

Modelamiento Geo-Minero-Metalúrgico de Yacimientos

Julián M. Ortiz, Ph. D.

AMTC, Universidad de Chile
Depto. Ingeniería de Minas, Universidad de Chile

Planteamiento del problema

- Se requieren **modelos más sofisticados de los depósitos**, de modo de poder predecir el desempeño de los materiales en los distintos procesos mineros y metalúrgicos a los que se someten.
- Estos modelos deben:
 - Integrar información de distintas fuentes, de distinta naturaleza y distintas calidades (datos cuantitativos, cualitativos, semi-cuantitativos)
 - Integrar información recabada en todas las etapas del proceso minero, desde la exploración a la producción
 - Predecir el comportamiento a escala de laboratorio y a escala industrial
- Objetivo: entender las respuestas minero-metalúrgicas de los materiales y poder anticiparlas



Plan de solución

- Cualquier solución al modelamiento de variables geo-minero-metalúrgicas pasa por los siguientes puntos:
 1. **Adquisición** de datos y **caracterización** de materiales in situ
 2. **Modelamiento espacial** de atributos
 1. Análisis de datos
 2. Definición de dominios de estimación
 3. Construcción de modelos
 3. **Modelamiento de cada proceso**
 1. Trazabilidad y caracterización de materiales entrando a cada proceso
 2. Vinculación de características de materiales con respuestas a procesos mineros y metalúrgicos
 3. Escalamiento y modelo predictivo
 4. **Optimización**
- En esta presentación me centraré en el segundo punto de esta lista y **no** daré todas las respuestas...



1. Adquisición de datos y caracterización de materiales in situ

- Datos de distintos orígenes:
 - Información geofísica (muy poco utilizada) (**cuantitativos**)
 - Mapeos geológicos: litología, alteración, mineralización, estructuras, texturas (**cualitativos**)
 - Información geoquímica: concentración de múltiples elementos (**cuantitativos**)
 - Ensayos de leyes: elementos de interés y deletéreos (**cuantitativos**)
 - Mineralogía: análisis hiperespectral, mineralogía cuantitativa, óptica (**cuantitativos** – **semi-cuantitativos**)
 - Mapeos y ensayos geotécnicos: RQD orientación de fracturas, relleno de fracturas, PLT, etc. (**cualitativos**)
 - Ensayos metalúrgicos: Bwi, SPI, Drop Weight Test, ensayos de flotación, etc. (**cuantitativos**)



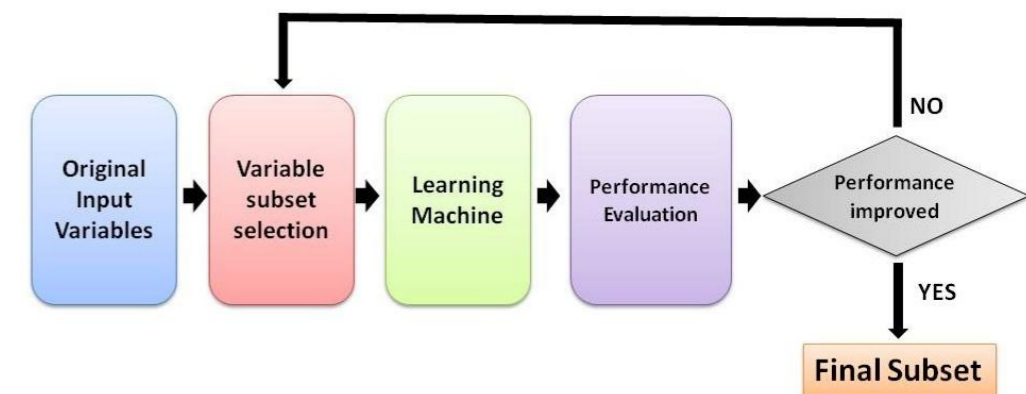
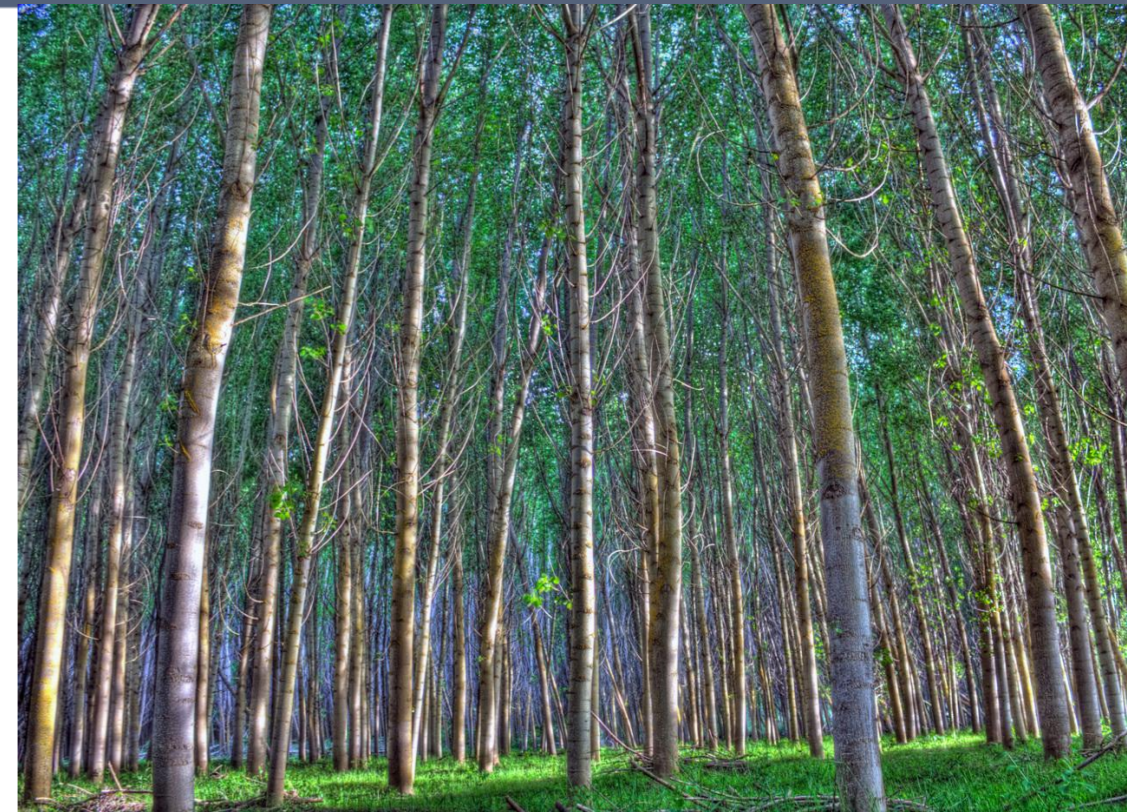
1. Adquisición de datos y caracterización de materiales in situ

- Algunas limitaciones:
 - QA-QC
 - En muchos de estos procesos de adquisición de datos **no se realizan procedimientos de control y aseguramiento de calidad**
 - Ejemplo: datos hiperespectrales para la caracterización de arcillas
 - Estándares
 - **No existen estándares industriales** para los procedimientos de adquisición de algunos de estos datos
 - Ejemplo: ensayos de flotación no son comparables entre faenas
 - Extrapolación
 - Si bien pueden existir procedimientos estándar para la adquisición de algunos de estos datos, **extrapolar a otras condiciones de adquisición no es simple**
 - Ejemplo: ensayos de flotación realizados a cierta granulometría no son directamente extrapolables a otra granulometría
- **Uno de los mayores problemas es saber qué datos se requieren para predecir el desempeño en procesos mineros y metalúrgicos**



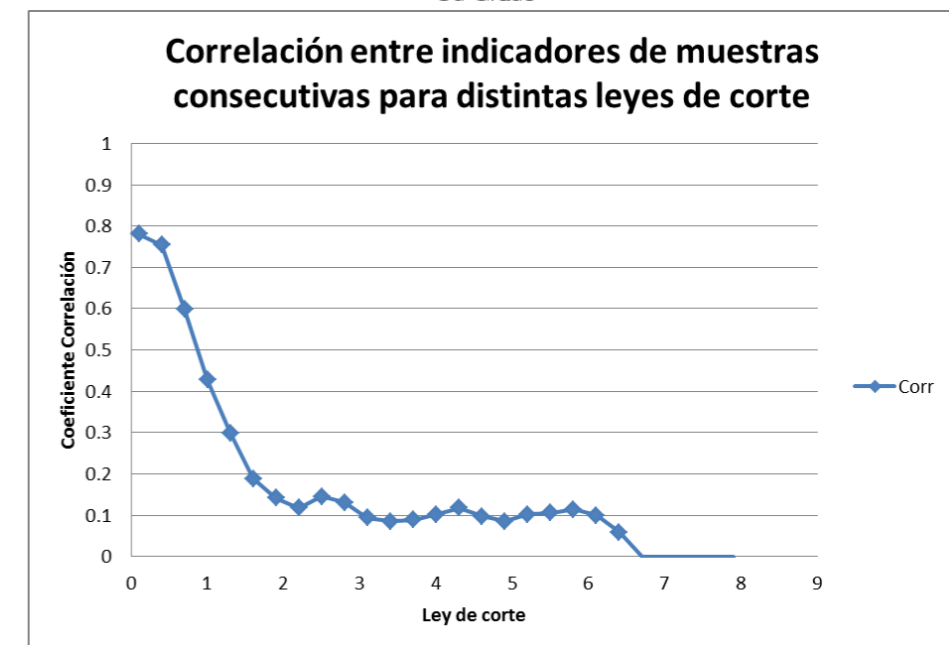
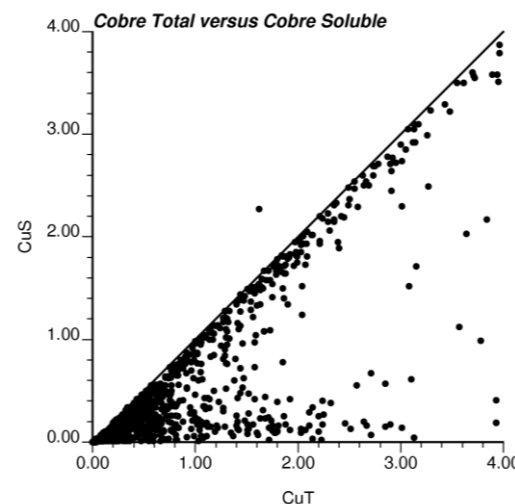
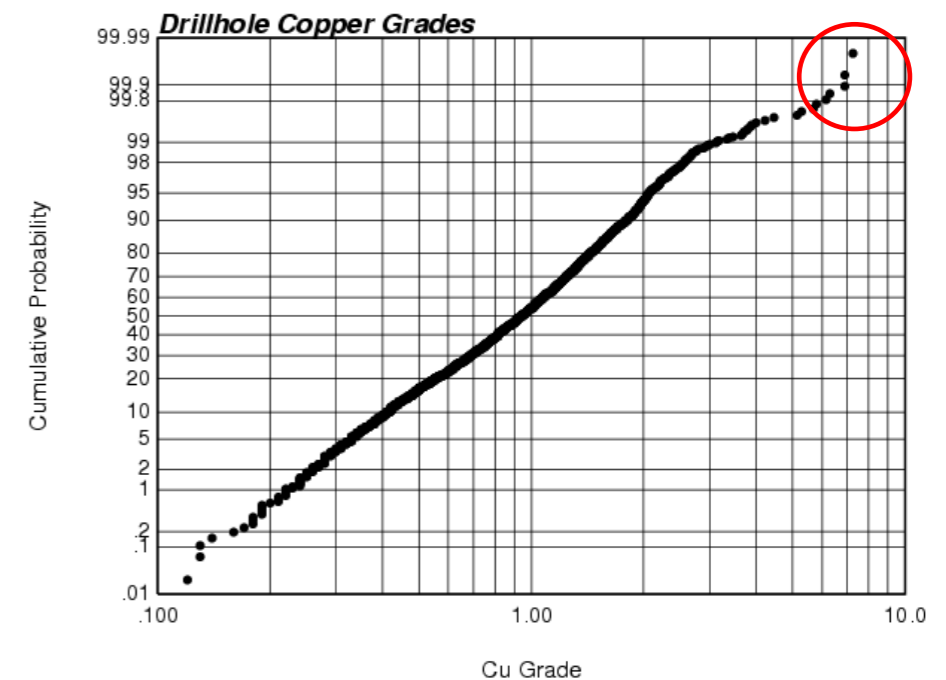
2. Modelamiento espacial de atributos – Análisis de datos

