



ESCUELA DE  
GEOLOGÍA

ESTUDIO DE MALLA DE MUESTREO ÓPTIMA PARA MUESTRAS  
GEOMETALÚRGICAS EN VETAS DE Au-Ag, EL PEÑÓN, ANTOFAGASTA,  
CHILE

Memoria entregada a la Universidad Mayor en cumplimiento de los requisitos para optar al  
Título de Geóloga.

FLORENCIA FRANCISCA ATENAS GODOY

Profesor guía:

PAULA LARRONDO DURÁN

Miembros de la Comisión Evaluadora de Examen:

XIMENA PRIETO VÉLIZ

KARLA ROJAS SOUBLETTE

SANTIAGO, CHILE

ABRIL, 2022

## RESUMEN

El yacimiento El Peñón corresponde a un depósito epitermal de Au-Ag de baja sulfuración, ubicado en la depresión central en el desierto de Atacama al sureste de Antofagasta, en la Región de Antofagasta, en el norte de Chile. Su mineralización se presenta, principalmente, en vetas orientadas norte – sur con la ocurrencia mineral de silicatos, sulfuros de metales base, carbonatos y en menor medida óxidos y sulfosales de plata.

Históricamente, las recuperaciones de oro y plata junto con el consumo de cianuro de sodio se han mantenido sin variaciones relevantes durante el tiempo. Sin embargo, la incorporación de nuevas estructuras del Bloque Pampa Augusta Victoria, advierten de un posible comportamiento geometalúrgico distinto al histórico. Los resultados preliminares de las pruebas geometalúrgicas realizadas en las vetas Victoria y Elizabeth, sugieren una disminución de la recuperación de plata y un aumento del consumo de cianuro de sodio. Un comportamiento geometalúrgico similar, ya había sido observado durante la explotación de las vetas Aleste y Bonanza del Bloque Norte. Las estructuras del Bloque Norte fueron las primeras estructuras en mostrar comportamientos metalúrgicos anómalos en relación con lo observado históricamente. La disminución en las recuperaciones de plata y el aumento del consumo de cianuro de sodio en las vetas Aleste y Bonanza, se relaciona con la ocurrencia específica de ciertos minerales de mena y ganga. Se propone realizar un análisis exploratorio de datos y de correlación espacial de los análisis geometalúrgicos disponibles para las vetas del Bloque PAV, para establecer los controles geológicos que pueden explicar las variaciones en el comportamiento geometalúrgico.

Adicionalmente, se plantea la interrogante de si al aumentar la densidad de muestras disponibles para el control de mineral, disminuyendo el espaciamiento entre muestras geometalúrgicas, será posible mejorar la predicción mensual de las variables geometalúrgicas. El objetivo es minimizar el impacto que tienen la reducción inesperada de las recuperaciones metalúrgicas, así como el aumento inesperado del consumo de cianuro de sodio, en los procesos de explotación y procesamiento, con respecto a lo planificado. Para responder a esta interrogante se propone realizar un análisis de malla óptima para muestras geometalúrgicas, a través de la simulación geoestadística que permiten valorizar la incertidumbre para distintos espaciamientos de muestreo.

Los resultados obtenidos indican que los parámetros geometalúrgicos en ambas vetas se caracterizan por distribuciones estadísticas de alta variabilidad independiente de la cantidad de muestras, lo cual se traduce en una correlación espacial reducida. El estudio realizado sugiere que una parte de la variabilidad observada en las distribuciones obedece a aspectos vinculados a la calidad de los datos, entre los que destacan los protocolos de análisis de las pruebas metalúrgicas y la metodología utilizada para asignar los atributos geológicos de litología, alteración, así como la ausencia de información mineralógica de detalle georeferenciada. En efecto, una mayor variabilidad al nivel de los resultados de los análisis se traduce en una mayor variabilidad a distancias cercanas a cero. Por otra parte, la falta de criterios geológicos que permitan definir dominios de estimación de menor varianza y mayor continuidad espacial resulta en la pérdida de continuidad a cortos alcances. Los modelos de correlación espacial resultantes no permiten concluir que, a volúmenes de extracción mensuales, reducir el espaciamiento resultará en una reducción de la incertidumbre. En contraposición, es posible que, al abordar las fuentes de variabilidad a nivel de análisis y asignación de atributos geológicos, sea posible definir dominios de estimación que resulten en distribuciones de las variables geometalúrgicas de menor varianza. La reducción de la variabilidad probablemente mejore la continuidad espacial, y por consiguiente las medidas de incertidumbre disminuyan sin que sea necesario optar por un muestro más denso.

## AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos van dirigidos a la empresa Yamana Gold Inc y Mineral Meridian Ltda, quienes me brindaron la oportunidad de desarrollar mi proyecto de investigación en el yacimiento El Peñón. Gracias a Javier Órdenes, Karla Rojas y Alex Milos por el tiempo y la buena disposición a ayudar. También a Ximena Prieto, por sus conocimientos en metalogénesis y a Marcelo Arancibia y Dafne Herreros quienes me entregaron gran conocimiento en el manejo del software Vulcan.

A mi familia y amigos, por el incondicional apoyo, sobre todo a mi querida amiga Silvi, que fue un apoyo emocional fundamental en el desarrollo de esta investigación. A mi madre, quien me dio la perseverancia y motivación para cumplir mis metas y no rendirme nunca. Y a Jose, quien se incorporó a mi círculo más cercano en los últimos metros antes de la meta y me dio total apoyo y amor. Gracias.

Finalmente, siempre estaré en deuda con mi querida profesora Paula Larrondo, que fue quien me impulsó y motivó a estudiar esta área de la geología. ¡Gracias por su sabiduría, conocimiento y sobre todo por su tiempo!

Gracias infinitas.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivos generales.....	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
1.3. Metodologías .....	6
1.3.1. Análisis exploratorio de datos .....	6
1.3.2. Análisis de distribución espacial .....	7
1.3.3. Correlación espacial .....	8
1.3.4 Interpolación mediante inverso a la distancia.....	9
1.3.5. Simulación geoestadística y validación.....	9
1.3.6. Malla optima e incertidumbre .....	10
CAPÍTULO II: ANTECEDENTES GEOLÓGICOS Y METALÚRGICOS.....	14
2.1. Aspectos Geológicos .....	14
2.1.1. Alteración hidrotermal.....	15
2.1.2. Mineralogía de mena y ganga.....	17
2.2. Metalurgia.....	19
2.2.1 Antecedentes geometalúrgicos. ....	21
CAPÍTULO III: RESULTADOS .....	26
3.1. Análisis Exploratorio de Datos.....	28

3.2. Correlación espacial. ....	55
3.3 Simulación geoestadística.....	59
3.3.1. Simulación de la verdadera distribución. ....	61
3.3.2. Muestreo de las simulaciones.....	64
3.3.3. Estimación .....	66
3.3.4. Promedio de bloques a soporte mensual.....	66
3.3.5. Medidas comparativas entre incertidumbre y espaciamiento de datos.....	67
CAPÍTULO IV: DISCUSIONES .....	70
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	77
REFERENCIAS .....	80
<b>ANEXO A</b> .....	82
<b>ANEXO B</b> .....	106
<b>ANEXO C</b> .....	114

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación yacimiento El Peñón. Extraído y modificado de Makshev (2001) y Zuloaga (2006). -----	1
Figura 1.2 Diagrama de flujo sintetizado de la planta de procesamiento El Peñón. Extraído y modificado de Órdenes, (2014). -----	4
Figura 1.3. Esquematización de la aplicación de unfolding para una estructura curvilínea. Extraído y modificado de Deutsch (2004). -----	10
Figura 1.4. Flujo de desarrollo de metodología de malla óptima. Extraído y modificado de Wilde y Deutsch (2010). -----	12
Figura 1.5. Diagrama de flujo metodología de simulación.-----	13
Figura 2.1. Mapa geológico Distrito Minero El Peñón. EP: El Peñón. Modificado y extraído de Warren, (2005).-----	15
Figura 2.2. Distribución de las alteraciones en el Distrito El Peñón (delimitado por el polígono negro). El polígono rojo representa la ubicación de las vetas en estudio. EP: El Peñón Bloque Norte, PAV: Pampa Augusta Victoria. Modificado y extraído de Warren (2005 -----	16
Figura 2.3. Esquema vertical de la distribución mineralógica en Veta Bonanza. Extraído y modificado de Órdenes, (2014). -----	19
Figura 2.4. Esquematización de la toma de muestras geometalúrgicas en las vetas del Distrito El Peñón. Extraído y modificado de Órdenes, (2014). -----	22
Figura 3.1. Visualización en el espacio de las vetas en estudio. A) Bloque Norte, Vetas Aleste y Bonanza, perfil NS con vista hacia el oeste. B) Bloque PAV, Vetas Victoria y Elizabeth, isométrica con vista hacia el SW.-----	27

Figura 3.2. Vista en perfil NS de la distribución de Tasa de filtrado (superior) y velocidad de sedimentación (inferior). Las muestras en color azul oscuro tienen un valor -1, que corresponde a sin análisis. -----	30
Figura 3.3. Gráficos de cajas y bigotes para recuperaciones de plata (A) y recuperaciones de oro (B) para las cuatro vetas en estudio.-----	32
Figura 3.4. Gráfico de cajas y bigotes para Consumo de cianuro de sodio en las cuatro vetas. ---	32
Figura 3.5. Gráficos de cajas y bigotes para velocidad de sedimentación (A) y tasa de filtrado (B) para cada veta. -----	33
Figura 3.6. Nubes de dispersión de recuperaciones de plata versus ley de plata.-----	34
Figura 3.7. Nubes de dispersión para recuperación de oro versus ley de oro en vetas del Bloque Norte. -----	35
Figura 3.8. Vistas isométricas hacia el suroeste en vetas Victoria y Elizabeth. Tipo Litológico (A), recuperación de plata (B).-----	38
Figura 3.9. Perfil NS vetas Aleste y Bonanza. Tipos litológicos (A) y recuperación de plata (B). -----	38
Figura 3.10. Curvas de probabilidad acumulada según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y vetas Bloque Norte (derecha).-----	40
Figura 3.11. Gráfico de cajas y bigotes según litología para recuperación de plata, veta Victoria (izquierda) y vetas Aleste-Bonanza (derecha). Los colores corresponden a la misma leyenda que para la Figura 3.10. -----	41
Figura 3.12. Curvas de probabilidad acumulada para recuperaciones de oro según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y veta Aleste-Bonanza (derecha). -----	42
Figura 3.13. Vista isométrica hacia el suroeste. Tipos litológicos (A) y recuperación de oro (B), vetas Bloque PAV.-----	42

Figura 3.14. Perfil NS vetas Bloque Norte. Tipo litológico (A) y recuperación de oro (B). -----	43
Figura 3.15. Gráficos de cajas y bigotes para recuperación de oro según tipo litológico. Veta Victoria (izquierdo) y veta Aleste-Bonanza (derecho) Los colores corresponden a la misma leyenda que para la Figura 3.12. -----	43
Figura 3.16. Nubes de dispersión de consumo de cianuro de sodio versus recuperación de plata y recuperación de oro. -----	44
Figura 3.17. Vista isométrica en Bloque PAV de las recuperaciones de plata, consumo de cianuro de sodio y recuperación de oro -----	45
Figura 3.18. Perfil NS de las de las recuperaciones de plata, consumo de cianuro de sodio y recuperación de oro en Bloque Norte. -----	45
Figura 3.19. Curvas de probabilidad acumulada para consumo de cianuro de sodio según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y Veta Aleste-Bonanza (derecha).-----	46
Figura 3.20. Gráficos de cajas y bigotes para consumo de cianuro de sodio según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y Veta Aleste- Bonanza (derecha). Los colores corresponden a la misma leyenda que para la Figura 3.19. -----	46
Figura 3.21. Vista isométrica de las distribuciones espaciales de las litologías, tasa de filtrado y velocidad de sedimentación en las vetas del Bloque PAV. -----	47
Figura 3.22. Curvas de probabilidad acumulada para tasa de filtrado según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y Vetas Aleste-Bonanza (derecha). -----	48
Figura 3.23. Gráficos de cajas y bigotes para tasa de filtrado según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y Vetas Aleste-Bonanza (derecha). Los colores corresponden a la misma leyenda que para la Figura 3.22. -----	48
Figura 3.24. Curvas de probabilidad acumulada para velocidad de sedimentación según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y Vetas Aleste-Bonanza (derecha). -----	49

Figura 3.25. Gráficos de cajas y bigotes para velocidad de sedimentación según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y Vetas Aleste-Bonanza (derecha) Los colores corresponden a la misma leyenda que para la Figura 3.25. -----	49
Figura 3.26. Vista isométrica de la distribución de los tipos de alteración en las vetas del Bloque PAV. -----	51
Figura 3.27. Perfil NS de la distribución espacial de los tipos de alteraciones en las vetas del Bloque Norte. -----	51
Figura 3.28. Curvas de probabilidad acumulada para recuperación de plata según tipo de alteración en veta Bonanza. -----	52
Figura 3.29. Vista isométrica de las Unidades geometalúrgicas con respecto a las variables geometalúrgicas en Bloque PAV. -----	53
Figura 3.30. Curvas de probabilidad acumulada para cada variable geometalúrgica según unidad geometalúrgica en veta Victoria -----	54
Figura 3.31. Variogramas omnidireccionales (curva azul) y a lo largo del sondaje (curva verde) para recuperación de plata en veta Bonanza y Aleste. -----	56
Figura 3.32. Perfil NS vetas Bloque Norte. Acercamiento veta Bonanza. -----	57
Figura 3.33. Modelos variográficos de recuperación de plata para veta Aleste y veta Bonanza. -	59
Figura 3.34. Representación metodología "Unfolding" en veta Aleste-Bonanza. A) Coordenadas originales; vista en planta (superior) y vista hacia el oeste (inferior). B) Coordenadas rotadas previo a unfolding; vista en planta (superior) y vista hacia el norte (inferior). C) Coordenadas unfolding; vista en planta (superior) y vista hacia el norte (inferior). -----	60
Figura 3.35. Validaciones curvas de frecuencia acumulada. Veta Aleste (izquierda) y veta Bonanza (derecha). Curvas de color negro corresponden a las realizaciones y curva de color rojo corresponde a la curva original. -----	62

Figura 3.36. Validación modelos variográficos recuperación de plata. Curva roja: dirección de máxima continuidad; Curva azul: dirección de mínima continuidad; Curva gris: direcciones simuladas; Puntos azules: pares de muestras de los modelos-----	62
Figura 3.37. Validación visual para cinco realizaciones. Los puntos corresponden a los datos originales. -----	63
Figura 3.38. Gráfico de precisión de intervalos de probabilidad. Veta Aleste (izquierda) y veta Bonanza (derecha). -----	64
Figura 3.39. Vista en planta del muestreo en 3 diferentes grillas de una realización de veta Bonanza.-----	65
Figura 3.40. Distribución de los diferentes coeficientes de variación para cada espaciamiento de grilla en veta Aleste. -----	68
Figura 3.41. Distribución de los diferentes coeficientes de variación para cada espaciamiento de grilla en veta Bonanza. -----	69

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Resumen del análisis mineralógico realizado por TESCAN, FRX y conteo modal. ...	17
Tabla 2.2. Pruebas de lixiviación, Laboratorio de Metalurgia, El Peñón. Extraído y modificado de Yamana Gold, (2017). .....	24
Tabla 2.3. Pruebas de molienda, Laboratorio de Metalurgia, El Peñón. Extraído y modificado de Yamana Gold, (2017). .....	24
Tabla 3.1. Resumen estadístico de variables geometalúrgicas por cada veta. Agppm y Auppm: ley de plata y oro respectivamente, expresada en partes por millón. Agrec y aurec: recuperaciones metalúrgicas de plata y oro expresadas como porcentaje en un rango de 0 a 1 .....	29
Tabla 3.2. Detalle códigos litológicos. ....	36
Tabla 3.3. Detalle códigos alteración. ....	37
Tabla 3.4. Detalle códigos unidad geometalúrgica. ....	37
Tabla 3.5. Direcciones de máxima continuidad espacial para los modelos variográficos. ....	57
Tabla 3.6. Parámetros modelos variográficos de veta Aleste-Bonanza. ....	58
Tabla 3.7. Resumen estadístico comparativo estadísticas básicas de la recuperación de plata calculadas a partir de las muestras geometalúrgicas y los valores simulados. ....	63
Tabla 3.8. Parámetros de estimación Inverso a la distancia. ....	66

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El distrito minero El Peñón se encuentra a 145 km al sureste de Antofagasta, en la Región de Antofagasta, en el norte de Chile. El yacimiento El Peñón corresponde a un depósito epitermal de Au-Ag de baja sulfuración, ubicado en la depresión central en el desierto de Atacama (Figura 1.1), limitado al oeste por la Cordillera de la Costa y al este por la Cordillera de Domeyko. El depósito se aloja en una secuencia de rocas volcánicas de edad principalmente Eocena, correspondientes al extremo sur del cinturón del Paleoceno, franja metalogénica que alberga una serie de pórfidos de Cu-Mo y depósitos epitermales (Boric et al., 1990; Marinovic et al., 1995). Su mineralización se presenta, principalmente, en vetas orientadas norte – sur con la ocurrencia mineral de silicatos, sulfuros de metales base, carbonatos y en menor medida óxidos y sulfosales de plata.

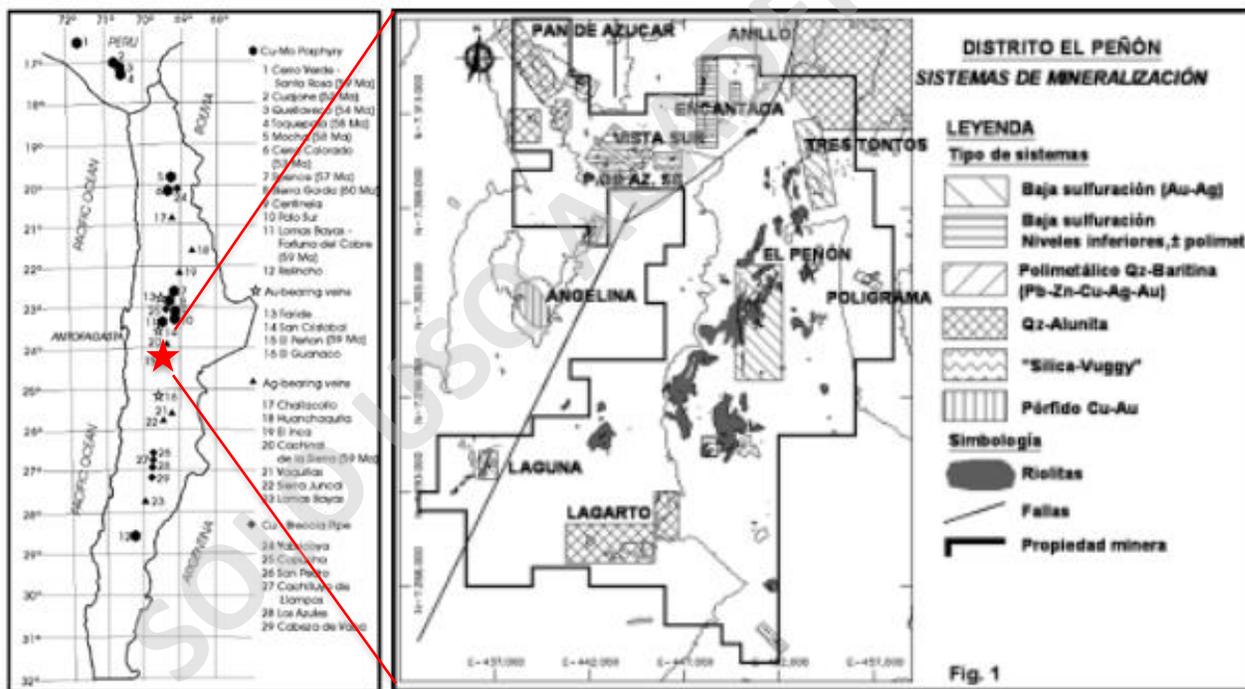


Figura 0.1. Ubicación yacimiento El Peñón. Extraído y modificado de Maksaev (2001) y Zuloaga (2006).

El Peñón lleva a cabo sus operaciones de producción a través de minería subterránea. El material extraído es procesado mediante la lixiviación por cianuro de sodio (Órdenes, 2014). Históricamente, la recuperación de oro (Au) ha sido del 90% en promedio, mientras que para la

plata (Ag) ha sido de un 86%. Por otra parte, el consumo de cianuro promedio ha sido de 1.4 kg de NaCN por tonelada métrica seca (TMS) (Órdenes, 2014). Como parte del avance en la explotación del depósito, a la fecha de este estudio, se han incorporado a la planificación las estructuras Victoria y Elizabeth del Bloque Pampa Augusta Victoria (PAV). Sin embargo, algunas pruebas metalúrgicas realizadas en estas estructuras advierten de un comportamiento geometalúrgico distinto al histórico. En promedio se observa un aumento significativo en el consumo de cianuro de sodio (4.7 kg/TMS), asociado a una disminución de la recuperación de plata de un 20% con respecto a valores histórico, así como también una disminución de las recuperaciones de oro en menor proporción. Es relevante mencionar que a la fecha en la que se extrajo la base de datos con la que se realiza este estudio, los cuerpos mineralizados de PAV contaban con relativamente pocas muestras geometalúrgicas, cuyos valores en promedio evidenciaban el comportamiento descrito.

Como es posible anticipar, el aumento del consumo de ácido y disminución de las recuperaciones, tienen un impacto significativo en los costos y beneficios económicos de la operación, respectivamente. Un comportamiento similar se había reportado anteriormente durante la explotación de las estructuras Aleste y Bonanza del Bloque Norte (Bloque Norte) (Órdenes, 2014).

En las estructuras del Bloque Norte, la disminución en las recuperaciones de plata y el aumento del consumo de cianuro, se relacionan con la ocurrencia específica de ciertos minerales de mena y ganga (Órdenes, 2014). La presencia de estos minerales influye en las interacciones químicas que ocurren durante los procesos de separación sólido-líquido en la planta de recuperación (Lavado Contra Corriente (LCC), Figura 1.2). La caracterización mineralógica de los materiales a extraer es fundamental para la correcta planificación minera y optimización de los procesos de extracción. Por lo tanto, establecer si los controles geológicos y metalúrgicos observados para el Bloque Norte, se replican en Bloque PAV, es de gran importancia para identificar zonas de menor recuperación y cómo estas pueden afectar la operación.

En efecto, como parte del proceso de planificación mina, específicamente de control de mineral, se realizan pruebas geometalúrgicas a muestras de canales. El proceso de control de mineral contribuye en los resultados de las reconciliaciones trimestrales y anuales de las variables geometalúrgicas, las cuales presentan desviaciones menores al 5%. No obstante, las reconciliaciones mensuales presentan desviaciones mayores al 5% con respecto a lo planificado

(K. Rojas, comunicación oral, 08 de diciembre, 2020). Es importante notar, que la alimentación a planta incluye más de una frente activa y la proporción con la que aporta cada veta es variable en el tiempo. Si bien, este método de planificación representa una dificultad en el proceso de control de mineral, favorece que las variaciones puntuales se vean atenuadas en periodos de tiempo más prolongados (C. Pérez, comunicación oral, 25 de febrero, 2020).

Las pruebas geometalúrgicas que se realizan a las muestras de canales, consisten en pruebas de lixiviación por cianuración en laboratorio en condiciones específicas, que tienen por objetivo anticipar la respuesta de los distintos materiales al proceso de lixiviación en la planta. Las pruebas geometalúrgicas son realizadas en la operación por personal del Laboratorio de Metalurgia (Contador, 2017) lo cual ofrece la ventaja de poder adaptar los protocolos a las condiciones de la operación. Sin embargo, los cambios en los protocolos de las pruebas de lixiviación en laboratorio pueden resultar en un aumento de la heterogeneidad de los valores de recuperación y consumo de ácido, que es necesario cuantificar.

Finalmente, se plantea la interrogante de si al aumentar la densidad de muestras disponibles para el control de mineral, disminuyendo el espaciamiento entre muestras geometalúrgicas será posible mejorar la predicción mensual de las variables geometalúrgicas, lo que además puede complementar la caracterización de los controles geológicos/metálúrgicos. Para responder a esta interrogante se propone realizar un análisis de malla óptima para muestras geometalúrgicas, a través de la simulación geoestadística. Esta técnica se basa en generar un número determinado de escenarios equiprobables que capturan la correlación espacial original y permiten valorizar la incertidumbre para distintos espaciamientos de muestreo. De acuerdo con la literatura disponible (Ortiz J. y Deutsch C. V., 2002; Wilde B.J y Deutsch C.V., 2010), se espera que una malla de muestreo densa resulte en valores de incertidumbre menores a los obtenidos para una malla más espaciada. No obstante, se debe tener en cuenta que la efectividad de la metodología propuesta depende de la inferencia sobre la correlación espacial que sea posible realizar con los datos disponibles. En otras palabras, dependiendo de la relación entre el espaciamiento existente y el modelo de correlación espacial, en particular, el alcance (distancia máxima a la cual se pierde la correlación entre los datos) y efecto pepa (correlación a distancia del espaciamiento mínimo de los datos), es que será posible establecer una malla óptima de muestreo. A su vez, la correlación espacial, en especial el alcance y efecto pepa, dependen de la variabilidad intrínseca del proceso

que subyace el fenómeno a representar, pero también de la variabilidad introducida en los procesos de muestreo y análisis, así como también, de la correcta caracterización de los atributos geológicos que controlan la distribución espacial de la variable a modelar y de la selección de dominios de estimación coherentes (Rossi y Deutsch, 2003; Coombes, 2008). La elección de dominios de estimación que capturen adecuadamente los controles geológicos de la variable de interés redundan en poblaciones que no solo son estadísticamente más homogéneas, sino su distribución en el espacio también lo es. La falta de controles geológicos resulta en poblaciones con alta variabilidad estadística que se traducen en correlaciones espaciales con una alta variabilidad a cortas distancias y disminuidos alcances.



Figura 0.2 Diagrama de flujo sintetizado de la planta de procesamiento El Peñón. Extraído y modificado de Órdenes, (2014).

En resumen, el aumento en el consumo de ácido y las disminuciones en las recuperaciones de plata que registran las vetas en estudio, justifican investigar la relación entre incertidumbre y distintos espaciamientos de muestreo con el objetivo de lograr disminuir las desviaciones en las reconciliaciones mensuales.

En consistencia con el problema planteado en la introducción, se propone la siguiente hipótesis para esta investigación aplicada.

## 1.1. Hipótesis

La densidad y calidad de la información geometalúrgica, así como los controles geológicos y metalúrgicos, influyen en la certidumbre con la que se estima la continuidad espacial de las variables geometalúrgicas y, por lo tanto, en la determinación de la malla óptima de muestreo de estas variables.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1 Objetivos generales

Determinar la influencia que tiene la densidad y calidad de la información geometalúrgica sobre el desarrollo de modelos de correlación espacial de las variables geometalúrgicas y su impacto en la determinación de una malla óptima de muestreo para la recuperación de plata en particular.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar los controles geológicos de las variables geometalúrgicas: recuperación de plata, recuperación de oro, consumo de cianuro de sodio, tasa de filtrado y velocidad de sedimentación, a través de un Análisis Exploratorio de Datos (EDA).
- Definir dominios de estimación para las variables de interés, en base a los controles identificados en el EDA y caracterizar estadísticamente su comportamiento.
- Proponer modelos de correlación espacial para los dominios de estimación, cuya densidad de información lo permita.
- Evaluar la incertidumbre en la recuperación de plata promedio para diferentes espaciamientos a través de la simulación geoestadística.
- Cuantificar el impacto que tiene la densidad de información disponible para la estimación de una malla de muestreo óptima para la recuperación de plata.

### 1.3. Metodologías

El desarrollo de los objetivos específicos se lleva a cabo en cuatro etapas principales: i) análisis exploratorio de datos, ii) análisis de la distribución espacial, iii) correlación espacial, iv) simulación geoestadística y validación, y v) cálculo de medidas de incertidumbre.

#### 1.3.1. Análisis exploratorio de datos

El análisis exploratorio de datos es un análisis estadístico general para conocer la distribución de una variable aleatoria regionalizada a partir de los valores de un conjunto de muestras. Una variable aleatoria regionalizada es una variable aleatoria, que describe procesos naturales, y cuyos valores dependen de su ubicación en el espacio (Matheron, G., 1979). Este análisis tiene como fin identificar el o los controles geológicos que tengan influencia en la distribución de las variables geometalúrgicas. Para el desarrollo de este análisis, se siguen los pasos que se detallan a continuación (Rossi y Deutsch, 2003).

Calcular estadísticos básicos como media, mediana, desviación estándar entre otros, cuyo objetivo es resumir la distribución general de las variables y comparar sus valores en una tabla (para efectos de este estudio se utilizó el programa Excel de Microsoft).

Calcular histogramas, curvas de probabilidad acumulada, gráficos de cajas y bigotes o box plots, gráficos de dispersión y mapas de localización para obtener una visión general de la distribución de los datos, tanto estadística como espacialmente. En este estudio se utilizaron las herramientas de la librería GSLIB que corresponde a una librería de programas geoestadísticos de libre acceso (Deutsch y Journel, 1998).

A continuación, se realiza el análisis estadístico condicional según atributo geológico, con el objetivo de determinar los controles geológicos relevantes que discriminan poblaciones estadísticamente. Para esto, se utilizan herramientas estadísticas como curvas de probabilidad acumulada, gráficos de cajas y bigotes, nubes de dispersión y gráficos cuantil – cuantil, de los cuales se espera obtener información sobre la influencia que dichos atributos tienen sobre las distribuciones estadísticas de las variables de interés.

A partir del análisis por atributo, es posible proponer controles geológicos que explicarían la distribución de los valores que presentan las variables estudiadas. A continuación, la consistencia espacial de los potenciales controles estadísticos se analiza.

### 1.3.2. Análisis de distribución espacial

El análisis de la distribución espacial implica la visualización de los datos en el espacio con el objetivo de localizar los valores extremos, tendencias generales y/o el grado de continuidad de las variables (Isaaks y Srivastava, 1989), e identificar la relación que existe entre la correlación espacial de los datos y su discriminación estadística. Este análisis, se realiza en conjunto con el EDA utilizando las herramientas detalladas a continuación.

El software Leapfrog Geo de Seequent es un programa de modelamiento geológico en tres dimensiones, que cuenta con herramientas de visualización dinámica (entre otras), lo que le otorga que sea una herramienta de fácil uso y entendimiento. Con él, es posible visualizar los datos en el espacio y caracterizar su distribución espacial. Por otra parte, a través de mapas de contornos y mapas de localización realizados en GSLIB, se tiene una vista general de la distribución espacial de los datos. Con ellos se puede, además, identificar, seleccionar y validar datos anómalos a la distribución, es decir, aquellos datos que se escapan de la distribución estadística global o local, así como de la distribución espacial predominante.

Sin embargo, el análisis espacial no es válido si no tiene una contraparte estadística. Por este motivo, una vez finalizado el análisis puramente estadístico, tanto general como por atributo, se da paso al análisis de la distribución espacial de los datos y a cómo ésta se relaciona con los posibles controles propuestos en los análisis previos. Si dichos controles presentan una relación espacial y geológica coherente, es decir, comparten características estadísticas, geológicas y espaciales semejantes, será posible agrupar los datos y definirlos como dominios de estimación. Los dominios de estimación son poblaciones de datos que cumplen con características estadísticas, geológicas y espaciales similares y por lo tanto se les considera como zonas geoestadísticas estacionarias que permiten aplicar herramientas de interpolación y simulación estadística (Rossi y Deutsch, 2003).

### 1.3.3. Correlación espacial

El estudio de la correlación espacial tiene como objetivo identificar y describir los patrones de correlación espacial presentes en los datos y cómo estos patrones cambian en función de la distancia y la dirección (Isaaks y Srivastava, 1989; Rossi y Deutsch, 2003). Para esto se calculan variogramas experimentales, los cuales necesitan cumplir con al menos tres requerimientos previos (Rossi y Deutsch, 2003):

1. Comprender los datos en su totalidad. Esto quiere decir, que se debe entender por completo el comportamiento de los datos tanto a nivel geológico, como estadístico y espacial. Para esto se deben realizar las metodologías previamente mencionadas en las secciones 1.3.1 y 1.3.2.
2. Se debe establecer un sistema de coordenadas apropiado al tipo de depósito. Eventualmente es preciso evaluar si es necesario definir coordenadas locales o realizar algún proceso de rotación y estiramiento para facilitar el cálculo de las distancias y dirección entre muestras de una misma unidad. Como puede ser el caso a modo de ejemplo, en dominios de estimación que corresponden a estratos plegados o depósitos tipo veta (Rossi y Deutsch, 2003).
3. Se deben tener en cuenta los datos anómalos y todas aquellas transformaciones que hayan sido aplicadas en los datos.

Si los requisitos previamente mencionados se cumplen, el cálculo de los variogramas y su posterior uso para la simulación geoestadística será confiable.

Los variogramas son el promedio de las diferencias al cuadrado de pares de datos separados a cierta distancia y dirección. Para su cálculo y modelado se utilizan los programas autónomos de libre disponibilidad *gamv* y *vmodel* de la librería GSLIB, respectivamente. Estos programas, hacen un barrido de los pares de datos disponibles en distintas direcciones y distancias, en los cuales se deben establecer parámetros de búsqueda. Estos parámetros tienen relación con el espaciamiento de las muestras en la malla de muestreo. En particular, como parámetro de separación de lag (distancia de separación) se considera el espaciamiento mínimo promedio, y la tolerancia como la mitad del valor de separación (Isaaks y Srivastava, 1989; Rossi y Deutsch, 2003). Por otra parte, los ángulos de búsqueda y la tolerancia de éstos dependen de la anisotropía que se observe en la distribución

de los valores, de la cual suele existir una apreciación preliminar luego de realizar el análisis exploratorio de datos. No obstante, es importante destacar que, en depósitos muestreados preferencialmente en ciertas direcciones con relación a otras, como es el caso de vetas, no siempre es posible calcular el variograma experimental en las direcciones de menor densidad de muestras. Esto se debe a que no es posible encontrar pares de muestras a distancias mayores a la mitad de la extensión del área muestreada.

El cálculo de variogramas omnidireccionales informan la correlación espacial promedio en todas direcciones, mientras que el variograma a lo largo del sondaje (comúnmente referido como método *down-the-hole*), informa la correlación espacial a la distancia mínima de muestreo, el cual permite inferir el efecto pepa (Isaaks y Srivastava, 1989; Rossi y Deutsch, 2003).

#### 1.3.4 Interpolación mediante inverso a la distancia.

Parte de los objetivos de la geoestadística es generar valores de una variable continua en zonas no muestreadas para facilitar la evaluación económica del yacimiento a través de un modelo de recursos. La interpolación de datos en el espacio es necesaria, ya que por lo general sólo un 10% de los yacimientos se encuentran muestreados, generando la necesidad de cuantificar el recurso total sin aumentar el número de muestras, debido a los altos costos relacionados a ello. El método de Kriging (Matheron, G., 1979) es el interpolador lineal más comúnmente utilizado en la actualidad, dado que logra incorporar la anisotropía (tendencia direccionada de una variable) y redundancia entre muestras cercanas. Sin embargo, existen escenarios donde no es posible reconocer o modelar la correlación espacial, y por lo tanto se opta por métodos de interpolación que no consideran posibles anisotropías de los datos y se basan solo en la distancia entre ellos, como lo es el caso de este estudio. Uno de estos métodos es el interpolador basado en el inverso a la distancia, que pondera las muestras en función de la distancia entre cada muestra y la ubicación del centroide del bloque a interpolar (Rossi y Deutsch, 2003).

#### 1.3.5. Simulación geoestadística y validación

La simulación geoestadística es un grupo de métodos geoestadísticos que permiten reproducir la variabilidad original de los datos sin el suavizamiento que introduce la interpolación, por lo que conserva los valores extremos y varianza de la distribución, así como la correlación espacial de la variable. En yacimientos vetiformes, se recomienda extender de la veta previo a la simulación. Esta

metodología de desdoblar o extender una estructura se conoce como “*unfolding*” (Deutsch, 2004) y consiste en estirar una estructura curvilínea. De esta manera se puede modelar la continuidad geológica del cuerpo y es posible mejorar los alcances de los modelos variográficos. También, entrega un beneficio indirecto ya que reduce la cantidad de bloques a simular al generar un modelo de bloques que se ajusta una figura geométrica semejante a un paralelepípedo que describe la estructura y no a las dimensiones totales del contorno irregular. La Figura 1.3 muestra una vista en planta de una estructura vetiforme a la cual se le aplica la metodología de *unfolding*.

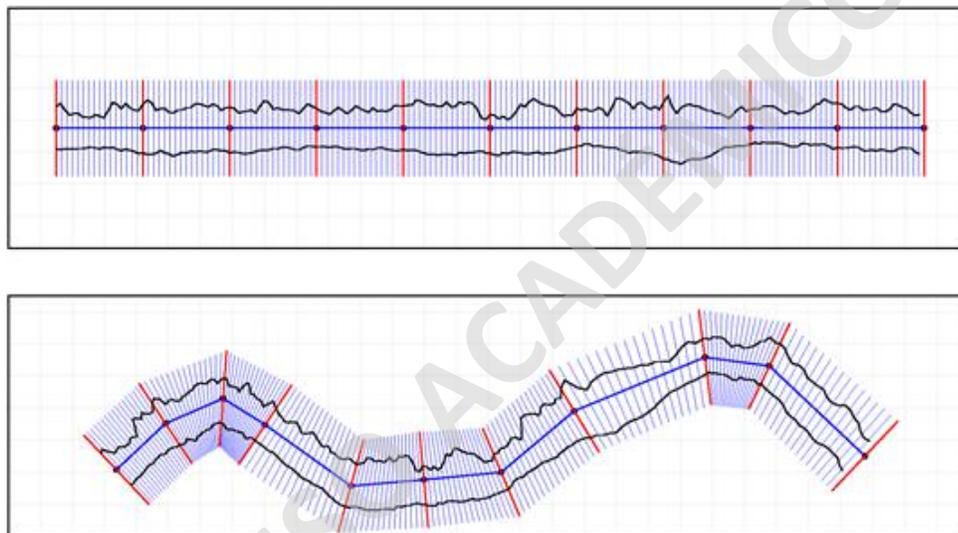


Figura 0.3. Esquemización de la aplicación de *unfolding* para una estructura curvilínea. Extraído y modificado de Deutsch (2004).

### 1.3.6. Malla optima e incertidumbre

Existen diferentes metodologías que intentan cuantificar el impacto en la incertidumbre al aumentar y/o disminuir el espaciamiento entre datos o cuantificar la relación que existe entre incertidumbre y densidad de información. Una de estas metodologías, utiliza la Simulación Secuencial Gaussiana (SGS por sus siglas en inglés), la cual permite crear múltiples modelos numéricos equiprobables basados en datos condicionantes, donde las fluctuaciones estadísticas entre cada realización generada proporcionan una medida de la incertidumbre de la variable que se está modelando (Journel y Kyriakidis, 2004; Wilde y Deutsch, 2010). La aplicabilidad de SGS es amplia, sin embargo, en esta investigación el objetivo es encontrar el espaciamiento óptimo que debe existir entre muestras metalúrgicas para disminuir las diferencias en las reconciliaciones mensuales de las recuperaciones de plata.

Wilde y Deutsch (2010) presentan una metodología para el cálculo de incertidumbre en función del espaciamiento de los datos. Su metodología inicia con la generación de un número estadísticamente representativo de realizaciones de una variable aleatoria regionalizada utilizando SGS. Las realizaciones se muestrean a diferentes tamaños de grilla y se ocupan para generar simulaciones condicionadas a los datos muestreados. Las realizaciones condicionales se promedian a un tamaño de bloque o soporte a una escala de interés determinada. Las medidas de incertidumbre se infieren a partir de estos promedios. Se ha adoptado la metodología propuesta por los autores para establecer la relación entre malla de muestreo e incertidumbre para muestras geometalúrgicas. Algunas de las medidas de incertidumbre utilizadas son el coeficiente de variación, la diferencia entre los percentiles y la desviación estándar.

La metodología de simulación aplicada en esta investigación se puede resumir en cinco pasos que se describen a continuación.

1. Generar 100 realizaciones a partir de la distribución real de los datos. Simulación condicional y validación de las simulaciones. Se debe validar que las simulaciones generadas respeten los datos condicionantes a través de la reproducción del histograma y la correlación espacial, además de un chequeo visual contrastando los datos reales contra las realizaciones. Estos criterios son considerados como los criterios mínimos de aceptación para modelos geoestadísticos (Leuangthong, et al., 2003). Además de estos criterios, se puede realizar el cálculo de la precisión de una simulación. Esta consiste en disgregar la distribución real en intervalos de probabilidad PI (PI en  $[0,1]$ ) y chequearlos contra la fracción de valores simulados que caen dentro de dichos intervalos de probabilidad, por lo que la curva que se genere debe ser lo más cercana a una recta de  $45^\circ$  para que los valores simulados sean semejantes a los valores de referencia.
2. Muestrear los datos previamente simulados a distintos espaciamientos. Posterior a la validación de las simulaciones, se realiza el muestreo en cada una de las 100 realizaciones generadas para cada veta. Cada realización se muestrea con tres diferentes grillas. La selección de las grillas de muestreo se realiza en base al espaciamiento real del muestreo metalúrgico que se utiliza en las vetas.
3. Estimar la variable de interés para cada una de las grillas muestreadas previamente. Una vez realizado el muestreo de las realizaciones, se estiman los valores de recuperación para cada uno de los espaciamientos.

4. Generar el promedio de bloques a soporte mensual para cada una de las grillas muestreadas y estimadas. El tamaño seleccionado como soporte mensual, guarda relación con el tamaño de los bancos que se explotan mensualmente en la mina.
5. Calcular medidas de incertidumbre.

Es importante destacar que la efectividad de esta metodología depende del modelo de correlación espacial que sea posible inferir a partir de los datos disponibles. La Figura 1.4 y 1.5 muestran el flujo de trabajo de la metodología aplicada en esta investigación.

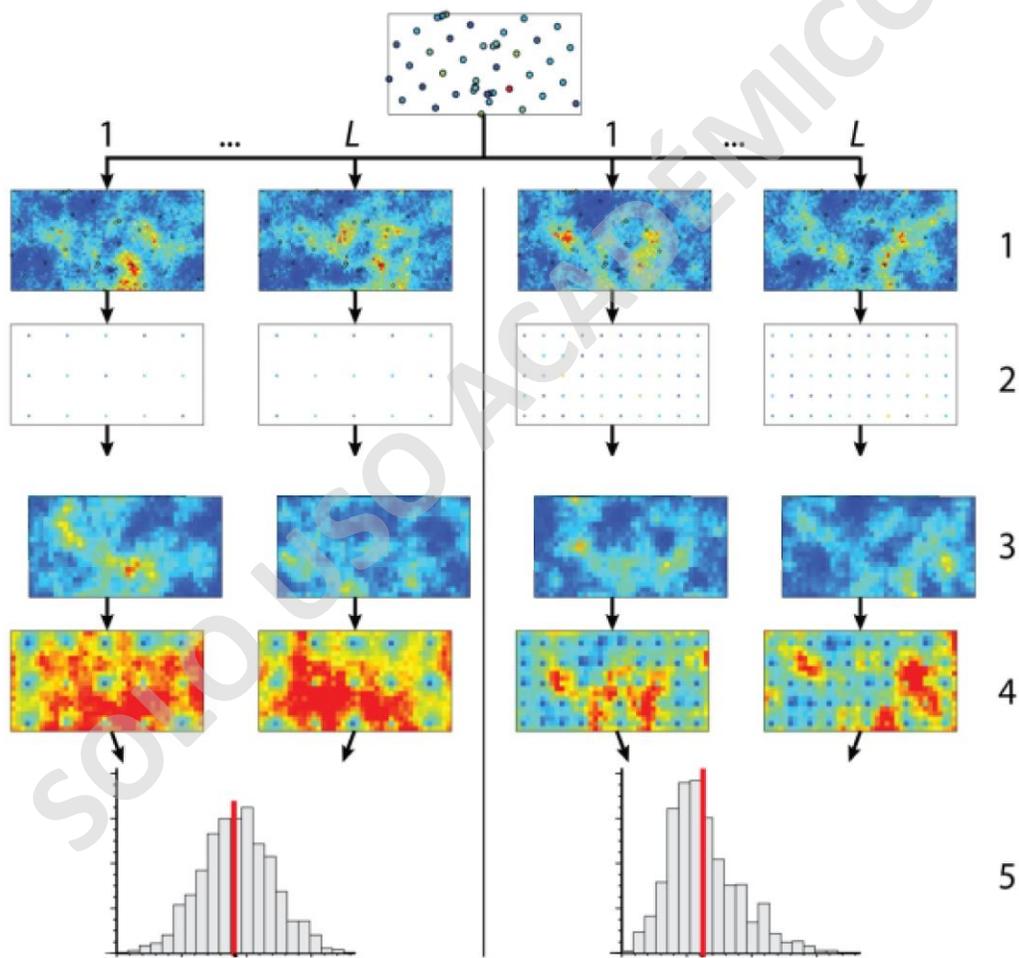


Figura 0.4. Flujo de desarrollo de metodología de malla óptima. Extraído y modificado de Wilde y Deutsch (2010).

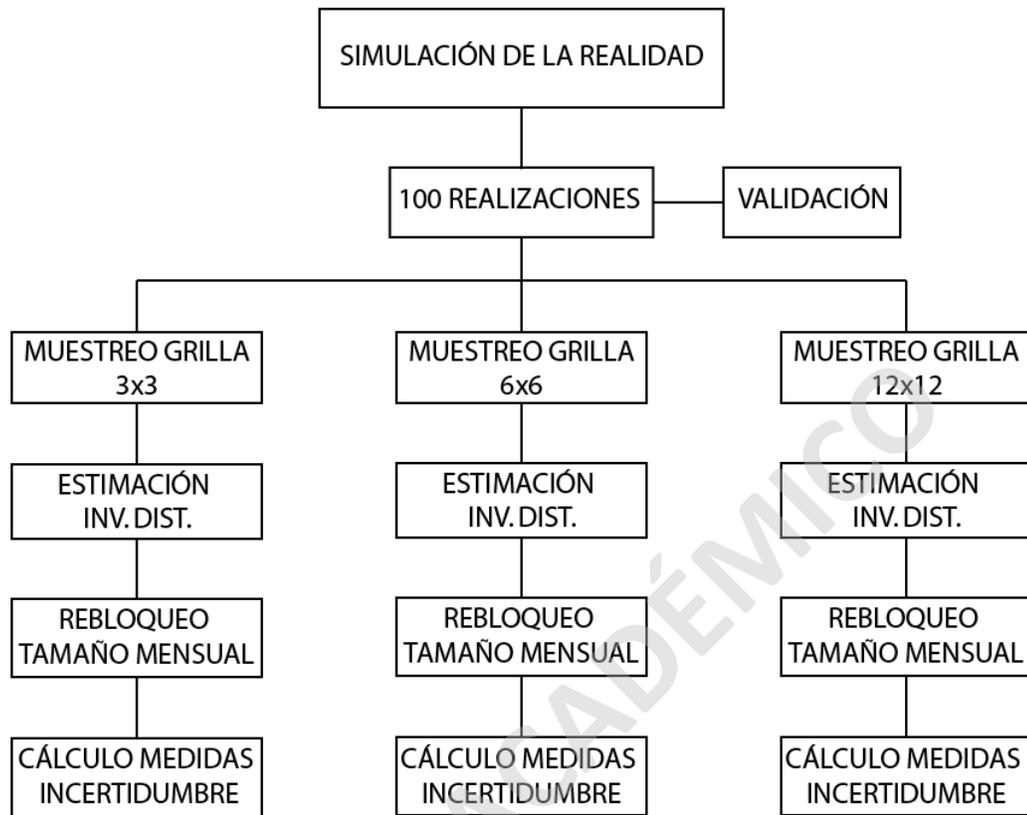


Figura 0.5. Diagrama de flujo metodología de simulación.

