



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS**

**SIMULACIÓN GEOESTADÍSTICA DEL CONSUMO DE ÁCIDO EN UN  
PÓRFIDO CUPRÍFERO UTILIZANDO INFORMACIÓN DE LOGGEOS  
GEOLÓGICOS Y ENSAYOS QUÍMICOS**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA**

**DIEGO ROLANDO VERGARA BUSTOS**

**PROFESOR GUÍA**

XAVIER EMERY

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**

ALEJANDRO CÁCERES SAAVEDRA

NADIA MERY GUERRERO

ALEJANDRO LEIVA RODRÍGUEZ

SANTIAGO DE CHILE

2017

## RESUMEN

Usualmente los yacimientos son separados en distintos dominios geológicos, en los cuales las propiedades de las variables a simular son espacialmente y estadísticamente homogéneas. Sin embargo, cuando se consideran casos multivariantes, la partición del yacimiento normalmente es llevada a cabo de acuerdo a los criterios de la variable cuyo estudio es más relevante, induciendo un criterio que no necesariamente se ajusta a las otras variables. Esto es particularmente problemático cuando las variables involucradas tienen distinta naturaleza, como lo son las leyes de elementos, que son resultados de procesos geológicos, y consumo de ácido, que es el resultado de procesos metalúrgicos dependientes de la naturaleza geológica.

El objetivo principal de esta tesis es cuantificar la incertidumbre y variabilidad del consumo de ácido y de leyes de carbonato en un yacimiento mediante modelos geoestadísticos de simulación que utilizan la información de sondajes de exploración. Para la definición de dominios se propone una metodología que define los dominios de acuerdo a cada variable de interés, pudiendo ser iguales, traslapados o disjuntos para las distintas variables. Adicionalmente, se considera la dependencia espacial de los datos que pertenecen a distintos dominios, permitiendo aportar información a otros dominios, lo cual es particularmente significativo en zonas de transición entre dos dominios.

El enfoque propuesto es aplicado a un caso de estudio, utilizando la base de datos del depósito Antucoya del norte de Chile, donde se simulan las leyes de carbonato y el consumo de ácido para distintas unidades mineralizadas.

Distintos escenarios de la distribución de unidades mineralizadas son generados mediante simulaciones plurigaussianas, para obtener la variabilidad de las unidades en el yacimiento. Posteriormente, se realizan cosimulaciones multigaussianas de la ley de carbonato y del consumo de ácido, para poder cuantificar su incertidumbre. Estos resultados fueron validados mediante validación cruzada, donde no se observaron diferencias significativas, en términos globales, entre los distintos modelos de simulación puestos a prueba. Sin embargo, se observa diferencias locales en las simulaciones para los sitios que se encuentran cercanos al contacto entre los distintos dominios.

## ABSTRACT

The purpose of this thesis is to quantify the uncertainty in the acid consumption in a copper deposit by using geostatistical simulation, which provides models conditioned to geological information and assays available at drill hole samples.

The standard practice consists in splitting the deposit into geological domains, in which the properties of the variables to simulate are spatially and statistically homogeneous. When more than one variable is involved, the splitting is often carried out considering the most relevant variable, inducing a criterion not necessarily suitable for other variables. This is problematic if the variables are of different natures, as grades are a geological process and leaching is a metallurgical process. As an alternative, it is proposed to define geological domains for each variable, which could be equal, disjoint or overlapping when comparing the different variables.

Another distinctive characteristic involves the spatial dependence of the data belonging to different geological domains. Indeed, one domain could supply relevant information for other domains, e.g., in transition zones near the contacts between two domains. In this study, all the defined variables are assumed to be spatially cross-correlated, even when they are defined in non-overlapping or partially overlapping geological domains.

The proposed approach is applied to a case study (Antucoya deposit, northern Chile), in which it is of interest to simulate the carbonate grade and the acid consumption for different mineralized zones in a region of the deposit.

It is concluded that mineralization is the geological variable that controls the acid consumption and the carbonate grade. This variable is simulated performing plurigaussian simulations, in order to reproduce its variability over the deposit. Afterwards, the variability and uncertainty of acid consumption was modelled out by multigaussian simulations, considering the variability of the mineralization, in two scenarios: in the first one the simulation domains are traditionally defined and in the second one it was included an overlapping transition domain.

The simulation results are validated by checking the reproduction of the main statistics of the conditioning data, and by performing cross validation, showing globally no significant differences between the models. Nevertheless, at the data located nearby the border between two zones, the accuracy of the simulation is improved by considering overlapping domain, especially for the acid consumption simulation, which is the least sampled variable in the deposit.

## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría agradecer a mi familia, que siempre me ha apoyado en todo.

Al profesor Xavier Emery, por su dedicación y paciencia. Así como a la comisión por sus comentarios.

Al proyecto Fondecyt 1130085 y a Conicyt PIA anillo ACT1407, por el financiamiento y apoyo a este trabajo. A Pablo Valiente y Antofagasta Minerals, por aportar información para la investigación.

Al Departamento de Ingeniería de Minas y al AMTC, por generar instancias de desarrollo profesional.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS Y ALCANCE.....</b>	<b>2</b>
2.1	OBJETIVOS .....	2
2.2	ALCANCE.....	2
2.3	APORTE AL ESTADO DEL ARTE.....	3
<b>3</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
3.1	GEOMETALURGIA.....	4
3.2	HIDROMETALURGIA .....	7
3.3	HERRAMIENTAS DE LA GEOESTADÍSTICA Y EVALUACIÓN DE YACIMIENTOS .....	10
3.3.1	Conceptos generales.....	10
3.3.2	Objetivos.....	13
3.3.3	Estimación de variables regionalizadas .....	14
3.3.4	Cuantificación de incertidumbre.....	18
3.4	ALCANCES DE LAS HERRAMIENTAS DE GEOESTADÍSTICA.....	22
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>CASO ESTUDIO .....</b>	<b>30</b>
5.1	ANTECEDENTES.....	30
5.2	GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO.....	31
5.2.1	Mineralización.....	31
5.3	ESTUDIO EXPLORATORIO DE DATOS.....	33
5.4	MODELO INTERPRETADO DE UNIDADES GEOLÓGICAS.....	54
5.4.1	Variogramas .....	55
5.4.2	Resultados.....	57
5.4.3	Verificación .....	58
<b>6</b>	<b>SIMULACIÓN DE UNIDADES GEOLÓGICAS.....</b>	<b>61</b>
6.1	REGLAS DE TRUNCACIÓN Y PROPORCIONES.....	61
6.2	VARIOGRAFÍA DE FUNCIONES ALEATORIAS GAUSSIANAS.....	63
6.3	RESULTADOS .....	64
6.3.1	Resultados globales.....	66
6.3.2	Resultados locales.....	67

<b>7</b>	<b>MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE VARIABLES DE INTERÉS .....</b>	<b>71</b>
7.1	SIMULACIÓN SIN TRASLAPES DE DOMINIOS .....	71
7.1.1	Definición de dominios de simulación .....	71
7.1.2	Anamorfosis.....	74
7.1.3	Bigaussianidad .....	76
7.1.4	Variogramas .....	80
7.1.5	Validación .....	82
7.1.6	Resultados.....	83
7.2	SIMULACIÓN CON TRASLAPES DE DOMINIOS .....	85
7.2.1	Definición de dominios de simulación .....	87
7.2.2	Anamorfosis.....	89
7.2.3	Bigaussianidad .....	92
7.2.4	Variogramas .....	95
7.2.5	Validación .....	98
7.2.6	Resultados.....	101
7.3	COMPARACIÓN DE MODELOS .....	103
7.3.1	Distribución de medias.....	103
7.3.2	Distribución de varianzas .....	104
7.3.3	Distribución de coeficientes de correlación entre variables .....	105
7.3.4	Comparación de diagramas de dispersión .....	105
7.3.5	Inventario de recursos .....	107
7.4	ANÁLISIS EN LA FRONTERA.....	110
7.4.1	Metodología.....	110
7.4.2	Efecto en la frontera.....	111
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>113</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>115</b>

# 1 INTRODUCCIÓN

La construcción de modelos predictivos es una necesidad para el desarrollo de proyectos mineros, tanto en sus etapas de estudios como en su operación. Hoy en día, existe un creciente interés en involucrar a varias disciplinas conjuntamente, de manera de poder aprovechar toda la información disponible en pro de mejorar la eficiencia de los procesos y la rentabilidad del proyecto.

En este contexto, en el área de metalurgia, se realizan pruebas de laboratorio para determinar distintos parámetros que caracterizan el comportamiento metalúrgico de algunas muestras del yacimiento. Dichos parámetros pueden ser el consumo de ácido, work index, consumo de cianuro, recuperaciones para distintos tiempos de residencia, razones de solubilidad y pruebas cinéticas, entre otros.

A partir de los resultados de las pruebas se definen valores nominales que caractericen el total del yacimiento o, en el mejor de los casos, valores nominales según cada unidad geológica considerada. Sin embargo, la extrapolación de parámetros metalúrgicos (para fijar ideas, considerar el consumo de ácido) a la totalidad del yacimiento no refleja la variabilidad espacial de ese parámetro. Tampoco se considera una potencial dependencia entre parámetros metalúrgicos y otros parámetros (como el tipo de roca, litología, tipo de mineralización e incluso las leyes).

Una extrapolación espacial de estos parámetros metalúrgicos permitiría sintetizar información geológica y del área de procesamiento de minerales para entregar a áreas de planificación (y posteriormente al área de evaluación económica) un modelo que incorpore no sólo leyes y tipos de roca, sino también los parámetros metalúrgicos relevantes a los procesos que ocurren posteriores a la extracción. Este modelo geo-metalúrgico busca proveer información a otras áreas de ingeniería a través de “poblar” el modelo de recursos con información de otras disciplinas. La construcción de dicho modelo geo- metalúrgico se basa en herramientas y métodos de análisis multivariable de datos y geoestadística.

El objetivo de esta investigación es cuantificar mediante herramientas geoestadísticas, la incertidumbre del consumo de ácido y de las leyes de carbonato en un yacimiento de cobre a partir de los resultados de pruebas metalúrgicas y considerando la variabilidad de la unidad geológica que controla la distribución de estas variables de interés.

## **2 OBJETIVOS Y ALCANCE**

### **2.1 OBJETIVOS**

El objetivo principal de este estudio es cuantificar la incertidumbre y variabilidad del consumo de ácido y de leyes de carbonato en un yacimiento reconocido con un muestreo heterotópico.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Identificar la variable geológica que controla la distribución del consumo de ácido y de leyes de carbonato y generar mediante simulaciones distintos escenarios del yacimiento.
- Calcular mapas de probabilidad de las distintas unidades que controlan la distribución de consumo de ácido y leyes de carbonato en el yacimiento.
- Generar escenarios posibles del yacimiento mediante simulaciones, con el fin de replicar la variabilidad espacial del consumo de ácido y de la ley de carbonato en el yacimiento, incorporando la información de leyes de carbonato para las simulaciones de consumo de ácido, debido a que existe un mayor número de mediciones.
- Realizar validaciones mediante jack-knife de las simulaciones realizadas.
- Cuantificar la incertidumbre del consumo de ácido considerando diferentes modelos de las unidades geológicas.
- Comparar el desempeño de las simulaciones, considerando el efecto de la inclusión de un traslape entre las distintas unidades. El desempeño de las simulaciones puede ser analizado de manera global y local en el yacimiento. Como el mayor impacto del involucramiento de traslapes se genera en la frontera entre las distintas unidades, se realiza un análisis del desempeño de las simulaciones en la vecindad de la frontera.

### **2.2 ALCANCE**

El presente estudio se desarrolla a partir de información del yacimiento Antucoya, explotado por Antofagasta Minerals S.A., el cual se encuentra ubicado en la región de Antofagasta, en la comuna de Mejillones. Para ello se utiliza información correspondiente a campañas de sondajes, pruebas de laboratorio y la interpretación geológica de muestras.



## 2.3 APORTE AL ESTADO DEL ARTE

Dentro de los elementos que son considerados un aporte y una variación con respecto a la metodología tradicional de los estudios de modelamiento geoestadístico, se incluyen los siguientes puntos:

- Se cuantifica la incertidumbre mediante técnicas geoestadísticas a una variable que por naturaleza es el resultado de pruebas metalúrgicas y no una característica intrínseca del yacimiento, como lo es el consumo de ácido, para cuantificar de manera local su incertidumbre. La cuantificación de la incertidumbre de consumo de ácido se realiza incorporando la correlación con la ley de carbonato en el yacimiento, la que es una variable cuya naturaleza sí es intrínseca al yacimiento y tiene un mayor número de mediciones.
- La definición de dominios de simulación se realiza para cada variable de manera independiente, atendiendo a las características de continuidad, estadísticas, geológicas y espaciales de cada variable. La metodología tradicional, por su parte, considera la partición del yacimiento en distintos dominios de simulación atendiendo a los mismos criterios expuestos, pero solamente aplicados a la variable de mayor interés. Sin embargo, esto fuerza una partición no adecuada del yacimiento para otras variables, ya que no se realizaba de acuerdo a sus propias características de continuidad. Esto es sumamente importante al considerar que las variables pueden ser de distinta naturaleza y la definición de dominios cambia variable a variable. Si bien la definición de dominios de simulación se realiza para cada variable, se incorpora información de las otras variables y otros dominios mediante covarianzas o variogramas cruzados, lo que permite aportar una mayor cantidad información al momento de realizar la simulación, ya que involucra la correlación entre los distintos dominios para las distintas variables.
- En el caso de existir unidades de transición entre dos unidades que presenten una frontera dura entre sí, pero ambas que presenten un contacto blando con una unidad de transición, se considera un modelo traslapado de dominios de simulación, que permita considerar la información de la unidad de transición en las otras dos unidades y considerar la correlación entre las distintas unidades de simulación. Esta generación de traslape entre unidades se hace considerando las zonas de transición para cada variable de interés sin alterar el tipo de contacto en las distintas unidades simuladas.

### **3 MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 GEOMETALURGIA**

La geometalurgia se define como la disciplina donde datos geológicos, mineros y metalúrgicos son analizados en conjunto para generar información útil para optimizar procesos (David, 2013).

Por otra parte, Dunham y Vann (2011) la definen como una disciplina cruzada que combina la geología, la metalurgia y la planificación minera y la visualiza como un paso lógico en la mejora en el diseño y operación del negocio minero.

En términos del negocio minero se puede ver a la geometalurgia como un enfoque multidisciplinario que tiene el objetivo final de entender los atributos geológicos del material antes de procesarlo, obteniendo mayor conocimiento del material para describirlo a lo largo de toda la cadena de valor, desde que se considera recursos hasta su puesta en venta en el mercado, pudiendo cuantificar los riesgos en el negocio y la variabilidad del depósito. En otras palabras, la geometalurgia permite entender de mejor manera el yacimiento, pudiendo predecir el comportamiento de distintos tipos de materiales del yacimiento en distintos procesos de tratamiento.

Lo anterior es posible debido a que en la actualidad se cuenta con gran cantidad de información proveniente de varias disciplinas, incorporándose últimamente la mineralogía, que cuenta con técnicas que pueden medir la mineralogía del material tratado en línea, cuando hasta hace algún tiempo la información mineralógica tenía un mayor tiempo de análisis. El menor tiempo de análisis de las caracterizaciones mineralógicas, que se llevan a cabo con las tecnologías actuales, permite que sus resultados sean tomados en cuenta en la toma de decisiones.

En este contexto, la evaluación de recursos y las técnicas geoestadísticas tienen un rol clave en todas las etapas de un proyecto minero: no sólo participan en la elaboración de un modelo de recursos, sino que también son las herramientas que permiten integrar las variables relevantes, generando mejores modelos geometalúrgicos. Estos modelos pueden ser tanto modelos de optimización de procesos como modelos de cuantificación de incertidumbre.

A continuación se presentan algunas aplicaciones de modelos geometalúrgicos utilizando técnicas geoestadísticas, todas ellas están orientadas a proveer mayor información del yacimiento con el fin de predecir el comportamiento del material a la actividad minera que tendrá efecto sobre él. Se puede observar que estos modelos son aplicados para distintos

parámetros de interés, dependiendo de cada proyecto minero y que son realizados en distintas etapas de la vida del proyecto, desde sus estudios iniciales hasta la operación y el posterior cierre de la operación.

- Estudios de conminución en Minera Escondida

Existen dos estudios de conminución realizados en Minera Escondida. El primero fue realizado por Bergholz y Schreder (2004), quienes describen la toma de muestras para un estudio de conminución considerando muestras de distintas litologías y mediciones realizadas en el rajo, en las correas y en los sondajes. En este estudio se obtuvieron 274 muestras con mediciones de SPI y pruebas de work index de bond (BWi) a partir de los cuales se realizó un kriging que interpoló esa información al modelo de bloques, permitiendo obtener una distribución espacial de la dureza en las distintas litologías.

Posteriormente, Flores (2005) realizó un modelo que permite estimar el ritmo de tratamiento de la planta de conminución, expresada en tph, a partir de la estimación de la dureza del mineral. Para ello utilizó una base de datos de 1440 muestras donde se había medido la dureza del mineral (SPI y BWi). La ventaja de este modelo es que permite retroalimentarse considerando la nueva información. Los resultados obtenidos por el modelo muestran diferencias menores al 5% en las toneladas por hora tratadas durante un trimestre.

Este modelo se usó para ajustar los diseños en las nuevas fases de expansión de la planta concentradora y para ajustar los planes mineros.

- Modelo de recuperación de Minera Los Bronces

En la Minera Los Bronces existen procedimientos de toma de muestra y metodologías de caracterización de las muestras considerando mineralogía, dureza (SPI y BWi) y pruebas de flotación primaria que han permitido definir 7 dominios de flotación y 10 dominios de dureza del mineral en la mina. Esto fue realizado considerando una gran base de datos, que considera 14000 muestras mineralógicas y 700 pruebas de flotación.

Lo anterior ha permitido desarrollar modelos que pueden ser contrastados con la realidad. Estos modelos muestran una diferencia menor a un 2% en la recuperación de cobre considerando un periodo de dos años y medio. Permiten realizar la selección estéril/mineral basándose en la recuperación y leyes de los bloques y no exclusivamente en la ley, incorporando el desempeño de la planta como un criterio para definir el destino de los bloques de mineral.

- Modelo de recuperación en flotación de Minera Doña Inés de Collahuasi

Suazo, Kracht y Alruiz (2010) realizaron un estudio para estimar la recuperación en el circuito de flotación de Minera Doña Inés de Collahuasi considerando el tamaño de partículas que alimentaba a la etapa de flotación (tomando como parámetro el  $P_{80}$ ). Este estudio fue realizado a escala de laboratorio e industrial y considera un modelo que predice los resultados metalúrgicos obtenidos en la planta industrial de flotación.

La importancia de este estudio es que permite generar un modelo que predice la respuesta metalúrgica en la planta considerando las distintas unidades geometalúrgicas que han sido definidas en la operación y a las distintas condiciones de operación de la planta. La diferencia entre los valores obtenidos y los valores estimados son menores a un 2% a lo largo de 18 meses.

- Modelamiento geometalúrgico en la mina Olympic Dam

Boisvert, Rossi, Ehrig y Deutsch (2013) realizaron un estudio metalúrgico para predecir el comportamiento de la planta de procesamiento de minerales de la mina Olympic Dam que genera cobre y óxido de uranio como producto final.

Este estudio fue realizado con toda la información disponible, la que incluyó leyes medidas, asociaciones minerales, tamaño de granos, mineralogías y variables asociadas al rendimiento de la planta. Este modelo fue realizado en dos etapas de regresiones lineales, considerando la reducción del número de variables (inicialmente, más de 200) y una etapa de simulación secuencial Gaussiana.

Como resultado de este estudio se generó un modelo de recuperación de cobre y uranio, consumo de ácido, recuperación en peso e indicadores de dureza (DWT y BWi). Estos modelos pueden ser utilizados para la optimización de la mina y de la planta.

- Modelo geometalúrgico incorporando la mineralogía en el depósito Dumont

El depósito Dumont corresponde a un yacimiento masivo de baja ley de níquel (0,3%) ubicado en Ontario, Canadá. Sciortino, Muinonen, Korczak y St-Jean (2013) han desarrollado investigaciones con el fin de complementar el estudio geológico con información mineralógica, para lo cual cuentan con una base de datos con 1420 muestras cuya mineralogía ha sido analizada mediante análisis QEMSCAN y 4440 pruebas complementarias de mineralogía. Estas pruebas han permitido aumentar el entendimiento del comportamiento del níquel en varias secciones a lo largo del depósito.

Adicionalmente se han desarrollado 105 pruebas metalúrgicas bajo condiciones estándar que han permitido relacionar la mineralogía con la respuesta metalúrgica. A partir de lo anterior, se

ha generado un modelo de bloques que considera dominios geometalúrgicos del comportamiento del níquel en una planta de procesamiento, considerando cuál es la cantidad de níquel que se encuentra liberado y cuál no. Esta metodología, que va más allá que la metodología tradicional para estudios de factibilidad, ha permitido tener una mejor aproximación del potencial valor económico del depósito, ya que permite considerar los recursos de níquel recuperables en lugar de los recursos existentes.

## **3.2 HIDROMETALURGIA**

La hidrometalurgia se define como la tecnología en la cual se busca separar ciertos metales de interés económico de los minerales que los contienen mediante medios físico-químicos acuosos (Domic, 2001).

Para lograr un producto comercializable, la hidrometalurgia requiere de otras operaciones unitarias de la metalurgia extractiva, como lo son la conminución, fenómenos de separación sólido/liquido, la electrometalurgia y la pirometalurgia.

En términos generales, la hidrometalurgia se lleva a cabo en tres etapas secuenciales: Una disolución selectiva (lixiviación) de los metales desde los materiales, utilizando una solución acuosa con reactivos. Posteriormente ocurren las etapas de concentración y recuperación selectiva del metal de interés.

El comportamiento metalúrgico de la lixiviación depende principalmente del material, debido a las distintas características mineralógicas de los minerales de mena y de ganga, como también depende de condiciones operacionales como la granulometría, concentración de reactivos, entre otros. En la lixiviación de minerales de cobre el reactivo utilizado en la solución acuosa es el ácido sulfúrico.

En general, los yacimientos minerales presentan una gran variedad de minerales con distintas características mineralógicas. Estos minerales pueden ser agrupados en unidades que tengan una respuesta metalúrgica similar a la lixiviación.

En particular, en los yacimientos de cobre tipo pórfido cuprífero existen distintas unidades que presentan una respuesta metalúrgica similar a la lixiviación en términos de cinéticas de la reacción, consumo de reactivos y porcentaje de extracción de cobre. Estas unidades son: Una zona lixiviada y estéril, una zona de óxidos de cobre, una zona de enriquecimiento secundario y una zona primaria. La Tabla 3-1 muestra los minerales de cobre más frecuentes en cada zona mineral.

**Tabla 3-1: Grupos de minerales en pórfido cuprífero**

Zona oxidada		
Malaquita	Atacamita	Brochantita
Chalcantita	Crisocola	Cuprita
Zona de enriquecimiento secundario		
Calcosina	Covelina	Digenita
Zona primaria		
Calcopirita	Enargita	Tetrahedrita
Bornita	Tenantita	

Desde el punto de vista del proceso, los parámetros relevantes en la lixiviación de cobre son: la recuperación de cobre, la cinética de la reacción y el consumo de ácido (medido en kg/t). Estos resultados se ven influenciados por los minerales de mena, de ganga y condiciones operacionales tales como la granulometría, el tipo de lixiviación, el tiempo de tratamiento, entre otros.

Existen distintos métodos de lixiviación utilizados en la minería del cobre, dependiendo principalmente de razones económicas. Entre las variables económicas que se consideran para determinar el método de lixiviación se encuentran:

- Valor económico del material a tratar: la cantidad de material que se desea tratar y el contenido de cobre soluble en el material.
- Recuperación esperada en cada método.
- Tiempo de reacción en cada método.
- Consumo de ácido esperado en cada método.
- Costos de operaciones previas (por ejemplo, costo de reducción de tamaño) y costos de tratamientos posteriores (tratamiento térmico).

Entre estos tipos se encuentran los siguientes:

- Lixiviación in-situ: En este caso la lixiviación se lleva a cabo sin realizar una extracción minera. Se busca aprovechar la permeabilidad del material, ya sea por fragmentación primaria o secundaria, para permitir el contacto entre el material y la solución. La solución rica se dirige mediante la gravedad a niveles inferiores donde es recolectada para su tratamiento.
- Lixiviación en botaderos: Consiste en el tratamiento de material estéril de muy baja ley, que tiene ley menor a la ley de corte de la planta principal y que no es atractivo para su procesamiento. La lixiviación se lleva a cabo en los botaderos en tiempos de ciclo superiores a un año, obteniendo recuperaciones bajas (entre un 40 y 60%) con costos de operación bajos. Existen varias operaciones que, en ciclos de precios altos, ponen especial interés en el contenido de cobre que se encuentra en el material estéril.

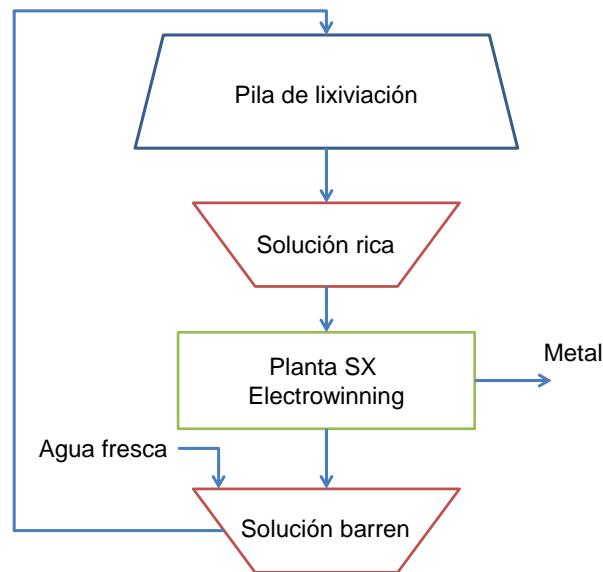
- Lixiviación en pilas: A diferencia de la lixiviación en botadero, la lixiviación en pilas se realiza para material cuya ley paga procesos de reducción de tamaño para obtener mayores recuperaciones de cobre. En esta metodología el material chancado y acondicionado se apila en pilas de 10-15 metros de altura y es regado mediante regadores en la parte superior de la pila. La solución se dirige gravitacionalmente a la parte inferior de la pila, donde es recolectada y enviada a una planta de concentración. Estas pilas pueden ser dinámicas o permanentes. En las pilas dinámicas el material es enviado a botadero luego de ser lixiviado mientras que en las pilas permanentes el material queda depositado en el lugar donde fue lixiviado. Este tipo de lixiviación es utilizado para material de oro de baja ley y de fácil extracción.