- Análisis de datos:
 - Preproceso:
 - **Limpieza** de datos → Outliers, imputación
 - Validación de datos → relaciones composicionales, restricciones mineralógicas
 - Estudio exploratorio → **Inferencia de relaciones** multivariadas y de relaciones entre variables de entrada y respuestas a procesos
 - **Selección** de variables → compresión, uso de correlaciones, colinearidad, relaciones multivariadas ocultas
 - **Modelamiento** preliminar:
 - Uso de proxy para simplificar predicción de respuestas
 - Modelo predictivo geometalúrgico



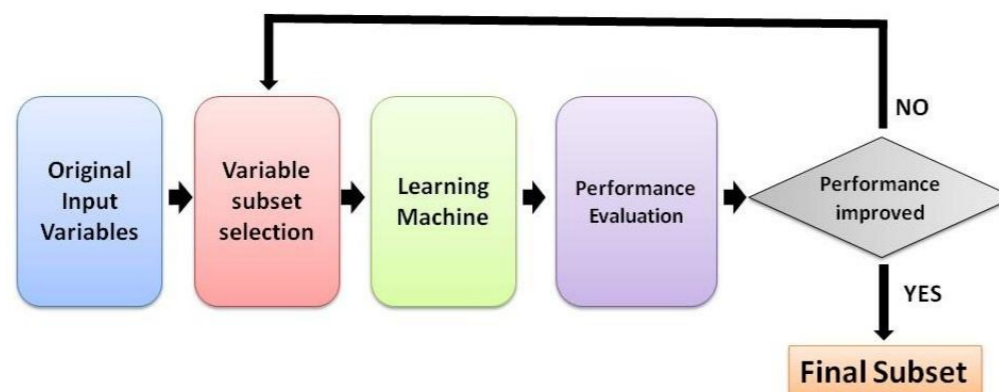
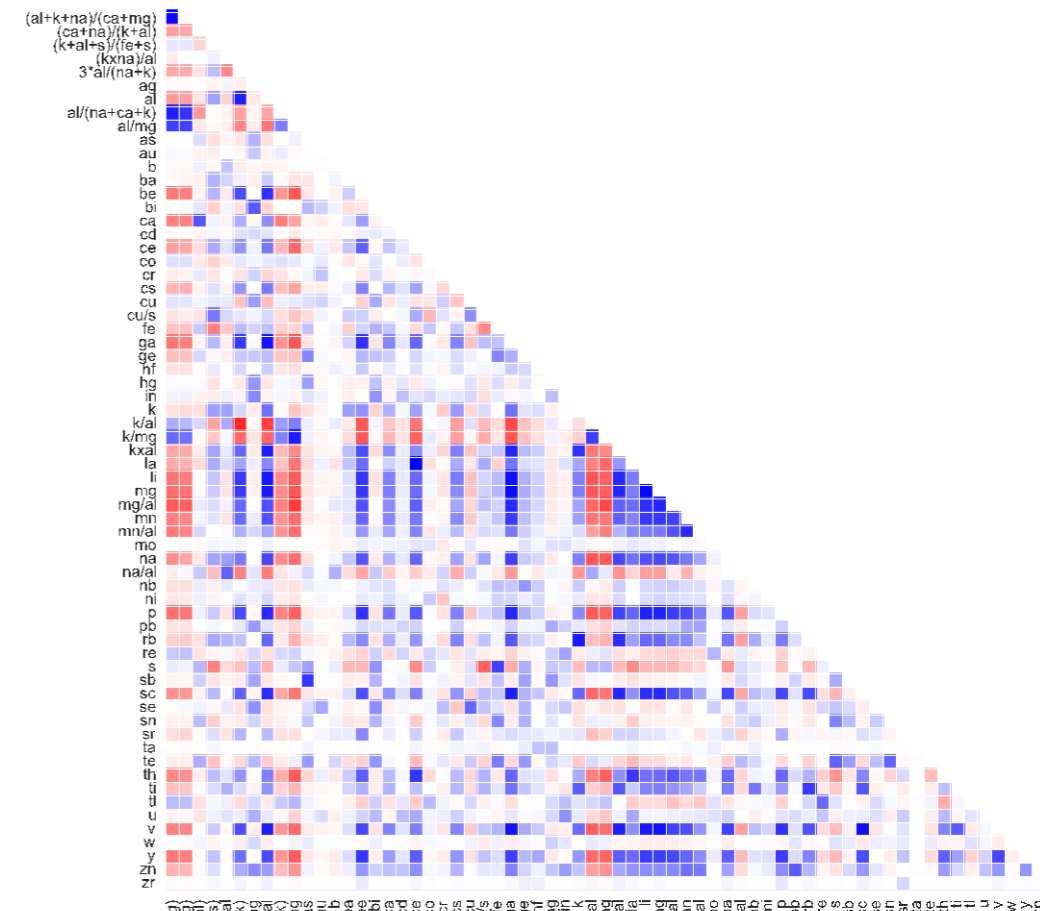
2. Modelamiento espacial de atributos – Análisis de datos

- Limpieza de datos → Outliers, imputación
 - **Outliers**: Existe una serie de tests estadísticos que se pueden complementar con una interpretación espacial
 - Dependen del modelo de distribución que se asuma (típicamente normal): z-scores, Grubbs
 - Uso de probability plot e histogramas
 - Cálculo de correlación entre indicadores consecutivos a distinta ley de corte
 - **Imputación**: rellenar BD
- Validación de datos:
 - Relaciones composicionales → suma de minerales = 100%
 - Restricciones mineralógicas → $CuT \geq CuS$



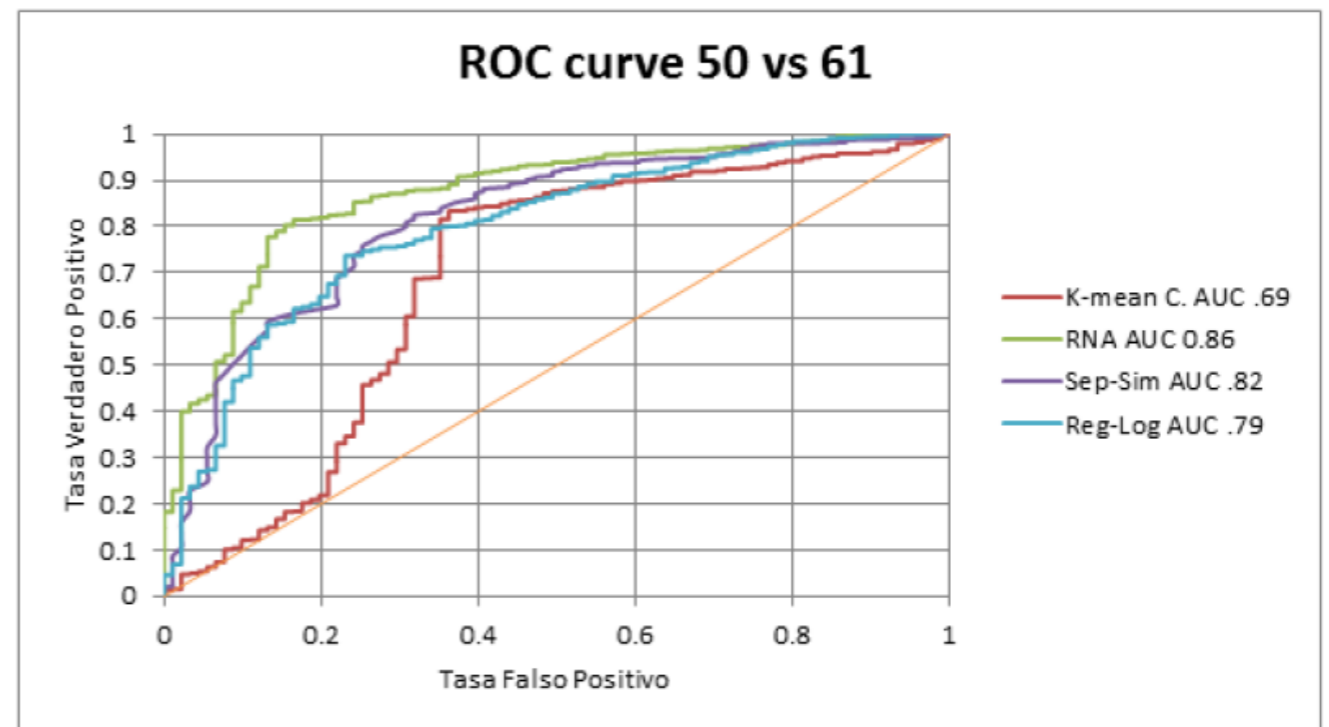
2. Modelamiento espacial de atributos – Análisis de datos

- Estudio exploratorio
 - Inferencia de relaciones multivariadas
 - Inferencia de relaciones entre variables de entrada y respuestas a procesos
 - Verificar hipótesis Gaussiana
 - Seleccionar atributos que permiten discriminar comportamientos → poblaciones
- **Selección de variables** → compresión, uso de correlaciones, colinearidad, relaciones multivariadas ocultas



2. Modelamiento espacial de atributos – Análisis de datos

- Modelamiento preliminar:
 - Uso de **proxy** para simplificar predicción de respuestas
 - Análisis de componentes principales
 - Modelos lineales
 - **Modelo predictivo** geometalúrgico:
 - Relaciona variables a soporte de datos disponibles
 - Escalamiento a nivel de operación pendiente