## **CAPÍTULO II: ANTECEDENTES GEOLÓGICOS Y METALÚRGICOS**

En el siguiente capítulo se presenta la información geológica y metalúrgica de las vetas en estudio, con el fin de contextualizar cómo estos aspectos se relacionan con los análisis estadísticos posteriores.

### **2.1. Aspectos Geológicos**

El yacimiento El Peñón está ubicado en la depresión central en el desierto de Atacama, limitado al oeste por la Cordillera de la Costa y al este por la Cordillera de Domeyko. La geología de la región se constituye por productos volcánicos provenientes del arco magmático del Cretácico tardío al Eoceno temprano, en el cual se encuentran secuencias de lavas y tobas basálticas a riolíticas, intrusiones porfíricas subvolcánicas y stocks de granitoides que se extienden desde el sur de Perú hasta el centro de Chile en un rango de edad de 72 a 40 Ma. (Boric et al., 1990; Marinovic et al., 1995; Warren 2005). Esta secuencia de rocas volcánicas e intrusiones es conocida como el cinturón del Paleoceno (Boric et al., 1990; Marinovic et al., 1995), el cual alberga una serie de pórfidos de Cu-Mo y depósitos epitermales de edad principalmente Eocena.

En la Figura 2.1 se observa el mapa geológico del distrito minero El Peñón. En el área de estudio, de manera local, se puede observar que afloran predominantemente flujos y domos riolíticos y dacíticos, mientras que en profundidad (perfil estructural, Figura 2.1) subyacen subhorizontalmente flujos piroclásticos, volcanoclásticos y andesíticos, los cuales son intruidos por los domos riolíticos y dacíticos que acompañan la mineralización de oro y plata en forma de vetas subverticales (Warren, 2005).

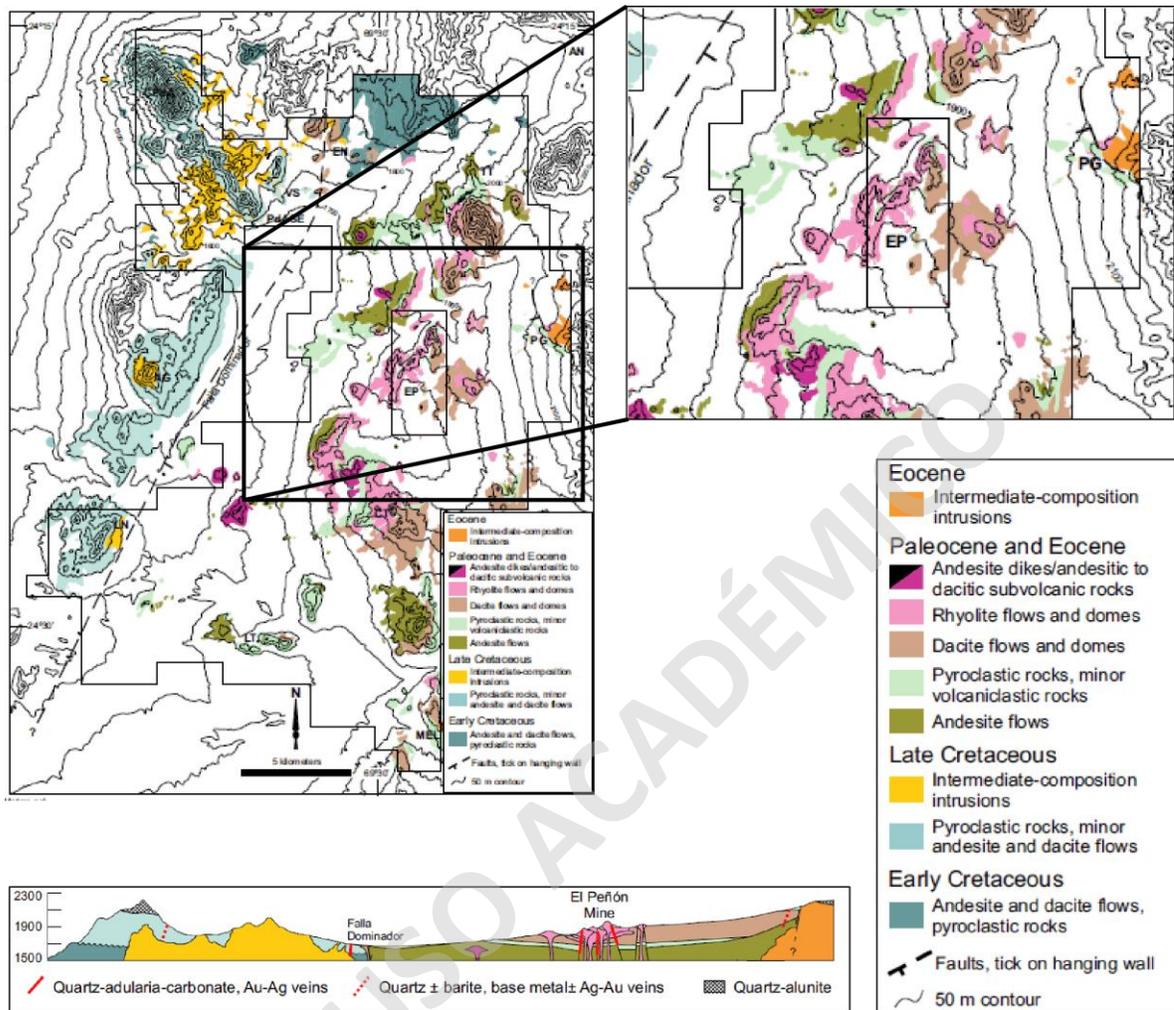


Figura 0.1. Mapa geológico Distrito Minero El Peñón. EP: El Peñón. Modificado y extraído de Warren, (2005).

### 2.1.1. Alteración hidrotermal

En el yacimiento El Peñón, se reconocen al menos dos grandes tipos de alteración hidrotermal (Warren, 2005), la primera corresponde a una alteración generalizada de pH neutro y fluidos reducidos, que generó el reemplazo de fases primarias y el relleno de vetas y matrices de brechas hidrotermales por cuarzo, adularia, albita, illita, clorita, esmectita, calcita y pirita. Esta alteración se encuentra espacialmente asociada con las vetas de Au-Ag del Peñón, las cuales a su alrededor presentan una intensa alteración de cuarzo – adularia, mientras que hacia la periferia disminuye su intensidad. El segundo tipo de alteración se presenta de manera localizada, caracterizada por un

pH ácido y fluidos oxidados, lo cual dio paso a la formación de un lithocap sobre las intrusiones del Cretácico tardío y Eoceno medio en forma de brecha hidrotermal masiva de cuarzo-alunita, acompañado de una débil mineralización de cobre (Warren, 2005).

La edad de ambos eventos hidrotermales difiere en aproximadamente dos millones de años, donde el evento de pH neutro y fluidos reducidos data de 52 a 53 Ma (Adularia, Ar/Ar), mientras que el evento de pH ácido y fluidos oxidados data de 50 a 49 Ma (Alunita, Ar/Ar) (Warren, 2005; Warren et al., 2005). En la Figura 2.2 se observa la distribución de las alteraciones dentro del Distrito El Peñón, donde se destaca la predominancia del primer tipo de alteración en la zona de estudio denominado con las siglas EP (El Peñón) y PAV (Pampa Augusta Victoria) destacadas con los polígonos rojos.

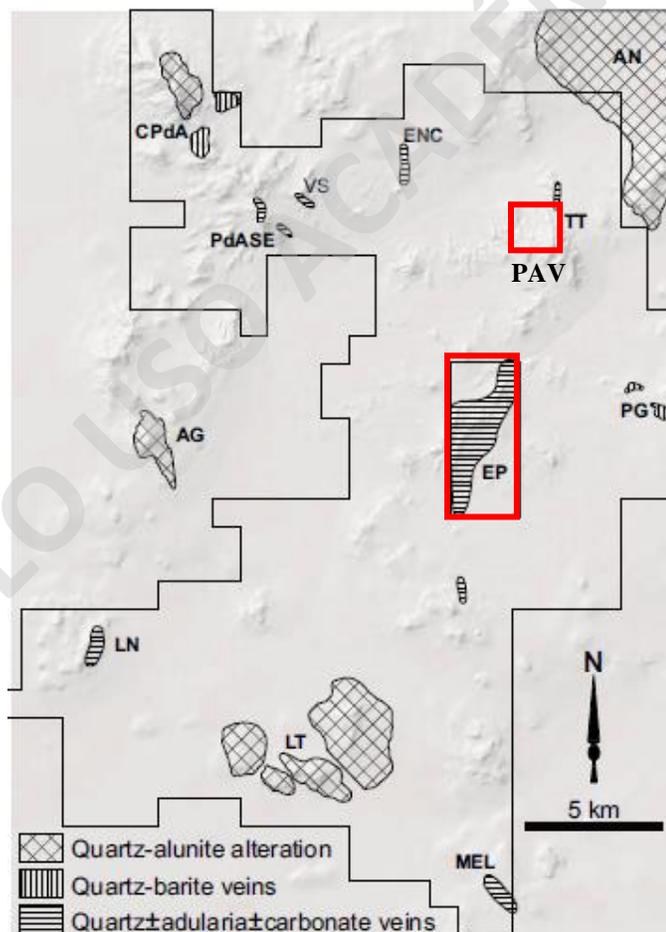


Figura 0.2. Distribución de las alteraciones en el Distrito El Peñón (delimitado por el polígono negro). El polígono rojo representa la ubicación de las vetas en estudio. EP: El Peñón Bloque Norte, PAV: Pampa Augusta Victoria. Modificado y extraído de Warren (2005)

Finalmente, una pervasiva oxidación supérgena, posterior a la mineralización de Au-Ag en El Peñón, se extiende 400 metros en promedio bajo la superficie. Los procesos de oxidación dieron como resultado la removilización localizada de ambos metales a lo largo de fracturas (Warren, 2005). Las vetas del Bloque Norte no presentan evidencias de este último evento, sin embargo, veta Victoria del Bloque PAV si presenta una zona mineral con ocurrencia de óxidos (óxidos de hierro principalmente).

### 2.1.2. Mineralogía de mena y ganga.

A partir de análisis TESCAN, FRX y conteo modal entregados por el Centro de Estudios Mineralógicos - Geoatacama (CEM), se han caracterizado mineralógicamente las vetas del distrito. En la Tabla 2.1 se detalla la mineralogía que caracteriza cada veta con sus respectivos porcentajes de abundancia. Es importante notar que esta información fue sintetizada de un conjunto de muestras cuya ubicación espacial no se encontraba disponible al momento de realizar este estudio, por lo que solo puede ser utilizado como es una caracterización mineralógica global.

Tabla 0.1. Resumen del análisis mineralógico realizado por TESCAN, FRX y conteo modal.

Grupo mineral	Vetas Bloque PAV				Vetas Bloque Norte			
	Victoria		Elizabeth		Aleste		Bonanza	
	%	Mx	%	Mx	%	Mx	%	Mx
<b>Silicatos</b>	80	Cuarzo, Feld K y Biotita	78	Cuarzo, Feld K, y Piroxeno	75	Cuarzo, Feld K, y Piroxeno	75	Cuarzo, Feld K, y Piroxeno
<b>Súlfuros</b>	15	Pirita, Galena, Esfalerita	15	Pirita, Galena, Esfalerita	6	Galena, Pirita, Esfalerita	13	Esfalerita, Pirita, Galena y Calcopirita
<b>Carbonatos</b>	<1	Siderita	11	Calcita, Siderita	14	Kutnohorita	8	Kutnohorita, Calcita
<b>Óxidos</b>	3	Hematita - Magnetita, Rutilo	<1	Rutilo	<1	Hematita - Magnetita, Rutilo	<1	Hematita - Magnetita, Rutilo
<b>Sulfosales</b>	<1	Polibasita	<1	Polibasita, Tetrahedrita	<1	Polibasita	<1	Tetrahedrita, Polibasita

Se observa que la mineralogía predominante en las vetas son los silicatos, representada principalmente por cuarzo y adularia (feldespato potásico). En menor medida lo son los carbonatos y los óxidos. Estos minerales representan casi en su totalidad la ganga que se encuentra en las vetas.

La mineralogía de mena, principalmente de plata, corresponde a sulfosales de Ag como la polibasita (AgCuSbS) y tetrahedrita (CuSbS). El oro, por su parte, ocurre como oro nativo y/o

electrum (Au-Ag) diseminado en cristales de cuarzo o asociado a minerales sulfurados. Espacialmente, estos minerales se encuentran en la zona de sulfuros (Figura 2.3, “Zona C”), lo cual, a diferencia de otras vetas del Distrito, es el principal causante de la disminución de las recuperaciones de los metales debido a la respuesta ante la cianuración (Órdenes, 2014).

El nivel freático en las vetas bordea los 1600 metros sobre el nivel del mar según estudios anteriores (Donoso, 2012; Órdenes, 2014), lo cual separa la zona de sulfuros con la zona de óxidos. En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo esquemático de la distribución mineral en veta Bonanza, en la cual se puede observar que la zona de sulfuros de metales base, correspondiente a la Zona C en la figura, es la que contiene los mayores valores de plata y oro. Además de la asociación mineralógica es relevante la forma en la que ocurren estos minerales, ya sea en brecha hidrotermal, stockwork, diseminado, masiva, entre otros. La ocurrencia de los minerales de mena está directamente relacionada con los procesos de liberación y lixiviación que ocurren bajo el nivel freático actual.

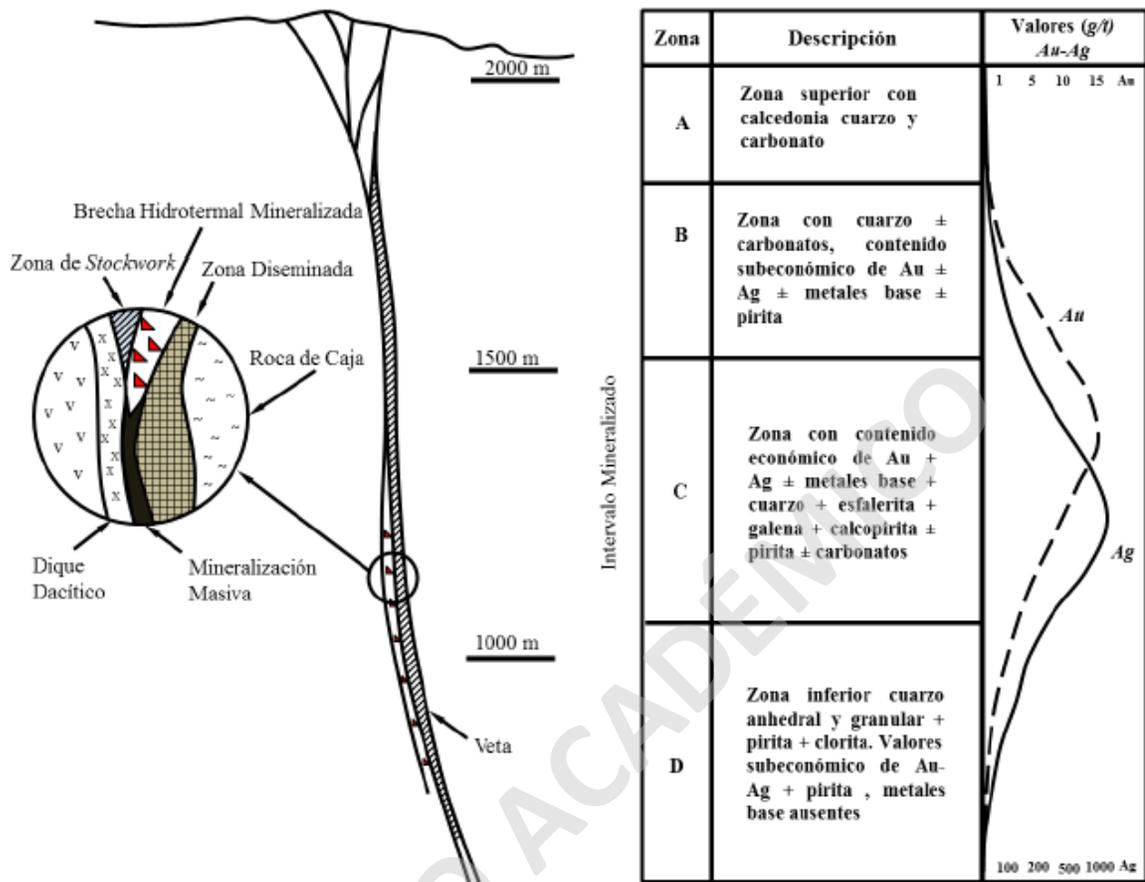


Figura 0.3. Esquema vertical de la distribución mineralógica en Veta Bonanza. Extraído y modificado de Órdenes, (2014).

De aquí en adelante, la Figura 2.3 será tomada como ejemplo esquemático de la distribución mineralógica de las vetas en estudio, dado que presentan asociaciones minerales similares según el análisis mineralógico TESCAN, FRX y conteo modal realizado en las vetas en estudio.

## 2.2. Metalurgia.

La metalurgia integra toda aquella información que tiene relación con el comportamiento químico y físico de un material al momento de ser intervenido, a través de procesos químicos, con el fin de recuperar, de la forma más pura, uno o varios metales de interés. Para el caso del oro y la plata en este caso de estudio, la recuperación se genera a través de la lixiviación por cianuro de sodio. La caracterización del material, tanto en términos químicos como físicos, tiene beneficios directos en la recuperación que se pueda obtener de él.

La ocurrencia de la mineralización de oro y plata, tanto, la composición química de las especies mineralógicas como la ocurre tiene directa relación con la respuesta que el material extraído tiene ante soluciones cianuradas y, por lo tanto, con las recuperaciones y con el consumo de cianuro. Como se ha mencionado en la sección anterior, la mineralización de oro y plata en las vetas, principalmente de plata, se presenta en forma de sulfuros, los cuales tienen una respuesta química a la lixiviación que genera que las recuperaciones disminuyan y que el consumo de cianuro de sodio sea mayor al observado en otras vetas del distrito. (Órdenes, 2014). Particularmente, la familia de los sulfuros de metales base, tales como la Galena, Esfalerita y Pirita que son parte importante de la ganga en el yacimiento, presentan un comportamiento refractario a la cianuración. A su vez, estos minerales presentan una baja solubilidad en soluciones de este tipo (Donoso, 2012; Órdenes, 2014), lo que causa un aumento en el consumo de cianuro de sodio para lograr liberar el metal de interés. El aumento de cianuro de sodio conlleva la liberación de componentes metálicos que no son de interés económico y que se consideran como impurezas (Pb, Zn, Cu, entre otros).

A su vez, las sulfosales de plata como la Polibasita, siendo esta la mena más significativa de las vetas, también tienen un efecto perjudicial en el proceso de lixiviación con cianuro debido a que, tanto el arsénico (As) como el antimonio (Sb), generan una capa pasivante alrededor del oro y la plata, impidiendo parcialmente su liberación (Hedley, N., y Tabachnick, H., 1958). De igual forma ocurre con los carbonatos, que reducen la extracción del metal debido al encapsulamiento de éstos dentro de componentes carbonatados y retienen el metal por adsorción, lo que provoca un mayor consumo de cianuro para lograr su liberación y consecuente recuperación.

Por otra parte, los factores físicos tienen directa relación con las variables de tasa de filtrado y velocidad de sedimentación, las que, a su vez, se relacionan con el peso específico, densidad, dureza y tamaño de la partícula del material. Todas las características físicas mencionadas anteriormente, se relacionan con la litología y alteración que alberga la mineralización y con el comportamiento físico que esta pueda tener. Comprender la litología/alteración del material, en términos físicos, conlleva a optimizar los procesos de molienda que tienen como fin reducir el tamaño de grano al tamaño óptimo, según las pruebas de molienda de laboratorio, para obtener la exposición necesaria del metal de interés para su recuperación.

### 2.2.1 Antecedentes geometalúrgicos.

La Superintendencia de Geometalurgia, de Minera Meridian Ltda., El Peñón, hizo entrega de una base de datos que corresponde a muestras metalúrgicas de tipo canaleta provenientes de cuatro diferentes cuerpos vetiformes mineralizados. La Figura 2.4 esquematiza la metodología de toma de muestras en la frente de las vetas, perpendicular a su rumbo. El material que se destina a la preparación de las pruebas metalúrgicas es el largo total de la muestra, i.e., la canaleta completa (Tramos 1 al 7 en la figura). No obstante, el tramo es interceptado con un sólido tridimensional que representa la veta (Largo total  $L_1$ ). Se observa que, del largo completo de la muestra de aproximadamente 8 metros, cerca de 1/3 de la muestra corresponden a mineral, stockwork (SK m; moderado, s: fuerte), brecha hidrotermal (HYB) y Veta Cuarzo Masivo (MQV) y que el resto de las secciones de la muestra corresponden a litologías y alteraciones diferentes. De acuerdo con lo observado en el archivo entregado, la litología y alteración asignada para la muestra corresponde con al primer tramo interceptado por el sólido (Tramo 2), independiente a si este tramo representa la mayor proporción del total de la muestra.

Las muestras incluidas en la base de datos provienen de las vetas del Bloque Pampa Augusta Victoria (veta Victoria y veta Elizabeth) y del Bloque Norte (veta Aleste y veta Bonanza). Ambos Bloques cuentan con información de análisis de laboratorio representada por cinco variables geometalúrgicas: recuperación de oro, recuperación de plata, consumo de cianuro de sodio, tasa de filtrado y velocidad de sedimentación, además de información derivada del proceso de composición del programa Vulcan, tales como ubicación de muestras, leyes y largo de las muestras. Es importante destacar que la muestra abarca el ancho de la frente completa y, por lo

tanto, los valores resultantes del análisis geometalúrgico tienen distintas proporciones de veta y roca de caja, o tipos de alteración, y por lo tanto incorporan porcentajes de dilución variables.

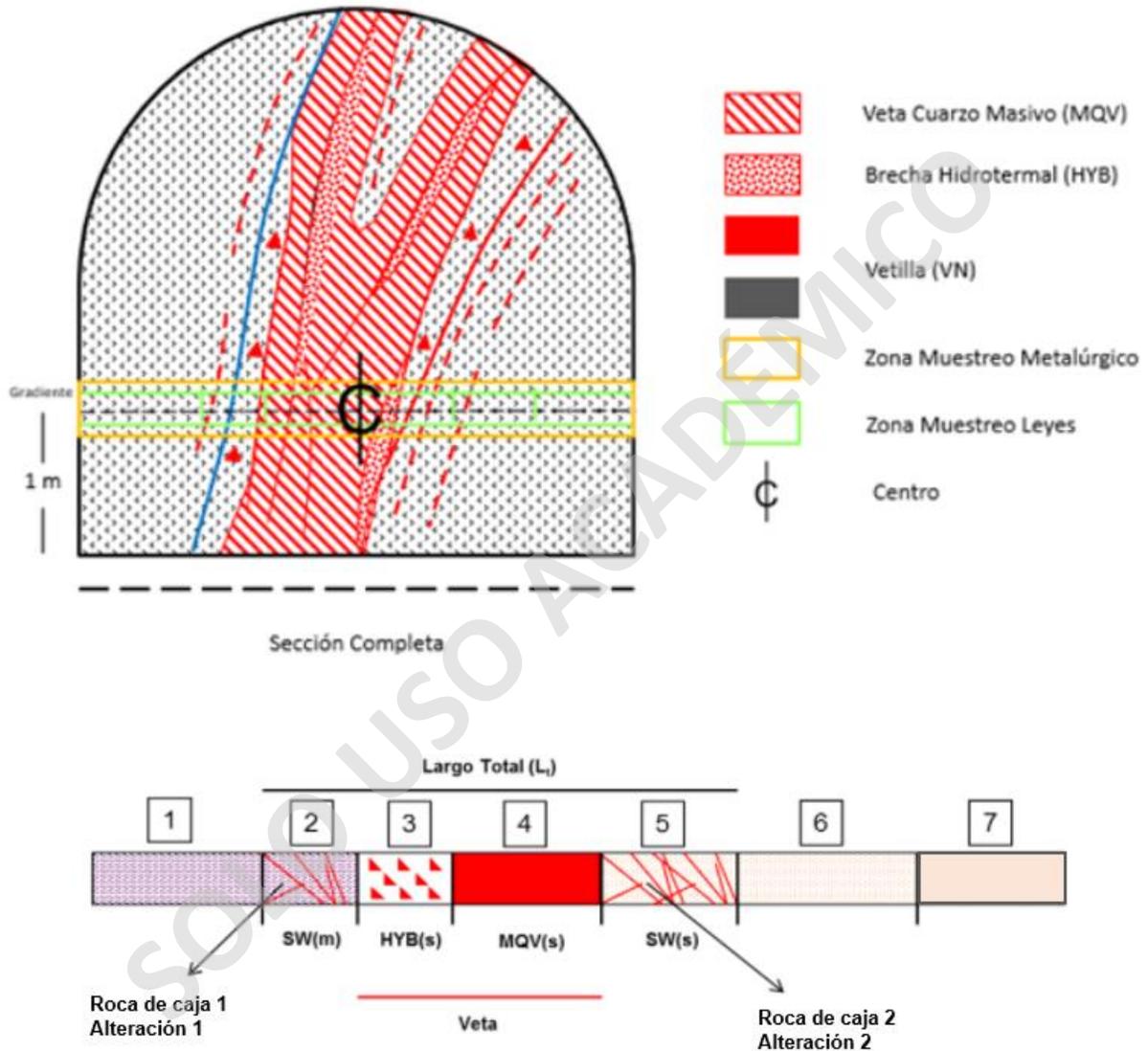


Figura 0.4. Esquematización de la toma de muestras geometalúrgicas en las vetas del Distrito El Peñón. Extraído y modificado de Órdenes, (2014).

Según los protocolos de procedimiento de trabajo para pruebas de laboratorio de metalurgia (Yamana Gold, 2017), las variables de recuperación y consumo de cianuro de sodio provienen del

análisis químico de las muestras. Estos análisis consisten en lixiviar una determinada cantidad de material en soluciones cianuradas aireadas por un tiempo determinado. En el caso de las variables de tasa de filtrado y velocidad de sedimentación, los valores provienen del análisis físico del material, equivalentes a pruebas de molienda.

La respuesta química del material ante la cianuración y su caracterización física y química, son los objetivos principales de las pruebas de laboratorio (Yamana Gold, 2017). Existen diferentes tipos de pruebas para desarrollar estos objetivos. En la Tabla 2.2 se detallan algunas de las pruebas de laboratorio que se realizan en el Laboratorio de Metalurgia de El Peñón. Las entradas de la tabla evidencian que las condiciones de cada prueba, en términos de la cantidad de muestra, porcentaje de sólidos, volumen de la solución, agitación del material, son distintas. El impacto de la variación de estas condiciones en los resultados no estuvo disponible para este estudio. Sin embargo, se reconoce en la literatura (Dominy et al, 2016) que los resultados de pruebas de lixiviación son sensibles a estos parámetros. Los valores disponibles en la base de datos utilizada en este estudio representan valores obtenidos principalmente a partir del método de lixiviación en botella. No obstante, la identificación del método utilizado para cada análisis no estuvo disponible para este estudio. Las diferencias en las condiciones de lixiviación pueden provocar que, para un mismo material, la respuesta metalúrgica presente variaciones. El impacto de los distintos protocolos de análisis geometalúrgico no es parte de este estudio.

Tabla 0.2. Pruebas de lixiviación, Laboratorio de Metalurgia, El Peñón. Extraído y modificado de Yamana Gold, (2017).

Pruebas de lixiviación			
Análisis	Lixiviación estandar	Lixiviación con orbitales	Lixiviación en botellas
Tipo de muestra	Muestras sólidas metalúrgicas de Veta, Caja, mineral o blending	Muestras de sondaje	No especifica
Granulometria de alimentación	80% - 150um	100% #150Ty (pulverizada)	80% - 150 um
Peso de mineral	2000 g	100g	1000 g
Volumen solución	2000cc	163 cc sol. Alcalina	1000 cc
Concentración de NaCN (l)	50 g/l	50 g/l	50 g/l
Concentración de sólidos	50%	35%	50%
Temperatura	ambiente	ambiente	ambiente
Agitación	400 - 600 RPM	-	-
Tiempo de lixiviación	48 hrs	24 hrs	24 hrs
pH	10.8 - 11.2	10.8 - 11.2	10.8 11.2

En el caso de las pruebas de molienda, su objetivo es cumplir con el tamaño solicitado por las pruebas de lixiviación, generar una curva que determine el tiempo en el cual se obtiene el tamaño solicitado, así como una caracterización granulométricamente del mineral molido. En la Tabla 2.3 se detallan las condiciones de molienda para el molino de laboratorio y el molino de rodillo.

Tabla 0.3. Pruebas de molienda, Laboratorio de Metalurgia, El Peñón. Extraído y modificado de Yamana Gold, (2017).

Pruebas de molienda		
Tipo de prueba	Molino laboratorio	Molino rodillo
Peso del mineral	1000 g	1000 g
Concentración de sólidos	70%	70%
Temperatura	ambiente	ambiente
Tiempos de molienda	6, 12 y 20 min	6, 12 y 20 min
pH	10.8 - 11.2	10.8 - 11.2
Granulometria final de la prueba	80% - 120 um	80% - 120 um

A su vez, el tamaño de grano del mineral molido tiene una importante relación con la capacidad de filtrado y velocidad de sedimentación, los cuales dependen de las propiedades físicas del material, tales como el peso específico de la partícula y la densidad. Estos dos últimos parámetros geometalúrgicos, se calculan en función de pruebas de filtración y sedimentación estándar (Yamana Gold, 2017).

De acuerdo con el rango de valores de la población de datos de la tasa de filtrado para este caso de estudio, se asume empíricamente, que un material tiene buena filtración cuando permite el paso de una sustancia líquida sin impedimento o sin mayor esfuerzo, equivalente a valores altos de tasa de filtrado mayores a 800 kg/kg precipitado. En términos geológicos, este material tiene un bajo contenido de arcillas, tanto en tamaño como composición, dado que las arcillas se consideran como capas aislantes, lo que impide el drenaje de un líquido. Por lo tanto, en un contexto de operación minera, que un material filtre bien, implica que presenta valores altos en su tasa de filtración y que el contenido de arcillas es relativamente bajo con respecto a materiales del mismo estudio.

Así mismo, se entiende que un material tiene buena sedimentación cuando éste presenta valores bajos (considérese como valores bajos aquellos menores a 16 cm/min), lo que indica que el material decanta rápidamente, mientras que, valores altos implican que el material decanta de manera lenta. Entonces, la velocidad de sedimentación tiene que ver principalmente con el peso específico y densidad de la partícula, lo que se relaciona con la composición química que constituye a dicha partícula y, por ende, con su mineralogía.

### **CAPÍTULO III: RESULTADOS**

Considerando que a la fecha de este estudio los cuerpos mineralizados de PAV contaban con relativamente pocas muestras geometalúrgicas, las metodologías de análisis se aplicaron simultáneamente a las muestras del Bloque Norte, considerando el comportamiento geometalúrgico semejante. El objetivo es evaluar los resultados de las vetas de PAV en el contexto de resultados relativamente más robustos estadísticamente obtenidos en estructuras con una mayor cantidad de muestras.

Las estructuras del Bloque PAV (veta Victoria y Elizabeth) se distinguen de las estructuras del Bloque Norte (Aleste y Bonanza) en sus dimensiones y estadísticamente. Veta Victoria y Elizabeth, son dos estructuras paralelas de rumbo norte-sur y manteo de  $60^{\circ}W$  aproximadamente. Tienen una corrida de 360 y 300 metros respectivamente y se extienden en profundidad 250 y 130 metros. Las estructuras del Bloque PAV corresponden a menos de un décimo de la extensión de las estructuras del Bloque Norte, lo que implica un menor volumen mineralizado. Producto de su menor extensión, PAV cuenta solo con un 25% del total de muestras disponibles en el Bloque Norte (ver Tabla 3.1). En la Figura 3.1, se pueden observar su disposición espacial y la densidad de muestras geometalúrgicas disponibles en este estudio. Veta Aleste-Bonanza corresponde a una estructura de dos vetas continuas de orientación norte-sur y manteo subvertical hacia el oeste cercano a los  $70^{\circ}$ .

Presenta una longitud de 4000 metros aproximadamente y una extensión en profundidad de 120 metros (Figura 3.1).

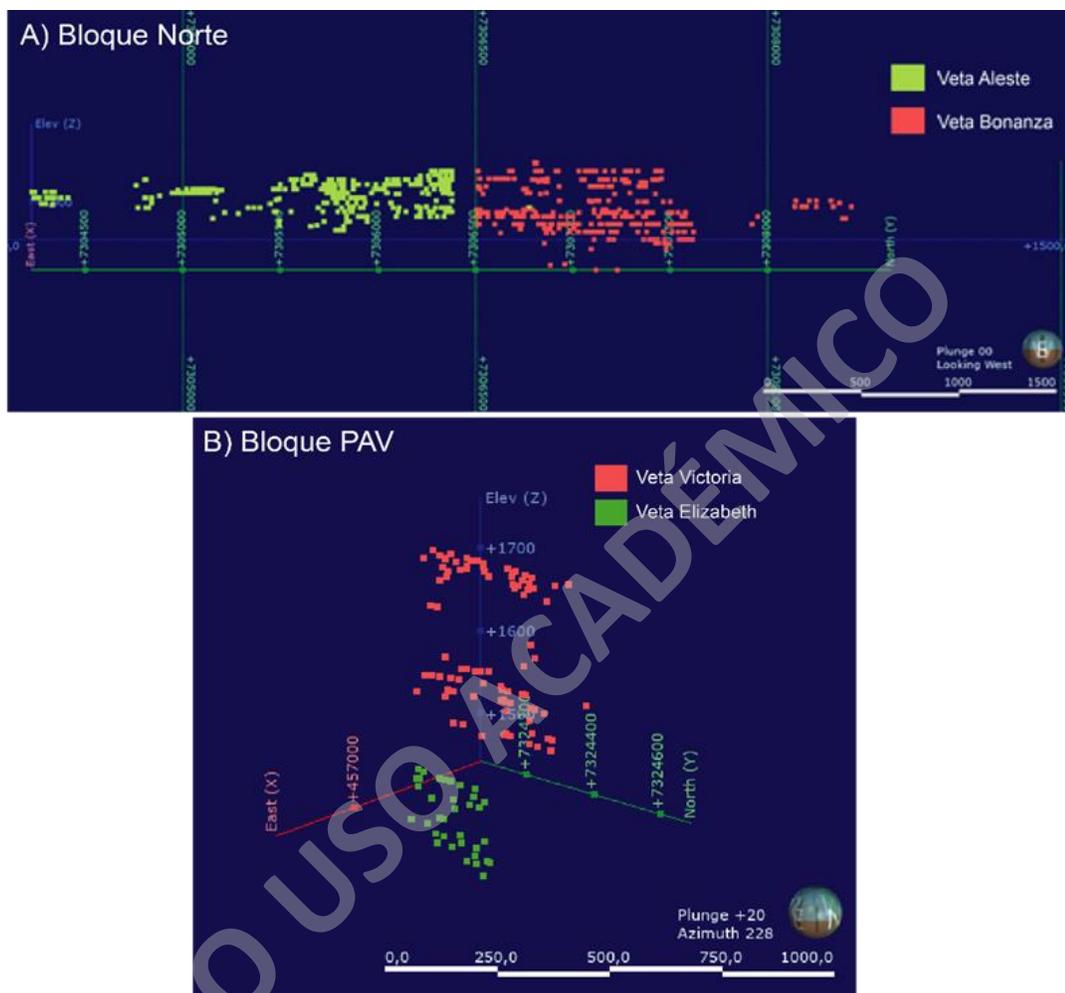


Figura 0.1. Visualización en el espacio de las vetas en estudio. A) Bloque Norte, Vetas Aleste y Bonanza, perfil NS con vista hacia el oeste. B) Bloque PAV, Vetas Victoria y Elizabeth, isométrica con vista hacia el SW.

A continuación, se presentan los resultados del análisis exploratorio de datos, análisis de correlación espacial, simulación geoestadística y cálculo de medidas de incertidumbre para la obtención de una malla óptima de espaciamiento de muestras geometalúrgicas.

### 3.1. Análisis Exploratorio de Datos.

Tal como se indicó en la Sección 1.3, el análisis exploratorio de datos tiene como objetivo identificar el o los controles geológicos que determinan la distribución espacial de las variables de interés. A continuación, se detallan los resultados de la aplicación de las distintas herramientas estadísticas descritas en la metodología.

#### *Estadística univariada*

Como parte del análisis exploratorio de datos, se calcularon las distribuciones acumuladas e histogramas para cada variable de manera global por veta. Los gráficos más relevantes se encuentran disponibles en el Anexo A. La Tabla 3.1 resume la estadística básica de cada veta. Destaca la diferencia en la cantidad de muestras de las vetas del Bloque PAV con respecto al Bloque Norte, así como también las diferencias en la dispersión de las variables geometalúrgicas en cada una de las vetas. Además, para las vetas del Bloque Norte, existe una diferencia importante en la cantidad de pruebas de filtrado y sedimentación que se realizaron a las muestras. Solo un 50% de las muestras geometalúrgicas totales disponibles cuentan con resultados para las variables de tasa de filtrado y velocidad de sedimentación. En la Figura 3.2 se observa la distribución espacial en las vetas Aleste y Bonanza para la tasa de filtrado y velocidad de sedimentación. Las distribuciones espaciales para las demás variables geometalúrgicas en cada una de las vetas, se encuentran disponibles en el Anexo A.

Tabla 0.1. Resumen estadístico de variables geometalúrgicas por cada veta. Agppm y Auppm: ley de plata y oro respectivamente, expresada en partes por millón. Agrec y aurec: recuperaciones metalúrgicas de plata y oro expresadas como porcentaje en un rango de 0 a 1

Resumen estadístico							
Veta	Variable	Cuenta	Mínimo	Máximo	Media	C. Variación	Varianza
<b>Aleste</b>	agppm	263	5.00	10790.00	766.15	1.87	2046045.57
	agrec	260	0.04	0.99	0.73	0.28	0.04
	auppm	263	0.24	439.04	21.91	1.88	1700.62
	aurec	264	0.04	1.00	0.86	0.17	0.02
	nacnc	256	0.14	10.92	4.31	0.46	3.91
	tfil	135	23.38	9264.43	1250.62	1.36	2903236.29
	vsed	139	1.80	106.80	21.65	0.80	299.08
<b>Bonanza</b>	agppm	281	8.00	9146.00	347.54	2.36	671959.46
	agrec	273	0.01	0.98	0.62	0.41	0.06
	auppm	281	0.20	3922.01	53.58	4.97	70827.75
	aurec	281	0.08	1.00	0.85	0.21	0.03
	nacnc	277	1.05	12.07	5.18	0.35	3.38
	tfil	98	10.00	5293.96	554.27	1.63	813613.24
	vsed	106	2.10	112.20	24.21	0.77	347.68
<b>Victoria</b>	agppm	88	3.51	2818.85	518.05	1.21	393622.19
	agrec	87	0.02	0.98	0.77	0.27	0.04
	auppm	88	0.20	100.48	11.66	1.66	374.26
	aurec	83	0.17	0.99	0.79	0.26	0.04
	nacnc	80	1.04	9.00	4.41	0.42	3.39
	tfil	73	10.00	5053.33	865.65	1.49	1669332.18
	vsed	72	0.78	66.96	8.30	1.13	87.12
<b>Elizabeth</b>	agppm	35	1.48	24699.09	2707.91	2.00	29293127.83
	agrec	34	0.18	0.95	0.57	0.38	0.05
	auppm	35	0.20	86.73	10.75	1.58	289.56
	aurec	35	0.07	0.95	0.70	0.29	0.04
	nacnc	34	1.35	6.00	3.11	0.41	1.63
	tfil	32	10.00	4632.22	677.00	1.39	885246.85
	vsed	24	1.20	57.00	12.58	1.23	237.95

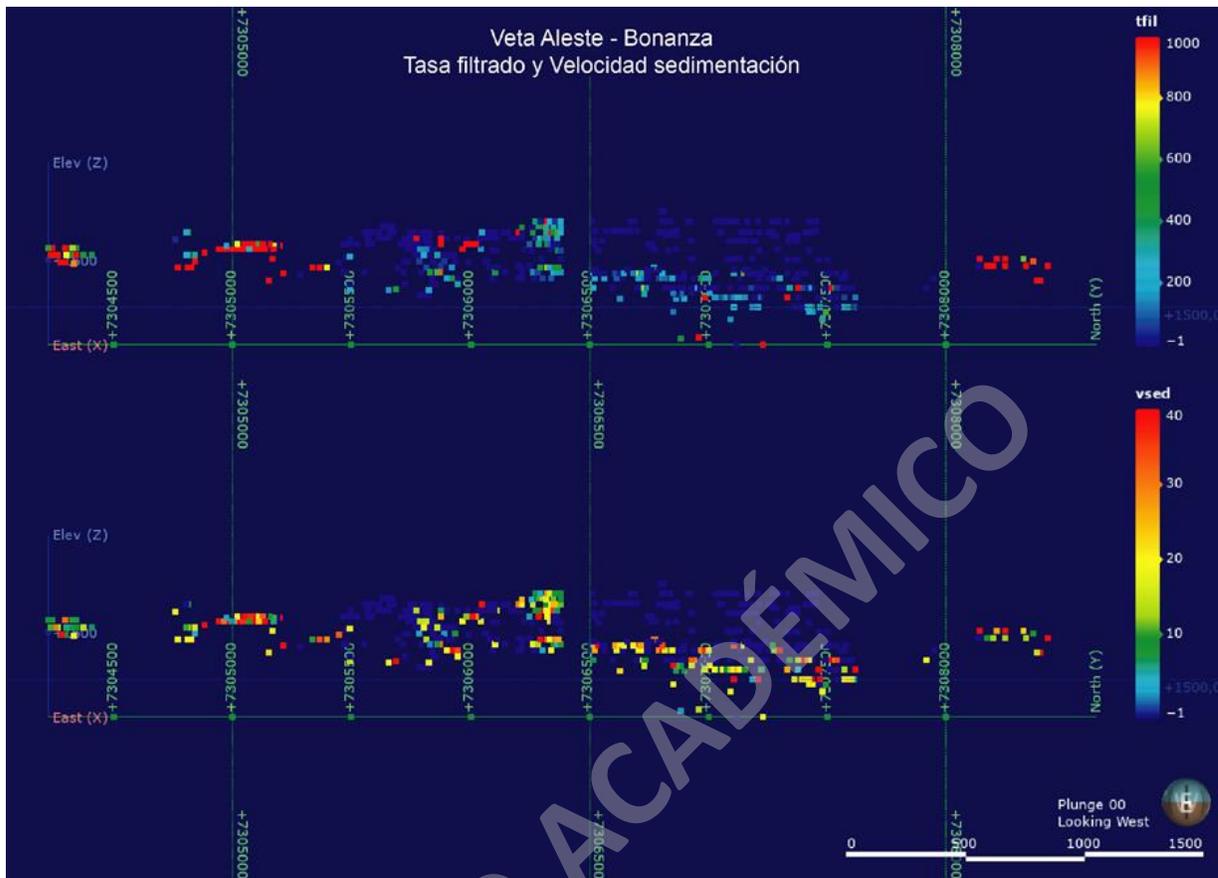


Figura 0.2. Vista en perfil NS de la distribución de Tasa de filtrado (superior) y velocidad de sedimentación (inferior). Las muestras en color azul oscuro tienen un valor  $-1$ , que corresponde a sin análisis.

Los gráficos de cajas y bigotes facilitan una comparación de las estadísticas básicas calculadas en la Tabla 3.1. En la Figura 3.3 se observan distribuciones asimétricas negativas para las recuperaciones de oro y plata. Más aún, en la Figura 3.3B se observa valores promedio de recuperación de oro más altos en Aleste y Bonanza de lo que se observa en las vetas de PAV, en particular, veta Elizabeth. Siendo esta última la estructura en ambos bloques, con menores valores de recuperación de oro. En el caso de la recuperación de plata, veta Elizabeth también presenta los valores promedio más bajos de las cuatro vetas. Sin embargo, al contrario de lo observado para la recuperación de oro, veta Victoria presenta los valores promedio de recuperación de plata más altos. Con respecto a la dispersión en torno a los valores de tendencia central, se observa una alta variabilidad en las recuperaciones de oro y plata, en las estructuras del Bloque PAV. En efecto, la recuperación de plata presenta un rango intercuartil equivalente a una variación entre 20 y 30%, en

todas las vetas, mientras que, en el caso de la recuperación de oro, el rango de variación en las vetas Aleste y Bonanza es solo un 10% aproximadamente. En efecto, el rango intercuartil de recuperaciones de plata en veta Bonanza es similar al de veta Elizabeth, con más del 50% de los valores de recuperación menores al 70%.

Al contrario de la asimetría observada en la distribución de las recuperaciones, el consumo de cianuro de sodio presenta distribuciones simétricas en torno a los valores promedio de cada veta (Figura 3.4). Aún más, la dispersión de valores de consumo de cianuro de sodio es semejante entre vetas, con excepción de veta Elizabeth que presenta valores de consumo de ácido menores.

En el caso de las variables de tasa de filtrado y velocidad de sedimentación las distribuciones son asimétricas positivas para ambas variables (Figura 3.5). En particular en el caso de la variable de velocidad de sedimentación, es posible observar que tanto el valor promedio como el rango intercuartil son mayores para las vetas del Bloque Norte con relación a las vetas del Bloque PAV. Sin embargo, es importante destacar que estas variables, velocidad de sedimentación y tasa de filtrado, no fueron analizadas en la misma proporción en ambos Bloques. De hecho, las vetas Aleste y Bonanza tienen análisis de tasa de filtrado y velocidad de sedimentación, solo para el 52 y 36% del total de pruebas geometalúrgicas realizadas, respectivamente. Por el contrario, el análisis de estas variables en el Bloque PAV tiene una mayor cobertura alcanzando aproximadamente el 82 y 68% del total de pruebas geometalúrgicas analizadas para las vetas Victoria y Elizabeth respectivamente. En el caso de la variable de tasa de filtrado, no se distingue un comportamiento distintivo entre ambos Bloques.