Mediante este tipo de lixiviación se obtienen recuperaciones de cobre entre 70 y 85% con inversiones moderadas en la planta, ya no que se requiere una planta de molienda. El grado de chancado necesario va a estar determinado por razones técnico-económicas, dependiendo de la recuperación de cobre para granulometrías más finas, el ciclo de lixiviación a la granulometría indicada y la estabilidad de la pila. El tiempo de lixiviación es de varios meses y la eficiencia del proceso depende en gran medida de la mineralogía del material a tratar.

- Lixiviación por agitación: En este método la lixiviación ocurre en estanques agitados con material finamente molido. Esto asegura que el mineral se encuentra expuesto y liberado y por tanto se pueden alcanzar altas recuperaciones, superiores a 90%, con tiempos de ciclo entre 6 y 24 horas. Es un método de inversión elevada, ya que requiere molienda y etapas de separación sólido/líquido. Sin embargo, sus altas recuperaciones y su bajo tiempo de ciclo lo hacen adecuado para material de alta ley.

Los parámetros más relevantes en el diseño y operación mediante el método de lixiviación en pilas son: tiempo de ciclo, tasa de riego de solución, altura de la pila y concentración de ácido en la solución. Estudios realizados (Padilla, Cisternas y Cueto, 2008) señalan que el tiempo de lixiviación y la altura de la pila son las variables que tienen mayor impacto en los beneficios económicos de la operación.

La Figura 3-1 muestra las distintas etapas involucradas en la lixiviación en pilas. En un estado estacionario, la pila es regada con una solución pobre con bajo contenido de cobre, denominada solución barren. La solución barren se enriquece con el cobre lixiviado de la pila y se dirige hacia una piscina de solución rica para ser enviada a la planta de extracción por solvente y electrowinning, donde se obtiene una solución pobre y cátodos de cobre. En la piscina de solución barren se añade agua fresca para reponer las pérdidas de agua del proceso, asociadas principalmente a la evaporación de agua en las piscinas y en la pila.



**Figura 3-1: Lixiviación en pilas**

Existen modelos analíticos (Mellado, Cisternas y Gálvez, 2013) que logran predecir los resultados de cinética y recuperaciones de la lixiviación a escala industrial. Estos métodos logran reproducir la respuesta metalúrgica del proceso y son utilizados para el diseño, operación y optimización del proceso.

Del mismo modo, existen modelos (Trujillo, Cisternas, Gálvez y Mellado, 2014) basados en la programación lineal, que permiten optimizar el proceso considerando distintas variables económicas externas, tales como el precio del cobre, costo de los reactivos y costos de operación en la pila. Estos modelos corresponden a una buena aproximación del negocio pero no abordan los distintos problemas operacionales y la variabilidad propia del material de alimentación al yacimiento.

### **3.3 HERRAMIENTAS DE LA GEOESTADÍSTICA Y EVALUACIÓN DE YACIMIENTOS**

#### **3.3.1 Conceptos generales**

Los autores Chilès y Delfiner (2012) definen la geoestadística como el estudio de fenómenos regionalizados, es decir que se extienden en el espacio y que presentan cierta continuidad espacial. Se intenta describir el fenómeno y su continuidad espacial a partir de información fragmentada, ya que se cuenta con un número acotado de muestras ubicadas espacialmente. Para describir estos fenómenos y sus variables regionalizadas asociadas, como por ejemplo la ley de mineral, se utiliza el concepto de función aleatoria.

En este contexto, se interpreta el valor de una variable regionalizada  $Z$  en un determinado sitio  $x$  como una realización de una variable aleatoria  $Z(x)$  en un dominio  $D$ , que representa el



espacio bajo el cual se desea realizar el estudio. El conjunto de variables aleatorias constituye una función aleatoria que está dada por:

$$Z = \{Z(x), x \in D\}$$

Las funciones aleatorias se caracterizan por una distribución espacial, formada por el conjunto de funciones de distribución de la siguiente forma:

$$F_{x_1, \dots, x_k}(z_1, \dots, z_k) = Prob\{Z(x_1) < z_1, \dots, Z(x_k) < z_k\} \forall z_1, \dots, z_k \in R$$

Las mediciones de los sitios muestreados se realizan sobre una pequeña fracción de la unidad de superficie o volumen que busca representar, por tanto el protocolo de la extracción de la muestra es sumamente importante ya que debe asegurar la representatividad de la muestra a analizar con respecto al origen de la muestra.

La unidad de superficie o volumen sobre el cual se realizan las mediciones de la variable regionalizada se denomina soporte, el cual en muchos casos es idealizado a un punto, pues es considerablemente menor que el soporte para el cual se realiza el estudio. Por ejemplo en el caso de aplicaciones mineras el soporte corresponde al tamaño del testigo de la perforación mientras que el soporte de interés corresponde a unidades de extracción minera.

Debido a que sólo se tiene una realización de la función aleatoria y ésta sólo es conocida en los puntos muestreados, no es posible realizar inferencia estadística en forma general. Para ello es necesario asumir algunas hipótesis adicionales como la estacionaridad, que postula que los valores que se encuentran en las distintas regiones presentan las mismas características.

Matemáticamente esta hipótesis postula que la distribución espacial de la función aleatoria es invariante por traslación, es decir, que las propiedades de un conjunto de datos no dependen de su posición absoluta en el espacio, sino que solamente de sus posiciones relativas entre sí.

Para describir las variables aleatorias se utilizan generalmente los momentos de su distribución. En este contexto se considera a  $Z(x)$  como una variable aleatoria en un punto  $x$ . Su momento de primer orden corresponde a la esperanza matemática y en general, es función de la posición  $x$ :

$$E\{Z(x)\} = m(x)$$

En geoestadística se consideran principalmente tres momentos de segundo orden que permiten establecer medidas de la continuidad espacial (o de la variabilidad espacial) de la variable de interés. Estos momentos son los siguientes:

- Varianza: Se define como el momento de segundo orden sobre la esperanza  $m(x)$  como se muestra en la siguiente ecuación.

$$Var\{Z(x)\} = E\{[Z(x) - m(x)]^2\}$$

- Covarianza: En caso que exista la varianza para las variables aleatorias  $Z(x_1)$  y  $Z(x_2)$  en los puntos  $x_1$  y  $x_2$ , entonces la covarianza entre estas variables existe y queda definida según siguiente ecuación.

$$Cov(Z(x_1), Z(x_2)) = E\{[Z(x_1) - m(x_1)][Z(x_2) - m(x_2)]\}$$

- Variograma: La función de variograma se define como la medida de varianza de los incrementos, y queda representada por la siguiente ecuación.

$$\gamma(x_1, x_2) = \frac{Var\{Z(x_1) - Z(x_2)\}}{2}$$

De las definiciones de varianza, covarianza y variograma se desprende que estas dependen simultáneamente de  $x_1$  y  $x_2$ , por lo cual se necesitarían muchas realizaciones de  $Z(x_1)$  y  $Z(x_2)$  para poder realizar la inferencia estadística, mientras que al asumir la estacionaridad, la media y la varianza (que son los momentos de primer y segundo orden, respectivamente) son independientes de la posición del espacio, y por tanto su valor queda definido por  $m$  y  $\sigma^2$ . En este contexto, el variograma queda descrito por la siguiente expresión:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} Var\{Z(x) - Z(x+h)\} = \frac{1}{2} E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\}$$

En otras palabras el variograma es el cuadrado de la diferencia esperada entre dos pares de datos medidos que se encuentren a una distancia  $h$  y al igual que la media y la varianza no depende de la posición absoluta entre los datos, si no de la posición relativa. El variograma corresponde a una medida de variabilidad entre los datos, dado que su valor aumenta cuando los datos son más diferentes entre sí.

Por otra parte, la covarianza se utiliza para medir la similitud entre los datos separados a una distancia  $h$ . Bajo la hipótesis de estacionaridad, su valor se encuentra definido por la siguiente expresión:

$$C(h) = E\{Z(x) * Z(x+h)\} - m^2$$

El valor de la covarianza es cero cuando los valores de los datos separados a una distancia  $h$  no se encuentran correlacionados. Para una distancia igual a cero, el valor de la covarianza es igual al valor de la varianza estacionaria.

$$\begin{aligned} C(0) &= E\{Z(x)^2\} - [E\{Z(x)\}]^2 \\ &= Var\{Z(x)\} = \sigma^2 \end{aligned}$$

Existe una relación entre el variograma y la covarianza para una distancia  $h$ , del mismo modo como intuitivamente existe una relación entre la variabilidad y la continuidad para una distancia  $h$ . Esta relación se establece a través de la siguiente fórmula:

$$C(h) = C(0) - \gamma(h)$$

El variograma corresponde a una medida de la variabilidad geológica con respecto a la distancia relativa entre las muestras, representando así la variabilidad espacial. Este variograma tiene tres elementos principales que son: la meseta, el alcance y el efecto pepita.

La meseta (valor que alcanza asintóticamente el variograma) corresponde a la varianza que se obtiene cuando no existe correlación entre los datos. El alcance corresponde a la distancia  $h$  a partir de la cual los datos dejan de mostrar correlación entre sí, siendo la distancia a la que se alcanza la meseta.

Por otra parte, el efecto pepita corresponde al valor del variograma a una distancia levemente superior al tamaño de la muestra, caracterizando la variabilidad a pequeña escala entre las muestras. Este concepto debe su nombre a la ocurrencia de pepitas de oro en un yacimiento, donde se puede encontrar una pepita de oro en cercanías de una muestra sin ninguna mineralización de oro, mostrando que existe variabilidad a distancias pequeñas.

Los variogramas pueden ser visualizados como un gráfico entre la distancia  $h$  y el valor del variograma para dicha distancia. En Figura 3-2 se puede apreciar un variograma con los elementos descritos anteriormente.

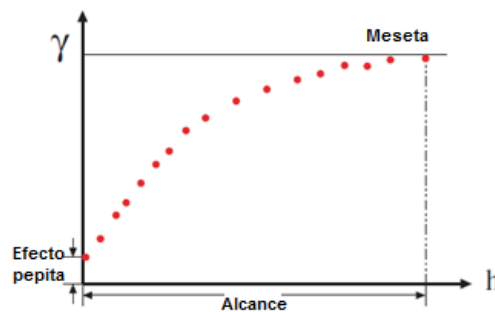


Figura 3-2: Variograma

### 3.3.2 Objetivos

En la industria minera el principal objetivo de la estimación de recursos es predecir tonelajes y variables de interés, como las leyes de especies con valor económico para su extracción mediante la actividad minera. La principal dificultad que se presenta es la representación de la variabilidad geológica y el desconocimiento del yacimiento, debido a que sólo se tiene información de un número limitado de muestras. Otro posible objetivo inicial de la estimación

de recursos es la caracterización de tendencias geológicas a gran escala en el yacimiento mediante modelos sencillos y replicables.

Existen dos tipos principales de estimación de recursos en un yacimiento, pudiendo ser una estimación global o local, dependiendo del propósito con el que se realiza la estimación.

Por un lado, la estimación global corresponde al modelo que se realiza con información que se ubica a gran distancia entre sí y que no tiene por finalidad la toma de decisiones con respecto a cada unidad del yacimiento, sino que pone énfasis en la predicción de los recursos recuperables totales del yacimiento. Este tipo de modelos es considerado para estimar de manera precisa grandes volúmenes o áreas a extraer durante un largo periodo de tiempo.

Por otro lado la estimación local tiene por finalidad la selección entre unidades más pequeñas, como es la selección entre estéril y mineral en yacimiento al momento de la extracción. Para esta estimación se cuenta con mayor cantidad de información que en el caso global, ya que se han realizado nuevos sondeos de perforación. En este caso la prioridad se encuentra en la exactitud y la precisión del modelo y no en los resultados globales de la estimación.

Un factor importante es que posterior a la estimación global existirá información adicional disponible que permitirá calcular estimaciones que son “correctas” en términos de valor esperado; esto es que el valor real de los recursos a extraer sea igual al valor estimado de dichos recursos.

El concepto que explica la necesidad de realizar estimaciones distintas dependiendo de la finalidad del modelo se denomina sesgo condicional y será explicado en las siguientes secciones.

### **3.3.3 Estimación de variables regionalizadas**

En esta sección se describen los principales métodos utilizados para la estimación de variables regionalizadas, como por ejemplo lo son las leyes de metales en un yacimiento.

- Métodos tradicionales

Dos métodos tradicionales son a menudo utilizados en las etapas iniciales de estudios de estimación de recursos, los cuales no se caracterizan por su precisión pero entregan de manera rápida y fácil un orden de magnitud de los recursos estimados. Adicionalmente, estos métodos pueden ser utilizados para la validación de los resultados obtenidos mediante otros métodos.

#### **Método de los polígonos**

Este método se basa en la idea que la cantidad de información de cada muestra es proporcional a su área o volumen de influencia. Para su cálculo es necesario calcular el área o volumen de influencia de cada muestra. El área de influencia se calcula de tal manera que cualquier punto contenido en el polígono se encuentra más cerca del sitio muestreado en el polígono que cualquier otro sitio muestreado. En este método cada polígono está caracterizado por el valor de la variable de interés contenido en el polígono. Este método es simple pero genera discontinuidades en la estimación. Otro inconveniente es que en las zonas poco muestreadas solamente una medición define el valor de un polígono de grandes dimensiones.

### **Método del inverso de la distancia**

Este método corresponde a un método de ponderación lineal, donde el valor estimado en un sitio  $x$  no muestreado corresponde a una suma ponderada de los valores de los sitios muestreados  $\{x_i, i = 1 \dots n\}$ . Esto se expresa de la siguiente forma:

$$Z^*(x) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Los pesos de los ponderadores  $w_i$  se obtienen considerando la distancia entre los sitios muestreados al sitio a estimar con la siguiente fórmula:

$$w_i = \frac{1}{c + d_i^w}$$

donde  $d_i$  es la distancia entre los sitios muestreados al sitio a estimar,  $c$  es una constante que se utiliza para disminuir el peso de los datos muy cercanos y  $w$  es un exponente que comúnmente se fija en dos o tres. Uno de los inconvenientes de este método es que no considera la redundancia entre los datos que se encuentran agrupados ni considera direcciones preferenciales de mineralización.

- Kriging

La estimación de recursos se puede realizar mediante la técnica de kriging, en la cual se utilizan los valores de los datos muestreados para definir el valor en otros puntos sin muestra considerando los siguientes aspectos:

- Cercanía entre los datos muestreados y el punto a estimar
- Redundancia de los datos
- Continuidad espacial de la variable.

El objetivo consiste en encontrar el valor de la variable de interés para los distintos datos considerando los aspectos previamente señalados. Como datos de entrada, utiliza los valores medidos de la variable regionalizada y un modelo variográfico, que mide el contraste entre los valores de las muestras en función de la distancia que los separa (Emery, 2011). El kriging es, por definición, el estimador lineal insesgado de varianza mínima. Existen algunas variantes considerando diferentes hipótesis y propósitos, dentro de los más importantes se encuentran el kriging simple (de media conocida) y kriging ordinario (de media desconocida).

Este modelo se trata de estimar los valores de la variable en función de los datos medidos utilizando la condición de insesgo y la condición de varianza mínima, realizando el cálculo como sigue.

$$Z^*(x) = a_k + \sum_{i=1}^n \lambda_i^k \cdot Z(x_i)$$

donde  $Z^*(x)$  representa el valor estimado en el sitio  $x$ ,  $a_k$  un factor de adición y  $\lambda_i^k$  son los ponderadores de los sitios con muestras  $x_i$ .

Luego para estimar el valor de la variable regionalizada en un punto es necesario estimar el valor de  $a_k$  y los ponderadores  $\lambda_i^k$ , los que se calculan considerando la condición de insesgo y de varianza mínima del error de estimación.

- Cokriging

Muchas veces existen varias variables de interés, pudiendo existir cierta correlación entre dichas variables, debido a que posiblemente son resultados del mismo fenómeno de mineralización. Un ejemplo de esto es la ocurrencia de diversas especies de interés.

Con el fin de incorporar la relación entre las variables estudiadas surge el cokriging, como una extensión del kriging al caso multivariable, permitiendo una estimación multivariable insesgada y de varianza del error mínima (Emery, 2011).

Este tipo de estimación utiliza la información de todas las variables consideradas para estimar la variable de interés, lo que permite, por ejemplo, incorporar mayor información para estimar variables que se encuentren sub muestreadas y que estén correlacionadas con otras variables con mayor información. No obstante, el tiempo de cálculo se ve incrementado considerablemente cuando el número de variables es muy grande.

Entre las propiedades del kriging y cokriging, se cuenta con la característica de realizar una interpolación exacta, es decir, para cada sitio muestreado  $i$  se tiene que:  $Z^*(x_i) = Z(x_i) \forall i$ . Además, la estimación mediante (co)kriging entrega la varianza del error de la estimación, la

cual es considerada una medida de precisión. Ésta sólo depende de la configuración geométrica de los datos y del modelo del variograma, y no de los valores de las muestras.

A pesar de ser el mejor estimador lineal insesgado, el (co)kriging junto a otros métodos de estimación por interpolación, genera suavizamiento en la estimación. Esto quiere decir que sobre estima los valores bajos de la variable y sub estima los valores altos, entregando un rango más estrecho de los valores estimados que el real, haciéndolo inapropiado cuando los valores extremos (por ejemplo la estimación de leyes altas) son relevantes.

Una de las propiedades deseadas en la estimación de recursos es la obtención de una estimación insesgada globalmente, es decir, que el error medio de estimación sea cero (en expresiones matemáticas, que el valor esperado del error sea cero). En otras palabras, que la ley media estimada es cercana a la ley media real.

No obstante, a pesar de que la estimación sea globalmente insesgada, puede ser sesgada si se aplica una condición. Este sesgo condicional ocurre cuando el valor esperado de la variable de interés es distinto al valor estimado al momento de aplicar una condición, como puede ser aplicar una ley de corte. Matemáticamente esto se expresa mediante la siguiente expresión:

$$E\{Z_V(x)|Z_V^*(x) = z\} \neq z$$

donde  $Z_V^*$  y  $Z_V$  representan los valores estimados y real de la variable de interés para cierto volumen  $V$  respectivamente. Un ejemplo de sesgo condicional ocurre cuando en bloques estimados sobre una ley de corte, la ley media estimada de una especie de interés no necesariamente coincide con la ley media real sobre dicha ley de corte.

El sesgo condicional puede ser reducido si la estimación se realiza considerando un gran número de muestras, generando estimaciones que son correctas en términos de valor esperado. Sin embargo, al considerar un gran número de datos que se encuentran distantes del sitio a estimar, se genera un suavizamiento que no sería aceptable para estimaciones realizadas con el propósito de tomar decisiones para cada unidad estimada.

Es así como Isaaks (2005) plantea lo que él denomina el oxímoron del kriging, que corresponde a que al realizar una estimación por kriging que minimice el sesgo condicional, necesariamente se está suavizando la estimación, debido a que para minimizar el sesgo condicional se debe aumentar el número de datos en la vecindad de búsqueda que es justamente lo que genera suavizamiento. El caso recíproco igual es cierto: para evitar el suavizamiento se genera sesgo condicional. Para reducir estos efectos Isaaks propone realizar dos estimaciones: una global, para conocer las características del yacimiento como un todo, y otra local utilizada para la selección estéril/mineral.

### 3.3.4 Cuantificación de incertidumbre

#### **Objetivo**

Las consecuencias del suavizamiento del kriging generan que el rango de los valores estimados es más estrecho que el rango de los valores reales. Esto puede inducir un sesgo al realizar operaciones no lineales (como por ejemplo, aplicar una ley de corte), además de no predecir adecuadamente la ocurrencia de valores extremos. Junto a lo anterior, el suavizamiento no reproduce correctamente la variabilidad en los sectores que no están densamente muestreados.

Luego el objetivo es generar instrumentos que repliquen la continuidad o variabilidad en el espacio de la variable de interés, sin un suavizamiento asociado, para poder cuantificar la incertidumbre asociada a las estimaciones.

#### **Simulaciones**

El objetivo de la simulación es generar valores que puedan ser considerados como realizaciones de una función aleatoria, que replique la variabilidad espacial definida por los datos.

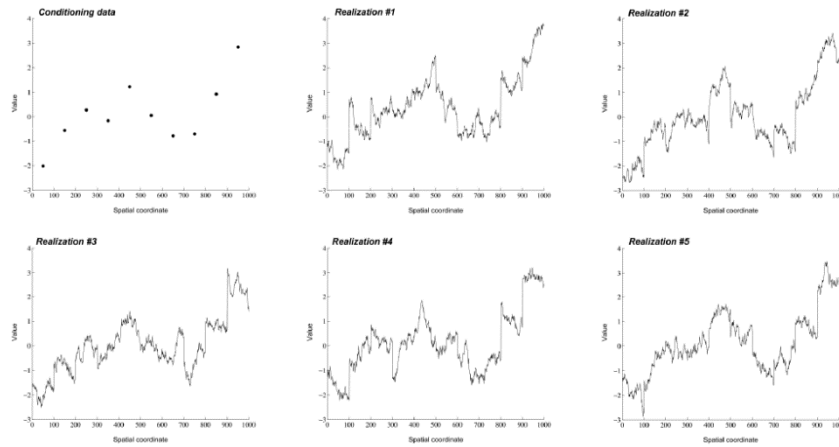
Adicionalmente, cada realización puede ser interpretada como una imagen de lo que “podría ser” el depósito, generando posibles escenarios que ayudan la toma de decisiones.

La principal diferencia entre el proceso de estimación mediante métodos de interpolación como el kriging y el de simulación radica en el objetivo para el cual se realiza. Por su parte, la estimación mediante kriging busca encontrar el mejor estimador  $Z^*(x)$  en el sentido que sea lo más próximo posible al valor real desconocido  $Z(x)$  tomando como criterios el insesgo del valor estimado y la minimización de la varianza del error de estimación. Esto no asegura, sin embargo, la reproducción de la variabilidad espacial de  $Z(x)$ . Las simulaciones, por el contrario, reproducen la variabilidad espacial de la variable pero no son precisas, ya que la diferencia entre el valor simulado y el real no es de varianza mínima.

#### **Tipos de simulación**

Existen dos tipos principales de simulaciones: las condicionales y las no condicionales. Las simulaciones condicionales son aquellas que restituyen los valores de los datos en los sitios muestreados, tal como se muestra en la Figura 3-3, donde se puede observar que el valor simulado coincide con el valor de los datos para cada realización y cada sitio muestreado, mientras que las no condicionales sólo reproducen la variabilidad de los datos sin replicar los valores de los sitios muestreados.





**Figura 3-3: Datos condicionantes y simulaciones condicionales**

### **Simulación de variables continuas**

Para variables medidas en escalas continuas, el problema generalmente se reduce a simular una función aleatoria multigaussiana  $Y(x)$  estacionaria, de media cero y varianza uno. Esta función aleatoria se encuentra caracterizada por su función de covarianza  $C(h)$ .

Existen diversos algoritmos computacionales de simulación, entre los cuales se encuentran los siguientes (Chilès y Delfiner, 2012):

- Simulación secuencial: Este algoritmo simula un sitio a la vez considerando los sitios muestreados y los valores simulados anteriormente.
- Simulación mediante descomposición matricial: Este método utiliza una descomposición de la matriz de varianza covarianza para realizar la simulación. Es un método teóricamente correcto, es decir sin aproximaciones. Su principal inconveniente radica en la dificultad para simular un gran número de sitios.
- Simulación mediante bandas rotantes: Este método considera tomar un gran número de rectas en el espacio, en cada una de las cuales se realiza una simulación, cuyo resultado se esparce hacia el espacio. Para entregar resultados satisfactorios es necesario considerar una gran cantidad de rectas en el espacio.
- Muestreador de Gibbs: Este método iterativo se encuentra basado en la teoría de cadenas de Markov.

Cabe destacar que no todos estos métodos de simulación entregan simulaciones condicionales de manera directa, por lo que es necesario realizar el condicionamiento mediante una etapa adicional.

Este condicionamiento se genera al realizar un kriging simple a partir de los datos condicionantes, que se obtiene al plantear la siguiente ecuación:

$$Y_{SC}(x) = Y^{KS}(x) + [Y_S(x) - Y_S^{KS}(x)]$$

donde  $Y^{KS}(x)$  es el kriging simple a partir de los datos condicionantes,  $Y_S(x)$  corresponde a una simulación no condicional y  $Y_S^{KS}(x)$  es el kriging simple de la simulación no condicional a partir de los valores en los sitios con datos.

La ventaja de este método es que permite condicionar todas las realizaciones con un sólo kriging (o cokriging, en el caso multivariable), ya que los ponderadores de kriging no dependen de los valores simulados.

### **Simulación de variables categóricas**

A continuación se describen los principales métodos utilizados para la simulación de variables categóricas con el fin de cuantificar su incertidumbre:

- Simulación secuencial de indicadores: Luego de transformar los valores de la variable categórica a indicadores, estos pueden ser simulados de manera secuencial. Sin embargo, esta metodología no considera las relaciones de contacto entre las distintas unidades.
- Simulación Gaussiana truncada: Este método de simulación consiste en truncar una función aleatoria multigaussiana y permite considerar las relaciones de contacto entre las distintas unidades. A pesar de esto, este método no logra realizar buenos ajustes cuando no existen jerarquizaciones claras entre las distintas categorías. El inconveniente al trabajar con más de dos unidades es que no se puede modelar correctamente los contactos entre unidades no jerarquizadas dado que no existe mayor control sobre los variogramas de las distintas unidades.
- Simulación plurigaussiana: Este método corresponde a una extensión del método anterior, pero con distintas funciones aleatorias multigaussianas, entregando al usuario la flexibilidad de poder definir el número de funciones aleatorias, los variogramas y la truncación o representación preliminar de cómo se distribuye el yacimiento en el espacio, permitiendo incorporar esta última información como datos “blandos”. Mediante la regla de truncación, este método permite replicar los contactos y la continuidad entre distintas unidades sin que exista una jerarquización clara entre estas unidades (Armstrong et al, 2011)

### **Metodologías para cuantificar incertidumbre**

En los yacimientos es posible encontrar tanto variables continuas como variables categóricas, siendo posible tomar como ejemplo las leyes de especies de interés y el tipo de roca o de mineralización. La cuantificación de la incertidumbre en estas variables se puede realizar de las siguientes formas:

- Independiente: Esta metodología es la más simple y considera cuantificar la incertidumbre de cada tipo de variables de manera independiente. En este caso la incertidumbre de las variables continuas se cuantifica con un método, por ejemplo modelos multigaussiano, mientras que la incertidumbre de las variables categóricas se cuantifica con un modelo para ese tipo de variables. La desventaja de esta metodología es que no incorpora los datos de una variable para cuantificar la incertidumbre de la otra variable de interés, eliminando todo posible control de las variables categóricas sobre las variables continuas.
- Cascada: Esta metodología corresponde a un enfoque jerarquizado donde primero se cuantifica la incertidumbre de las variables categóricas para luego cuantificar dentro de cada unidad simulada la incertidumbre de las variables continuas. Esta metodología es más completa que la anterior y tiene como ventaja que incorpora el control geológico (asociado a las variables categóricas) para la estimación o simulación de las leyes (variables continuas). El inconveniente de esta metodología es que la incertidumbre asociada a las leyes suele no considerar la información de otras unidades geológicas, ya que el análisis se realiza por cada unidad de manera independiente, ignorando datos de otras unidades y no aprovechando toda la información disponible. Adicionalmente, esto genera una discontinuidad abrupta de la ley en las zonas de contacto entre las unidades geológicas que no necesariamente se explica por un control geológico.
- Conjunta: En los últimos años algunos autores como Emery y Silva (2009), Emery y Cáceres (2010) y Maleki y Emery (2014) han realizado estudios donde se utiliza una cosimulación conjunta de tipos de roca y leyes para cuantificar la variabilidad en el yacimiento. Esta metodología considera realizar un análisis variográfico conjunto de modo de correlacionar la dependencia entre los distintos tipos de variables, obteniendo resultados que presenten una transición gradual de leyes y que captura en los variogramas toda la información disponible del yacimiento.