2. Modelamiento espacial de atributos – Definición de dominios de estimación / Construcción de modelos

- Dominios de estimación:
 - Corresponden a volúmenes en los cuales la respuesta de interés tiene un comportamiento “homogéneo”.
 - Esto es, donde el modelo predictivo es constante.
 - Equivalente al concepto de unidades de estimación en evaluación de recursos
- Definición de **dominios de estimación**:
 - Clasificación de datos geo-referenciados (resultado de análisis y selección de variables)
 - Modelamiento espacial con técnicas geoestadísticas:
 - Kriging de indicadores
 - Requiere etapa de suavizamiento del modelo
 - Debe verificarse consistencia entre datos y envolventes
- Construcción de modelos:
 - Aplicación de kriging y/o simulación
 - Variables deben ser aditivas
 - Atención con cambio de soporte

3. Modelamiento de cada proceso

- Modelos estadísticos son útiles cuando no se tiene una cabal comprensión del proceso.
 - Ejemplo: cuál es la relación entre la mineralogía de entrada y la recuperación en flotación (dadas condiciones de calidad de agua, medios de molienda, Eh, pH)
- Lo ideal es modelar el proceso (pero no restringirse a una regresión, sino que tomar en cuenta la variabilidad)
- **Problemas:**
 - Trazabilidad y caracterización de materiales entrando a cada proceso
 - Actualmente no conocemos la composición mineral de los materiales entrando a cada proceso → sensorización, caracterización más barata
 - Vinculación de características de materiales con respuestas a procesos mineros y metalúrgicos
 - Modelo estadístico vs modelo fenomenológico
 - Escalamiento y modelo predictivo
 - Fluctuaciones en procesos
 - Intervención humana (reactivos)

4. Optimización

- Optimización de procesos no debe hacerse por sí solos
- Optimización integrada a la planificación minera
- Dificultades:
 - Somos incapaces de predecir las respuestas metalúrgicas
 - Datos son insuficientes para un modelamiento espacial confiable
 - No sabemos qué variables son relevantes para nuestro modelo



Aplicación 1: modelo estadístico para predecir tipos de alteración, basado en información geoquímica

Objetivo:

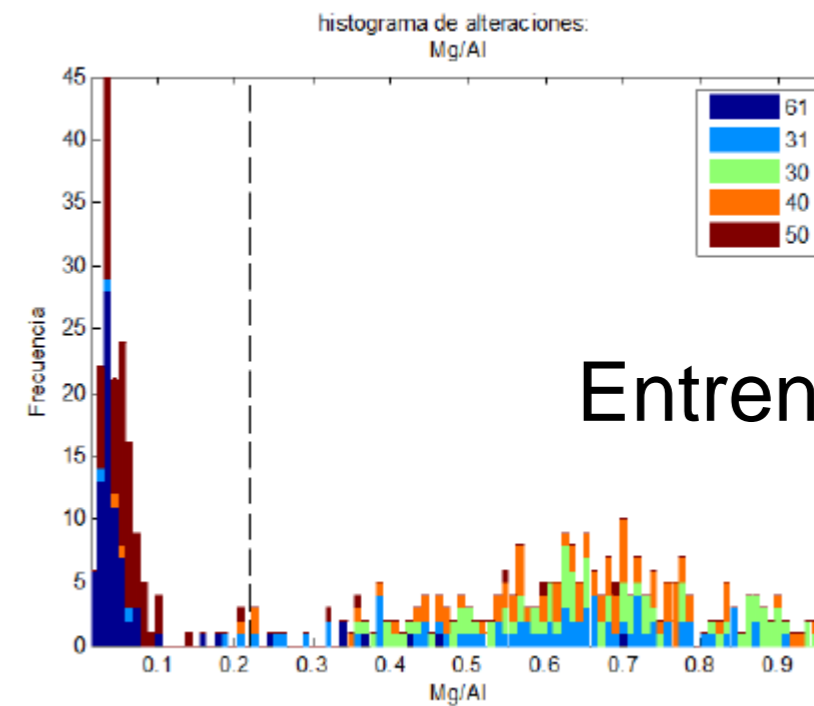
- Modelar **alteraciones** de manera **cuantitativa** a partir de información geoquímica y leyes

Información utilizada:

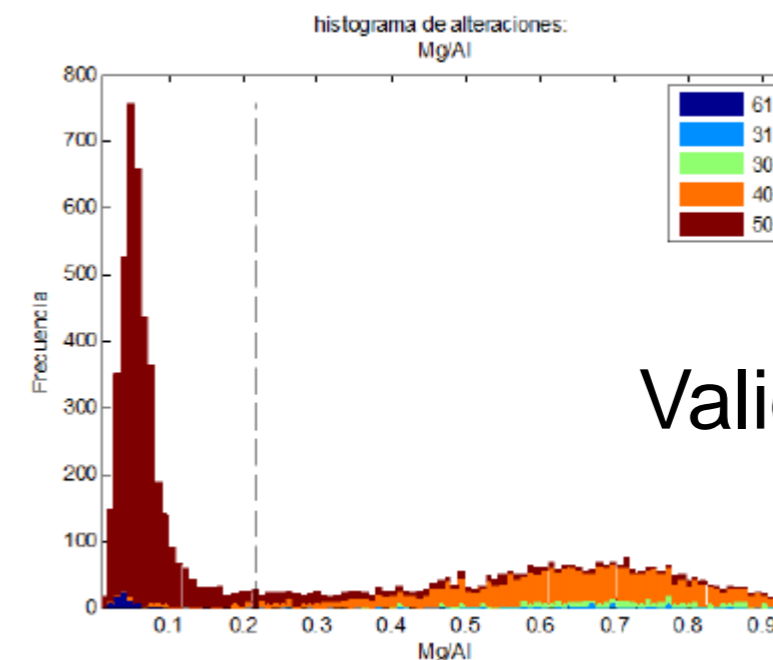
- Mapeos geológicos: lito, alt, min
- Geoquímica: 50+ variables
- Leyes: CuT, CuS, Fe, As

Etapas:

1. Revisión de geología del yacimiento
2. Generación de base de datos de trabajo
3. Estudio exploratorio de datos y selección de variables
4. Aplicación de herramienta de estadística multivariable para predecir Alteración
5. Evaluación de desempeño



Entrenamiento



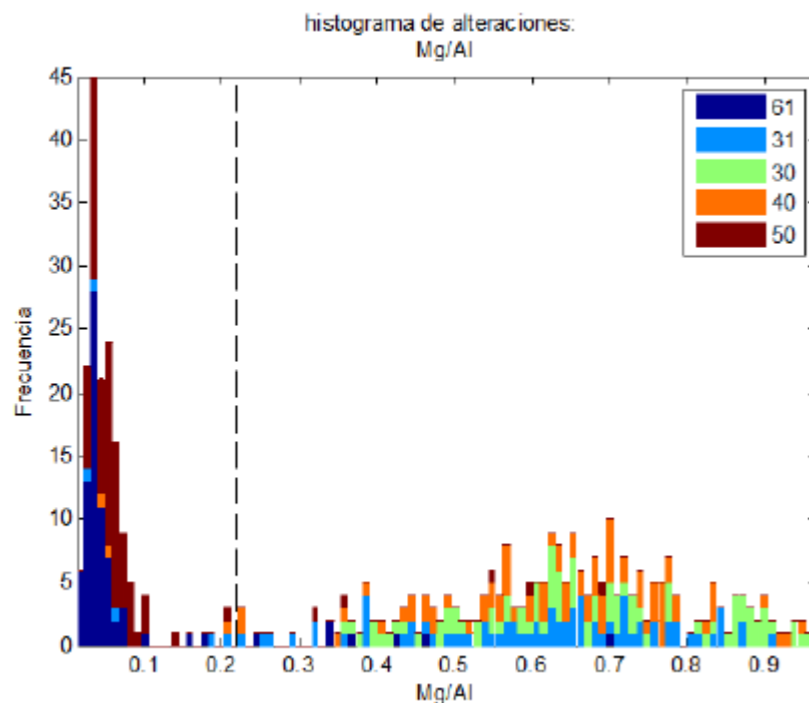
Validación

Aplicación 1: modelo estadístico para predecir tipos de alteración, basado en información geoquímica

Modelos estadísticos:

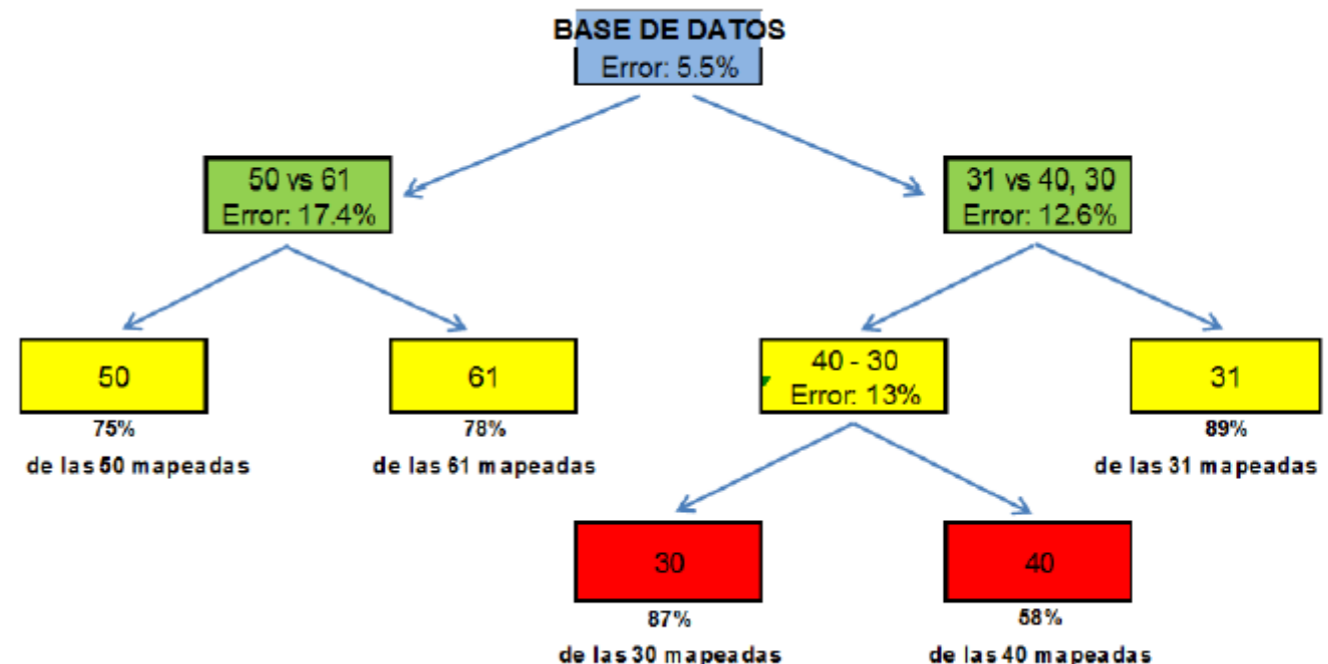
- Separación simple
- K-means clustering
- Regresión logística
- Redes Neuronales artificiales