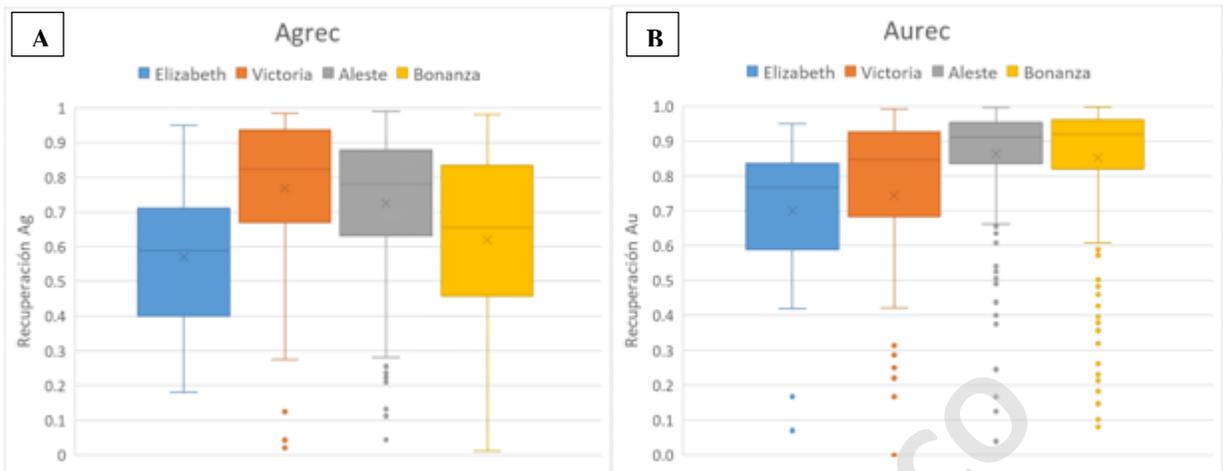


Figura 0.3. Gráficos de cajas y bigotes para recuperaciones de plata (A) y recuperaciones de oro (B) para las cuatro vetas en estudio.

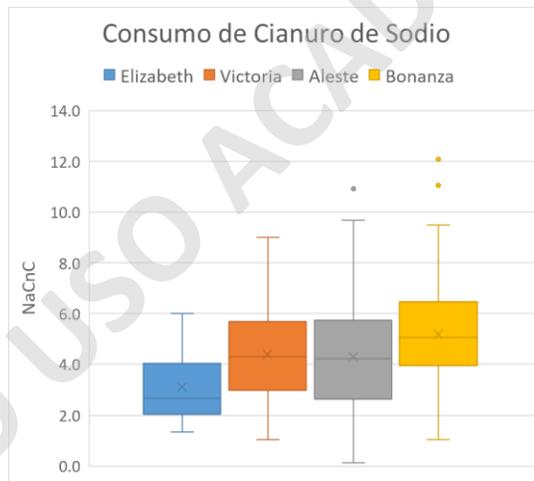


Figura 0.4. Gráfico de cajas y bigotes para Consumo de cianuro de sodio en las cuatro vetas.

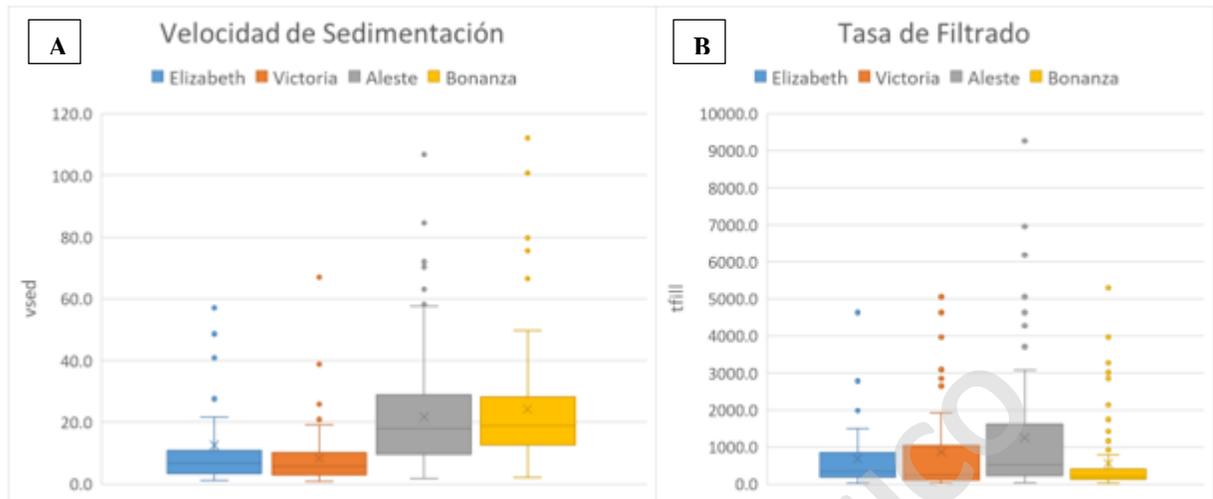
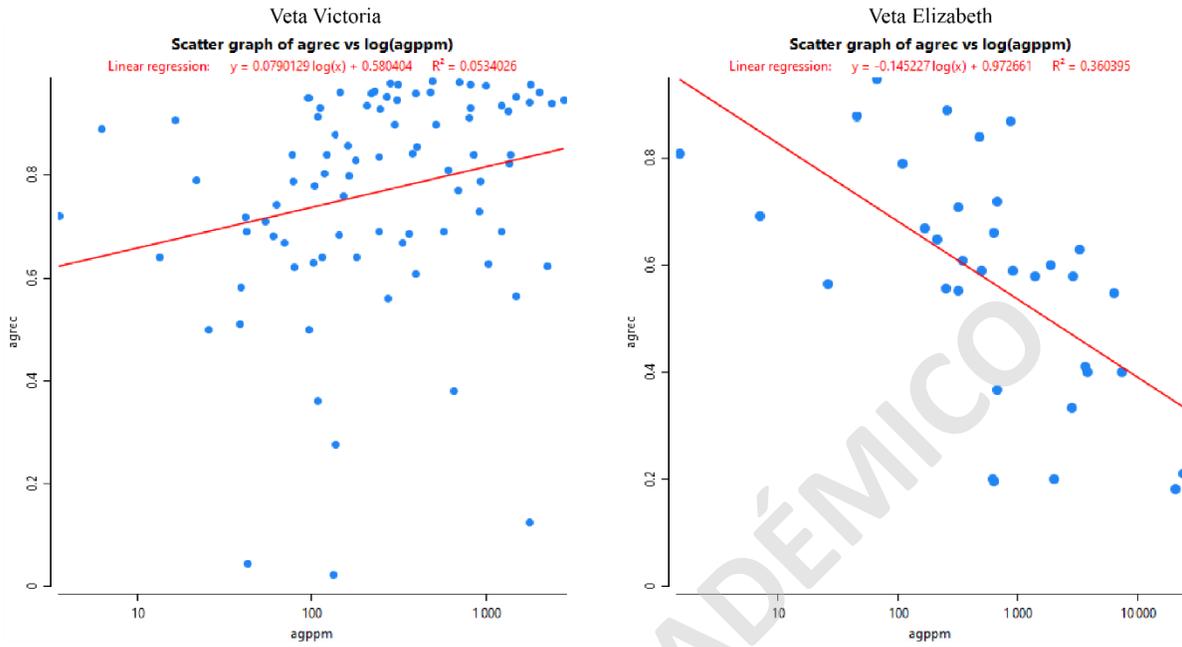


Figura 0.5. Gráficos de cajas y bigotes para velocidad de sedimentación (A) y tasa de filtrado (B) para cada veta.

### Estadística bivariada

Los gráficos de nubes de dispersión (Figura 3.6), muestran la casi nula correlación entre leyes de plata y sus recuperaciones, con excepción de veta Elizabeth, donde se observa una ligera correlación negativa. Esta observación es consistente con el hecho que no todas las ocurrencias de un elemento son recuperables por un determinado proceso y que el porcentaje de recuperación depende de otras variables como la liberación del mineral a determinadas granulometrías, el cual a su vez depende de otras variables como los minerales que acompañan a los minerales de mena y factores operacionales.

Nubes de dispersión  
Recuperación de plata vs Ley de plata



Nubes de dispersión  
Recuperación de plata vs Ley de plata

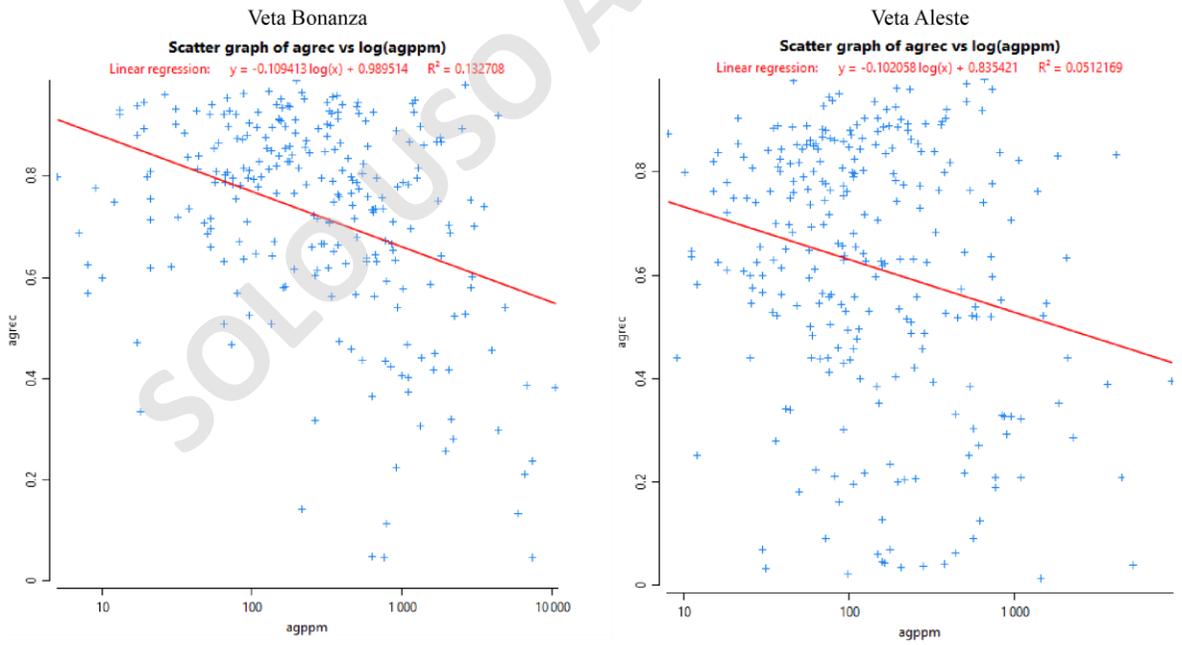


Figura 0.6. Nubes de dispersión de recuperaciones de plata versus ley de plata.

Por su parte, las nubes de dispersión entre las leyes de oro y sus recuperaciones también evidencian la falta de correlación entre ambas variables (Figura 3.7). No obstante, en el caso de los gráficos correspondientes a vetas Aleste y Bonanza, se observa un artefacto curvilíneo en la relación entre ley y recuperación, que sugiere que algunos de los valores de recuperación de oro fueron derivados de una función no lineal de las leyes de oro. Las implicancias de este artefacto en la base de datos se abordan en el capítulo de discusiones.

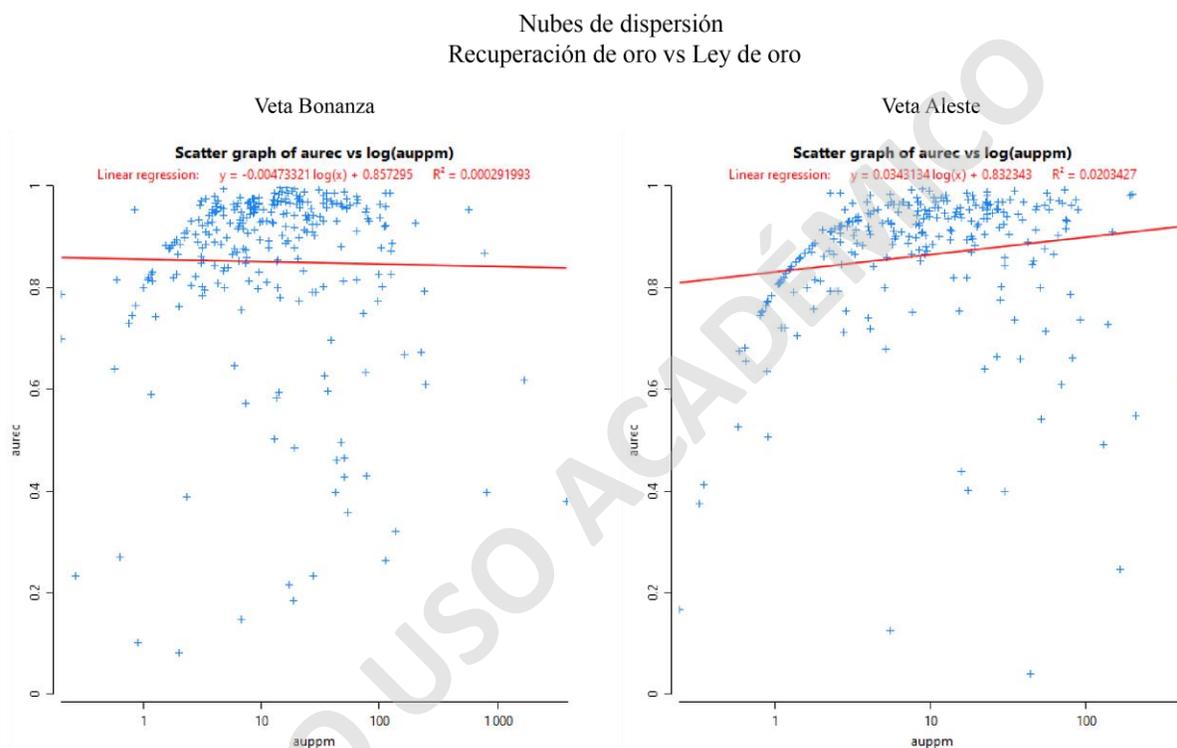


Figura 0.7. Nubes de dispersión para recuperación de oro versus ley de oro en vetas del Bloque Norte.

### Estadística condicional por atributo geológico

En la base de datos extraída de programa Vulcan, asociadas a los valores de cada prueba geometalúrgicas están disponibles las siguientes tres variables categóricas; litología, alteración y unidad geometalúrgica (ugm). El análisis detallado a continuación corresponde a la estadística exploratoria de cada variable geometalúrgica condicionada a tipos específicos de litología, alteración y unidad geometalúrgica, para cada estructura. El objetivo de esta sección es identificar controles geológicos para las distribuciones de recuperación de oro y plata, consumo de ácido, tasa

de filtrado y velocidad de sedimentación en las estructuras del Bloque PAV. El mismo análisis se llevó a cabo en el Bloque Norte, donde existe un número de muestras mayor, con el objetivo de identificar posibles controles que puedan observarse también en las vetas Victoria y Elizabeth, donde el número de muestras menor dificulta la inferencia estadística.

No obstante, al presentar los resultados es fundamental tener en cuenta las limitaciones de este análisis. Como se describe en la sección de antecedentes (Sección 2.2.1), las pruebas geometalúrgicas incluyen distintos grados de dilución de la roca de caja. La proporción de roca de caja no está registrada en la base de datos, aunque podría ser aproximada a partir de la extensión de los intervalos que genera la intersección con las triangulaciones que representan las vetas. Sin embargo, los códigos de litología y alteración asignados a las pruebas metalúrgicas corresponden a los del primer intercepto entre el dato registrado del mapeo y el sólido, independiente si este primer intercepto es la proporción mayoritaria de la muestra total. En consecuencia, dado que los códigos registrados no corresponden a un criterio geológico o de proporción mayoritaria, es posible que resulten poco consistentes al momento de establecer si ejercen o no, un control sobre las variables geometalúrgicas.

La litología, registra al tipo de roca presente en la muestra. Similarmente, la alteración corresponde a la asociación de minerales de alteración (ganga) predominante para cada muestra. Por último, la unidad geometalúrgica caracteriza las muestras según el contenido relativo de sulfuros y óxidos, principalmente de hierro, los cuales afectan el comportamiento de los materiales en el proceso de lixiviación. Las Tablas 3.2, 3.3 y 3.4 detallan los códigos de cada uno de los atributos geológicos.

*Tabla 0.2. Detalle códigos litológicos.*

<b>Litologías</b>	<b>Código</b>	<b>Código numérico</b>
Veta	veta	1
Dacita_PAV	daci	3
Brecha Riolítica	brio	4
Riolita	rio	5
Riolita <sup>1</sup>	rio	6
Toba Riolítica	trio	7
Toba Andesítica	tand	8
Fallas bajo ángulo	fba	10

<sup>1</sup> existen dos litologías de Riolita en las vetas del Bloque Norte, Riolita 6 hace referencia a la riolita que ocurre solamente en veta Aleste, mientras que Riolita 5 ocurre en ambas vetas.

Tabla 0.3. Detalle códigos alteración.

<b>Alteración</b>	<b>Código</b>	<b>Código numérico</b>
Propilítica	pro	1
Silicificación intensa	sili	2
Silicificación strong	sils	3
Silicificación media	silm	4
Silicificación weak	silw	5
Silicificación traza	silt	6
Argílica	arg	7

Tabla 0.4. Detalle códigos unidad geometalúrgica.

<b>Unidad Geometalúrgica</b>	<b>Código</b>	<b>Código numérico</b>
Bajo sulfuro Andesítico óxido	OxBS	2
Alto sulfuro Andesítico Alto % sulfuro	ReAS	6

### **Litología.**

El tipo litológico predominante en las vetas del Bloque PAV es Dacita, mientras que en el Bloque Norte el tipo litológico predominante corresponde a Riolita. Las Figuras 3.8 y 3.9 corresponden a vistas isométricas donde se puede apreciar la distribución espacial de los tipos litológicos en cada una de las vetas. Para efecto del análisis se incluyen vistas equivalentes coloreadas por recuperación de plata. De estas vistas, destaca la tendencia a encontrar valores de recuperación de plata mayores al 80% en mayor proporción, de forma subhorizontal en las partes altas de las estructuras, tanto para el Bloque PAV como el Bloque Norte. Se observa en las Figuras 3.8 y 3.9, que la ocurrencia de los distintos tipos litológicos también sigue una tendencia subhorizontal. Esta tendencia es consistente con la tendencia subhorizontal de mayor correlación detectada en el estudio de correlación espacial, y que se discute en la siguiente sección. A continuación, se detallan los resultados del análisis estadístico exploratorio por tipo litológico.

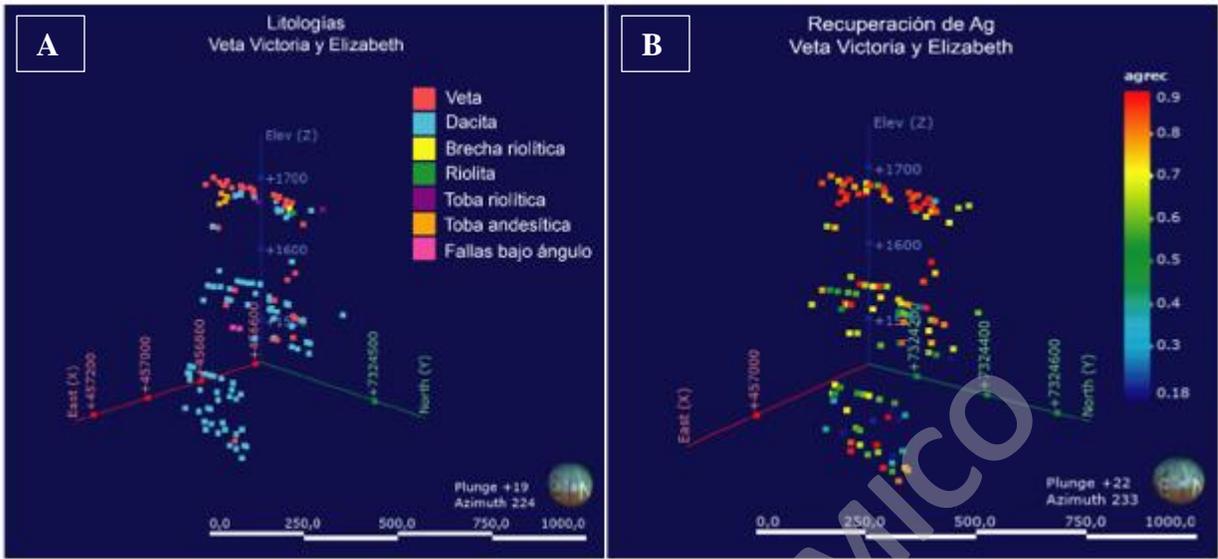


Figura 0.8. Vistas isométricas hacia el suroeste en vetas Victoria y Elizabeth. Tipo Litológico (A), recuperación de plata (B).

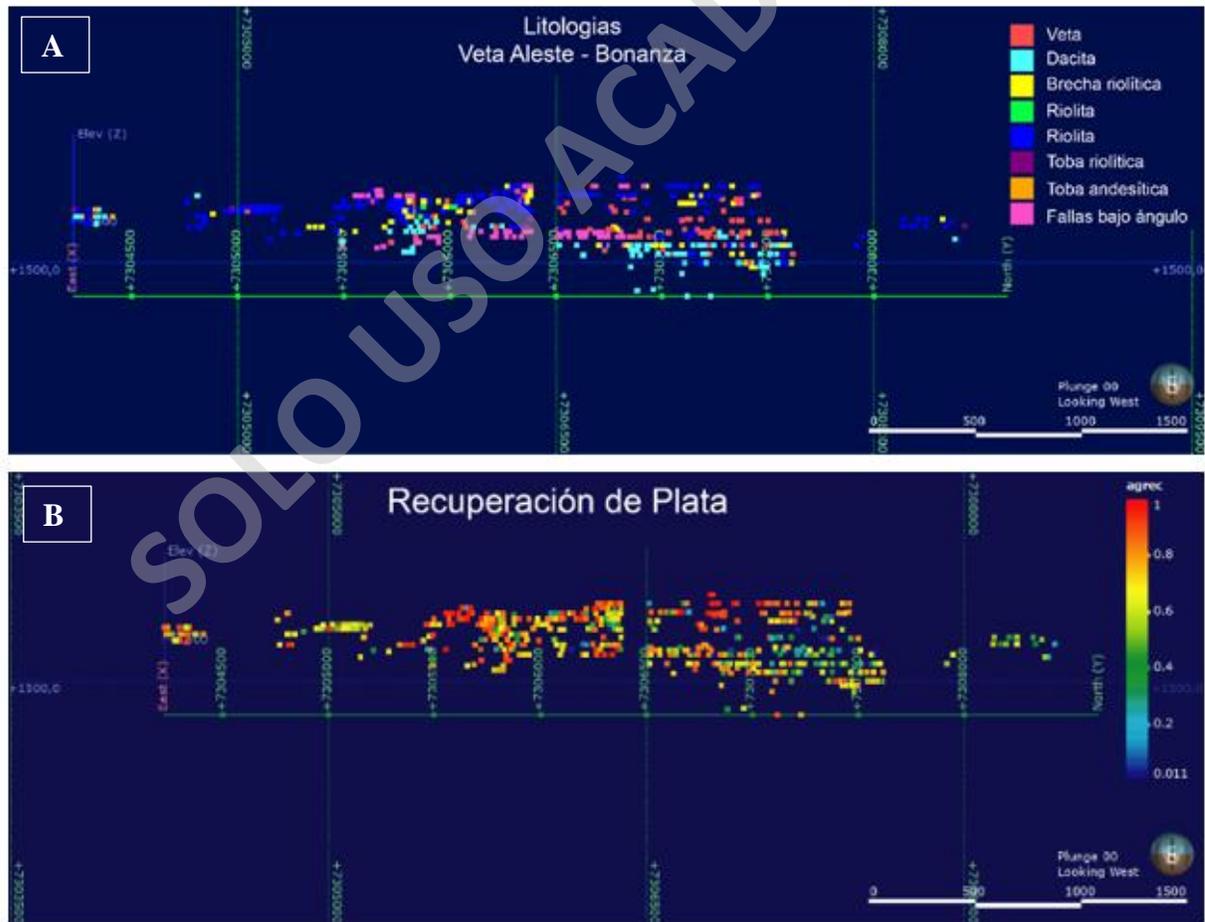


Figura 0.9. Perfil NS vetas Aleste y Bonanza. Tipos litológicos (A) y recuperación de plata (B).

En veta Victoria, las curvas de distribución acumulada de recuperación de plata por tipo litológico (Figura 3.10) muestran que la litología correspondiente a veta presenta valores de recuperación de plata más altos que para el tipo dacita para el rango intercuantil 25-75%. Consistentemente, en las vistas isométricas de recuperación de plata (Figura 3.8) también se observa que valores altos se concentran en la parte superior de veta Victoria, donde se observa una mayor ocurrencia del tipo litológico veta. No obstante, valores relativamente altos de recuperación también se observan en los tipos litológicos: dacitas y toba andesítica. Debemos recordar que la asignación de litologías (y alteración), no se basa en un criterio geológico o de proporción mayoritaria, por lo tanto, la litología asignada a la muestra no necesariamente representa la litología predominante. Lo cual es consistente con lo que se observa en la distribución espacial del atributo en las vetas, la cual carece de continuidad geológica y tiene una alta variabilidad a cortas distancias.

En el caso de veta Elizabeth, dacita es el tipo litológico predominante, el resto de los tipos litológicos no tiene un número de muestras suficiente que permitan realizar alguna inferencia válida sobre el comportamiento de la población respecto de la variable litología. De manera similar, el gráfico de distribución acumulada en el caso de las vetas del Bloque Norte presenta distribuciones globalmente distintas para la recuperación de plata en los tipos litológicos con mayor número de muestras: veta, dacita, riolita y falla de bajo ángulo. Si bien, las diferencias en las medias y las formas en las que se distribuye la variable en los distintos tipos litológicos sugieren que la litología puede ser un potencial control de las recuperaciones de plata. La alta dispersión evidenciada en el amplio rango intercuantil observado para los distintos tipos litológicos en la Figura 3.11 muestra que la posible distinción entre poblaciones no es discriminativa. Por ejemplo, en el gráfico de cajas y bigote (Figura 3.11) se observa que el rango intercuantil de los tipos litológicos veta y dacita en las estructuras del Bloque PAV es semejante, sin embargo, la media y mediana son distintas, como se evidencia en el gráfico de distribución de probabilidad acumulada (Figura 10). En la vista isométrica (Figura 3.8A), es posible observar que en la parte alta de veta Victoria, el tipo litológico veta ocurre en mayor proporción asociado a valores de recuperación de plata más altos. Sin embargo, una gran proporción de valores de recuperación alta ocurren fuera de esa zona, asociados a muestras de tipo veta, pero también muchos asociados al tipo litológico de dacita. Tomando en consideración como fueron asignados los atributos de litología, es posible que los valores altos que se observan fuera de la zona de veta correspondan a muestras en las que la proporción de vetas es

alta, pero quedaron asignados a dacita al ser el primer intercepto de la muestra. Como resultado el tipo litológico dacita tiene una alta variabilidad. Un comportamiento similar se observa en el Bloque Norte, para los tipos litológicos dacita, brecha riolita, riolita, y falla de alto ángulo. En la vista en sección norte-sur con vista hacia el oeste (Figura 3.9A), es posible observar que, si bien estos tipos litológicos se logran distinguir espacialmente, la distribución de valores altos y bajos de recuperación disponible en la Figura 3.9B, no es consistente con la distribución de tipos litológicos.

En síntesis, la alta variabilidad observada en la distribución de los parámetros geometalúrgicos no es consistente con distribución de tipos litológicos, los que, a su vez, también presentan una alta variabilidad y en algunos casos carecen de coherencia espacial, por lo que no es posible definir dominios de estimación en base al atributo litología.

En el siguiente capítulo se profundizará sobre las consecuencias de utilizar la litología como un elemento para definir dominios de estimación para las variables geometalúrgicas del Bloque PAV, considerando que esta litología no fue asignada utilizando un criterio geológico y representa el primer intercepto entre el dato registrado del mapeo y el sólido, independiente a la proporción mayoritaria con respecto al largo total de la canaleta.

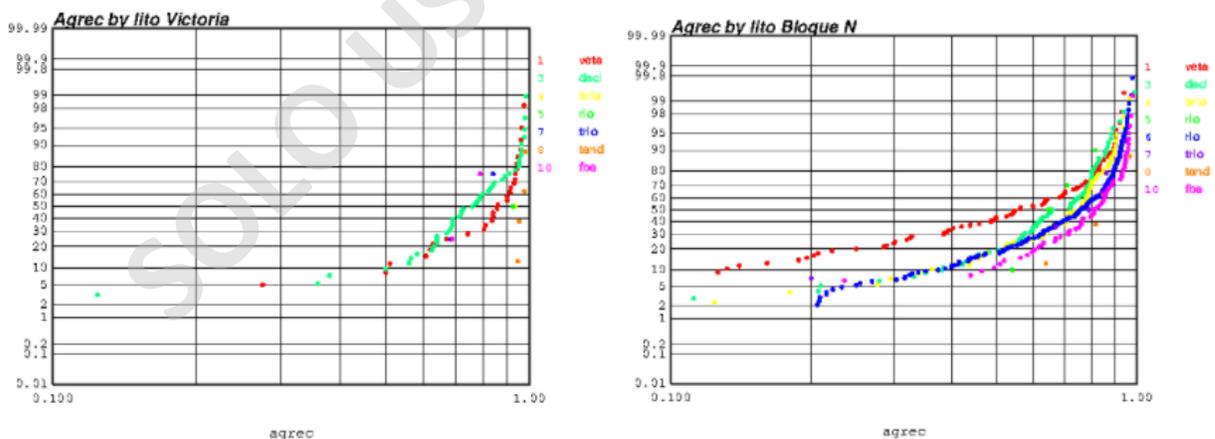


Figura 0.10. Curvas de probabilidad acumulada según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y vetas Bloque Norte (derecha).

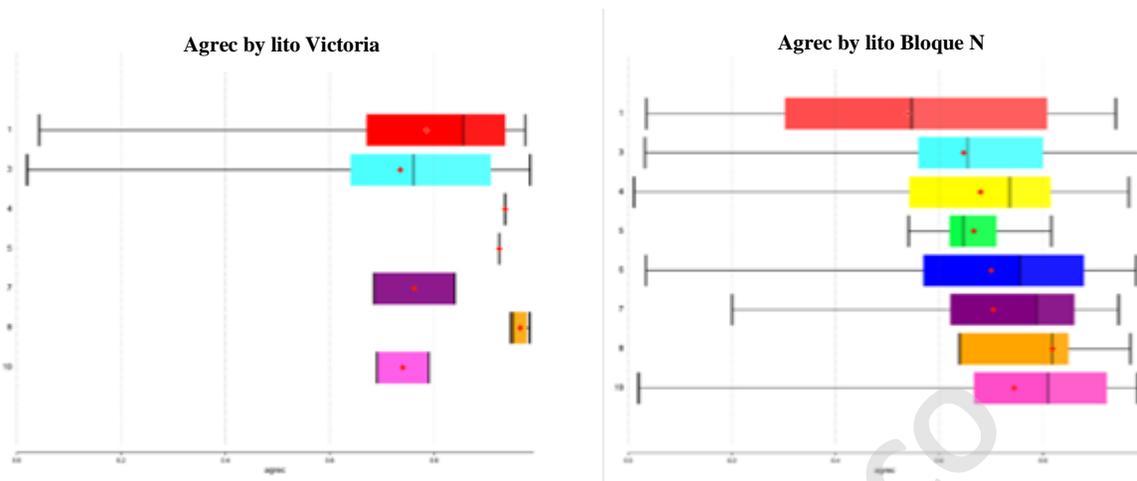


Figura 0.11. Gráfico de cajas y bigotes según litología para recuperación de plata, veta Victoria (izquierda) y vetas Aleste-Bonanza (derecha). Los colores corresponden a la misma leyenda que para la Figura 3.10.

En el caso de las recuperaciones de oro en veta Victoria, ocurre lo inverso a lo observado para la recuperación de plata. La litología dacita presenta valores promedio más altos de recuperación de oro con respecto a la litología veta (Figura 3.12). Por otra parte, la distribución de recuperación de oro en la litología veta en el Bloque Norte se distingue de las otras litologías, al presentar valores promedio de recuperación de oro menores (Figura 3.12). Sin embargo, los valores de recuperación de oro en veta Victoria y Elizabeth, se distribuyen en el espacio con una alta variabilidad, sin una correlación clara con la distribución de los tipos litológicos con mayor número de muestras (Figura 3.13). La alta dispersión se evidencia también en los gráficos de caja y bigote (Figura 3.11). En el caso de las vetas del Bloque Norte, en la vista en sección del Bloque Norte, se observa en el extremo norte de veta Aleste, un sector con valores promedio de recuperación de oro consistentemente menores al promedio, que es coherente con una zona de litología tipo veta. Esta zona, aunque no es muy extensa tiene consistencia tridimensional y podría ser un dominio de estimación distinto. Sin embargo, el gráfico de caja y bigote correspondiente (Figura 3.15) no evidencia una distinción estadística clara entre el tipo litológico veta y el resto de los tipos de roca.

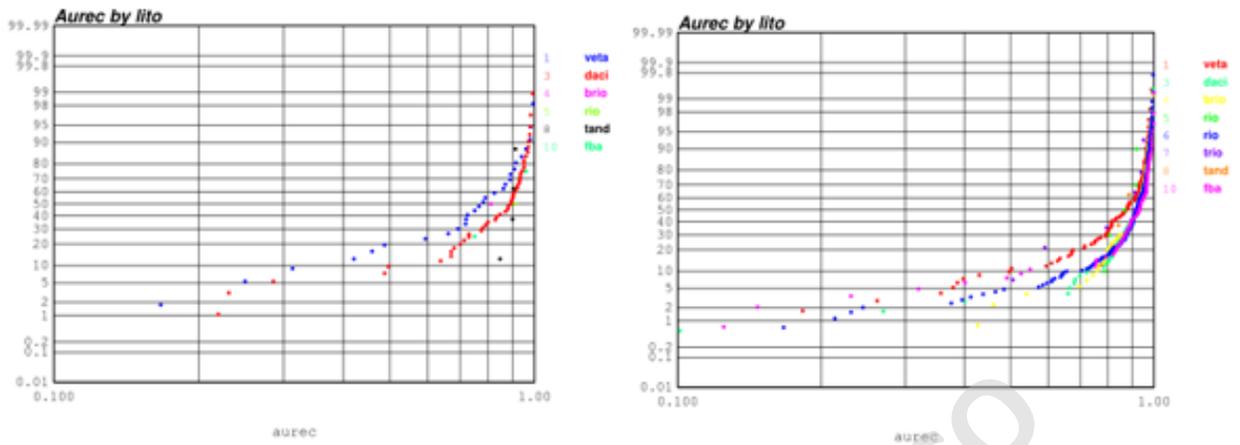


Figura 0.12. Curvas de probabilidad acumulada para recuperaciones de oro según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y veta Aleste-Bonanza (derecha).

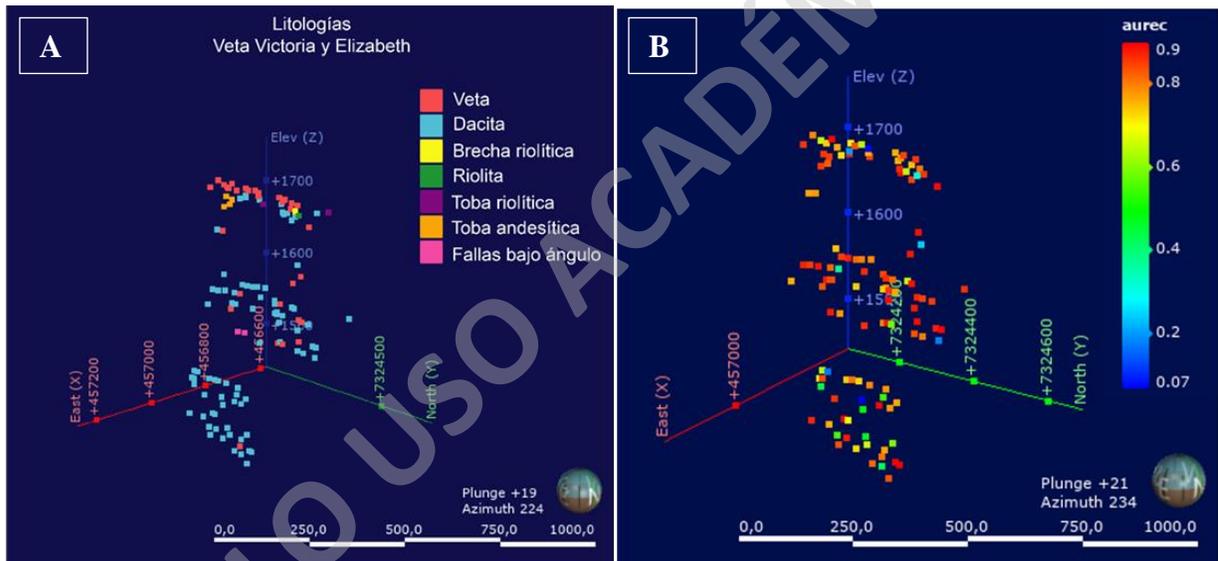


Figura 0.13. Vista isométrica hacia el suroeste. Tipos litológicos (A) y recuperación de oro (B), vetas Bloque PAV.

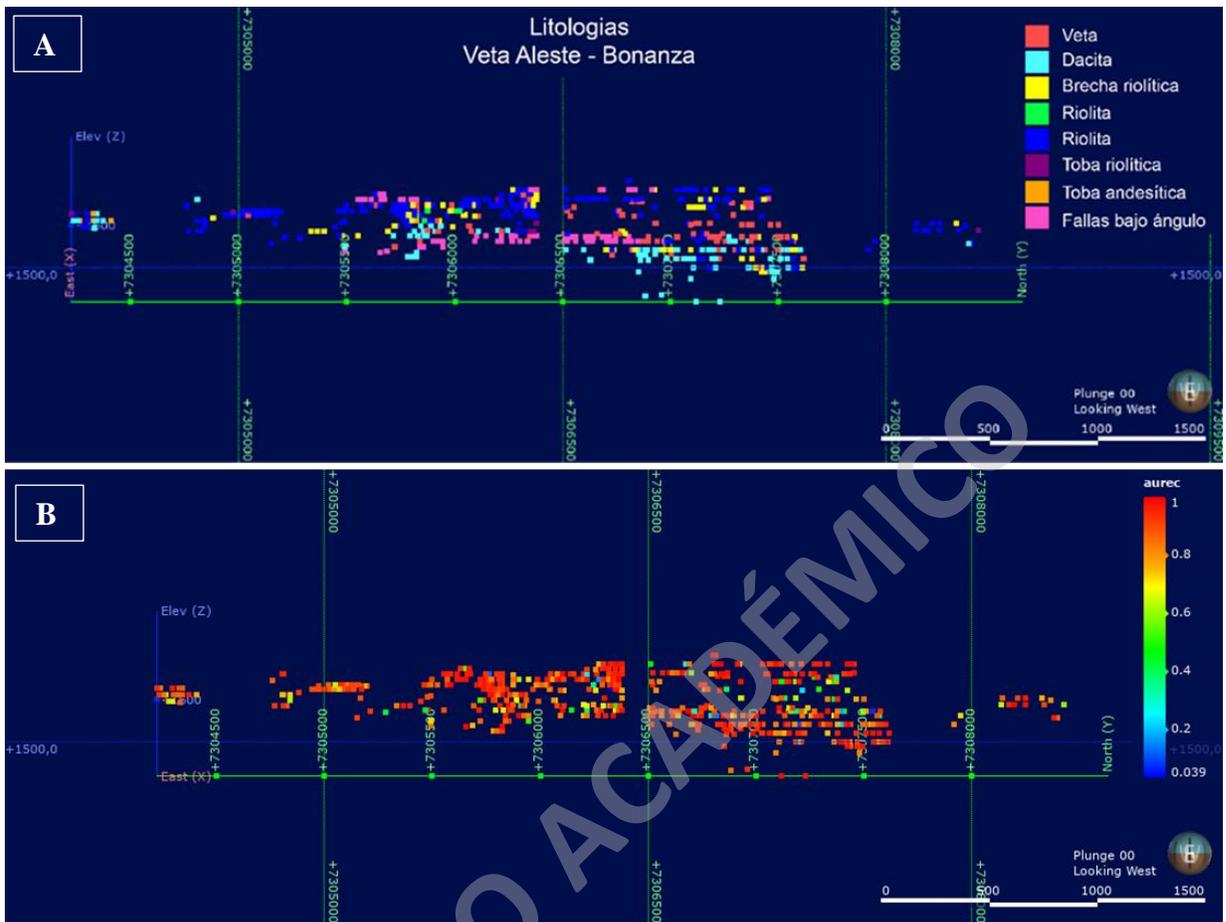


Figura 0.14. Perfil NS vetas Bloque Norte. Tipo litológico (A) y recuperación de oro (B).

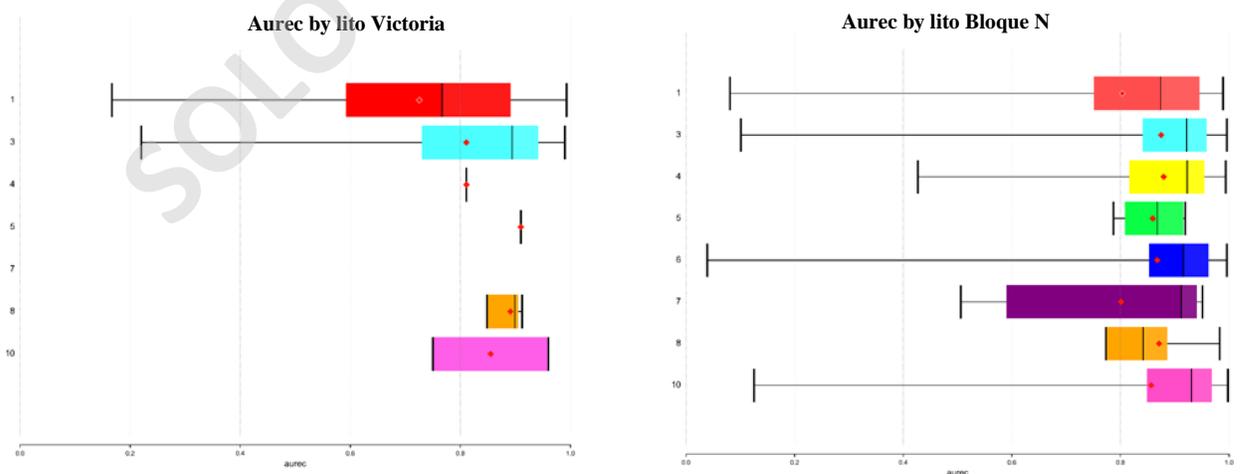


Figura 0.15. Gráficos de cajas y bigotes para recuperación de oro según tipo litológico. Veta Victoria (izquierdo) y veta Aleste-Bonanza (derecho) Los colores corresponden a la misma leyenda que para la Figura 3.12.

Si bien las distribuciones de los valores de consumo de ácido no presentan una correlación significativa con las recuperaciones de oro y plata (Figura 3.16), su distribución espacial guarda algunas semejanzas. En la Figura 3.17, es posible notar que valores de alto consumo de ácido se concentran en la porción superior de Veta Victoria donde también se concentran valores de alta recuperación de plata. Esta zona corresponde a una zona donde la litología asignada corresponde mayoritariamente al tipo veta. En el caso de las vetas de Bloque Norte, en especial en veta Aleste, se observa que valores altos de consumo de ácido coinciden con la ocurrencia de valores relativamente bajos de recuperación de oro y plata. La zona donde es más clara esta relación coincide con una zona donde la litología asignada corresponde con el tipo veta, similar a lo observado en las Figuras 3.8 y 3.9. No obstante, los gráficos de distribución acumulada, así como los de caja y bigote (Figura 3.19 y Figura 3.20) no evidencian controles significativos según la variable de litología.

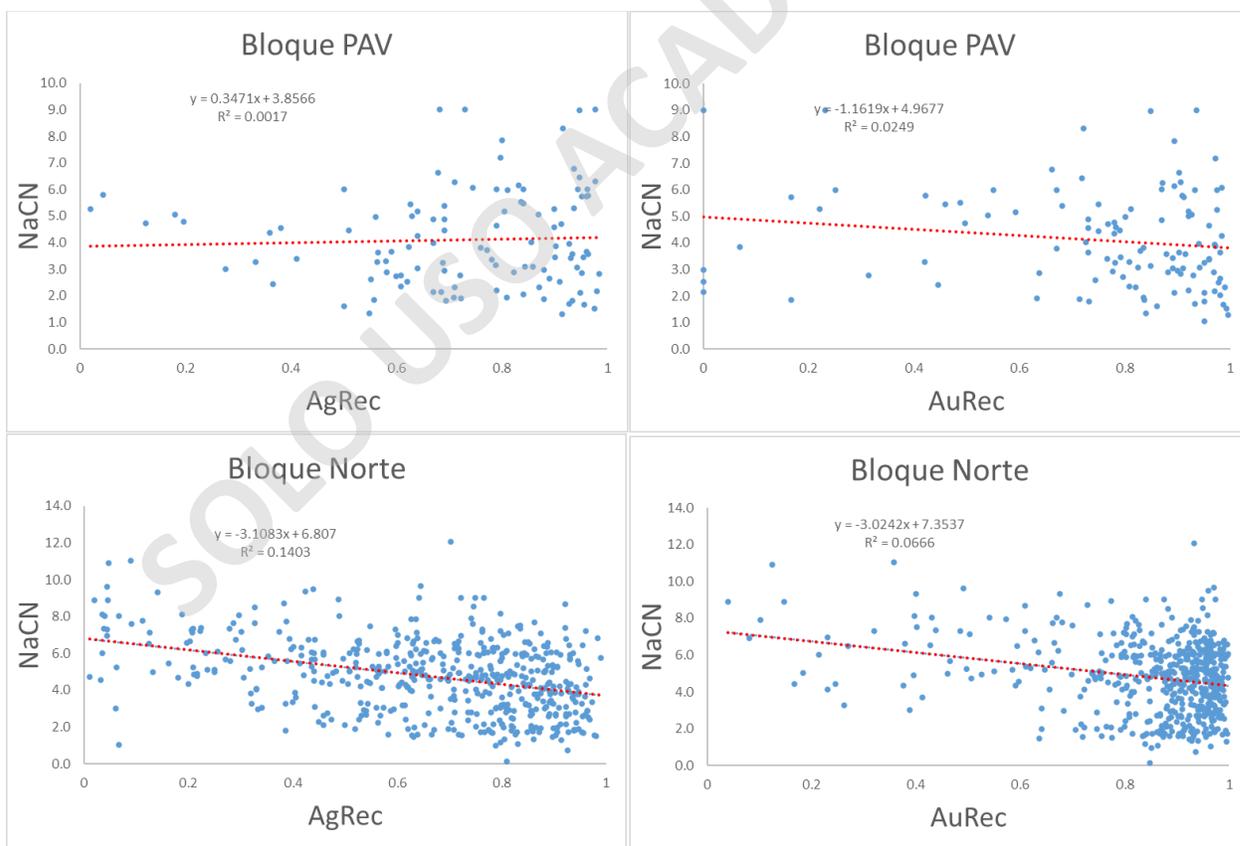


Figura 0.16. Nubes de dispersión de consumo de cianuro de sodio versus recuperación de plata y recuperación de oro.

