en intervalos de 500 m
Distancia a márgenes batolíticos de granodiorita, diorita
Distancia a fallas/fracturas de tendencia NS, SE, NW, EW
Geoquímica de Cu y Zn

RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto

CRITERIO YACIMIENTOS MINERALES	
Proximidad a rocas plutónicas	
Proximidad a rocas volcánicas	
Proximidad a fallas geológicas	
Proximidad a contactos de terrenos litotectónicos	
Proximidad a contactos litológicos	
Campo magnético residual	
Primera derivada del campo magnético residual	
Concentración geoquímica de Au	
Concentración geoquímica de Cu	
Concentración geoquímica de Pb	
Concentración geoquímica de Zn	
Concentración geoquímica de Mo	

CRITERIO REVISIÓN DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS
Proximidad a rocas intrusivas y a fallas geológicas
Mapas geofísicos (magnetometría y aeromagnetometría)
Mapa de alteraciones hidrotermales de argílica y óxidos de Fe
Geoquímica de sedimentos de corriente
Intersecciones con fallas de alto ángulo
Buffer a rocas intrusivas (500 m), zonas alteración (3000 m), diques (2500 m)
Distancia, densidad y dirección de fallas
Geoquímica de elementos: Au, Ag, Cu, Mo, Pb, Zn
Geoquímica de concentración de metales (Cu, Pb y Mo)
Primera derivada vertical magnética
Distancia a intrusivos, fallas y roca caja en intervalos de 500 m
Distancia a márgenes batolíticos de granodiorita, diorita
Distancia a fallas/fracturas de tendencia NS, SE, NW, EW
Geoquímica de Cu y Zn

RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto

CRITERIO YACIMIENTOS MINERALES	
	Proximidad a rocas plutónicas
	Proximidad a rocas volcánicas
	Proximidad a fallas geológicas
	Proximidad a contactos de terrenos litotectónicos
	Proximidad a contactos litológicos
	Campo magnético residual
	Primera derivada del campo magnético residual
	Concentración geoquímica de Au
	Concentración geoquímica de Cu
	Concentración geoquímica de Pb
	Concentración geoquímica de Zn
	Concentración geoquímica de Mo

CRITERIO REVISIÓN DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS
Proximidad a rocas intrusivas y a fallas geológicas
Mapas geofísicos (magnetometría y aeromagnetometría)
Mapa de alteraciones hidrotermales de argílica y óxidos de Fe
Geoquímica de sedimentos de corriente
Intersecciones con fallas de alto ángulo
Buffer a rocas intrusivas (500 m), zonas alteración (3000 m), diques (2500 m)
Distancia, densidad y dirección de fallas
Geoquímica de elementos: Au, Ag, Cu, Mo, Pb, Zn
Geoquímica de concentración de metales (Cu, Pb y Mo)
Primera derivada vertical magnética
Distancia a intrusivos, fallas y roca caja en intervalos de 500 m
Distancia a márgenes batolíticos de granodiorita, diorita
Distancia a fallas/fracturas de tendencia NS, SE, NW, EW
Geoquímica de Cu y Zn