Se genera un árbol de clasificación con >75% de coincidencia con mapeos



	Alt. Predicha	30	31	40	50	61
Alt. Mapeada	Cantidad de Datos	575	750	1412	3471	902
30	261	87%	3%	10%	0%	0%
31	115	8%	89%	0%	4%	0%
40	2169	15%	20%	58%	5%	2%
50	4474	0%	4%	3%	75%	18%
61	91	0%	2%	6%	14%	78%
		Acuerdo Promedio: 77.2%				

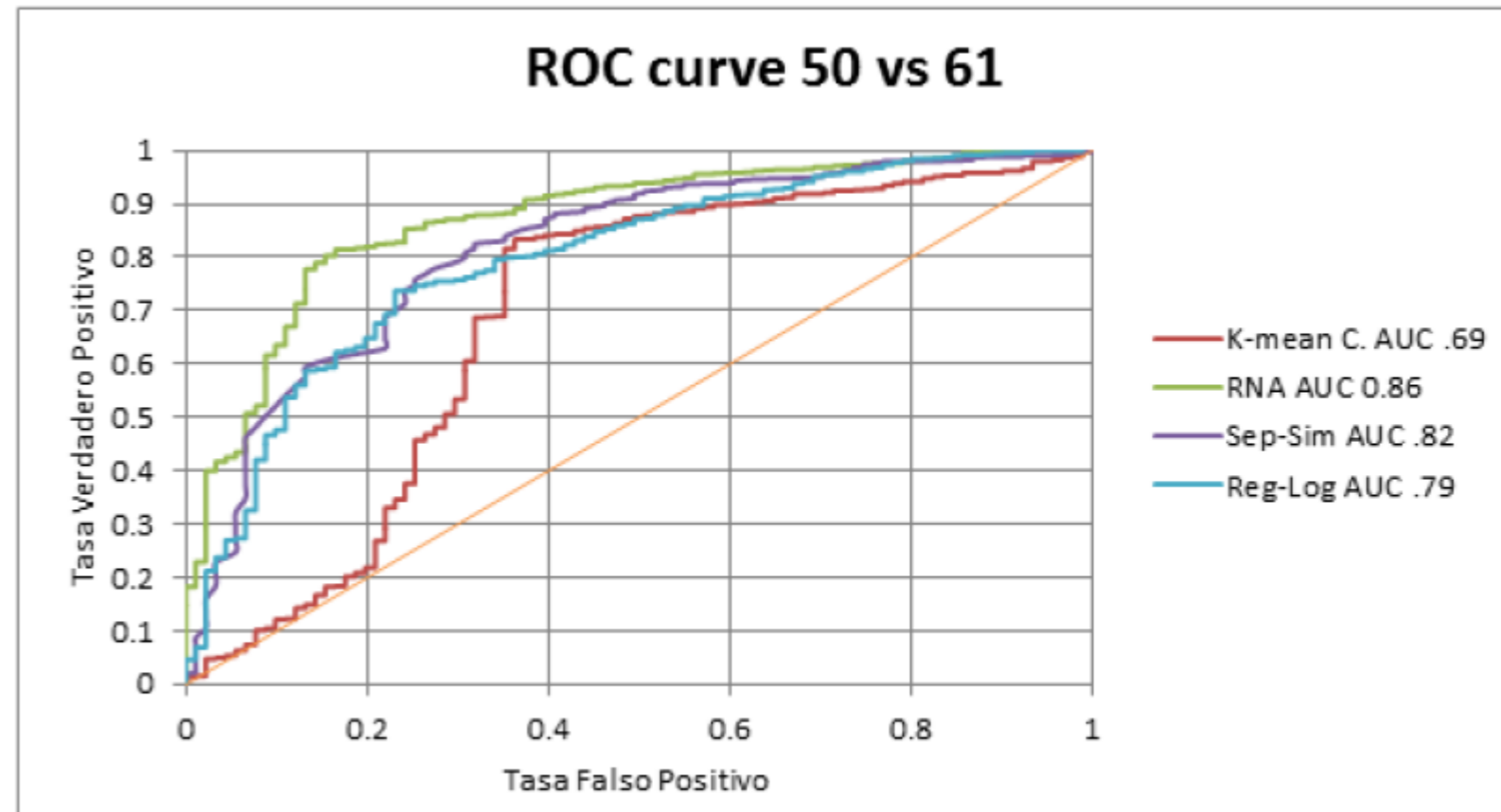
Tesis de Magíster en Minería
Roberto Miranda, 2015



Aplicación 1: modelo estadístico para predecir tipos de alteración, basado en información geoquímica

Modelos estadísticos:

- Separación simple
- K-means clustering
- Regresión logística
- Redes Neuronales artificiales

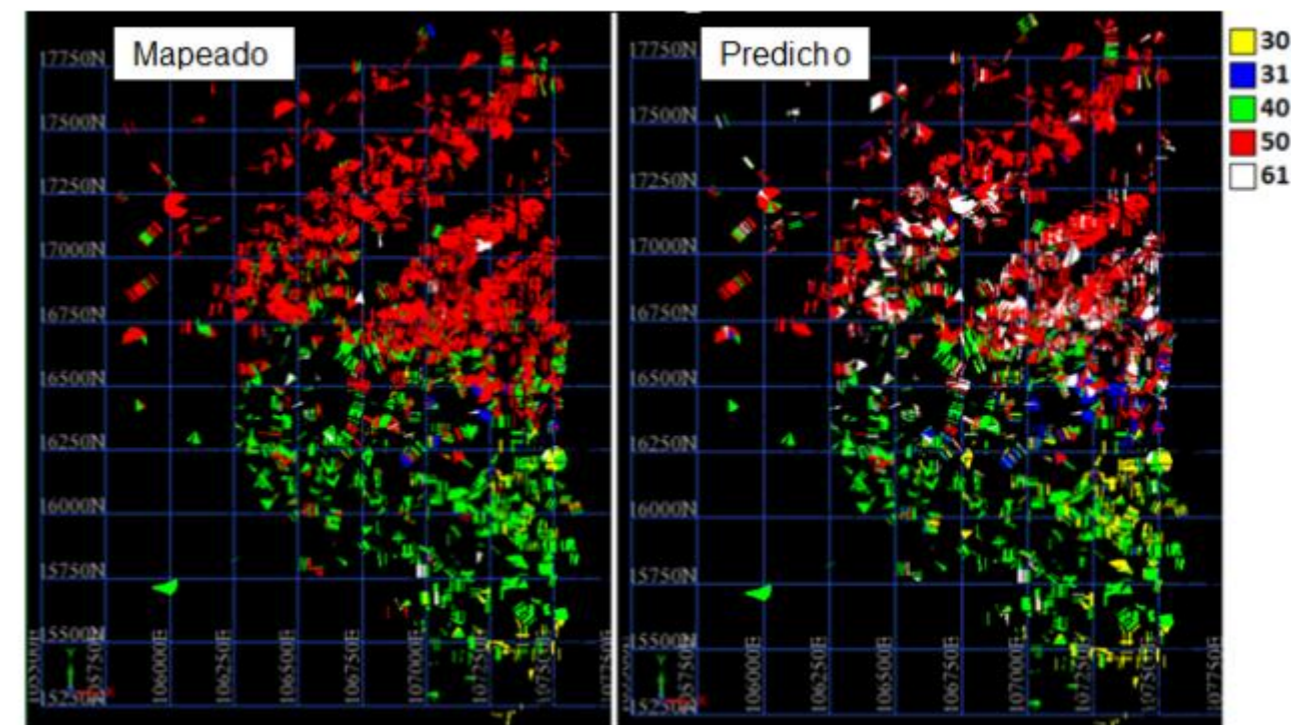
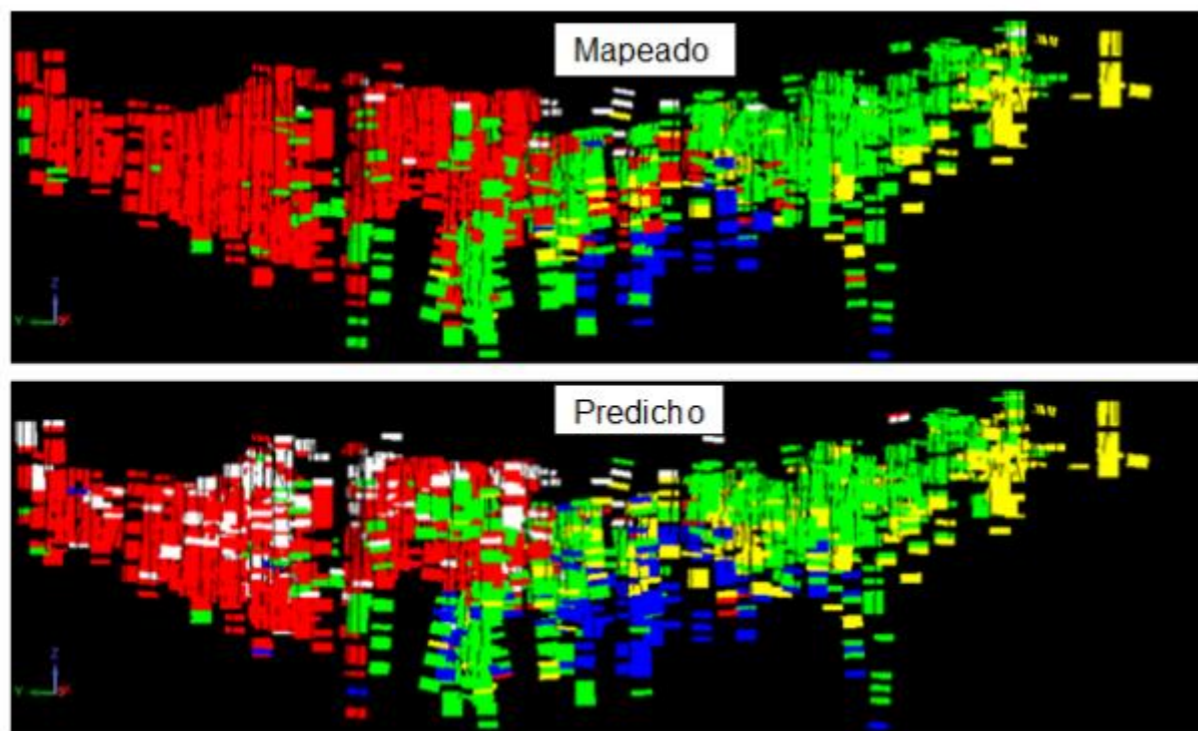


Metodología	Acierto promedio [%]	Desviación Estándar [%]
Separación Simple	71.5	16.1
K-mean Clúster	71.7	9.1
Regresión Logística	73.6	11.5
Red Neuronal Artificial	77.2	12.4

Tesis de Magíster en Minería
Roberto Miranda, 2015

Aplicación 1: modelo estadístico para predecir tipos de alteración, basado en información geoquímica

- Diferencia entre alteración mapeada y predicha con modelo estadístico. Se analizaron algunas secciones para ver las diferencias entre los mapeos y lo predicho con el modelo estadístico
- Conocimiento geológico y de proceso en selección de variables y en interpretación de variables seleccionadas