### **Metodologías para definición de dominios geológicos**

La definición de dominios geológicos de estimación o simulación se realiza atendiendo a criterios estadísticos, geológicos y de continuidad espacial. Usualmente la definición de los distintos dominios se realiza al considerar estos criterios a una variable de interés, mientras que en las otras variables estos criterios puedan o no aplicar. Mery (2016) realizó un estudio considerando distintos dominios para cada variable de interés para simulaciones en un yacimiento de hierro e involucrando las funciones de covarianza entre las distintas unidades de estimación.

Otro aspecto que usualmente se considera en las simulaciones o estimaciones es el tratamiento en la frontera entre distintos dominios o unidades geológicas. Usualmente para fronteras blandas (tal que la variable de interés presenta una transición gradual entre una

unidad y otra) se suele considerar los datos de ambas unidades para estimar o simular valores en la frontera, incluso se puede generar una unidad de traslape entre ambas unidades.

### **3.4 ALCANCES DE LAS HERRAMIENTAS DE GEOESTADÍSTICA**

Deutsch (2013) plantea que las estimaciones mediante kriging o cokriging generan sesgo cuando están siendo utilizados para la estimación de variables no aditivas, mientras que las simulaciones permiten disminuir el sesgo para la estimación de variables no aditivas, además de modelar la variabilidad a pequeña escala y ser un buen método para transferir incertidumbre local a incertidumbre en volúmenes relevantes para el negocio minero.

Junto a lo anterior, el autor plantea que los principales pasos que deben ser considerados para la realización de modelos geometalúrgicos son los siguientes:

- Determinar el propósito y la metodología del estudio
- Explorar el comportamiento de la información y las variables y determinar cuáles van a ser espacialmente modeladas
- Construir un modelo 3D y realizar un procesamiento de datos apropiado al propósito del estudio.

Del mismo modo, el autor enumera los desafíos y limitantes para las técnicas geoestadísticas tradicionales al momento de ser utilizadas para la generación de modelos geometalúrgicos. Entre estas limitantes se encuentran las siguientes:

- Funciones de transferencia

Uno de los desafíos de este tipo de modelos es la generación de funciones que permitan asociar el comportamiento de variables “estáticas” del yacimiento, como lo son las leyes, a variables “dinámicas” que son resultados del desempeño del material en algún proceso de reducción o concentración. Junto a lo anterior, es necesario considerar que las pruebas realizadas para medir el comportamiento del depósito a determinados procesos son sumamente costosas, por lo tanto no existe una gran cantidad de mediciones de estas pruebas, cuando se compara, por ejemplo, con la cantidad de mediciones de leyes en el yacimiento.

En términos generales, la recomendación para este tipo de escenarios es generar un modelo mediante simulaciones de las variables “estáticas” o asociadas a las propiedades del mineral y luego las variables “dinámicas” o aquellas que están asociadas al comportamiento del mineral pueden ser unidas mediante una función de transferencia. Esta función puede ser un

modelo de regresión multivariable, técnicas más avanzadas de data mining, modelos no paramétricos, entre otros.

Es necesario estar consciente de la influencia que tienen tanto la geología como otras propiedades del material para generar información confiable. Considerar gran cantidad de realizaciones permite generar distintos escenarios de variabilidad del modelo.

La importancia del estudio preliminar de las variables asociadas a las propiedades del mineral radica en que permite identificar y remover variables que tengan poca correlación con las variables dinámicas que se desea modelar.

Otro problema asociado a la función de transferencia es estimar la sensibilidad de la predicción con respecto a cada variable. Una forma de abordar este problema es variar un parámetro a la vez con los demás constante. Sin embargo, este procedimiento no permite capturar variabilidad real en el yacimiento debido a las complejas interacciones entre las variables.

- Variables no aditivas

A diferencia de las leyes, donde la ley media entre dos o más bloques del mismo tamaño y misma densidad es la media de la ley de dichos bloques, las variables de interés geometalúrgico como recuperaciones, consumo de energía, unidades geotécnicas, dureza del mineral, entre otras, no tienen un comportamiento aditivo.

Asumir aditividad entre las variables que geológicamente no tienen un comportamiento aditivo induce un sesgo en el modelo. Realizar kriging a variables no aditivas puede ser útil para visualizar tendencias en el espacio, sin embargo, estos resultados no debiesen utilizarse como un modelo cuantitativo.

Existen dos principales soluciones para evitar este sesgo: la primera es realizar múltiples simulaciones, dado que el kriging que se considera en la realización de las simulaciones se realiza para el mismo soporte volumétrico que los datos. El problema de este enfoque es el esfuerzo adicional que se requiere para realizar estas simulaciones y manejar esa información al soporte deseado.

La otra posible solución consiste en estimar una regla de calibración de la variable que se desea estimar. Esta regla de calibración puede generar que se trabaje con variables que operan linealmente. Sin embargo, para realizar esto es necesario tener mayor conocimiento de la fenomenología que se intenta describir, además de tener una mayor cantidad de información para calibrar el modelo.

- Número de datos

A medida que se desea describir el comportamiento del yacimiento de mejor manera, la cantidad de información con la que se desea trabajar aumenta considerablemente, ya que aumenta el número de datos medidos y de variables de interés. Por ejemplo ya no se consideran solamente las leyes de metales como variables de interés, sino que también se consideran mineralogías, asociación liberación del mineral, variables asociadas a la conminución y a las etapas de concentración de los minerales. Esto lleva a pasar de trabajar con un número reducido de variables (por ejemplo, diez) a abordar problemas con más de cien variables.

El problema que esto genera es la complejidad de entender y visualizar todas las relaciones bivariantes presentes en el estudio, lo cual es necesario para la generación de modelos variográficos utilizados en la estimación mediante cokriging o en los algoritmos de cosimulación.

Dependiendo del propósito del estudio, en muchos casos algunas variables pueden ser removidas, eliminando información que aporta marginalmente al estudio y evitando un sobreajuste del modelo. Para estos fines es posible definir un umbral en el valor de correlación entre las variables a partir del cual las variables dejen de ser relevantes.

Un enfoque para determinar cuáles son las variables relevantes en el estudio es considerar la matriz de correlación entre variables. No obstante, esta matriz no muestra la relación espacial entre las variables ni muestra cómo todas las variables se comportan en conjunto. Otro enfoque radica en utilizar técnicas de escalamiento multidimensional (MDS, por sus siglas en inglés), que asocia coordenadas a las variables, las cuales se encuentran calculadas mediante la correlación entre las variables, y permite observar la relación entre las variables como un conjunto.

Un último enfoque que es usualmente considerado para reducir el número de variables, es agruparlas o combinarlas en nuevos grupos secundarios de variables. En este contexto, el análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) permite generar variables no correlacionadas entre sí (factores), como una combinación lineal entre las variables originales. Además se indica cual es el porcentaje de la varianza que explica cada factor. El problema de este enfoque es que no considera la espacialidad de los datos.

Para superar esta dificultad, surge Desbarats (2000) la metodología MAF (minimum/maximum autocorrelation factors) como una extensión de PCA que permite considerar la espacialidad entre los datos para una distancia dada.

La principal ventaja de PCA y MAF es que no sólo permiten reducir el número de variables, sino que las nuevas variables no se encuentran correlacionadas y por tanto pueden trabajarse de manera independiente.

- Variables faltantes

Las técnicas para eliminar la correlación entre variables en PCA y MAF requieren que todas las variables se encuentren medidas en todos los sitios muestreados. Sin embargo, usualmente existen variables que se encuentran más densamente muestreadas que otras, como lo son, por ejemplo, las variables de medición de leyes en relación a las pruebas de conminución.

Al remover los sitios donde no todas las variables se encuentren muestreadas se elimina gran parte de la información y el modelo que se puede generar a partir de esto corresponde a un modelo más pobre y limitado que el que se podría obtener considerando toda la información.

La solución a este problema es reemplazar los datos faltantes por nuevos datos, lo que permite tener una base de datos completa. Lo anterior se puede realizar de varias formas, pero nunca debe ser utilizando valores constantes, ya que esto altera la relación espacial entre las variables y por tanto los métodos de kriging y simulación no podrán reportar fehacientemente la incertidumbre asociada.

Para realizar una correcta inserción de los valores sin estimar es necesario realizar técnicas estocásticas, las cuales consideran la correlación espacial con la información que ya se posee. Los enfoques más utilizados son las simulaciones Gaussianas y adaptaciones del muestreador de Gibbs.

- Datos composicionales

En el estudio de yacimientos existen variables composicionales, que deben ser cantidades mayores que cero y cuya suma debe ser uno (pueden ser las proporciones de unidades mineralizadas). La restricción usual en los modelos de recursos es que la ley debe estar entre 0 y 100%. Sin embargo, las nuevas restricciones de las variables composicionales presentan nuevos desafíos ya que no son parte de los modelos convencionales y existen complejas relaciones que deben cumplirse entre las distintas variables. Un ejemplo de esto es cumplir mediciones en ley de todos los elementos presentes en una muestra de manera que sea consistente con la composición mineralógica de la muestra.

Un posible enfoque propuesto por Deutsch (2013) para solucionar este problema es considerar una variable referencial y que las demás sean estimadas y modeladas mediante razones con

respecto a la variable de referencia. Realizar este razonamiento de manera sucesiva obliga a las variables a sumar uno.

Otro enfoque para este problema es utilizar el logaritmo de las razones. Sin embargo, existe un problema adicional, ya que ninguna de las variables medidas puede tener un valor cero, ya que se indefiniría el valor del logaritmo. El principal problema es que trabajar con los logaritmos de las razones generar valores que no son aditivos y, por tanto, no pueden ser trabajados mediante kriging, ya que inducirían un sesgo, por tanto las estimaciones mediante kriging solo tendrían un carácter referencial del comportamiento espacial de la variable de interés. Deutsch (2013) señala que, en estos casos, es más conveniente trabajar con valores que no cumplan las características composicionales de las variables que con estimadores que generen resultados sesgados.

- Información que no corresponde al mismo dato

Para el caso de estudios de variables geometalúrgicas, es frecuente encontrar muestreo heterotópico, es decir, tener variables que no estén medidas en los mismos sitios del espacio. El problema de este tipo de muestreo es que no permite realizar gráficos cruzados ni calcular coeficientes de correlación.

Una posible solución es considerar tolerancia espacial pero esto, junto con el efecto pepita, puede generar distorsiones en los gráficos cruzados.

En muchos casos se puede considerar un cokriging tradicional, donde las covarianzas directas de cada variable son calculadas de la manera usual y las covarianzas cruzadas son calculadas para las distancias permitidas por los datos, luego todas las covarianzas son ajustadas por un modelo variográfico tradicional. Otra alternativa es utilizar simulaciones secuenciales, considerando primero la variable más abundante y luego las menos abundantes. Una última alternativa es realizar simulaciones que eliminen el muestreo heterotópico, generando una base que permita realizar PCA o MAF.

- Relación compleja entre variables

Las variables geológicas son el resultado de fenómenos que no siempre pueden ser explicados mediante relaciones lineales y modelos multivariantes donde sólo se tiene información de algunos sitios muestreados. Realizar kriging de cada variable puede indicar tendencias a gran escala, pero para obtener representaciones de la variabilidad a pequeña escala es necesario considerar simulaciones. Estas simulaciones usualmente son realizadas mediante técnicas que consideran distribuciones Gaussianas de las variables. Sin embargo, las variables entre sí no siempre cumplen una distribución bigaussiana o multigaussiana.



## 4 METODOLOGÍA

El objetivo principal de este estudio es realizar una cuantificación de la incertidumbre del consumo de ácido en un yacimiento de cobre, involucrando la variabilidad de las distintas unidades geológicas que controlan su distribución. De igual manera el objetivo es incorporar la información disponible de variables que se encuentran densamente muestreadas en el yacimiento y que presentan relación con el consumo de ácido.

En este contexto, se considera un modelo jerárquico de simulación, primero definiendo cuál es la variable geológica que controla la distribución del consumo de ácido y luego generando distintos escenarios posibles de la distribución y comportamiento espacial de dicha variable. Finalmente, se puede generar distintas simulaciones de la distribución del consumo de ácido en el yacimiento.

Los escenarios de simulación del consumo de ácido se construyen considerando dos criterios distintos para la delimitación de las fronteras entre las distintas unidades geológicas. El primero es un enfoque que considera definir distintas unidades con fronteras duras. La limitación de este enfoque radica en el caso de unidades que corresponden a una unidad de transición entre dos unidades que presenten un contacto duro entre sí. La manipulación de las unidades se hace más compleja, sobre todo cuando se consideran distintas unidades para distintas variables, en lugar de una definición de unidades que afecten a todas las variables. El segundo escenario de delimitación de las unidades a simular considera que una unidad de transición puede aportar la información para la estimación o simulación de la variable de interés en otras unidades.

La metodología de estudio es la siguiente:

- 1) Desarrollar una revisión bibliográfica de los estudios relevantes a la estimación geoestadística de consumo de ácido.
- 2) Desarrollar un análisis exploratorio de los datos de sondajes, detectando posibles anomalías en la base de datos. El desarrollo del análisis exploratorio también permite detectar la correlación entre las distintas variables, zonas de concentración de mediciones, zonas de mayor o menor ley, entre otros aspectos. Además permite detectar la presencia y magnitud del muestreo preferencial y la heterotopía en la base de datos.
- 3) Determinar cuál de las variables categóricas en el yacimiento tiene mayor control sobre la distribución de las variables de interés.
- 4) Utilizando la caracterización geológica construir un modelo interpretado a soporte de bloque que represente la distribución espacial de la variable categórica elegida. Como no se cuenta con un modelo geológico interpretado asociado al yacimiento se decide construir

uno a partir de las caracterizaciones geológicas para la variable que controla la distribución de las variables de interés. Para ello se realiza un kriging de indicadores de la variable de interés, considerando los siguientes pasos:

- Codificación de la variable en indicadores.
- Análisis variográfico de los indicadores.
- Realización de kriging de los indicadores.
- Estandarización de los resultados, los que son interpretados como la probabilidad de un bloque de ser de cierta unidad geológica.
- Validación del modelo utilizando una estimación mediante frecuencia por bloque.

5) Utilizando la información de la caracterización geológica, realizar una simulación de la variable categórica de interés. Para realizar esto es necesario modelar el contacto entre las distintas unidades, posteriormente modelar la continuidad geológica y luego realizar la simulación considerando la información condicionante. El objetivo de la simulación es generar distintos escenarios posibles del yacimiento con respecto a la variable categórica que controla la distribución de las especies de interés, para ello se realiza una simulación plurigaussiana considerando los siguientes pasos:

- Definir regla de truncación y proporciones de unidades geológicas.
- Análisis variográfico de las unidades.
- Validación visual.
- Cálculo de la probabilidad de los bloques de pertenecer a cada unidad.

6) Utilizando la información de los sitios muestreados, realizar una simulación conjunta de las variables de interés (consumo de ácido y carbonato) sin considerar un traslape o unidades de transición entre las distintas unidades. El objetivo de la cosimulación es generar escenarios de distribución de las variables de interés en el yacimiento, considerando la información disponible del muestreo de carbonato para las simulaciones de consumo de ácido. Para construir las realizaciones se considera el método de bandas rotantes, generando una realización para cada escenario de unidades geológicas obtenido por las simulaciones plurigaussianas en el paso anterior. Para realizar esto se aplican los siguientes pasos:

- Definición de los dominios a simular para las distintas variables
- Anamorfosis de las variables de interés, es decir, transformación de variables con distribución univariable Gaussiana.

- Verificación de la hipótesis de bigaussianidad de las variables transformadas.
  - Análisis variográfico de las variables de interés en los distintos dominios.
  - Realización de las cosimulaciones mediante bandas rotantes.
  - Condicionamiento a los datos.
  - Anamorfosis inversa.
- 7) Utilizando la información de los sitios muestreados, realizar una simulación conjunta de las variables de interés (consumo de ácido y carbonato) considerando un traslape entre las unidades geológicas que se encuentren relacionadas mediante un tipo de frontera blando.

Para realizar esto se siguen los mismos pasos anteriores, con excepción que se realizan considerando unidades que traslapan, en otras palabras, permitiendo que un dato se encuentre en más de una unidad.

- 8) Para la validación del modelo se consideran técnicas usuales de validación, como lo es la metodología jack-knife. Para la validación del modelo se considera la capacidad de reproducir los datos, es decir que los valores de los datos simulados repliquen de la mejor forma posible los datos muestreados.
- 9) Evaluar y comparar los resultados entre ambos modelos de simulación, considerando el efecto de incluir traslapes en las distintas unidades.

Para realizar la comparación de resultados es necesario determinar cuál es el efecto que tiene considerar distintos variogramas para los dos modelos de simulación y cuál es el efecto que tiene en el traslape entre las distintas unidades en las simulación, en particular si existen diferencias considerables en las variables simuladas en la frontera de las distintas unidades.

## 5 CASO ESTUDIO

### 5.1 ANTECEDENTES

Para el desarrollo del caso de estudio se considera un sector de la base de datos de Minera Antucoya. El proyecto Antucoya se ubica en la Región de Antofagasta, en las comunas de Mejillones y María Elena. Específicamente, el yacimiento se sitúa a 125 km al Noreste de Antofagasta a una altura aproximada de 1.700 m.s.n.m. La Figura 5-1 muestra la ubicación del proyecto Antucoya.



**Figura 5-1: Ubicación Antucoya**

Las reservas del yacimiento se estiman en 635,8 millones de toneladas de mineral con una ley media de 0,35% de cobre total, lo que permitirá una producción promedio anual de aproximadamente 85000 toneladas de cobre fino.

Antucoya corresponde a una mina de cobre que considera la extracción de los minerales oxidados del yacimiento mediante una operación a cielo abierto. El proceso considera dos líneas de tratamiento, la primera corresponde a una lixiviación de material proveniente de la mina (ROM) y la segunda es una planta de chancado de tres etapas, lixiviación de cobre en pilas, para posteriormente obtener cátodos de cobre a través de las etapas de extracción por solventes y electro obtención.

Dado que Antucoya es un yacimiento de baja ley, el margen de error para realizar su extracción y procesamiento de manera rentable es bajo. En este contexto, conocer con mayor profundidad las características del yacimiento mediante modelos geometalúrgicos, permite predecir los resultados de los procesos de producción y los costos de procesamiento, reflejados por ejemplo en la estimación del consumo de ácido en la lixiviación, para con esta información realizar una planificación minera considerando los consumos de ácido asociados. Para fijar ideas, de acuerdo a estudios realizados por Minera Antucoya, el consumo de ácido

estima en 12 g/t para la lixiviación de material ROM y 20 g/t para el material chancado. Estos consumos corresponderían a un 20% del costo de operación, luego el conocimiento de esta variable es de gran impacto en la rentabilidad del proyecto.

## **5.2 GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO**

Según lo estipulado por Arellano (2003), el sector en el que se encuentra el proyecto Antucoya ha sido estudiado desde inicios del siglo XX mediante piques superficiales y calicatas, los cuales indicaban la presencia de material oxidado con contenido de cobre. Sin embargo, las leyes muestreadas en ese entonces no eran atractivas ni competitivas para la época. En el sector donde se encontraban las mejores leyes se instaló la operación Buey Muerto, la que de manera intermitente ha operado en el sector desde ese entonces.

Hacia finales de 1959 se realizaron programas de exploración mediante la excavación de zanjas. Como resultado de estos programas se mostraron pocos afloramientos, confirmando la presencia de material oxidado que era poco rentable. A partir de estos estudios se concluyó que el yacimiento correspondía a un pórfido “mal desarrollado”.

En 1995 el propietario de la concesión, la empresa SQM, inició un nuevo programa de exploración, lo que entregó información para definir los rasgos geológicos de la superficie de Antucoya mediante estudios de la constitución litológica, alteración hidrotermal y esquema estructural. Basado en esta información en 1997 se concluyó que el yacimiento correspondía a un pórfido cuprífero.

El pórfido cuprífero Antucoya tiene una extensión aproximada de 1.6 km de largo por 1 km de ancho. Gran parte del yacimiento se encuentra cubierto por material de depósitos aluviales y coluviales del Terciario inferior-Cuaternario.

El pórfido se encuentra ubicado en la intersección de dos sistemas estructurales: el Sistema Falla Atacama, compuesto por un sistema de lineamientos norte-sur, y el Sistema Falla Buey Muerto, siendo el primero más importante que el segundo.

### **5.2.1 Mineralización**

La mayoría de los pórfidos cupríferos que se encuentran expuestos a procesos supérgenos presentan una zonación mineralógica vertical, caracterizada por una zona superior lixiviada, seguida de una zona de óxidos, una zona de enriquecimiento secundario y finalmente una zona de sulfuros primarios.

Siguiendo estas directrices, la mineralización de Antucoya también posee una zonación vertical, caracterizada por una zona lixiviada en la parte superficial, bajo la cual se ubica una

zona oxidada que alcanza una profundidad promedio de 150 metros, la cual es seguida por una zona mixta, en la cual coexisten óxidos y sulfuros, con una profundidad promedio de 300 metros. Los sulfuros supérgenos, por su parte, no se encuentran muy desarrollados. Finalmente se encuentra una zona primaria.

La zona lixiviada se encuentra inmediatamente bajo una zona de gravas. En esta zona abundan los compuestos hidratados de hierro, entre los cuales se distinguen la jarosita, hematita y goethita. Adicionalmente la zona lixiviada se asocia a las rocas silicificadas, con óxidos de cobre y manganeso que aparecen de forma aislada.

La zona lixiviada alcanza un espesor de 5 metros en la parte central del yacimiento y 300 metros en los bordes, afectando principalmente a la roca de caja andesítica, aprovechando zonas de mayor fracturamiento y contactos litológicos.

La zona de material oxidado conforma cuerpos elongados de dirección noreste, donde el tipo mineralógico predominante es la brochantita y en menor proporción coexisten atacamita, crisocola, malaquita, copper wad y arcillas de cobre. Los minerales oxidados se encuentran principalmente asociados a rocas con alteración cuarzo-sericítica y potásica, y su ocurrencia se presenta en el relleno de fracturas y en diseminados de feldespato potásico y biotitas. La brochantita ocurre en fracturas, en forma de pequeñas venillas, y diseminadas.

La zona mixta se caracteriza por la coexistencia de minerales oxidados, tal como la brochantita, y de sulfuros, principalmente calcopirita y pirita. Estos minerales se distribuyen en cuerpos elongados y en sentido noroeste, la profundidad es en promedio 400 metros. La brochantita ocurre tanto en forma diseminada como en fracturas, mientras que la calcopirita ocurre principalmente en forma de vetillas y de manera secundaria de forma diseminada, con una asociación menor a la pirita.

La coexistencia de minerales oxidados y sulfurados podría ser explicada por las variaciones del nivel freático, producto de los movimientos verticales de bloques.

La zona de sulfuros secundarios corresponde a una zona pobremente desarrollada, donde sólo es posible reconocer minerales como la calcosina, covelina y bornita al nivel de trazas o como minerales de reemplazo. A diferencia de los pórfidos tradicionales, el pórfido Antucoya no muestra una zonación clara en la que exista una zona inferior con covelina y una superior con calcosina. La explicación para este nivel de desarrollo de la zona de enriquecimiento recaería en el brusco descenso del nivel freático, lo que no permitió un desarrollo en esta zona.

La mineralización del tipo hipógena se reconoce a partir de los 380 metros de la superficie en la parte central del yacimiento. Los sulfuros primarios principales son calcoprita y piritita, mostrando también la presencia en trazas de bornita y molibdenita.

### 5.3 ESTUDIO EXPLORATORIO DE DATOS

Se cuenta con una base de datos que consta de muestras de sondajes de exploración (compositadas en promedio a un largo de 8 m), con información sobre las leyes de carbonato y mediciones de consumo de ácido. Las leyes de carbonato se encuentran expresadas en porcentaje en peso, mientras que las mediciones de consumo de ácido se expresan en kilogramos de ácido por tonelada.

Por otro lado, se cuenta con una caracterización geológica según, litología, alteración, mineralogía y tipo de roca, siendo esta caracterización más numerosa que las mediciones de leyes.

Los sitios muestreados se encuentran ubicados entre las coordenadas de la Tabla 5-1.

**Tabla 5-1: Ubicación de muestras**

Parámetro	Unidad	Este	Norte	Cota
Mínimo	[m]	3700.2	4206.7	1300.0
Máximo	[m]	4499.8	4800.0	1694.8
Rango	[m]	799.6	593.2	394.8

Los filtros considerados para la limpieza de la base de datos fueron los siguientes:

- Se consideraron datos duplicados los que se encontraban a menos de 2 metros de distancia.
- No se consideraron datos que no tuvieran caracterización geológica en alguna variable (litología, alteración o mineralización).
- Se considera un valor umbral máximo de 150 kg/t para el consumo de ácido y 7% para el carbonato, correspondiente a valores considerados extremos según la industria.
- Se realiza un desagrupamiento de datos para dar mayor representatividad a los sectores menos muestreados y restar influencia a los sectores más densamente muestreados. Esto se realiza asignando un ponderador en función de la representatividad de la muestra en un volumen determinado del yacimiento.
- Se eliminaron datos cuyos valores de consumo de ácido o carbonato eran negativos.
- Debido a que no existe un carácter composicional de los datos, no hay una relación aditiva entre las leyes de carbonato y los valores de consumo de ácido.