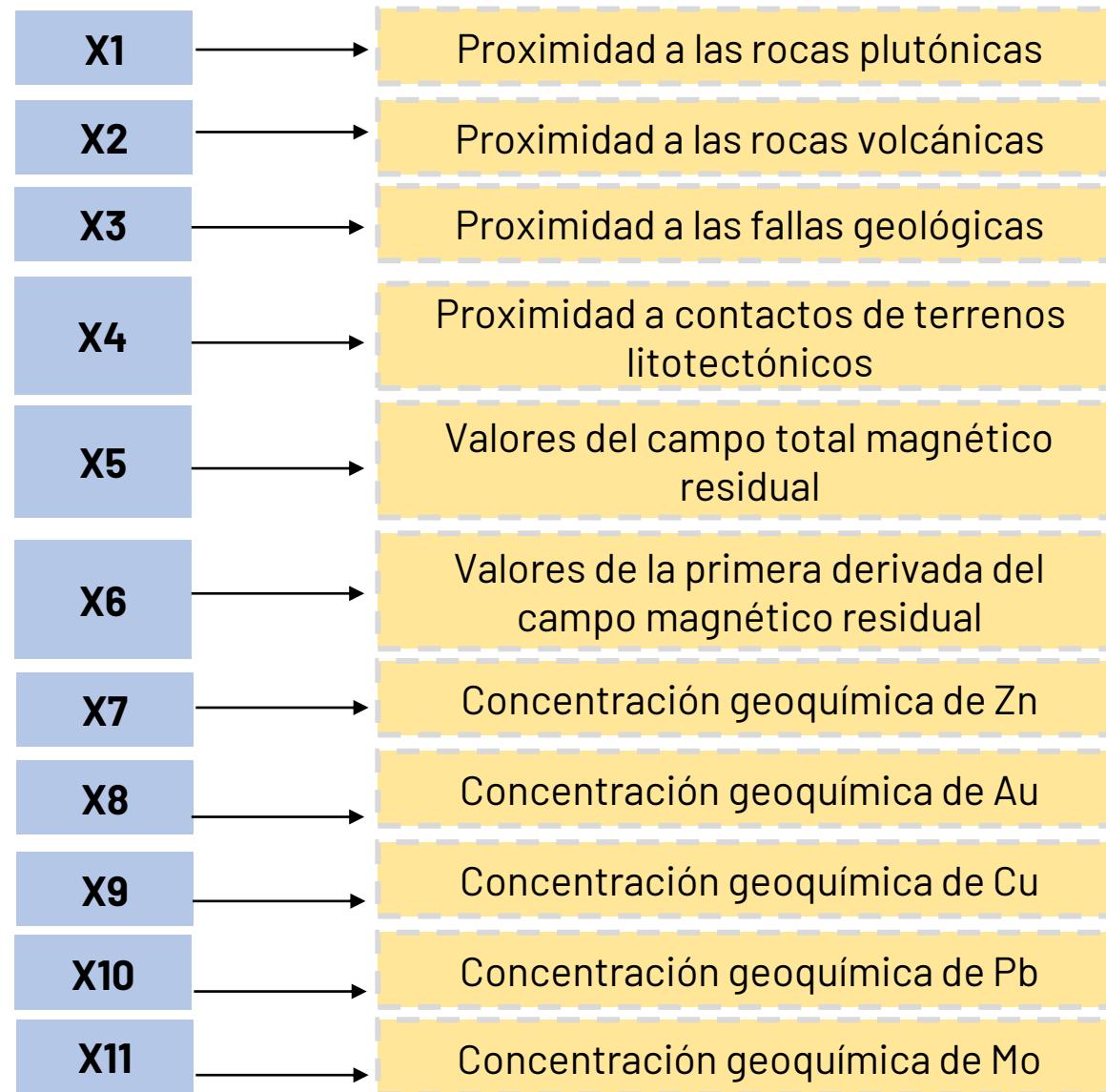
RESULTADOS

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM

Fase 3
Predicción
Propuesta

Conclusiones

Impacto



RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

Predicción

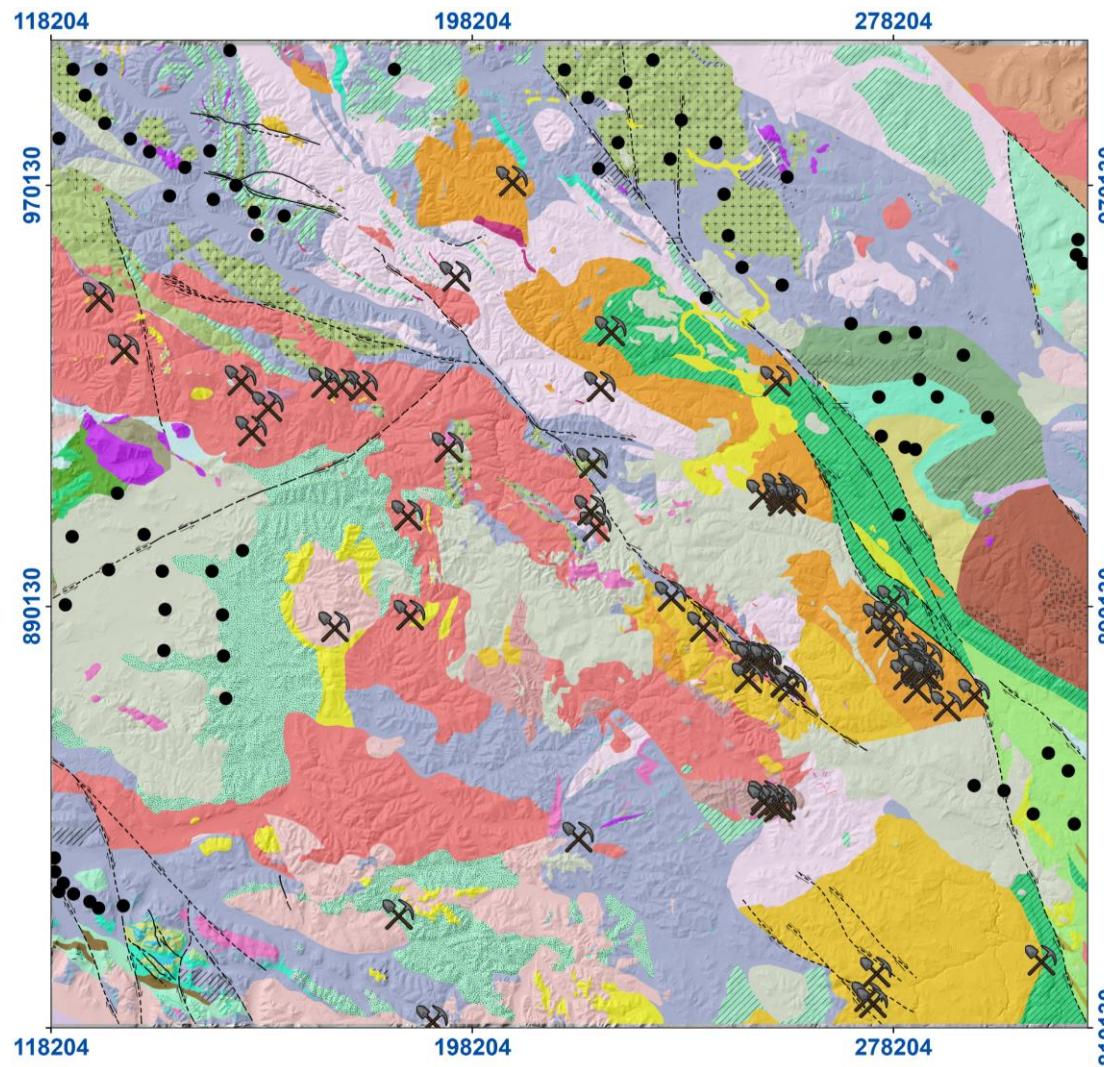
Propuesta

Conclusiones

Impacto

Capas de entrada

**Selección de puntos
no-depósito**



RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

Predicción

Propuesta

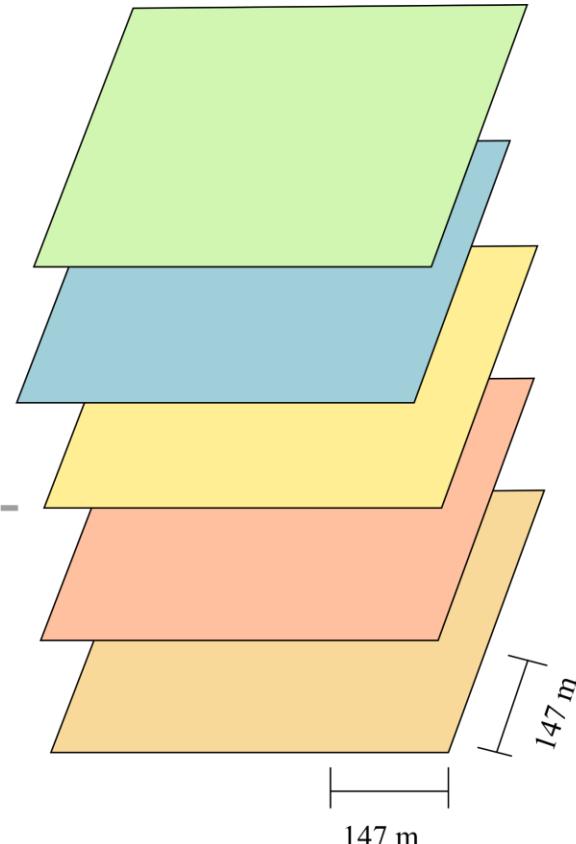
Conclusiones

Impacto

Capas de entrada

**Selección de puntos
no-depósito**

**Selección adecuada
del tamaño de celda
unitaria**



RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

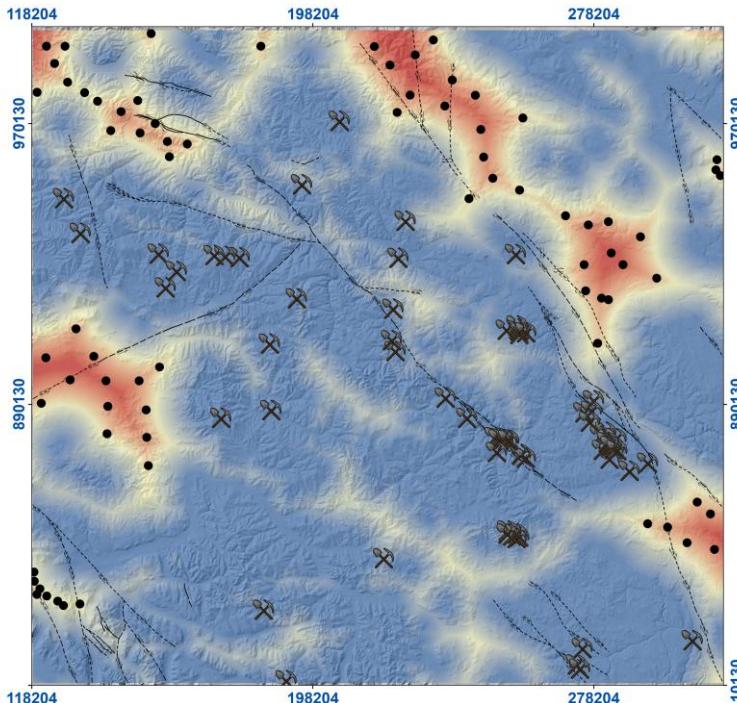
Predicción

Propuesta

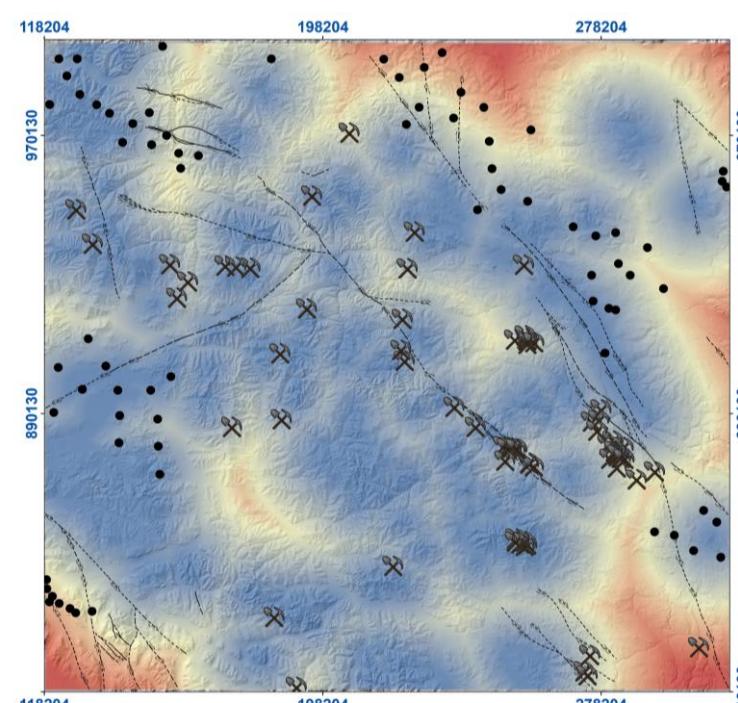
Conclusiones

Impacto

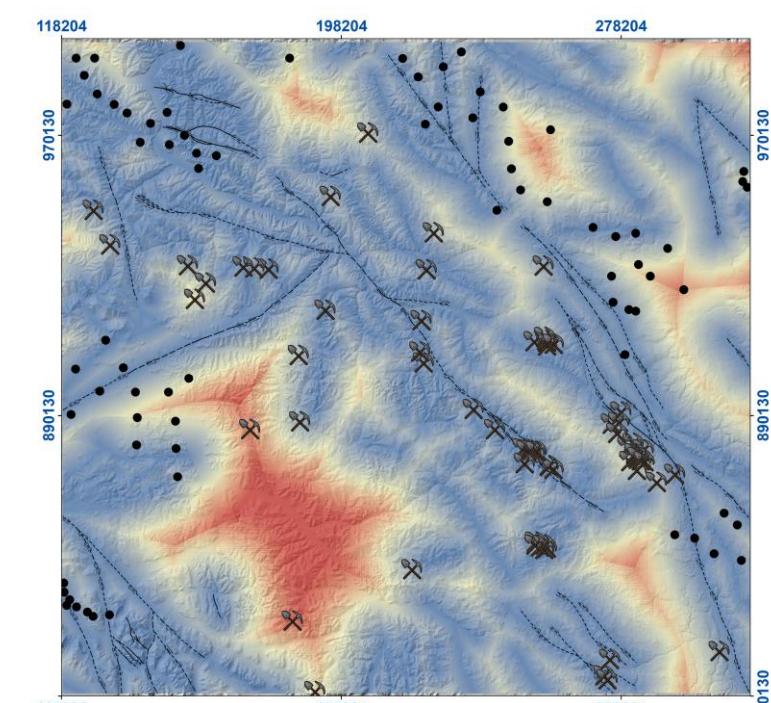
ROCAS VOLCÁNICAS



ROCAS PLUTÓNICAS



FALLAS



RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

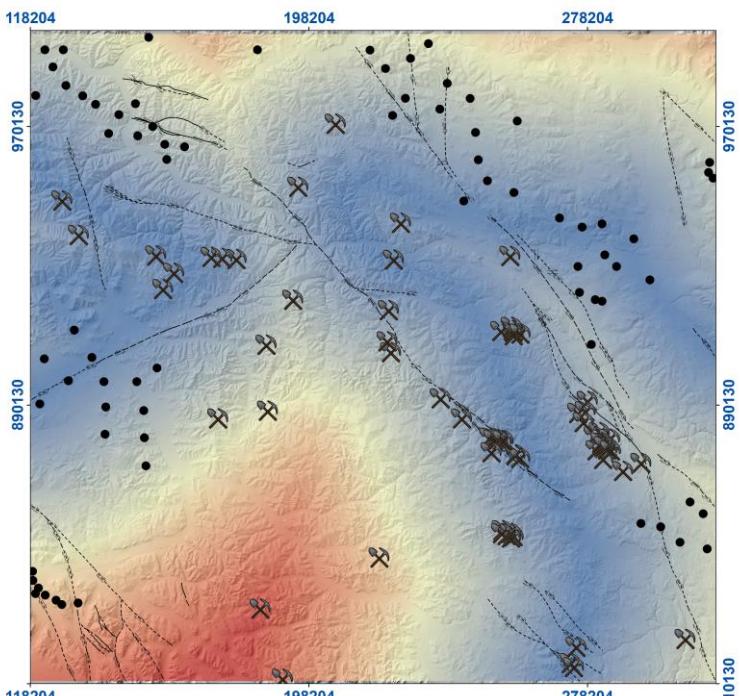
Predicción

Propuesta

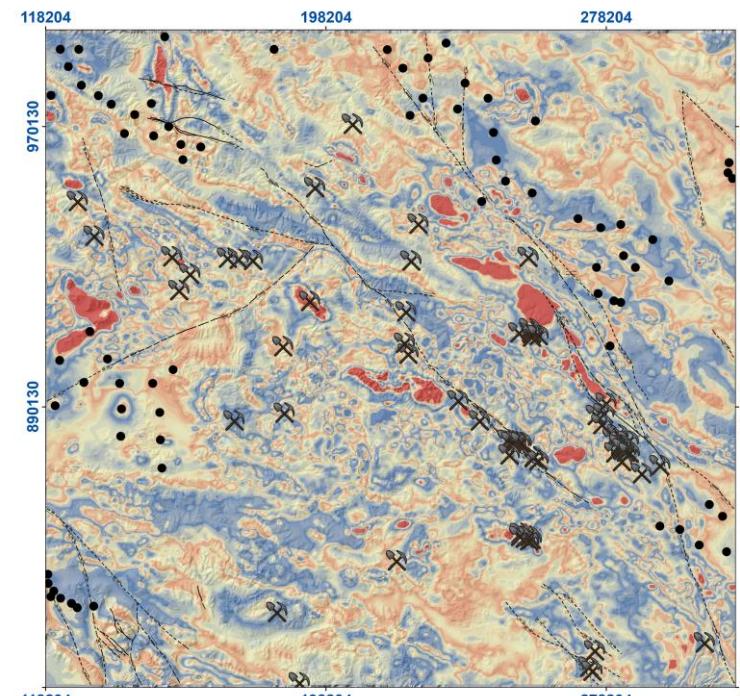
Conclusiones

Impacto

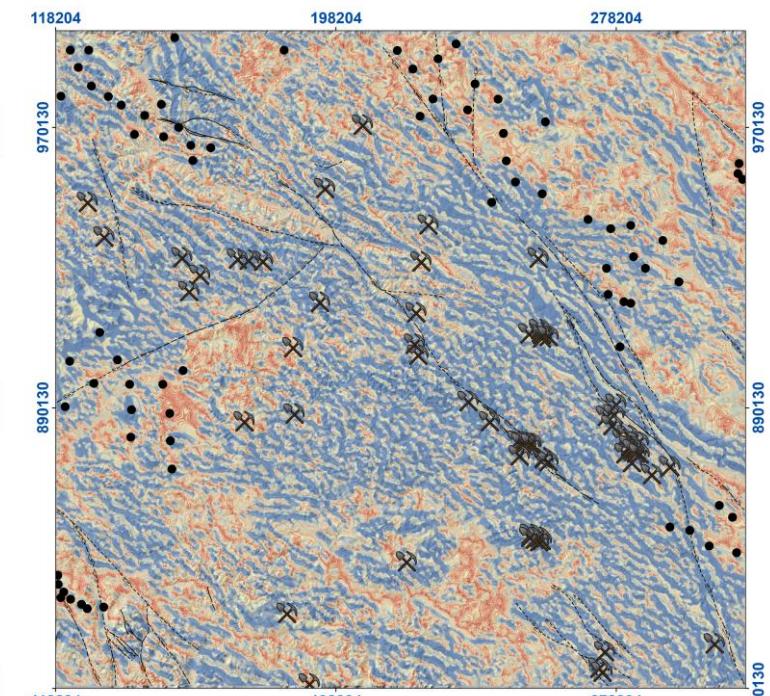
TERRENOS



CAMPO MAGNÉTICO



PRIMERA DERIVADA



RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

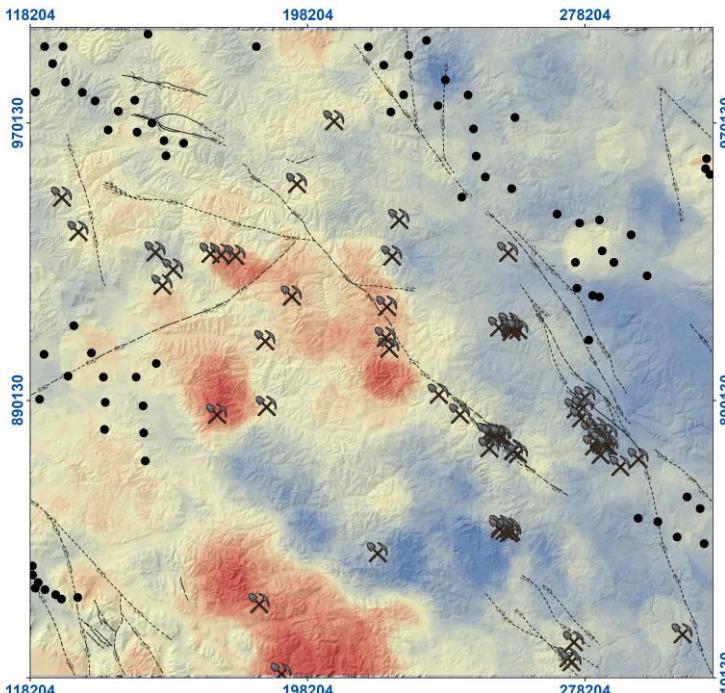
Predicción

Propuesta

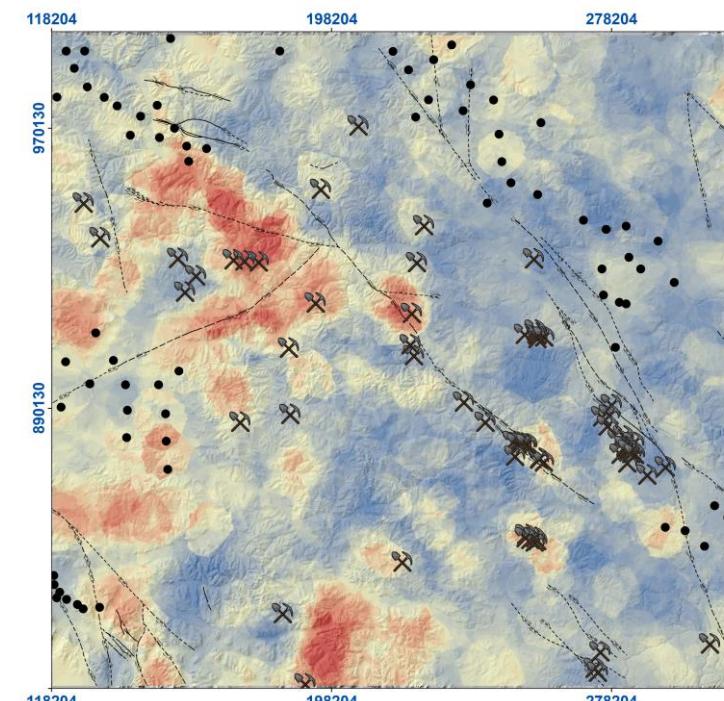
Conclusiones

Impacto

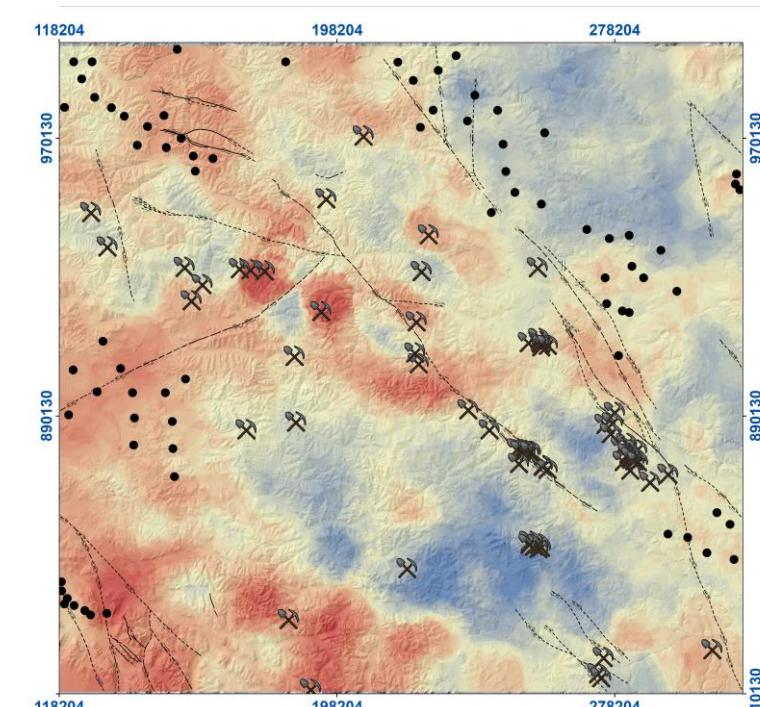
Zn



Au



Cu



RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

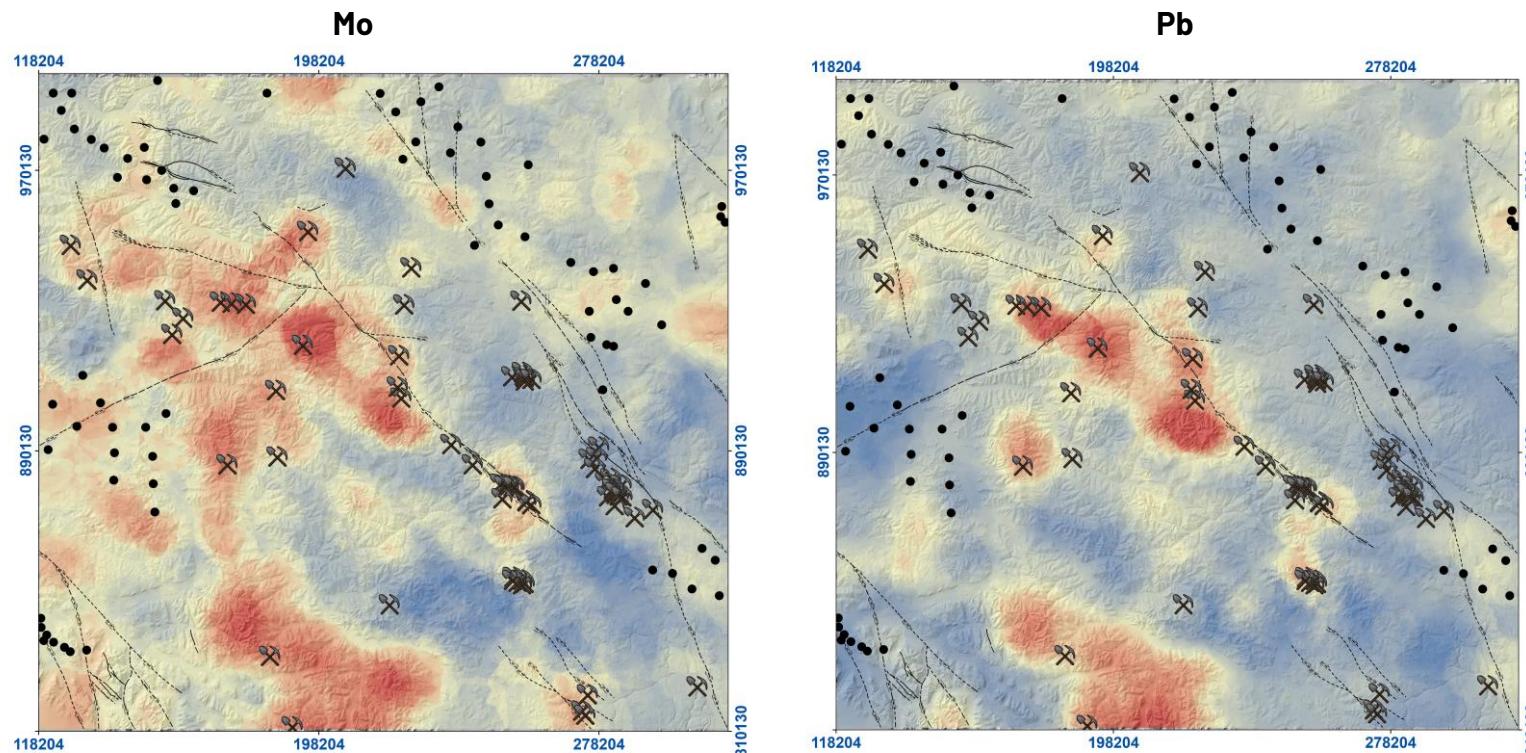
Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto



RESULTADOS

Justificación
Objetivos

Resultados

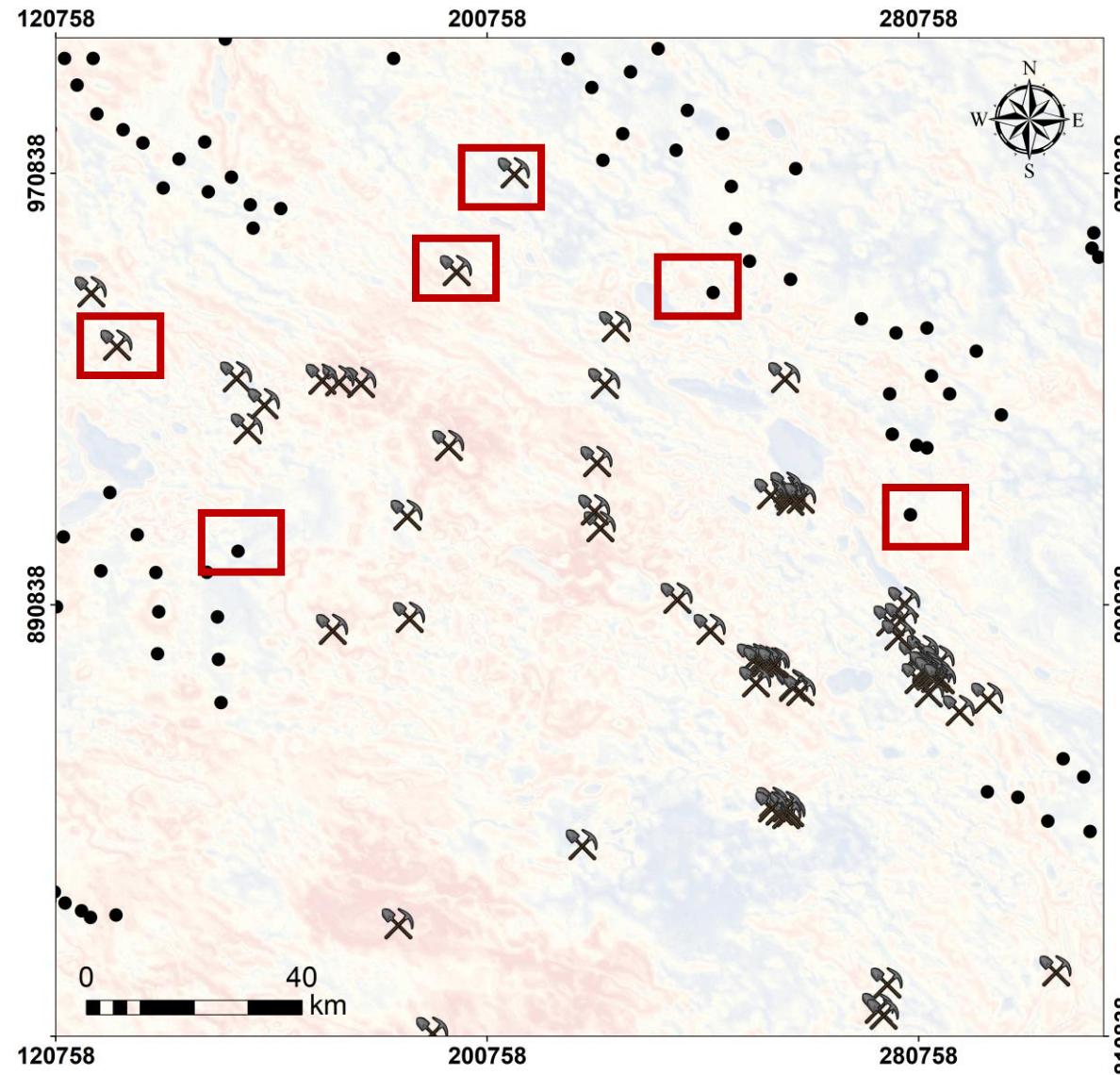
Fase 1

Fase 2
ANN
RF
SVM

Fase 3
Predicción
Propuesta

Conclusiones

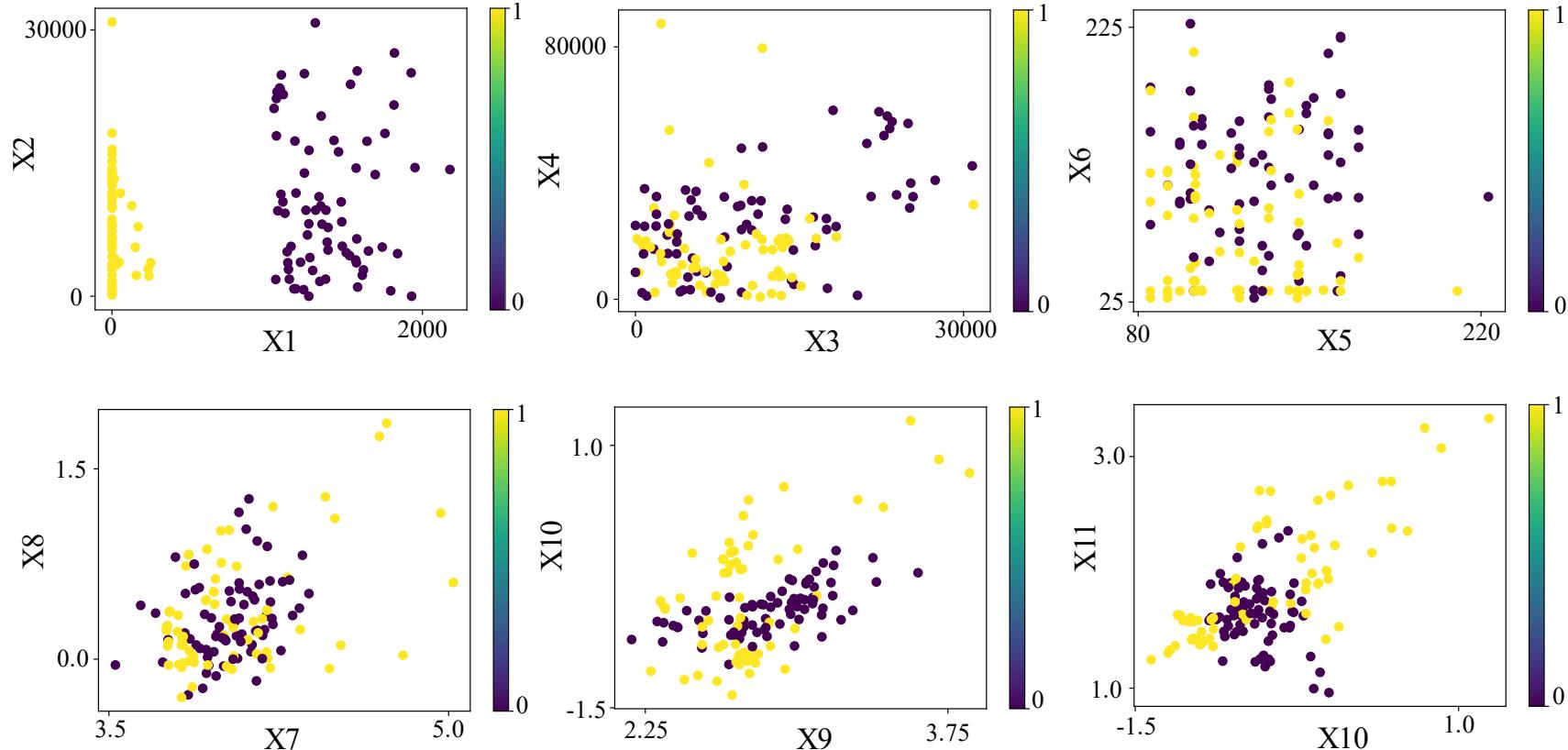
Impacto



RESULTADOS

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto

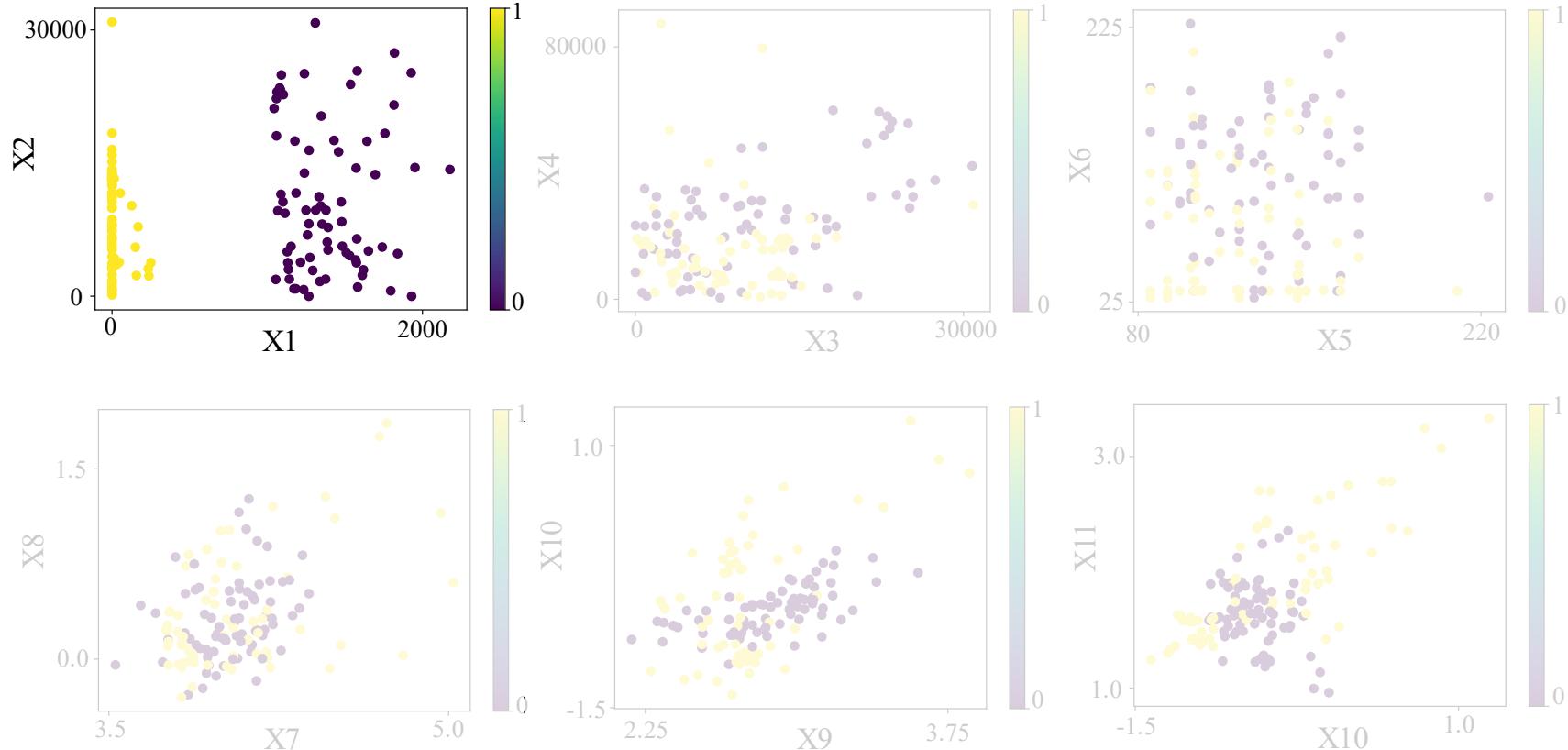
ANÁLISIS ESTADÍSTICO



RESULTADOS

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto

ANÁLISIS ESTADÍSTICO



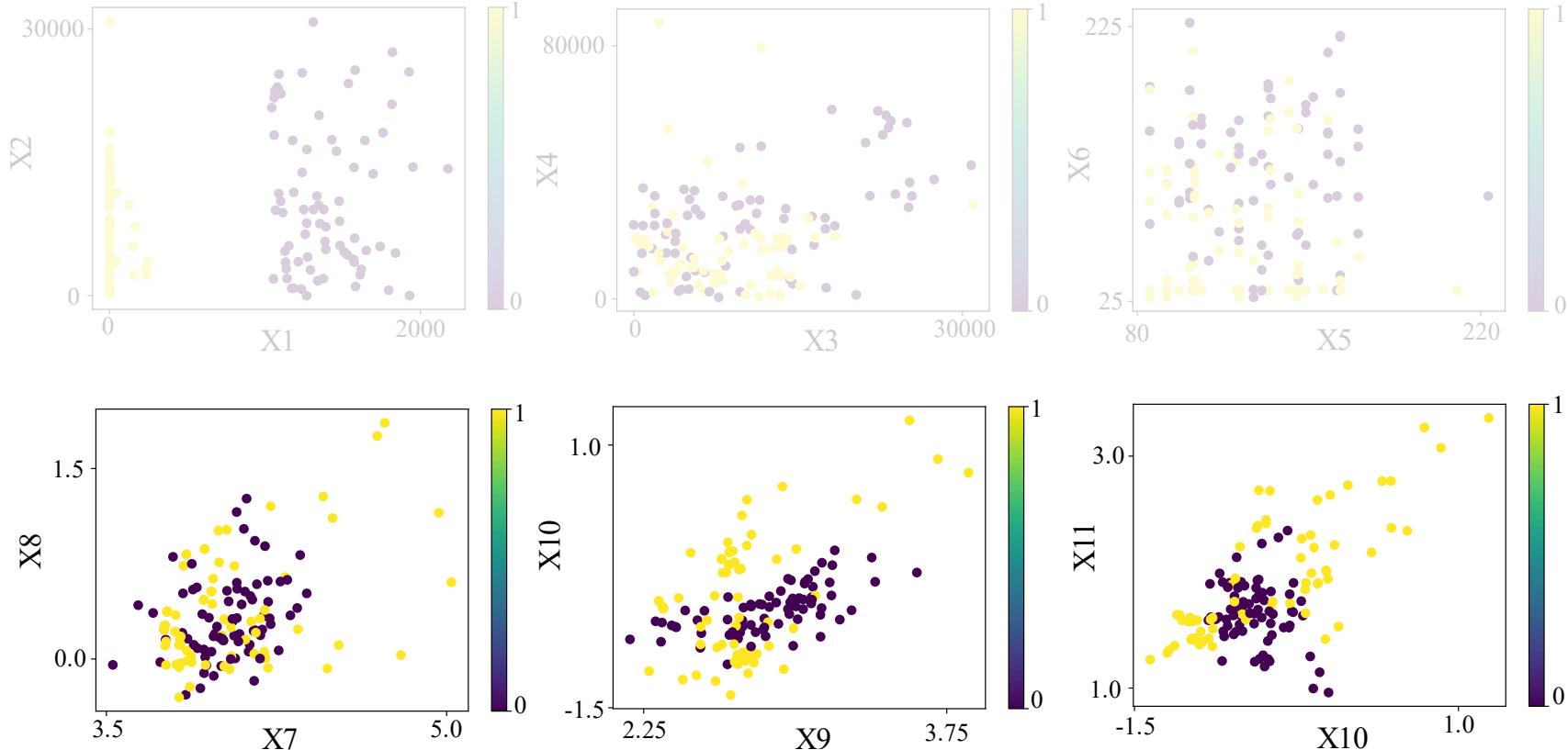
RESULTADOS

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM

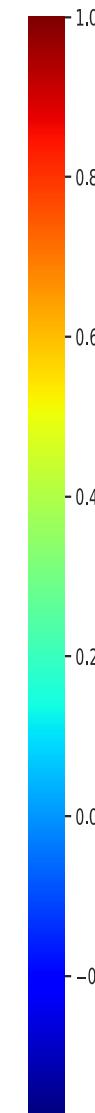
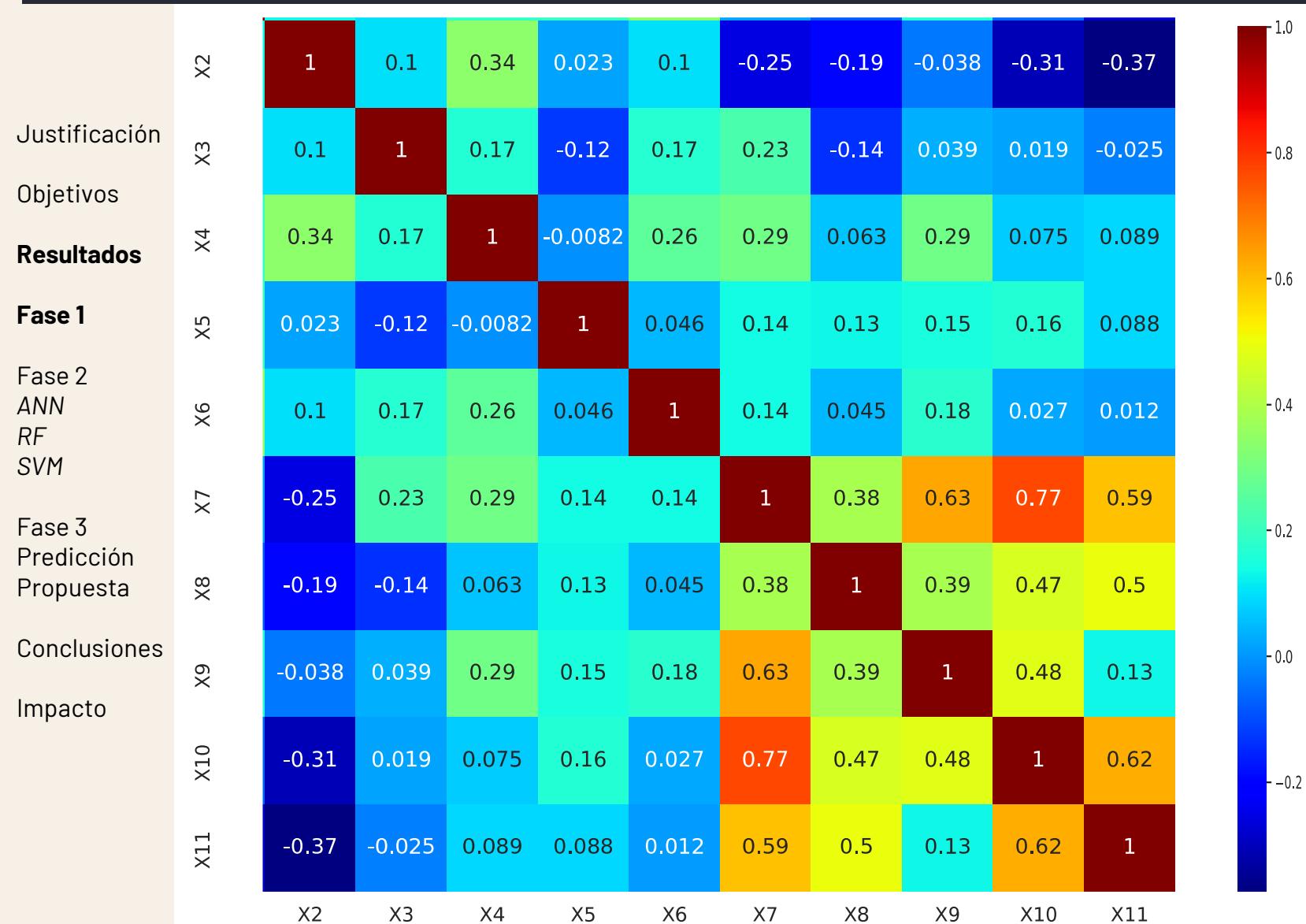
Fase 3
Predicción
Propuesta