Tesis de Magíster en Minería
Roberto Miranda, 2015

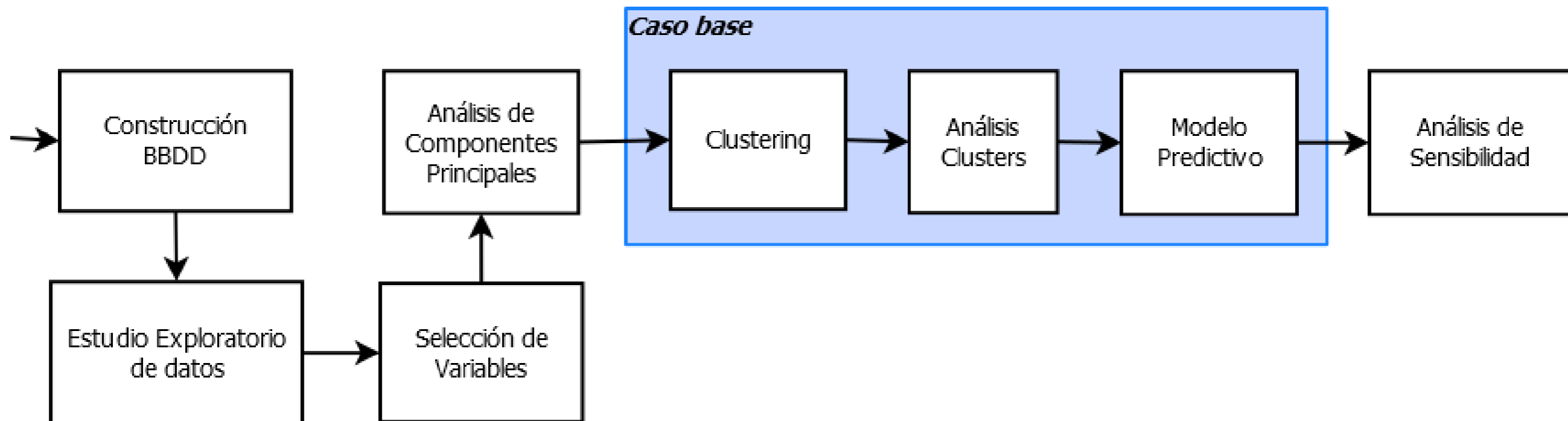
Aplicación 2: Definición de dominios geometalúrgicos

Objetivo:

- Generar metodología para definir **dominios geometalúrgicos**

Información utilizada:

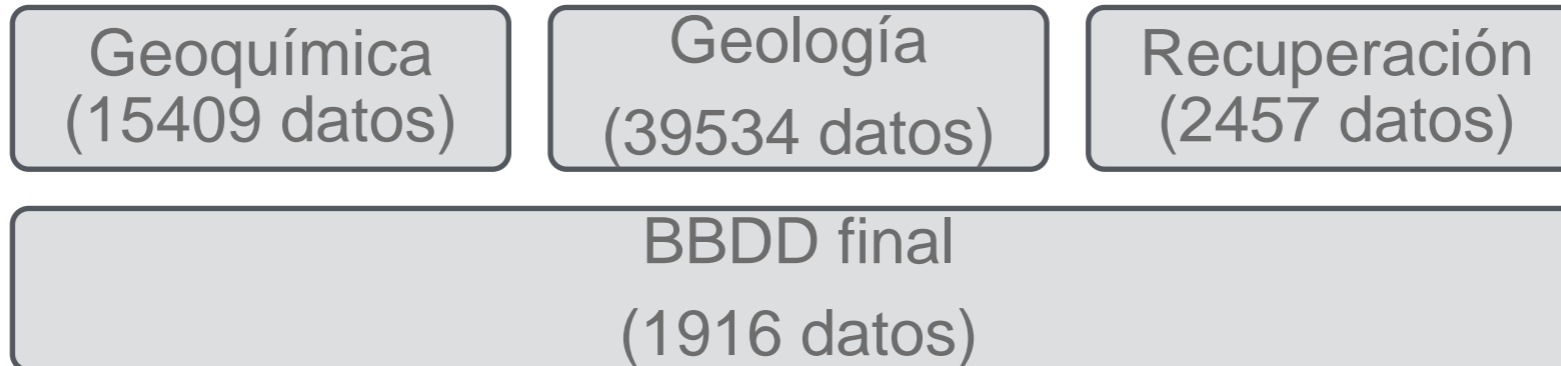
- Mapeos geológicos: lito, alt, min
- Geoquímica: 50+ variables
- Recuperación en flotación rougher



Memoria de Título
David Rosales, 2015

Aplicación 2: Definición de dominios geometalúrgicos

- Construcción de base de datos:

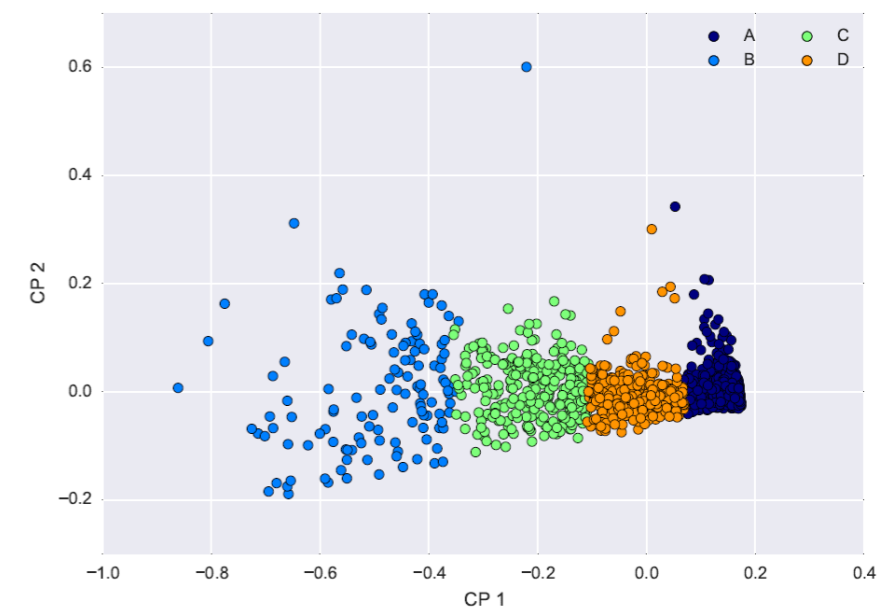
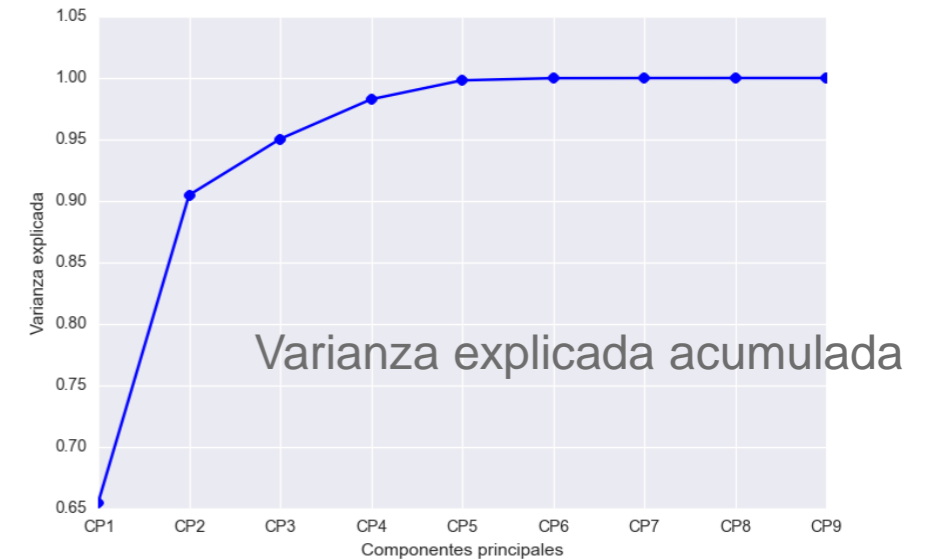
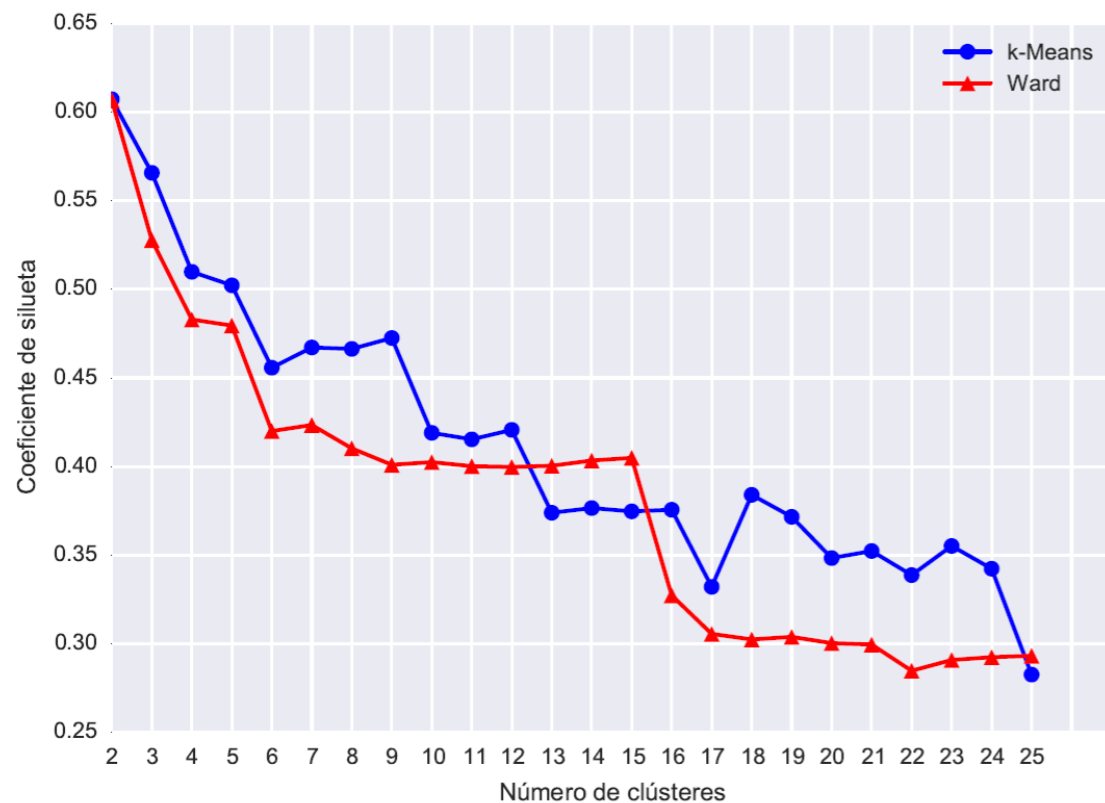