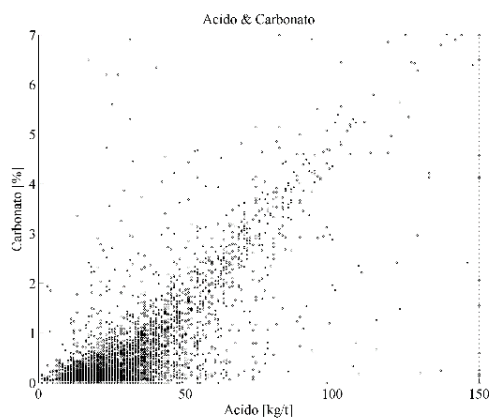
En la Tabla 5-2 se muestran las estadísticas globales desagrupadas de las dos variables

estudiadas, donde se aprecia el muestreo heterotópico en el yacimiento, ya que existe un mayor número de mediciones de leyes de carbonato que mediciones de consumo de ácido.

**Tabla 5-2: Estadísticas globales**

Parámetro	Ley de carbonato [%]	C. de ácido [kg/t]
Número de datos	8284	4764
Media	0.67	31.23
Varianza	0.94	472.83
Mínimo	0	1
1-cuantil	0.12	17
Mediana	0.28	25
3-cuantil	0.79	38
Máximo	7	150

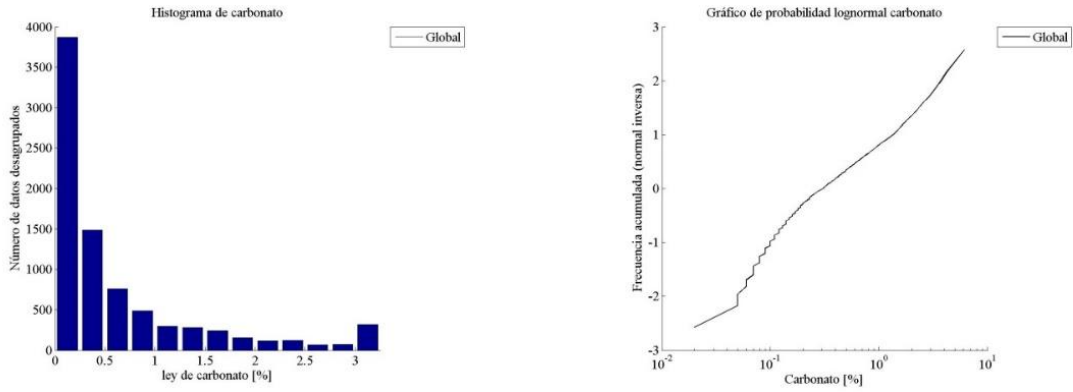
El coeficiente de correlación entre ambas variables es de 0.72, por tanto la variable más muestreada, la ley de carbonato, aportaría información para la estimación de la variable menos muestreada, consumo de ácido. La Figura 5-2 muestra un gráfico de dispersión entre ambas variables.



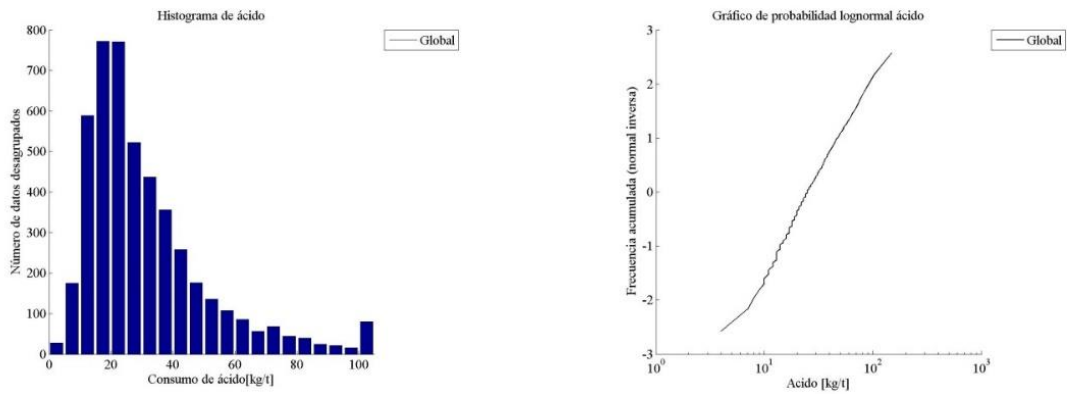
**Figura 5-2: Dispersión entre ley carbonato y consumo de ácido**

A continuación (Figura 5-3 y Figura 5-4) se muestran los histogramas desagrupados de las variables estudiadas junto a los respectivos gráficos de probabilidad lognormal.



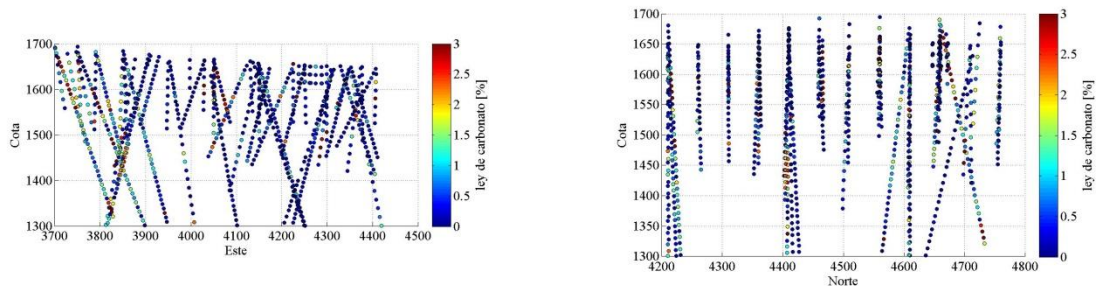


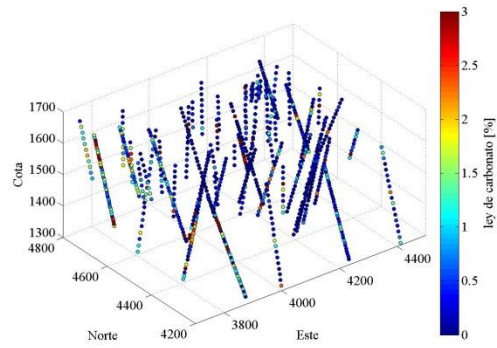
**Figura 5-3: Histograma y probabilidad lognormal – ley de carbonato**



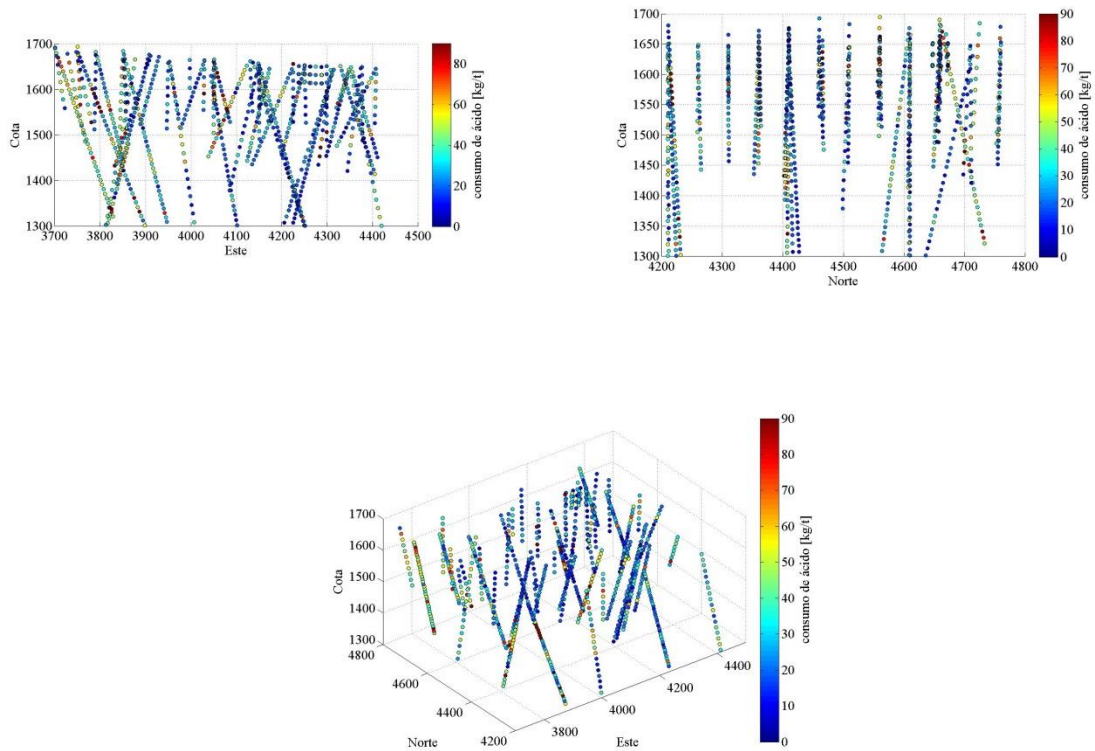
**Figura 5-4: Histograma y probabilidad lognormal – consumo de ácido**

En las siguientes figuras (Figura 5-5 y Figura 5-6) se despliegan la distribución espacial de las leyes de carbonato y de los valores de consumo de ácido, considerando vistas en sección y en perspectiva, donde no se puede apreciar una tendencia espacial clara, pero si que los sectores con mayor ley de carbonato tienen un mayor consumo de ácido.





**Figura 5-5: Dispersión espacial – ley de carbonato**



**Figura 5-6: Dispersión espacial – consumo de ácido**

En las siguientes tablas (Tabla 5-3 y Tabla 5-4) se pueden ver los parámetros estadísticos de la ley de carbonato y del consumo de ácido considerando las diferentes litologías a las que pertenecen. Estos datos se muestran sin la aplicación de los valores umbrales máximos, para considerar su variabilidad.

**Tabla 5-3: Estadísticos de ley de carbonato según litología**

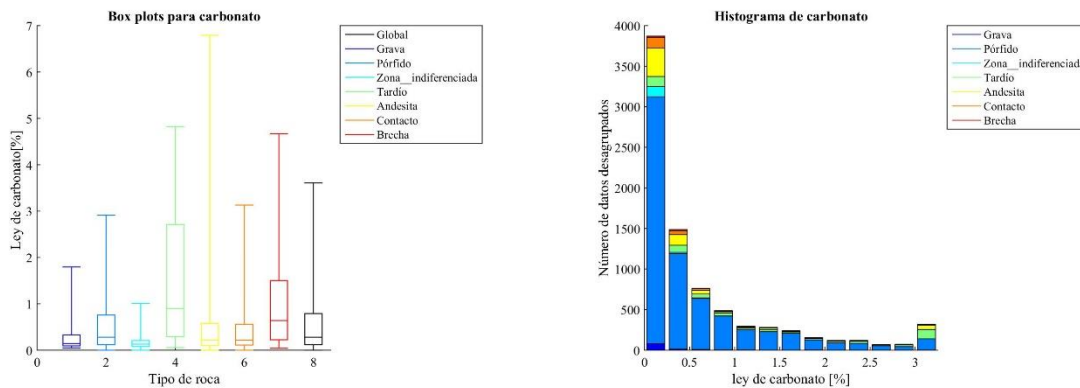
Litología	Carbonato [%]				
	Cuenta	Máximo	Mínimo	Promedio	Varianza
Grava	86	4.36	0	0.28	0.28
Pórfido	6532	10.7	0	0.60	0.65
Zona indiferenciada	125	2.16	0	0.19	0.08
Tardío	571	8.75	0	1.55	2.40
Andesita	619	15.45	0	0.91	3.77
Contacto	277	7.99	0	0.53	0.90
Brecha	74	6.43	0	1.09	1.58

**Tabla 5-4: Estadísticos de consumo de ácido según litología**

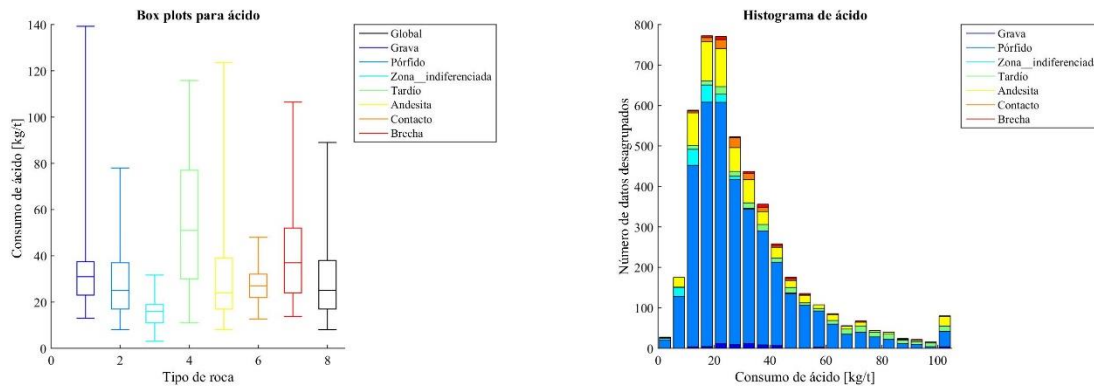
Litología	Consumo de ácido [kg/t]				
	Cuenta	Máximo	Mínimo	Promedio	Varianza
Grava	38	166	13	35.61	726.46
Pórfido	3726	203	1	29.63	364.41
Zona indiferenciada	111	48	2	16.03	42.92
Tardío	229	157	3	55.03	921.64
Andesita	481	300	4	36.27	1319.28
Contacto	115	65	11	27.81	84.37
Brecha	64	128	11	42.64	563.92

En las tablas anteriores se observa que más del 50% de las muestras son catalogadas como pórfido, siendo “andesita” y “tardío” las litologías que ocupan el segundo y tercer lugar.

En las siguientes figuras (Figura 5-7 y Figura 5-8) se muestran los diagramas de cajas y los histogramas desagrupados para ambas variables según las litologías.

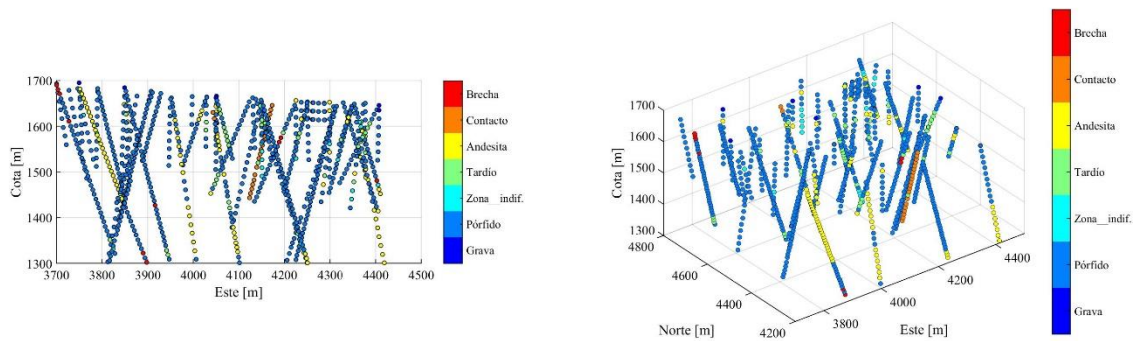


**Figura 5-7: Diagrama de caja e histograma según litología – ley de carbonato**



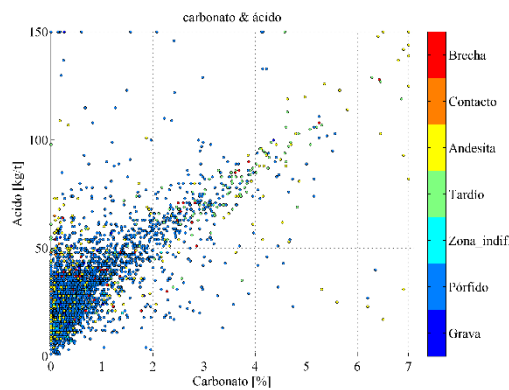
**Figura 5-8: Diagrama de caja e histograma según litología – consumo de ácido**

La Figura 5-9 muestra la distribución espacial de las muestras según su litología, donde se observa una baja zonación vertical de las litologías consideradas.



**Figura 5-9: Dispersión espacial litológicas**

En la Figura 5-10 se muestra la dispersión entre las mediciones de leyes de carbonato y consumo de ácido, en la cual se puede ver que no existe un fuerte control de la litología sobre la ocurrencia conjunta de los valores de consumos de ácido y leyes de carbonato.



**Figura 5-10: Dispersión entre ley carbonato y consumo de ácido según litología**

En las siguientes tablas (Tabla 5-5 y Tabla 5-6) se pueden ver los parámetros estadísticos de la ley de carbonato y del consumo de ácido considerando las diferentes alteraciones a las que pertenecen. Se observa que la alteración definida como sericita-clorita es la más frecuente para ambas variables.

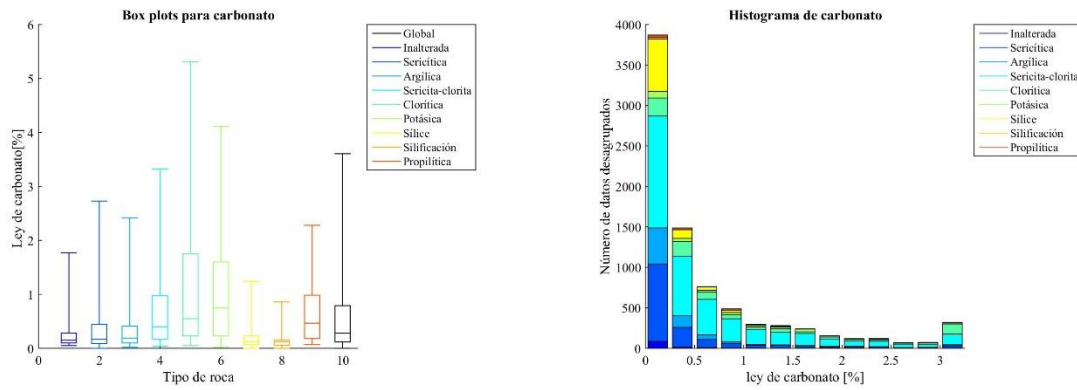
**Tabla 5-5: Estadísticos de ley de carbonato según alteración**

Alteración	Carbonato [%]				
	Cuenta	Máximo	Mínimo	Promedio	Varianza
Inalterada	87	4.36	0	0.28	0.28
Sericítica	1464	10.7	0	0.45	0.79
Argílica	630	8.76	0	0.48	0.78
Sericita-clorita	3894	9.11	0	0.74	0.85
Clorítica	931	15.45	0	1.29	2.92
Potásica	320	5.15	0	0.98	0.99
Sílice	872	6.45	0	0.23	0.21
Silificación	20	0.97	0	0.16	0.06
Propilítica	66	2.39	0.05	0.65	0.33

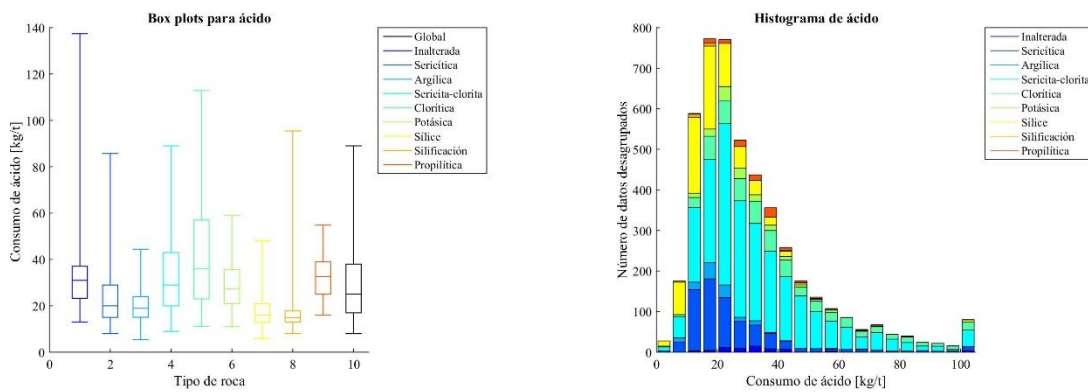
**Tabla 5-6: Estadísticos de consumo de ácido según alteración**

Alteración	Consumo de ácido [kg/t]				
	Cuenta	Máximo	Mínimo	Promedio	Varianza
Inalterada	39	166	13	35.46	708.15
Sericítica	684	162	2	26.60	442.24
Argílica	89	67	5	20.29	85.69
Sericita-clorita	2323	203	1	33.81	442.59
Clorítica	607	300	2	44.36	1055.62
Potásica	173	82	11	29.85	171.36
Sílice	759	186	1	19.39	203.55
Silificación	24	102	8	28.50	739.65
Propilítica	66	67	12	31.95	113.49

En las siguientes figuras (Figura 5-11 y Figura 5-12) se muestran los diagramas de cajas y los histogramas desagrupados para ambas variables según las alteraciones.

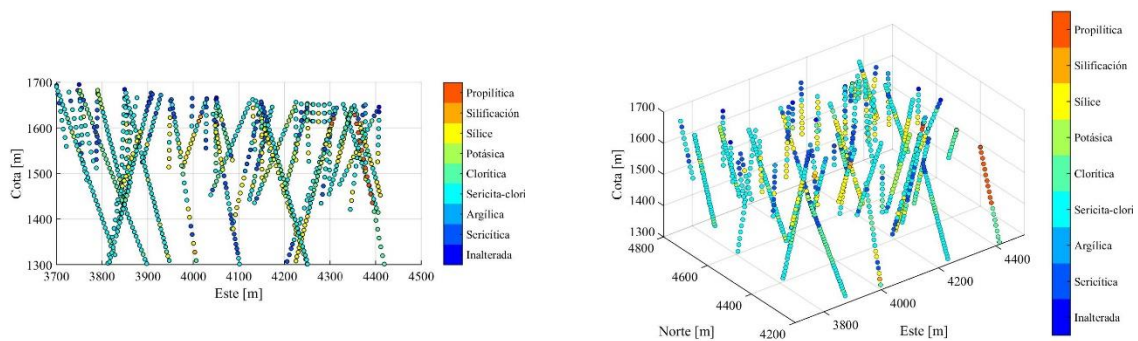


**Figura 5-11: Diagrama de caja e histograma según alteración – ley de carbonato**



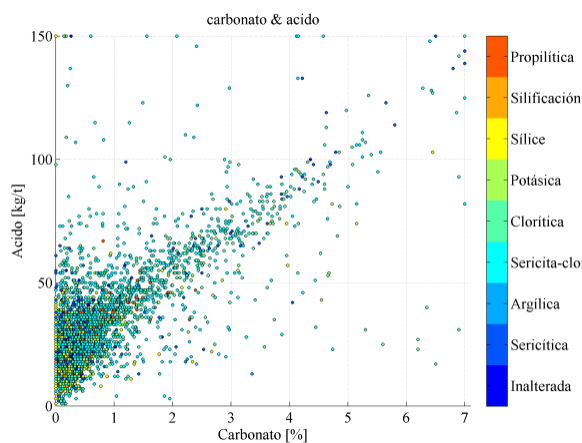
**Figura 5-12: Diagrama de caja e histograma según alteración – consumo de ácido**

La Figura 5-13 muestra la distribución espacial de las muestras según su alteración, donde se observa una baja zonación vertical de las unidades de alteración.



**Figura 5-13: Dispersión espacial alteraciones**

En la Figura 5-14 se muestra la dispersión entre las mediciones de leyes de carbonato y consumo de ácido, en la cual se puede ver que no existe un fuerte control de la alteración sobre la ocurrencia conjunta de los valores de consumos de ácido y leyes de carbonato.



**Figura 5-14: Dispersión entre ley carbonato y consumo de ácido según alteración**

En las siguientes tablas (Tabla 5-7 y Tabla 5-8) se pueden ver los parámetros estadísticos de la ley de carbonato y del consumo de ácido considerando las diferentes zonas mineralógicas a las que pertenecen. Las zonas mineralógicas más frecuentes son óxidos y sulfatos. Existen zonas con un número bajo de mediciones, pudiendo ser micro-estructuras, lo que podría ser el caso del material secundario y la grava.

**Tabla 5-7: Estadísticos de ley de carbonato según mineralogía**

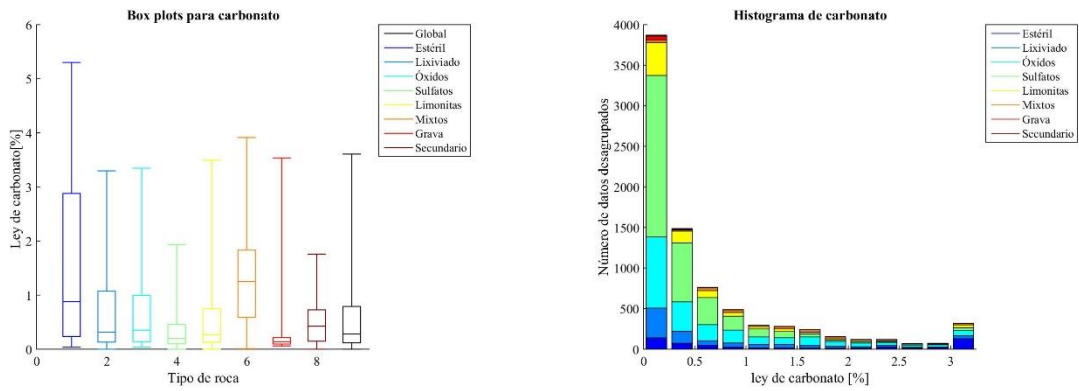
Mineralogía	Carbonato [%]				
	Cuenta	Máximo	Mínimo	Promedio	Varianza
Estéril	578	8.75	0	1.65	2.66
Lixiviado	791	9.62	0	0.82	1.17
Óxidos	2161	11.5	0	0.74	0.98
Sulfatos	3601	7.99	0	0.40	0.37
Limonitas	806	15.45	0	0.76	1.97
Mixtos	276	7.15	0	1.41	1.23
Grava	41	4.36	0.06	0.31	0.51
Secundario	30	1.94	0	0.40	0.19

**Tabla 5-8: Estadísticos de consumo de ácido según mineralogía**

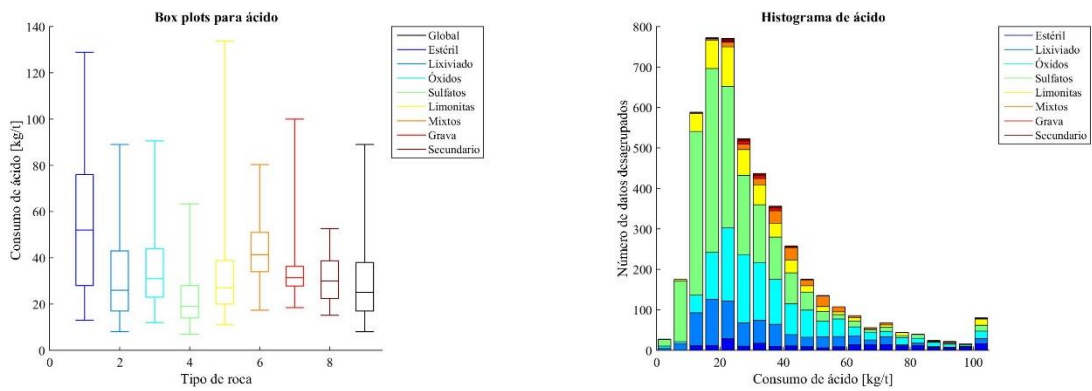
Mineralogía	Consumo de ácido [kg/t]				
	Cuenta	Máximo	Mínimo	Promedio	Varianza
Estéril	240	166	10	56.68	918.97
Lixiviado	612	203	3	34.41	574.58
Óxidos	1225	213	1	35.42	413.28
Sulfatos	2095	186	1	23.39	243.69
Limonitas	374	300	2	36.32	1252.77
Mixtos	174	151	11	43.17	325.65
Grava	14	100	18	34.93	379.15
Secundario	30	53	14	29.57	103.98

En las siguientes figuras (Figura 5-15 y Figura 5-16) se muestran los diagramas de cajas y los histogramas desagrupados para ambas variables según las zonas de mineralización

consideradas.