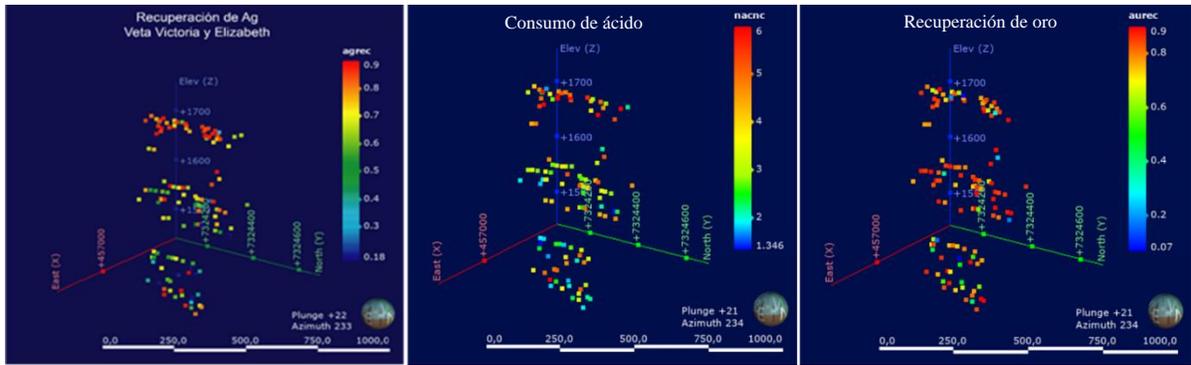


Figura 0.17. Vista isométrica en Bloque PAV de las recuperaciones de plata, consumo de cianuro de sodio y recuperación de oro

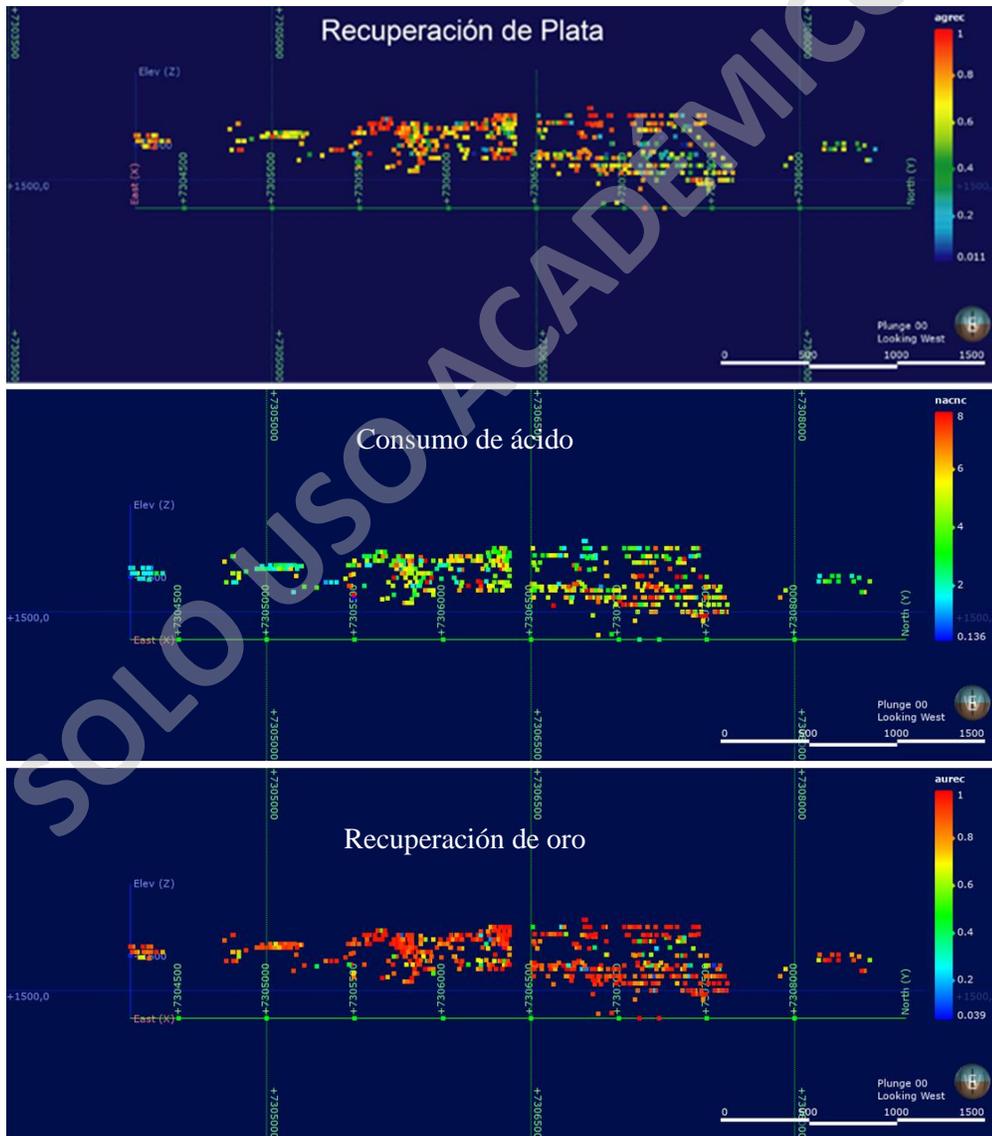


Figura 0.18. Perfil NS de las de las recuperaciones de plata, consumo de cianuro de sodio y recuperación de oro en Bloque Norte.

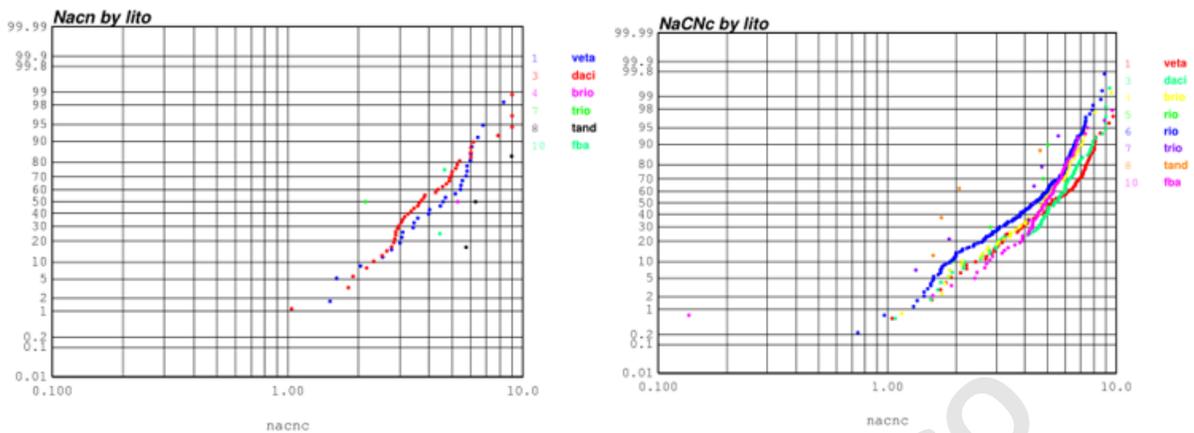


Figura 0.19. Curvas de probabilidad acumulada para consumo de cianuro de sodio según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y Veta Aleste-Bonanza (derecha).

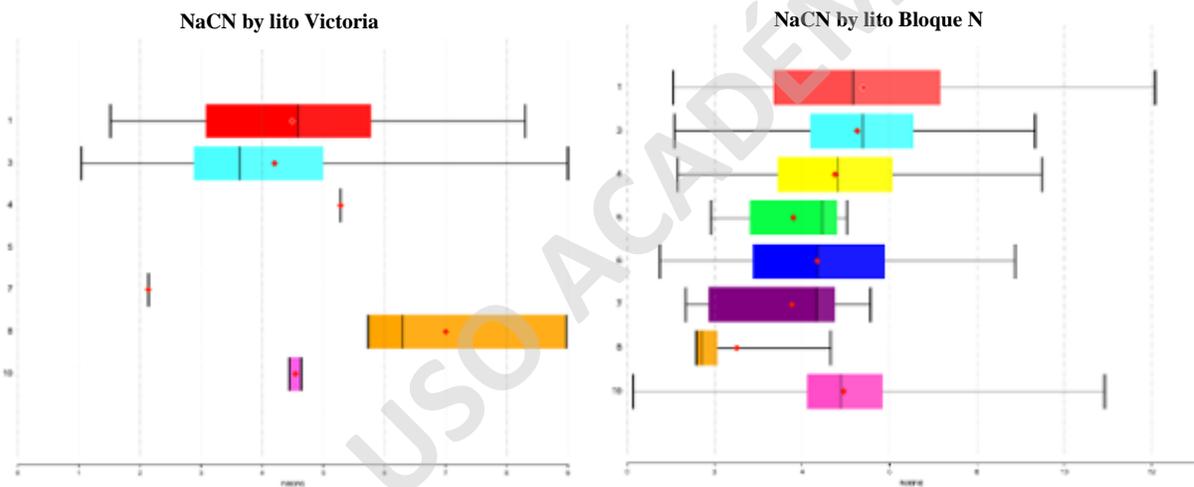


Figura 0.20. Gráficos de cajas y bigotes para consumo de cianuro de sodio según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y Veta Aleste- Bonanza (derecha). Los colores corresponden a la misma leyenda que para la Figura 3.19.

En relación, al posible control de la distribución de valores de tasa de filtrado y velocidad de sedimentación por la litología, es importante recordar que la cobertura de estos análisis en las vetas del Bloque Norte es significativamente menor a la disponible en las vetas del Bloque PAV (Sección 2.3). Tal como se puede observar en la Figura 3.2 las vetas del Bloque Norte tienen amplias áreas de la parte superior sin análisis. La falta de un análisis sistemático en las vetas del Bloque Norte impide extrapolar las tendencias espaciales y estadísticas al bloque completo. Por tanto, el apoyo

que pueden representar para el análisis de la tasa de filtrado y velocidad de sedimentación en el Bloque PAV es limitado.

En la Figura 3.21 es posible observar que la distribución espacial de las variables de tasa de filtrado y velocidad de sedimentación en las estructuras del Bloque PAV, no muestran un control litológico evidente. Sin embargo, en el caso de la distribución de tasa de filtrado si es posible observar una zonación vertical, con valores bajos en la parte superior de veta Victoria.

No obstante, consistente con las tendencias observadas en las variables de recuperación y consumo de ácido, las variables geometalúrgicas asociadas a procesos de molienda presentan comportamientos estadísticos semejantes según tipo litológico, en el Bloque PAV. En la Figura 3.22 se observa una diferenciación menor entre las distribuciones de tasa de filtrado para las litologías asignadas a veta y dacita. Mientras que en el caso de la velocidad de sedimentación (Figura 3.24) esta diferenciación es mayor. Por otro lado, la tasa de filtrado en el Bloque Norte muestra diferenciación en las medias y varianzas según tipo litológico.

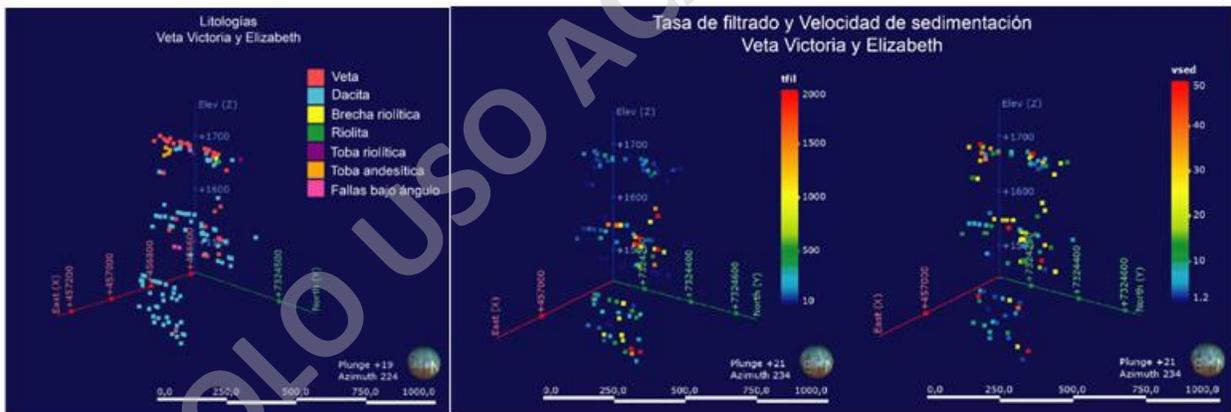


Figura 0.21. Vista isométrica de las distribuciones espaciales de las litologías, tasa de filtrado y velocidad de sedimentación en las vetas del Bloque PAV.

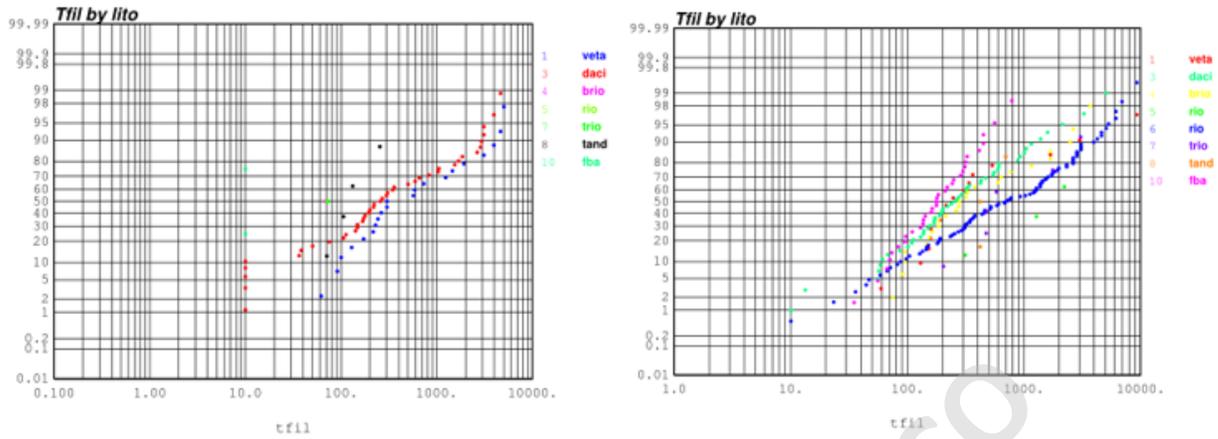


Figura 0.22. Curvas de probabilidad acumulada para tasa de filtrado según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y Vetas Aleste-Bonanza (derecha).

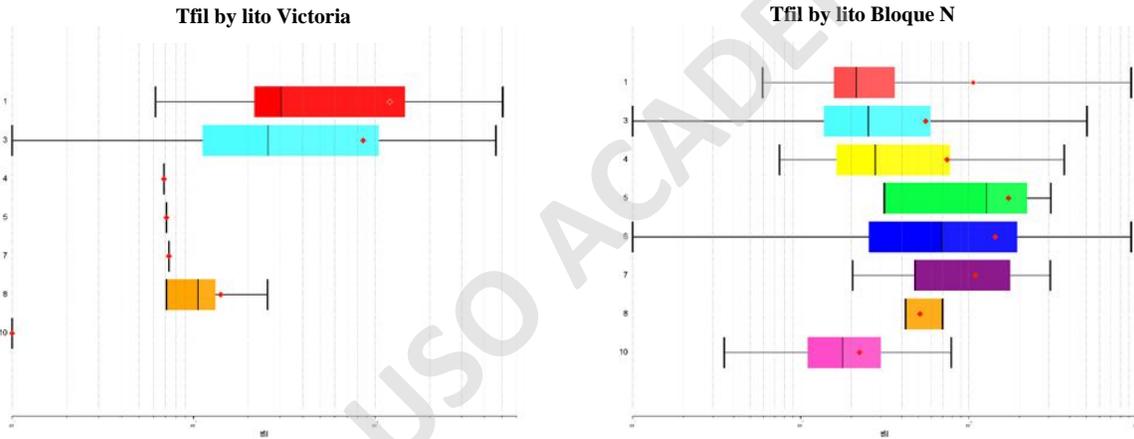


Figura 0.23. Gráficos de cajas y bigotes para tasa de filtrado según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y Vetas Aleste-Bonanza (derecha). Los colores corresponden a la misma leyenda que para la Figura 3.22.

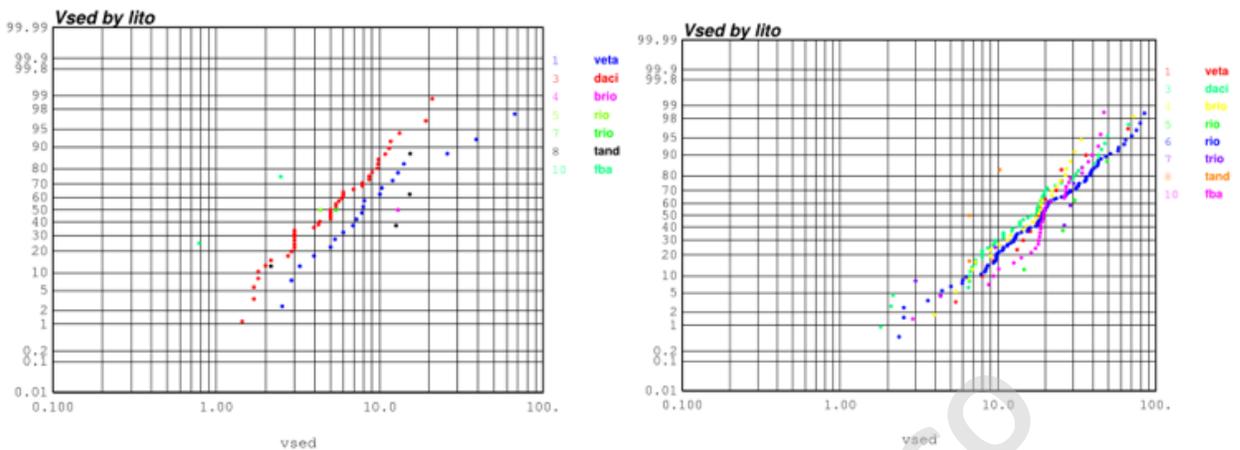


Figura 0.24. Curvas de probabilidad acumulada para velocidad de sedimentación según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y Vetas Aleste-Bonanza (derecha).

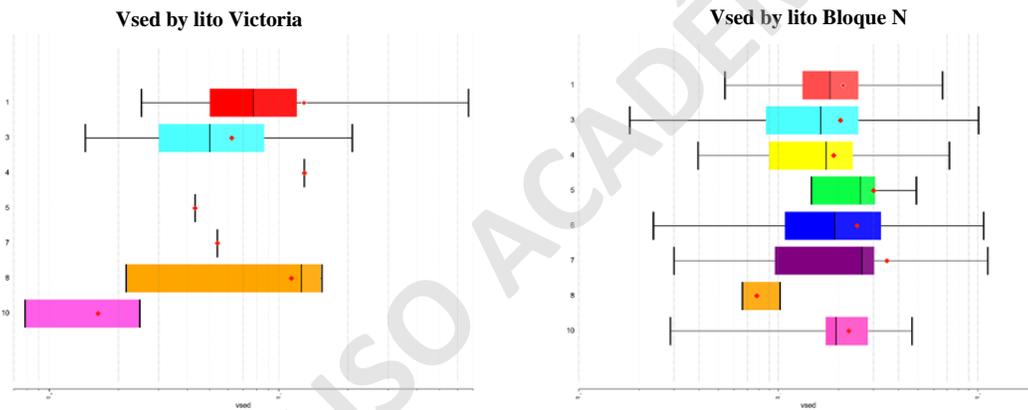


Figura 0.25. Gráficos de cajas y bigotes para velocidad de sedimentación según tipo litológico. Veta Victoria (izquierda) y Vetas Aleste-Bonanza (derecha) Los colores corresponden a la misma leyenda que para la Figura 3.25.

En síntesis, las muestras que reflejan zonación en las estructuras, no se relacionan espacialmente con un solo tipo litológico que muestre continuidad geológica y estadística. Esto dificulta el uso de este atributo como potencial factor para generar dominios estacionarios espaciales. Los límites de lo que podría ser un volumen litológico continuo que envuelva muestras estadísticamente similares son difusos, con una proporción relevante de muestras con el mismo código a modelar ubicadas fuera del potencial dominio de estimación. El impacto de no utilizar dominios estacionarios por tipo litológico, se expande con mayor profundidad en el siguiente capítulo.

## Alteración

Los códigos alteración disponibles en la base de datos corresponde en su mayoría a diferentes intensidades de silicificación en ambos bloques. En las vetas del Bloque PAV, la alteración predominante es silicificación intensa (sili intensa) (Figura 3.26). El resto de los tipos de alteración no tienen un número suficiente de muestras que permitan realizar alguna inferencia estadística válida sobre el comportamiento geometalúrgico de la población con relación a un posible control de la alteración. Lo mismo ocurre en veta Aleste en el Bloque Norte, donde la alteración predominante también corresponde a silicificación intensa (sili intensa), por lo que el resto de los tipos de alteración no tiene un número suficiente de muestras para realizar inferencias sobre un potencial control en las variables. En el caso de la veta Bonanza, es posible distinguir que la alteración correspondiente a silicificación pervasiva o fuerte (sili strong) presenta cierto grado de coherencia espacial y coincide parcialmente con las zonas de baja recuperación y alto consumo de ácido observadas en la Figura 3.9, Figura 3.14 y Figura 3.18. Sin embargo, en las curvas de probabilidad acumulada de veta Bonanza (Figura 3.28), se observa que las poblaciones de recuperación de plata según tipo de alteración no se diferencian notoriamente.

Los gráficos de distribución acumulada, así como de caja y bigote para las distintas variables por tipo de alteración, para ambos bloques, se incluyen en el Anexo A. La falta de representación de tipos de alteración distintos a silicificación intensa, sumado a la falta de análisis sistemáticos en el caso de los análisis de velocidad de sedimentación y tasa de filtrado en las vetas de Bloque Norte, no permiten hacer inferencia sobre el control de la alteración en la distribución de estas variables.

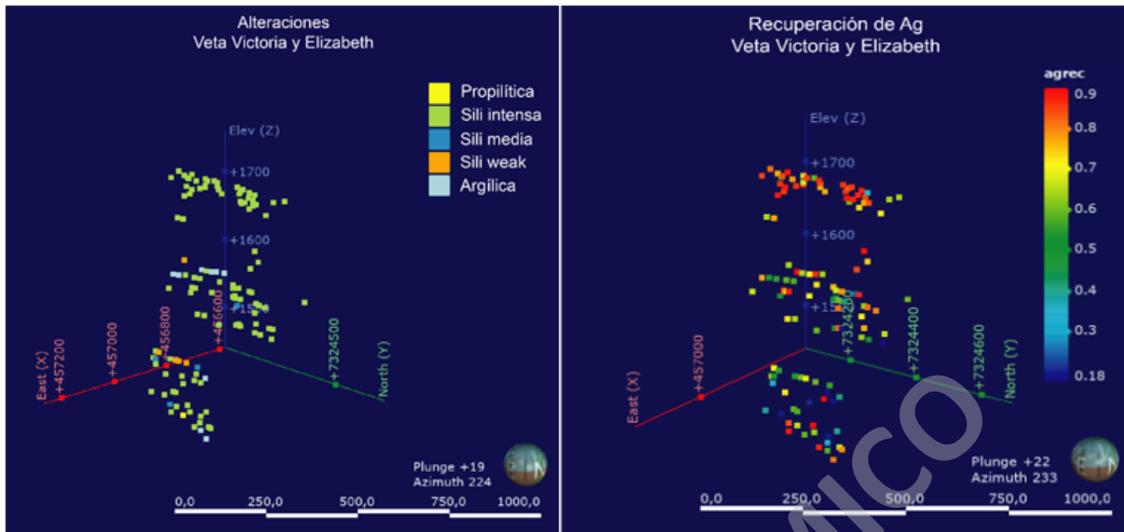


Figura 0.26. Vista isométrica de la distribución de los tipos de alteración en las vetas del Bloque PAV.

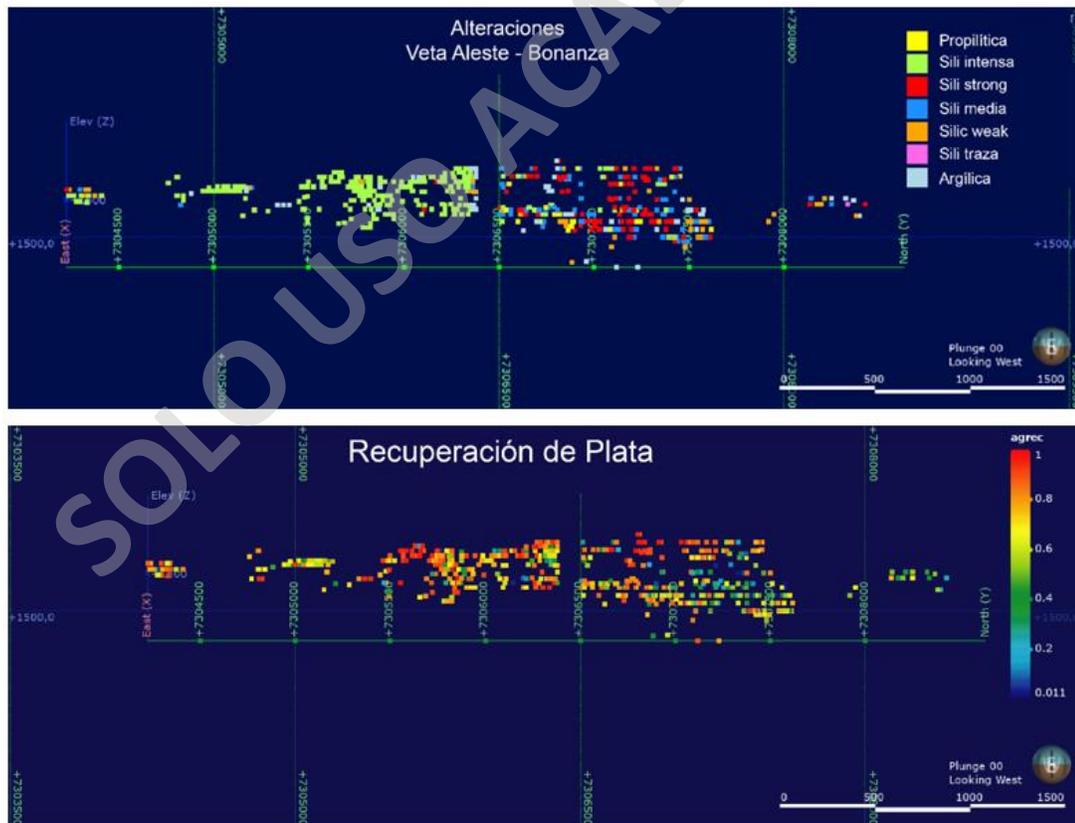


Figura 0.27. Perfil NS de la distribución espacial de los tipos de alteraciones en las vetas del Bloque Norte.

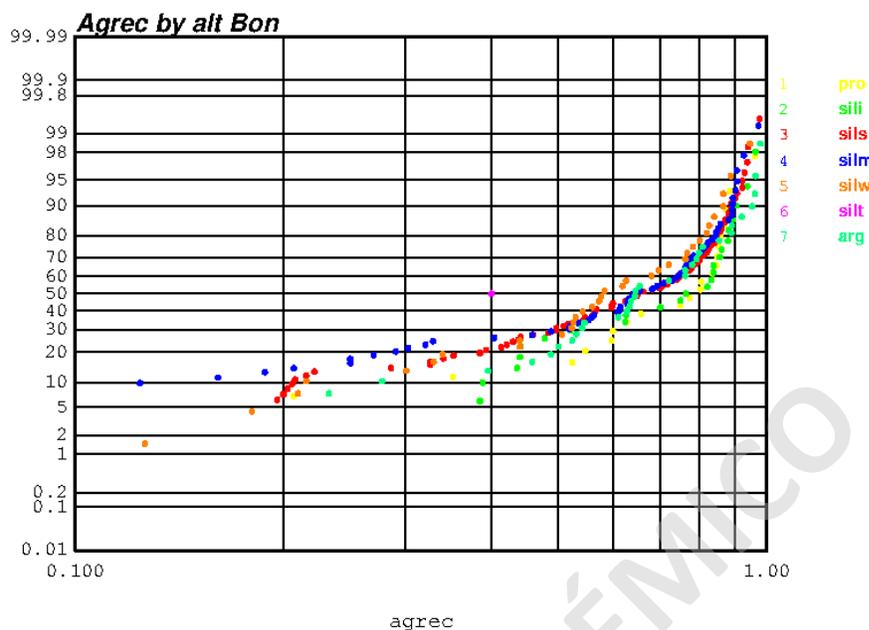


Figura 0.28. Curvas de probabilidad acumulada para recuperación de plata según tipo de alteración en veta Bonanza.

### Unidad Geometalúrgica

Consistente con su denominación, la distribución espacial del atributo correspondiente a unidad geometalúrgica se correlaciona con la distribución espacial observada para las variables: recuperación de plata, consumo de ácido y tasa de filtrado (Figura 3.29). La unidad correspondiente a la zona de bajo contenido de sulfuros y presencia de minerales oxidados (OxBS) presenta valores promedio de recuperación de plata y consumo de ácido más altos, así como valores de tasa de filtrado más bajos. Estas tendencias son consistentes con las diferencias observadas en los gráficos de probabilidad acumulada incluidas en la Figura 3.30. En el caso de la recuperación de oro, la unidad geometalúrgica no presenta una correlación en la distribución espacial o estadística. Finalmente, en el caso de la velocidad de sedimentación, se observa una leve diferencia en las distribuciones acumuladas según unidad geometalúrgica, no obstante, esta no es estadísticamente representativa. Cabe destacar que, para las vetas del Bloque Norte, sólo existe la unidad geometalúrgica de alto contenido de sulfuros, por lo cual no es posible realizar el mismo análisis.

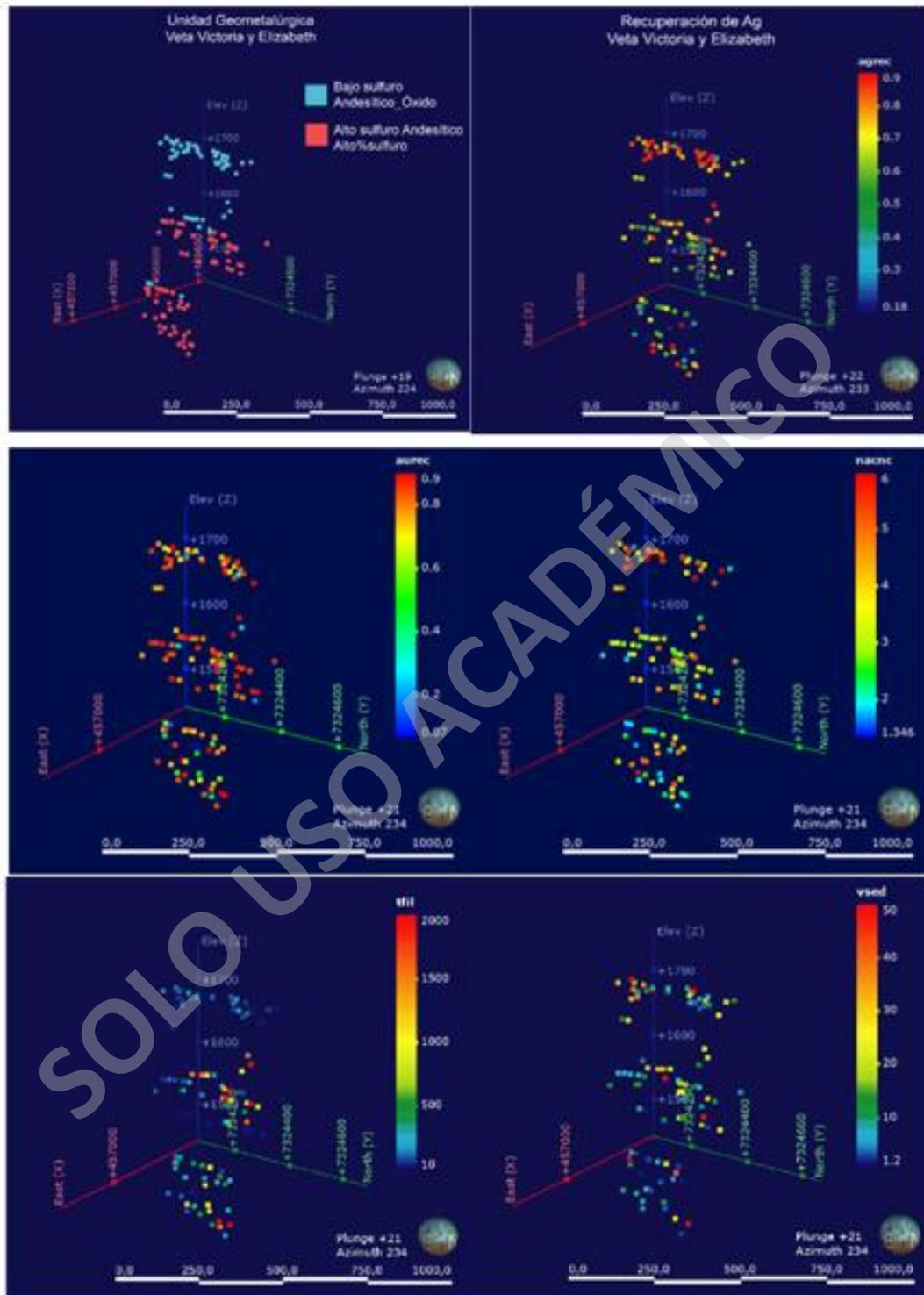


Figura 0.29. Vista isométrica de las Unidades geometalúrgicas con respecto a las variables geometalúrgicas en Bloque PAV.

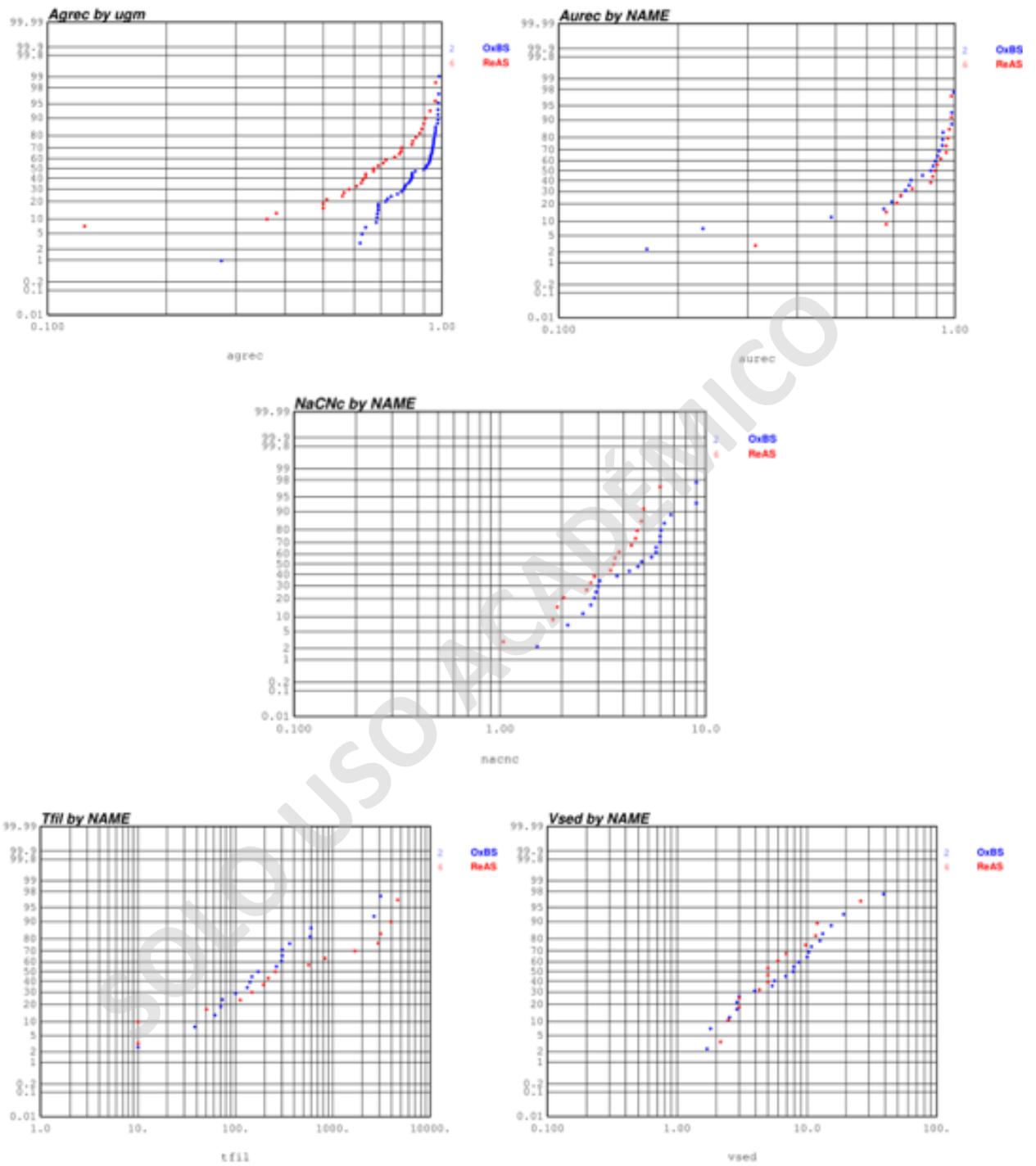


Figura 0.30. Curvas de probabilidad acumulada para cada variable geometalúrgica según unidad geometalúrgica en veta Victoria

En resumen, el análisis exploratorio deja en evidencia la falta de consistencia de los potenciales controles geológicos en los datos, lo que genera que las distribuciones estadísticas que condicionan los siguientes análisis tengan una alta variabilidad, lo cual impacta los resultados. Las consecuencias de esto serán abordadas con mayor profundidad en el siguiente capítulo.

### 3.2. Correlación espacial.

Debido a la falta de controles geológicos/metalúrgicos en las vetas, el análisis de correlación espacial se desarrolla por veta considerando todas las muestras disponibles. Además de variogramas experimentales direccionales, se calcularon los variogramas omnidireccional y a lo largo de los sondajes (comúnmente referido como método *down-the-hole*). Estos últimos, permiten obtener una apreciación de la correlación espacial promedio y la correlación a corta distancia, respectivamente. Los variogramas omnidireccionales muestran correlaciones promedio de corto alcance con respecto a la longitud total de las vetas, sumado a la alta variabilidad a corta distancia que se presenta en los variogramas por largo del sondaje (Figura 3.31).

La orientación y espaciamiento de las muestras, determinada por la geometría de los cuerpos mineralizados, influye en los parámetros de búsqueda de direcciones de máxima continuidad. Como resultado las direcciones en la que es posible encontrar pares de muestras para inferir la correlación de la variable a distintas distancias, están limitadas al rumbo de las estructuras en ambos bloques. El detalle de los parámetros está disponible en el en anexo B.

Las direcciones de máxima continuidad de cada variable, para las vetas Victoria, Aleste y Bonanza, se detallan en la Tabla 3.5. La veta Elizabeth no tiene suficientes muestras para realizar un análisis de correlación espacial. Todas las direcciones son consistentes con el rumbo norte sur de las estructuras y de inclinación subhorizontal. Sin embargo, en el caso de las variables de tasa de filtrado y velocidad de sedimentación, los variogramas direccionales carecen de estructura, por lo que se seleccionaron variogramas omnidireccionales para modelar la correlación espacial de estas variables.

El análisis de correlación espacial en las vetas del Bloque PAV, no permiten identificar direcciones de máxima continuidad. Aún más, los variogramas omnidireccionales carecen de continuidad y consistencia estructural. Debido a lo anterior no fue posible generar modelos variográficos para las vetas del Bloque PAV.

Por otro lado, la correlación espacial en las vetas del Bloque Norte muestra una tendencia subhorizontal a lo largo de la estructura con variaciones en la inclinación entre 5° a 25° para las variables de recuperación y consumo de ácido (Tabla 3.5). Los variogramas direccionales de la recuperación de plata en las vetas Aleste y Bonanza pierden correlación rápidamente al alcanzar la meseta a los 125 metros aproximadamente. Por otra parte, el consumo de cianuro muestra mayor correlación a cortas distancias para ambas vetas, alcanzando el punto de máxima correlación espacial a los 250 metros aproximadamente. (Los variogramas experimentales se encuentran disponibles en el Anexo B).

Las direcciones de mayor correlación en veta Bonanza presentan una mayor inclinación en relativo a veta Aleste. En la Figura 3.32, se observa que los niveles del muestreo, en veta Bonanza, presentan una leve inclinación con respecto a la horizontal y mayor espaciamiento entre niveles en el eje vertical. Por lo tanto, los resultados de las direcciones de máxima correlación espacial proponen que la forma en la que se desarrolla la toma de muestras podría estar enmascarando la anisotropía y correlación espacial real de los datos. Este concepto será abordado con mayor profundidad en el capítulo siguiente.

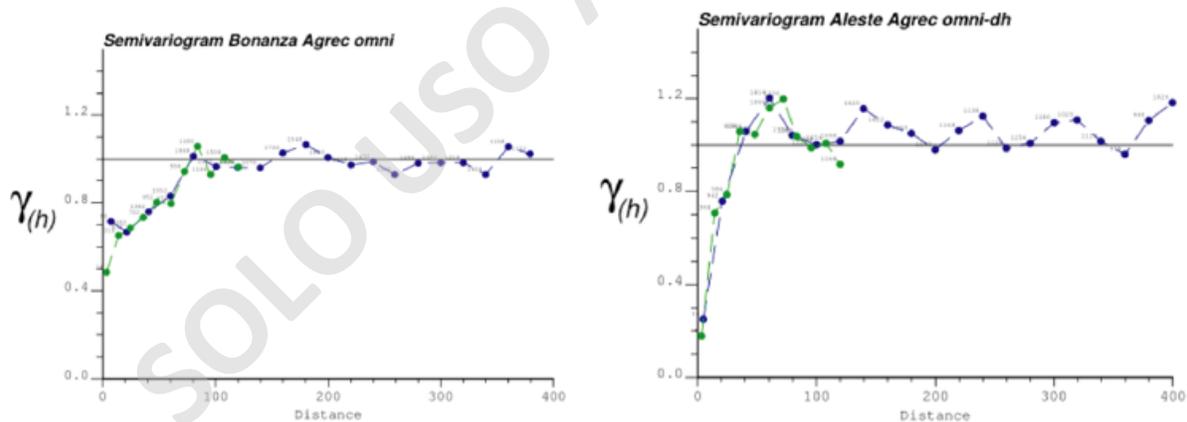


Figura 0.31. Variogramas omnidireccionales (curva azul) y a lo largo del sondaje (curva verde) para recuperación de plata en veta Bonanza y Aleste.

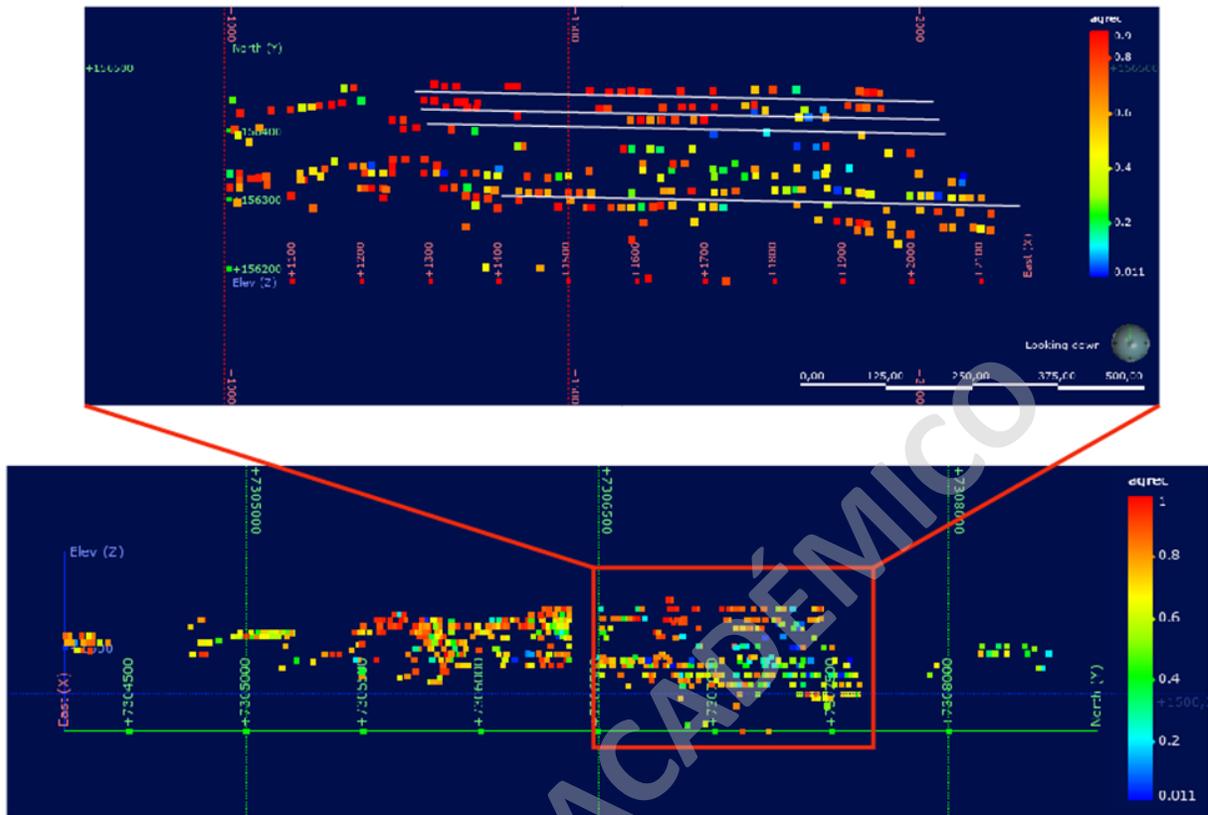


Figura 0.32. Perfil NS vetas Bloque Norte. Acercamiento veta Bonanza.

Tabla 0.5. Direcciones de máxima continuidad espacial para los modelos variográficos.

Variable	Veta Victoria (Azimut/Dip)	Veta Bonanza (Azimut/Dip)	Veta Aleste (Azimut/Dip)
Agrec	0°/20°	0°/20°	0°/20°
Aurec	Omnidireccional	0°/25°	0°/5°
cNaCN	Omnidireccional	0°/25°	0°/5°
Vsed	Omnidireccional	Omnidireccional	Omnidireccional
Tfil	Omnidireccional	Omnidireccional	Omnidireccional

Tomando en consideración que los variogramas experimentales obtenidos en las vetas del Bloque PAV no muestran estructura variográfica consistente, se calcularon los modelos variográficos de las variables de recuperación de plata, oro y consumo de cianuro de sodio, solo para veta Bonanza y veta Aleste.

La Figura 3.33 presenta los modelos variográficos obtenidos para las recuperaciones de plata en ambas vetas. De las figuras se desprende que veta Aleste pierde casi el 80% de la correlación a distancias menores a 20 metros. En el caso de veta Bonanza, el 80% de correlación se alcanza a aproximadamente 70 metros en la dirección de máxima continuidad. Como referencia, la longitud de las vetas corresponde a 1,000 metros cada una, aproximadamente. Por un lado, las direcciones ortogonales a la dirección principal en veta Aleste, presentan un rápido crecimiento en los primeros 20 metros. Por el contrario, en veta Bonanza, el crecimiento de la curva hacia la meseta es más bien lineal en los primeros 80 metros con un leve quiebre en gamma 0.9. La Tabla 3.6 detalla los parámetros de cada modelo variográfico generado. Los modelos variográficos obtenidos para la recuperación de oro y consumo de cianuro de sodio de las vetas del Bloque Norte, se presentan en el Anexo C.

Tabla 0.6. Parámetros modelos variográficos de veta Aleste-Bonanza.