- Selección de variables relevantes

K/Alcc	0.58	(Ca+Na)/(K+Al)	0.06	Mn/Al	-0.28
K/Mg	0.51	W	0.05	Ca	-0.29
Al/Mg	0.50	In	0.03	K	-0.30
(Al+K)/(Na+Ca+Mg)	0.39	Ta	0.01	Rb	-0.32
(Al+K+Na)/(Ca+Mg)	0.35	Nb	0.00	Cs	-0.42
Al/(Na+Ca+K)	0.34	Zr	0.00	La	-0.44
Cu	0.33	Ni	-0.02	Th	-0.48
S	0.25	Cu/S	-0.03	Ce	-0.48
Na/Al	0.24	Co	-0.04	Mn	-0.49
Bi	0.20	Ba	-0.07	Sc	-0.54
Ag	0.18	B	-0.07	Na	-0.55
Se	0.16	Cd	-0.07	KxAl	-0.57
Te	0.15	Pb	-0.07	Y	-0.58
Cr	0.14	Hf	-0.11	Mg/Al	-0.58
As	0.14	U	-0.12	V	-0.60
Tl	0.13	(K+Al+S)/(Fe+S)	-0.15	Ga	-0.63
Sb	0.10	Ge	-0.16	P	-0.65
Sn	0.10	Mo	-0.16	Mg	-0.66
(KxNa)/Al	0.09	Fe	-0.19	Be	-0.66
Au	0.09	Ti	-0.19	3*Al/(Na+K)	-0.67
Hg	0.07	Zn	-0.26	Li	-0.69
Re	0.07	Sr	-0.26	Al	-0.70

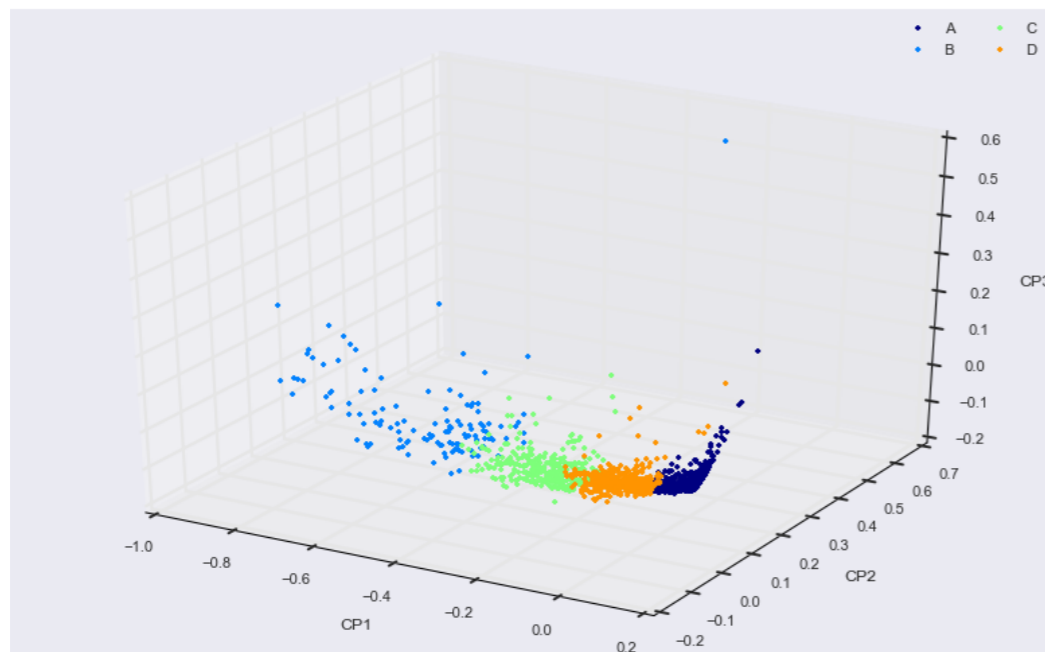
Aplicación 2: Definición de dominios geometalúrgicos

- Reducción de dimensionalidad – Análisis de componentes principales
- Clustering: métricas Ward o K-means
 - Elección de número de clusters → Coeficiente de silueta
 - Análisis e interpretación de clusters seleccionados

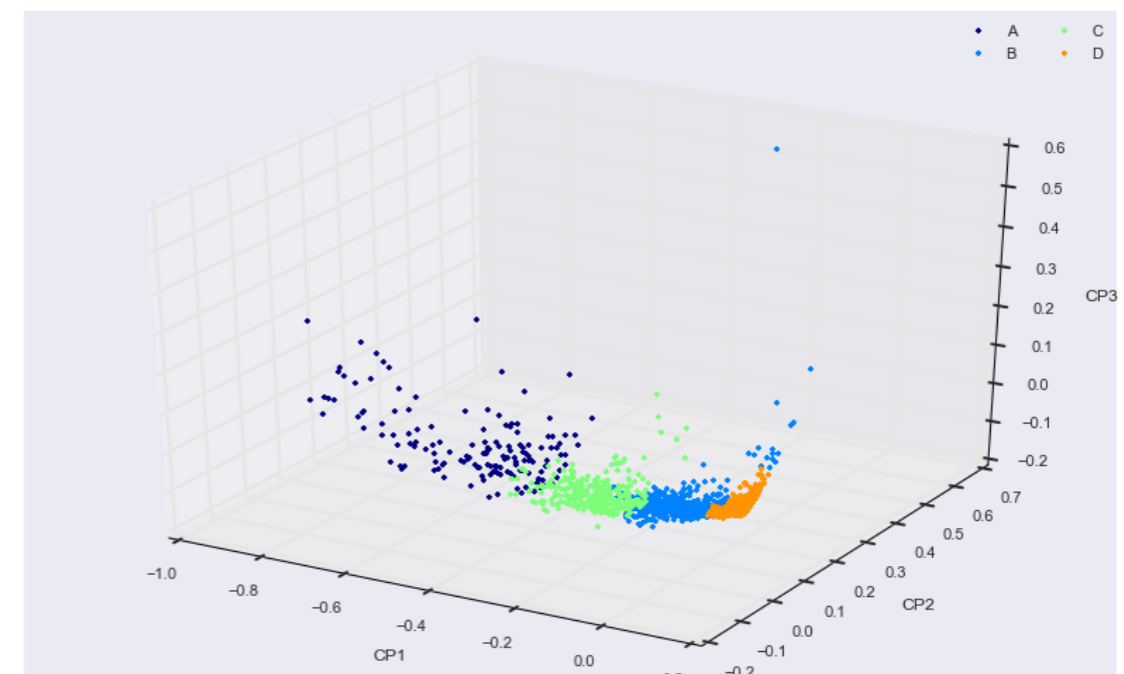


Aplicación 2: Definición de dominios geometalúrgicos

k-Means



Ward



Memoria de Título
David Rosales, 2015

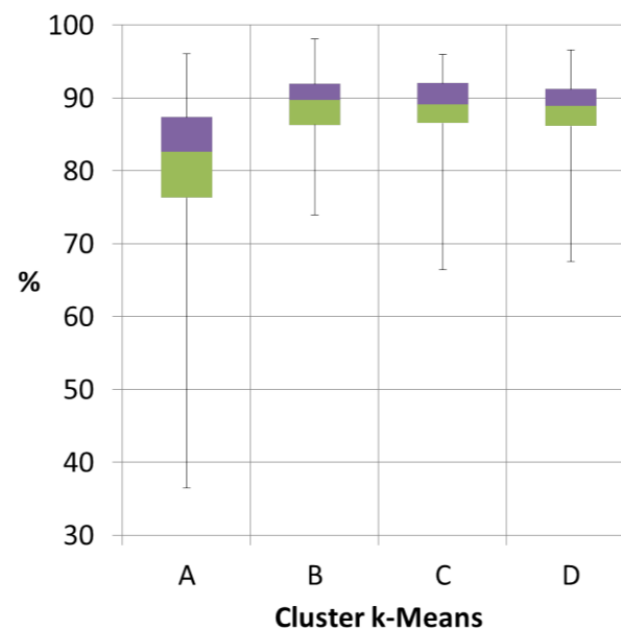
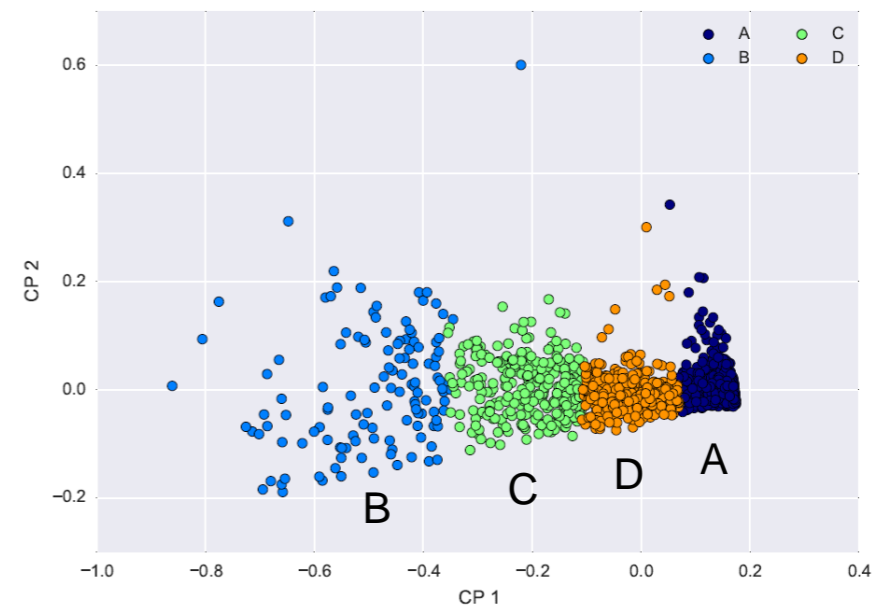
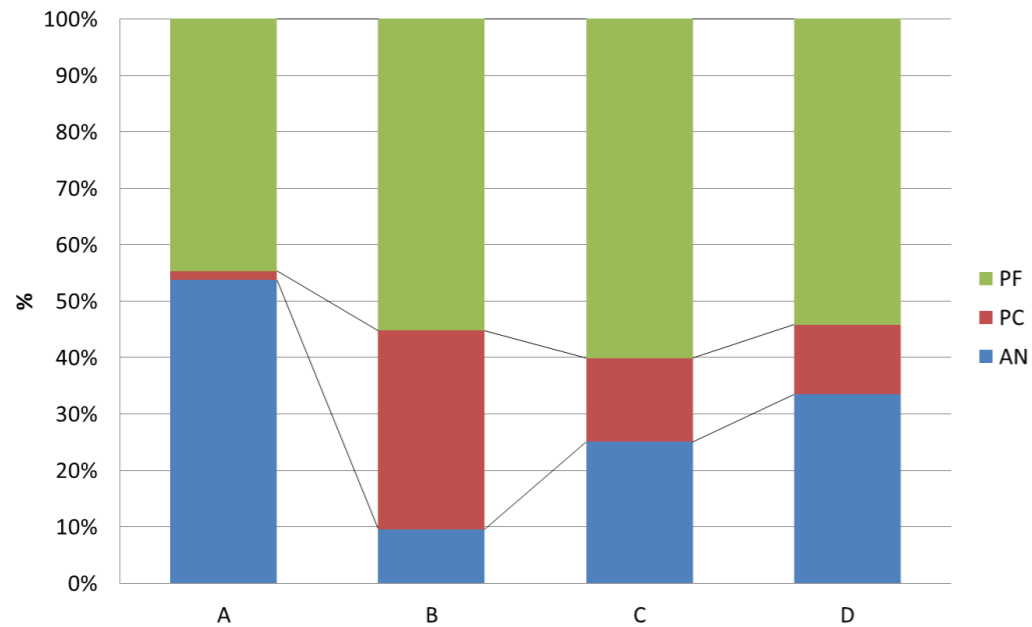
Ward