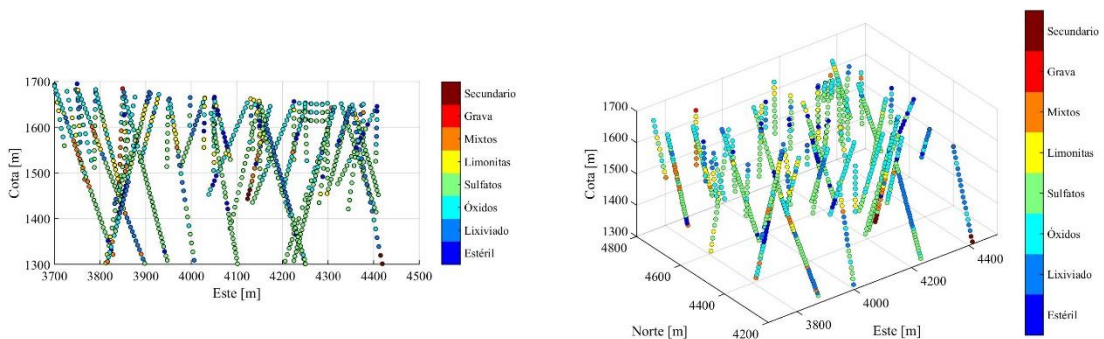


**Figura 5-15: Diagrama de caja e histograma según mineralización – ley de carbonato**



**Figura 5-16: Diagrama de caja e histograma según mineralización – consumo de ácido**

La Figura 5-17 muestra la distribución espacial de las muestras según las unidades de mineralización, donde se observa cierta zonación vertical de las unidades de mineralización.

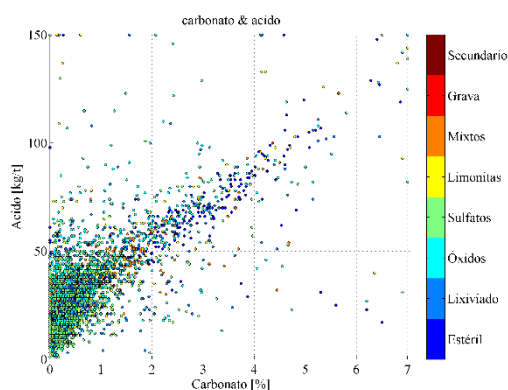


**Figura 5-17: Dispersión espacial mineralizaciones**

En la Figura 5-18 se muestra la dispersión entre las mediciones de leyes de carbonato y consumo de ácido, en la cual se puede ver que existe un control de la mineralización sobre la



ocurrencia conjunta de los valores de consumos de ácido y leyes de carbonato, dado que las leyes bajas de carbonato y consumo de ácido son, en general, mediciones de óxidos, sulfatos y material lixiviado, mientras que los valores altos corresponden a material estéril.



**Figura 5-18: Dispersión entre ley carbonato y consumo de ácido según mineralización**

En base a lo anterior, se considera que la variable que controla la distribución del consumo de ácido y de la ley de carbonato es la mineralización. Por un lado, en la litología existe sólo una unidad que agrupa la mayor cantidad de los datos, entregando poco espacio a la variabilidad de los valores medidos en las otras unidades. Por otro lado, en el caso de la alteración, no se observa una continuidad espacial tan significativa como se logra apreciar en la mineralogía. Tampoco se observan diferencias entre las distintas unidades, en términos de media y varianza, para las variables consumo de ácido y ley carbonato.

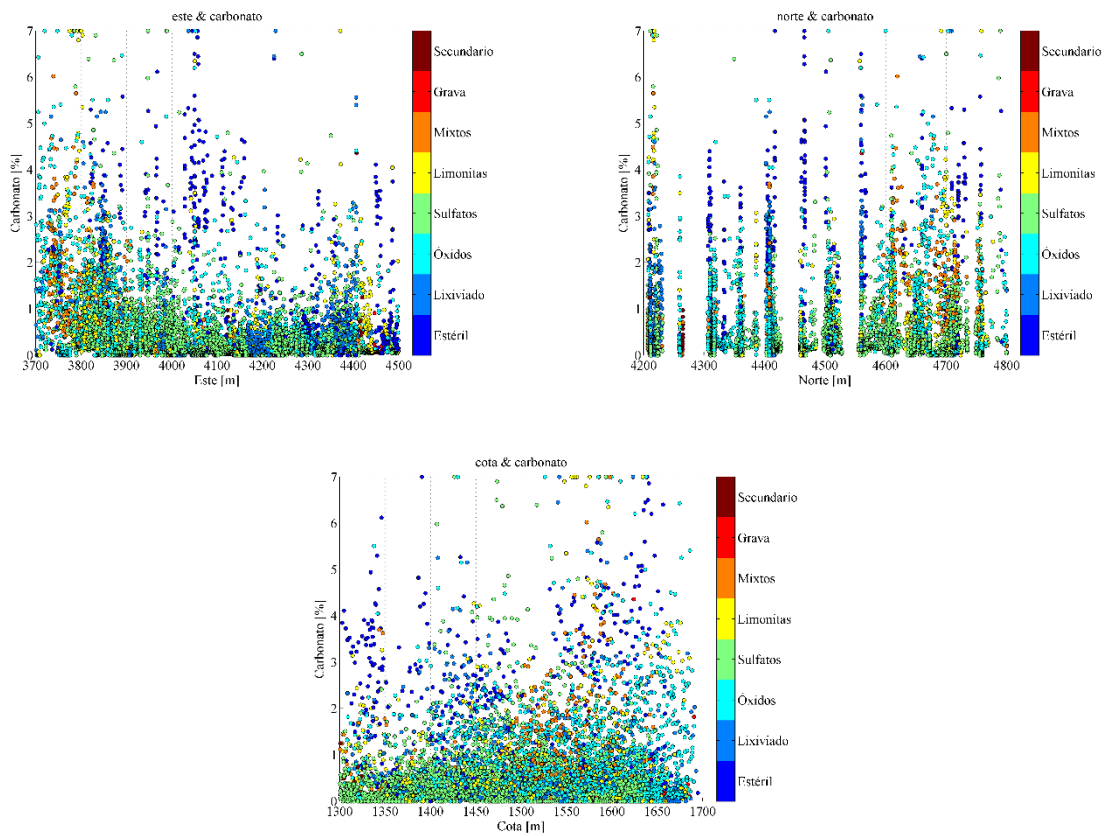
Si bien existen unidades de la mineralogía, como los óxidos y los sulfatos, que podrían dividirse en nuevas unidades considerando un criterio de la litología y la alteración, esto no se realiza porque genera un fracturamiento de la información, perdiendo la continuidad espacial en la variable a lo largo de los distintos dominios considerados.

La Tabla 5-9 muestra los coeficientes de correlación entre las leyes de carbonato y el consumo de ácido para las distintas unidades de mineralización, donde se aprecia que existen unidades que presentan valores más extremos de correlación que otros, como lo son la grava y el material secundario. Sin embargo, corresponden a las unidades con menor número de muestras, por tanto representarían una fracción menor del yacimiento y no reflejan la relación entre las variables en la mayoría del depósito.

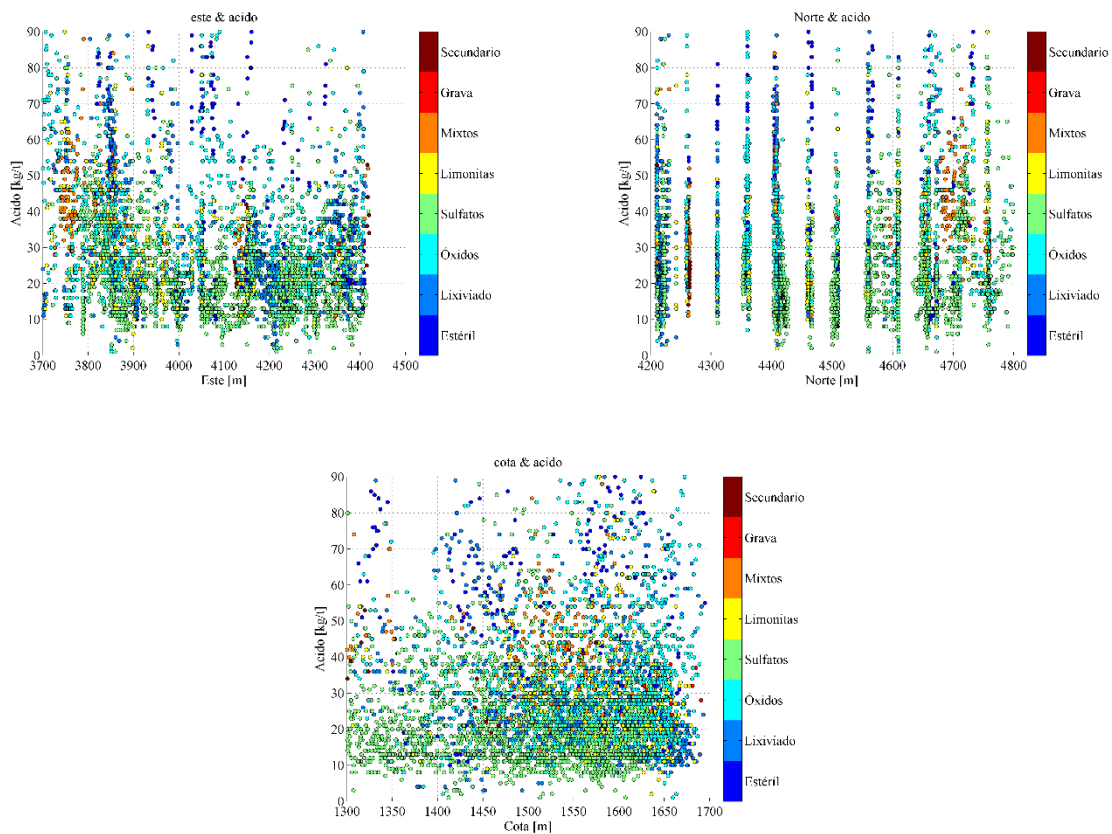
**Tabla 5-9: Coeficientes de correlación según unidades**

Unidad mineralógica	Coefficiente de correlación
Estéril	0.68
Lixiviado	0.76
Óxidos	0.70
Sulfatos	0.62
Limonitas	0.69
Mixtos	0.78
Grava	0.82
Secundario	0.47

A continuación (Figura 5-19 y Figura 5-20) se muestran los gráficos de dispersión considerando las dos variables de interés y las coordenadas, para observar posibles relaciones entre la posición, el tipo de mineralización y el valor de las variables.



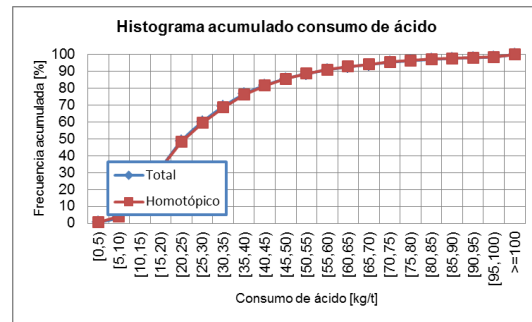
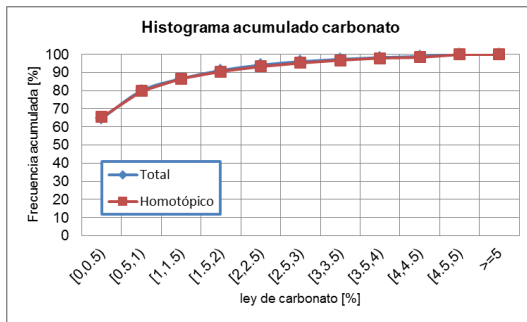
**Figura 5-19: Dispersión entre ley de carbonato y coordenadas según mineralización**



**Figura 5-20: Dispersión entre consumo de ácido y coordenadas según mineralización**

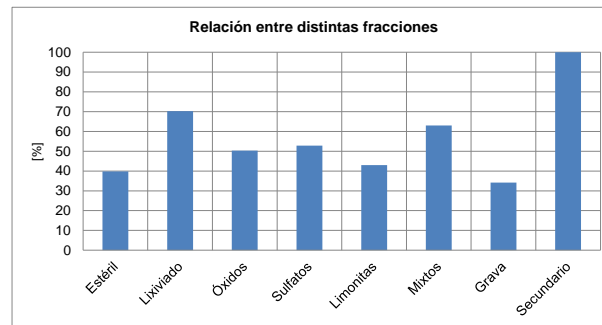
Dado que la cantidad de mediciones de leyes de carbonato supera considerablemente a las mediciones de consumo de ácido se concluye que existe un alto muestreo heterotópico en el depósito. Debido a esto es necesario analizar la presencia de un muestreo preferencial, sobre todo considerando las distintas unidades mineralizadas. Para ello la base de datos fue separada en dos fracciones, una homotópica (parcial) y otra heterotópica (completa), con el propósito de analizar las diferencias entre ambas bases.

En la Figura 5-21 se muestran los histogramas acumulados de ambas bases para las dos variables de interés. En los gráficos se aprecia que, de manera global, no existe una diferencia estadística entre ambas bases de datos.



**Figura 5-21: Histogramas de bases de datos homotópica y total**

A pesar de no mostrar una diferencia global entre las bases de datos homotópica y heterotópica, es necesario analizar qué sucede cuando se considera la distribución según zona mineralizada. A continuación, en la Figura 5-22, se muestra cuál es la razón entre las mediciones del caso homotópico y el caso heterotópico para cada unidad de mineralización, donde se aprecia que el muestreo preferencial tiene efecto en la proporción de datos según cada unidad de mineralización.



**Figura 5-22: Razón entre número de muestras según mineralización**

En la Tabla 5-10 se muestran los valores medios y la cantidad de datos de ambas bases por unidad de mineralización. Se observan diferencias menores en las medias de consumo de ácido, que es la variable menos muestreada. Sin embargo, las medias de leyes de carbonato son significativamente distintas para algunas unidades, como el estéril y la grava.

**Tabla 5-10: Estadística de bases de datos**

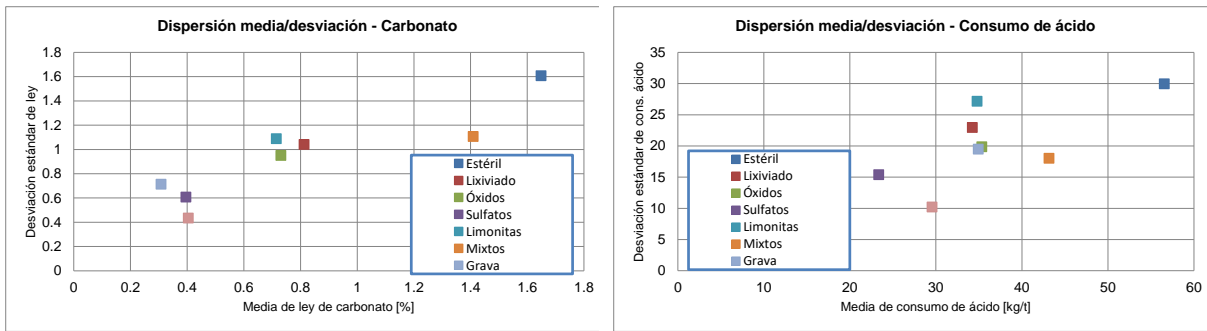
Unidad	Base homotópica			Base heterotópica			
	Cuenta	Media carbonato [%]	Media con. ácido [kg/t]	Cuenta carbonato	Cuenta con. ácido	Media carbonato [%]	Media con. ácido [kg/t]
Estéril	233	2.16	55.41	578	240	1.65	56.56
Lixiviado	579	0.90	33.77	791	612	0.81	34.24
Óxidos	1133	0.69	35.87	2161	1225	0.73	35.35
Sulfatos	1970	0.38	23.41	3601	2095	0.40	23.36
Limonitas	355	0.77	34.90	806	374	0.71	34.80
Mixtos	174	1.31	43.16	276	174	1.41	43.16
Grava	14	0.59	34.93	41	14	0.31	34.93
Secundario	30	0.40	29.57	30	30	0.40	29.57
Global	4488	0.69	31.30	8284	4764	0.67	31.21

A partir de lo anterior se concluye que el muestreo heterotópico no es de tipo preferencial y no constituye una fuente significativa de sesgo en el estudio. Se cree que el muestreo de consumo de ácido es de tipo preferencial con respecto a las mediciones de cobre, que es la especie de interés económico. Sin embargo, el cobre no es considerado en este estudio.

Con el fin de trabajar con unidades de mineralización que tengan mayor representatividad, en términos de dominio que representan en el yacimiento, se agrupan ciertas unidades que tienen un número menor de muestras (por ejemplo las gravas y el material secundario) con otras que tienen un mayor número de mediciones.

El agrupamiento de las unidades utiliza como criterios: la continuidad espacial de las leyes de carbonato y el consumo de ácido, la ubicación espacial de las muestras, debido a que se busca agrupar unidades que se encuentren en secciones próximas del yacimiento, y la distribución de los valores dentro de cada unidad, considerando como referencia las medias y las desviaciones estándares de los valores muestreados.

La Figura 5-23 muestra los valores medios versus la desviación estándar de las variables de interés para las distintas unidades mineralizadas. El objetivo es analizar cuáles son las unidades mineralizadas que presentan un comportamiento similar. En la figura se puede ver que el material lixiviado y el oxidado presentan un comportamiento similar en términos de media-desviación, al igual que el material del tipo sulfatos con el material secundario. Adicionalmente, ambos pares de unidades se encuentran en zonas próximas en el yacimiento, como se pudo ver en los diagramas de dispersión (Figura 5-17).

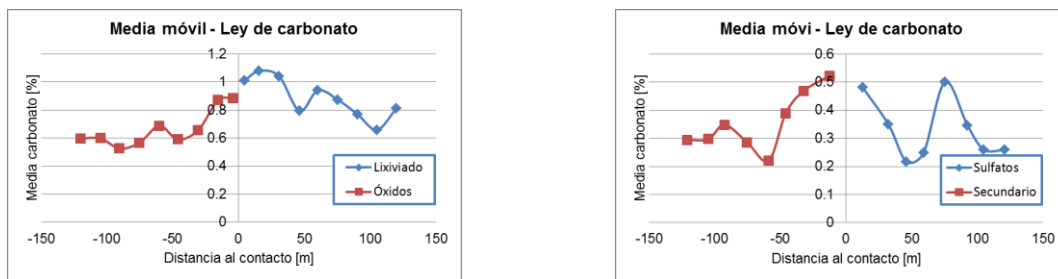


**Figura 5-23: Gráficos media vs desviación estándar según mineralización**

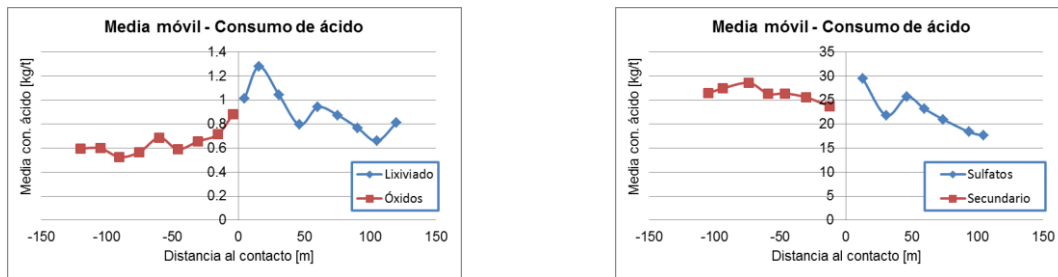
Debido a lo anterior, el material caracterizado como secundario se une con el material tipo sulfatos, dando origen a la unidad “Súlfuros”, mientras que el material lixiviado y el material denominado óxidos, son agrupados en la unidad “Óxidos”.

A pesar que el material estéril y el tipo grava presentan posiciones opuestas en los gráficos de media-desviación, la ubicación espacial de las gravas y su número acotado de datos, hace idóneo su agrupamiento con el material estéril (en la unidad “Estéril”).

A continuación (Figura 5-24 y Figura 5-25) se muestran los gráficos de media móvil entre las unidades que se unifican para las dos variables de interés. Se observa una relativa continuidad espacial entre las distintas unidades. El contacto es más difuso para las mediciones de consumo de ácido, debido a que el número de datos del material secundario es considerablemente bajo (habiendo 30 datos en el material secundario).



**Figura 5-24: Media móvil entre unidades –ley de carbonato**



**Figura 5-25: Media móvil entre unidades –consumo de ácido**

En Tabla 5-11 y en la Tabla 5-12 se presentan las estadísticas de las variables estudiadas según las nuevas unidades mineralizadas definidas.

**Tabla 5-11: Estadística de ley de carbonato**

Ley de carbonato [%]						
Parámetro	Global	Estéril	Óxidos	Sulfuros	Limonitas	Mixtos
Número de datos	8284	619	2952	3631	806	276
Media	0.67	1.51	0.75	0.41	0.67	1.37
Varianza	0.94	2.59	0.94	0.39	1.04	1.11
Mínimo	0	0	0	0	0	0
1-cuantil	0.12	0.17	0.14	0.1	0.13	0.59
Mediana	0.28	0.67	0.34	0.2	0.27	1.25
3-cuantil	0.79	2.72	1.02	0.46	0.75	1.83
Máximo	7	7	7	7	7	7

**Tabla 5-12: Estadística de consumo de ácido**

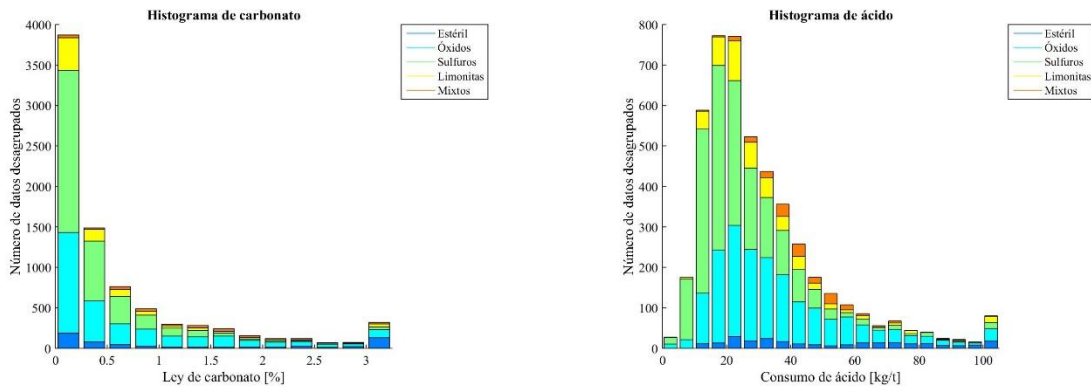
Consumo de ácido [kg/t]						
Parámetro	Global	Estéril	Óxidos	Sulfuros	Limonitas	Mixtos
Número de datos	4764	254	1837	2125	374	174
Media	31.23	53.08	35.15	23.54	33.83	43.23
Varianza	472.83	980.77	457.37	256.98	643.12	282.07
Mínimo	1	10	1	1	2	11
1-cuantil	17	28	21	14	20	34
Mediana	25	46.4	30	20	27	41.4
3-cuantil	38	74	44	28	38.82	51
Máximo	150	150	150	150	150	150

Los coeficientes de correlación entre el consumo de ácido y la ley de carbonato para cada unidad se muestran en Tabla 5-13, donde se aprecia una correlación entre ambas variables, lo que es relevante al momento de traspasar información de una variable a la otra.

**Tabla 5-13: Coeficientes de correlación**

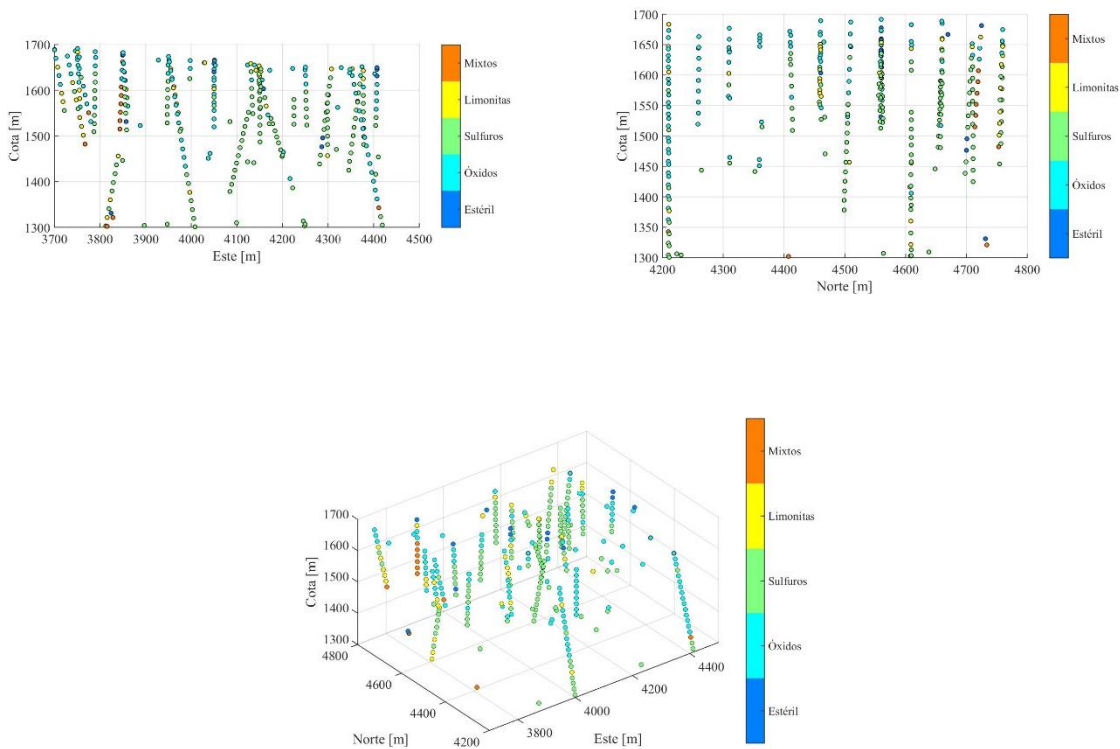
Unidad mineralógica	Coefficiente de correlación
Estéril	0.69
Óxidos	0.72
Sulfuros	0.61
Limonitas	0.69
Mixtos	0.78

En la Figura 5-26 se muestran los histogramas considerando las distintas zonas mineralizadas definidas para la ley de carbonato y consumo de ácido.