Modelos Semivariográficos, Vetos Bloque Norte											
Veta	Variable	Nugget efect	N° estructuras	Tipo de estructura	Sill contribución	Ángulos			hmax/hmin/hvert		
Aleste	Aurec	0.120	2	Exponencial	0.580	0	10	0	35	20	15
				Esférico	0.300	0	10	0	80	45	30
	Agrec	0.190	2	Exponencial	0.510	0	5	0	35	35	40
				Esférico	0.300	0	5	0	150	40	80
	NaCN	0.300	2	Exponencial	0.400	0	5	0	105	100	45
				Esférico	0.300	0	5	0	180	150	55
Bonanza	Aurec	0.230	2	Esférico	0.370	0	25	0	50	30	5
				Esférico	0.400	0	25	0	85	30	10
	Agrec	0.410	2	Esférico	0.190	0	20	0	90	80	45
				Esférico	0.400	0	20	0	140	80	55
	NaCN	0.450	2	Exponencial	0.400	0	25	0	95	20	25
				Esférico	0.150	0	25	0	270	40	40

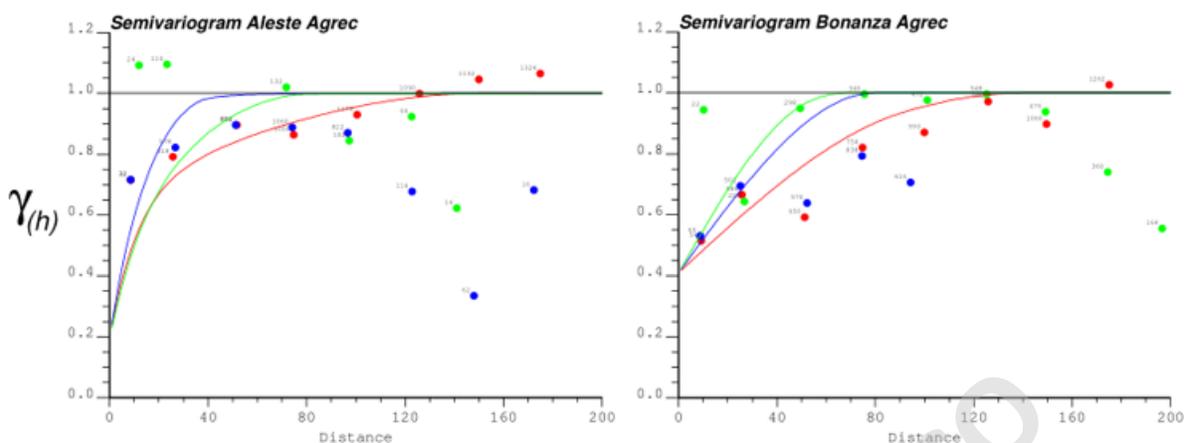


Figura 0.33. Modelos variográficos de recuperación de plata para veta Aleste y veta Bonanza.

### 3.3 Simulación geostatística

Con el objetivo de cuantificar la relación entre la incertidumbre y el espaciamiento entre las muestras y cómo ésta impacta en las reconciliaciones mensuales, se aplica la metodología para el cálculo de malla óptima. El propósito de realizar este estudio es determinar si al disminuir el espaciamiento de las muestras que se analizan para caracterizar la geometalurgia es posible disminuir la incertidumbre de estas variables y mejorar su predicción. En especial, para la variable de recuperación de plata, cuyo rango de variación es mayor e impacta los procesos de extracción y procesamiento. Sin embargo, debido a que no fue posible obtener un modelo de correlación espacial para las vetas de PAV, se opta por aplicar la metodología a las vetas del Bloque Norte, dado que comparten comportamientos metalúrgicos similares, en especial en el caso de la recuperación de plata.

La metodología para el cálculo de malla óptima se basa en la Simulación Secuencial Gaussiana. A continuación, se detallan los resultados de las distintas etapas del proceso.

#### *Aplanamiento de la estructura (unfolding)*

Previo a la aplicación de SGS, se realiza el despliegue o aplanamiento de las vetas con el fin de mejorar los resultados de la simulación de incertidumbre y facilitar su desarrollo. Para esto se utiliza el método de Unfolding (Deutsch, 2004), programa que aplanar o estira una estructura curvilínea con el objetivo de mejorar y facilitar el modelado de variogramas y cálculos de

simulación de incertidumbre (Deutsch, 2004). En la Figura 3.34 se presenta paso a paso el proceso de unfolding para veta Aleste y Bonanza. En el paso A, las vetas se presentan en sus coordenadas originales. Luego, en el paso B, los tres ejes de coordenadas se encuentran rotados según especifica la metodología, lo cual permite proceder al estiramiento final de la estructura, tal como se muestra en el paso C.

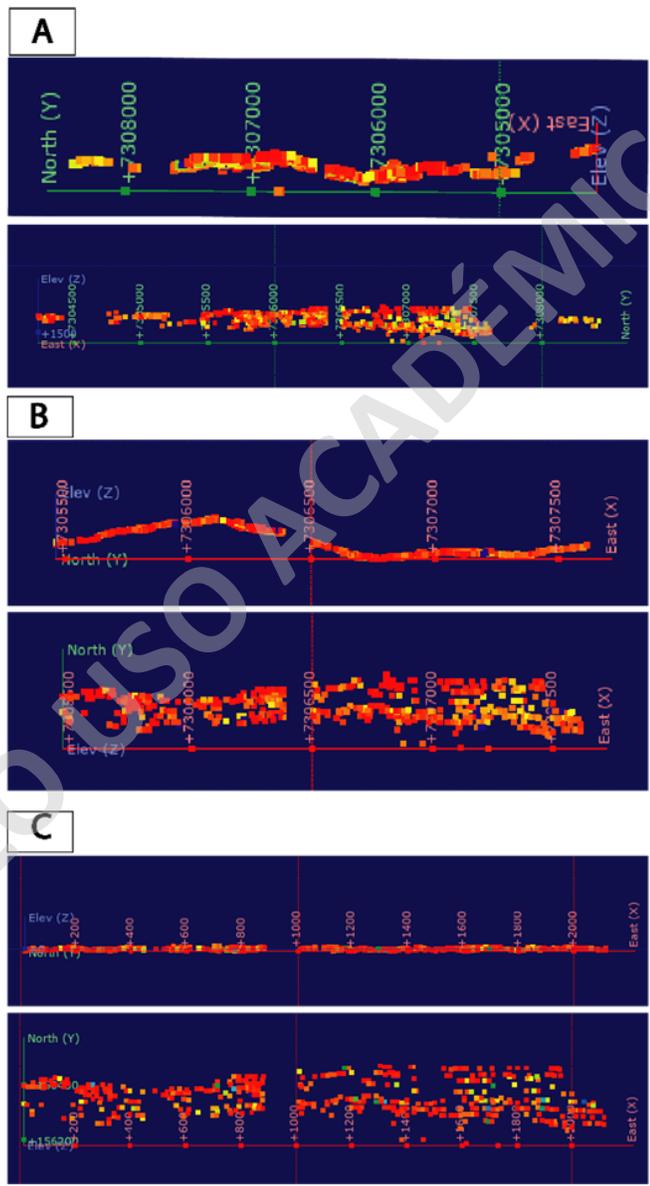


Figura 0.34. Representación metodología "Unfolding" en veta Aleste-Bonanza. A) Coordenadas originales; vista en planta (superior) y vista hacia el oeste (inferior). B) Coordenadas rotadas previo a unfolding; vista en planta (superior) y vista hacia el norte (inferior). C) Coordenadas unfolding; vista en planta (superior) y vista hacia el norte (inferior).

### 3.3.1. Simulación de la verdadera distribución.

Utilizando la distribución de valores de recuperación de plata de las muestras como distribución de referencia para veta Aleste y veta Bonanza, así como sus respectivos modelos variográficos, se generan 100 realizaciones condicionales equiprobables para cada veta a soporte puntual (0.5x0.5x1). Las 100 realizaciones tienen valores distintos, sin embargo, su distribución y variograma honra las distribuciones originales de recuperación de plata en veta Bonanza y veta Aleste por separado.

#### *Validación de la simulación*

Los criterios mínimos de validación de las realizaciones deben cumplir la reproducción de la distribución de referencia, a través de la reproducción del histograma y estadísticas básicas. Así mismo, se valida la reproducción de la continuidad espacial de los datos, comparando el modelo variográfico con los variogramas experimentales calculados para cada realización. Adicionalmente, se revisa de manera visual la reproducción de los valores de los datos originales con respecto a los valores simulados. Finalmente, se verifica la precisión de los valores simulados, a través de intervalos de probabilidad local.

La validación de la reproducción del histograma y el variograma, para ambas vetas, se muestra en las Figuras 3.35 y 3.36, respectivamente. En ambas validaciones, es posible notar una buena reproducción, tanto de la distribución, como de los modelos variográficos, lo cual también se refleja en el resumen estadístico comparativo que se incluye en la Tabla 3.7. Existen leves fluctuaciones entre los valores simulados y los valores originales, sin embargo, las reproducciones obtenidas son suficientes para validar las realizaciones simuladas.

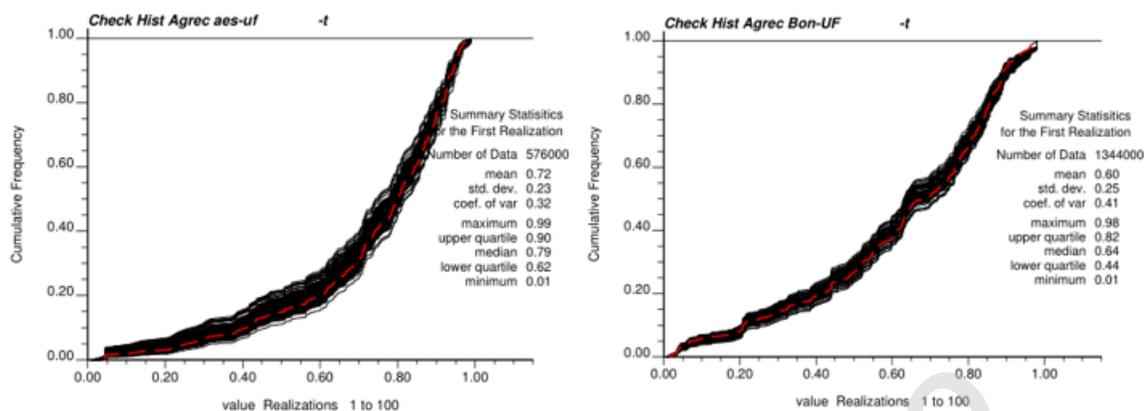


Figura 0.35. Validaciones curvas de frecuencia acumulada. Veta Aleste (izquierda) y veta Bonanza (derecha). Curvas de color negro corresponden a las realizaciones y curva de color rojo corresponde a la curva original.

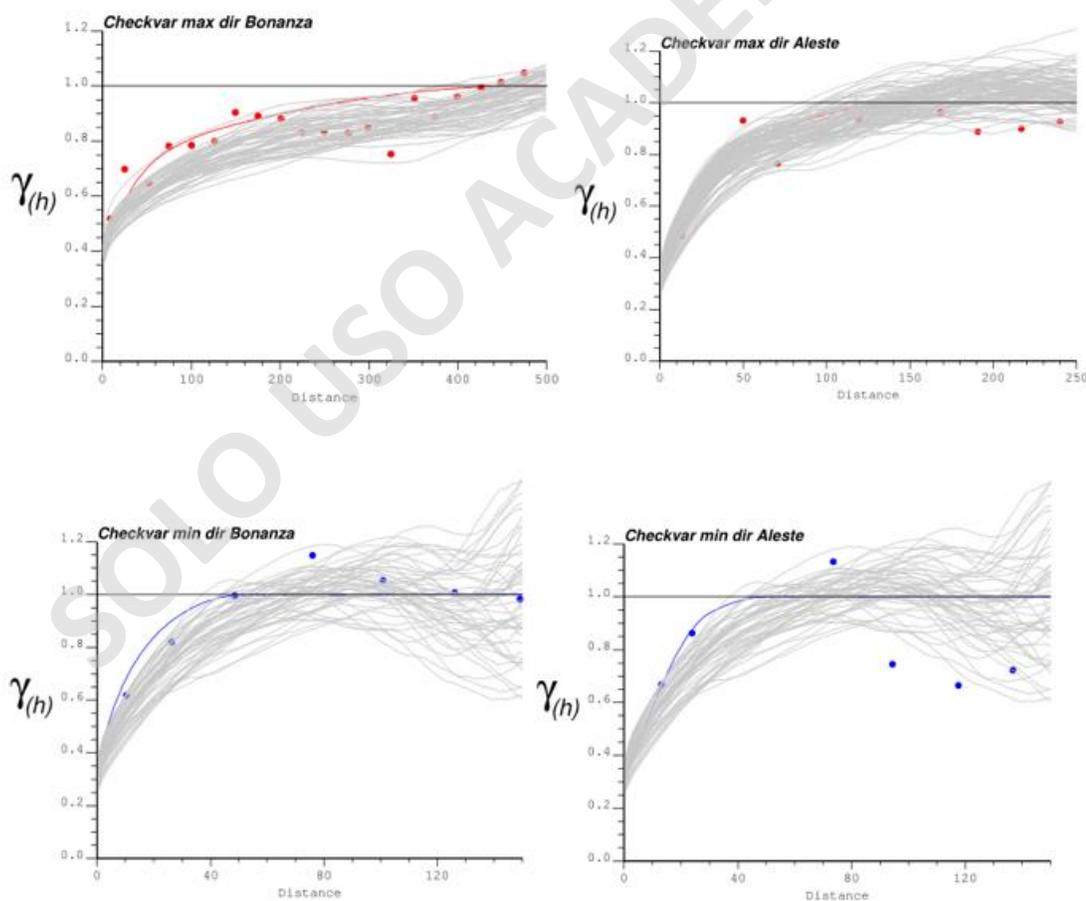


Figura 0.36. Validación modelos variográficos recuperación de plata. Curva roja: dirección de máxima continuidad; Curva azul: dirección de mínima continuidad; Curva gris: direcciones simuladas; Puntos azules: pares de muestras de los modelos

Tabla 0.7. Resumen estadístico comparativo estadísticas básicas de la recuperación de plata calculadas a partir de las muestras geometalúrgicas y los valores simulados.

Estadística básica Datos originales v/s Datos simulados				
	Aleste	Aleste sim	Bonanza	Bonanza sim
Cuenta	170	576000	256	1344000
Media	0.73	0.72	0.62	0.6
Desv. Estandar	0.22	0.23	0.25	0.25
Coef. Variación	0.30	0.32	0.41	0.41
Mínimo	0.04	0.01	0.01	0.01
Lower quartile	0.64	0.62	0.48	0.44
Mediana	0.80	0.79	0.66	0.64
Upper quartile	0.90	0.9	0.84	0.82
Máximo	0.99	0.99	0.98	0.98

La validación visual de la reproducción de los valores de recuperación de plata de las muestras geometalúrgicas muestra que las realizaciones honran los datos originales. Un ejemplo de esta validación se incluye en la Figura 3.37, donde se aprecia como las zonas de mayor recuperación, recuperación intermedia y baja observada en las muestras, se reproducen para cada una de las cinco realizaciones seleccionadas.

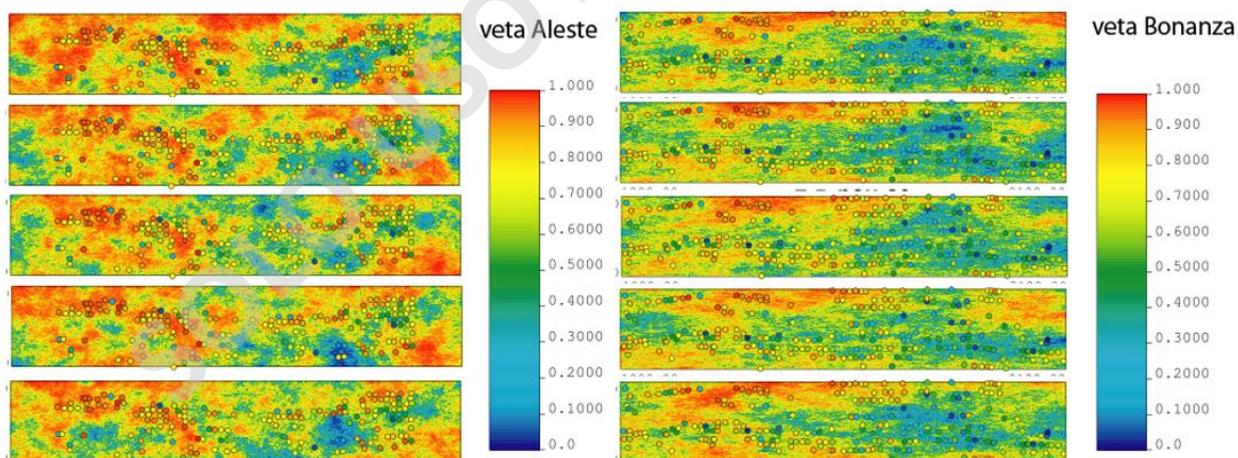


Figura 0.37. Validación visual para cinco realizaciones. Los puntos corresponden a los datos originales.

Finalmente, se realiza un chequeo de la precisión con la cual se generan los valores de las realizaciones. Esta consiste en desagregar la distribución real en intervalos de probabilidad PI (PI en  $[0,1]$ ) y contrastar estos valores contra la fracción de valores que caen dentro de dichos intervalos

de probabilidad. Si la curva generada corresponde a una recta de 45°, significa que los valores simulados son precisos con relación a los valores de referencia. La Figura 3.38, muestra los resultados de esta validación para las dos vetas. Los resultados se consideran aceptables y precisos según resultados disponibles en la literatura (Leuangthong, et al., 2003).

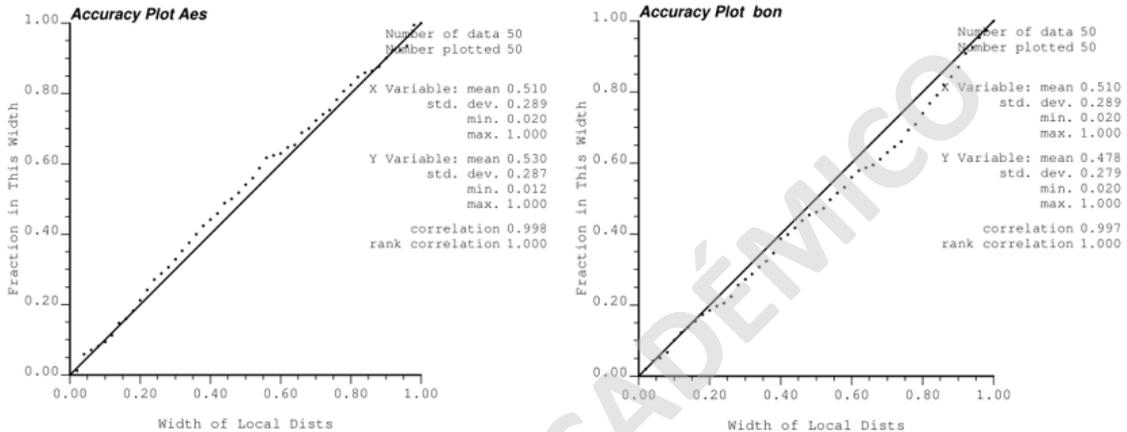


Figura 0.38. Gráfico de precisión de intervalos de probabilidad. Veta Aleste (izquierda) y veta Bonanza (derecha).

### 3.3.2. Muestreo de las simulaciones.

Tomando en consideración que el muestreo actual se realiza cada 12 metros a lo largo de las vetas (eje x en coordenadas aplanadas), se han establecido dos posibles espaciamientos de muestreo para aplicar la metodología y evaluar la incertidumbre. Los espaciamientos seleccionados son cada 3 y 6 metros en el rumbo de la estructura. Dado que la separación en el eje vertical (eje Y en coordenadas aplanadas) es cada 20 metros, que es el espaciamiento entre niveles de extracción (correspondientes a los niveles de muestreo), el cual se considera fijo. Así como que solo se toma una muestra por canal en el frente de avance y que el ancho promedio de veta es 1 metro (eje z en coordenadas aplanadas). Se definieron los siguientes espaciamientos 12x20x1, 6x20x1 y 3x20x1 metros, variando solamente el espaciamiento a lo largo de la veta.

A modo de ejemplo, en la Figura 3.39 se observa el muestreo realizado para una realización en veta Bonanza en los 3 diferentes espaciamientos definidos. Cada uno de los cuadros representa una vista

en perfil del muestreo que se obtiene de las recuperaciones de plata para cada espaciamento. Es importante destacar que a medida que disminuye el espaciamento entre muestras, es posible observar con mayor claridad la distribución original de las recuperaciones (grilla 3x20x1).

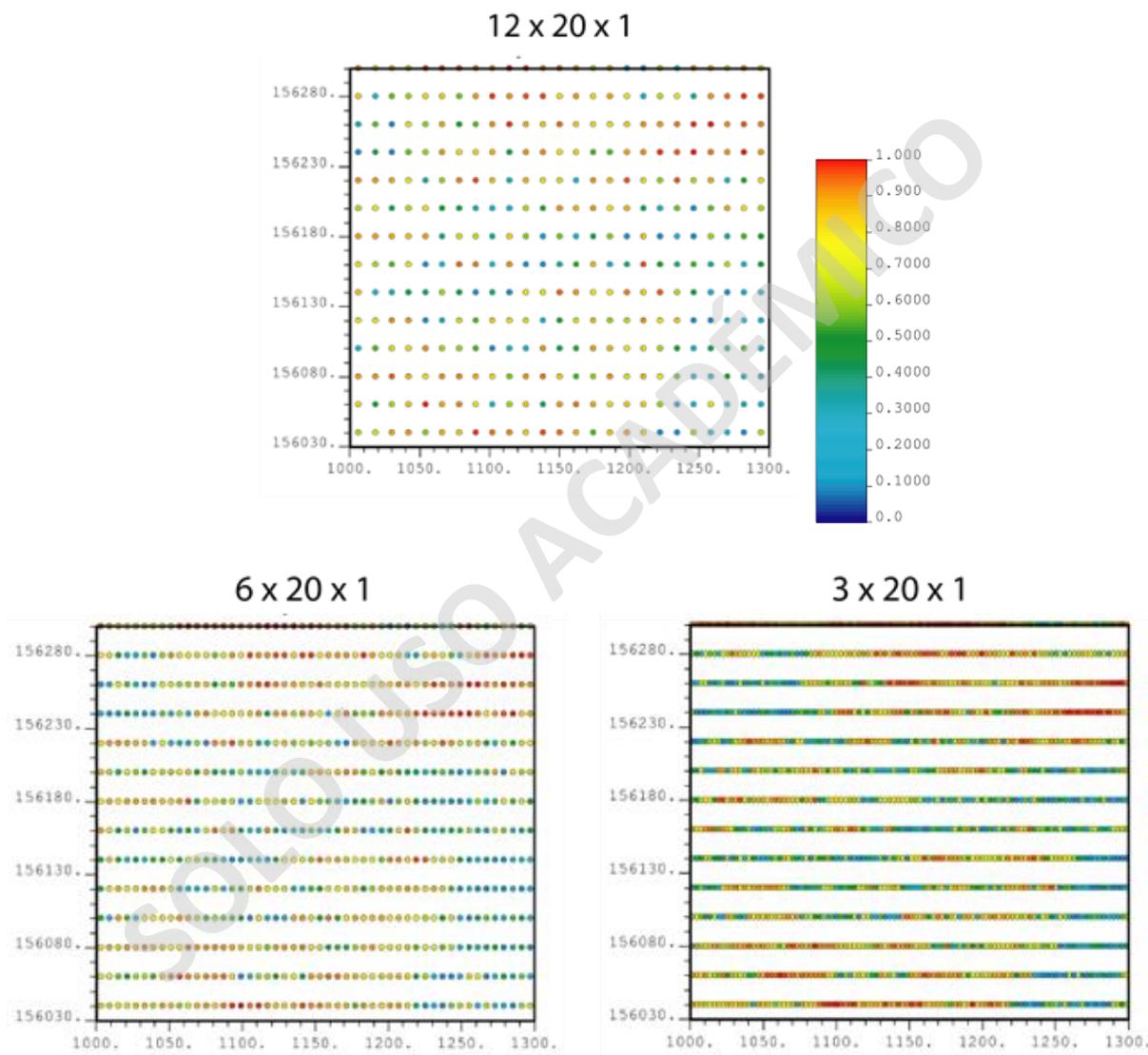


Figura 0.39. Vista en planta del muestreo en 3 diferentes grillas de una realización de veta Bonanza.

### 3.3.3. Estimación

Se realiza la estimación para cada realización y espaciamiento. El método utilizado para la estimación es Inverso a la Distancia (ID), el cual corresponde al método utilizado en la mina actualmente. Los parámetros utilizados para realizar el cálculo de las ponderaciones (detalle en Tabla 3.8) se mantienen igual para cada una de las grillas establecidas, con el fin de encontrar potenciales diferencias en los resultados comparativos de incertidumbre producto de los distintos espaciamientos. Cabe mencionar que no se utilizaron restricción demuestras por sondaje u octante para el cálculo de estimación.

Tabla 0.8. Parámetros de estimación Inverso a la distancia.

Tamaño de bloque	tamaño en x	4
	tamaño en y	3.5
	tamaño en z	1
Mínimo datos para estimar	4	
Máximo datos para estimar	8	
Radios de búsqueda (m)	distancia máxima	500
	distancia mínima	70
	distancia vertical	70
Ángulos elipsoide de búsqueda	ángulo 1	90
	ángulo 2	0
	ángulo 3	0
Método estimación	Inverso a la Distancia	

### 3.3.4. Promedio de bloques a soporte mensual.

Para cada una de las 100 estimaciones realizadas, se genera una regularización del tamaño de bloque a soporte mensual, con el fin de obtener un valor promedio de las recuperaciones equivalente al que se obtendrían mensualmente para las diferentes grillas. Esto último para cada una de las 100 estimaciones generadas. Los 100 valores promedio de recuperación estimada permiten calcular las medidas de incertidumbre para cada grilla y su posterior comparación.

Se considera como soporte mensual bloques de tamaño 15x20x1, teniendo como referencia la distribución espacial de las muestras en las vetas y la metodología de explotación y avance en la mina, por lo que el tamaño escogido se considera como un volumen mensual promedio aproximado para este caso de estudio en particular.

### 3.3.5. Medidas comparativas entre incertidumbre y espaciamento de datos.

Los histogramas de los valores de coeficiente de variación de las 100 realizaciones se incluyen en las Figuras 3.40 y 3.41. Al comparar las distribuciones de las tres grillas propuestas, se observa que el coeficiente de variación se mantiene prácticamente constante para los tres espaciamentos. Si bien en el caso veta Aleste, se observa un leve desplazamiento de la media, mediana, rango intercuartil, y mínimo y máximo del coeficiente de variación hacia valores relativamente mayores para espaciamentos menores, las diferencias no son estadísticamente significativas. En definitiva, la incertidumbre de la variable recuperación de plata, expresada como el coeficiente de variación sobre 100 distintas estimaciones, no disminuye o aumenta significativamente con la reducción del espaciamento entre muestras, tanto para veta Aleste como para veta Bonanza. La implicancia de este resultado se discute en el siguiente capítulo.

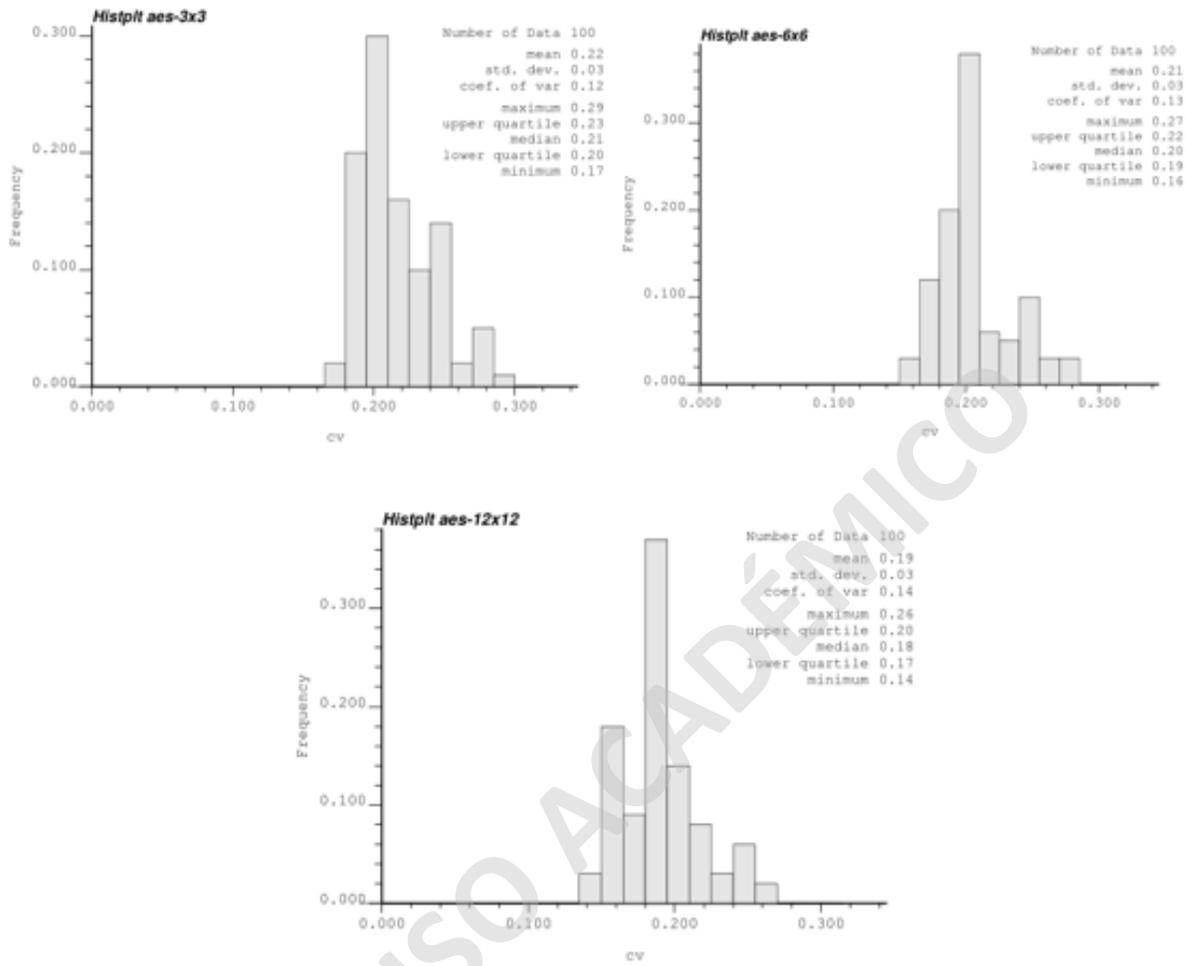


Figura 0.40. Distribución de los diferentes coeficientes de variación para cada espaciamiento de grilla en veta Aleste.

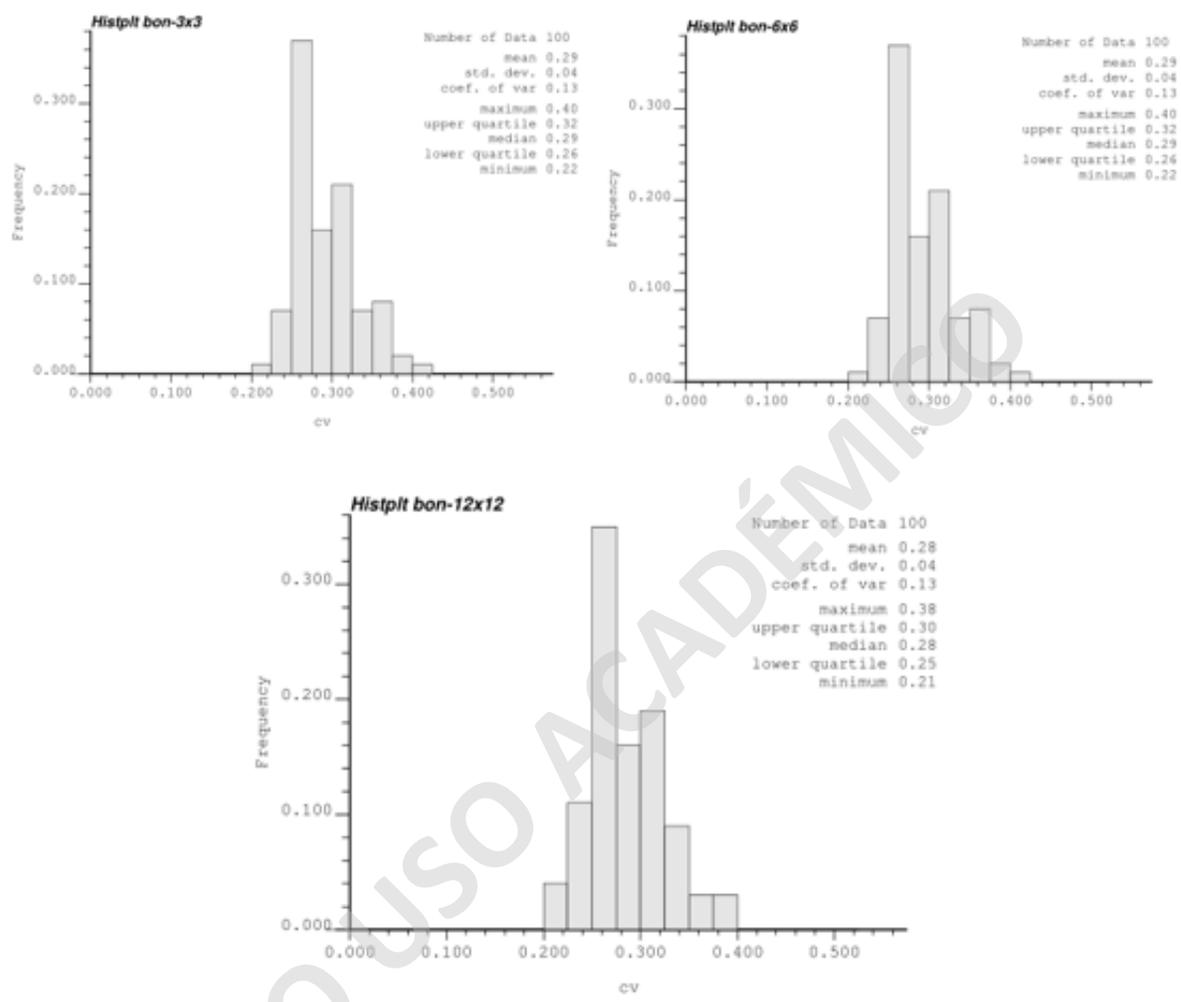


Figura 0.41. Distribución de los diferentes coeficientes de variación para cada espaciamiento de grilla en veta Bonanza.

## CAPÍTULO IV: DISCUSIONES

En el capítulo I se presenta la problemática de las diferencias entre las recuperaciones de oro, plata y el consumo de cianuro de sodio de las vetas del Bloque PAV con respecto a los valores de las recuperaciones y consumo de ácido históricos que registra la planta. Es este capítulo se discuten los resultados obtenidos del análisis exploratorio de datos realizado para las distintas variables geometalúrgicas, las evidencias de correlación espacial y los resultados del cálculo de una malla óptima, tal que permita disminuir la incertidumbre en periodos mensuales.

### *Análisis exploratorio de datos*

La estadística univariada identifica que tanto las recuperaciones de oro y plata presentan promedios más bajos de los registrados históricamente en la planta (menores a 90% y 86%, respectivamente). Si se comparan las recuperaciones de plata entre ambos Bloques, se identifica que existen medias ligeramente diferentes y menores a los promedios históricos (0.67 Bloque Norte y 0.71 Bloque PAV), sin embargo, el rango intercuartil de los valores promedio de recuperación de plata abarcan relativamente la misma amplitud (0.3 puntos de recuperación entre el cuartil inferior y el superior). Las recuperaciones de oro por su parte han mostrado tener disminuciones moderadas con respecto al promedio histórico. Del análisis univariado de las recuperaciones de oro obtenidas en las vetas del Bloque PAV, se observa una mayor variabilidad a partir de la amplitud del rango intercuartil, con respecto al rango observado en el Bloque Norte. Además, las estructuras de ambos Bloques difieren en sus medias (0.85 en Bloque Norte y 0.73 en Bloque PAV). Cabe mencionar que la cantidad de muestras que presentan las vetas del Bloque PAV, corresponden a un tercio de las que presenta Aleste y Bonanza, por lo que no es posible aseverar que la mayor variabilidad responde únicamente a un fenómeno de origen geológico. El consumo de cianuro de sodio por su parte muestra una amplitud del rango intercuartil relativamente similares entre las cuatro vetas en estudio, destacando que en Elizabeth el consumo de cianuro es menor aun cuando las recuperaciones de plata y oro son más bajas que en las demás vetas. Dado que veta Elizabeth presenta un solo tipo litológico y de alteración predominante, dacita y silicificación intensa, respectivamente, es probable que su comportamiento responda a la ocurrencia de minerales de mena y ganga con efectos refractarios al proceso de lixiviación. Utilizando el mismo razonamiento, es posible inferir que la baja variabilidad que se observa en las distribuciones de tasa de filtrado y

velocidad de sedimentación en las vetas de PAV, también esté relacionada con asociaciones mineralógicas de mena y ganga específicas que ocurren en estas vetas. Esto último debido a que el tipo litológico o de alteración se presentan relativamente constantes en estas vetas. Si bien en las vetas del Bloque Norte las variables de tasa de filtrado y velocidad de sedimentación tienen mayor variabilidad y esta podría atribuirse a una mayor variedad de tipos litológicos y de alteración. No es posible resolver esta hipótesis, pues solo el 50% de las muestras en estas vetas fueron analizadas, con preferencia en los niveles más profundos, y por lo tanto no es posible hacer inferencias estadísticas robustas sobre estas variables.

En conclusión, la variabilidad de distribuciones que se logra identificar en los primeros análisis y comparaciones de las variables entre ambos Bloques propone que existen diferentes poblaciones de datos que podrían responder a diferentes controles geológicos/metalúrgicos. Sin embargo, antes de evaluar la variabilidad introducida por los fenómenos geológicos que dan origen a estos comportamientos, es necesario revisar la variabilidad introducida artificialmente producto de decisiones de muestreo, métodos de análisis y manipulación de los datos.

Además de la variabilidad natural o intrínseca que tiene el fenómeno que representa una variable regionalizada, es ampliamente reconocido en la industria minera la variabilidad que pueden introducir diferentes protocolos de muestreo y análisis a la distribución de una variable que representa un fenómeno natural. En la Sección 2.2.1 del Capítulo II, se detalla el origen de las variables geometalúrgicas, las cuales provienen de distintas pruebas de laboratorio de protocolos variados. No obstante, la identificación del método utilizado para cada análisis no estuvo disponible para este estudio, ni tampoco materiales de aseguramiento y control de calidad, que permitieran establecer el impacto de las variaciones en los protocolos en los resultados de los análisis. Debido a lo anterior, no fue posible establecer qué porcentaje de la variabilidad de corto alcance observada en la distribución de las variables geometalúrgicas obedece a variaciones en la metodología de análisis.

Adicionalmente a las variaciones que introducen los métodos de muestreo o análisis, la manipulación de datos o la falta de muestreos sistemáticos también pueden impactar el análisis exploratorio de datos y las conclusiones que pueden extraerse de ese análisis. Un ejemplo de lo anterior es el artefacto detectado en el gráfico de dispersión de recuperación de oro versus leyes de

oro, en las vetas del Bloque Norte, donde se observa que un porcentaje de los datos de recuperación parecen haber sido derivados de una función no lineal de las leyes de oro. Si efectivamente algunos valores fueron derivados matemáticamente a partir de los análisis de oro, es necesario remover esos datos antes de poder realizar inferencias sobre la distribución de las variables y sus controles. Por otra parte, la falta de análisis sistemáticos de la tasa de filtrado y velocidad de sedimentación en las estructuras del Bloque Norte no permiten realizar inferencias estadísticas consistentes sobre estas variables, pues ciertos sectores carecen de análisis, y, por lo tanto, las distribuciones y sus estadígrafos pueden estar sesgados.

Otro aspecto relevante que se debe considerar al tratar de identificar los controles de las variables geometalúrgicas, es la distribución espacial de los atributos geológicos, litología y alteración, y el método utilizado para asignar estos atributos geológicos a las muestras correspondientes a canaletas. Tomando en consideración que el método de muestreo para el análisis de las muestras geometalúrgicas incluye proporciones variadas de veta y roca de caja, es de esperar que los valores de recuperaciones y consumo de ácido se vean afectados por estas proporciones. Si bien es necesario que este tipo de muestreo continúe tomando en consideración el impacto de la dilución que impone el método de extracción. También es necesario incluir la variable proporción de veta/roca de caja en cada muestra y analizar su impacto en la distribución de probabilidad de las variables geometalúrgicas. Es más, debido a que el control que pueda ejercer el atributo geológico de litología y alteración se ven enmascarados por la proporción veta/roca de caja, es probable que el análisis exploratorio de datos realizado no haya sido exitoso definiendo los dominios de estimación necesarios que expliquen la variabilidad observada en los parámetros geometalúrgicos, más allá de la variabilidad ya provocada por la heterogeneidad de los métodos de análisis, selección de muestras u otras posibles manipulaciones de los datos.

No obstante, el análisis anterior sobre las limitaciones de análisis exploratorio de datos y sus implicancias para el modelamiento de correlación espacial y la determinación de una malla óptima, es posible reconocer en ciertos resultados del análisis exploratorio de datos, que la mineralogía, litología y alteración tienen un impacto en los procesos metalúrgicos. Sin embargo, en el estado actual de la base de datos optar por la aplicación de dominios de estimación, más que discriminar poblaciones de menor varianza, es probable que se genere la mezcla de poblaciones de datos de estadística diferente, añadiendo aún más variabilidad de la que ya existe.

En efecto, dado que estos atributos no fueron asignados según la proporción mayoritaria, no es posible asegurar que las diferencias en poblaciones o disposición espacial obedecen efectivamente a una litología o alteración distinta. De hecho, al observar la distribución de los tipos litológicos en el espacio, es posible advertir cierta zonación preferencial en la ocurrencia de algunos de ellos. No obstante, la proporción de muestras con el mismo código que ocurre fuera del volumen tridimensional tentativo (potencial dominio de estimación), es mayor que la proporción que define el volumen. Además, no se observa que esta zonación de ciertos tipos litológicos sea consistente con la zonación de los valores de las variables geometalúrgicas, por lo que los posibles dominios no disminuyen el rango de variación de las distribuciones al interior de estos. Las dificultades para identificar controles geológicos o geometalúrgicos que expliquen la variabilidad de los parámetros geometalúrgicos se traduce en una distribución de entrada para el análisis de correlación espacial y posterior simulación, que tiene una alta dispersión a cortas distancias.

#### *Correlación espacial*

El desarrollo del análisis de correlación espacial en grupos de datos de gran variabilidad dio como resultado modelos variográficos de corto alcance y efectos pepa altos. Por otra parte, la geometría de los cuerpos mineralizados y el método de explotación determinan la disposición tridimensional y espaciamiento de las muestras disponibles para el cálculo de la variografía. En efecto, es posible encontrar pares de datos a mayores distancias en la dirección de las vetas, que perpendicular al rumbo. A lo anterior, se suma que el espaciamiento en la dirección vertical o en el manto de las estructuras es mayor que en la dirección horizontal NS, siguiendo la dirección de las vetas. Como resultado de esta disposición tridimensional, las direcciones de máxima continuidad que se desprenden de los variogramas experimentales se ven influenciadas por la orientación de las vetas. En efecto, la diferencia de inclinación de la dirección de máxima continuidad entre veta Bonanza ( $25^\circ$ ) y veta Aleste ( $5^\circ$ ), sugiere que las direcciones de máxima correlación espacial y anisotropía reales, podrían estar siendo enmascaradas por el espaciamiento anisotrópico de las muestras disponibles.

#### *Malla optima e incertidumbre*

Teóricamente, una malla de muestreo densa disminuye la incertidumbre de un conjunto de datos, lo que se traduce en un valor menor del coeficiente de variación con respecto al de una malla

espaciada. Sin embargo, se debe considerar la naturaleza de la variable en cuestión. Por ejemplo, se acepta que, en la mayoría de los depósitos, la variabilidad natural de la mineralización de cobre es comparativamente menor a la del oro y la plata. En este último caso, la selección de una malla relativamente más densa disminuiría la variabilidad entre los datos en función de la distancia entre ellos. No obstante, se reconoce en general, que la mineralización de oro y la plata ocurre de manera errática a cortas distancias. Este fenómeno se asocia a modelos de correlación espacial de efecto pepa más altos y alcances más cortos. En estos casos, una malla más densa no necesariamente resultaría en una disminución de la variabilidad, sino al contrario, podría aumentar al capturar con mayor resolución la variabilidad natural de las variables. Por lo tanto, este supuesto debe ser considerado al momento de analizar los resultados obtenidos para las diferentes mallas de muestreo.

Los histogramas de las medidas comparativas muestran que los coeficientes de variación de las 100 realizaciones de cada espaciamiento no difieren como se esperaría, lo que se podría explicar a través del impacto que tiene la correlación espacial sobre la metodología con estos datos en particular. El traspaso de la escasa correlación espacial a las realizaciones será traspasado a su vez a las diferentes mallas de muestreo. Esto quiere decir que las simulaciones tendrán un comportamiento similar en lo que respecta su poca correlación a corta distancia, que resulta de los modelos variográficos obtenidos. Este último concepto es relevante para comprender los resultados de la malla y por qué no se observan diferencias sustanciales entre ellos. Los muestreos de las tres diferentes grillas provienen de las mismas realizaciones, las cuales honran modelos de correlación espacial de corto alcance y efectos pepa alto. Por lo tanto, es posible que la falta de diferencias entre el muestreo a 3, 6 y 12 metros de espaciamiento, obedezca a la escasa diferencia en la correlación entre las muestras a esas distancias.

#### *Variabilidad versus calidad de los datos*

La correcta caracterización geoestadística entendida como la correlación espacial y características estadísticas de la distribución de valores que toma una variable regionalizada está directamente relacionada con la calidad de los datos. Como se menciona en el apartado anterior, teóricamente se espera que a mayor densidad o cantidad de información disminuya el nivel de incertidumbre en un depósito, no obstante, la falta de una correcta caracterización geoestadística puede resultar en que

no se cumpla esta premisa. El reconocimiento de los atributos geológicos que determinan la distribución de los valores que toma una variable regionalizada en el espacio, permite discriminar poblaciones de media y varianza estacionarias. La definición de dominios estacionarios permite dar cuenta de la variabilidad observada en un depósito y permite reducir la incertidumbre a través de las herramientas de inferencia estadística. En efecto, la cualidad de estacionariedad se relaciona directamente con la capacidad de predecir el comportamiento de una variable en localidades no muestreadas. En particular, la caracterización de la correlación espacial observada en un dominio nos permite establecer las distancias máximas hasta las que es posible utilizar la correlación con localidades ya muestreadas para inferir el valor en una localidad no muestreada. Este es el principio a la base de la metodología de encontrar la malla óptima. A mayor continuidad de correlación espacial, las muestras pueden estar más alejadas y aun así cumplir con una desviación dentro de un determinado rango con respecto a los valores reales de producción. Sin embargo, si el modelo de correlación espacial sugiere que la variable en estudio pierde su correlación espacial rápidamente a cortas distancias, es posible que disminuir el espaciamiento no resulte en una disminución de la incertidumbre, dependiendo del volumen sobre el cual se realiza el cálculo.