Conclusiones
Impacto

ANÁLISIS ESTADÍSTICO



RESULTADOS



Correlación inicial

Valor de r	Fuerza de la correlación
$ r < 0.3$	Ninguna o débil
$0.3 < r < 0.5$	Débil
$0.5 < r < 0.7$	Moderada
$ r > 0.7$	Fuerte

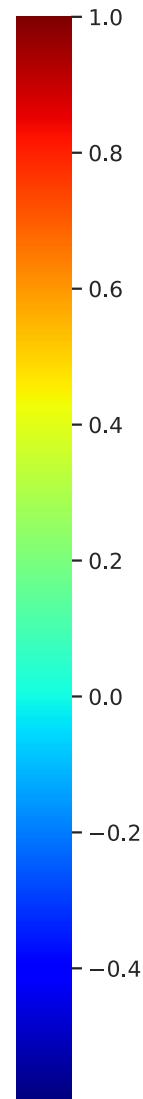
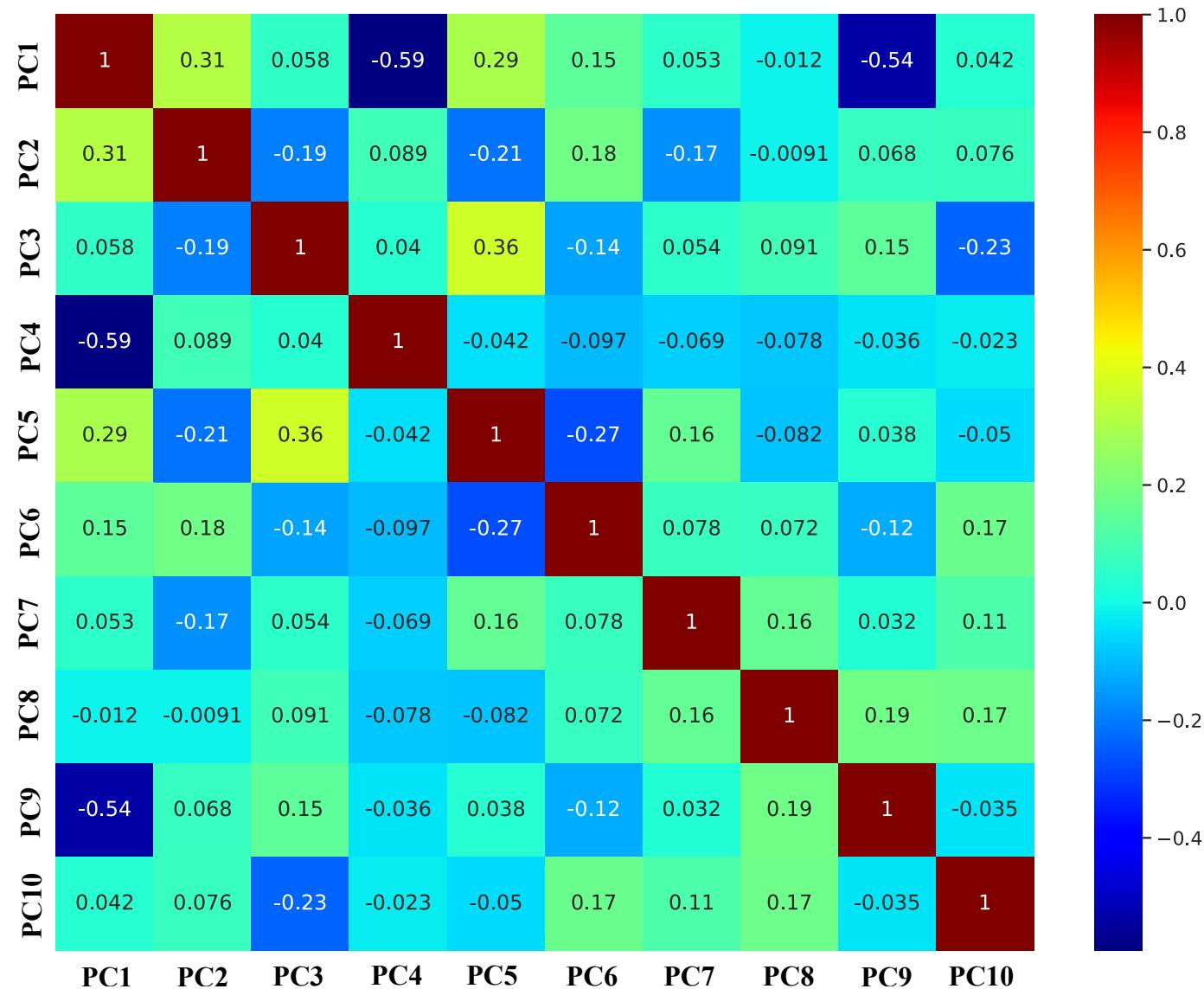
Mindrila & Balentyne (2017).

RESULTADOS

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM

Fase 3
Predicción
Propuesta

Conclusiones
Impacto



Correlación
con PCA

RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

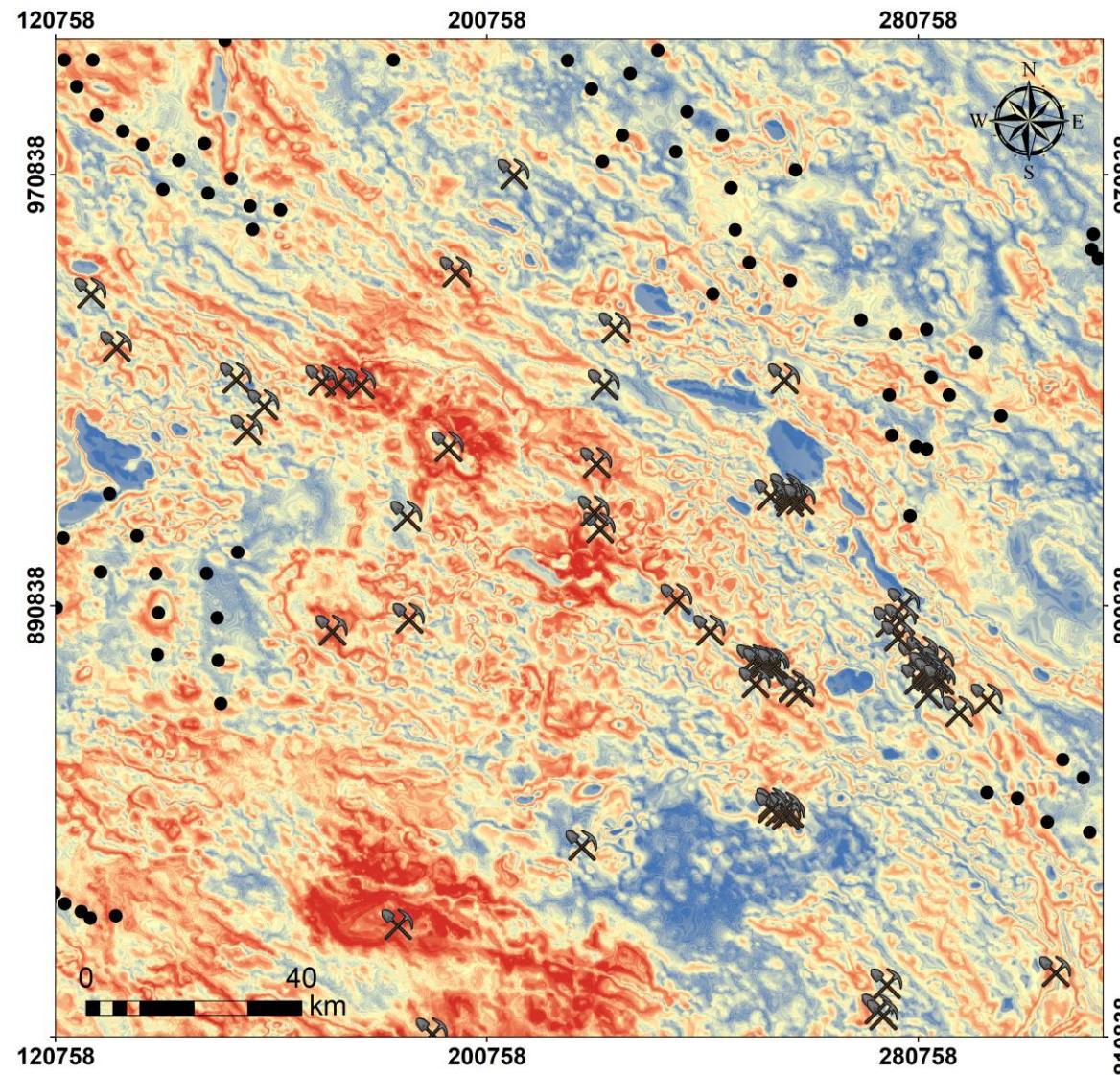
Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto

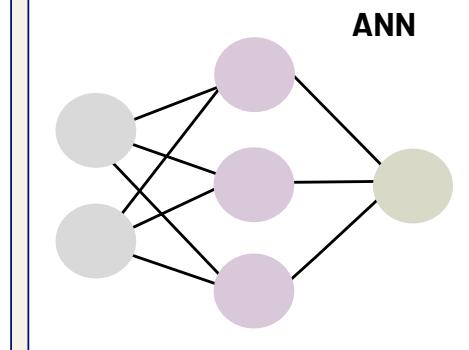
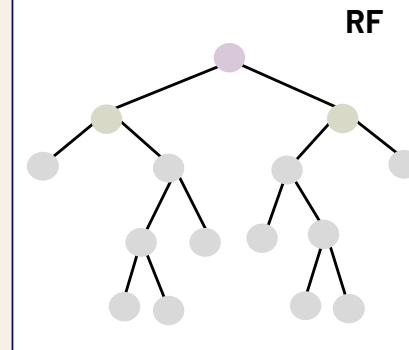
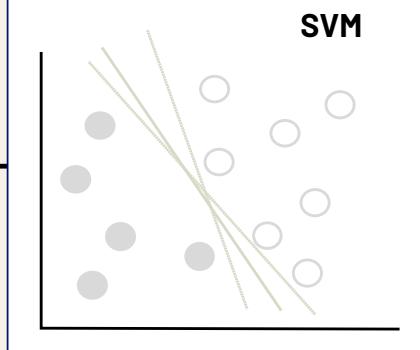


OBJETIVO 1

FASE 2. OBJETIVO 2

Entrenar los
modelos y evaluar
métricas

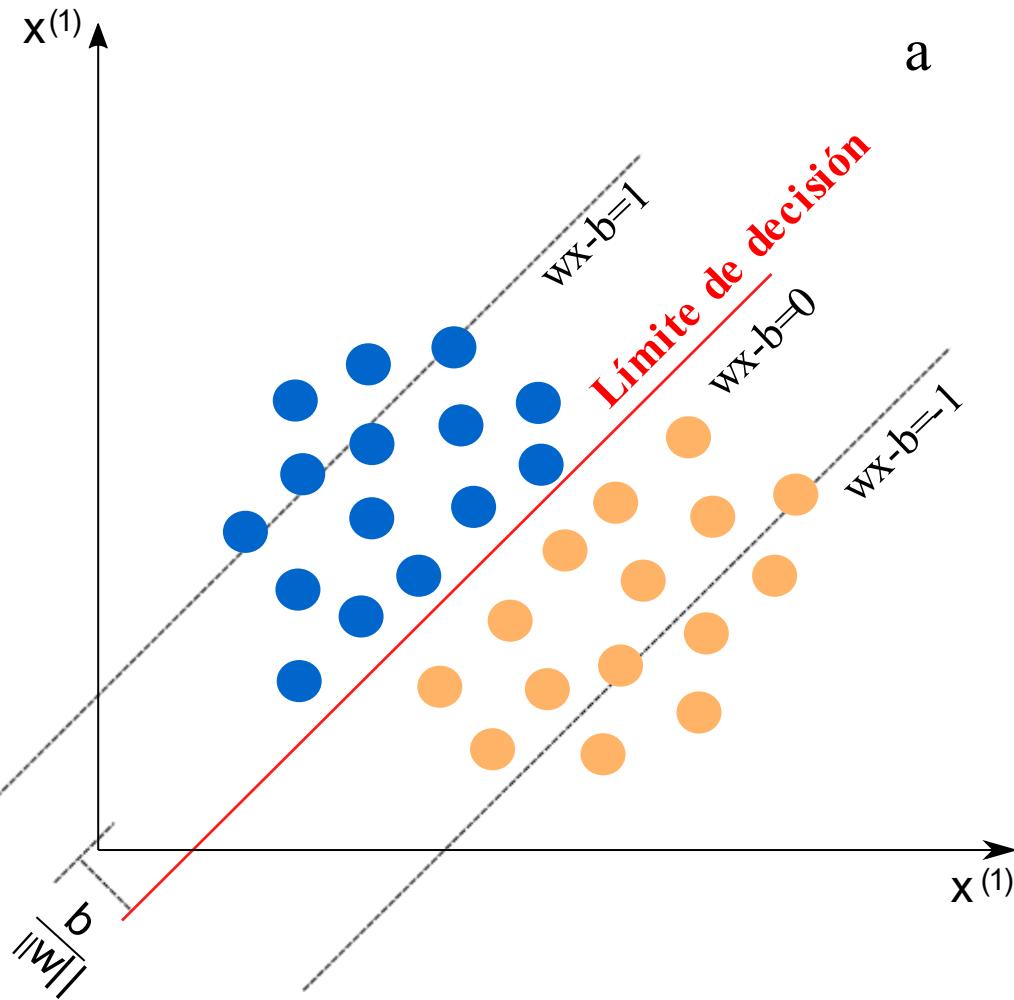
Entrenar los modelos y analizar subajuste y sobreajuste



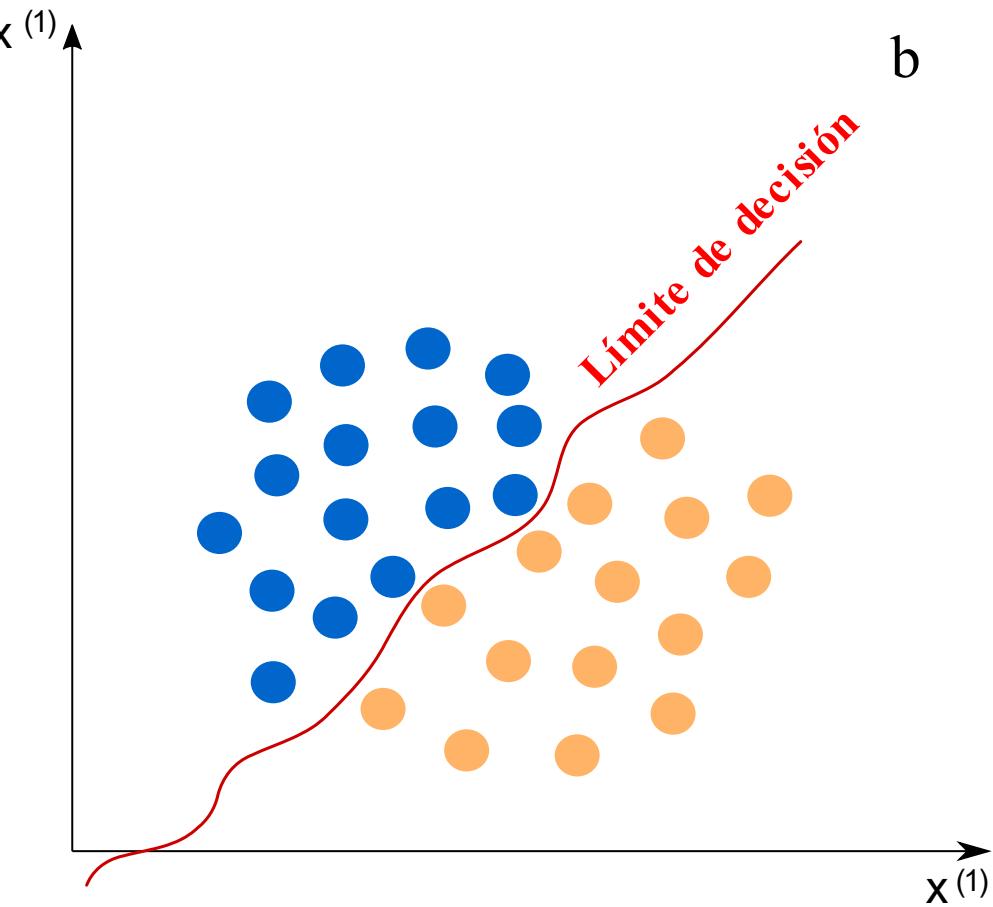
Estandarizar las
variables

RESULTADOS

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto



a



b

RESULTADOS: MODELO 1- ANN

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

Predicción

Propuesta

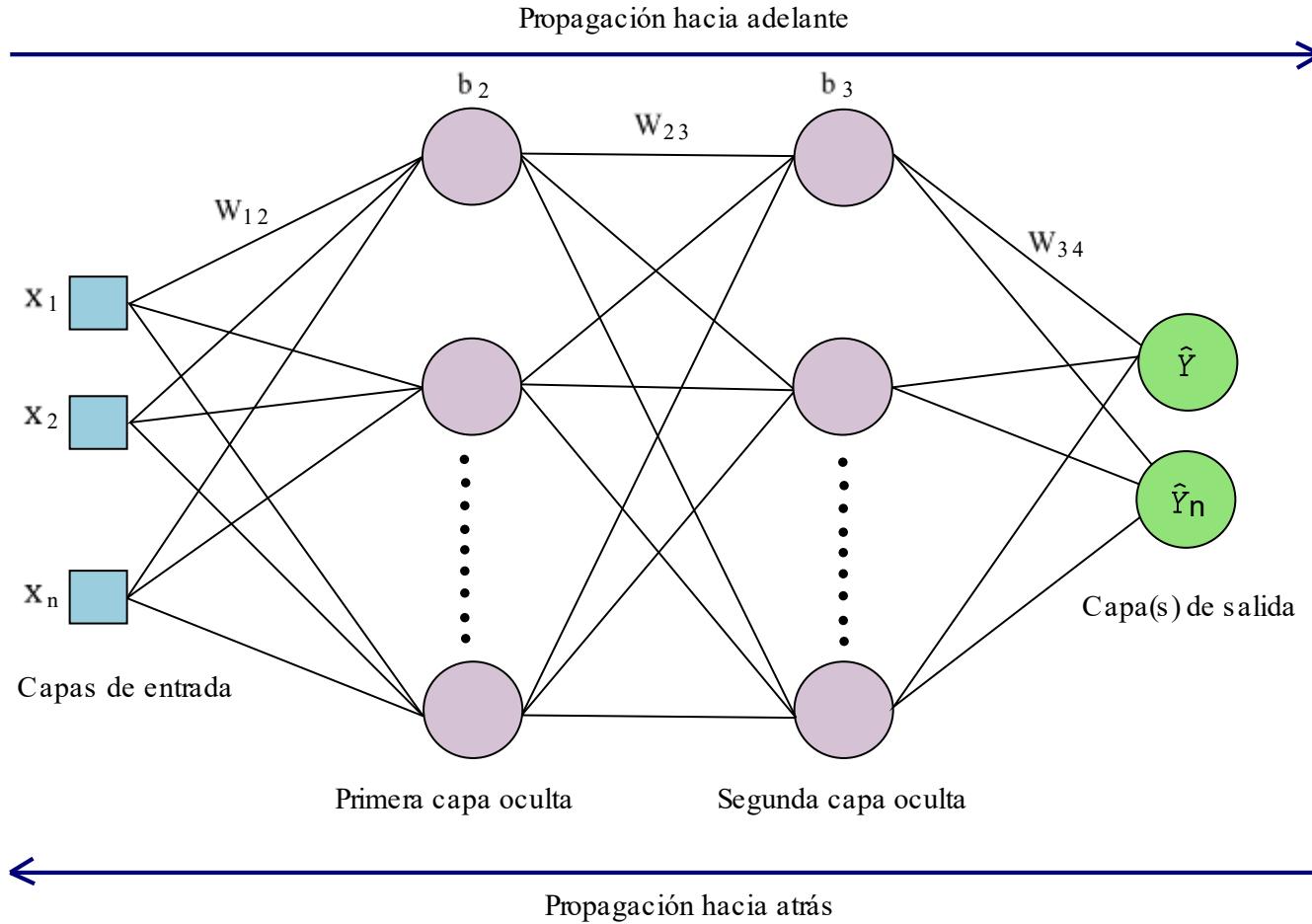
Conclusiones

Impacto



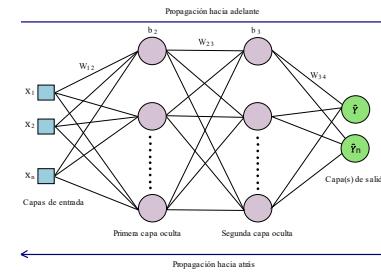
RESULTADOS: MODELO 1 - ANN

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto

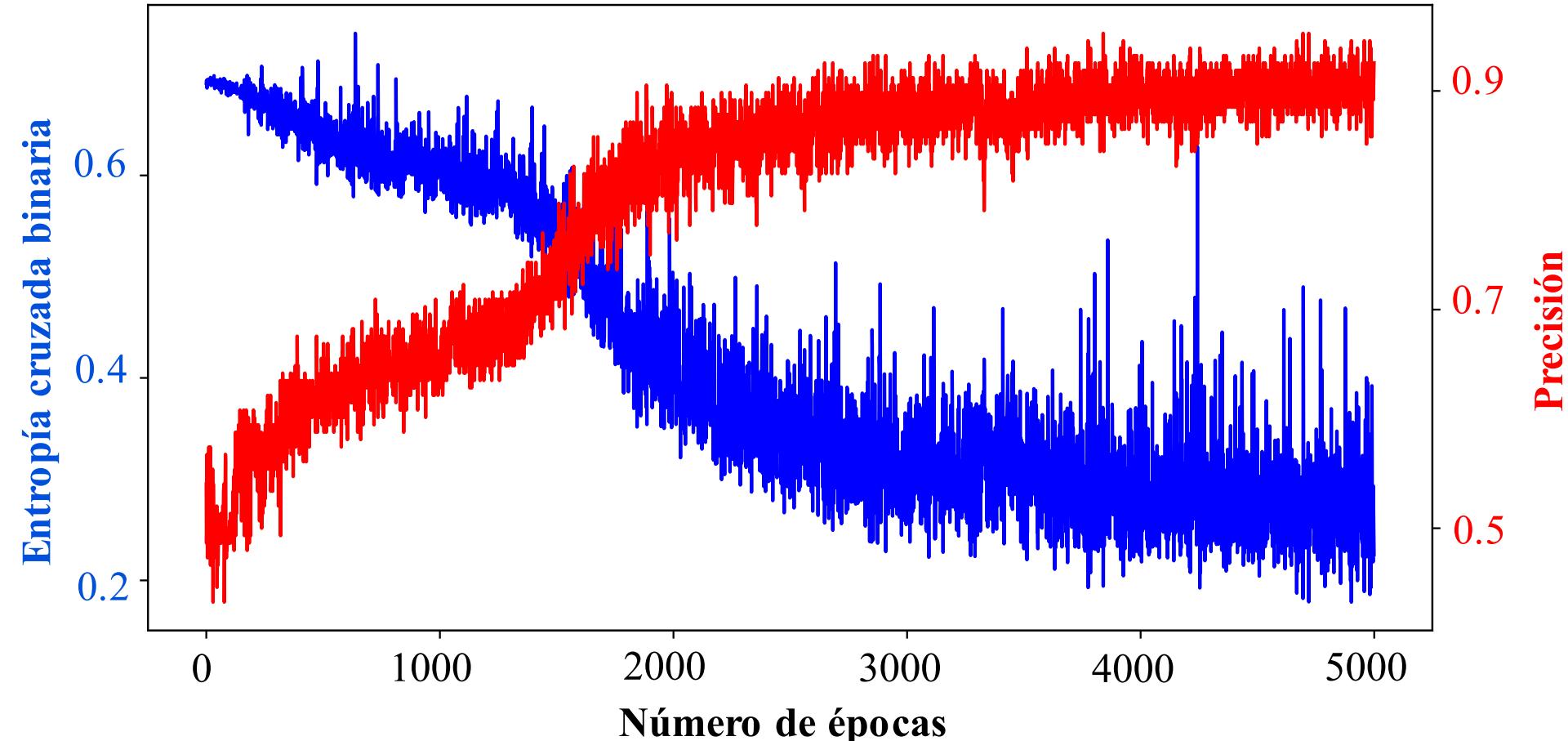


Hiperparámetros	Descripción
Variables de entrada	10
Capas ocultas	10
Dropout	0.2 (entre cada capa oculta)
Neuronas requeridas en cada capa oculta	10
Función de activación capas ocultas	ReLU
Función de activación capa de salida	Sigmoide
Optimizador	Adam
Tasa de aprendizaje	1×10^{-3}
Función de pérdida	Entropía cruzada binaria
Métricas	Precisión, ROC, AUC, matriz de confusión
Épocas	5000