k-Means

	A	B	C	D
A	0%	10%	0%	90%
B	96%	1%	3%	0%
C	10%	1%	89%	0%
D	0%	95%	5%	0%

Aplicación 2: Definición de dominios geometalúrgicos

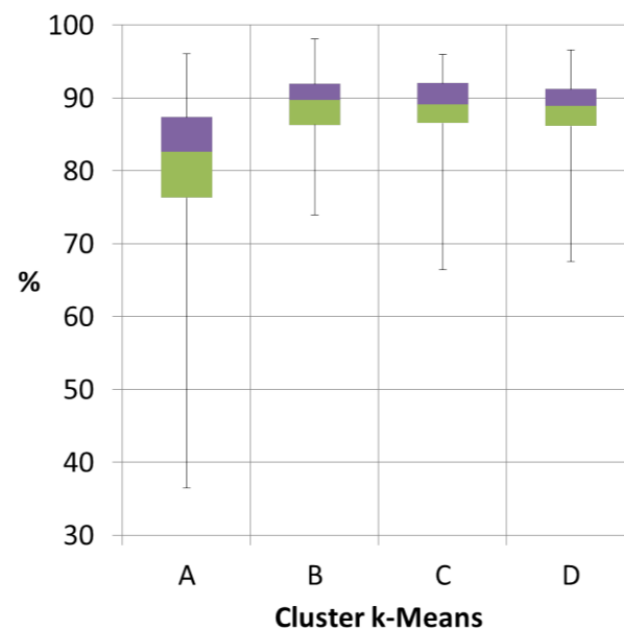
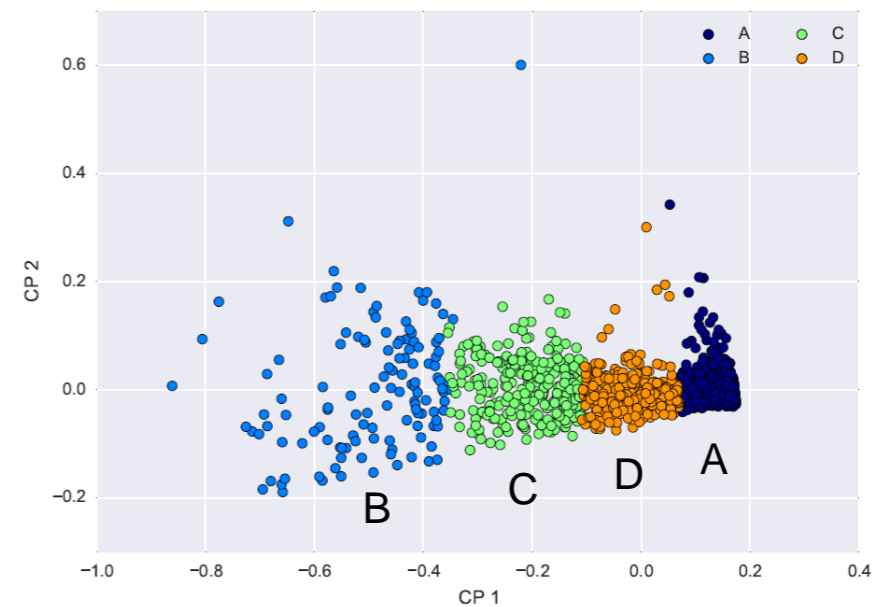
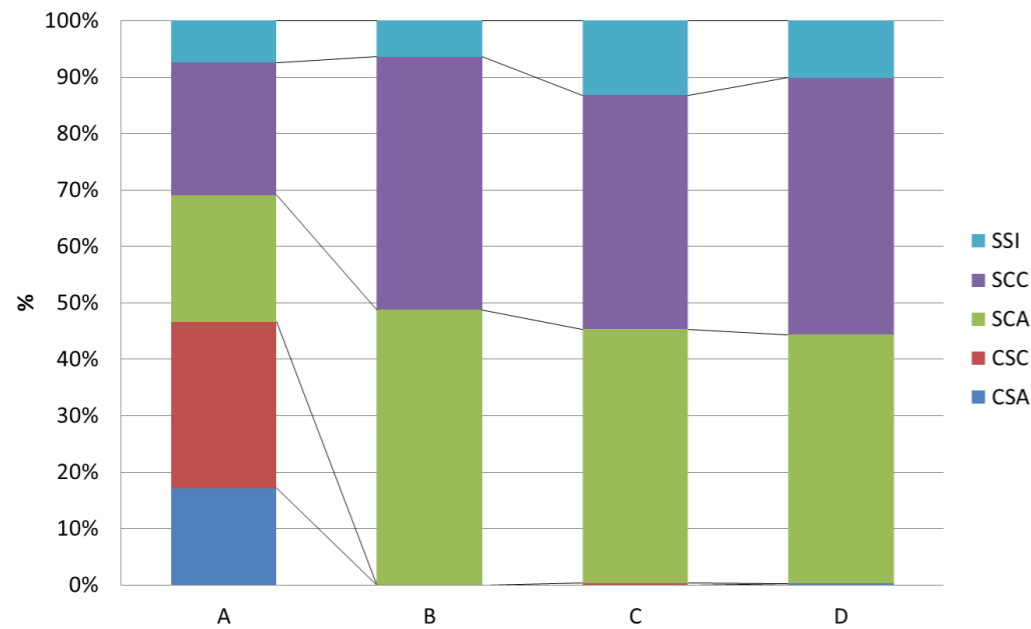
Litologías