En este estudio, se ha observado que varios aspectos de la calidad de los datos pueden haber impactado en las características del modelo de correlación espacial que caracteriza las variables geometalúrgicas. Entre los más relevantes se encuentran los métodos de análisis de las pruebas geometalúrgicas, y el método de asignación de los atributos geológicos a las muestras geometalúrgicas. El primero, impacta la variabilidad intrínseca de las variables de interés, aumentando los coeficientes del efecto pepa, al aumentar la variabilidad a nivel de resultado de los análisis. Mientras que la segunda, impacta en la posibilidad de correlacionar los valores a distancias mayores a cero. Si no es posible definir dominios al interior de los cuales las variables a caracterizar vean reducida su variabilidad, el modelo variográfico resultante, sobre el cual se generan las correspondientes simulaciones, no será capaz de capturar distintos niveles de incertidumbre para mallas de muestreo a distintos espaciamientos. Si a lo anterior se suma un número restringido de muestras, como es el caso en las vetas de Bloque PAV, o la caracterización de las variables de tasa de filtrado y velocidad de sedimentación en el Bloque Norte, el modelo variográfico resultante, en el caso que sea posible obtenerlo, puede verse afectado aún más. No obstante, una conclusión relevante en este ámbito es el hecho que independiente que el Bloque PAV cuente con menor

densidad de muestras que en Bloque Norte, los alcances obtenidos son los mismos. Lo cual sugiere que la variabilidad introducida a través de las variaciones en la metodología de análisis y la falta de controles geológicos pueden resultar más relevantes que la densidad de muestras, consistente con los resultados de incertidumbre para distintos espaciamientos de muestreo.

Además de los conceptos de correlación espacial y distribución estadística antes mencionados, otro aspecto que redundante en la calidad de la caracterización geoestadística de una variable es la caracterización geológica, en términos de los atributos geológicos disponibles para realizar el análisis exploratorio de datos. La caracterización completa de las muestras, tanto en términos geológicos: litología, alteración, incluyendo asociaciones de minerales de ganga, en especial contenidos de arcillas y carbonatos, así como las asociaciones de minerales de mena y la ocurrencia de estos en stockwork, disseminado, masiva, o matriz en brecha hidrotermal, por ejemplo, tienen un impacto en la respuesta geometalúrgica, por lo que a través de atributos registrables en la base de datos tales como dureza, estado de oxidación, solubilidad y permeabilidad, es posible explorar cuales son los controles geológicos y geometalúrgicos que permitan definir dominios de estimación estacionarios, que resulten en una menor variabilidad y mayor continuidad espacial.

Más allá de que la forma en la que fueron asignados los atributos geológicos a las muestras requiere de una revisión y la proporción de veta/roca de caja en la muestra es necesaria para realizar un mejor análisis exploratorio de datos, las características geológicas determinan en un porcentaje importante la respuesta geometalúrgica. La aseveración anterior es reforzada por los resultados del análisis exploratorio de datos donde es posible observar que como era de esperar, que la variable geometalúrgica es un control de las distribuciones de las variables de recuperación y consumo de ácido. Esta variable está vinculada a la ocurrencia de ciertos minerales de ganga y mena. Contar con el detalle de la distribución de estas especies mineralógicas que impactan el procesamiento de los materiales en la planta, sería relevante para mejorar la incertidumbre en la estimación de las variables geometalúrgicas. Incluso poder utilizar la ubicación espacial de las muestras del análisis mineralógico TESCAN, FRX y conteo modal realizado facilitaría la caracterización de posibles variaciones que ocurren en el depósito.

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

### *Conclusiones*

El desarrollo de esta investigación permitió constatar el impacto de la información geológica y metalúrgica en la incertidumbre con la que se infieren ubicaciones no muestreadas a partir de las muestras cercanas. En particular, fue posible evidenciar el impacto del muestreo, protocolos de análisis y caracterización geológica y geometalúrgica en la variabilidad de los datos, y como esta, impacta en la continuidad espacial. Así como también, el impacto de la calidad del modelo de correlación espacial con la determinación de una malla óptima de muestreo que permita reducir la incertidumbre con la que se estiman las recuperaciones metalúrgicas, consumo de cianuro de sodio y parámetros de procesamiento como tasa de filtrado y velocidad de sedimentación. Las decisiones con respecto a la toma de muestreo, procedimientos de análisis y asignación de los atributos geológicos, agregan variabilidad artificial a la variabilidad intrínseca de las variables de interés.

En relación con la variabilidad introducida al momento del muestreo y análisis, la información disponible no permite descartar que un mismo material sometido a protocolos de análisis distintos, pueda generar diferentes resultados metalúrgicos. Por lo que es posible que la variedad de protocolos de análisis geometalúrgicos influya en la mayor variabilidad observada en este estudio. Es necesario realizar un estudio de aseguramiento y control de calidad que permita determinar el impacto de distintos protocolos de análisis en los resultados de las pruebas geometalúrgicas, y mantener un registro del procedimiento utilizado en cada prueba. En línea con las prácticas estándares mínimas de QAQC, todos los valores que fueron derivados matemáticamente deberían ser removidos de la base de datos.

Por otra parte, el procedimiento de asignación de los atributos geológicos también tiene un impacto en la variabilidad observada. La definición de dominios estacionarios a partir de la correcta caracterización geológica en base a los atributos geológicos asignados a una muestra permite explicar la variabilidad observada en un depósito. Al interior de los dominios definidos, generalmente se observa una reducción de la variabilidad y un aumento de la continuidad espacial, lo cual se puede traducir en una reducción de la incertidumbre en la estimación de ubicaciones no muestreadas, si el resto de las variables que impactan la reconciliación se mantienen constantes. No obstante, dada la forma en la que fueron asignados los atributos geológicos a las muestras

geometalúrgicas, no es posible asegurar que las diferencias en poblaciones o disposición espacial obedece efectivamente a cambios de litología o alteración.

La inclusión de la proporción veta/roca de caja y mayor detalle de las asociaciones mineralógicas de mena y ganga, puede resultar en la definición de poblaciones estadísticamente más homogéneas y de mayor continuidad espacial en función de los tipos de mineralización, litología, alteración o alguna combinación de estos atributos. La definición de dominios de estimación que resulten en distribuciones estadísticas de las variables geometalúrgicas con una menor dispersión tiene el potencial de resultar en modelos de correlación espacial de mayor continuidad, lo cual reducirá la incertidumbre incluso en el espaciamiento actual.

Los resultados de la aplicación de la metodología para el cálculo de malla óptima han dejado en evidencia que la densidad y calidad de la información generan un impacto en la incertidumbre de ubicaciones a estimar. En efecto, la calidad de la información en etapas de análisis y muestreo influye en la variabilidad a distancias menores al menor espaciamiento y por ende resultan en un valor mayor para el efecto pepa. A esta mayor variabilidad a distancias cercanas a cero, se suma la variabilidad a distancias mayores o igual al espaciamiento actual, que se traduce en alcances menores a los cuales se pierde continuidad, producto de la ausencia de controles geológicos y metalúrgicos que resulten en dominios de estimación con menor dispersión. Ambos efectos, resultan en modelos de correlación espacial que, a volúmenes de extracción mensuales, no permiten concluir que reducir el espaciamiento resultará en una reducción de la incertidumbre. En contraposición, es esperable que mejoras en la calidad de los datos en línea con las indicadas anteriormente si tengan un impacto en la reducción de la incertidumbre. Es esperable, que una mejor caracterización de las distribuciones de entrada al proceso de simulación, en términos de continuidad y disminución de la varianza de las cuales se extraen los valores simulados, se traduzca en medidas de incertidumbre menores sin que sea necesario optar por un muestro más denso.

### *Trabajos futuros*

El impacto de los distintos protocolos de análisis geometalúrgico no es parte de este estudio, sin embargo, resulta fundamental establecer qué porcentaje de la variabilidad de corto alcance observada en la distribución de las variables geometalúrgicas obedece a esta causa.

Con el fin de mejorar la representatividad del depósito en las muestras, se sugiere contar con una caracterización mineralógica de cada muestra geometalúrgica asociada a la coordenada espacial de la muestra, con el objetivo de caracterizar las muestras desde el punto mineralógico. De la misma forma, la asignación con los tipos litológicos y de alteración debería realizarse en función de la proporción mayoritaria, junto con una cuantificación de la proporción de veta/roca de caja o alteración. Una caracterización geológica más robusta debería mejorar la capacidad de inferencia en posiciones no muestreadas a partir de la zonación en dominios no estacionarios y una mejor caracterización del comportamiento de la continuidad espacial.

SOLO USO ACADÉMICO

## REFERENCIAS

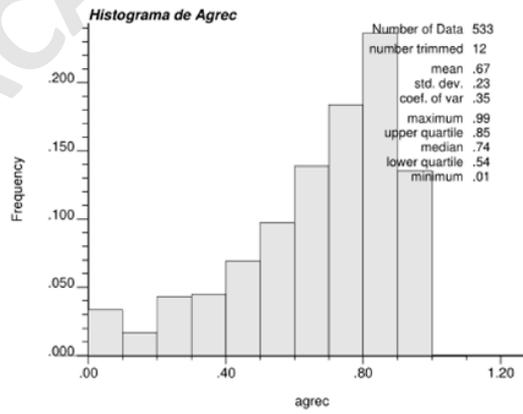
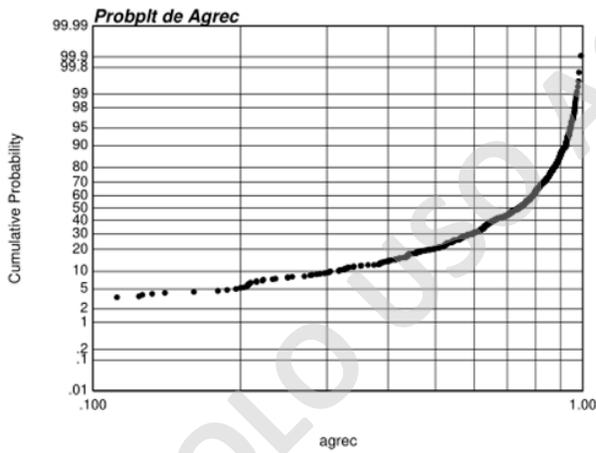
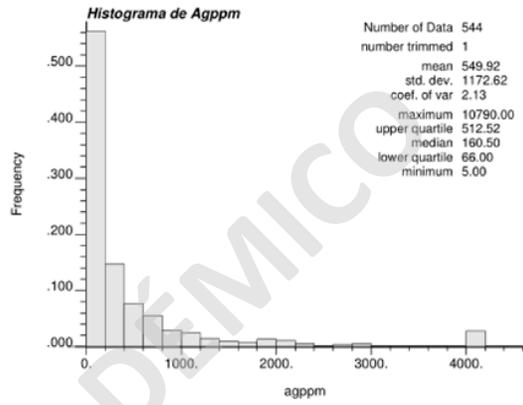
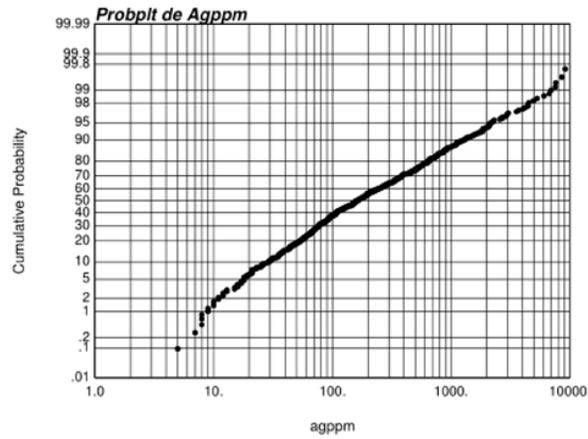
- Boric, R., Díaz, F. y Maksaev, V. (1990). Geología y yacimientos metalíferos de la Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín, No. 40, 246 p., 2 mapas escala 1:500.000.
- Contador, A., (2017). Procedimiento de trabajo. Pruebas Laboratorio Metalurgia. Yamana Gold, El Peñón.
- Coombes, J., (2008). The art and science of resource estimation. Coombes Capability, Subiaco.
- Deutsch, C. V. (2005). Practical unfolding for geostatistical modeling of vein type and complex tabular mineral deposits. In *32nd International Symposium of the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM)*.
- Dominy, S. C., O'Connor, L., & Xie, Y. (2016, June). Sampling and testwork protocol development for geometallurgical characterisation of a sheeted vein gold deposit. In *Proceedings of the International Geometallurgy Conference, Perth, Australia* (pp. 15-16).
- Donoso, F. J., (2012). Caracterización petrográfica y mineralógica de la veta Bonanza-Aleste y sus implicancias geometalúrgicas, Mina El Peñón, Región de Antofagasta.
- Hedley, N., y Tabachnick, H., (1958). Chemistry of cyanidation: American Cyanamid Tech. Bull. 23.
- Isaaks, E. H. y Srivastava, R. M., (1989). An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press.
- Journel, A.G y Kyriakidis, C.J., (2004). Evaluation of Mineral Reserves. Oxford University Press, New York. 232p.
- Krutzelmann, H., Lecuyer, N. y Moore, C.M. (2018). Technical report on the El Peñón mine, Antofagasta Region (II), Chile.
- Leuangthong, O., & Deutsch, C. V. (2000). Stepwise conditional transformation for simplified cosimulation of reservoir properties. *CCG Paper, 106*
- Leuangthong, O. (2003). Stepwise conditional transformation for multivariate geostatistical simulation (NQ88013 Ph. D.), University of Alberta (Canada). *Ann Arbor. ProQuest Dissertations & Theses Full Text database*.
- Leuangthong, O. and Deutsch, C. V. (2003). Stepwise conditional transformation for simulation of multiple variables. *Mathematical Geology*, Vol 35, N° 2.
- Leuangthong, O., McLennan J.A. and Deutsch, C. V. (2003). Minimum acceptance criteria for geostatistical realizations. Department of Civil & Environmental Engineering. University of Alberta.
- Matheron, G., 1979. Recherche de simplification dans un problema de cokrigeage. Centre de Geostatistique, Fontainebleau.

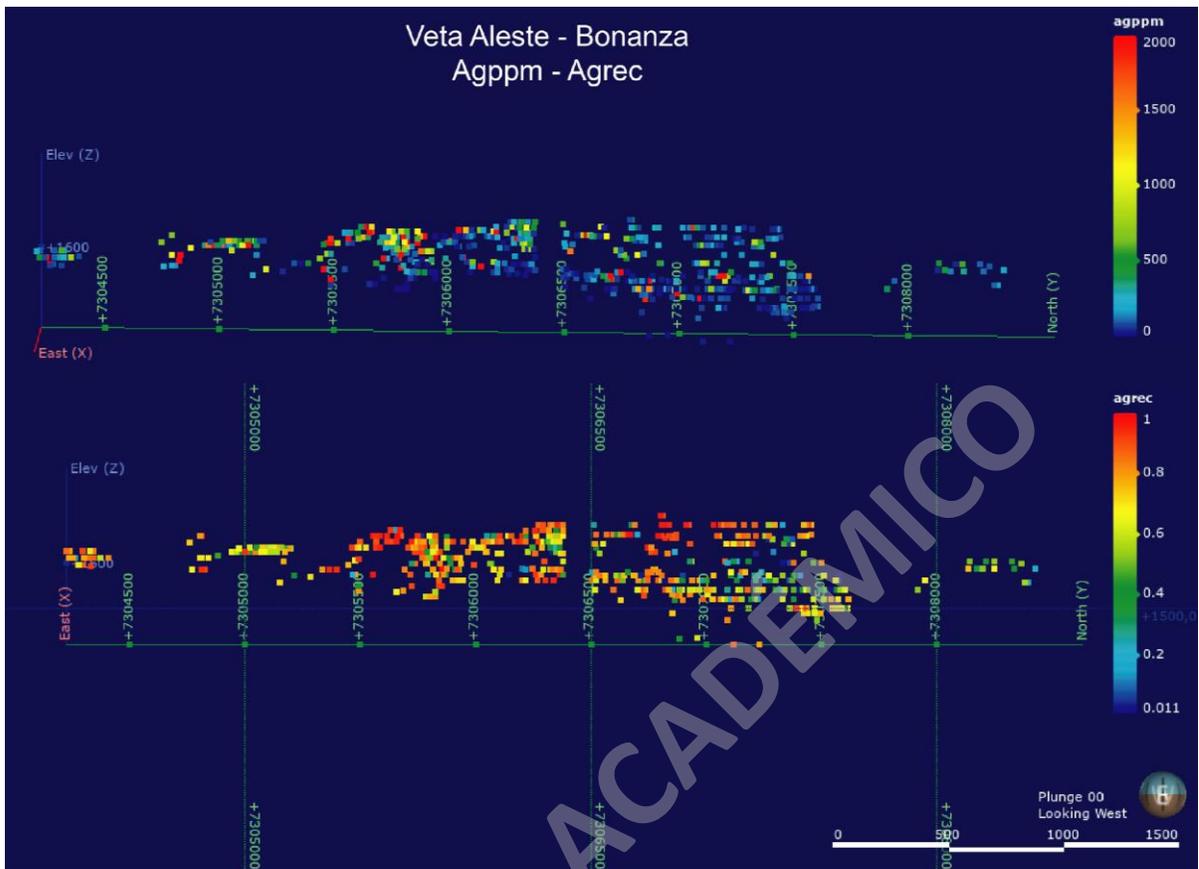
- Marinovic, N., Smoje, I., Maksaev, V., Hervé, M., Mpodozis, C., (1995). Hoja Aguas Blancas, Región de Antofagasta, Carta Geológica de Chile N° 70, escala 1:250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- Rossi, M.E., y Deutsch, C.V., (2013). Mineral resource estimation. Springer Science & Business Media.
- Órdenes J. (2014). Influencia de la mineralogía de la veta Bonanza en el proceso hidrometalúrgico de lixiviación de Au y Ag, Yacimiento El Peñón, Chile.
- Ortiz J. y Deutsch C. V. (2002). Calculation of uncertainty in the variogram. *Mathematical Geology*, Vol 34, N° 2.
- Warren P., (2005). Geology, geochemistry, and génesis of the El Peñon epithermal Au-Ag deposit, northern Chile: Characteristics of a bonanza-grade deposit and techniques for exploration. Geology department, University of Auckland.
- Warren, I., Zuluaga, J. I., Robbins, C. H., Wulftange, W. H., & Simmons, S. F. (2005). Geology and geochemistry of epithermal Au-Ag mineralization in the El Peñón district, northern Chile.
- Wilde, B. J., & Deutsch, C. V. (2010). Methodology for Calculating Uncertainty versus Data Spacing. *CCG Paper*, 108.
- Yamana Gold, (2017). Pruebas Laboratorio Metalurgia, Guía de procedimiento de trabajo.
- Zuluaga J., (2004). Geología y Mineralización del Distrito El Peñón, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta.

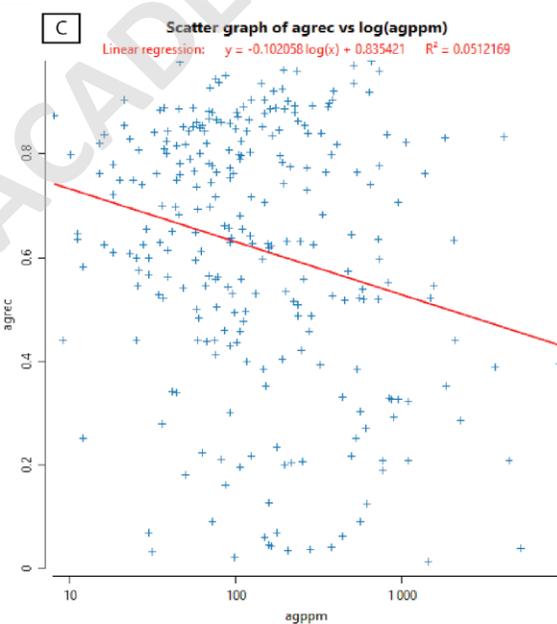
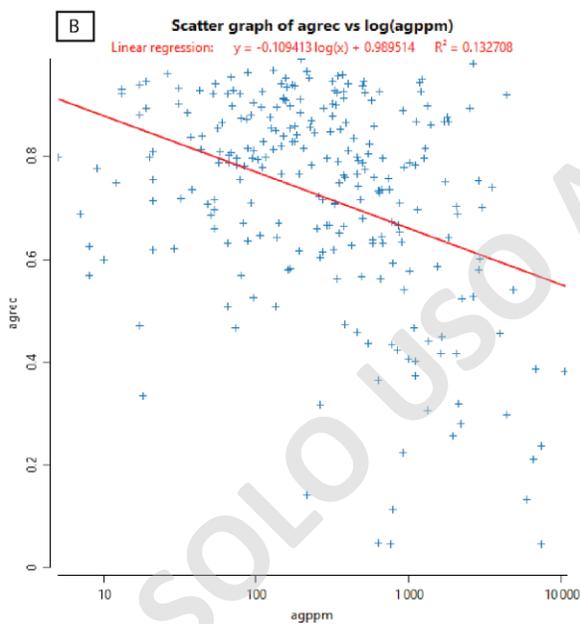
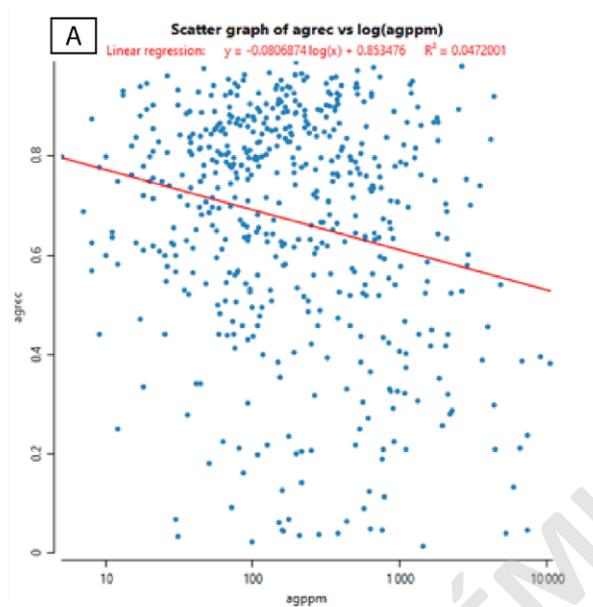
# ANEXO A

Bloque Norte.

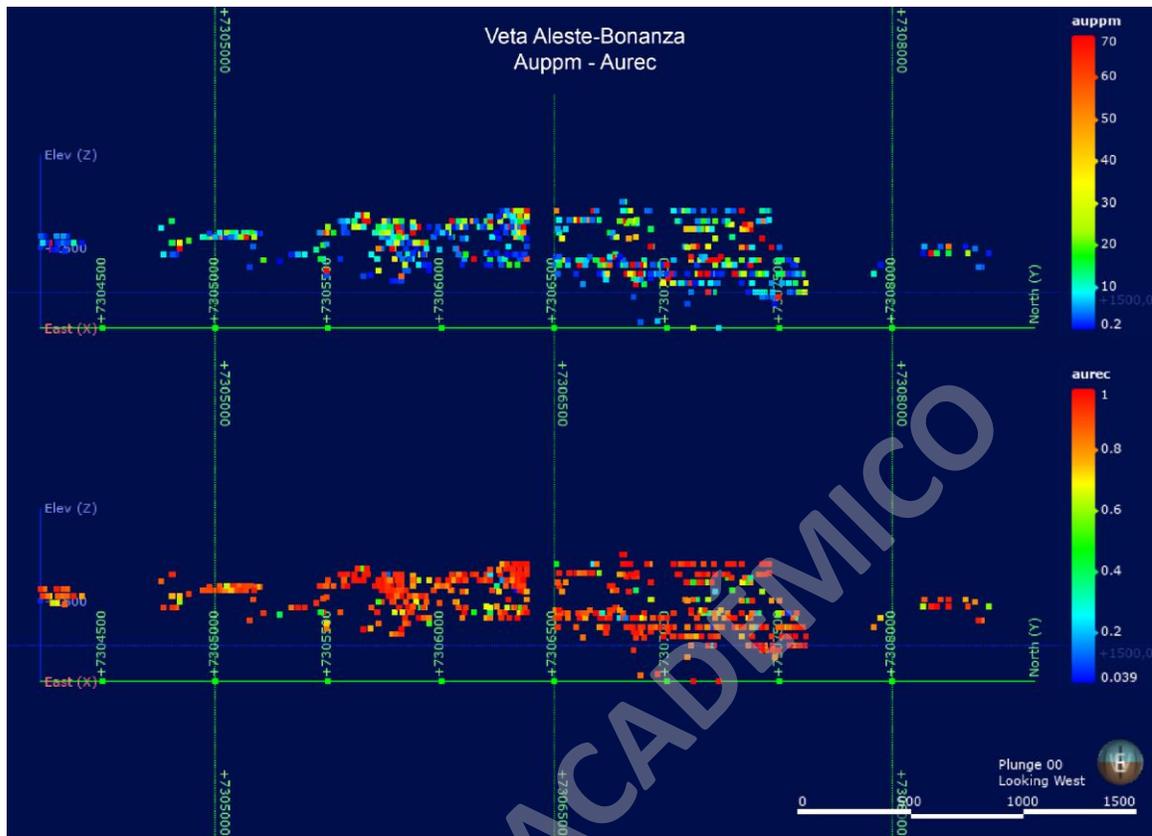
Recuperación de plata (Agrec)

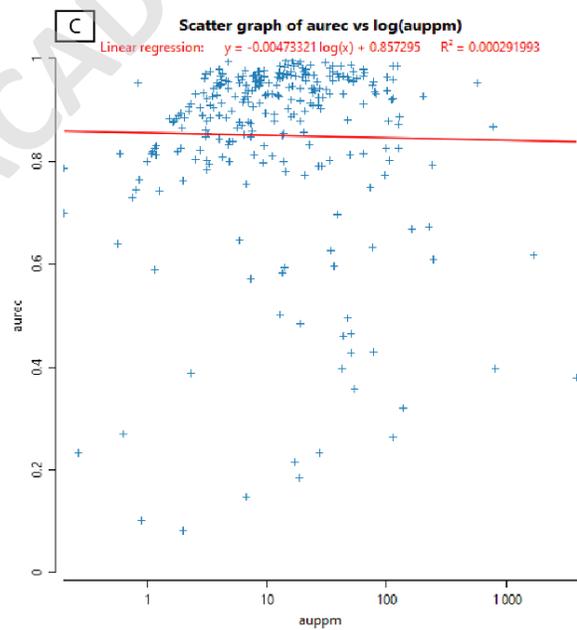
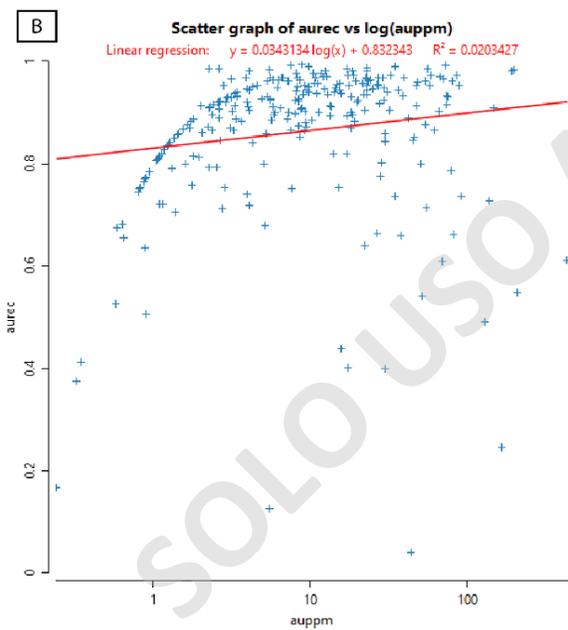
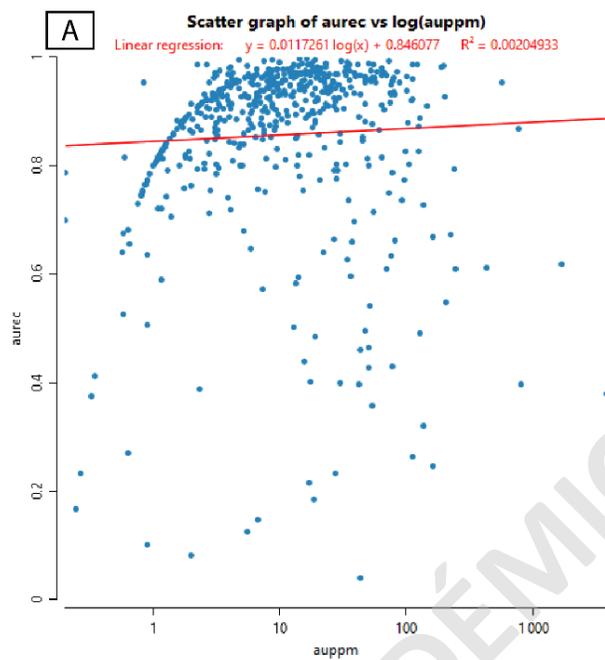


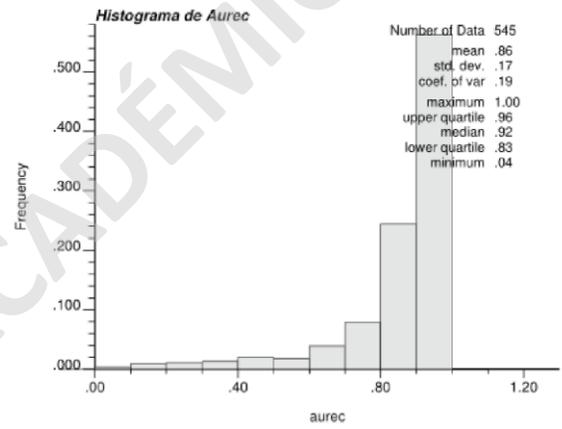
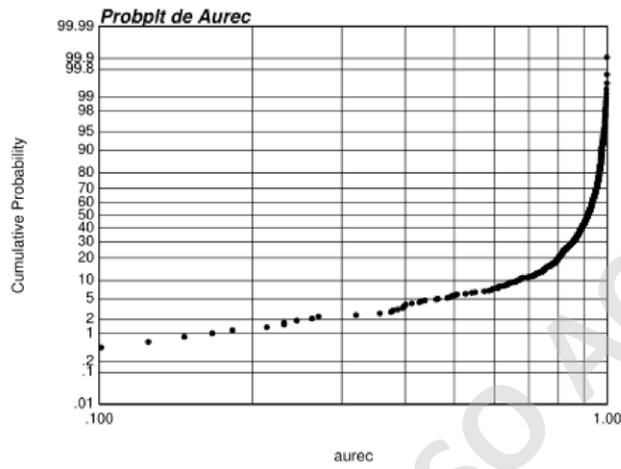
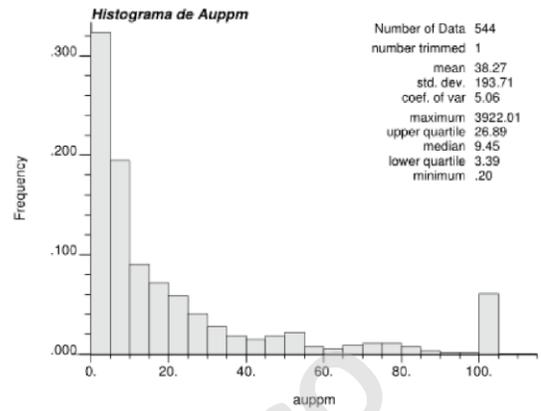
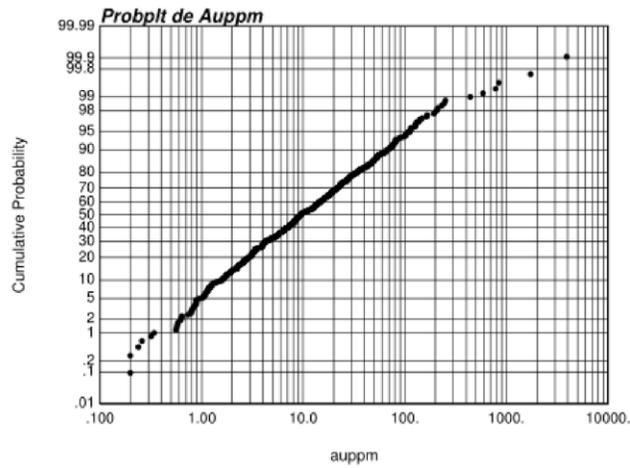




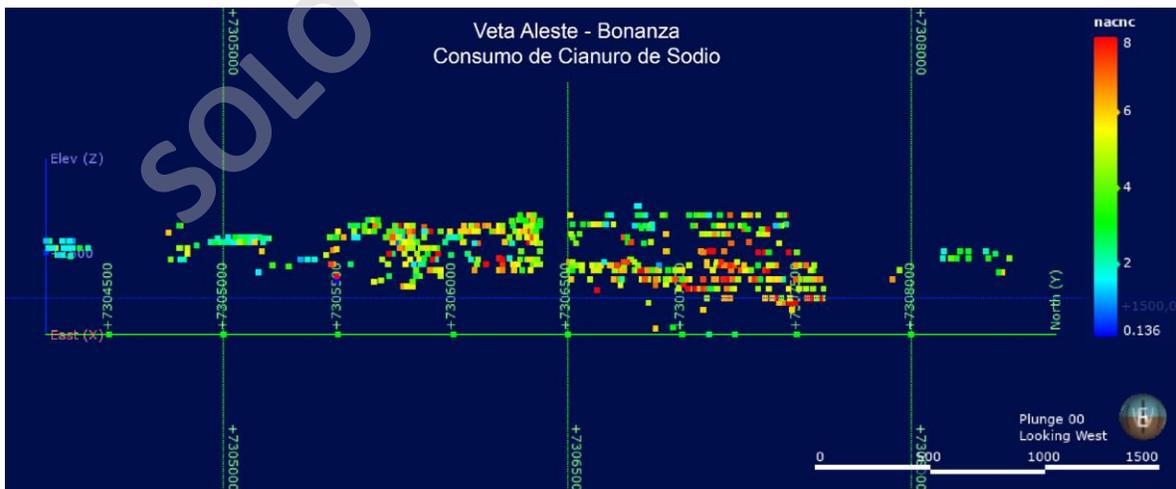
*Recuperación de oro (Aurec)*

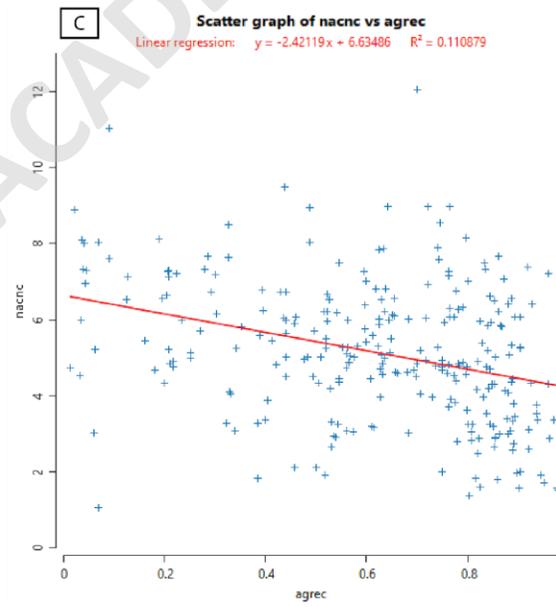
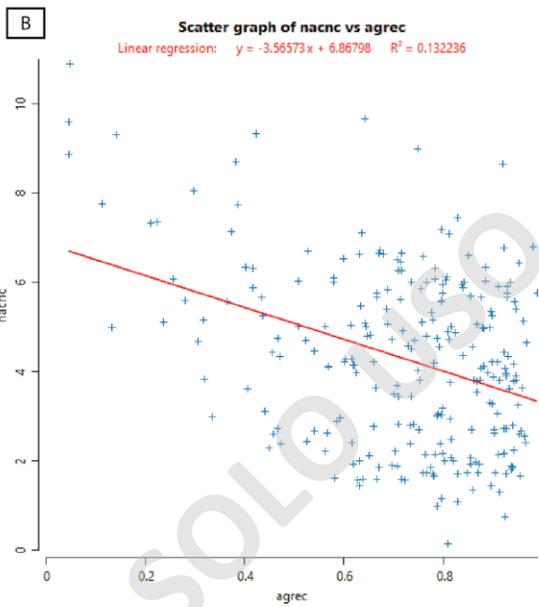
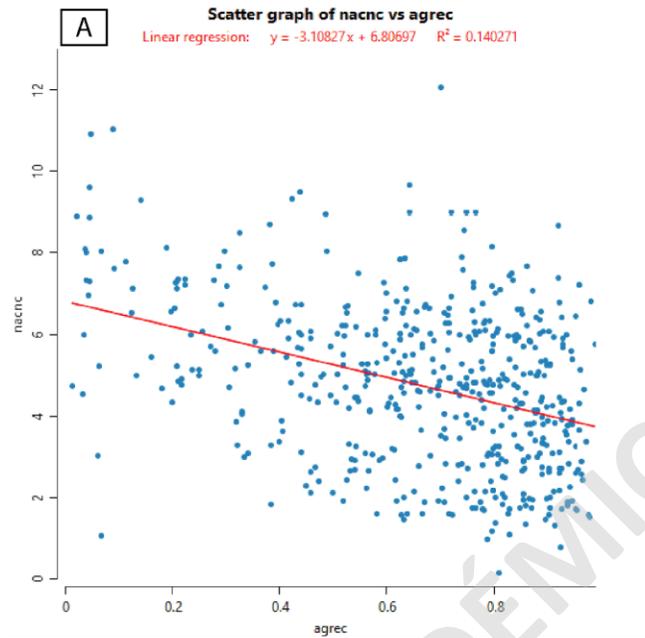


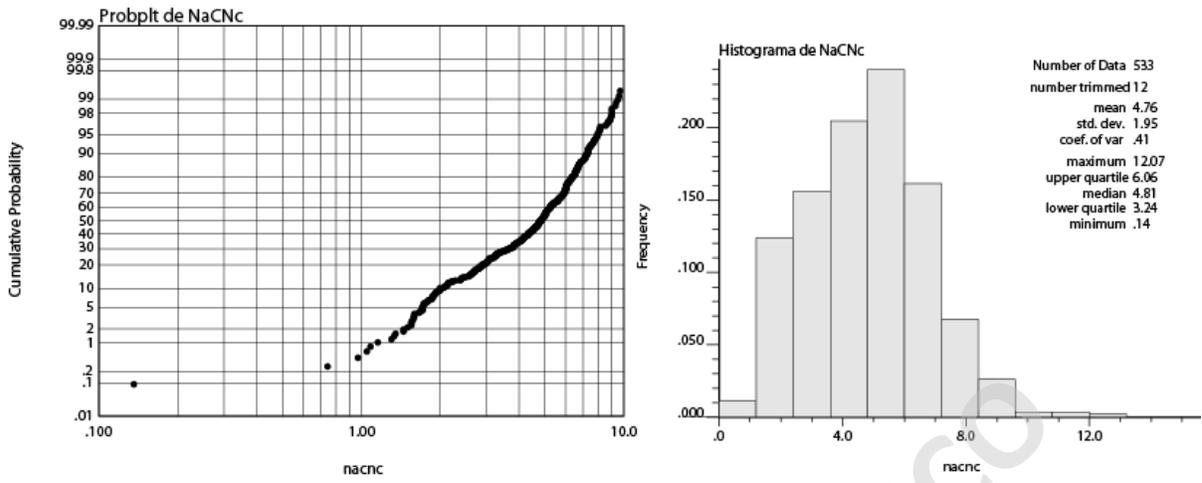




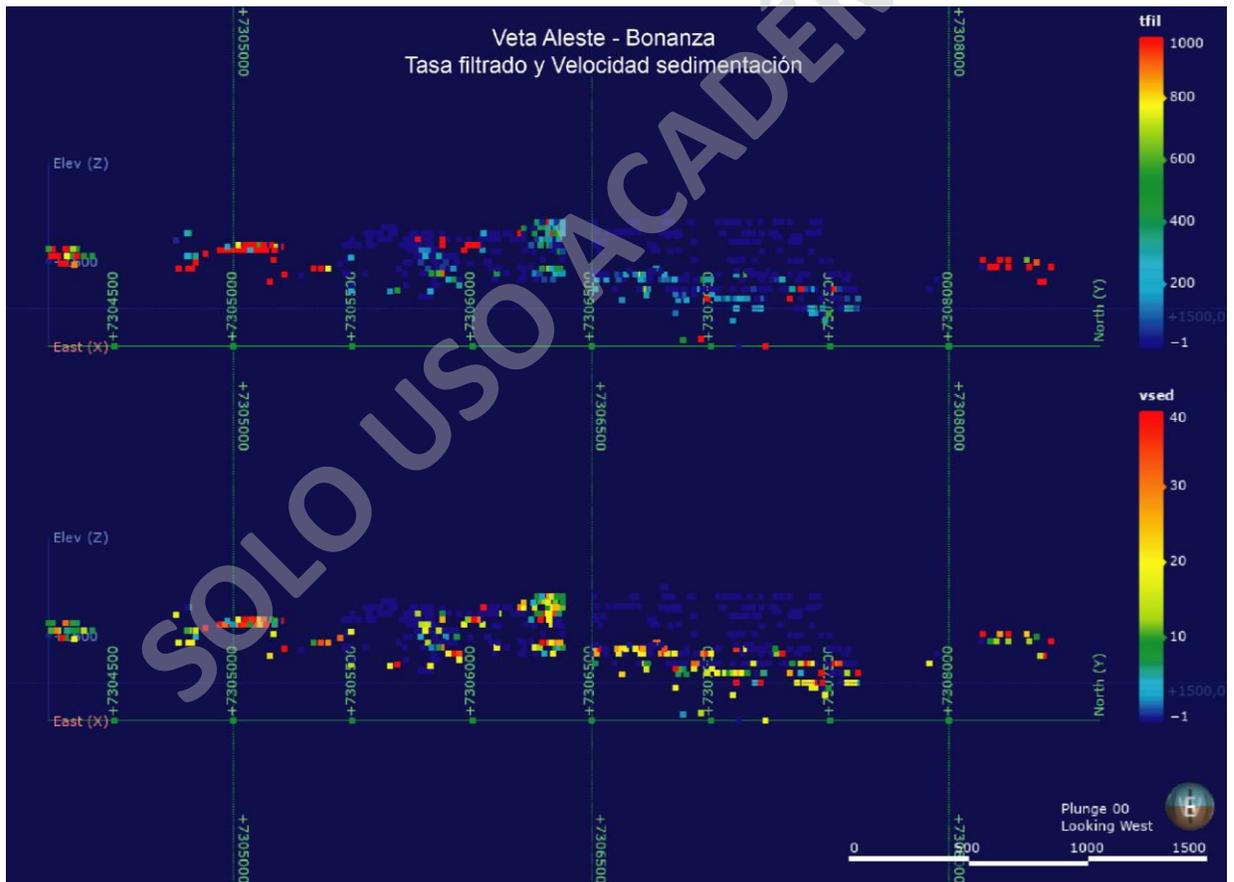
Consumo de cianuro de sodio (cNaCN)

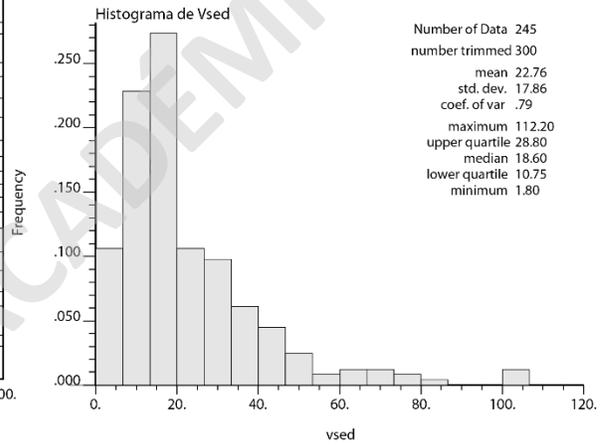
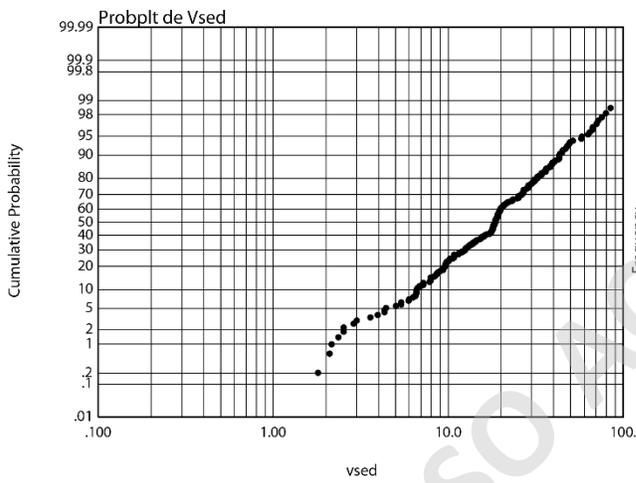
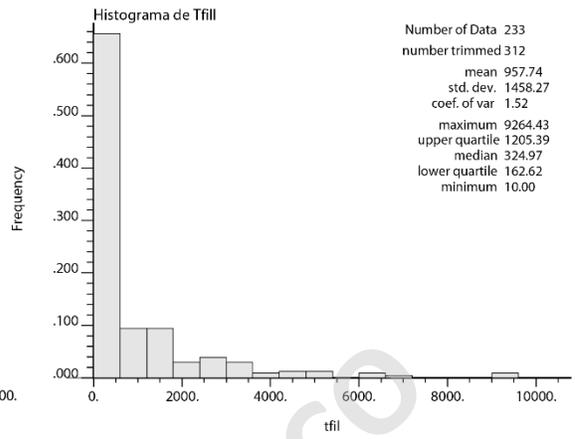
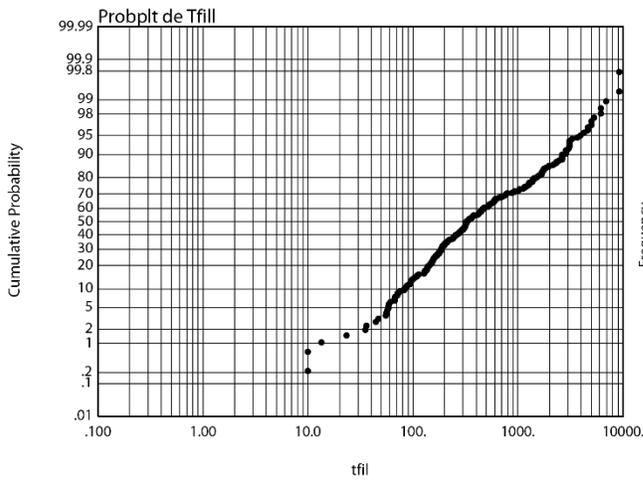




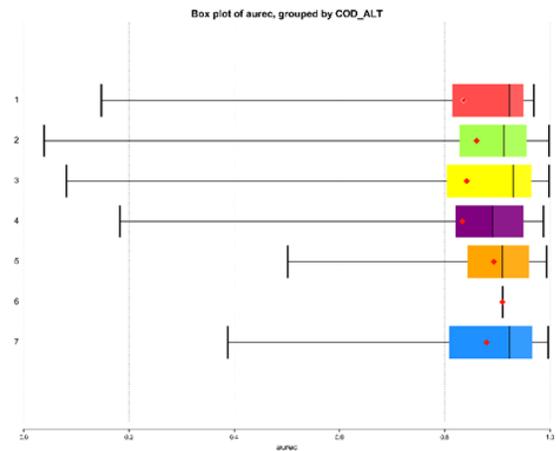
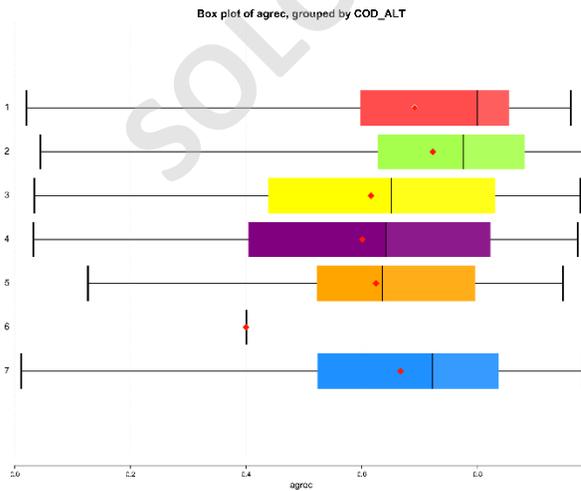