RESULTADOS: MODELO 1 - ANN



Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto



Precisión: 94.59 %
Loss: 0.1688

RESULTADOS: MODELO 2 - *RF*

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

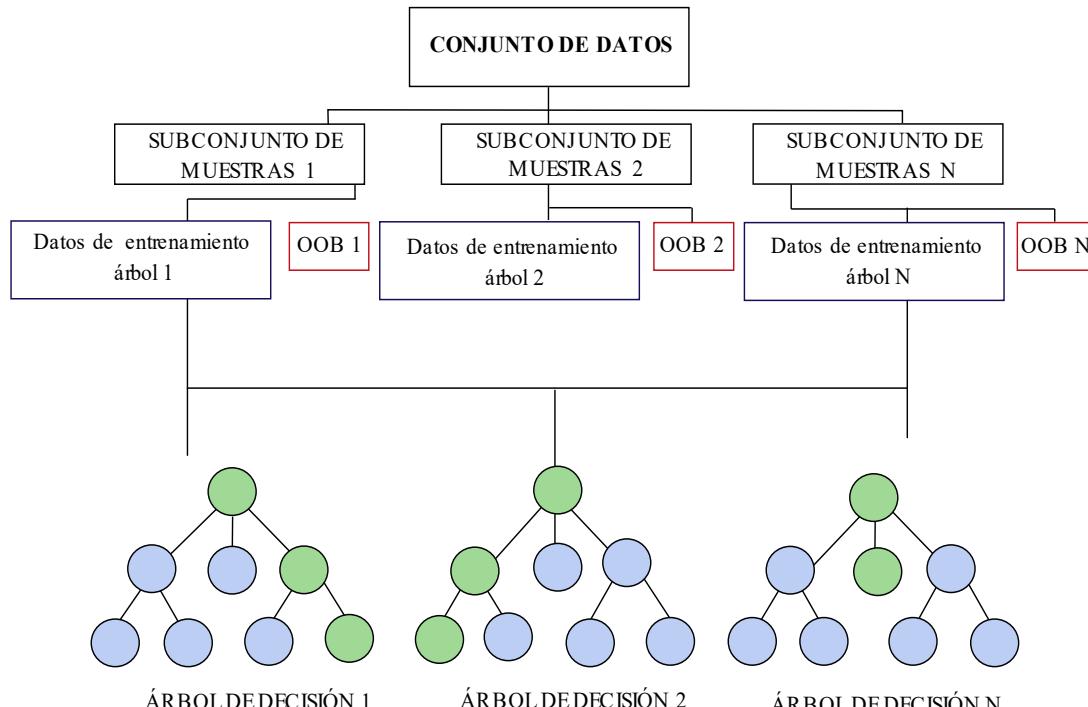
Fase 3

Predicción

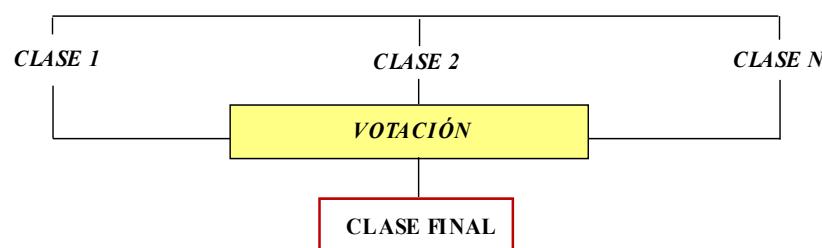
Propuesta

Conclusiones

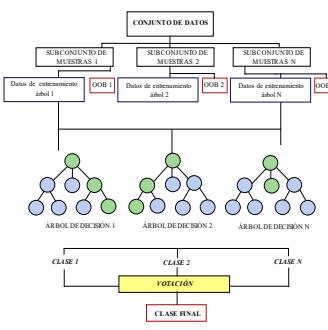
Impacto



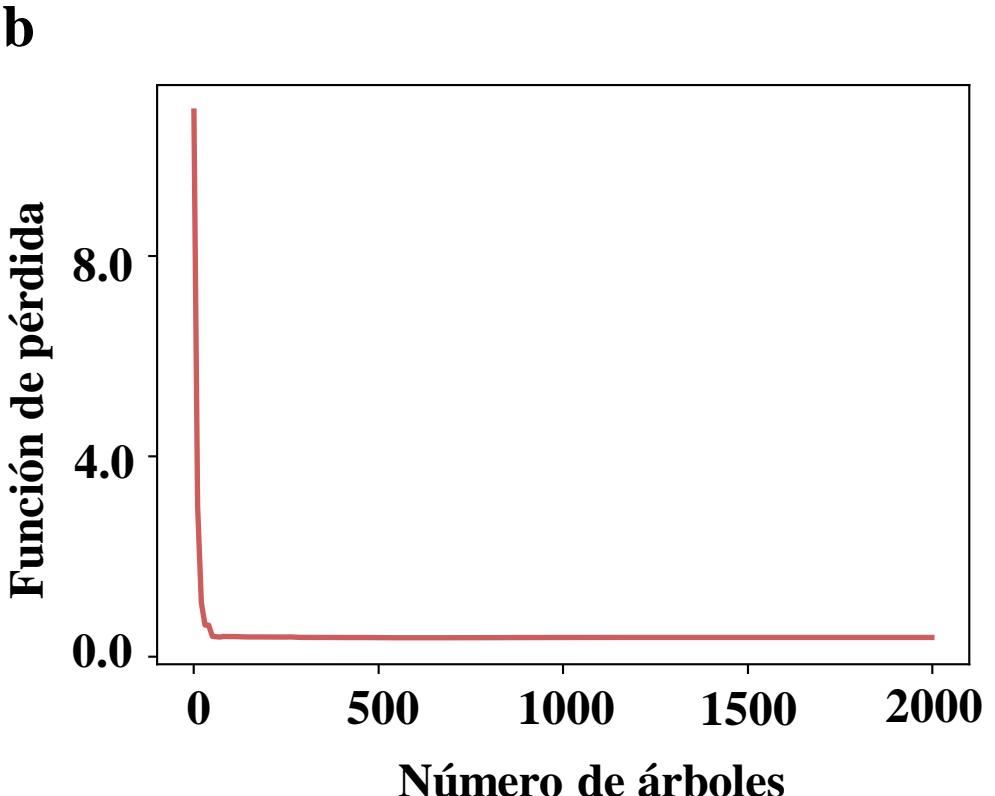
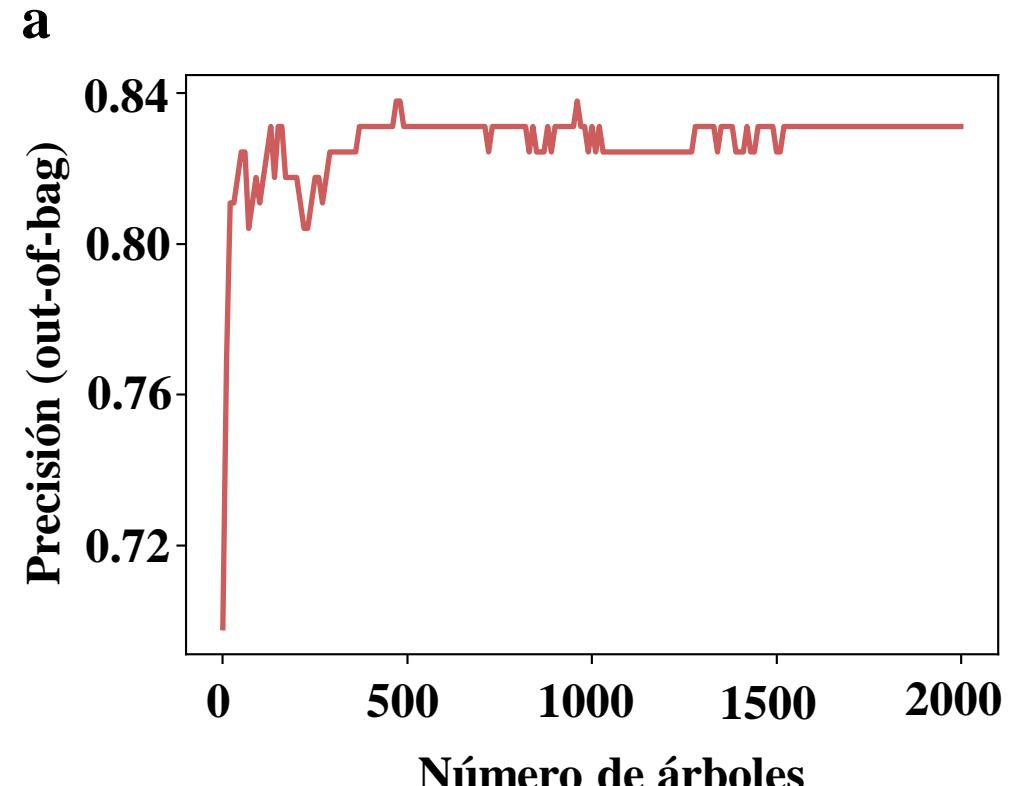
Hiperparámetros	Descripción
Número de árboles de decisión	2000
Algoritmo categórico	CART
Función de pérdida	Entropía cruzada binaria
Métricas	Precisión, ROC, AUC, matriz de confusión



RESULTADOS: MODELO 2 - *RF*



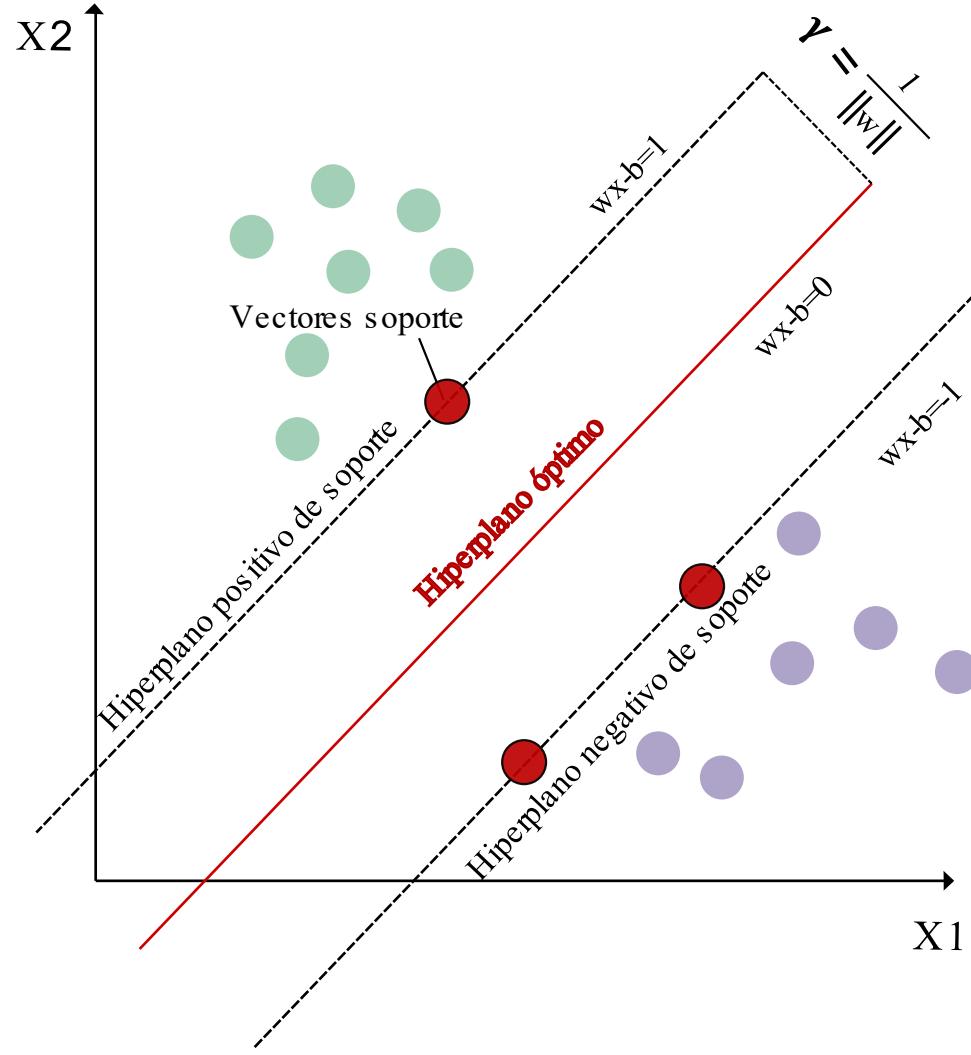
Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto



Precisión: 83.10 %
Loss: 0.3807

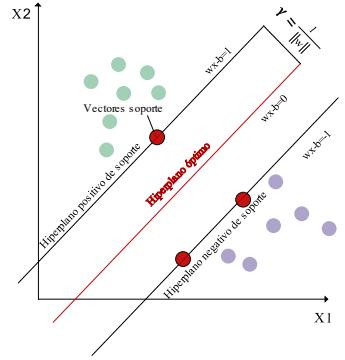
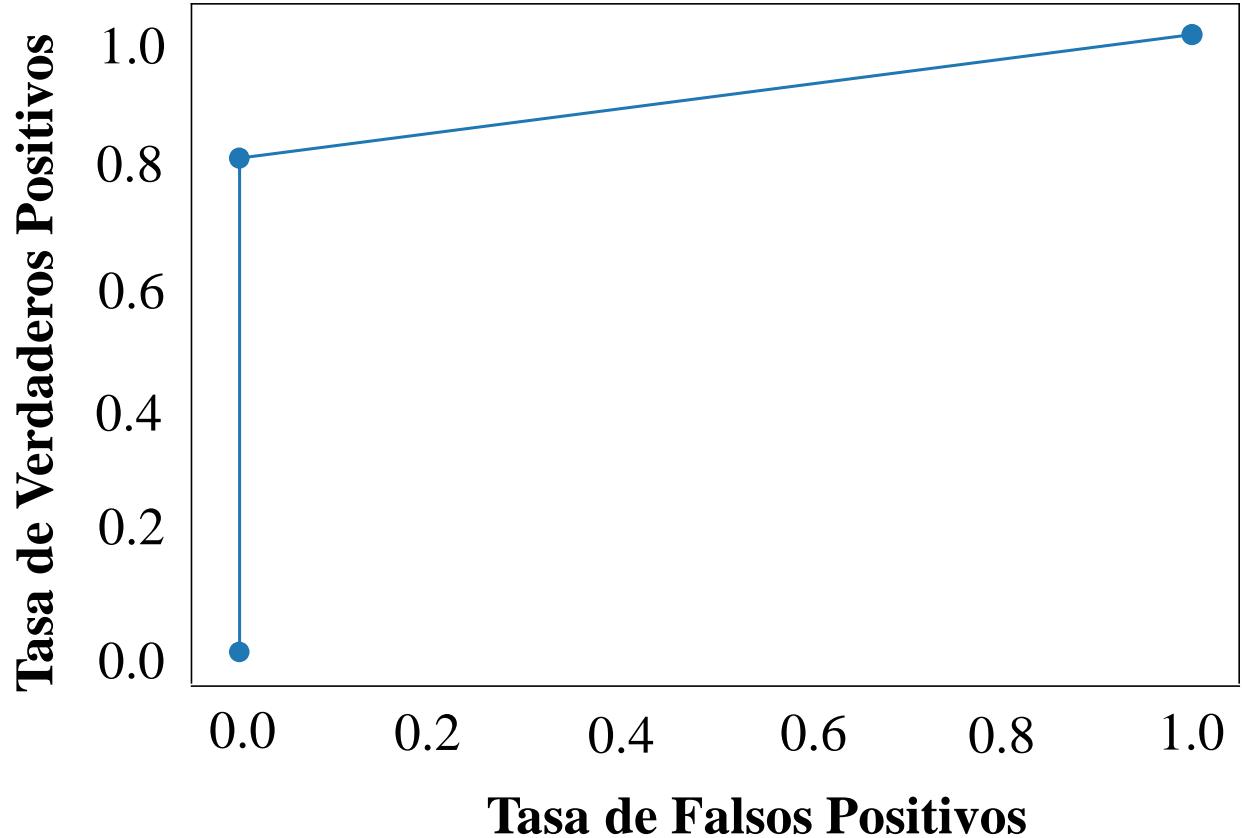
RESULTADOS: MODELO 3- *SVM*

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto



Hiperparámetros	Descripción
C	10
Gamma	0.1
Kernel	rbf (radial basis function)
Métricas	Precisión, ROC, AUC, matriz de confusión

RESULTADOS: MODELO 3- *SVM*



Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto

RESULTADOS: MODELO 3- *SVM*

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto

REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Precisión: 94.59 %
Loss: 0.1688

BOSQUES ALEATORIOS

Precisión: 83.10 %
Loss: 0.3807

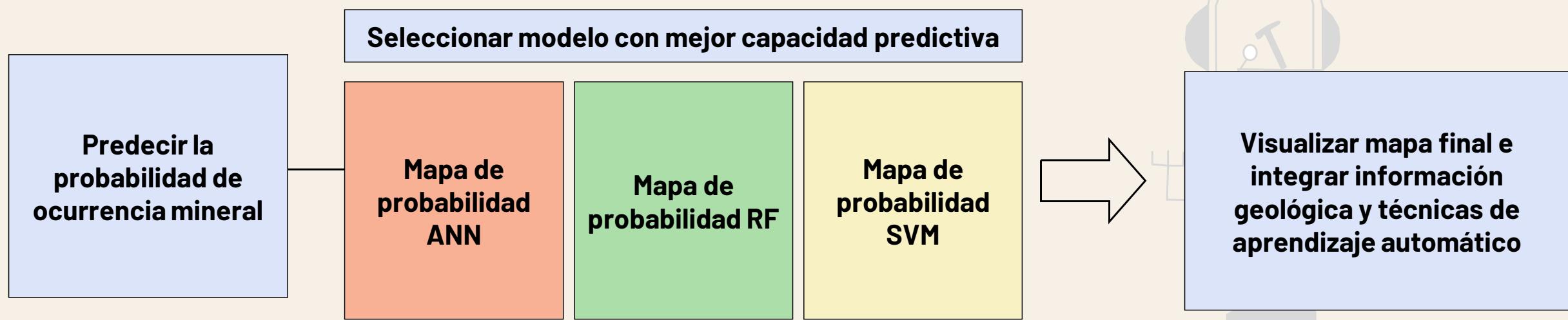
MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL

Precisión: 94.59 %
AUC: 0.9

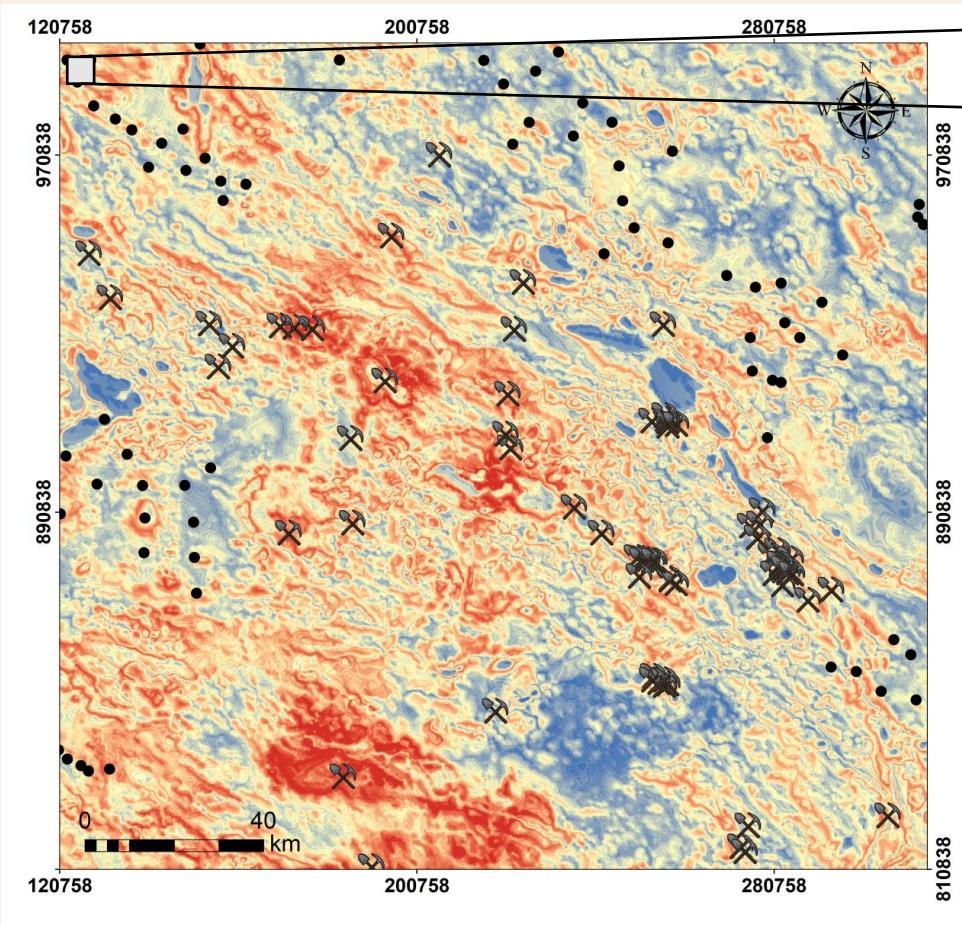


OBJETIVO 2

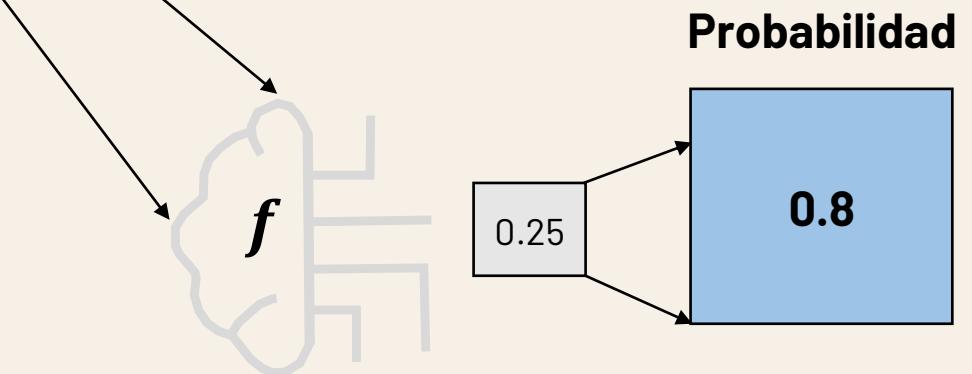
FASE 3. OBJETIVO 3



¿Cómo se realiza la predicción?