Memoria de Título
David Rosales, 2015

Aplicación 2: Definición de dominios geometalúrgicos

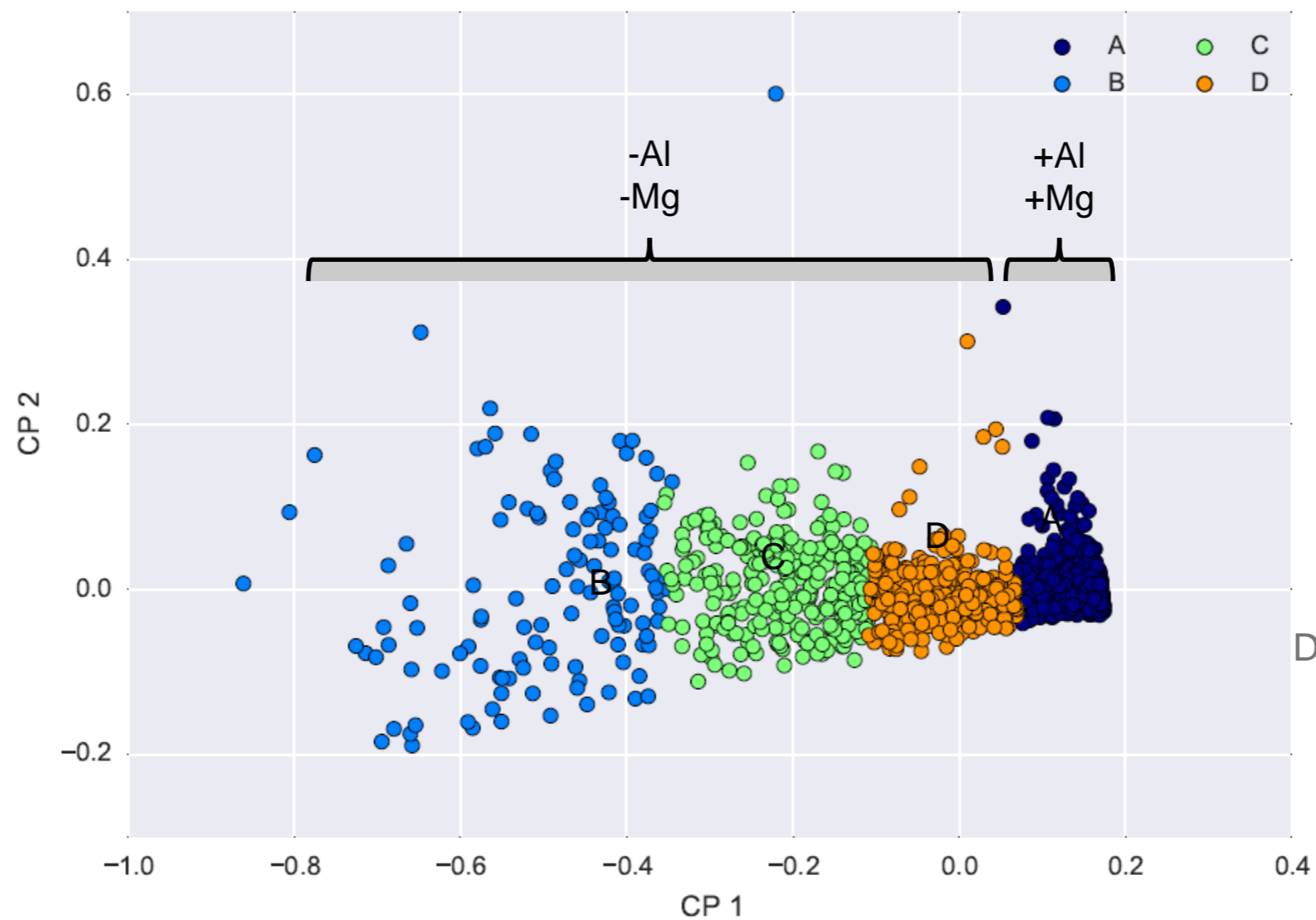
Alteraciones



Memoria de Título
David Rosales, 2015

Aplicación 2: Definición de dominios geometalúrgicos

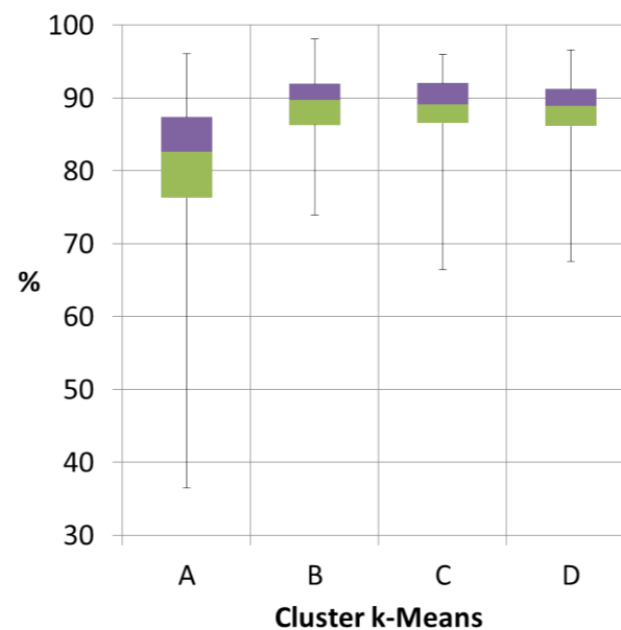
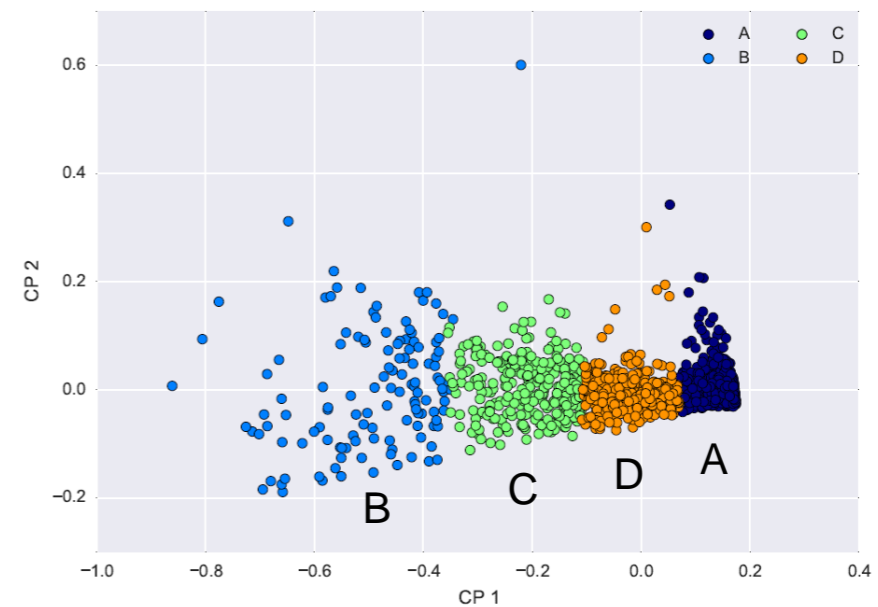
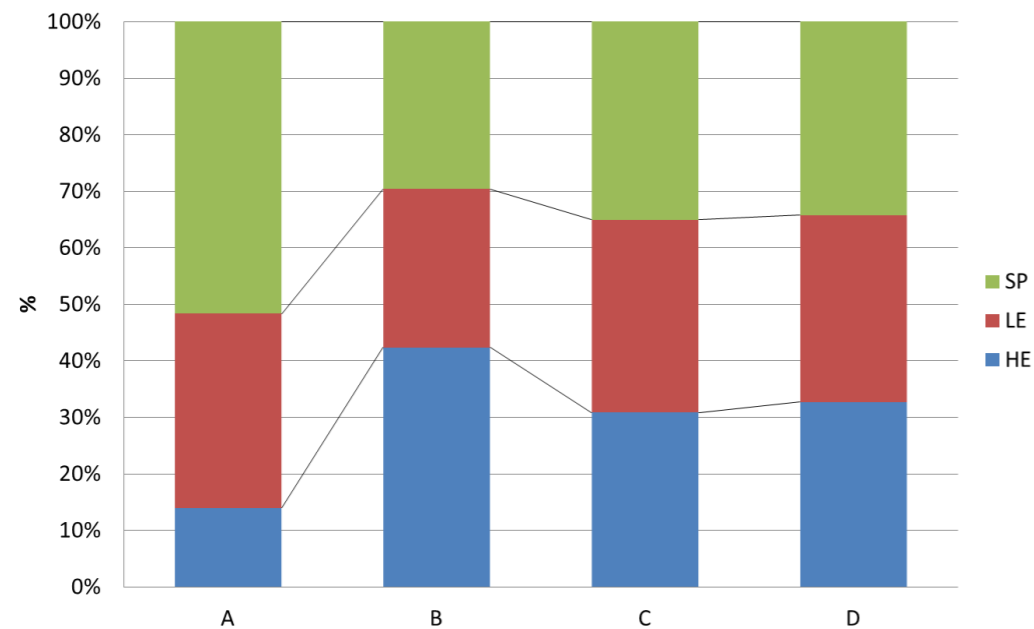
Alteraciones



Memoria de Título
David Rosales, 2015

Aplicación 2: Definición de dominios geometalúrgicos

Mineralizaciones



Memoria de Título
David Rosales, 2015

Aplicación 2: Definición de dominios geometalúrgicos

Modelo predictivo (multilineal)

k-Means

Ward

	A	B	C	D
	s=0.025	s=0.025	s=0.01	s=0.01
(Al+K)/(Na+Ca+Mg)	0	0	0	0
3*Al/(Na+K)	-0.33	-0.39	0	0
Al	-2.59	-7.43	0	-2.09
Al/(Na+Ca+K)	0.28	0.12	0	0
Al/Mg	0	0	0	0
Be	-6.38	0	3.93	0
Cu	1.91	4.87	7.97	5.22
K/Al	0	0	2.67	0
K/Mg	0	0	0	0.17
Mg	0	0	-113	0
P	0	-0.003	0	0
S	0	0.07	0.09	0.07
V	0	-0.18	-0.13	-0.06
Intercepto	80.04	90.08	84.510	84.6
R2	0.492	0.392	0.261	0.167
N° de datos	864	125	311	406

	A	B	C	D
	s=0.025	s=0.01	s=0.025	s=0.025
(Al+K)/(Na+Ca+Mg)	0	0	0	0
3*Al/(Na+K)	0	0	0	-0.32
Al	-7.15	0	0	-3.17
Al/(Na+Ca+K)	0	0	0	0.3
Al/Mg	0	0	0	0
Be	0	-0.40	0	-5.73
Cu	5.16	5.12	5.94	1.59
K/Al	1.77	2.92	1.81	0
K/Mg	0	0.18	0	0
Mg	-5.37	0	-90.48	0
P	0	0	0	0
S	0	0.16	0	0
V	-0.2	-0.06	0	0
Intercepto	88.20	81.070	85.860	80.035
R2	0.312	0.192	0.206	0.477
N° de datos	150	481	301	774

Próximos pasos

- Investigación y desarrollo avanza en la dirección necesaria para mejorar nuestras herramientas de modelamiento geo-minero-metalúrgico
- Nuevas herramientas estadísticas para modelar
- Nuevos equipos para mejorar nuestra comprensión de los procesos
- El futuro no es tan aterrador...



Próximos pasos



Magotteaux Mill®

Mill

Sensor probes

Eh, pH, DO, Temp

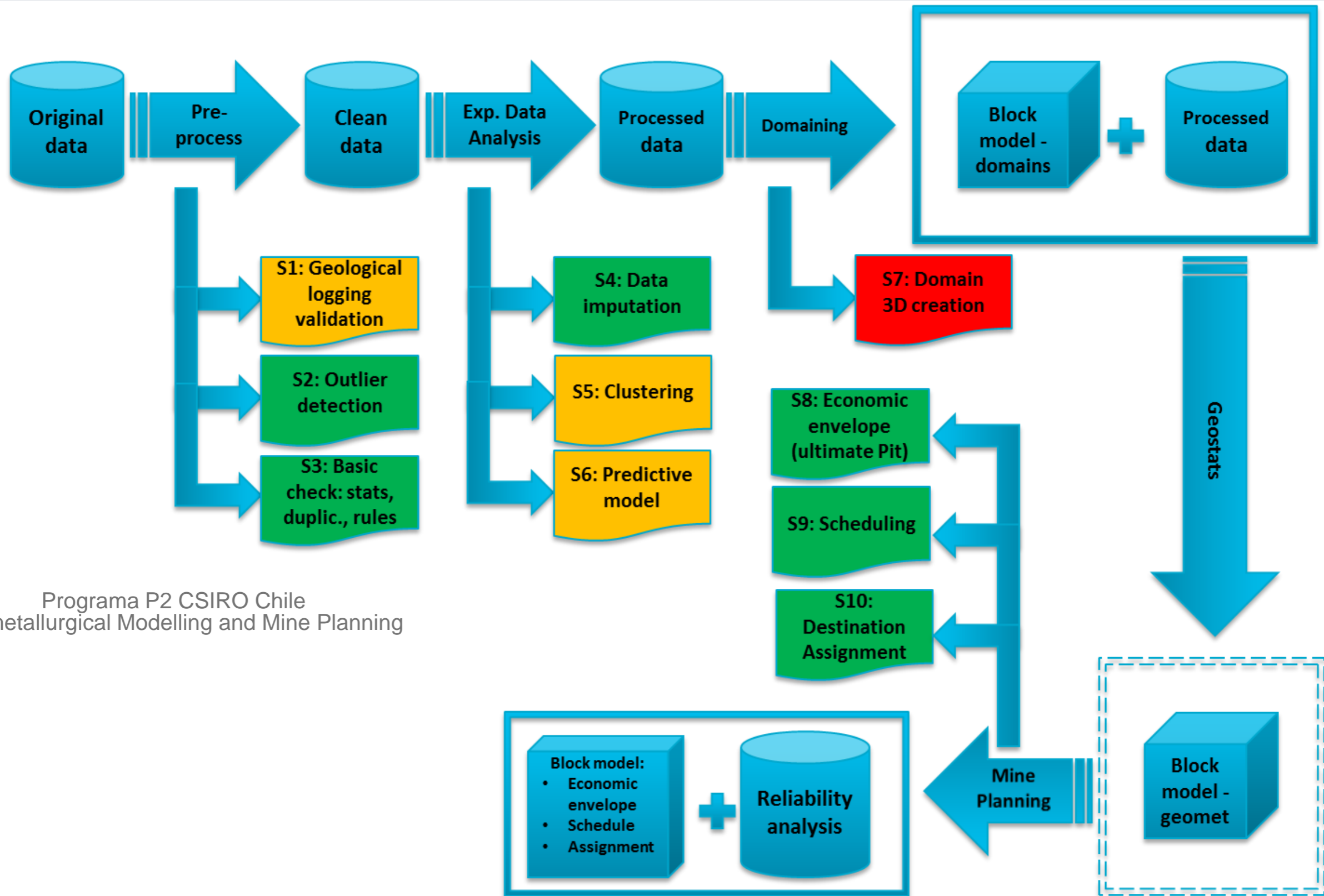
Data logger

Peristaltic pump

**(EDTA extraction
equipment)**



Próximos pasos



Programa P2 CSIRO Chile
Geometallurgical Modelling and Mine Planning

Discusión

- El modelamiento geo-minero-metalúrgico constituye un gran desafío
- **Dificultades:**
 - En general, disponemos de pocos datos
 - No sabemos si los datos que tenemos son los más adecuados
 - Entendemos parcialmente la relación entre las características de los materiales y los procesos
 - Construcción de modelos espaciales basado en pocos datos
- **Cómo enfrentarlas:**
 - Existen numerosas técnicas estadísticas para modelar procesos que no entendemos bien
 - Validación es crucial
 - Realizar sensibilizaciones permite entender la reacción del procesos a cambios en las variables de entrada
- Para el futuro:
 - Se requieren **más datos y más estudios** para entender los procesos

Modelamiento Geo-Minero-Metalúrgico de Yacimientos

Julián M. Ortiz, Ph. D.

AMTC, Universidad de Chile
Depto. Ingeniería de Minas, Universidad de Chile