**Figura 5-26: Histogramas unidades mineralizadas**

A continuación, en la Figura 5-27, se despliegan gráficos que muestran la distribución espacial de los sitios muestreados, considerando las distintas zonas mineralizadas para las dos variables estudiadas.



**Figura 5-27: Ubicación espacial de unidades mineralizadas**

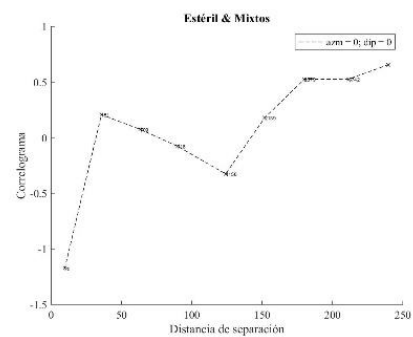
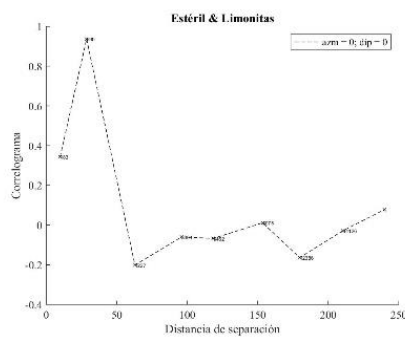
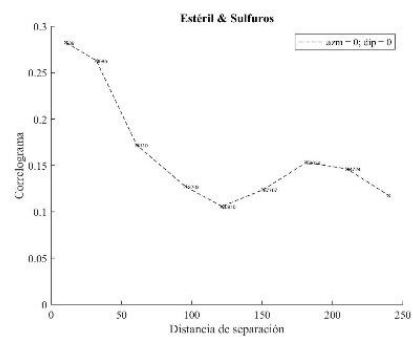
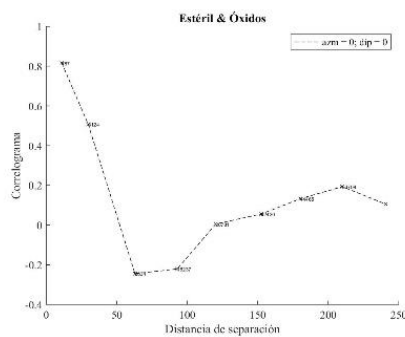
Al momento de analizar la variabilidad espacial entre las variables de interés, es importante definir el tipo de contacto entre distintas unidades. Esto permite determinar si los sitios muestreados de una unidad aportan información para sitios de interés en otra unidad próxima

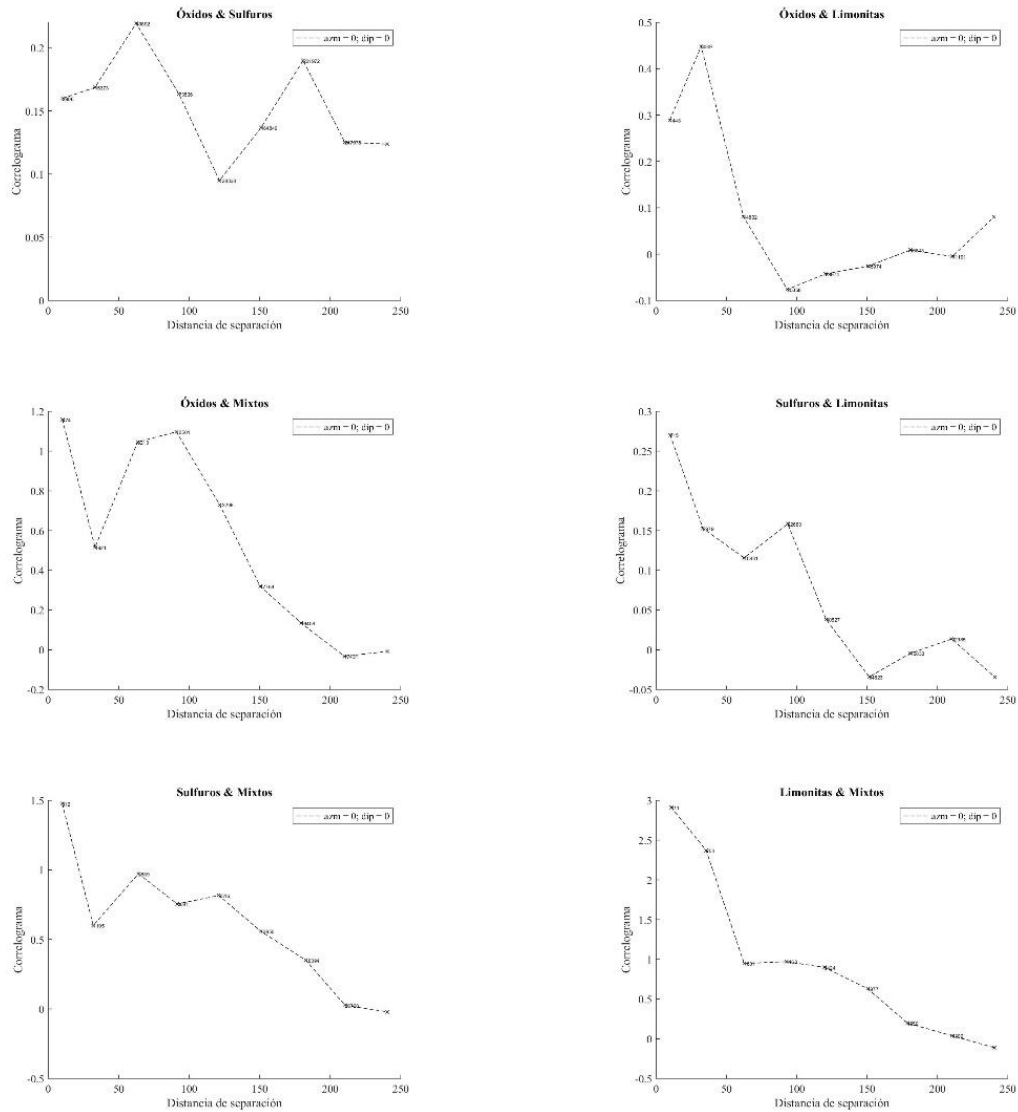


o si son totalmente independientes.

A continuación se muestran los correlogramas cruzados entre unidades para las especies de interés. En estos gráficos se aprecia si un contacto es del tipo blando, es decir hay una transición suavizada entre los valores de una unidad mineralizada y los valores que existen en otra unidad (correlogramas significativamente diferentes de cero hasta grandes distancias), o del tipo duro, donde existe un quiebre brusco entre los valores a ambos lados de un contacto (correlogramas que tienden rápidamente a cero).

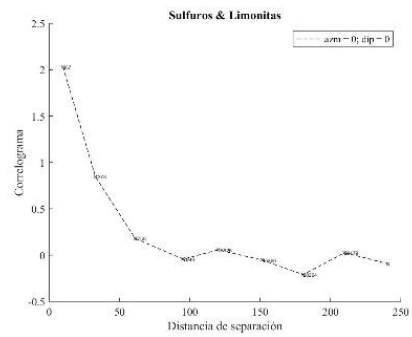
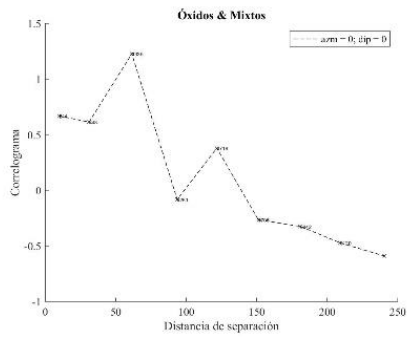
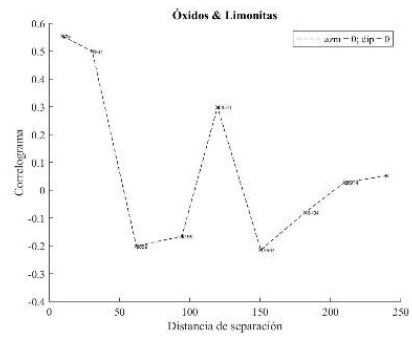
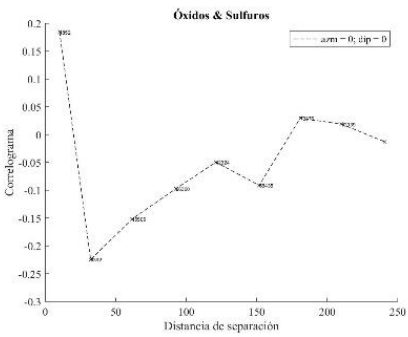
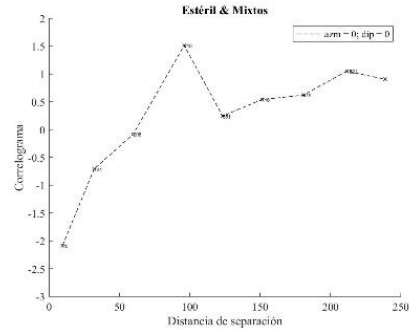
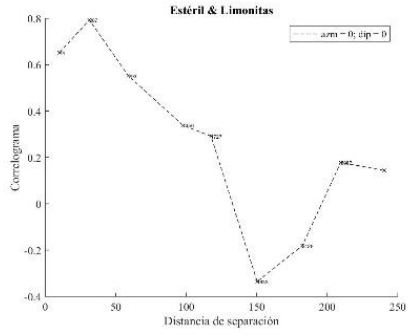
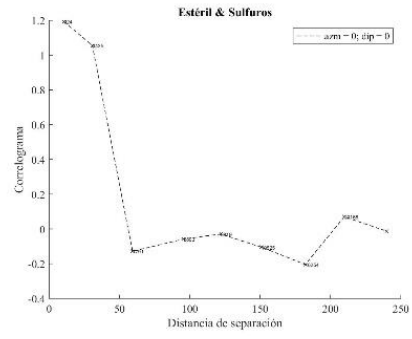
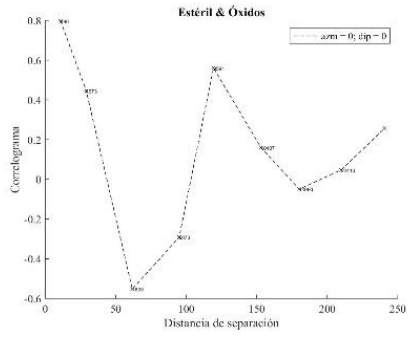
En el caso de las leyes de carbonato (Figura 5-28), existe una frontera dura entre el estéril y las demás unidades, los óxidos presentan una frontera dura con el material estéril, sulfuros y limonitas, presentando una frontera blanda sólo con el material tipo mixto. Del mismo modo, los sulfuros presentan una frontera dura con estéril, óxidos y limonitas, presentando un contacto blando sólo con el material mixto. Las limonitas presentan fronteras duras con todas las unidades, con excepción del material mixto. Finalmente, el material mixto presenta fronteras blandas con todas las unidades excepto el material estéril.

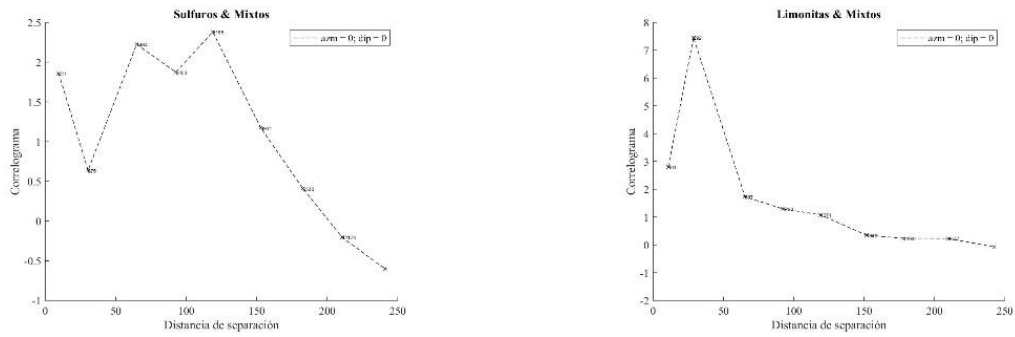




**Figura 5-28: Correlogramas según unidades de mineralización – ley de carbonato**

Los correlogramas para el consumo de ácido se muestran en la Figura 5-29. En términos generales se observa que los contactos para el consumo de ácido suelen ser más blandos entre las distintas unidades, en comparación con los contactos entre las distintas unidades para la ley de carbonato. El material tipo óxido presenta una frontera dura con los sulfuros y blanda con las demás unidades. El material sulfurado, por otra parte, exhibe contactos blandos con todas las unidades excepto con el material oxidado, donde presenta una frontera dura. Las limonitas, el estéril y el material mixto presentan fronteras blandas con todas las unidades.





**Figura 5-29: Correlogramas según unidades de mineralización – consumo de ácido**

#### 5.4 MODELO INTERPRETADO DE UNIDADES GEOLÓGICAS

El objetivo de esta sección es generar un modelo interpretado de la distribución de las unidades mineralizadas en el yacimiento. Esto se realiza mediante kriging de indicadores, que consiste en codificar los distintos valores de unidades mineralizadas para luego realizar un kriging a cada indicador. Posteriormente se realiza una estandarización de los valores obtenidos, para luego indicar cuál es la unidad más probable para cada bloque.

El inconveniente de esta metodología radica en el suavizamiento generado en las estimaciones mediante kriging, el cual es particularmente significativo en las zonas donde el muestreo no es denso. A pesar de esto, corresponde a una buena aproximación para un yacimiento diseminado donde no se observa la presencia de microestructuras ni de estructuras en forma de vetas.

La base de datos utilizada para la generación del modelo geológico interpretado corresponde a una base que contiene a la base asociada a las mediciones de consumo de ácido y leyes de carbonato. La base cuenta con 11080 descripciones, luego de eliminar los datos duplicados, utilizando como criterio para definir los datos duplicados una distancia inferior a 2 metros.

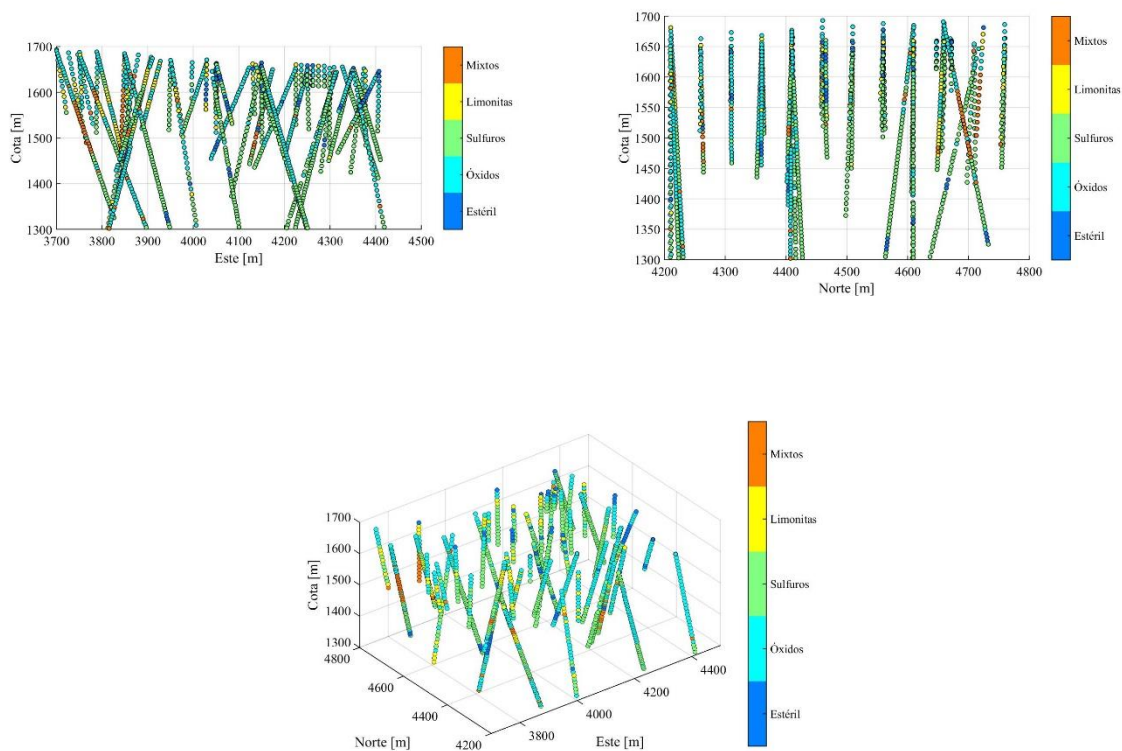
La siguiente tabla muestra la distribución de los valores de acuerdo a las distintas unidades, donde se observa la predominancia de las unidades de óxidos y sulfuros.

**Tabla 5-14: Muestras de caracterizaciones geológicas**

Unidad mineralógica	Número	Porcentaje [%]
Estéril	847	7.64
Óxidos	4090	36.91
Sulfuros	4749	42.86
Limonitas	1052	9.49
Mixtos	342	3.09
Total	11080	100

En la Figura 5-30 se muestran mapas de distribución espacial de los sitios con caracterización

mineralógica, donde se observa cuáles son las tendencias de las distintas unidades. En términos generales, se puede observar que el estéril se encuentra en la parte superior y lateral, seguido del material oxidado. Por otro lado, los sulfuros se ubican en la parte inferior, mientras que las otras unidades se encuentran más dispersas, pero siempre en el sector medio del yacimiento, como una zona de transición entre la unidad oxidada y la de sulfuros, lo que es consistente con la información geológica recopilada y presentada anteriormente.



**Figura 5-30: Distribución espacial de muestras según zonas mineralizadas**

### 5.4.1 Variogramas

El primer paso para obtener el modelo corresponde a una codificación de las interpretaciones geológicas en cinco indicadores, correspondientes a las unidades mineralizadas. Posteriormente se realiza un análisis variográfico de los indicadores, para lo cual se consideraron variogramas del tipo omniplanar (horizontal), vertical y omnidireccional. Los variogramas omniplanares y verticales no mostraron diferencias significativas con los omnidireccionales, por lo que se consideraron variogramas omnidireccionales para representar la continuidad espacial de los indicadores.

La Tabla 5-15 muestra los parámetros utilizados para el cálculo de los variogramas

experimentales.

**Tabla 5-15: Parámetros de variogramas experimentales**

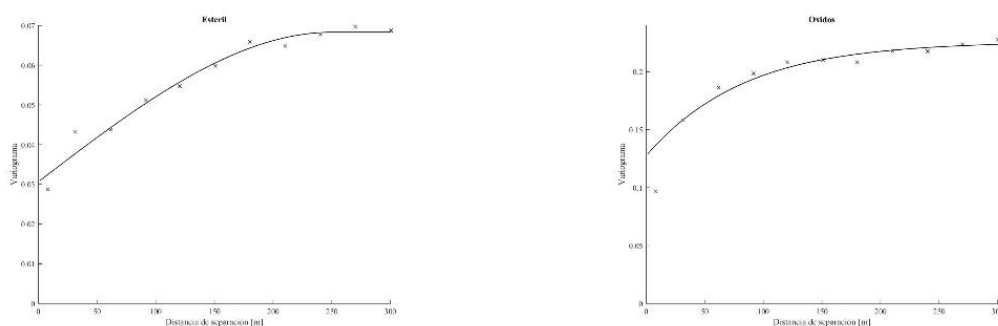
Parámetro	Unidad	Valor
Azimut	°	0
Tolerancia azimut	°	90
Dip	°	0
Tolerancia dip	°	90
Paso	m	30
Número de pasos	#	12
Tolerancia paso	m	15

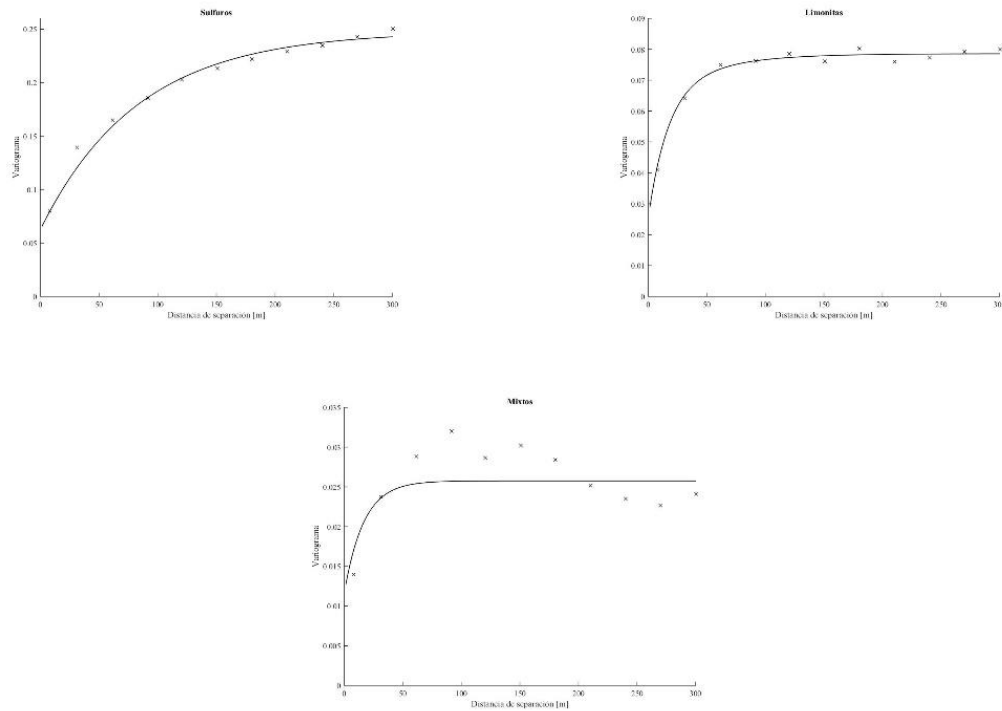
Las estructuras utilizadas para el cálculo de los variogramas modelados se muestran en la Tabla 5-16. Para cada variograma se consideran dos estructuras con distintos alcances y un efecto pepita para ajustar la varianza a distancias cercanas a cero.

**Tabla 5-16: Estructuras variogramas modelados**

Unidad	Meseta	Modelo N°1			Modelo N°2		
	Efecto pepa	Estructura	Alcance [m]	Meseta	Estructura	Alcance [m]	Meseta
Estéril	0.03	Exponencial	150	0.03	Esférica	260	0.02
Óxidos	0.13	Esférica	50	0.05	Exponencial	250	0.07
Súlfatos	0.06	Exponencial	200	0.1	Exponencial	250	0.1
Limonitas	0.05	Esférica	50	0.03	Exponencial	150	0.01
Mixtos	0.01	Exponencial	50	0.01	Exponencial	100	0.01

La Figura 5-31 muestra los variogramas modelados de los indicadores de las cinco unidades. Los ajustes de las mesetas se realizan mediante un algoritmo semi-automático de mínimos cuadrados.





**Figura 5-31: Variogramas modelados de indicadores**

## 5.4.2 Resultados

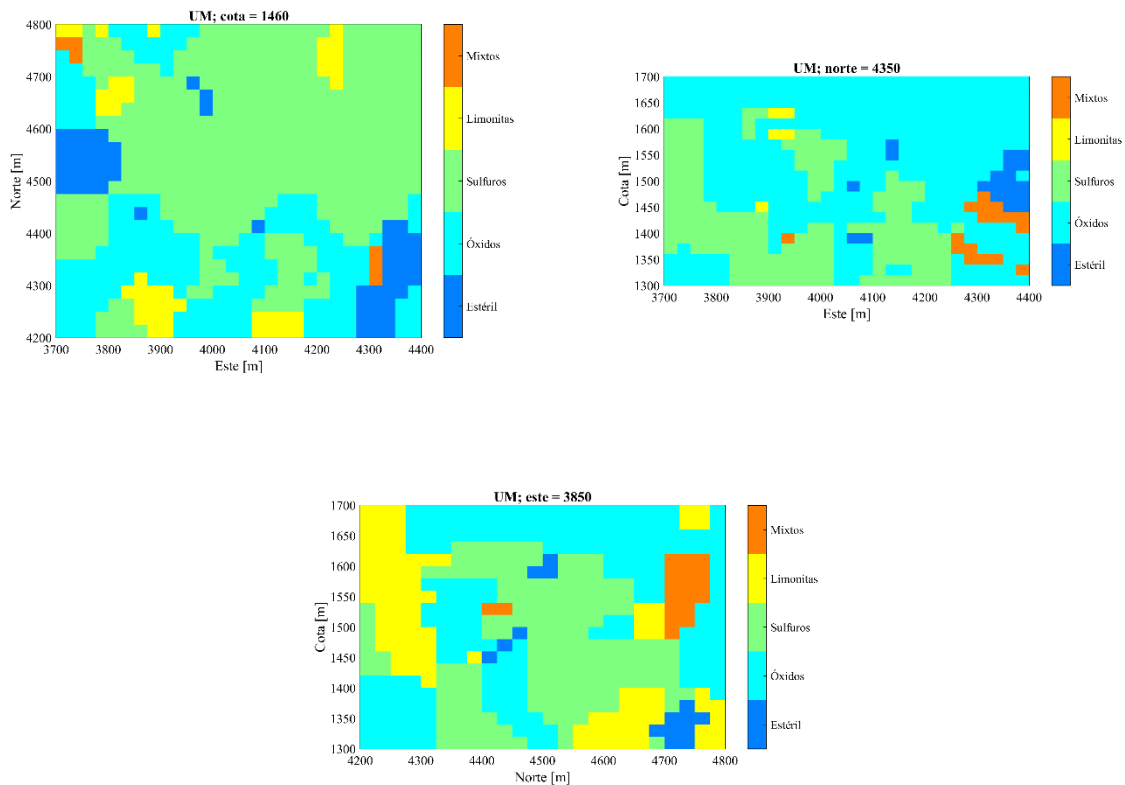
Posterior al desarrollo de los modelos variográficos se realizan cinco estimaciones de kriging, una por cada indicador utilizando una grilla de 25 x 25 x 20 metros, una vecindad de búsqueda de 24 datos y una discretización de cada bloque de la grilla en 3 x 3 x 3 puntos. El post procesamiento de los datos consiste en agrupar los resultados de las estimaciones mediante kriging para cada bloque y estandarizar los resultados. Cada kriging se interpreta la probabilidad de ese bloque de ser de cierta unidad mineralizada, por lo que la unidad con mayor probabilidad corresponde a la que identifica al bloque.