0.25



Los datos de entrada del ráster pueden representarse en Python como una matriz

RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

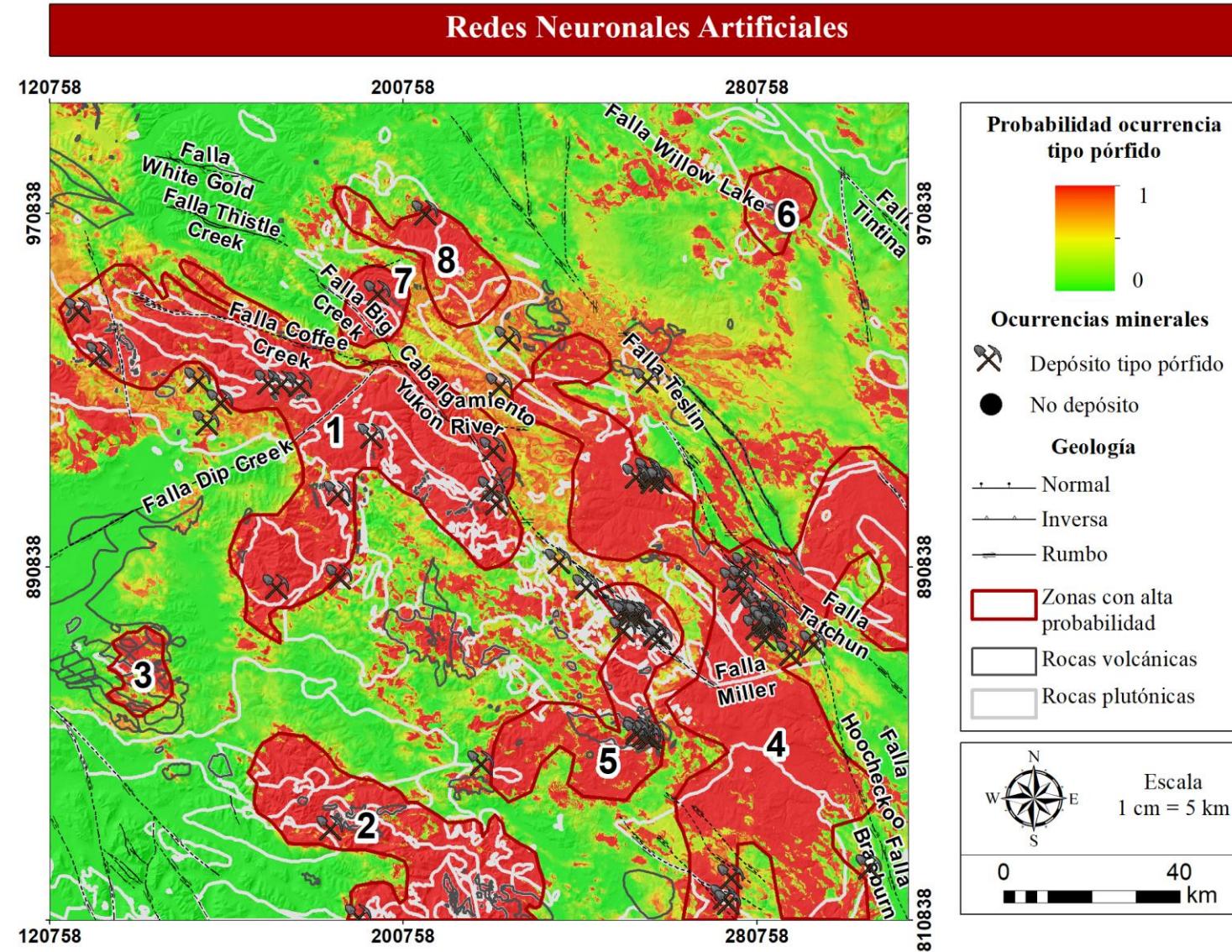
Fase 3

Predicción

Propuesta

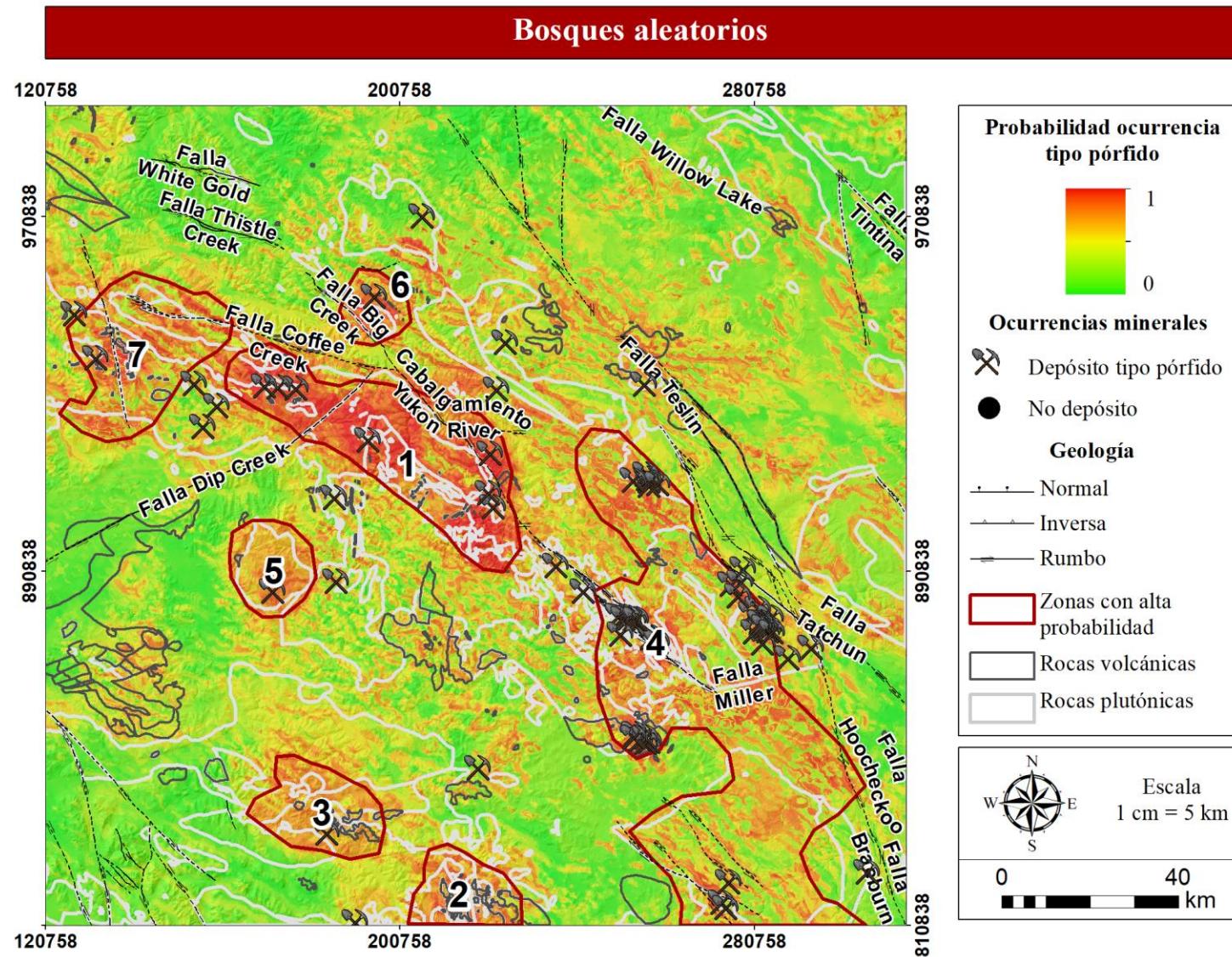
Conclusiones

Impacto



RESULTADOS

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto



RESULTADOS

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

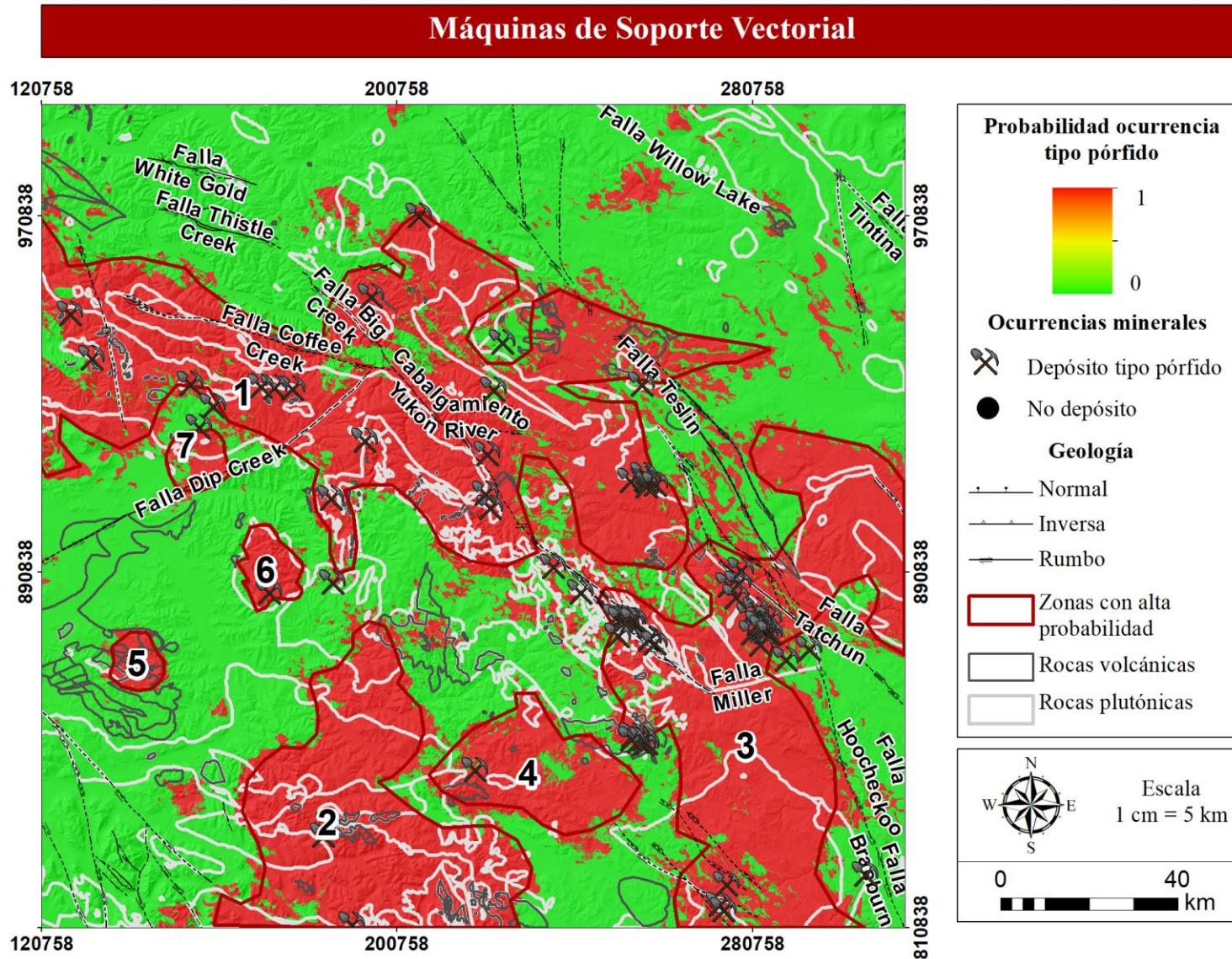
Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto



RESULTADOS



Visualizar mapa final e integrar información geológica y técnicas de aprendizaje automático

Motivo 1 : ¿escoger un solo mapa de probabilidad? ¿con qué criterios?

Motivo 2 : ¿cómo unificar los resultados de aprendizaje automático con la información geológica?

Metodología Propuesta: Aumento de datos

Justificación
Objetivos

Resultados

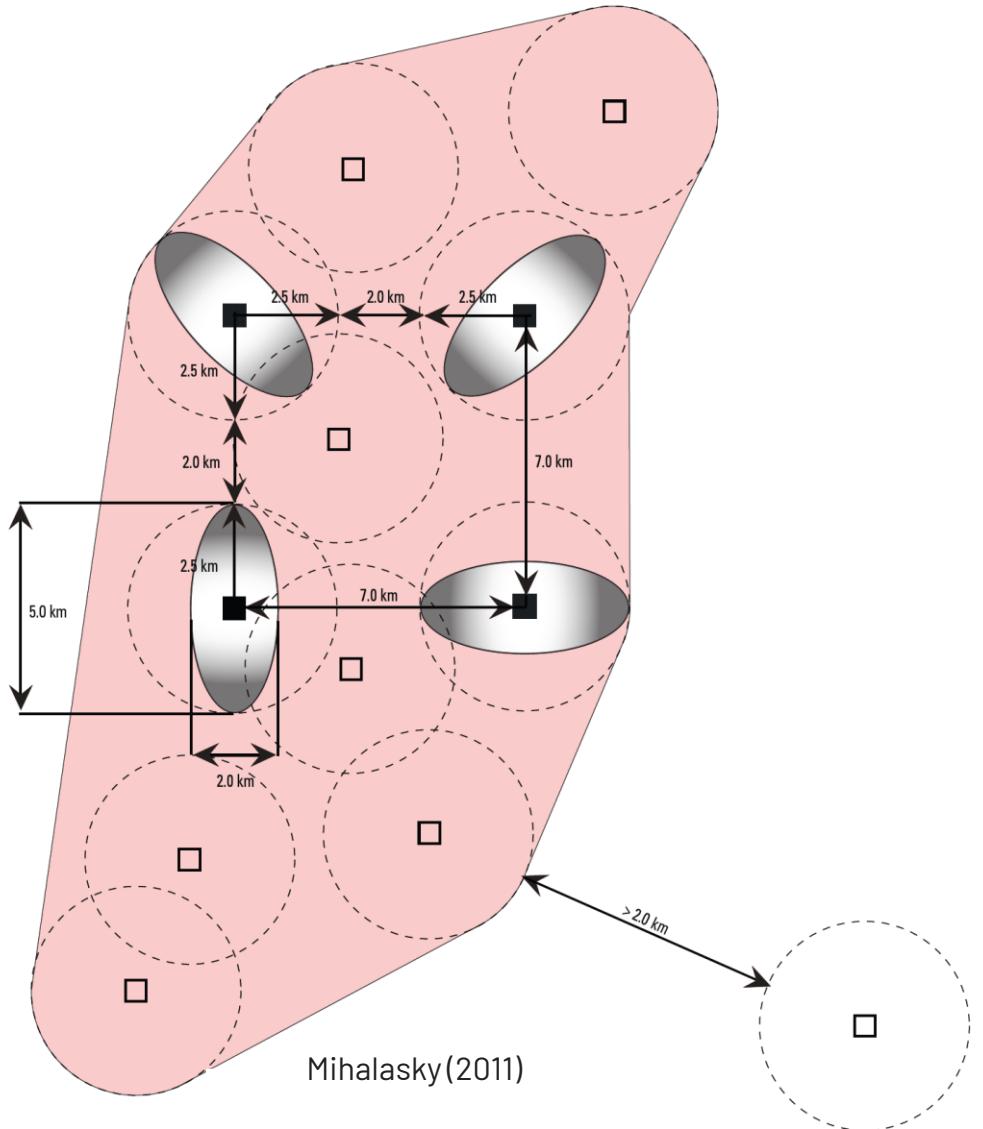
Fase 1

Fase 2
ANN
RF
SVM

Fase 3
Predicción
Propuesta

Conclusiones

Impacto



Mapas de probabilidad

Buffer de depósitos en Yukón (5 km)

Buffer de rocas plutónicas

Buffer de rocas volcánicas

Se aumentó de 174 a 215 datos de entrenamiento

Metodología Propuesta: Aumento de datos

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

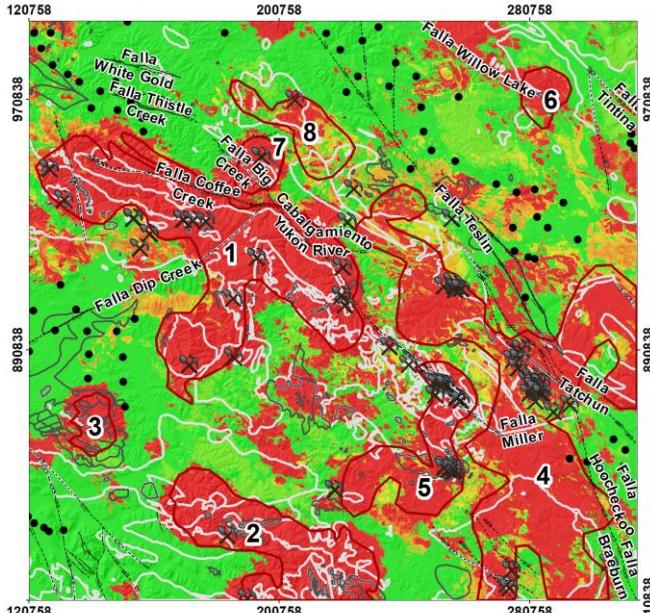
Fase 3

Predicción

Propuesta

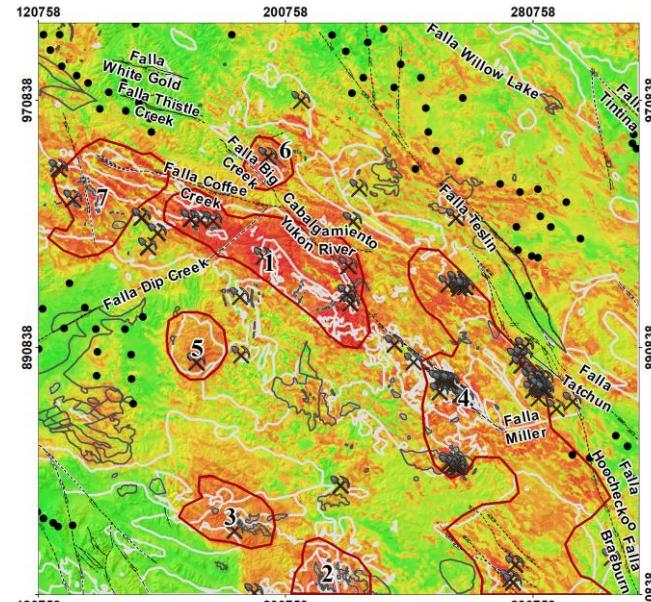
Conclusiones

Impacto



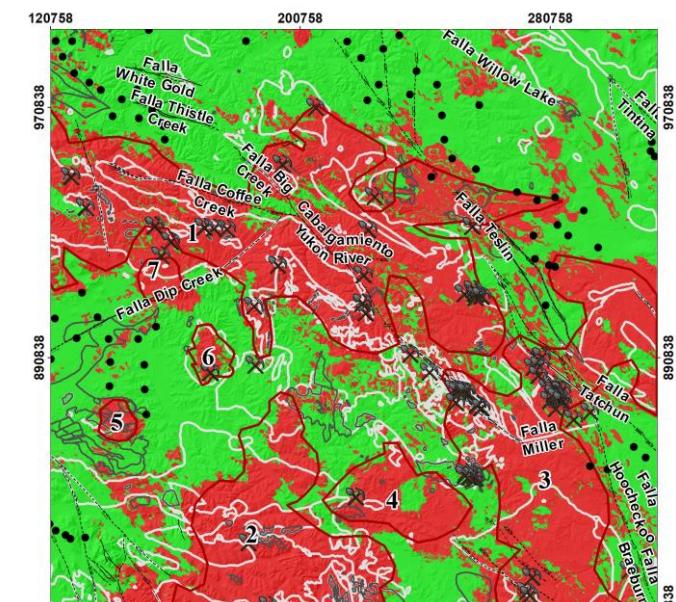
Mapa de probabilidad ANN

Precisión antes: **94.59 %**
Precisión después: **98.96 %**



Mapa de probabilidad RF

Precisión antes: **83.10 %**
Precisión después: **89.61 %**

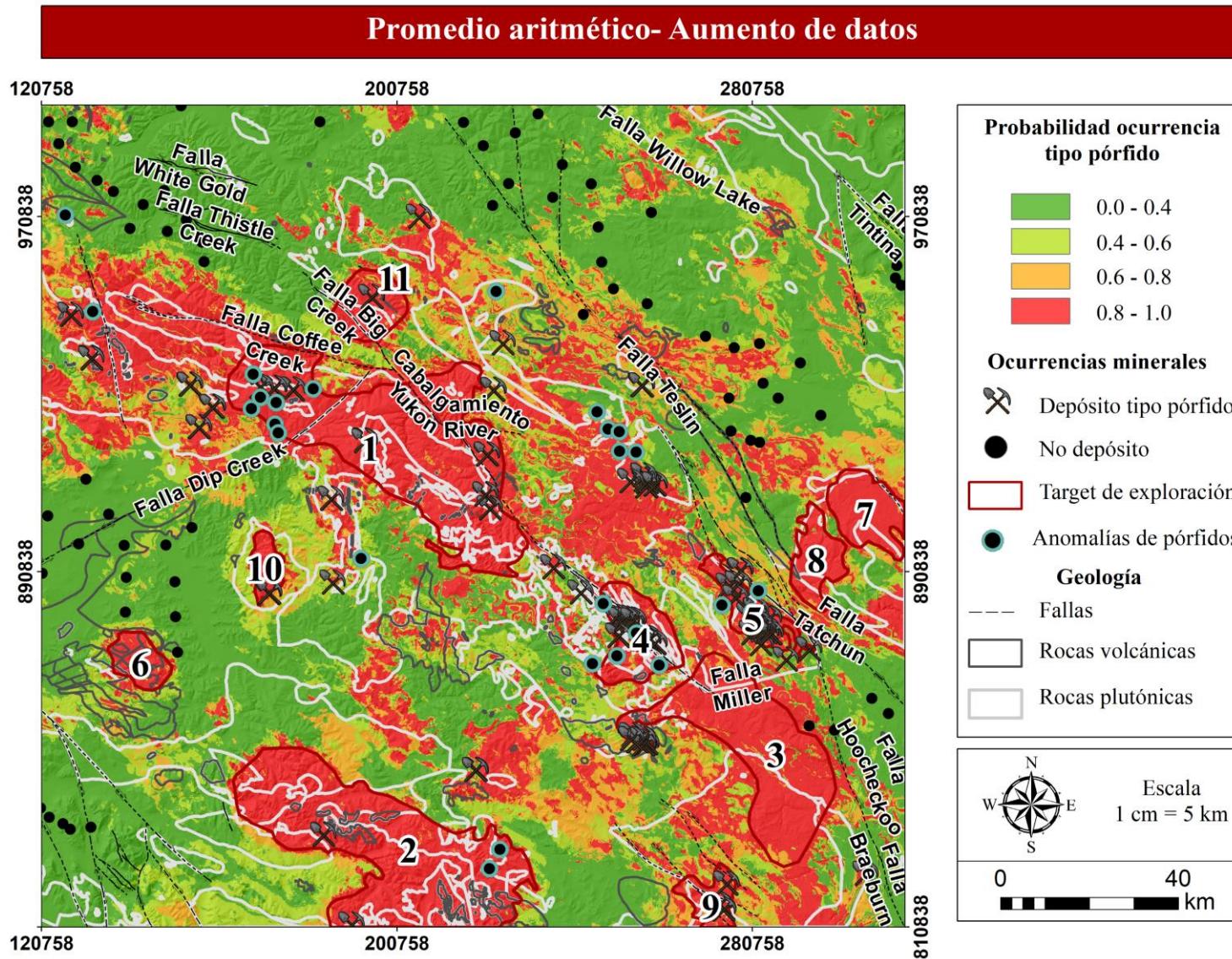


Mapa de probabilidad SVM

Precisión antes: **94.59 %**
Precisión después: **97.92 %**

Metodología Propuesta: Promedio aritmético

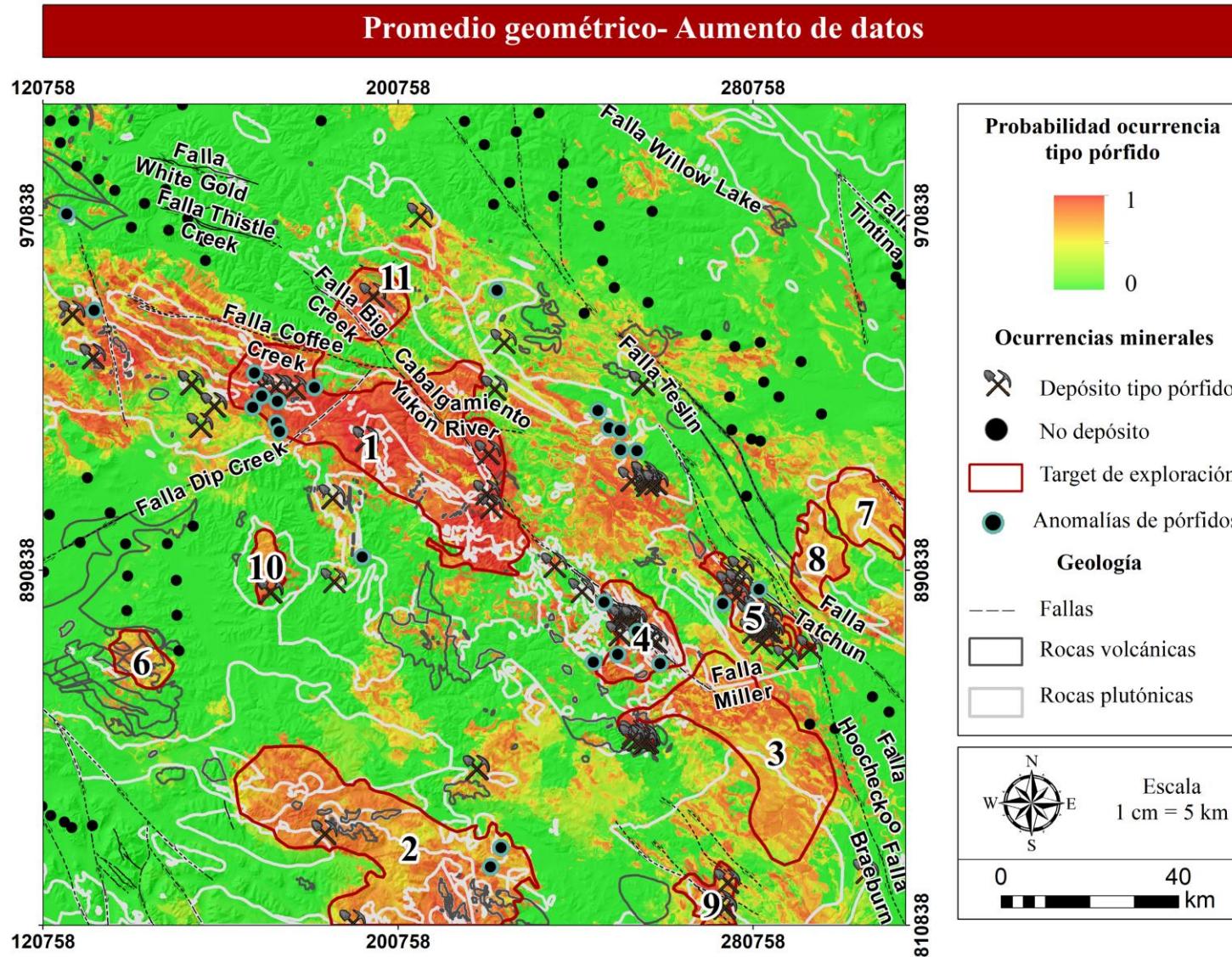
Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto



$$PA = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \cdots + X_n}{n}$$

Metodología Propuesta: Promedio geométrico

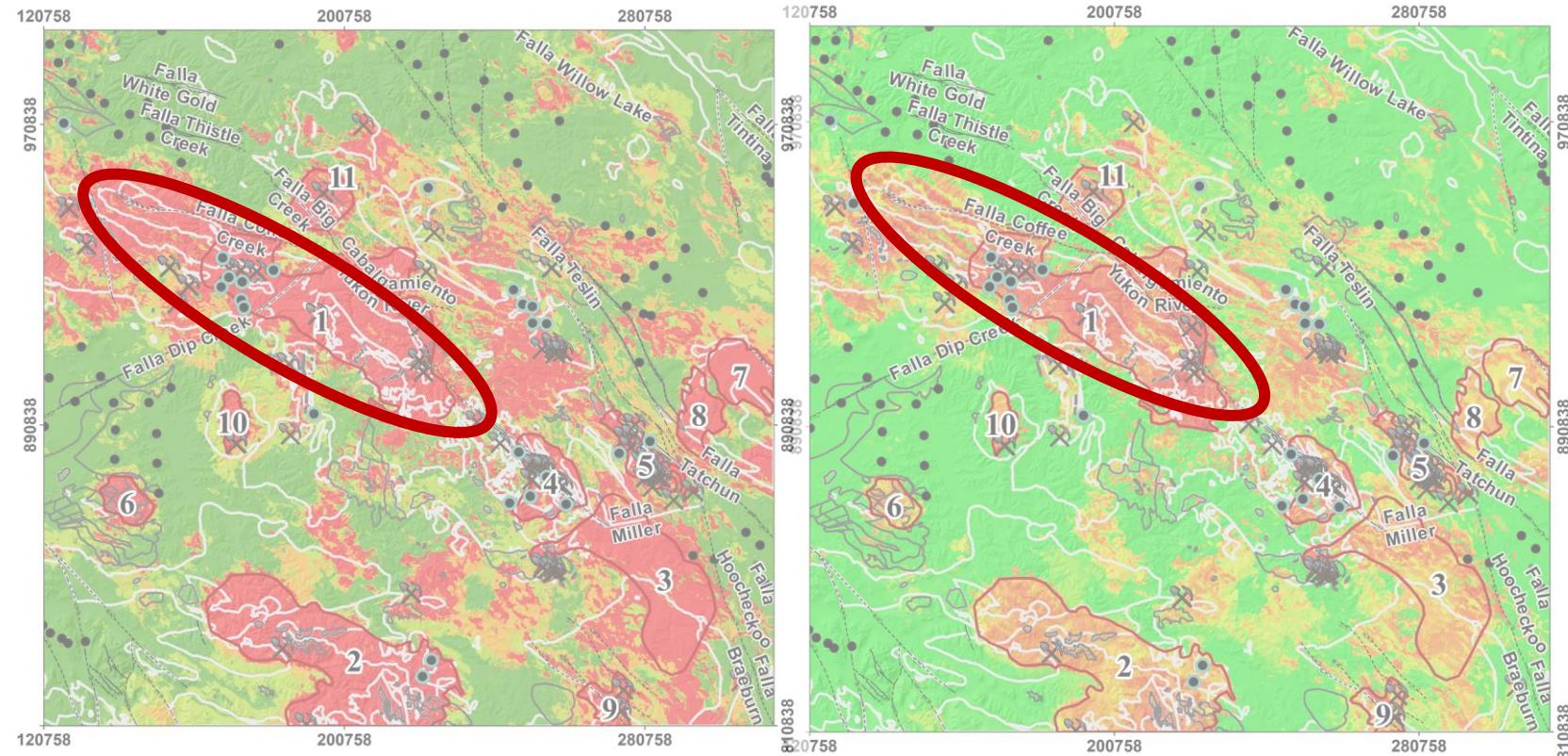
Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto



$$PG = \sqrt[n]{axbxcx \dots}$$

Metodología Propuesta: Estadística zonal

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto



$$\sigma = 0.0398; \bar{x} = 0.9701; \sigma^2 = 0.0016; \text{Probabilidad} = 99.98\%$$

Metodología Propuesta: Estadística zonal

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

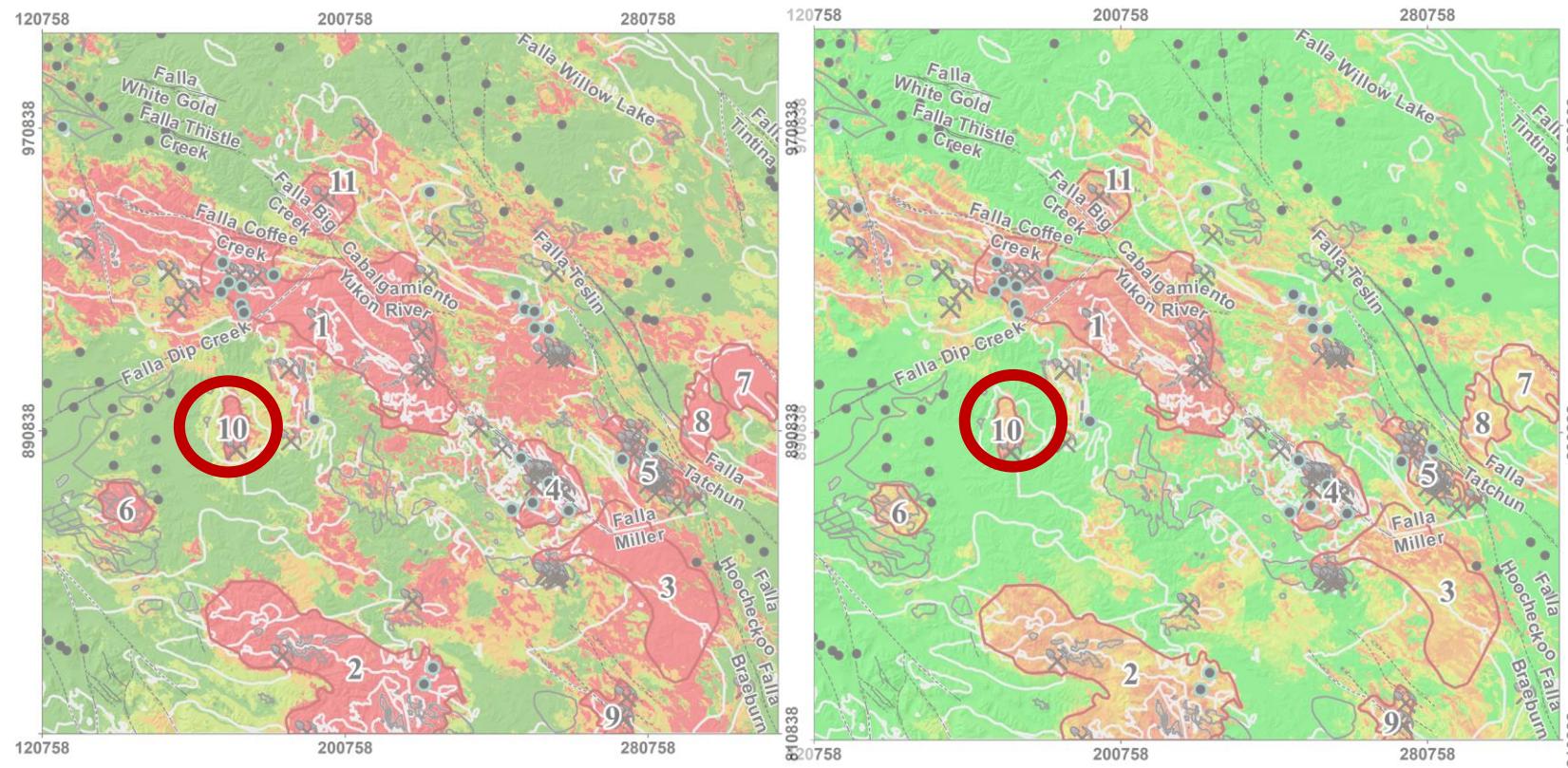
Fase 3

Phase 6

Propuesta

Conclusiones

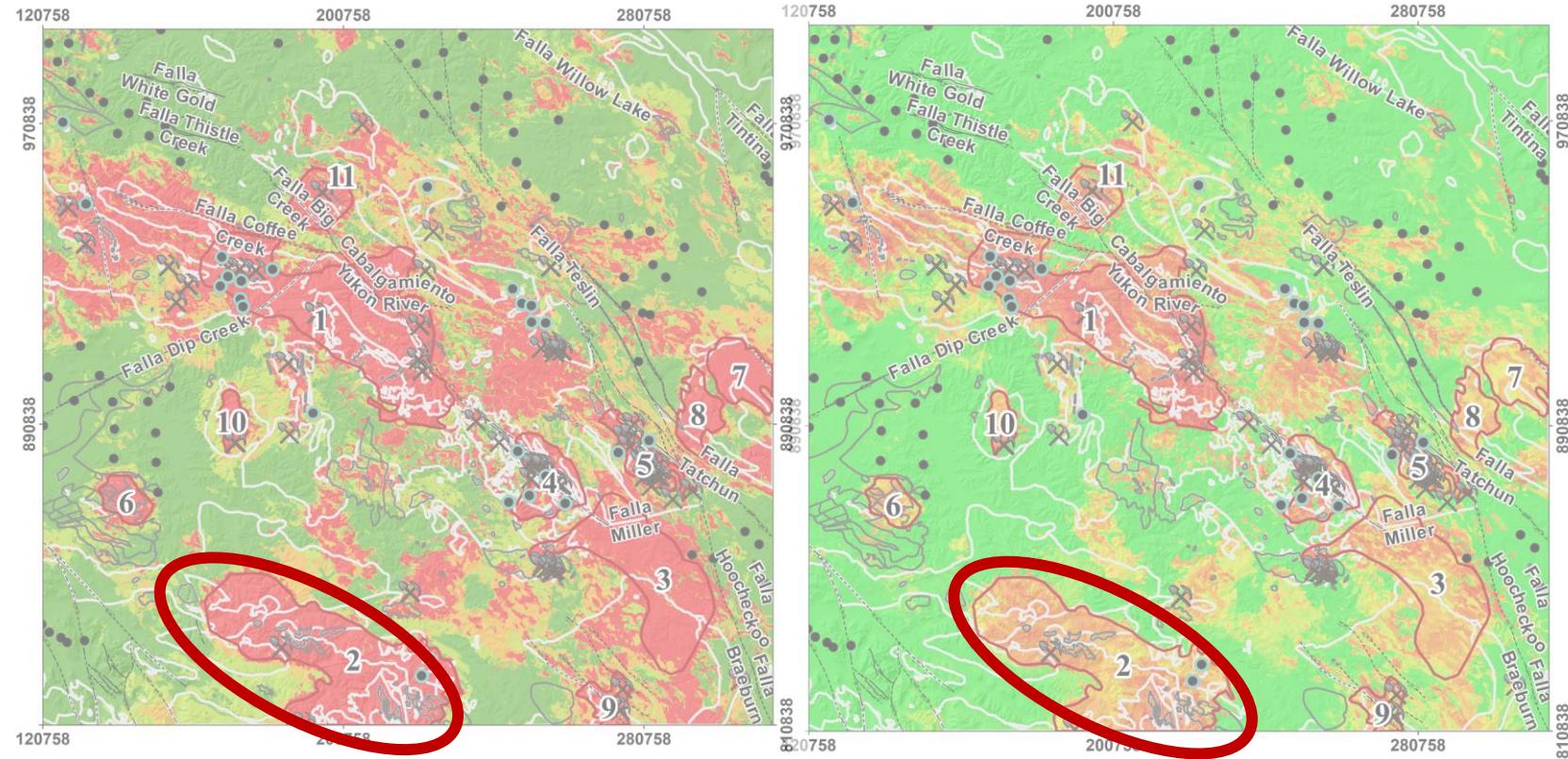
Impacts



$\sigma = 0.0284$; $\bar{x} = 0.9262$; $\sigma^2 = 0.0008$; Probabilidad = 98.15%

Metodología Propuesta: Estadística zonal

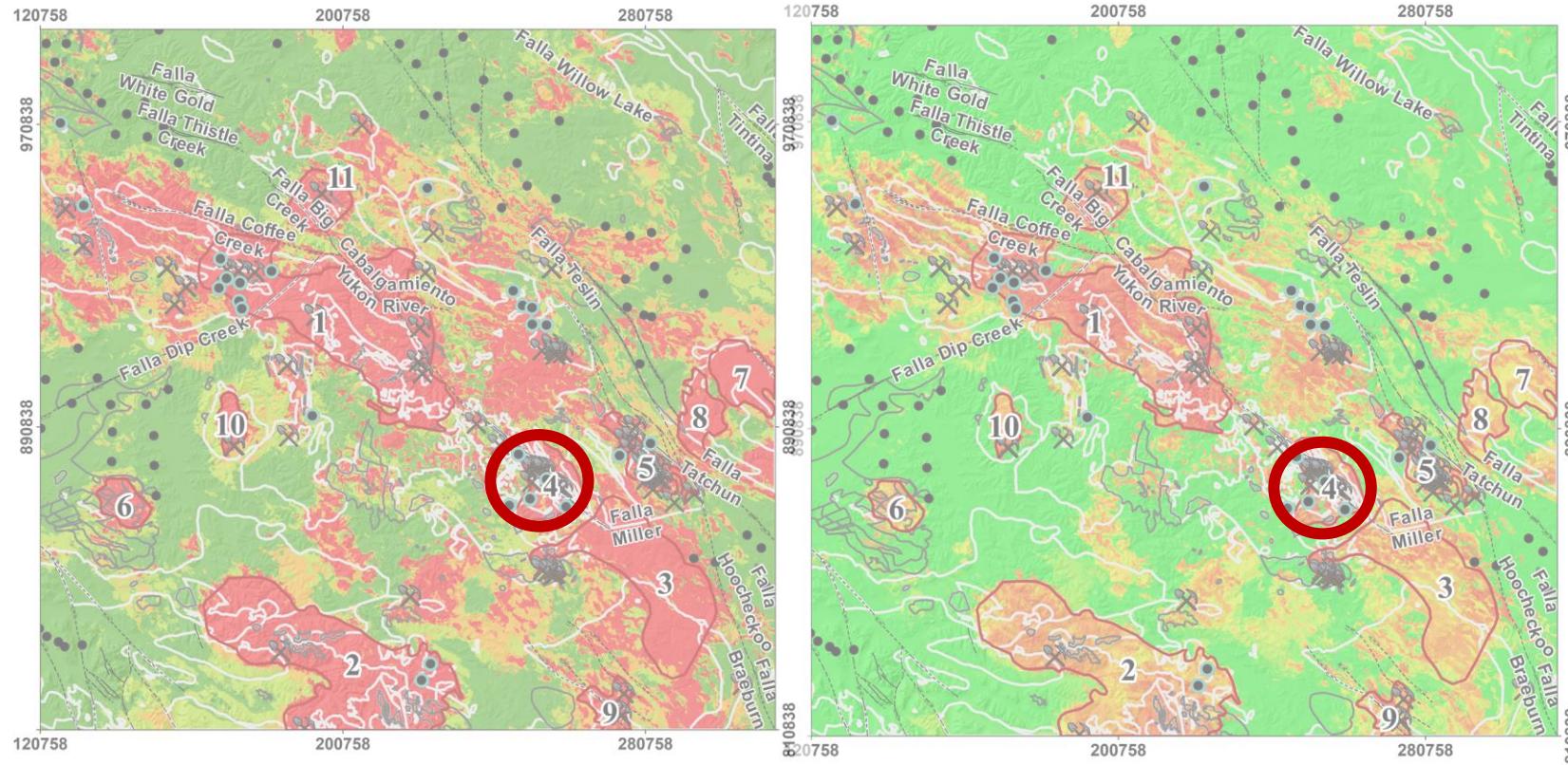
Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto



$$\sigma = 0.0424; \bar{x} = 0.9191; \sigma^2 = 0.0018; \text{Probabilidad} = 99.47\%$$

Metodología Propuesta: Estadística zonal

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto



$$\sigma = 0.0865; \bar{x} = 0.9381; \sigma^2 = 0.0075 ; \text{Probabilidad} = 99.98 \%$$

Metodología Propuesta: Comparación

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

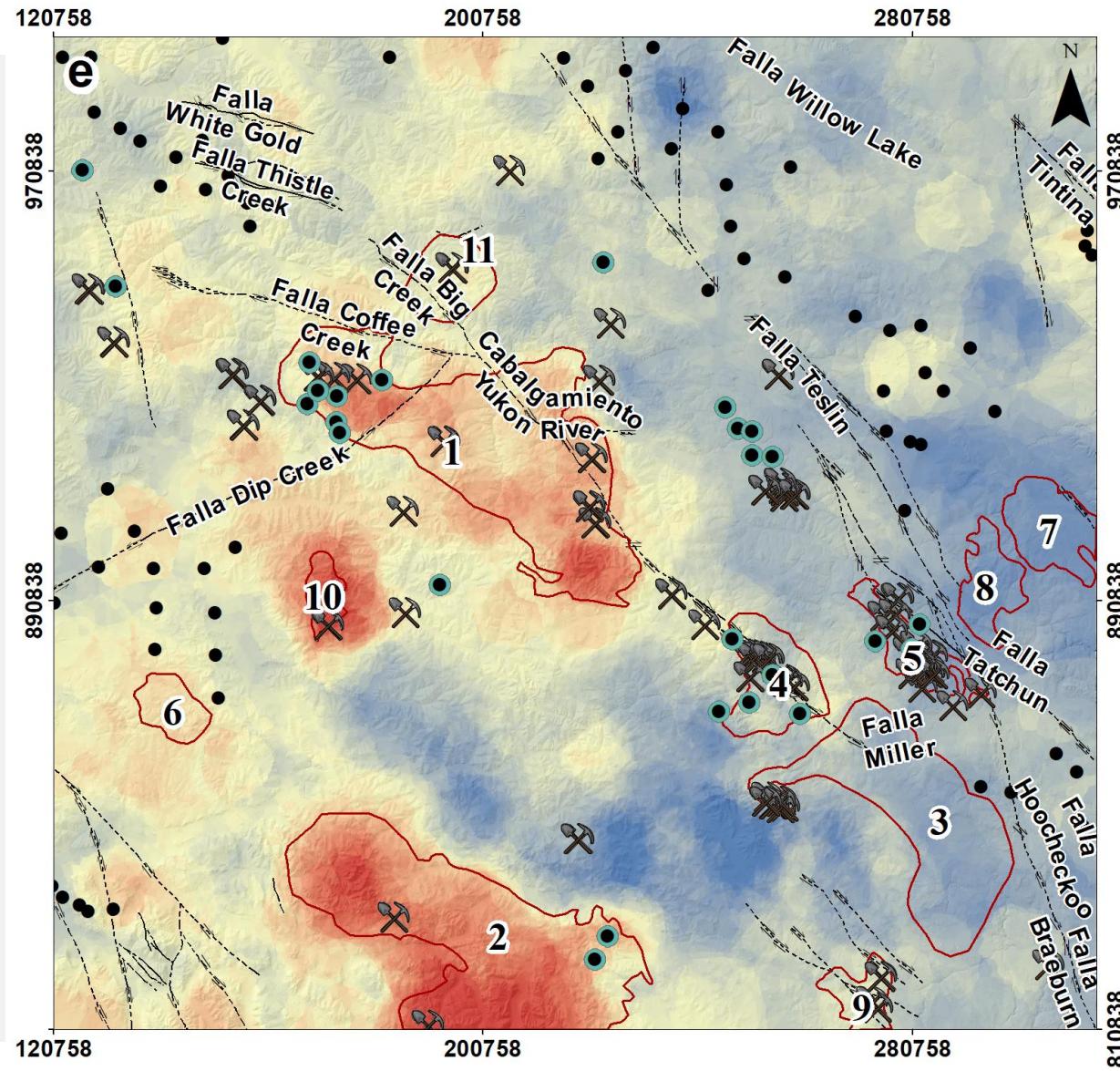
Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto