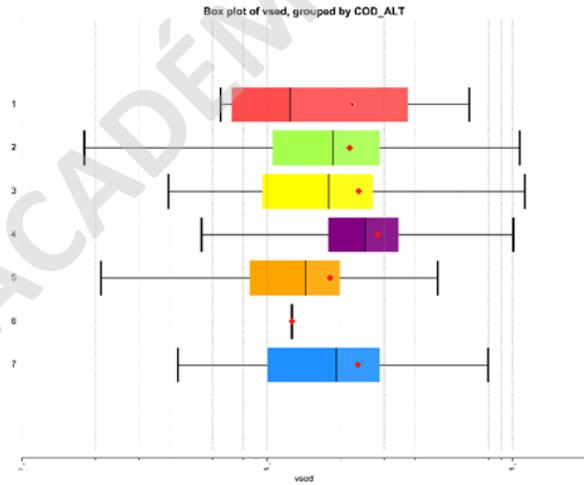
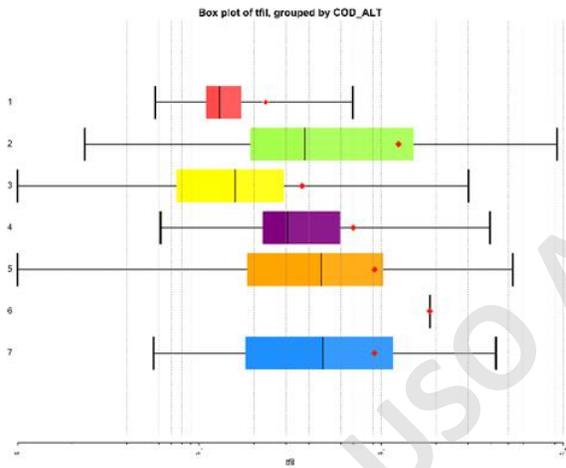
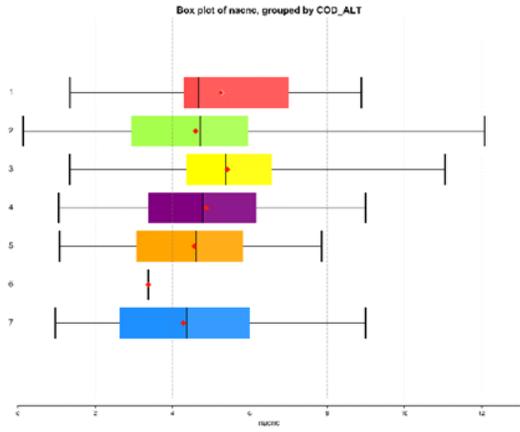
*Tasa de filtrado y velocidad de sedimentación (Tfil y vsed)*





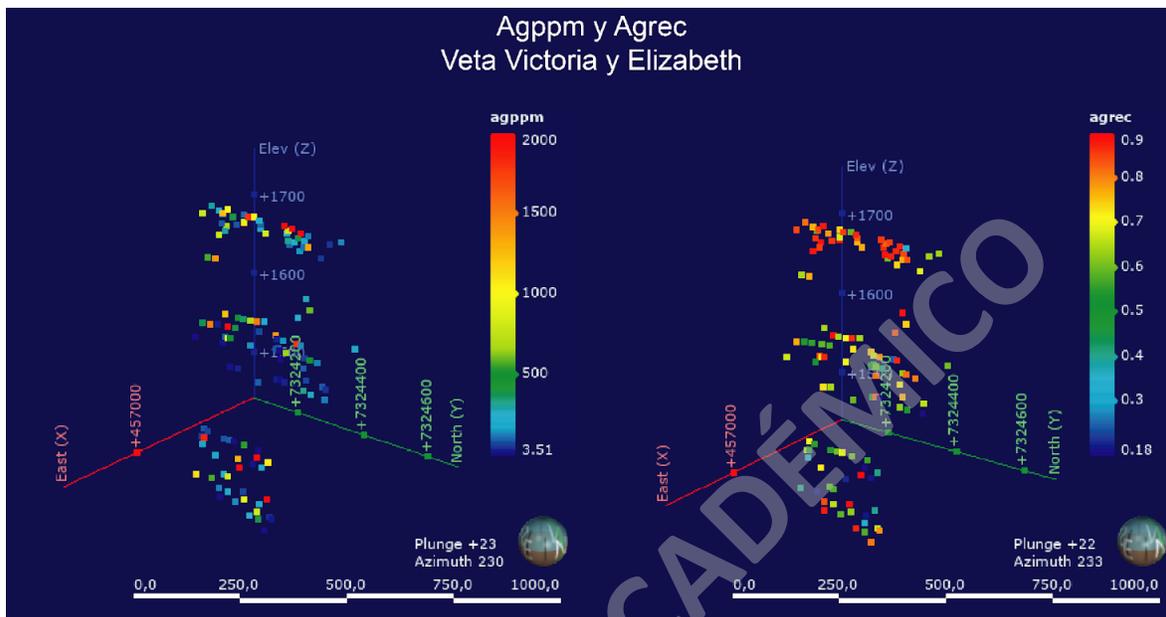
## Alteración

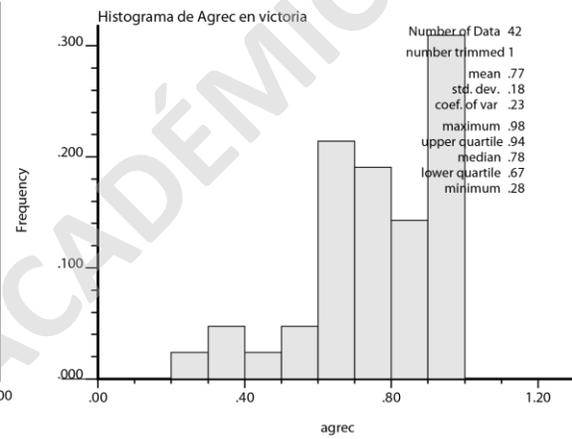
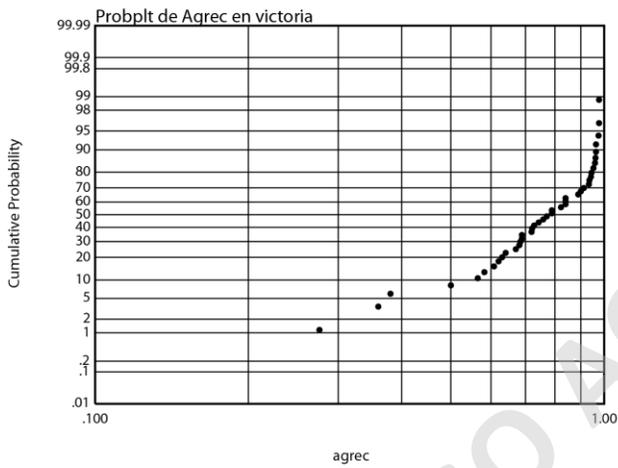
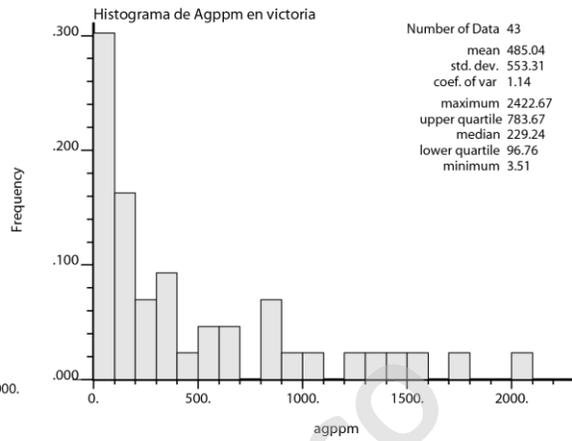
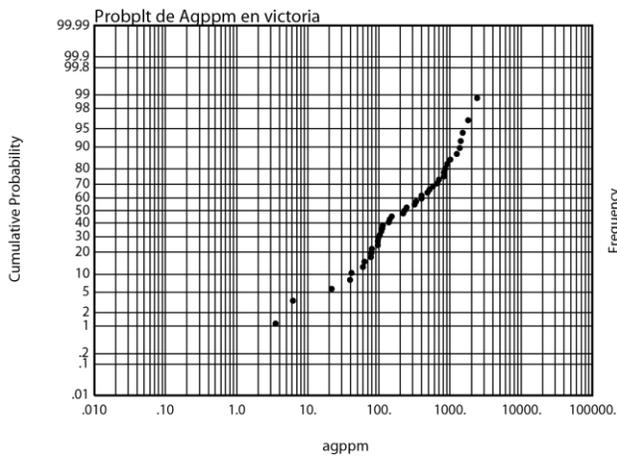


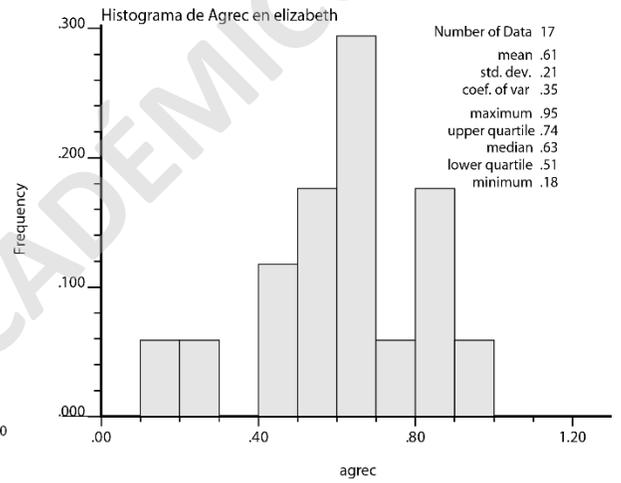
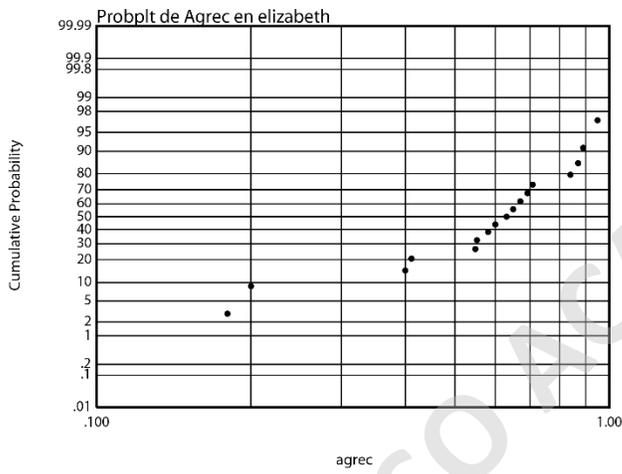
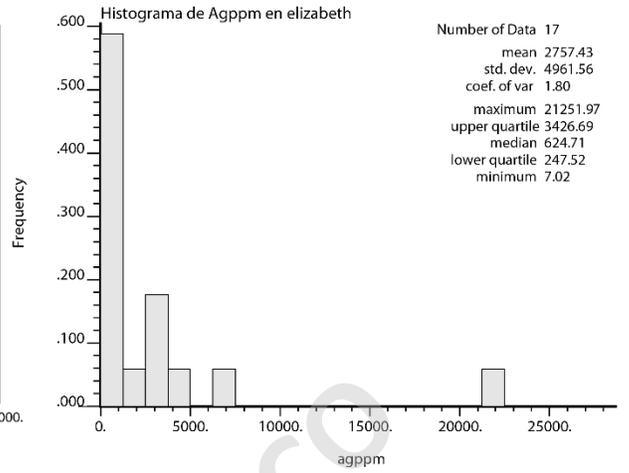
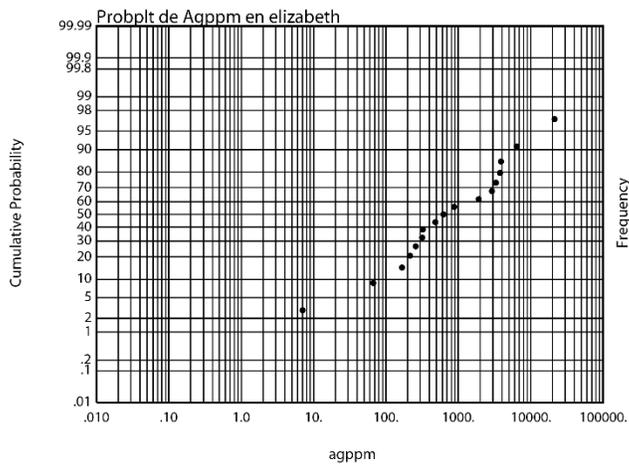


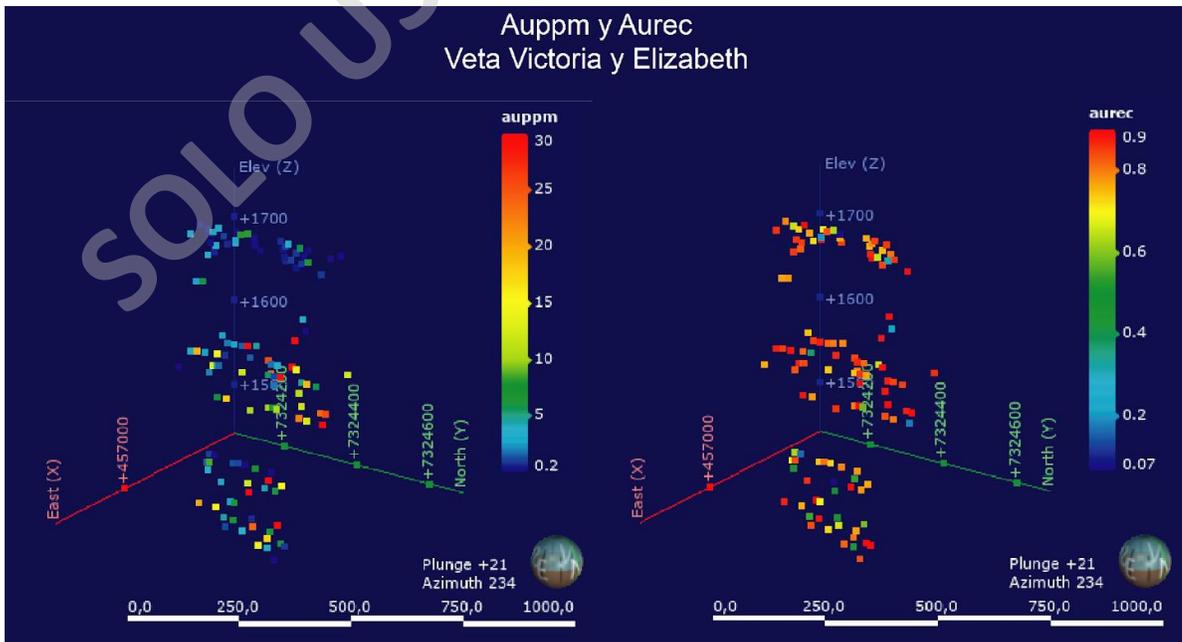
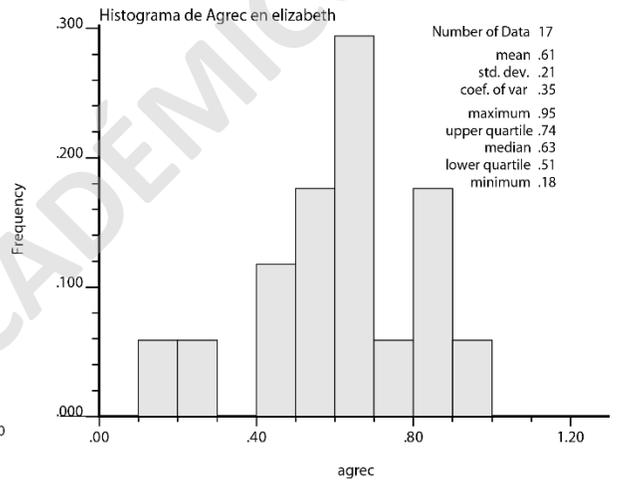
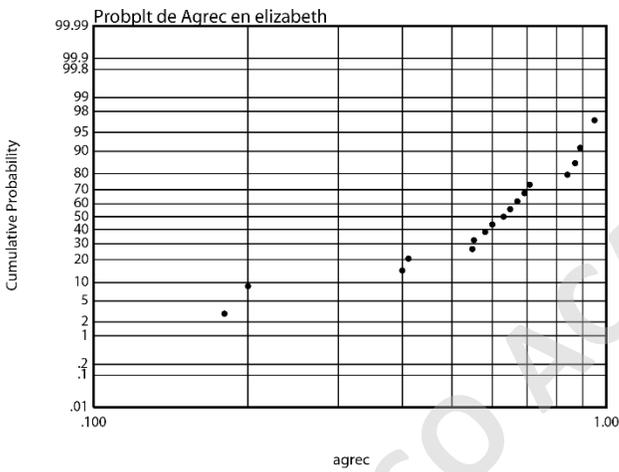
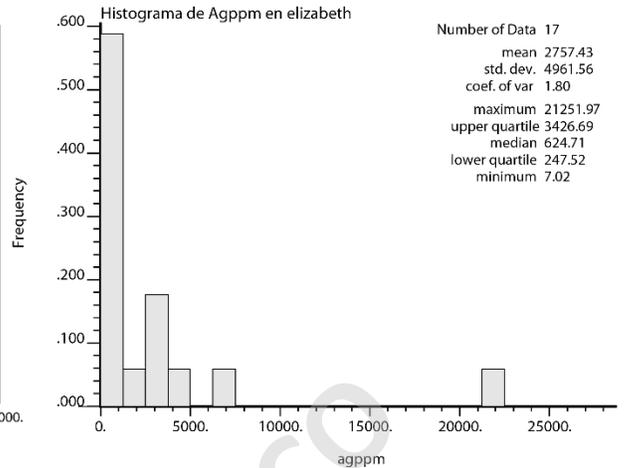
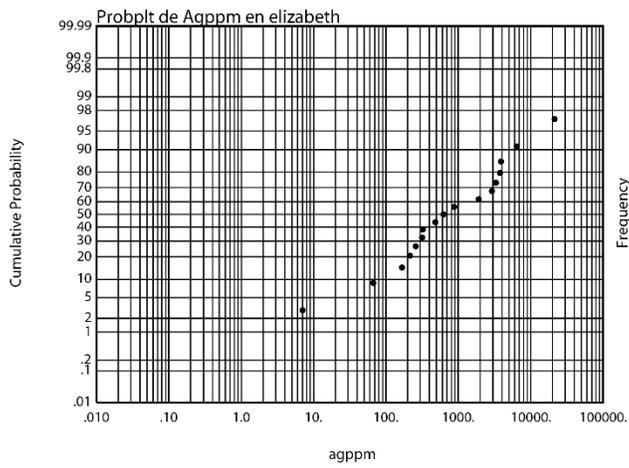
*Bloque Pampa Augusta Victoria.*

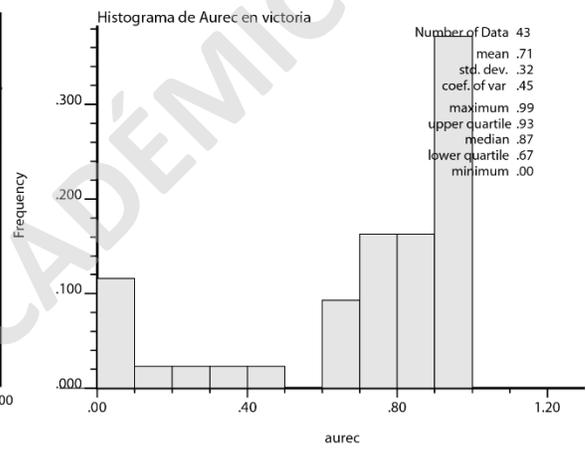
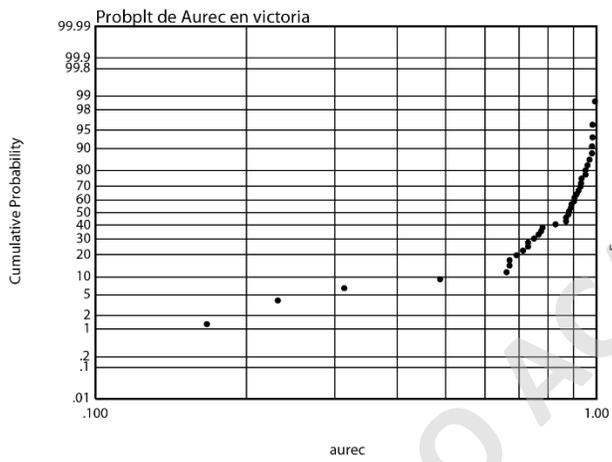
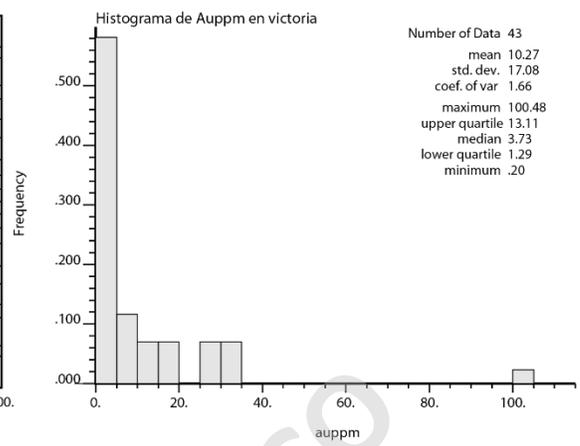
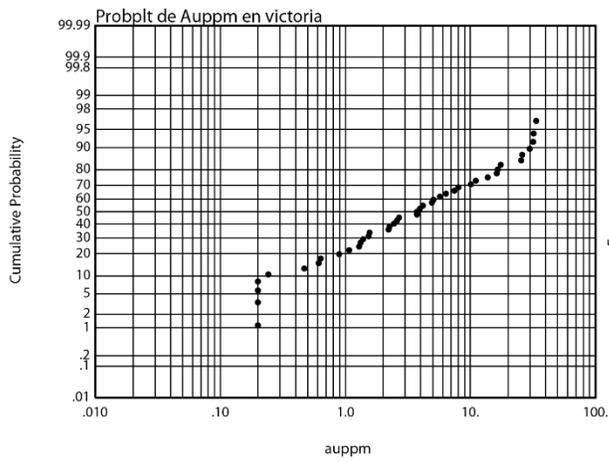
*Recuperación de Ag (Agrec)*

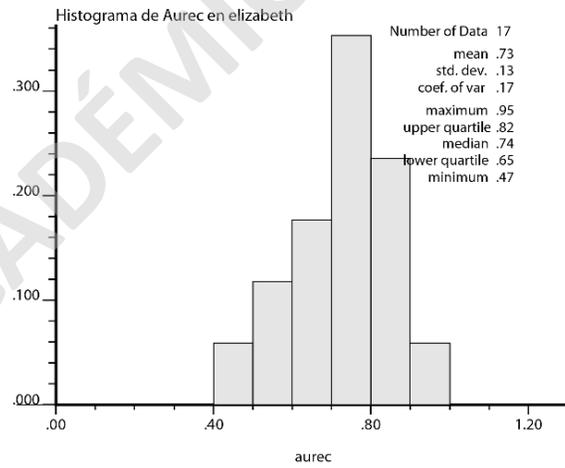
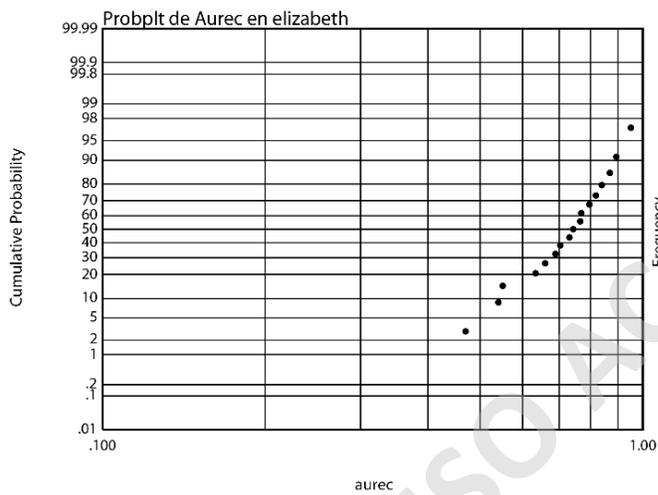
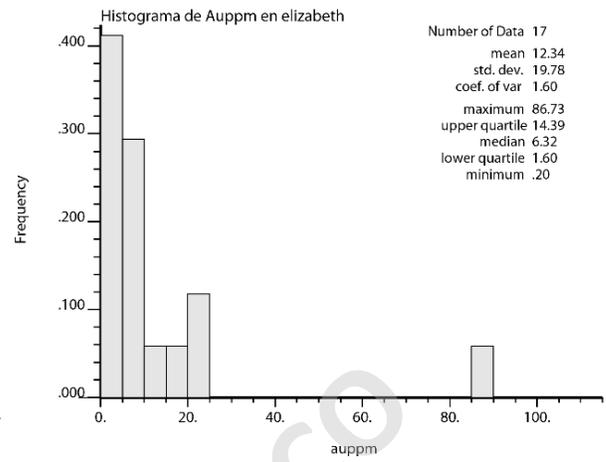
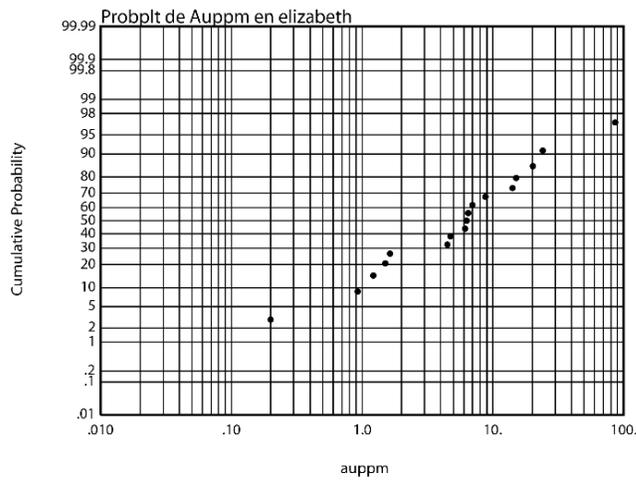




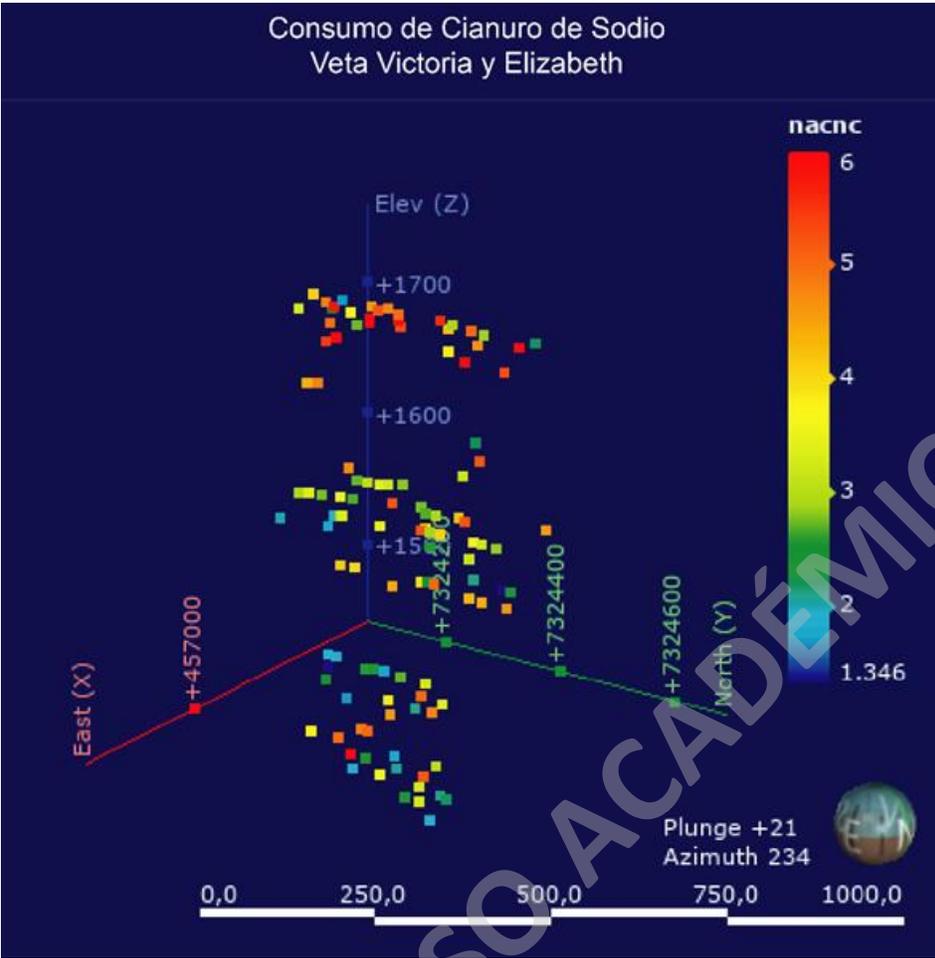


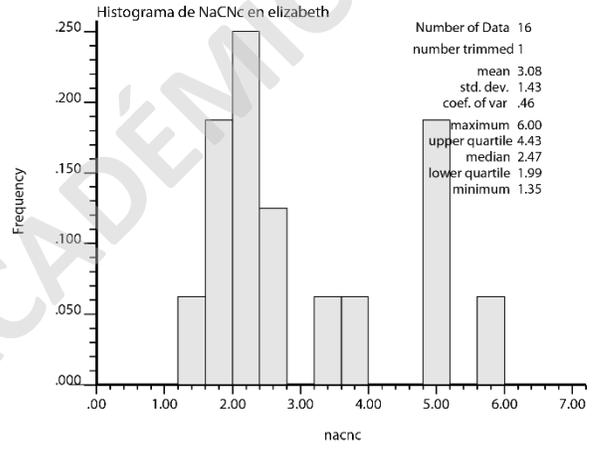
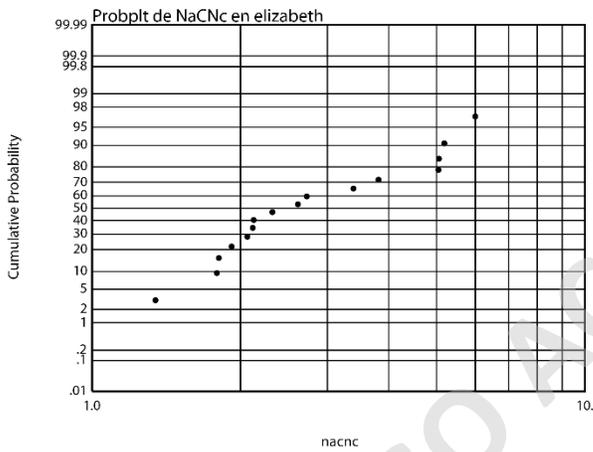
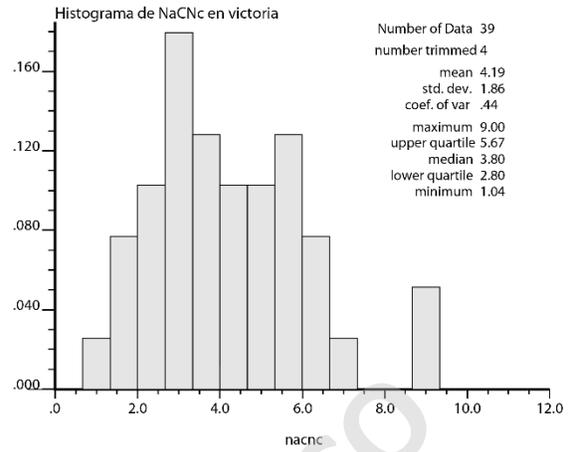
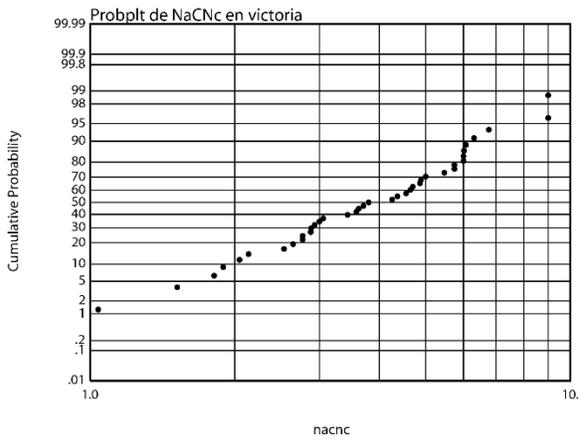






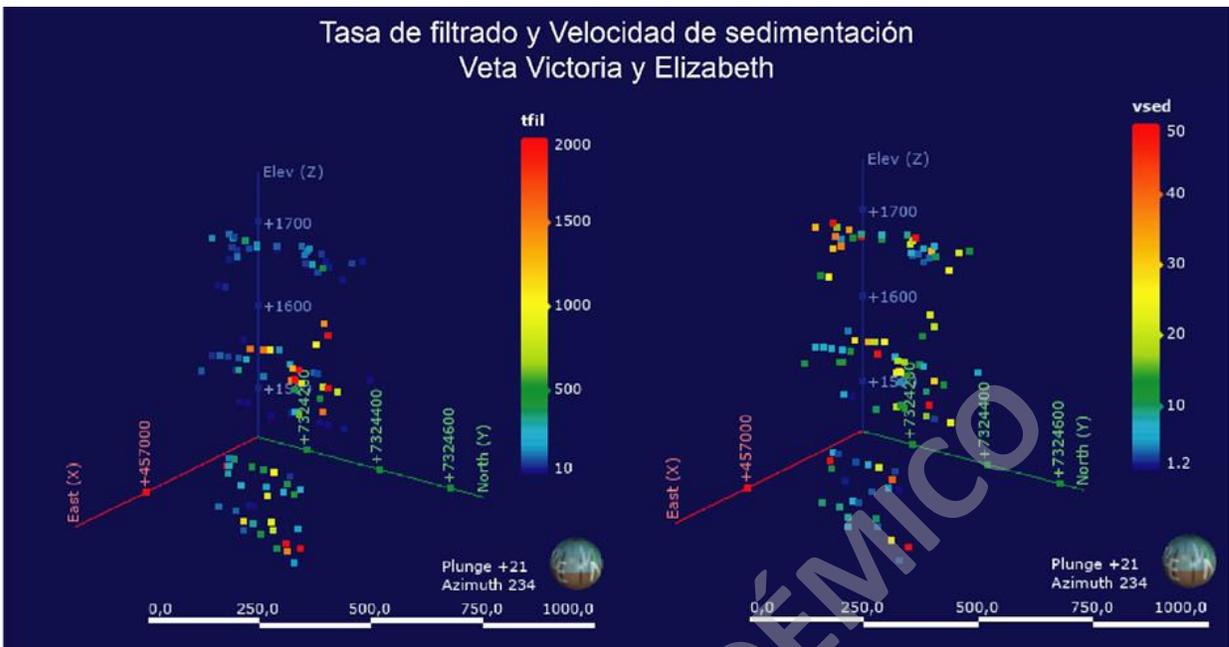
*Consumo de Cianuro de Sodio (cNaCN)*



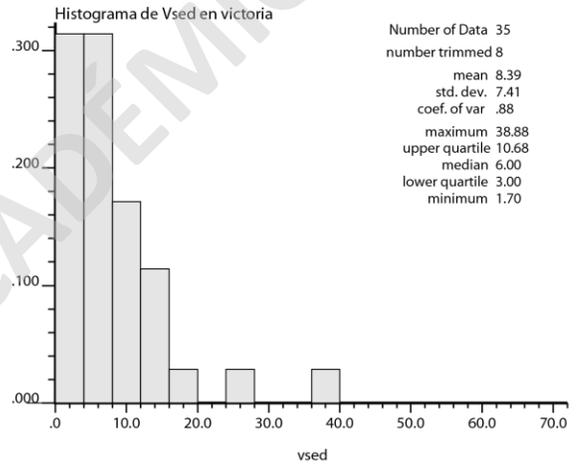
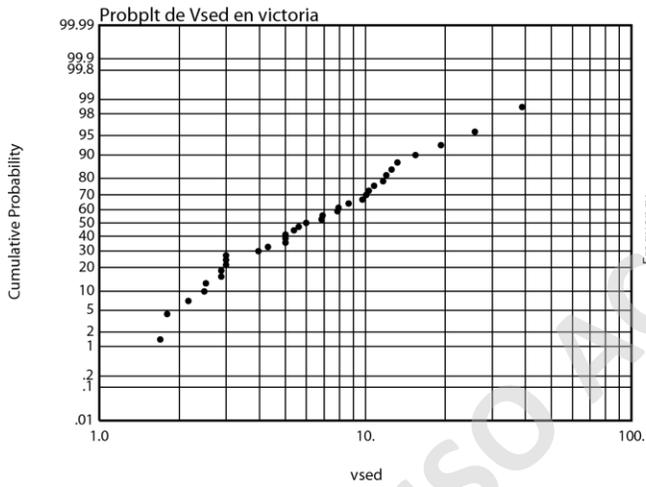
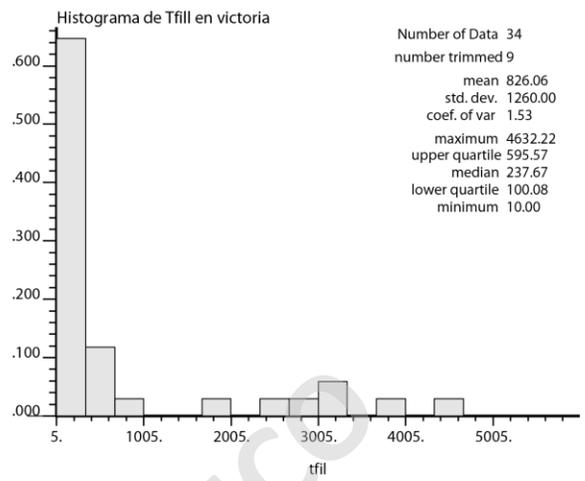
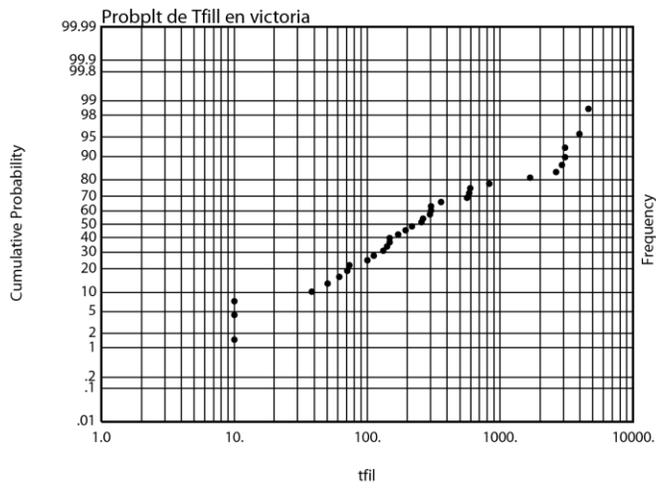


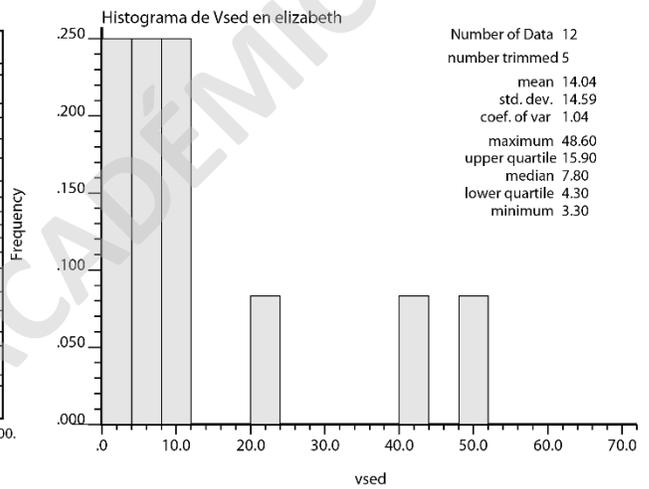
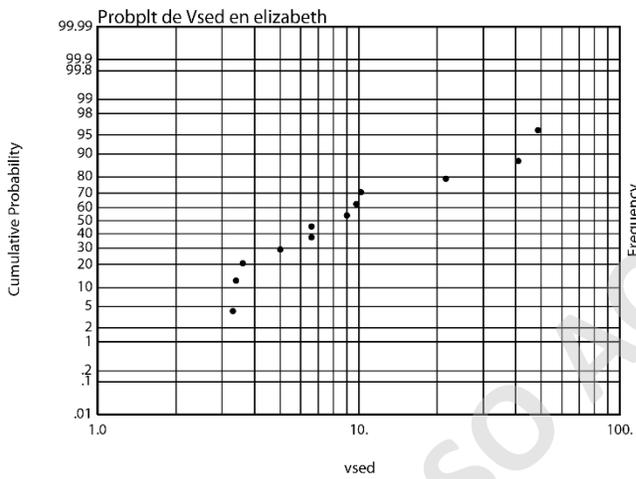
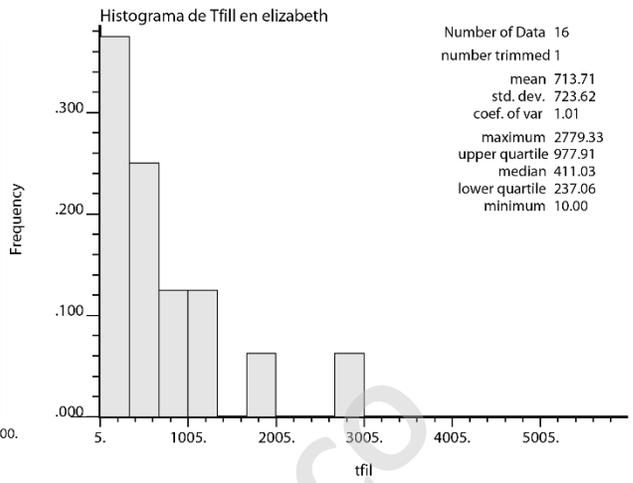
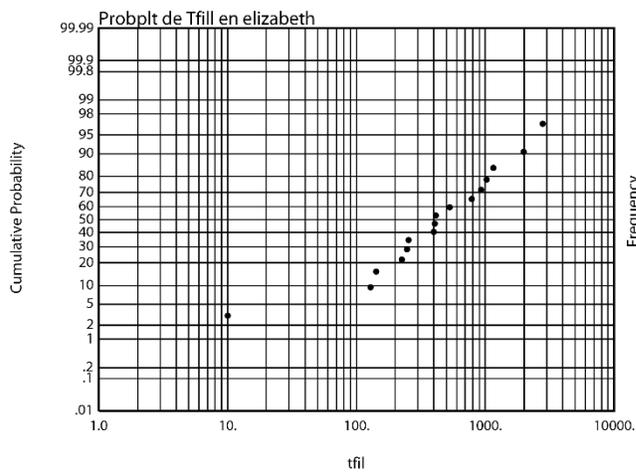
*Tasa de filtrado y Velocidad de sedimentación (Tfil y Vsed)*

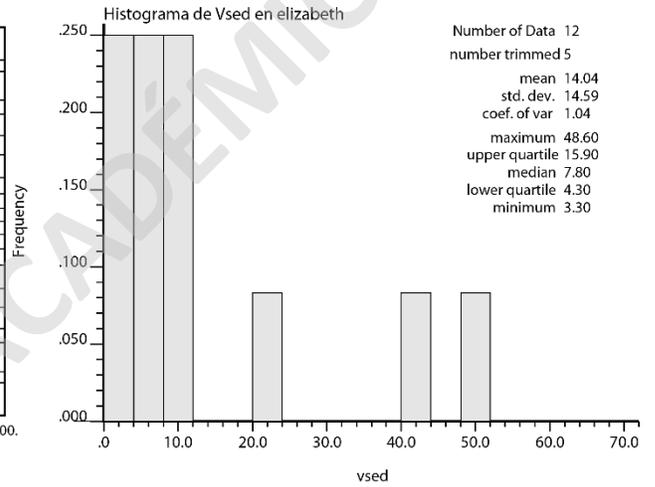
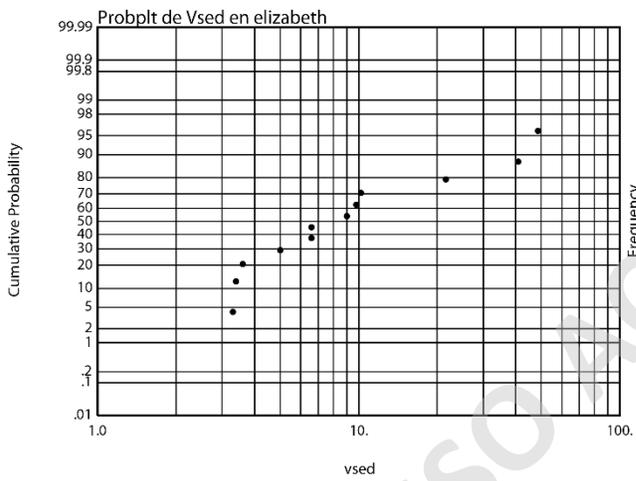
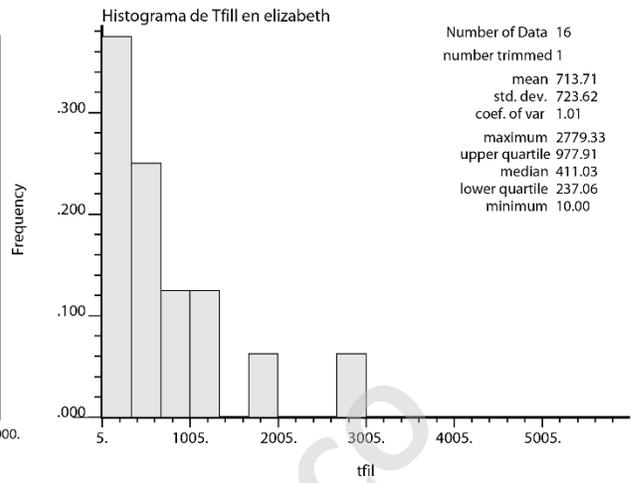
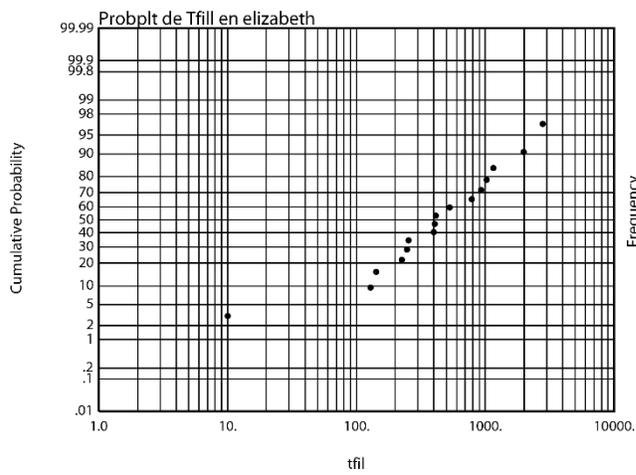
### Tasa de filtrado y Velocidad de sedimentación Veta Victoria y Elizabeth