La Tabla 5-17 muestra los resultados globales del modelo, indicando el porcentaje de bloques que corresponde a cada unidad. Se observa la predominancia del material oxidado y sulfurado, los cuales en conjunto involucran un 87% de los bloques.

**Tabla 5-17: Resultados globales**

Unidad	Cantidad	Porcentaje [%]
Estéril	1213	5.26
Óxidos	10630	46.14
Sulfuros	9406	40.82
Limonitas	1493	6.48
Mixtos	298	1.29
Global	23040	100

En la Figura 5-32 se despliegan algunas secciones que muestran los resultados del modelo de referencia, donde se observa la predominancia del material oxidado y sulfurado, mientras que las demás unidades ocupan pequeñas fracciones del yacimiento.



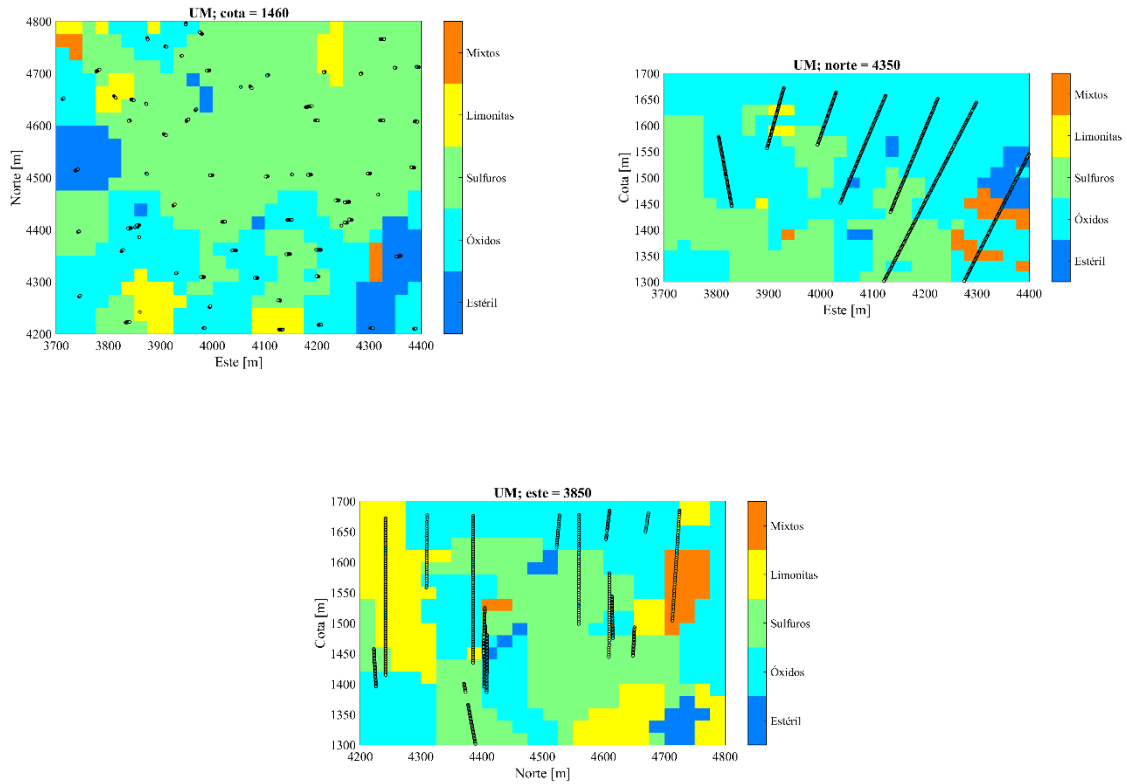
**Figura 5-32: Secciones modelo interpretado**

### 5.4.3 Verificación

Para realizar la validación del modelo interpretado se consideran dos metodologías visuales. La primera consiste en realizar gráficos de las distintas secciones del modelo interpretado y contrastarlo con los sitios con información, mientras que la segunda corresponde a realizar una interpretación geológica basada en la unidad más frecuente dentro de un bloque. Es decir, la zona mineralizada que caracteriza un bloque corresponde a la de mayor frecuencia dentro de ese bloque. El inconveniente de este método es que existen zonas que no se encuentran exhaustivamente muestreadas, debido al muestreo irregular. A pesar de lo anterior, este método permite confirmar la tendencia de la distribución espacial de las unidades.

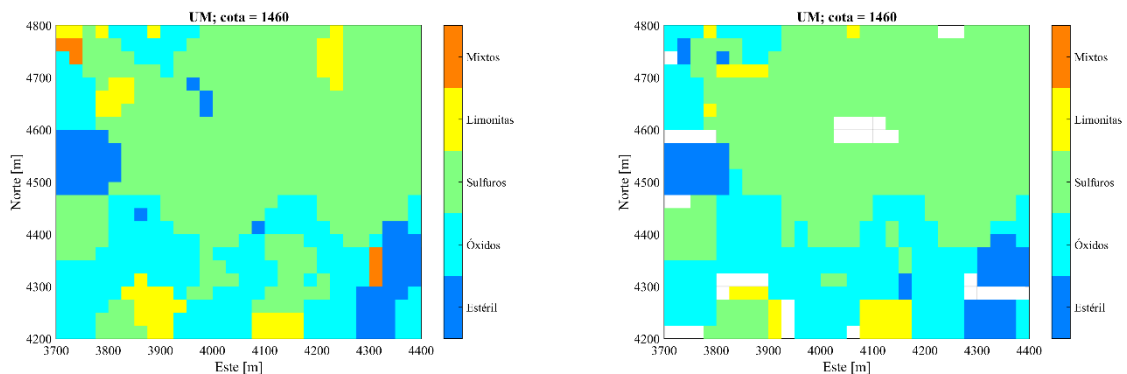
A continuación, en la Figura 5-33, se muestran, a modo de verificación visual, gráficos de dispersión sobrepuestos con el modelo interpretado, exhibiendo que existe un buen ajuste en el modelo, sobre todo en la vista en planta.





**Figura 5-33: Verificación visual modelo interpretado**

La Figura 5-34 muestra los gráficos de dispersión utilizando como criterio para definir el valor de un bloque al elemento más frecuente dentro del mismo. Los sectores en blanco corresponden a bloques sin mediciones en su interior. Se observa que la estimación mediante kriging de indicadores permite incorporar unidades que se encuentran pobremente muestreadas, como el material mixto, el que prácticamente no aparece en la metodología que considera la frecuencia de unidades pero si ocupa un 1.3% en el modelo interpretado obtenido mediante kriging de indicadores.



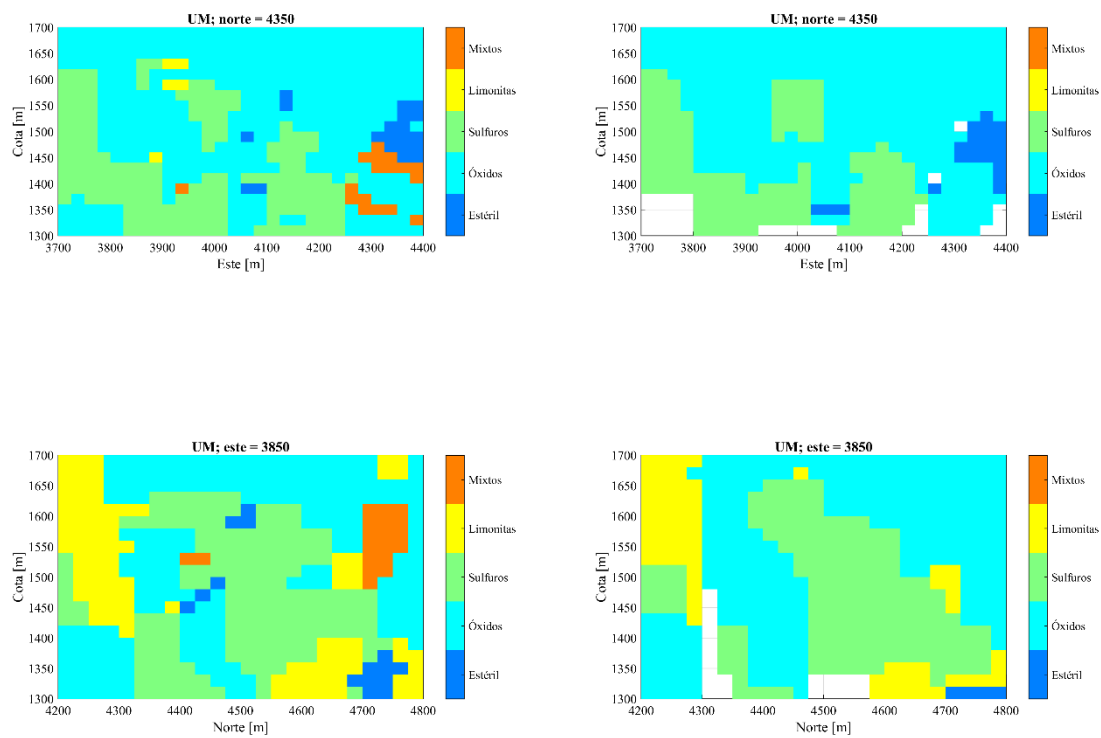


Figura 5-34: Comparación modelo interpretado (izq: kriging de indicadores, der: estimación por frecuencia)

## **6 SIMULACIÓN DE UNIDADES GEOLÓGICAS**

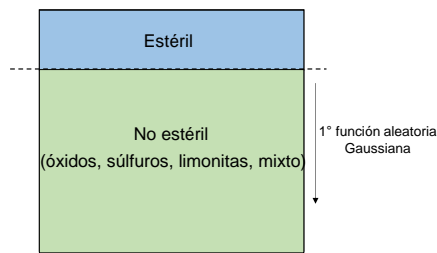
El objetivo de esta sección es generar distintos escenarios de la distribución de las unidades mineralizadas en el yacimiento. Para ello se utilizan simulaciones plurigaussianas que consideran el contacto entre las diferentes unidades a partir del modelo interpretado y de la información que entregan los sitios con caracterización geológica. En términos generales, la simulación plurigaussiana considera una partición del espacio a simular en distintos subdominios mediante la utilización de distintas funciones Gaussianas que representan los contactos entre las diferentes unidades.

### **6.1 REGLAS DE TRUNCACIÓN Y PROPORCIONES**

En el contexto de la simulación es necesario considerar un conjunto de reglas de truncación que definen la partición del espacio en distintas unidades, generando una interpretación, en términos generales, de los contactos entre las distintas unidades.

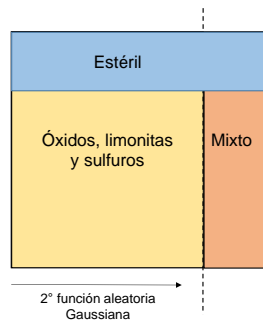
En este estudio se utilizan tres funciones aleatorias Gaussianas independientes, que generan la partición de las cinco zonas mineralizadas del yacimiento, permitiendo definir los contactos entre las distintas unidades. La información geológica recopilada es coherente con la disposición espacial de las muestras, esto es que en la parte superior se encuentra el material estéril, seguido por una zona de óxidos (que incluye el material lixiviado y oxidado), posteriormente se encuentra una zona de transición compuesta por limonitas y material mixto, para finalmente encontrar el material sulfurado (que incluye el sulfatado y el material secundario) en la parte inferior del depósito. Sin embargo, a partir del despliegue de vistas transversales, se observa que el material estéril también se encuentra en la zona lateral del yacimiento, teniendo contacto con todas las unidades mineralizadas y no solamente con la zona oxidada, como la información geológica lo indica.

Para realizar las reglas de truncación, se considera primero la zonación vertical de la mineralización, separando el material estéril del no estéril, tal como se muestra en la siguiente Figura 6-1.



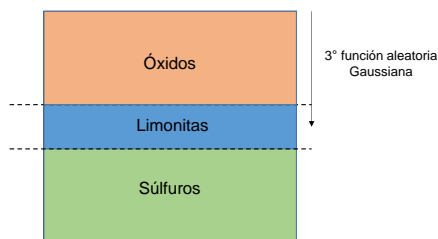
**Figura 6-1: Primera función Gaussiana**

Posteriormente se considera una zonación lateral, para permitir la presencia del material mixto en la parte lateral inferior del yacimiento y su contacto con la unidad de sulfuros.



**Figura 6-2: Segunda función Gaussiana**

Finalmente se considera una zonación vertical para las unidades mineralizadas de óxidos, limonitas y sulfuros, tal como se muestra en la Figura 6-3.



**Figura 6-3: Tercera función Gaussiana**

El variograma de las funciones aleatorias Gaussianas se obtiene a partir de los variogramas de los indicadores. Por otro lado, los umbrales de truncación son calculados a partir de la proporción que ocupa cada unidad en la zona de interés. Para obtener una mejor aproximación se consideran curvas de proporción, que definen las distintas proporciones de unidades en los distintos bloques, calculadas a partir del modelo interpretado. Para el cálculo de las proporciones se consideró una ventana móvil de 50 x 50 x 40 metros.

## 6.2 VARIOGRAFÍA DE FUNCIONES ALEATORIAS GAUSSIANAS

Posteriormente a la definición de las reglas de truncación y del cálculo de las proporciones, se calculan los variogramas de los indicadores, los que mediante una relación matemática, se relacionan con los variogramas de las funciones Gaussianas (Mery, 2016).

Los variogramas experimentales se calculan de manera omnidireccional debido a que no se observan grandes diferencias entre los variogramas en la dirección vertical y los variogramas en un plano horizontal. Los parámetros utilizados para el cálculo de los variogramas experimentales se muestran en la Tabla 6-1. Cabe destacar que la regla de truncación también constituye un parámetro de entrada para el cálculo de los variogramas.

**Tabla 6-1: Parámetros de variogramas experimentales**

Parámetro	Unidad	Valor
Azimut	°	0
Tolerancia azimut	°	90
Dip	°	0
Tolerancia dip	°	90
Paso	m	15
Número de pasos	#	20
Tolerancia paso	m	7.5

El ajuste del modelo variográfico involucra diferentes estructuras para las distintas funciones aleatorias Gaussianas, en las cuales el ajuste de la meseta se realiza de manera iterativa mediante un algoritmo semi-automático de mínimos cuadrados, considerando que la meseta global debe ser igual a uno para cada una de las funciones aleatorias Gaussianas.

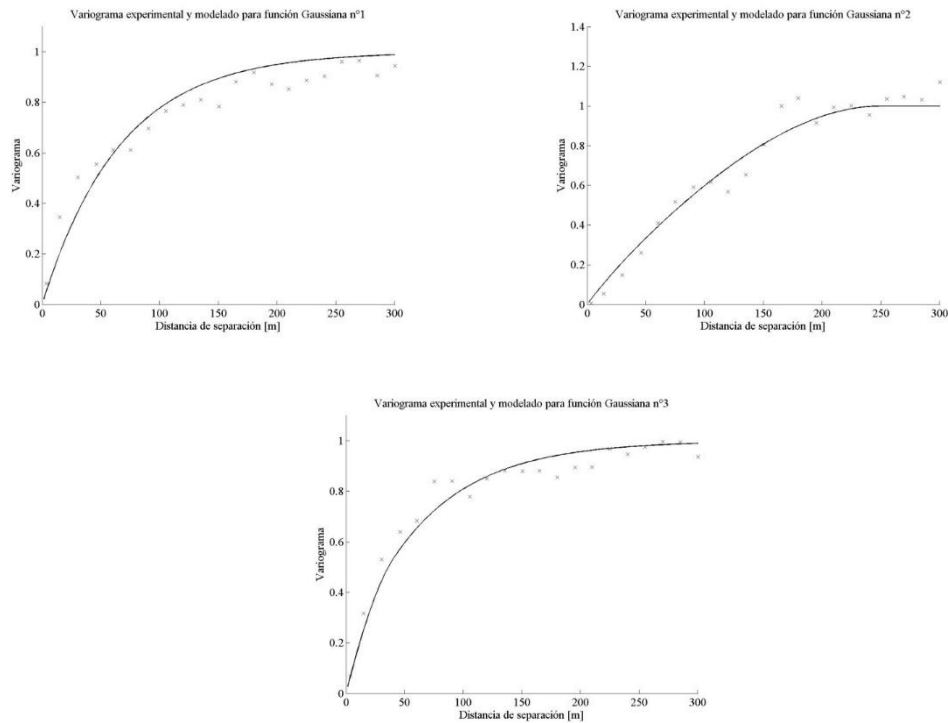
La Tabla 6-2 muestra las diferentes estructuras usadas para cada una de las tres funciones aleatorias Gaussianas, sin utilizar un efecto pepa en el modelamiento.

**Tabla 6-2: Estructuras de variogramas modelados**

Función aleatoria	Estructura	Alcance [m]	Meseta
N°1	Exponencial	40	0.043
	Esférica	120	0.160
	Exponencial	200	0.797
N°2	Exponencial	100	0.079
	Exponencial	150	0.101
	Esférica	250	0.820
N°3	Esférica	40	0.145
	Esférica	75	0.102
	Exponencial	200	0.753

Los siguientes gráficos de la Figura 6-4 muestran los variogramas experimentales (indicados mediante cruces) y los variogramas modelados (indicados mediante línea continua) para las

tres funciones aleatorias Gaussianas.

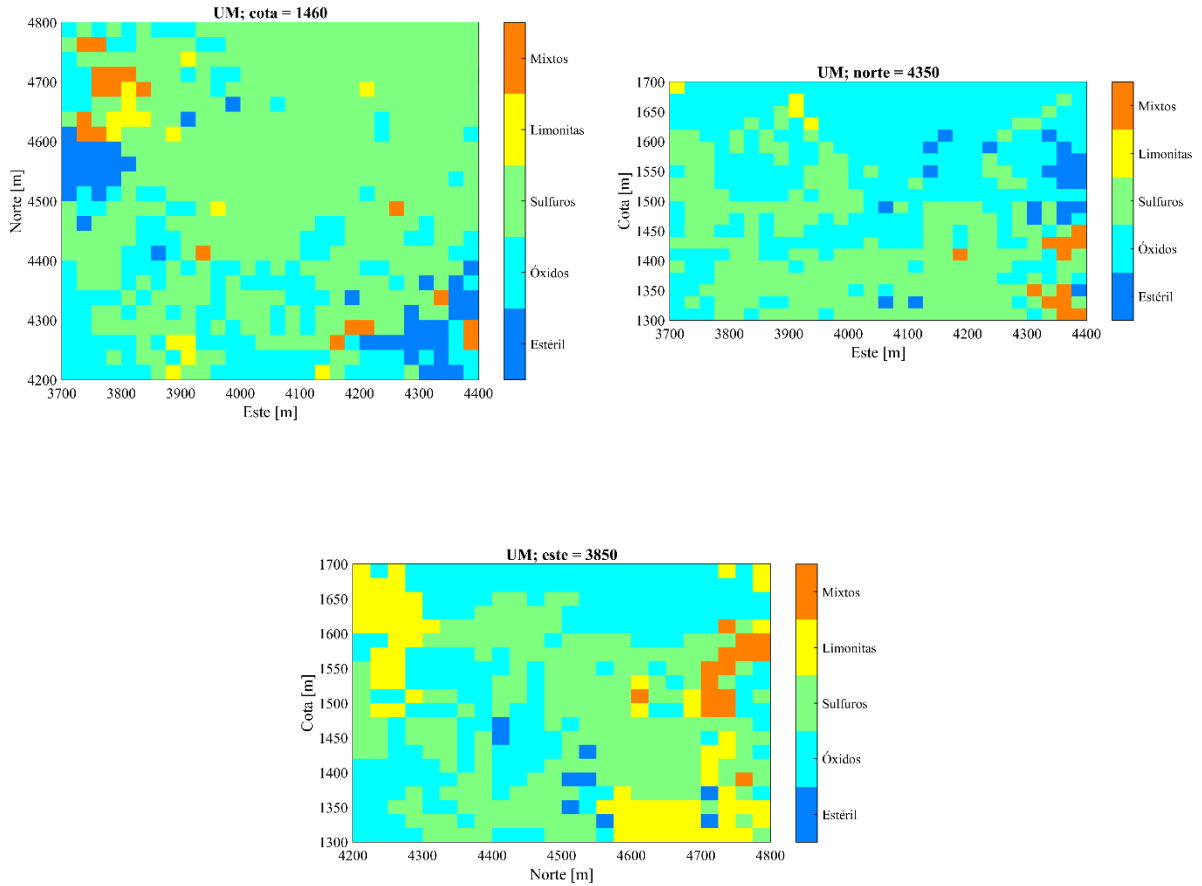


**Figura 6-4: Variogramas funciones Gaussianas**

### 6.3 RESULTADOS

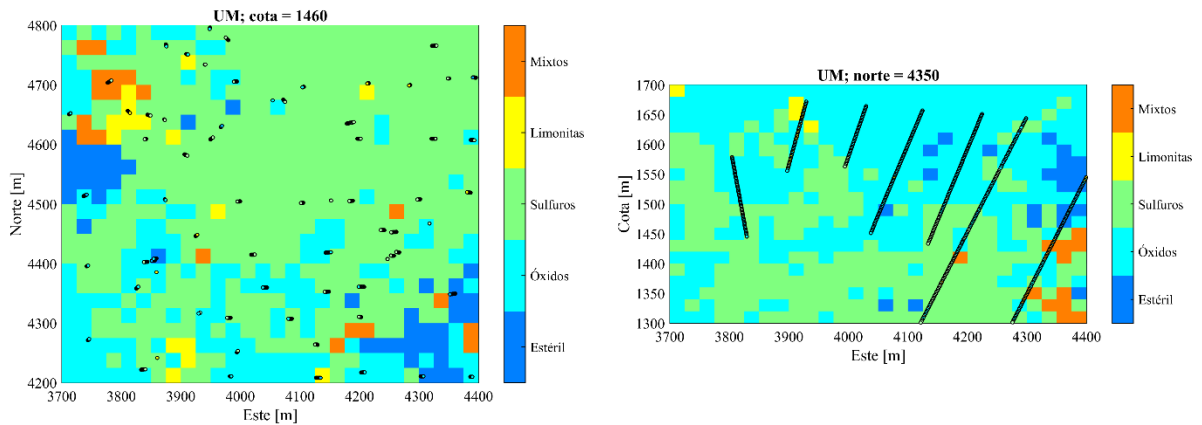
La simulación se realiza mediante simulación plurigaussiana, condicional a la información de los sondeos de exploración. Para obtener la zona mineralizada en cada realización se realiza una transformación a los valores Gaussianos de la información categórica mediante el muestreador de Gibbs (Armstrong et al, 2011). Posteriormente se realiza la simulación de los valores Gaussianos mediante el algoritmo de bandas rotantes, para finalizar con un condicionamiento mediante kriging y una conversión a valores categóricos considerando la regla de truncación definida. En esta etapa se realizaron 50 realizaciones de simulación.

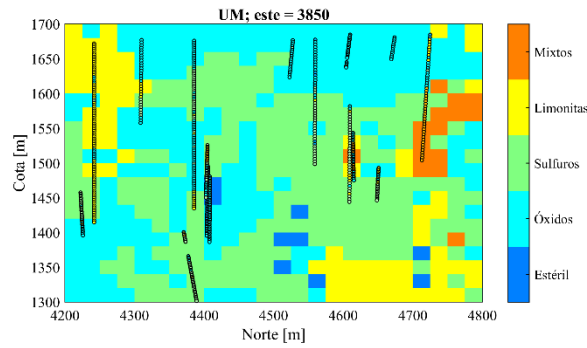
La Figura 6-5 muestra algunas vistas de los resultados de una realización para la distribución de unidades mineralizadas en el yacimiento. Se observa una gran similitud entre los resultados mostrados por la realización de la simulación y los obtenidos por el modelo interpretado. Sin embargo, es posible observar una mayor variabilidad en los resultados de las simulaciones, ya que se puede observar la alternancia entre distintas unidades y que los contactos no se encuentran tan suaves como en el modelo interpretado.



**Figura 6-5: Secciones de simulación de unidades de mineralización (realización #1)**

A modo de verificación visual, se presentan secciones en la Figura 6-6, que muestran los resultados de las simulaciones con los valores de los sitios muestreados, exhibiendo una correspondencia entre los resultados del modelo y los valores muestreados.





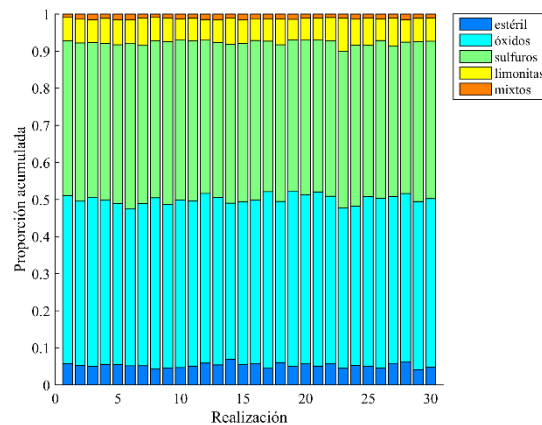
**Figura 6-6: Verificación visual de modelo plurigaussiano (realización #5)**

### 6.3.1 Resultados globales

Los resultados globales de las simulaciones plurigaussianas se refieren a los parámetros que permiten caracterizar el yacimiento, independientemente de los resultados obtenidos en cada uno de los bloques o sitios de interés.

Entre los parámetros que permiten caracterizar un yacimiento de manera global se encuentran la proporción de las distintas unidades mineralizadas simuladas.