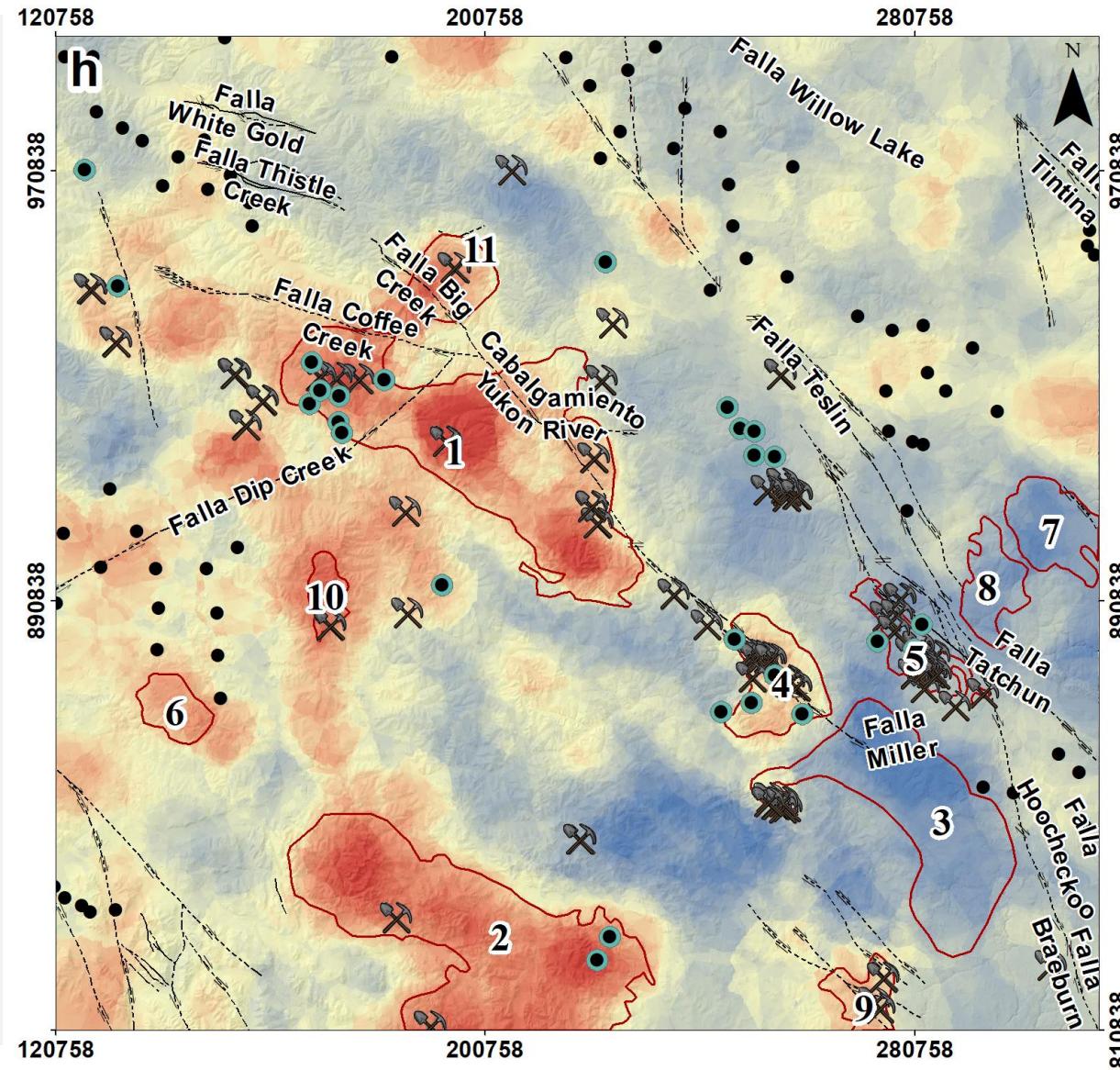
CONCENTRACIÓN GEOQUÍMICA DE Zn



Metodología Propuesta: Comparación

Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto

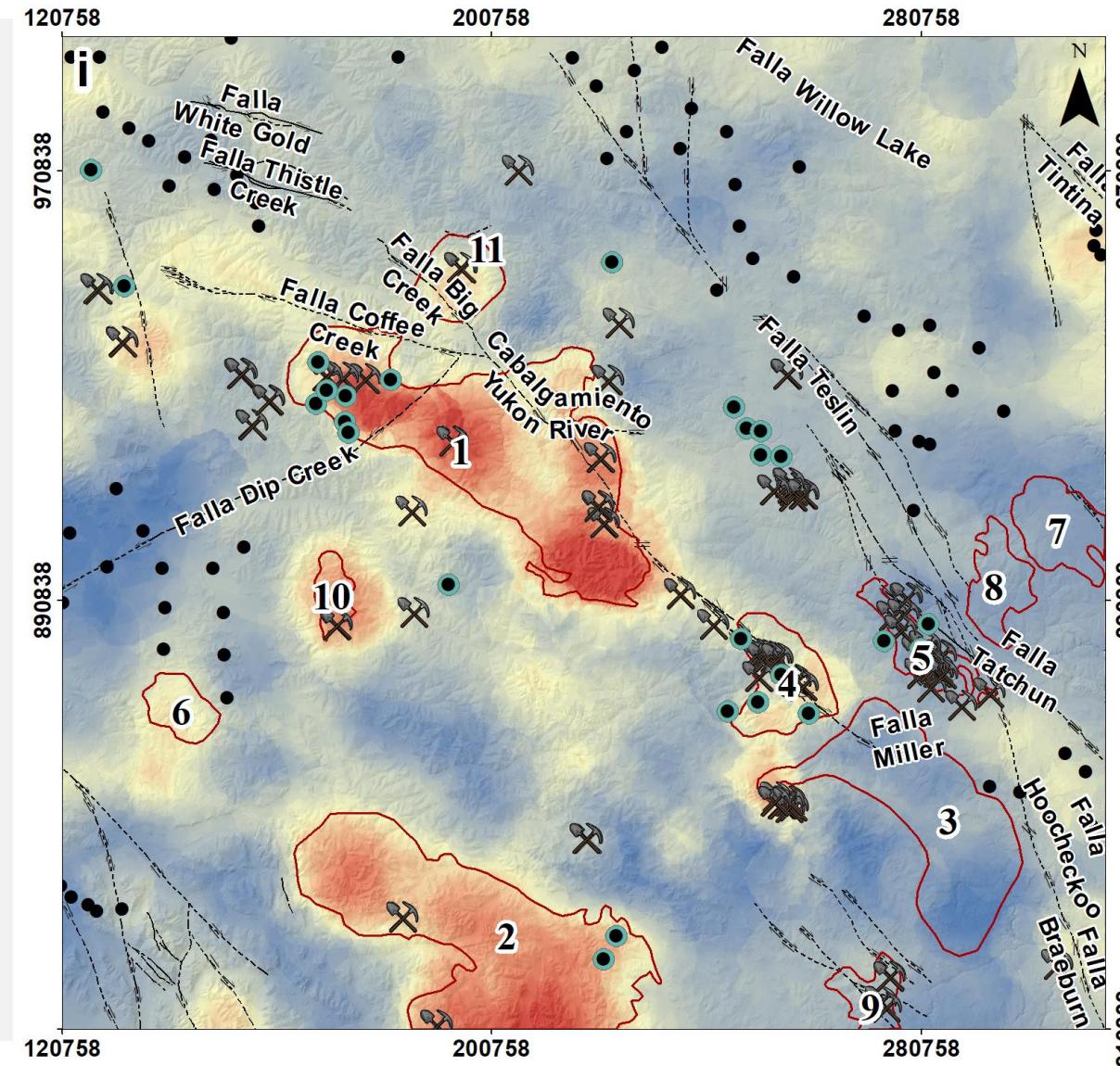
CONCENTRACIÓN GEOQUÍMICA DE Mo



Metodología Propuesta: Comparación

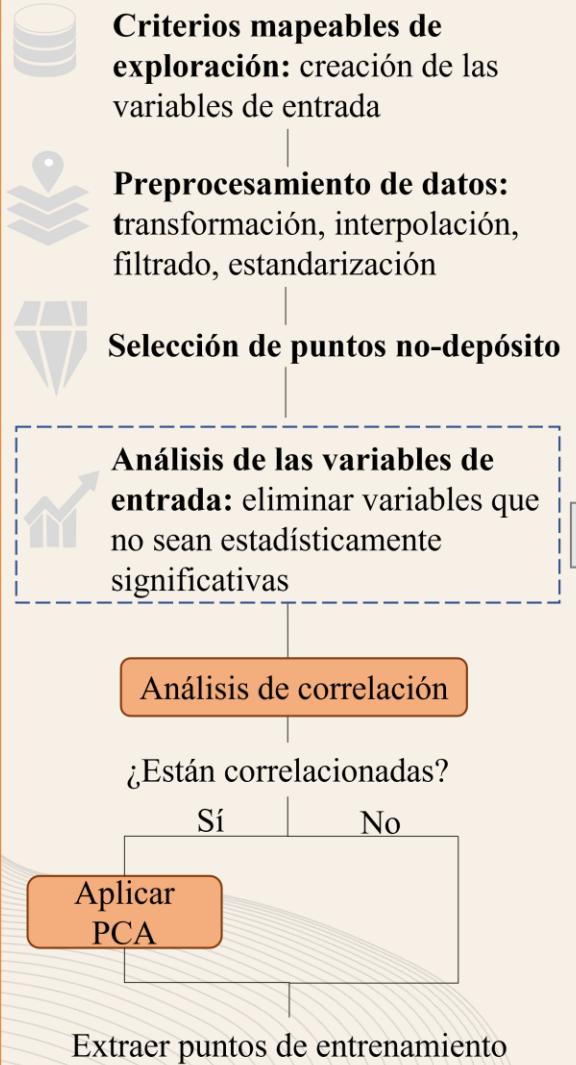
Justificación
Objetivos
Resultados
Fase 1
Fase 2
ANN
RF
SVM
Fase 3
Predicción
Propuesta
Conclusiones
Impacto

CONCENTRACIÓN GEOQUÍMICA DE Pb

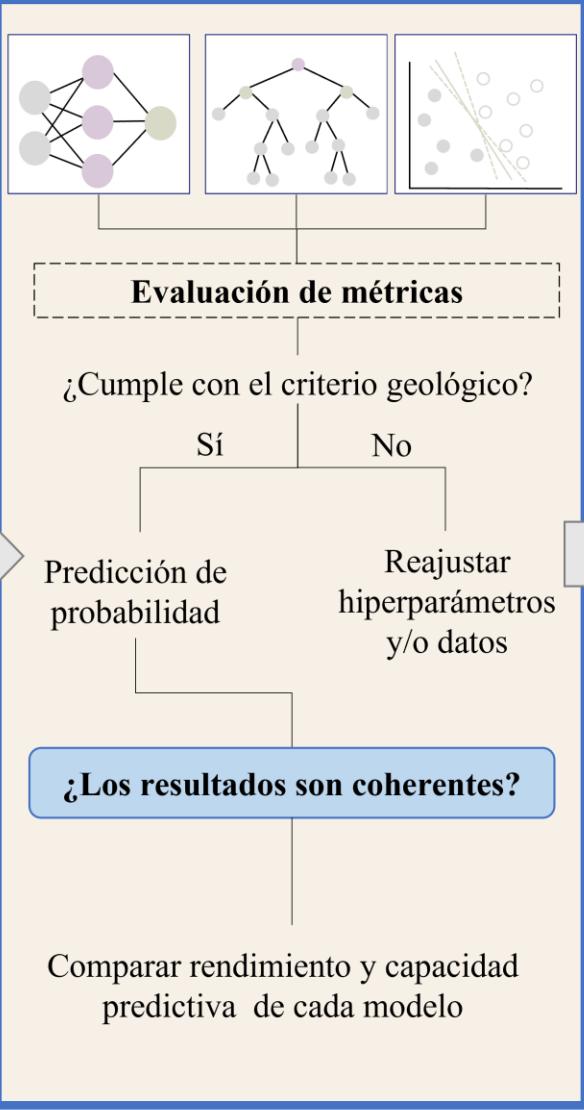


METODOLOGÍA PROPUESTA

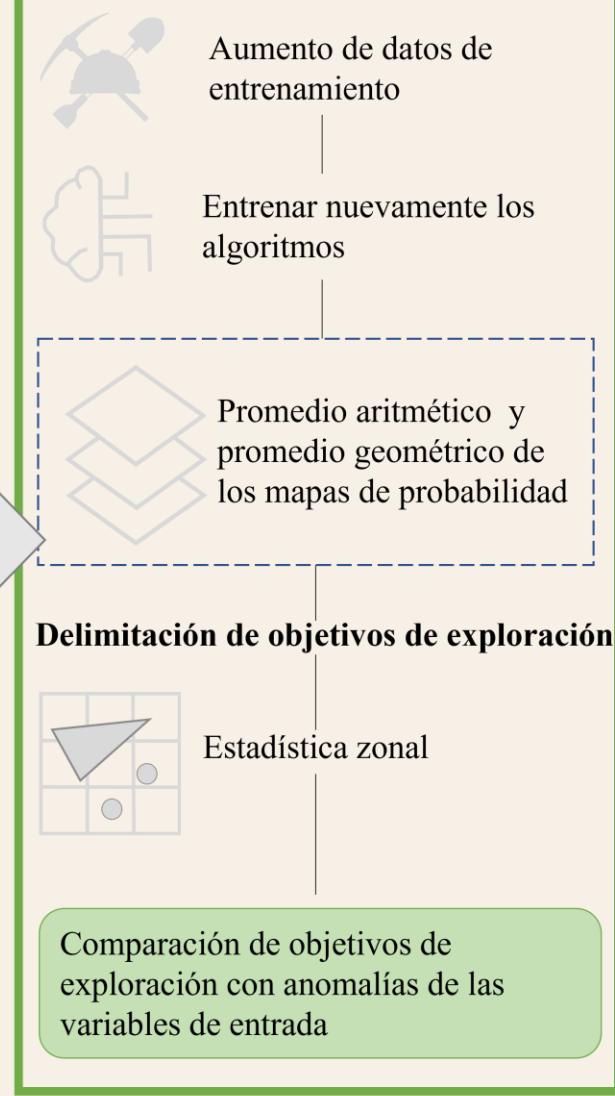
Creación y análisis de la base de datos



Modelos de aprendizaje automático



Delimitación de objetivos de exploración



OBJETIVO 3

CONCLUSIONES

OBJETIVO 1. Analizar los diferentes insumos geológicos, geoquímicos y geofísicos que se relacionen con la ocurrencia de depósitos minerales pórfito.

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

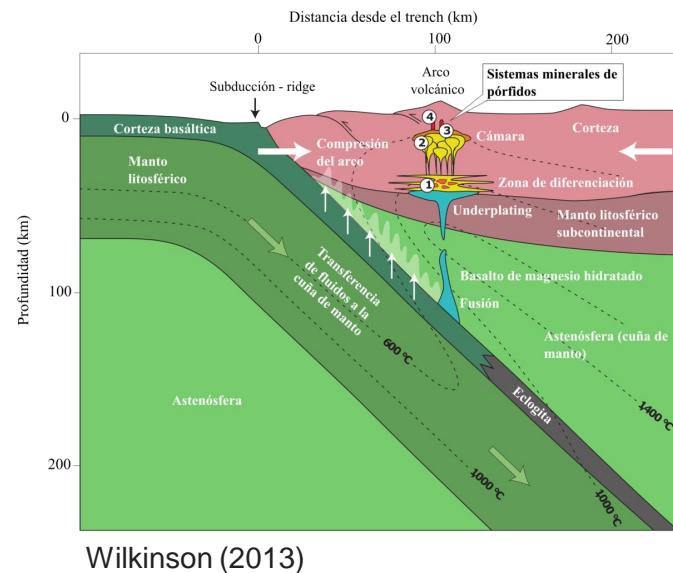
Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto



OBJETIVO 1. Analizar los diferentes insumos geológicos, geoquímicos y geofísicos que se relacionen con la ocurrencia de depósitos minerales pórfito.

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

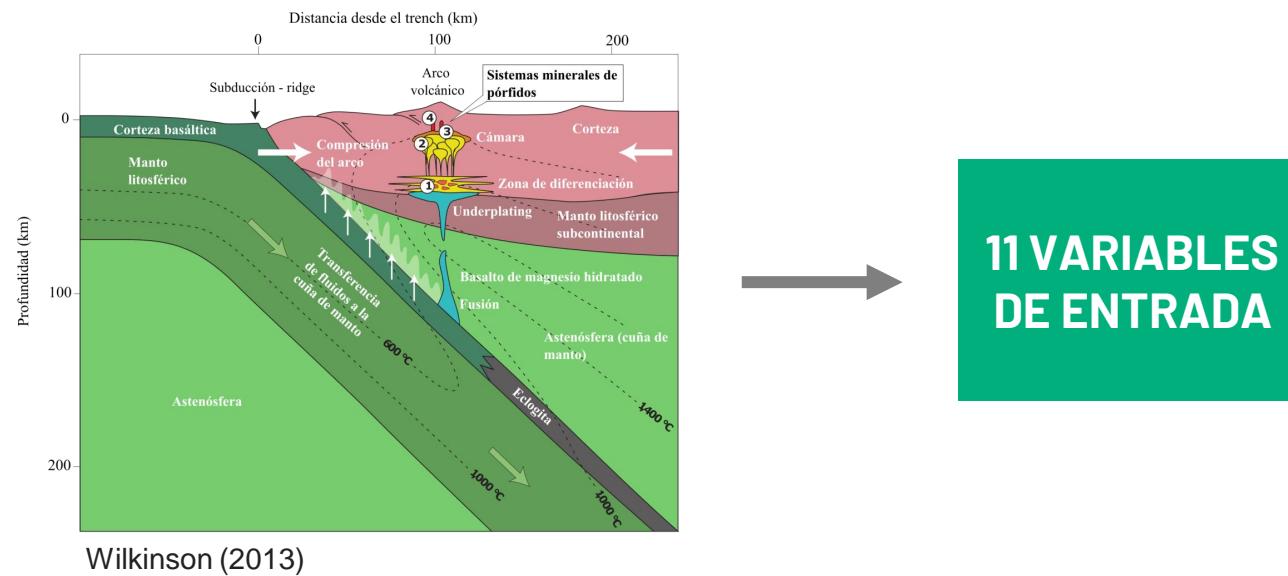
Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto



11 VARIABLES
DE ENTRADA

OBJETIVO 1. Analizar los diferentes insumos geológicos, geoquímicos y geofísicos que se relacionen con la ocurrencia de depósitos minerales pórfito.

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

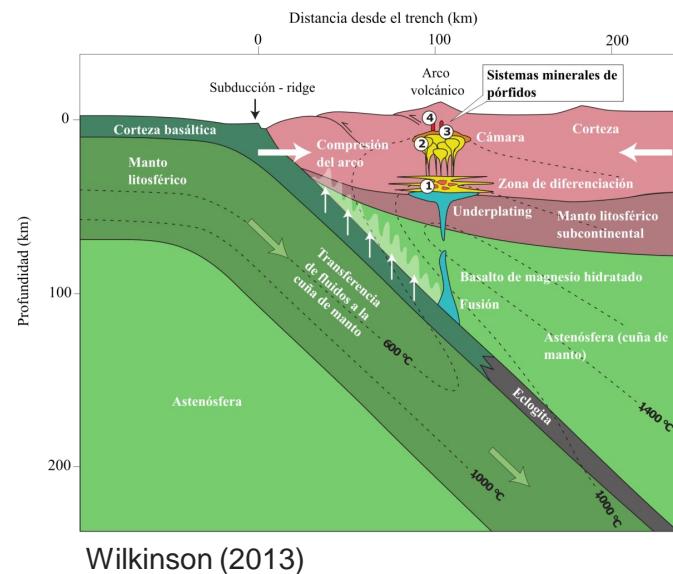
Fase 3

Predicción

Propuesta

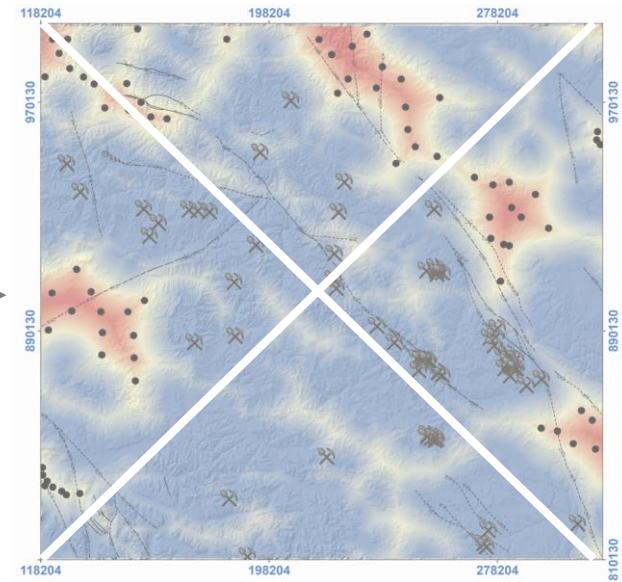
Conclusiones

Impacto



Wilkinson (2013)

11 VARIABLES
DE ENTRADA



OBJETIVO 1. Analizar los diferentes insumos geológicos, geoquímicos y geofísicos que se relacionen con la ocurrencia de depósitos minerales pórfito.

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

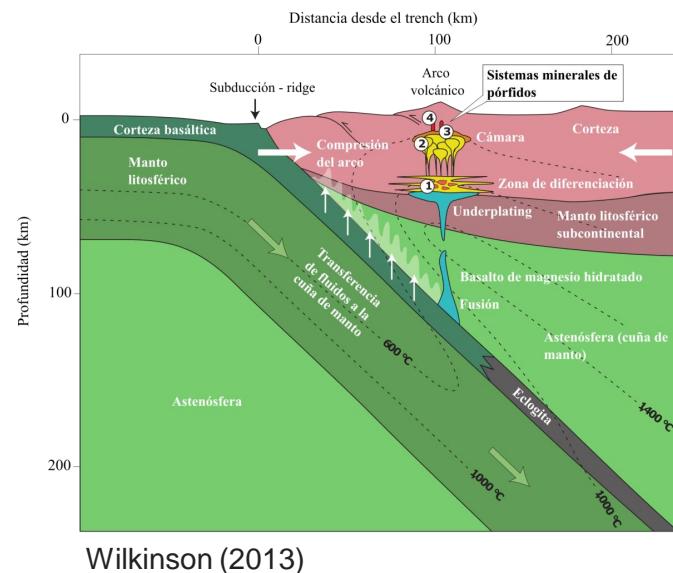
Fase 3

Predicción

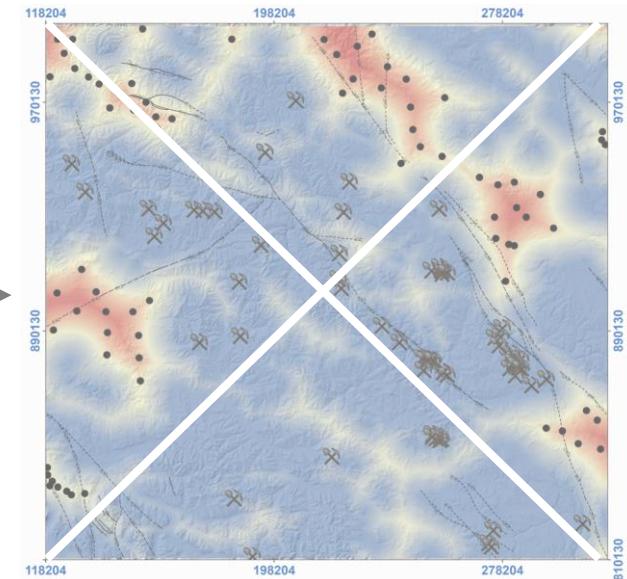
Propuesta

Conclusiones

Impacto



11 VARIABLES
DE ENTRADA



PCA

OBJETIVO 1. Analizar los diferentes insumos geológicos, geoquímicos y geofísicos que se relacionen con la ocurrencia de depósitos minerales pórfido.

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

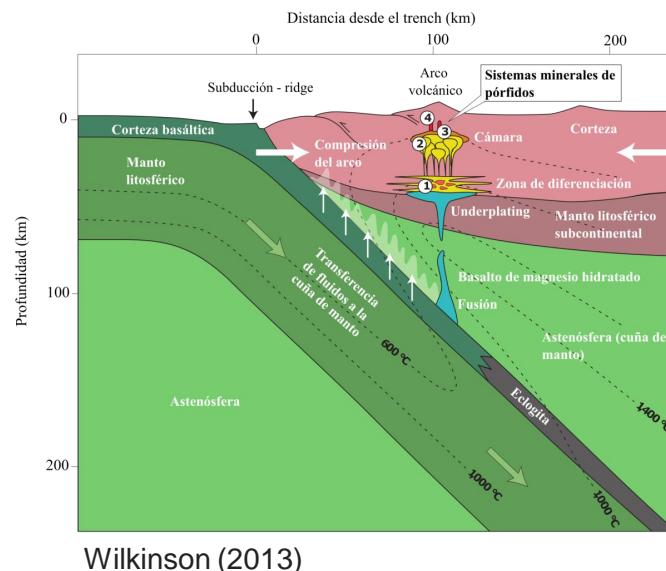
Fase 3

Predicción

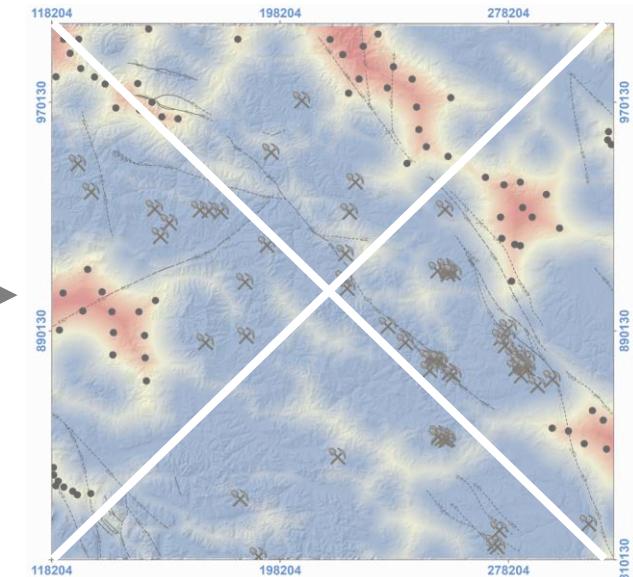
Propuesta

Conclusiones

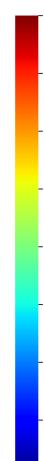
Impacto



11 VARIABLES
DE ENTRADA



	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10
PC1	1	0,31	0,058	-0,59	0,29	0,15	0,053	-0,012	-0,54	0,042
PC2	0,31	1	-0,19	0,089	-0,21	0,18	-0,17	-0,0091	0,068	0,076
PC3	0,058	-0,19	1	0,04	0,36	-0,14	0,054	0,091	0,15	-0,23
PC4	-0,59	0,089	0,04	1	-0,042	-0,097	-0,069	-0,078	-0,036	-0,023
PC5	0,29	-0,21	0,36	-0,042	1	-0,27	0,16	-0,082	0,038	-0,05
PC6	0,15	0,18	-0,14	-0,097	-0,27	1	0,078	0,072	-0,12	0,17
PC7	0,053	-0,17	0,054	-0,069	0,16	0,078	1	0,16	0,032	0,11
PC8	-0,012	-0,0091	0,091	-0,078	-0,082	0,072	0,16	1	0,19	0,17
PC9	-0,54	0,068	0,15	-0,036	0,038	-0,12	0,032	0,19	1	-0,035
PC10	0,042	0,076	-0,23	-0,023	-0,05	0,17	0,11	0,17	-0,035	1



PCA

OBJETIVO 1. Analizar los diferentes insumos geológicos, geoquímicos y geofísicos que se relacionen con la ocurrencia de depósitos minerales pórfito.