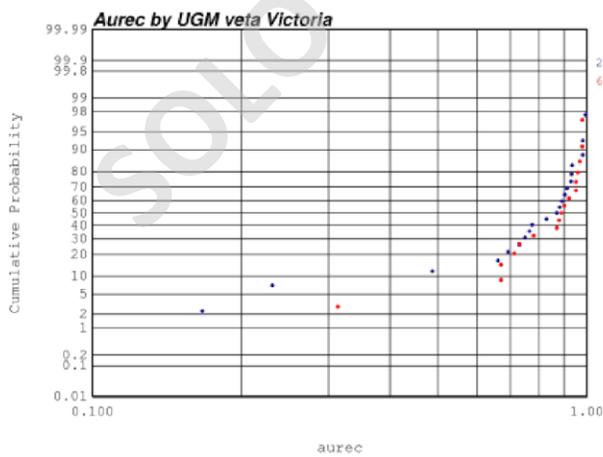
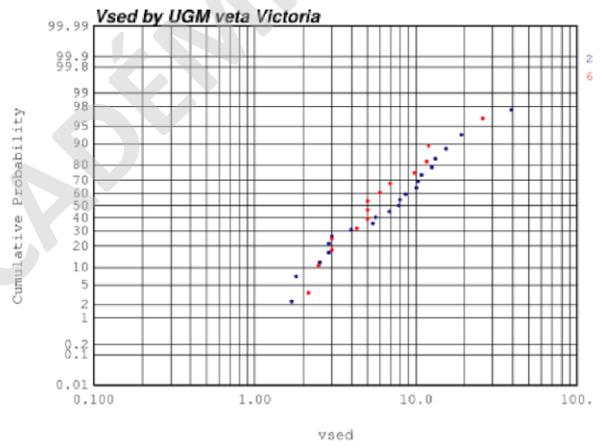
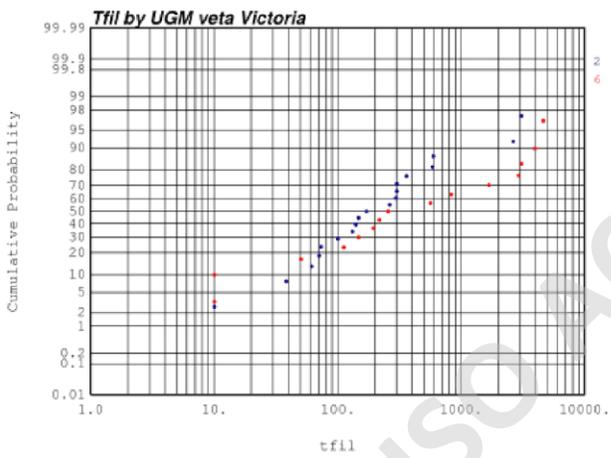
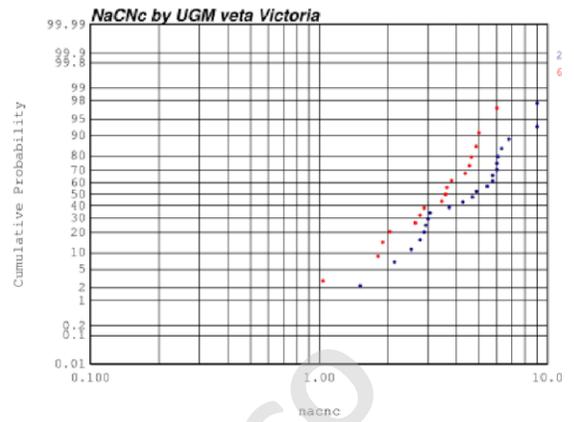
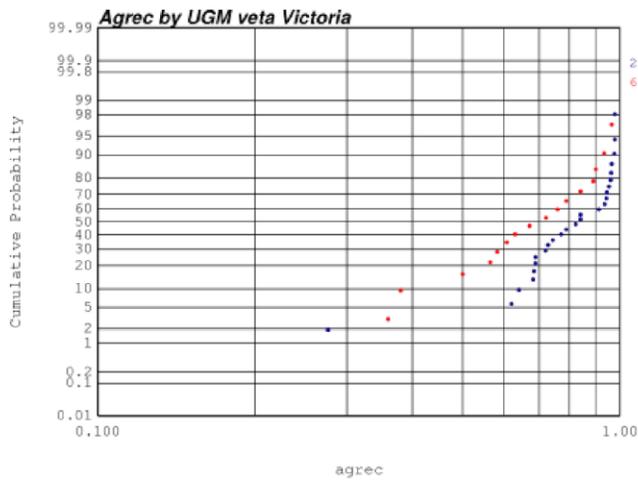


SOLO USO ACADÉMICO

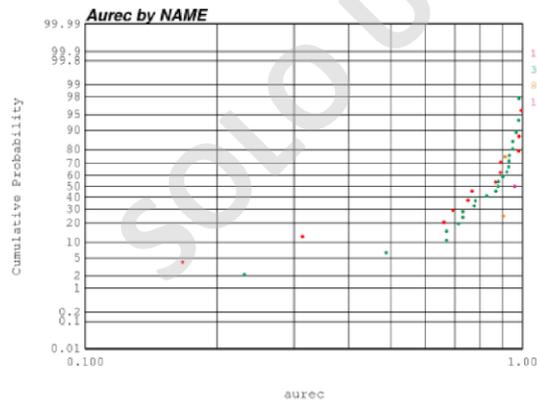
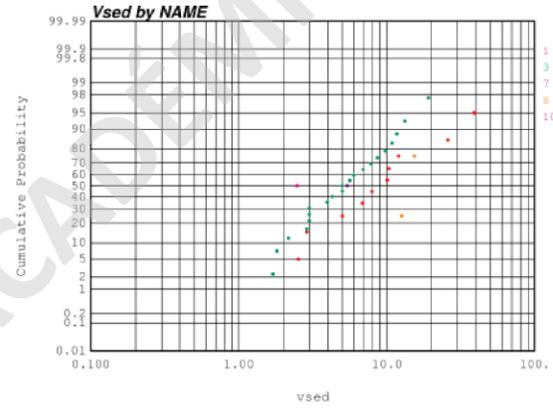
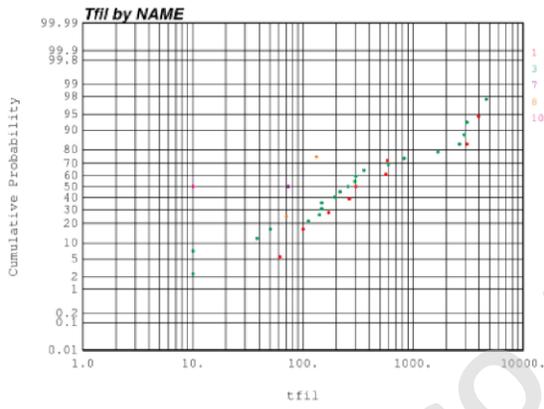
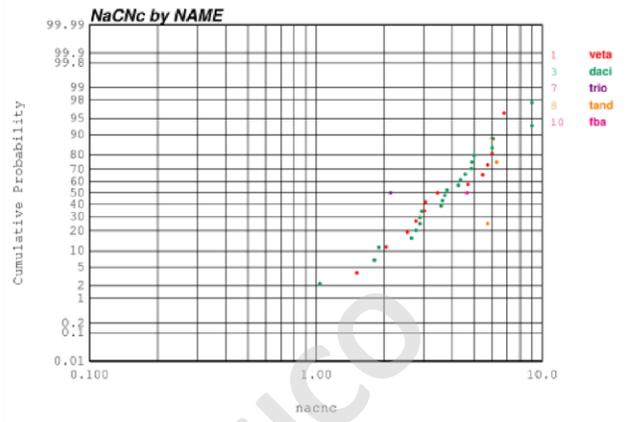
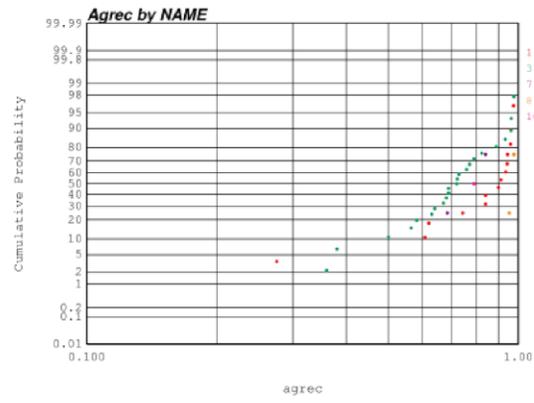








# Litologías



## ANEXO B

Variografía experimental Vetas Aleste - Bonanza		
Parámetro	Omnidireccional	Direccional
Paso	20 m	25 m
Tolerancia Paso	10 m	12.5 m
Tolerancia angular horizontal	90°	22.5°
Tolerancia angular vertical	90°	22.5°
Ancho de banda horizontal	100 m	50 m
Ancho de banda vertical	100 m	25 m

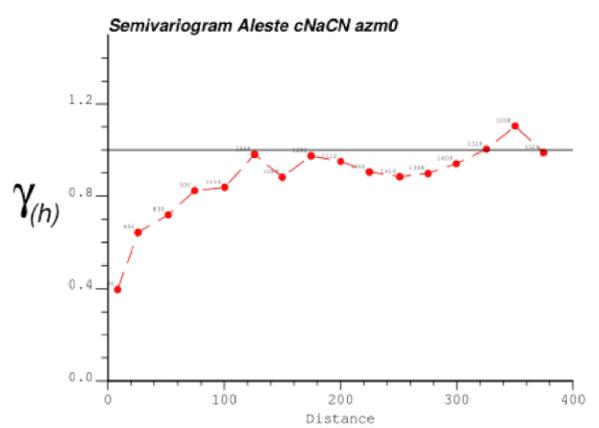
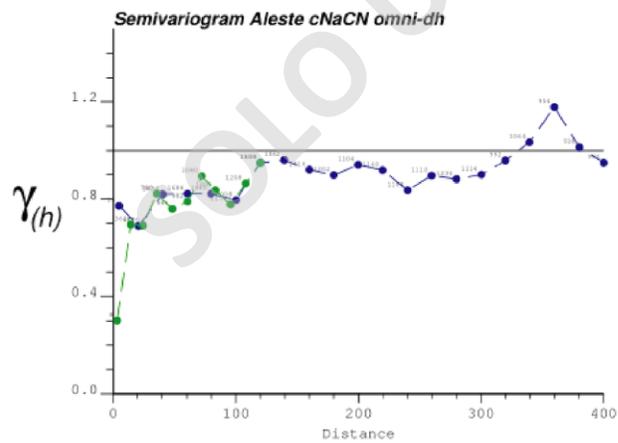
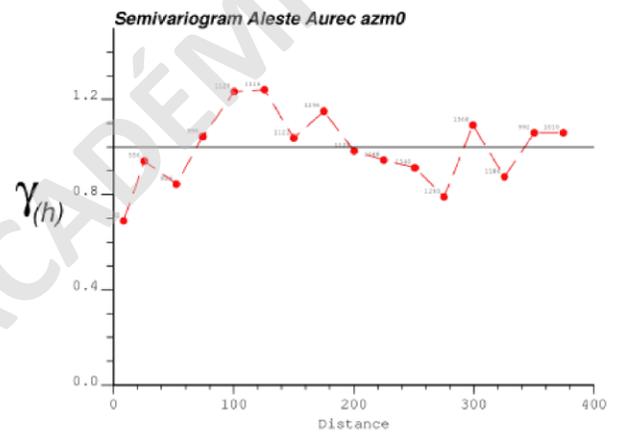
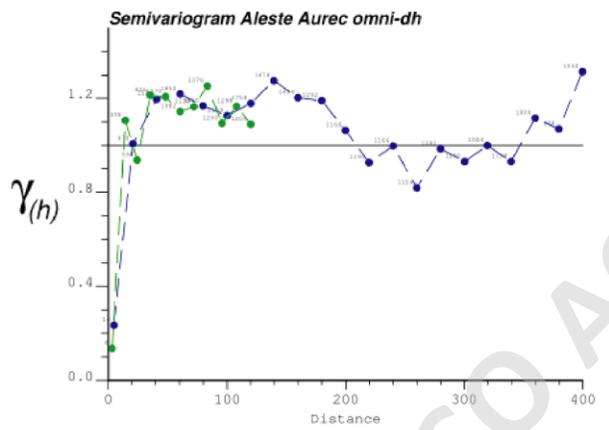
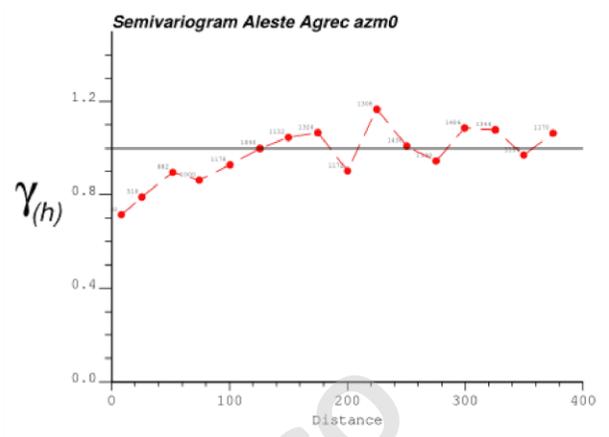
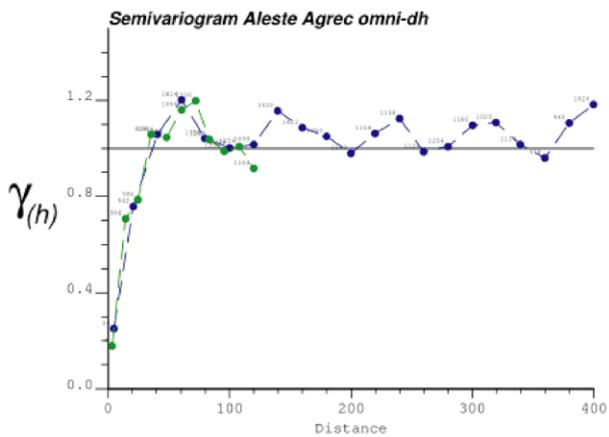
Variografía experimental Vetas Victoria - Elizabeth			
Parámetro	Omnidireccional	Omnidireccional	Direccional
Paso	20 m	15 m	15 m
Tolerancia Paso	10 m	7.5 m	7.5 m
Tolerancia angular horizontal	90°	90°	90°
Tolerancia angular vertical	90°	90°	22.5°
Ancho de banda horizontal	100 m	100 m	50 m
Ancho de banda vertical	100 m	100 m	25 m

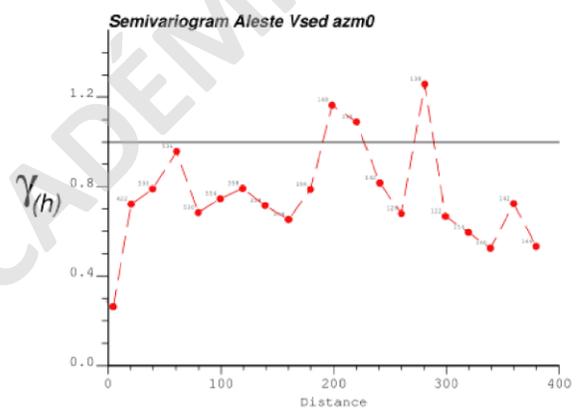
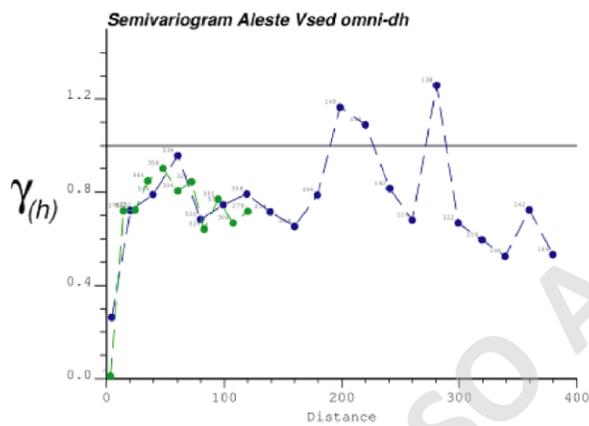
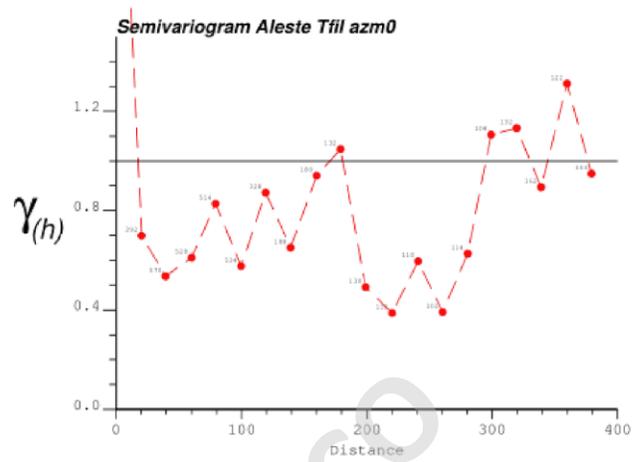
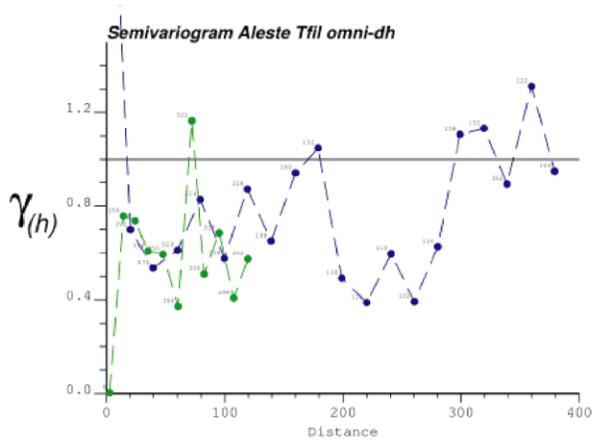
### *Veta Aleste*

Color azul: variograma omnidireccional.

Color verde: variograma down the hole.

Color rojo: dirección de máxima continuidad (chequear tabla de direcciones).



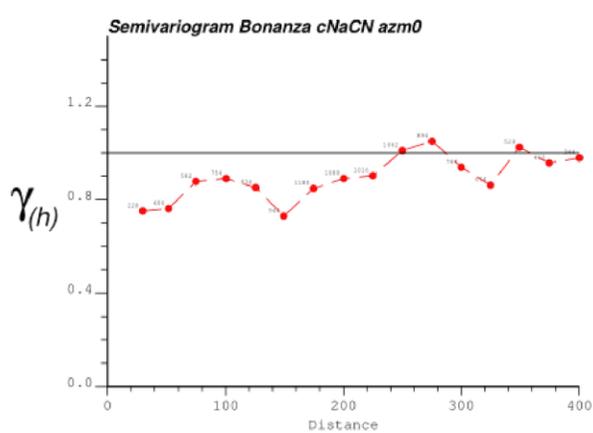
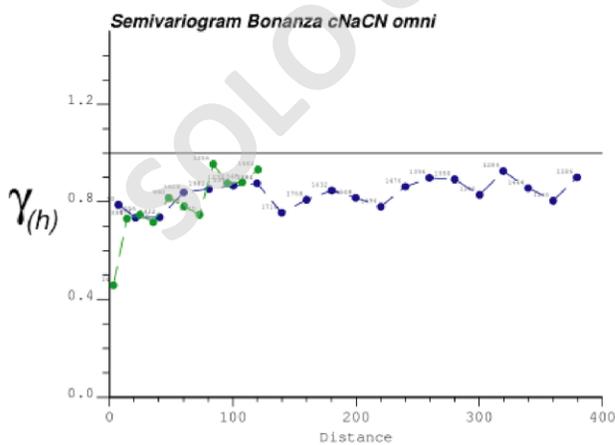
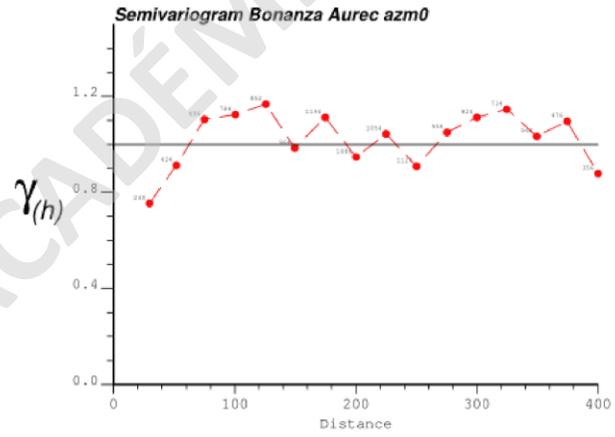
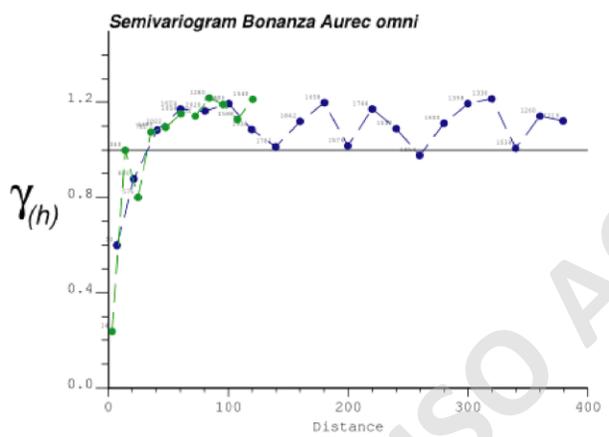
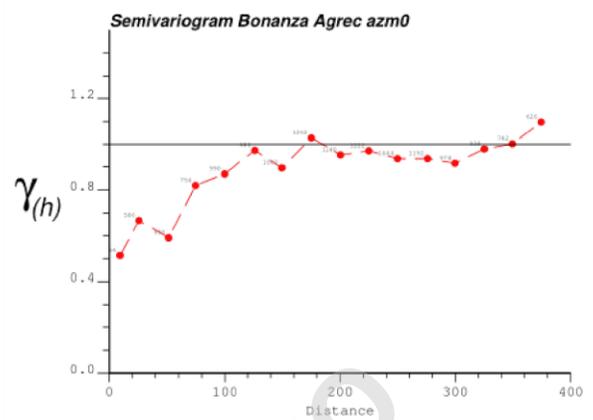
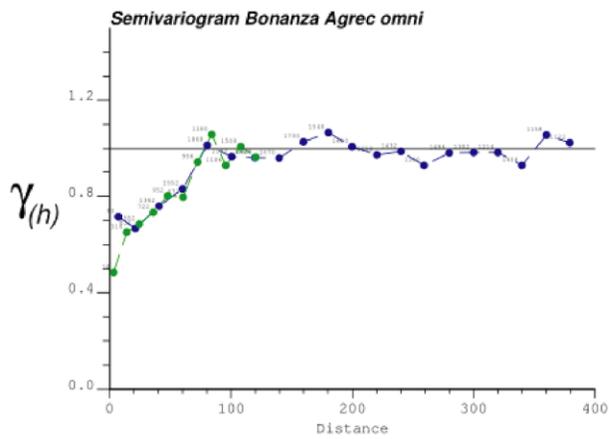


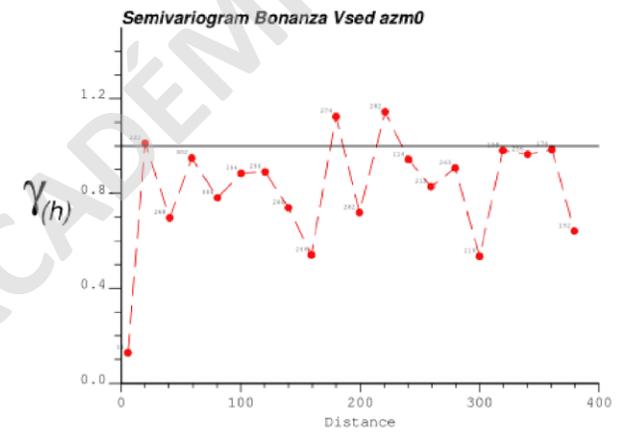
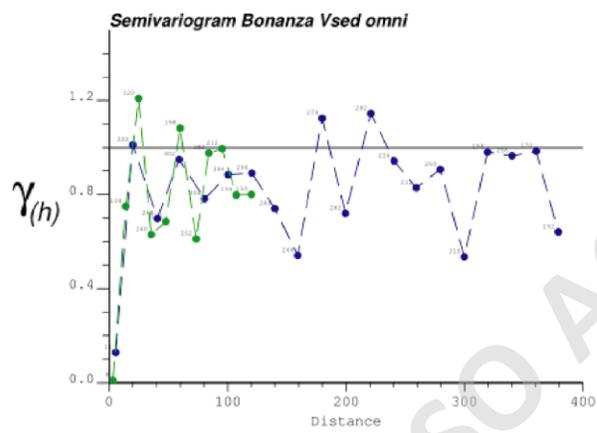
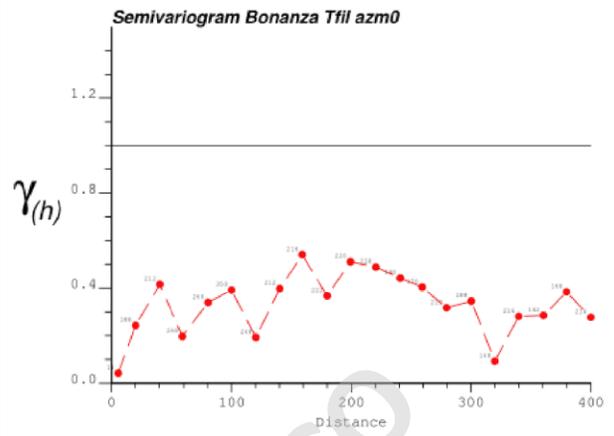
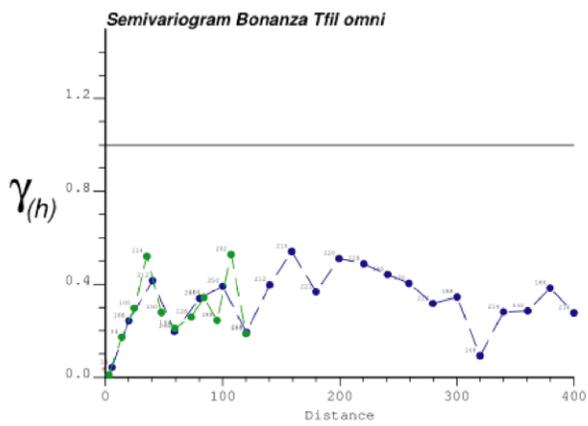
*Veta Bonanza*

Color azul: variograma omnidireccional.

Color verde: variograma down the hole.

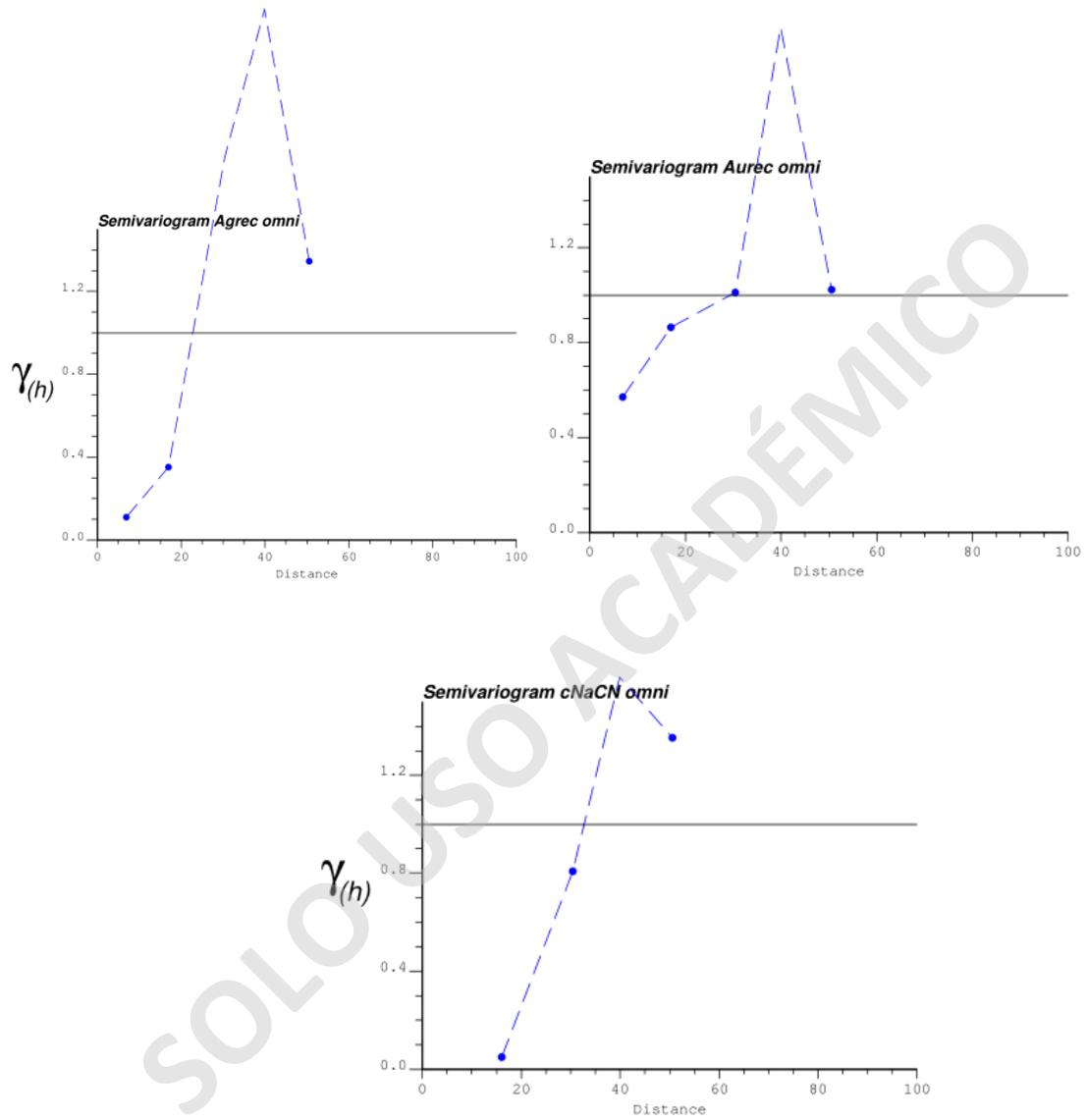
Color rojo: dirección de máxima continuidad (chequear tabla de direcciones).

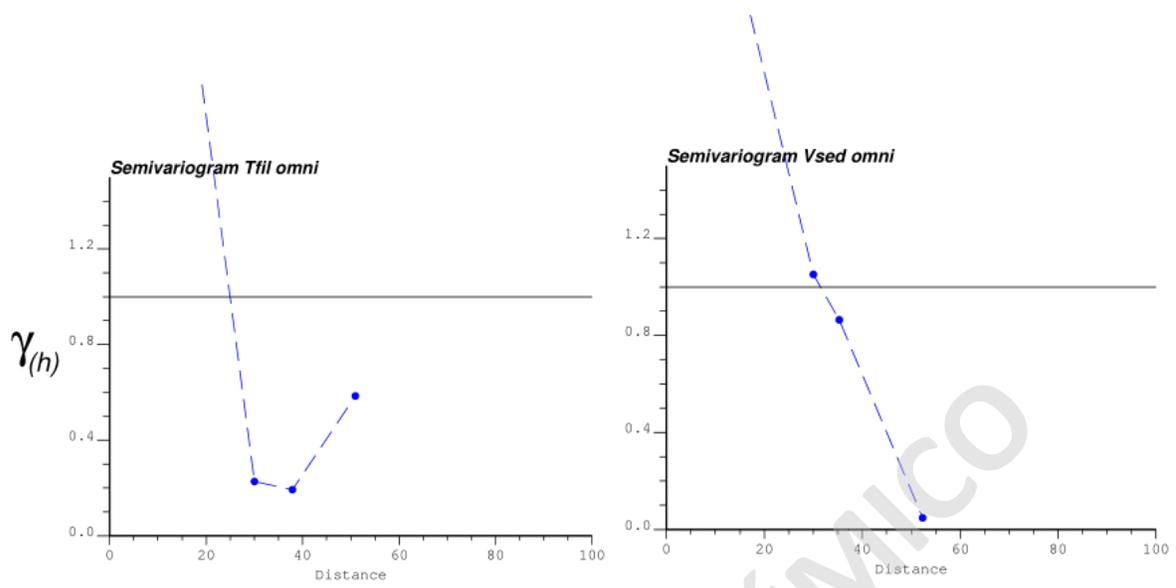




Veta Elizabeth

Color azul: variograma omnidireccional.



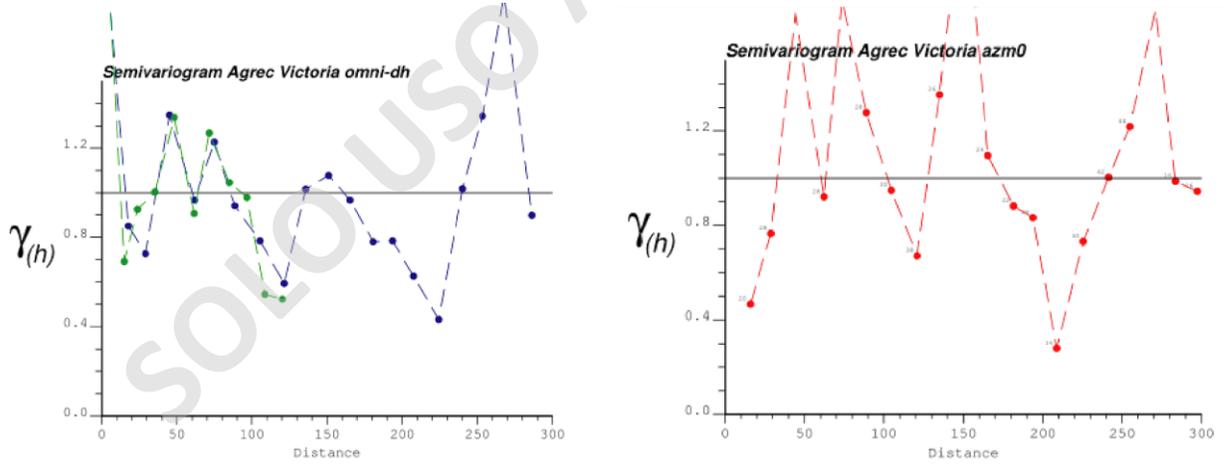


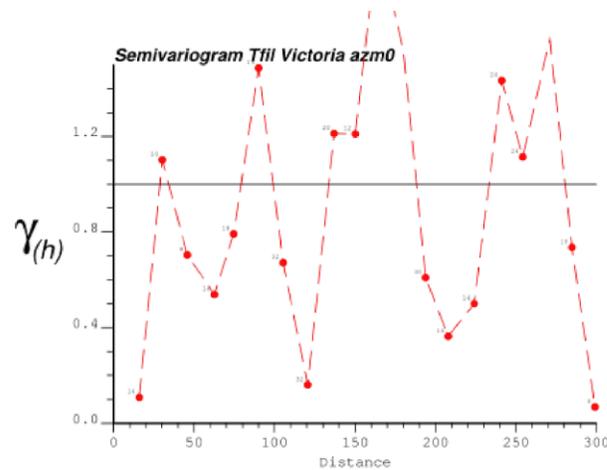
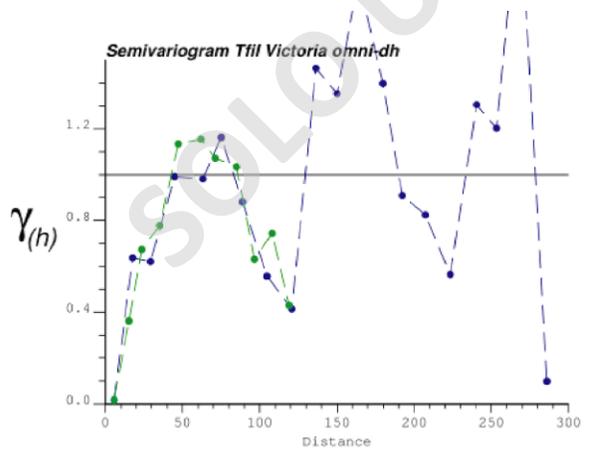
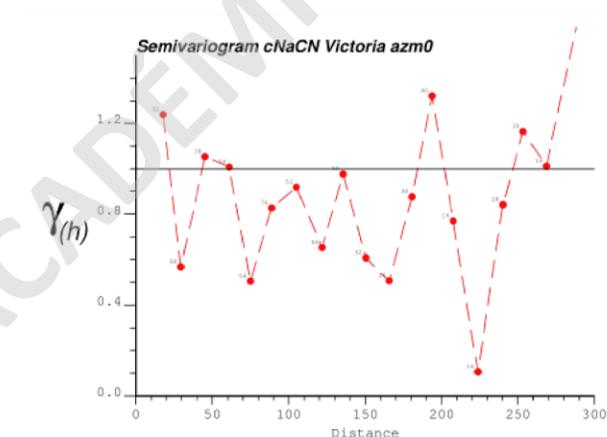
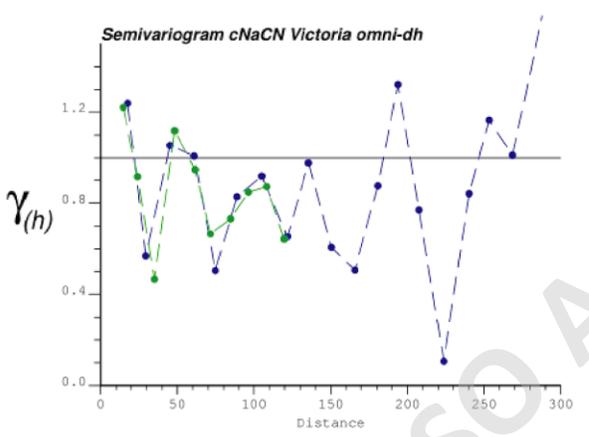
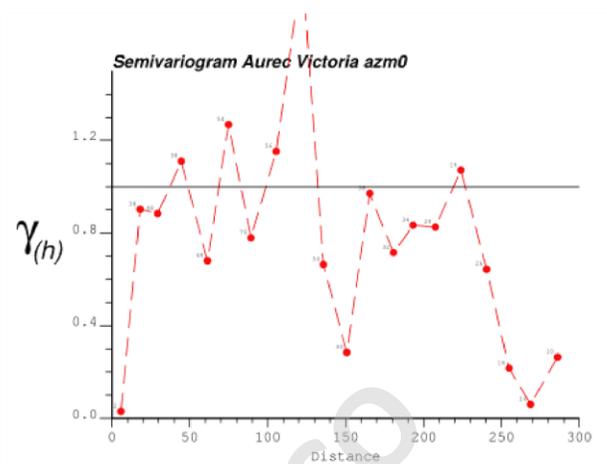
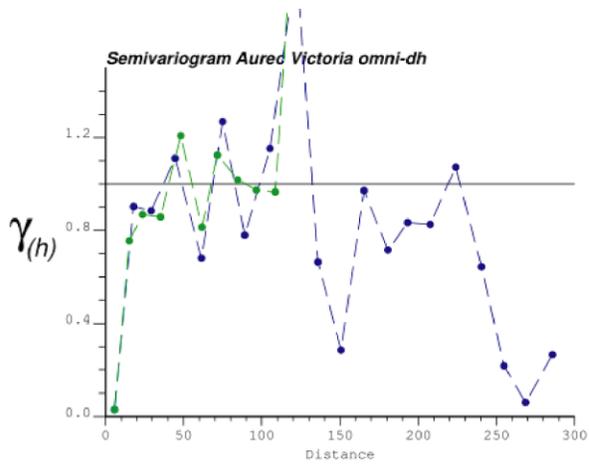
*Veta Victoria*

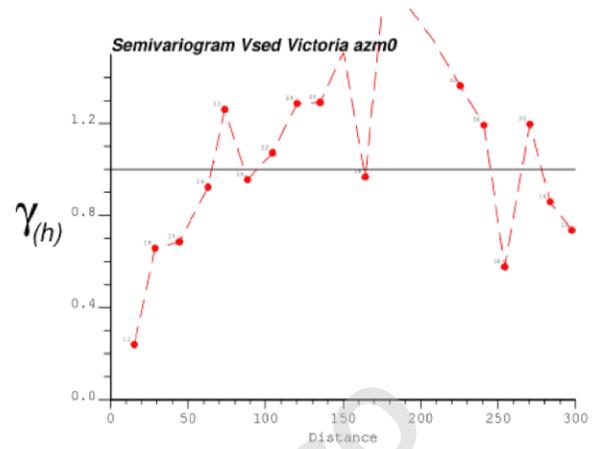
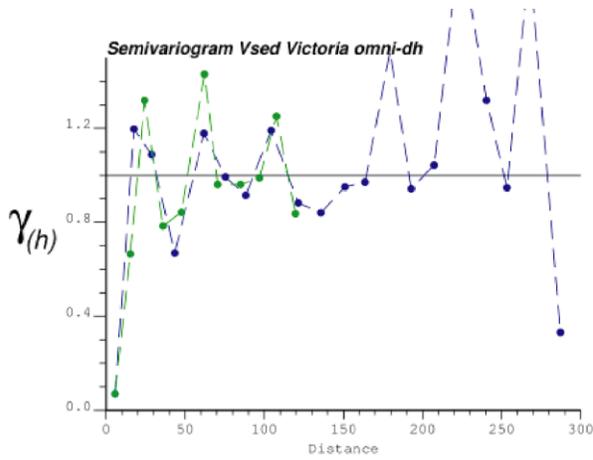
Color azul: variograma omnidireccional.

Color verde: variograma down the hole.

Color rojo: dirección de máxima continuidad (chequear tabla de direcciones).



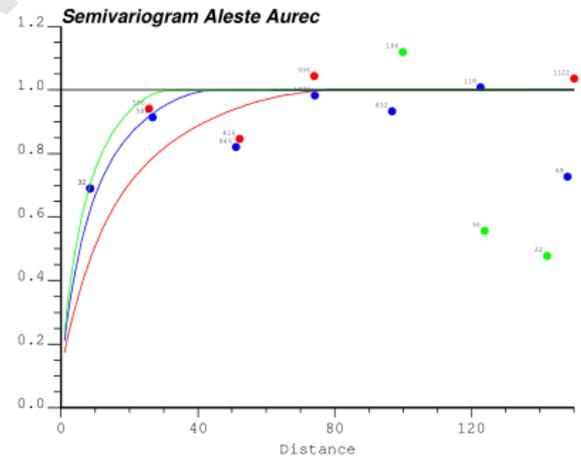
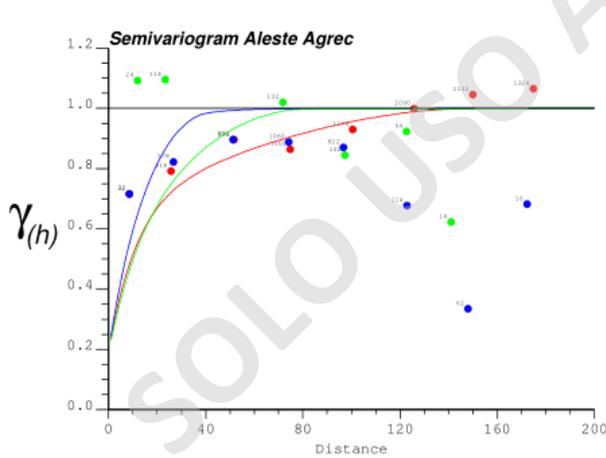


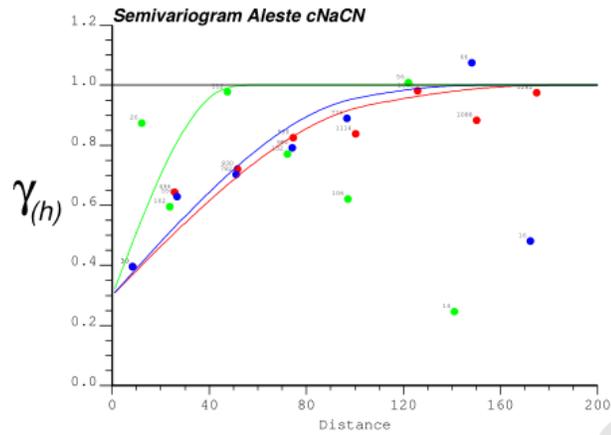


## ANEXO C

*Modelos variográficos veta Aleste.*

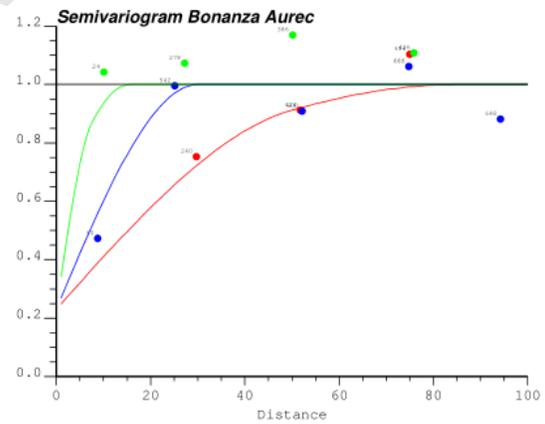
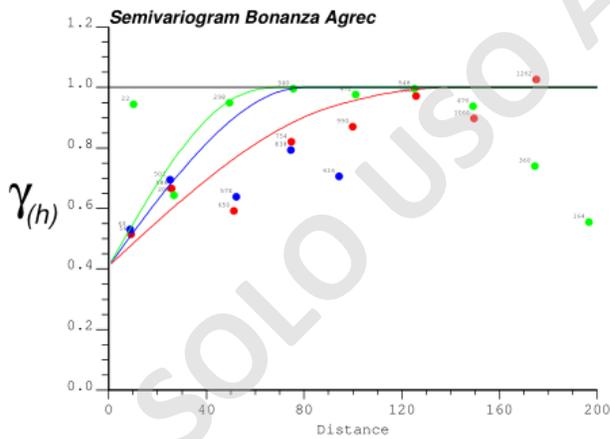
Color rojo: dirección de continuidad máxima  
 Color verde: dirección de continuidad intermedia.  
 Color azul: dirección de continuidad mínima.

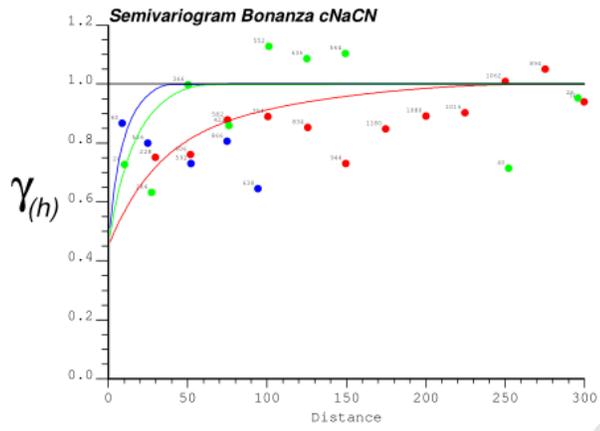




Modelos variográficos, veta Bonanza.

Color rojo: dirección de continuidad máxima  
 Color verde: dirección de continuidad intermedia.  
 Color azul: dirección de continuidad mínima.





SOLO USO ACADÉMICO