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

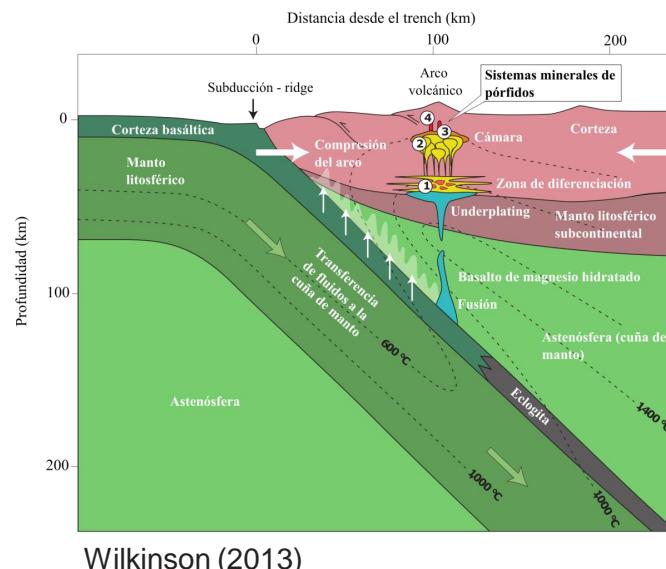
Fase 3

Predicción

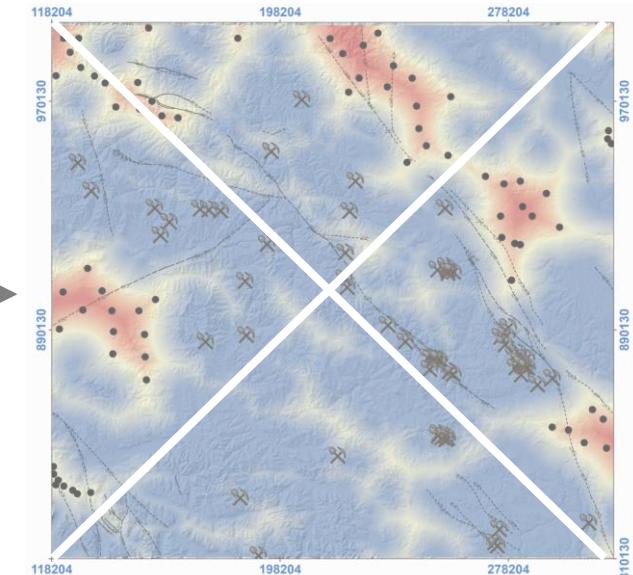
Propuesta

Conclusiones

Impacto

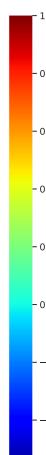


11 VARIABLES
DE ENTRADA



9 COMPONENTES
PRINCIPALES

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10
PC1	1	0.31	0.058	-0.59	0.29	0.15	0.053	-0.012	-0.54	0.042
PC2	0.31	1	-0.19	0.089	-0.21	0.18	-0.17	-0.0091	0.068	0.076
PC3	0.058	-0.19	1	0.04	0.36	-0.14	0.054	0.091	0.15	-0.23
PC4	-0.59	0.089	0.04	1	-0.042	-0.097	-0.069	-0.078	-0.036	-0.023
PC5	0.29	-0.21	0.36	-0.042	1	-0.27	0.16	-0.082	0.038	-0.05
PC6	0.15	0.18	-0.14	-0.097	-0.27	1	0.078	0.072	-0.12	0.17
PC7	0.053	-0.17	0.054	-0.069	0.16	0.078	1	0.16	0.032	0.11
PC8	-0.012	-0.0091	0.091	-0.078	-0.082	0.072	0.16	1	0.19	0.17
PC9	-0.54	0.068	0.15	-0.036	0.038	-0.12	0.032	0.19	1	-0.035
PC10	0.042	0.076	-0.23	-0.023	-0.05	0.17	0.11	0.17	-0.035	1



PCA

OBJETIVO 2. Comparar el rendimiento y capacidad de predicción de depósitos minerales tipo pórfido de los modelos de aprendizaje automático usando redes neuronales artificiales, bosques aleatorios y máquinas de soporte vectorial

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

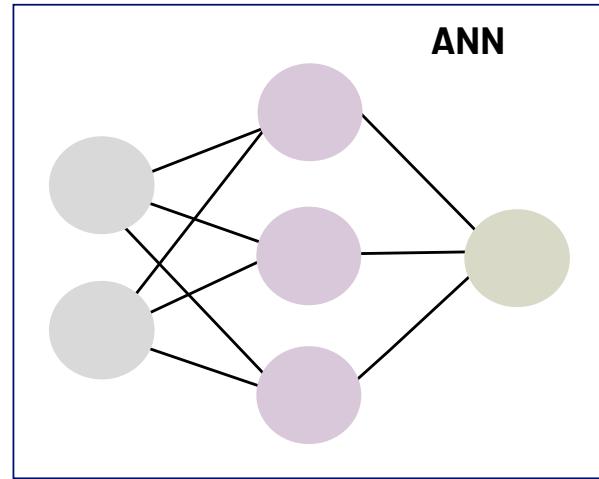
Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto



REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Precisión: 94.59 %

Loss: 0.1688

OBJETIVO 2. Comparar el rendimiento y capacidad de predicción de depósitos minerales tipo pórfido de los modelos de aprendizaje automático usando redes neuronales artificiales, bosques aleatorios y máquinas de soporte vectorial

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

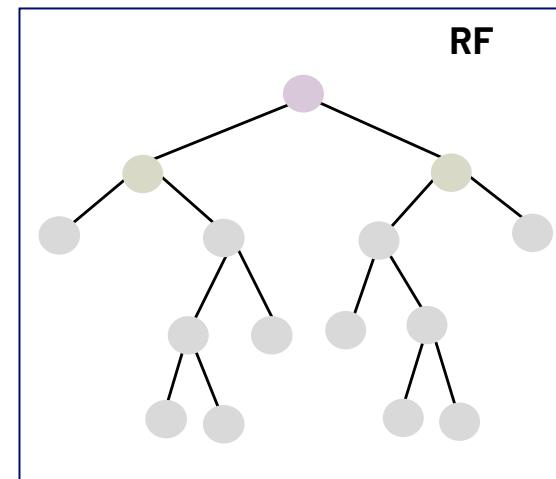
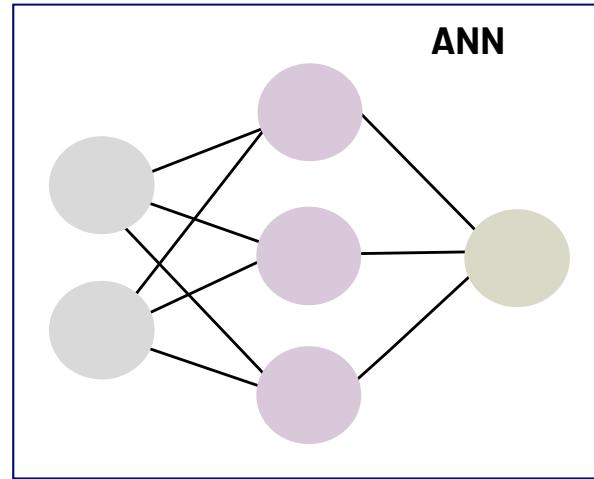
Fase 3

Predicción

Propuesta

Conclusiones

Impacto



REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Precisión: 94.59 %
Loss: 0.1688

BOSQUES ALEATORIOS

Precisión: 83.10 %
Loss: 0.3807

OBJETIVO 2. Comparar el rendimiento y capacidad de predicción de depósitos minerales tipo pórfido de los modelos de aprendizaje automático usando redes neuronales artificiales, bosques aleatorios y máquinas de soporte vectorial

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

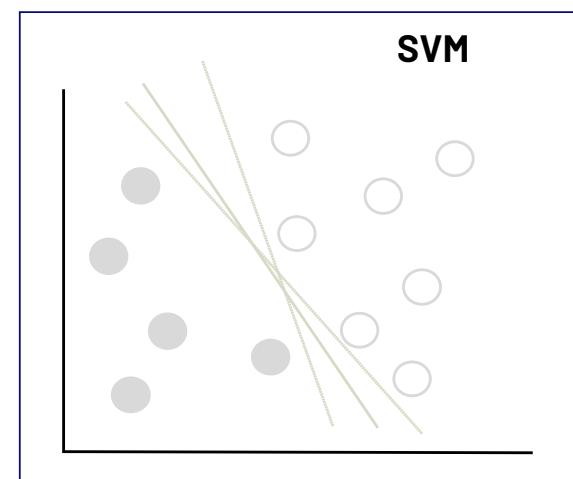
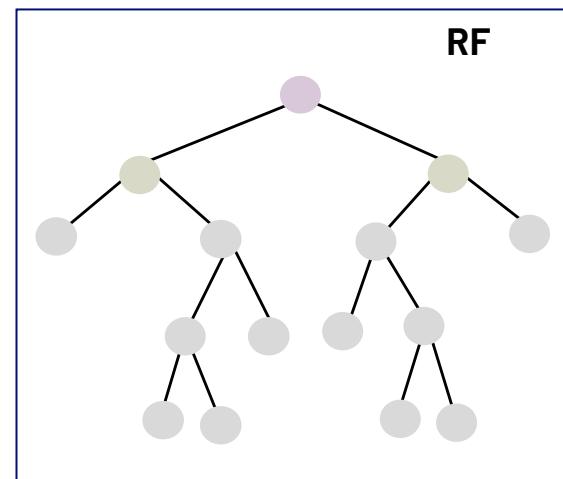
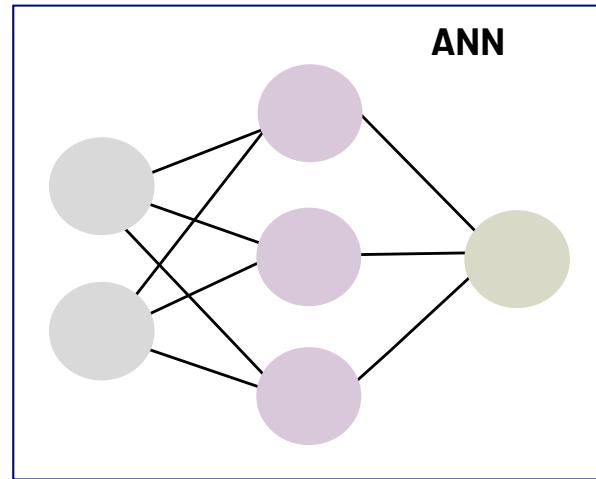
SVM

Fase 3

Predicción
Propuesta

Conclusiones

Impacto



REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Precisión: 94.59 %
Loss: 0.1688

BOSQUES ALEATORIOS

Precisión: 83.10 %
Loss: 0.3807

MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL

Precisión: 94.59 %
AUC: 0.9

OBJETIVO 3. Implementar una metodología utilizando los modelos de aprendizaje automático y la información geológica, geoquímica y geofísica para predecir la ocurrencia de depósitos minerales tipo pórfido.

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

Predicción

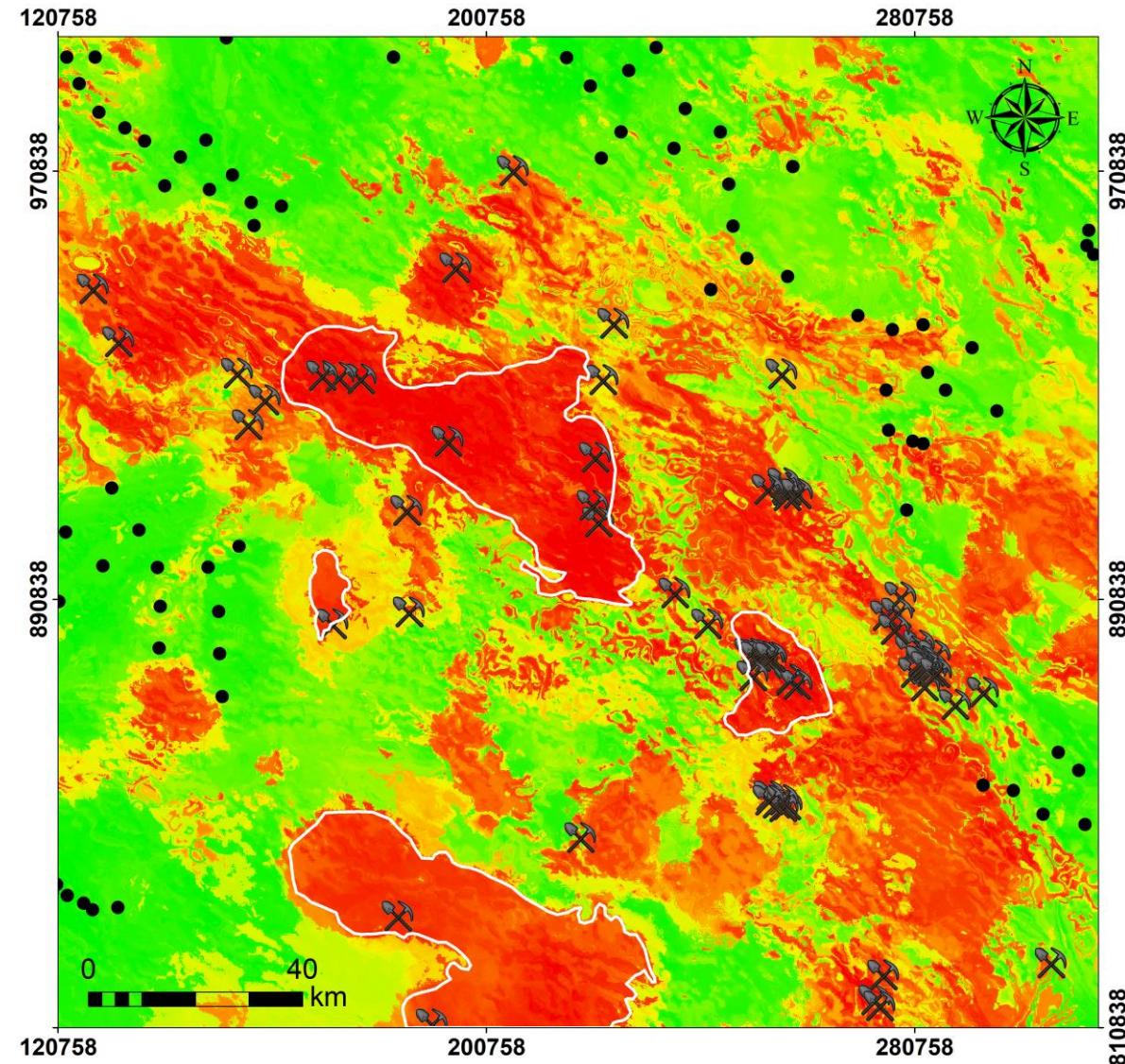
Propuesta

Conclusiones

Impacto

4 ZONAS
PROSPECTIVAS

PROMEDIO ARITMÉTICO



OBJETIVO 3. Implementar una metodología utilizando los modelos de aprendizaje automático y la información geológica, geoquímica y geofísica para predecir la ocurrencia de depósitos minerales tipo pórfido.

Justificación

Objetivos

Resultados

Fase 1

Fase 2

ANN

RF

SVM

Fase 3

Predicción

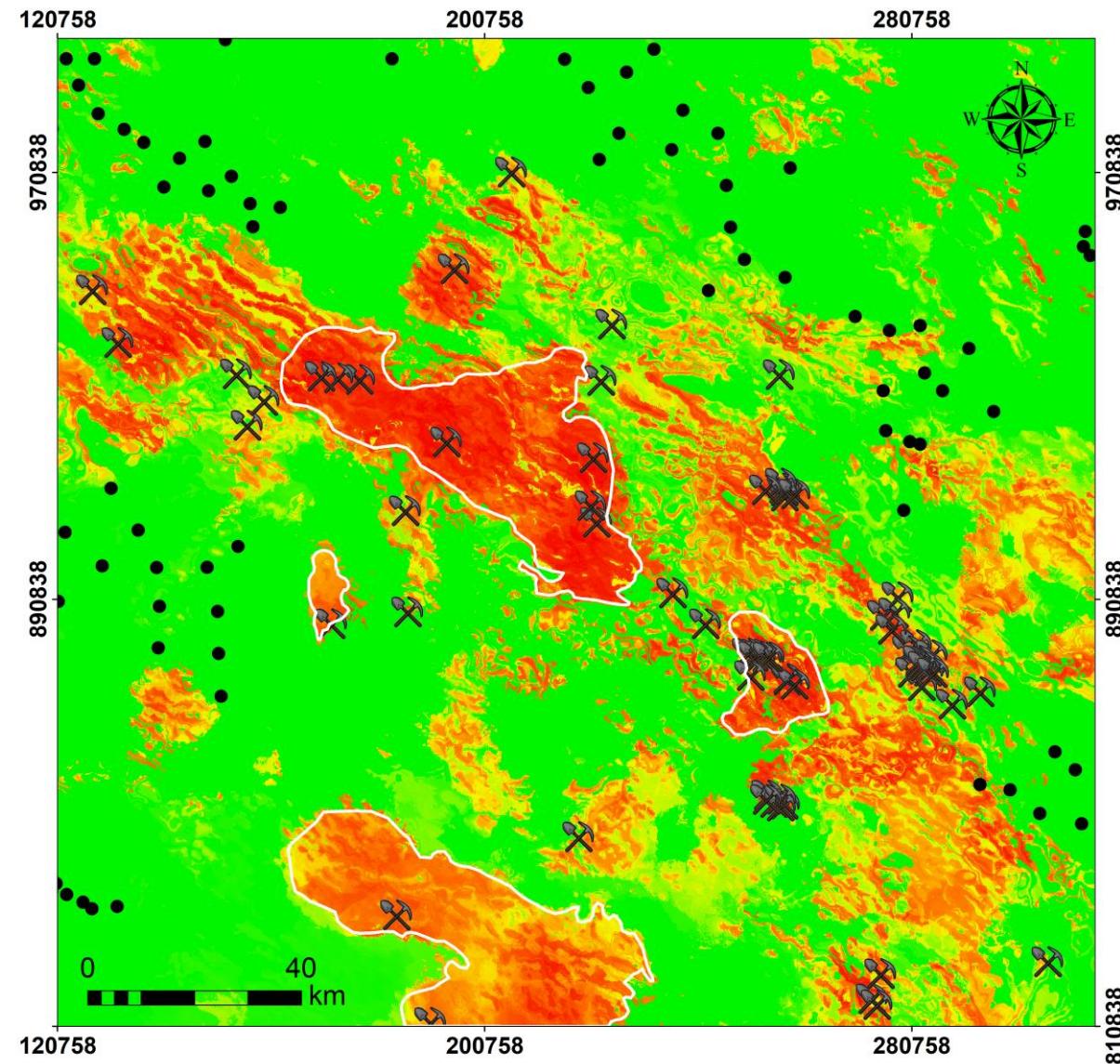
Propuesta

Conclusiones

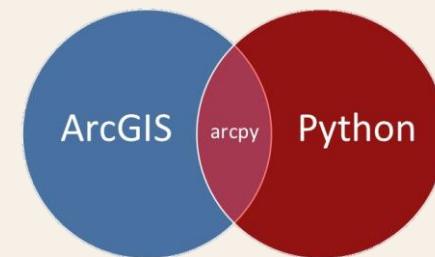
Impacto

**4 ZONAS
PROSPECTIVAS**

PROMEDIO GEOMÉTRICO



IMPACTO



A banner for the Stanford University Earth & Planetary Sciences department. It features a photograph of a desert landscape with layered rock formations. Text on the banner includes "Stanford University", "Stanford | Doerr School of Sustainability", "Intranet", "Earth & Planetary Sciences", "Former Geological Sciences", and "EARTH & PLANETARY SCIENCES".

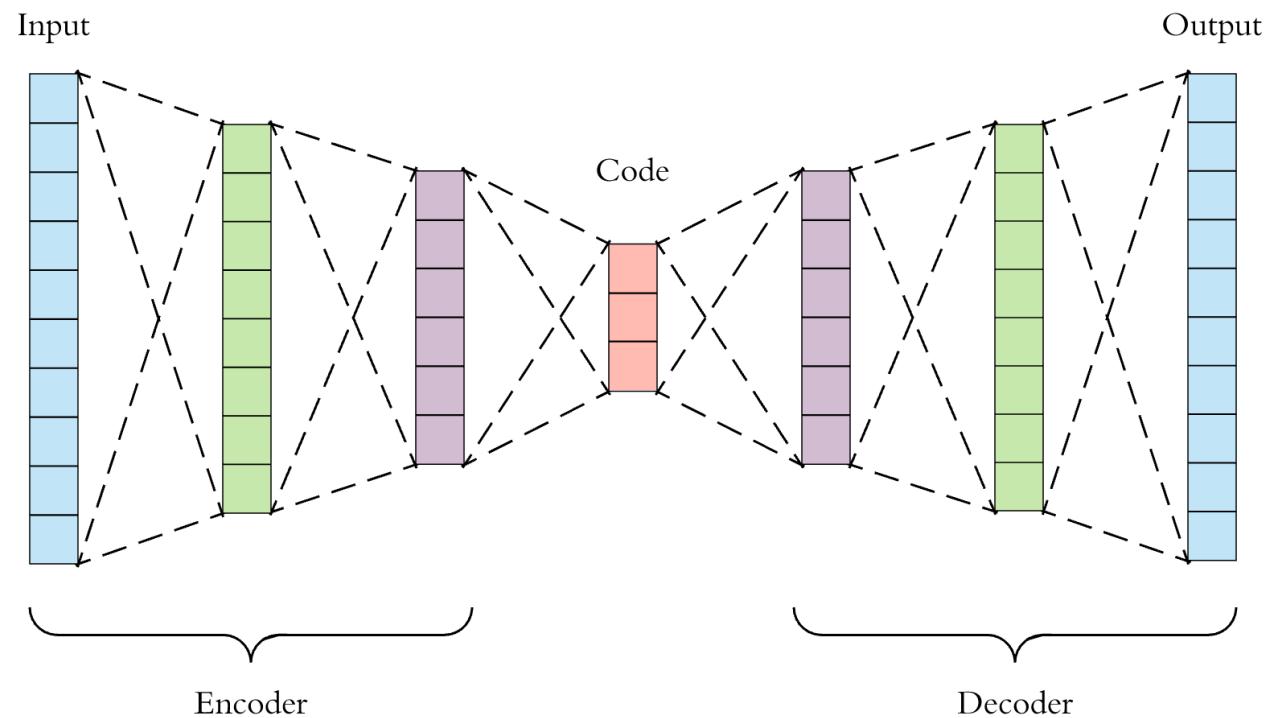
geolog. IA

simetriK. University

RECOMENDACIONES

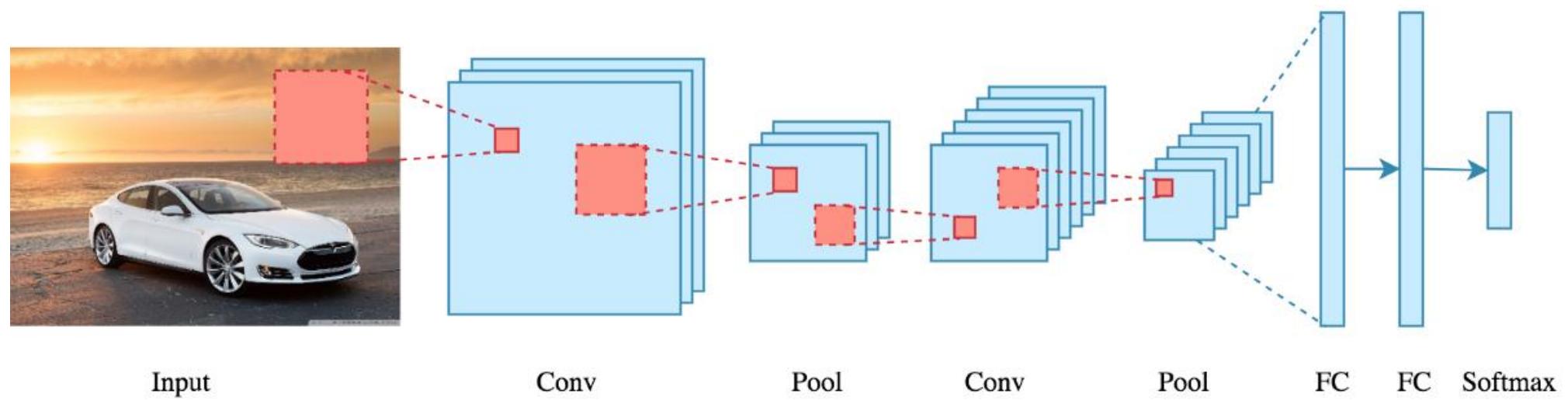
RECOMENDACIONES

Se recomienda aplicar otras técnicas de reducción de dimensionalidad o remoción de multicolinealidad, como por ejemplo las redes autoencoders



RECOMENDACIONES

Se propone aplicar redes neuronales convolucionales para predecir la probabilidad



REPOSITORIO Y ACCESO A DATOS

☞ Predicción de la ocurrencia de depósitos minerales tipo pórfido usando técnicas de aprendizaje automático

Descripción del repositorio

Este es un código de Python que presenta una aplicación detallada y sistemática de los métodos de aprendizaje automático de redes neuronales artificiales, bosques aleatorios y máquinas de soporte vectorial con el objetivo de representar el problema de predicción mineral como un problema de clasificación con superficies de decisión.

Se realizó un flujo de preprocesamiento que incluyó la estandarización, el análisis de componentes principales y de distribución de las variables geológicas en una zona del territorio de Yukón (Canadá), donde se hizo una revisión exhaustiva de los criterios mapeables de exploración relacionados con ocurrencias minerales tipo pórfido.

Los resultados obtenidos indican que la incorporación del aprendizaje automático en el flujo de trabajo de exploración mineral supone una mejora considerable en la optimización de recursos y el grado de confiabilidad en los objetivos de exploración.

<https://github.com/Anagabrielamantilla/MineralPrediction.git>

“Todos los modelos son erróneos, pero algunos son útiles”

- George Box



Gracias!

Ana Gabriela Mantilla Dulcey, Yesid Paul Goyes Peñafiel (Director)

*Contacto: ana.mantilla@correo.uis.edu.co

BIBLIOGRAFÍA

1. Mindat [acceso 15/02/2023]. <https://www.mindat.org/>
2. Flaticon [acceso 15/02/2023]. <https://www.flaticon.es/>
3. Kleinbaum, D. G., Dietz, K., Gail, M., Klein, M., & Klein, M. (2002). Logistic regression (p. 536). New York: Springer-Verlag.
4. Servicio Geológico de Yukón. <https://data.geology.gov.yk.ca/>
5. Wilkinson, J. J. (2013). Triggers for the formation of porphyry ore deposits in magmatic arcs. *Nature Geoscience*, 6(11), 917-925.
6. Mihalasky, M. J., Bookstrom, A. A., Frost, T. P., & Ludington, S. (2011). *Porphyry copper assessment of British Columbia and Yukon Territory, Canada: Chapter C in Global mineral resource assessment* (No. 2010-5090-C). US Geological Survey.
7. Mindrila, D., & Balentyne, P. (2017). *Scatterplots and Correlation.* https://www.westga.edu/academics/research/vrc/assets/docs/scatterplots_and_correlation_notes.pdf