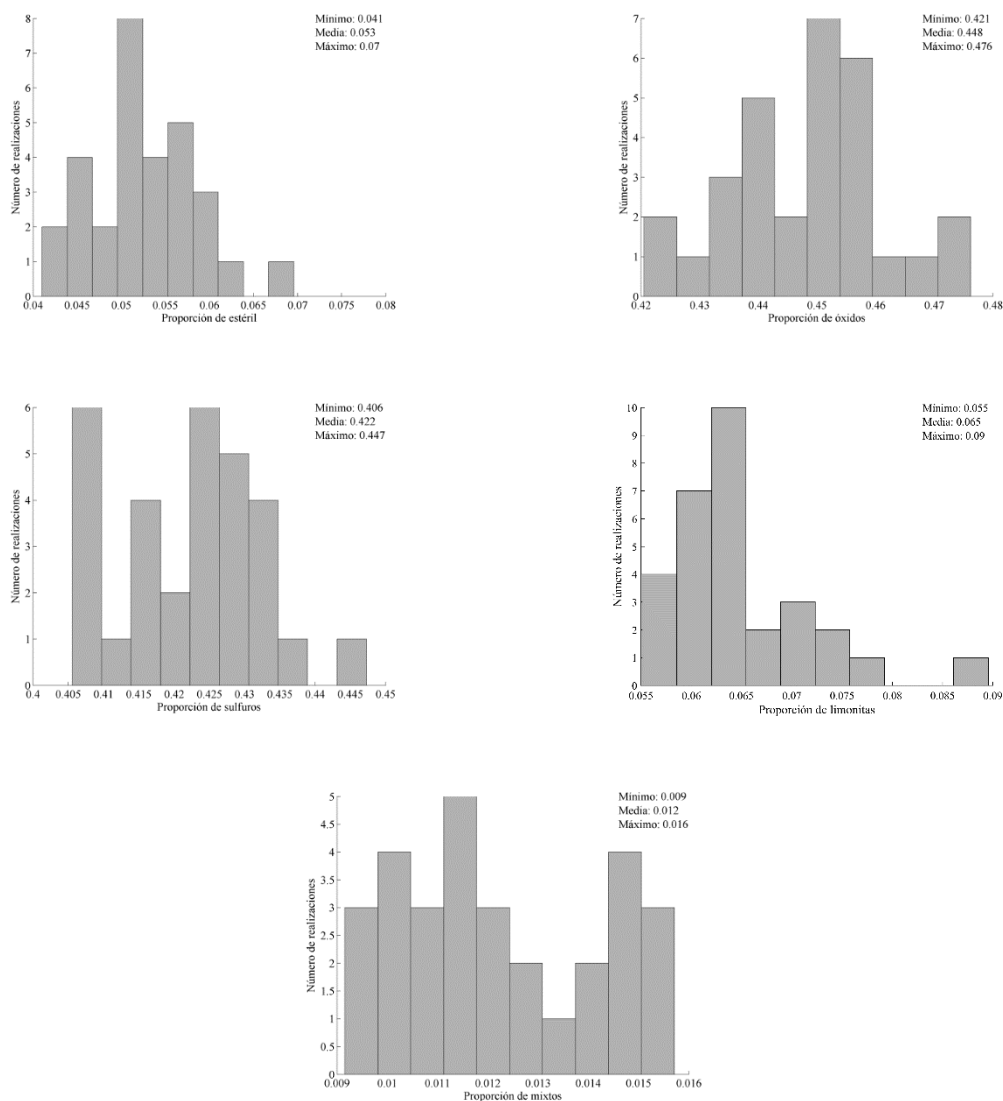
En la Figura 6-7 se observa la proporción del yacimiento que ocupa cada unidad mineralizada. Se puede observar que las proporciones de las unidades mineralizadas son similares entre sí a lo largo de las diferentes realizaciones (30 en total). Las unidades que tienen mayor presencia son los óxidos y los sulfuros, ocupando en promedio un 44% y 42%, respectivamente. La unidad que muestra menor presencia es el material del tipo mixto, que ocupa en promedio un 1.2% del yacimiento.



**Figura 6-7: Proporción de unidades mineralizadas en realizaciones**



La Figura 6-8 muestra el histograma de la proporción de cada unidad mineralizada para el total de las realizaciones. En las figuras se puede ver los rangos de la proporción de cada unidad en el yacimiento. Se destaca el hecho que en ninguna realización el porcentaje de óxidos y de sulfuros ocupa menos del 42% y 40%, respectivamente. Corroborando la predominancia de estas unidades en el yacimiento.

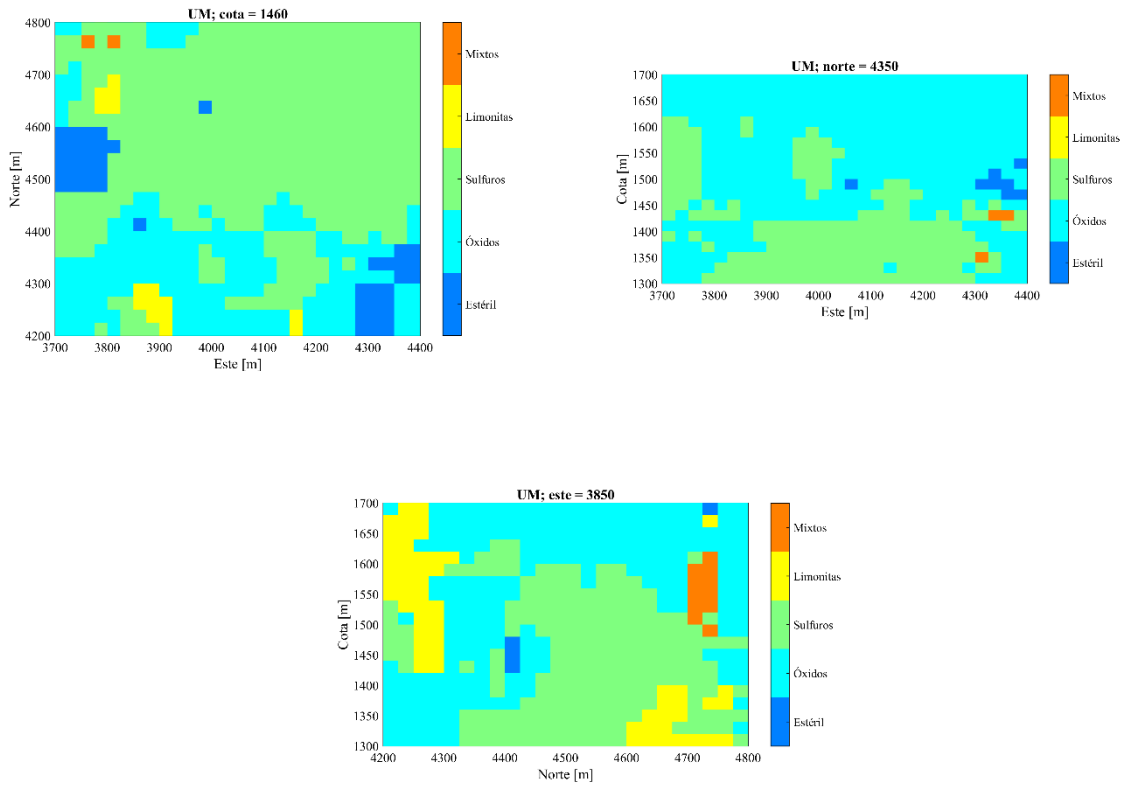


**Figura 6-8: Frecuencia de la proporción de unidades mineralizadas en 30 realizaciones**

### 6.3.2 Resultados locales

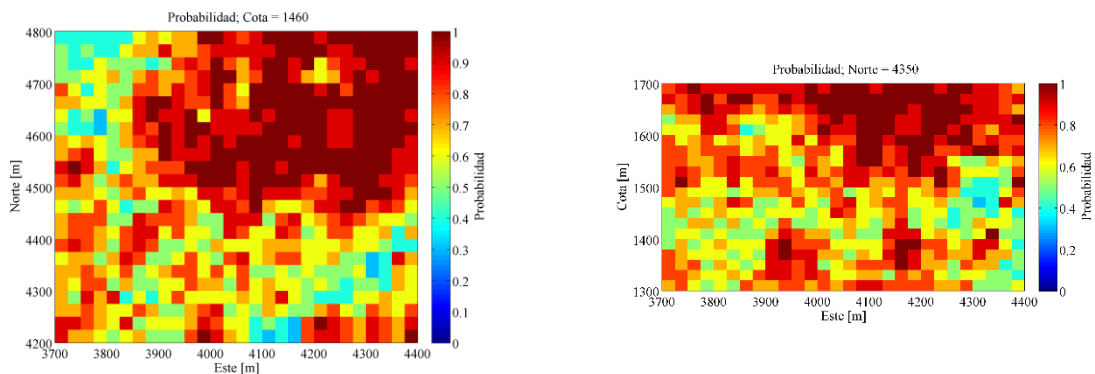
Los resultados locales tienen relación con la unidad mineralizada obtenida en cada sitio o bloque simulado y con la variabilidad que muestran los resultados a lo largo de las distintas realizaciones, lo que permite calcular la probabilidad de que un sitio de interés sea de cierta unidad mineralizada en particular.

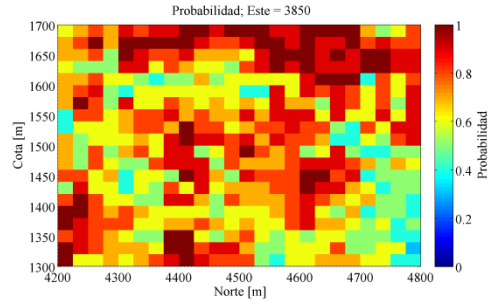
La Figura 6-9 muestra distintas vistas del modelo de unidades mineralizadas construido a partir de la selección de la unidad más probable para cada bloque en todas las realizaciones.



**Figura 6-9: Secciones de unidad más probable de mineralización**

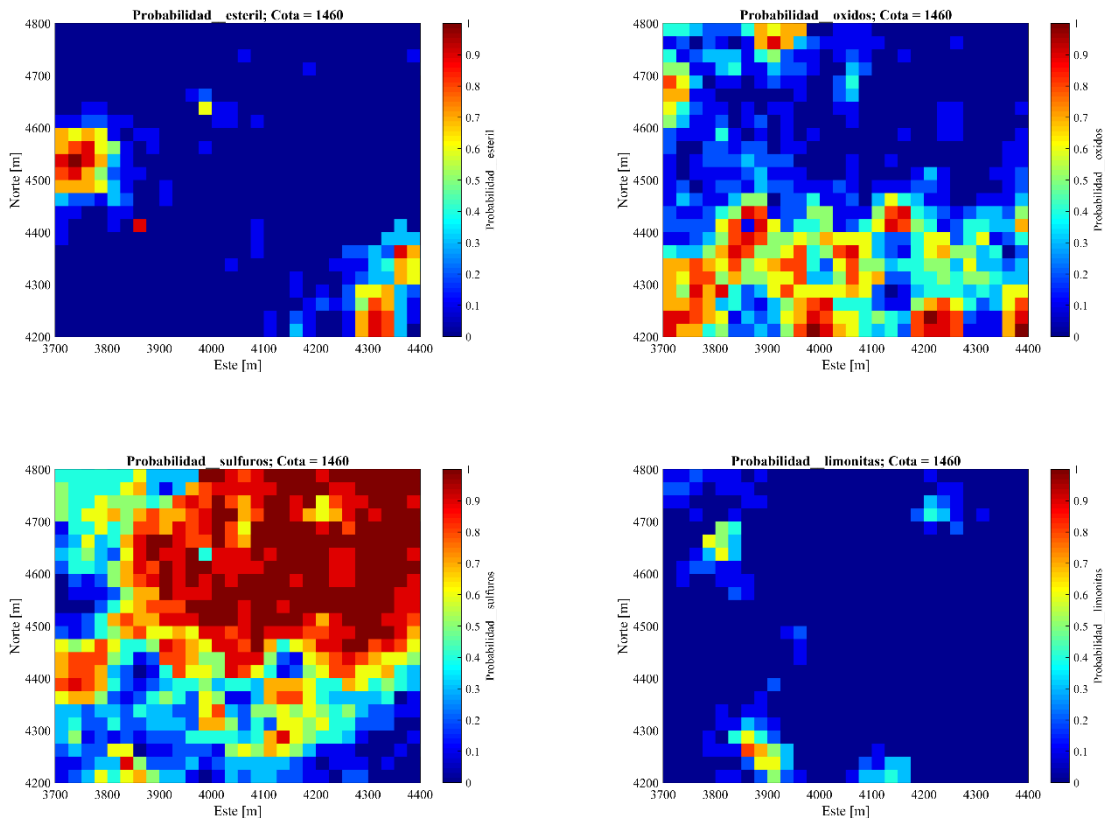
También es posible calcular mapas de probabilidad para la unidad más probable, lo que permite identificar cuáles son las zonas en las que se espera una mayor variabilidad en las unidades mineralizadas y cuáles son las zonas en las que las unidades simuladas se encuentran más definidas. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 6-10.

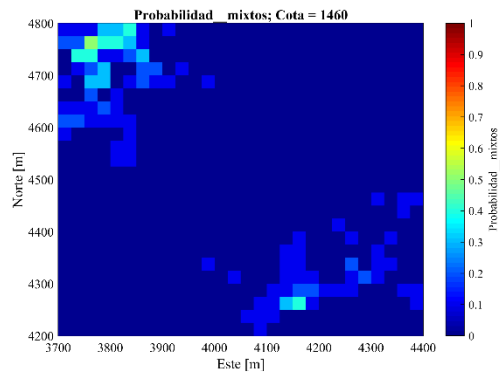




**Figura 6-10: Mapas de probabilidad de unidad más probable**

La Figura 6-11 muestra los mapas de probabilidad de las unidades, donde es posible identificar las zonas en las que es más probable encontrar cada una de las unidades mineralizadas, donde se puede ver, para esta sección en planta en particular, la alta probabilidad de la unidad de sulfuros y de óxidos, lo que es consistente con los gráficos anteriores.





**Figura 6-11: Mapas de probabilidad de unidades mineralizadas**

## **7 MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE VARIABLES DE INTERÉS**

En esta sección se muestra el desarrollo y los resultados de las cosimulaciones de leyes de carbonato y consumos de ácido, realizadas con el fin de calcular la distribución, la variabilidad y la incertidumbre de esas variables en el yacimiento. Con este propósito se consideran dos metodologías; la primera consiste en separar, de manera tradicional, las distintas unidades mineralizadas al momento de realizar la cosimulación, perteneciendo cada unidad mineralizada a sólo un dominio de simulación. Mientras que en la segunda metodología se separan las unidades mineralizadas al momento de realizar la cosimulación, pero las unidades mineralizadas pueden pertenecer a más de un dominio de simulación, permitiendo un traslape entre dichos dominios.

Gran parte de la metodología considerada en ambos modelos es análoga. Sin embargo se realizan sobre distintos conjuntos de datos debido a la definición de los dominios a simular. En primer lugar se presenta el desarrollo y los resultados del modelo de simulación que no considera un traslape entre dominios de simulación y en segundo lugar el modelo que considera el traslape entre estos dominios.

### **7.1 SIMULACIÓN SIN TRASLAPE DE DOMINIOS**

#### **7.1.1 Definición de dominios de simulación**

La separación de las unidades mineralizadas en distintos dominios de simulación se realiza mediante criterios estadísticos, geológicos y de distribución espacial. Esto se realiza de manera independiente para cada variable, lo que flexibiliza la separación de los datos en distintos dominios, sin necesidad de imponer los criterios de separación para una variable sobre la otra variable.

Lo anterior es sumamente relevante, debido a que las dos variables de este estudio tienen una naturaleza distinta; las leyes de carbonato corresponden al resultado de un proceso geológico de formación del yacimiento y constituyen una característica intrínseca de cada sitio muestreado. Mientras que el consumo de ácido corresponde al resultado de una prueba metalúrgica, en este caso pruebas de lixiviación, lo que la hace una variable que depende de las condiciones y protocolo bajo el cual se realizó las pruebas. Corresponde a un resultado que puede cambiar, si cambian las condiciones bajo las cuales se desarrollan las pruebas. Esta diferencia en naturaleza de las variables puede implicar que los dominios de simulación y sus fronteras puedan ser distintos para cada una de las variables.

- Ley de carbonato

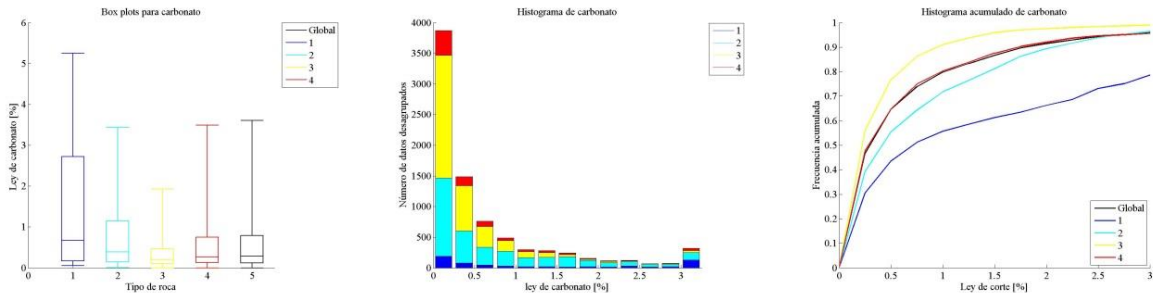
El primer antecedente para la definición de los dominios de simulación corresponde a los correlogramas de la ley de carbonato entre las distintas unidades de mineralización, los cuales se encuentran en la Figura 5-28, donde se puede observar que las únicas unidades mineralizadas que muestran una fuerte correlación para distancias menores a cien metros son el material oxidado y el mixto.

En términos espaciales, se sabe que las dos unidades que tienen mayor presencia en el yacimiento son óxidos y sulfuros, las cuales muestran una correlación baja a todas distancias consideradas, por lo que la frontera entre ambas unidades es del tipo dura. El material mixto, sin embargo, también presenta una correlación considerable con el material sulfurado pero es menor a la correlación que presenta con el material oxidado. A partir de lo anterior, se definen los dominios de simulación para la ley de carbonato expuestos en la Tabla 7-1.

**Tabla 7-1: Dominios de simulación para ley de carbonato**

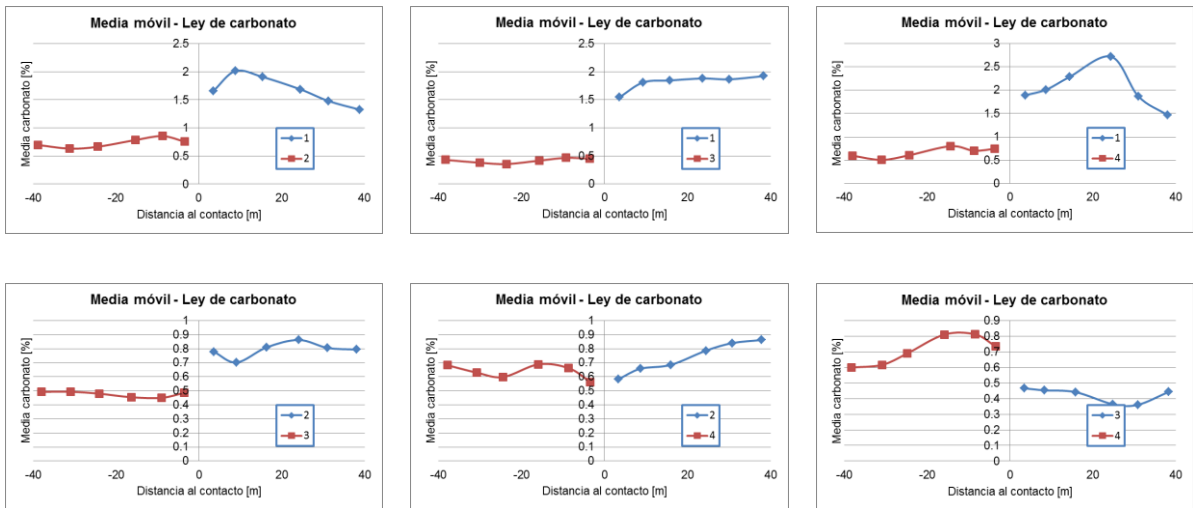
Dominio de simulación	Unidades mineralizadas
1	Estéril
2	Óxidos-Mixtos
3	Sulfuros
4	Limonitas

La Figura 7-1 presenta la distribución y el rango de las leyes de carbonato para los dominios de simulación, donde se puede ver que existen diferencias en el rango y distribución acumulada del material estéril (unidad 1) con los demás dominios de simulación.



**Figura 7-1: Distribución de ley de carbonato según dominio de simulación**

La siguiente figura muestra las medias de ley de carbonato en la frontera entre los distintos dominios, mostrando que existe un tipo de contacto duro entre estos dominios.



**Figura 7-2: Media móvil de ley de carbonato en el contacto según dominio**

- Consumo de ácido

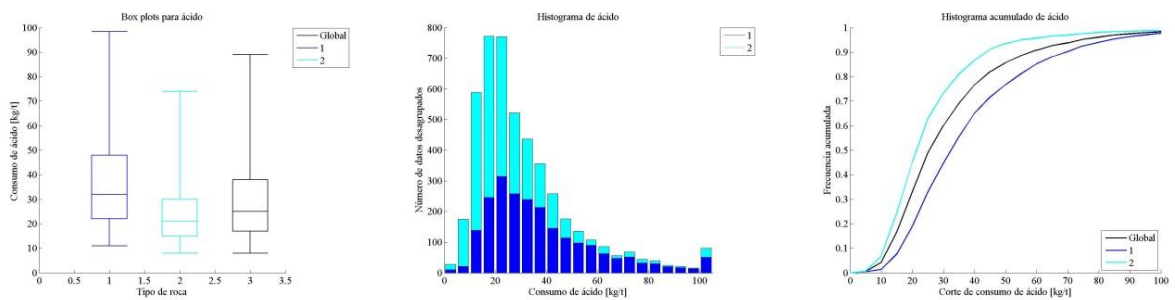
A partir de los correlogramas de consumo de ácido presentados en la Figura 5-29 se puede observar que existe una fuerte correlación entre el material sulfurado y las limonitas; así como entre estéril, óxidos y mixtos. Se observa que la correlación entre óxidos y sulfuros es baja, por tanto estas unidades deben estar en dominios de simulación separados.

La definición de los dominios de simulación para consumo de ácido se resume en la Tabla 7-2.

**Tabla 7-2: Dominios de simulación para consumo de ácido**

Dominio de simulación	Unidades mineralizadas
1	Estéril-Óxidos-Mixtos
2	Sulfuros-Limonitas

A continuación se presentan la distribución y el rango de los valores de consumo de ácido para los dos dominios de simulación, donde se puede ver que existen diferencias en el rango y distribución acumulada del material entre ambos dominios.



**Figura 7-3: Distribución de consumo de ácido según dominios de simulación**

La Figura 7-4 muestra las medias de consumo de ácido en la frontera entre los dos dominios, mostrando que existe un tipo de contacto duro entre ellos.

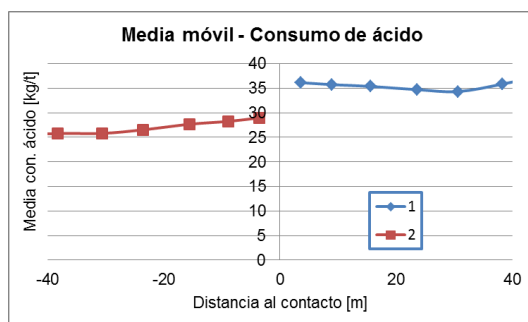


Figura 7-4: Media móvil de consumo de ácido en el contacto según dominio

### 7.1.2 Anamorfosis

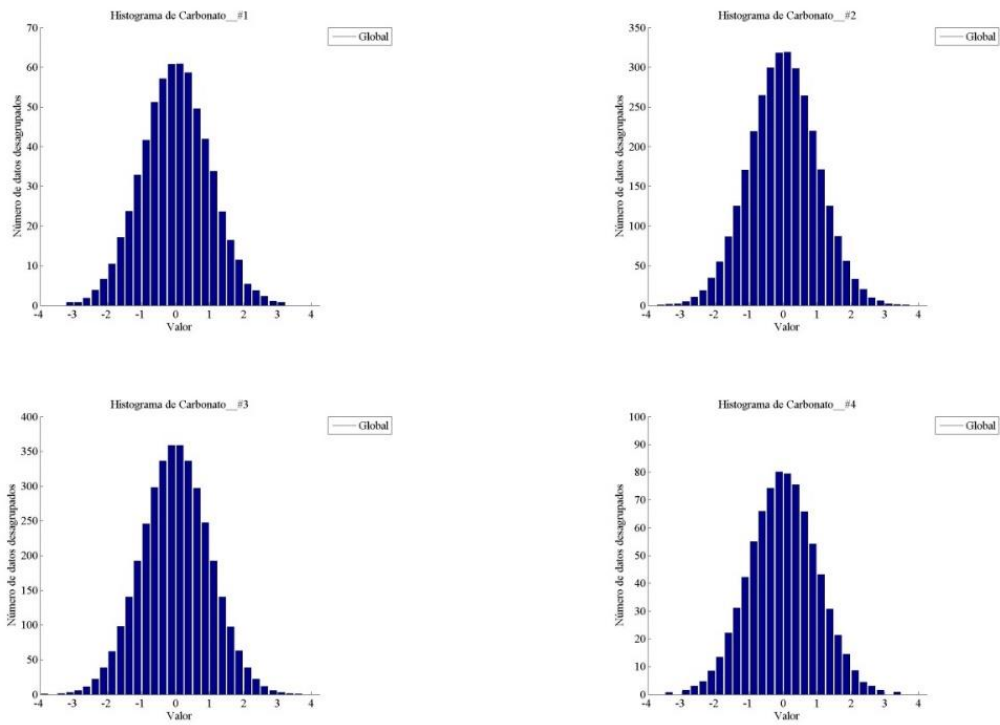
La siguiente etapa consiste en una anamorfosis Gaussiana de las variables a simular. De esta manera se busca transformarlas en variables con una distribución normal (0,1). Esto se realiza distorsionando el histograma desagrupado de los valores en cada unidad a simular para obtener el histograma Gaussiano estándar. La Tabla 7-3 muestra los principales estadísticos de la transformación de cada variable para los distintos dominios de simulación, donde se observa que tienen media cero y desviación uno.

Tabla 7-3: Estadísticas de variables Gaussianas por dominio

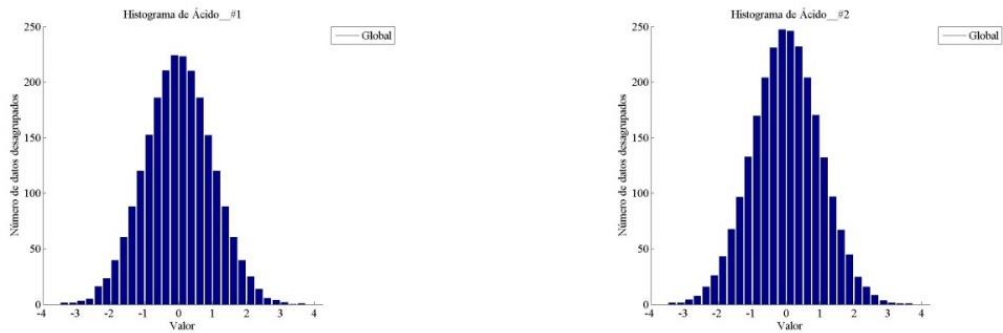
Variable	Dominio	Número datos	Media	Desviación	Mínimo	Máximo
Ley de carbonato [%]	1	619	0	1	-3.2	3.22
	2	3228	0	1	-3.72	3.64
	3	3631	0	1	-3.77	3.74
	4	806	0	1	-3.31	3.28
Consumo de ácido [kg/t]	1	2265	0	1	-3.4	3.56
	2	2499	0	1	-3.41	3.57

A continuación (Figura 7-5 y Figura 7-6) se muestran los histogramas del consumo de ácido transformado por cada dominio de simulación, donde se puede ver la forma típica de las distribuciones normales.



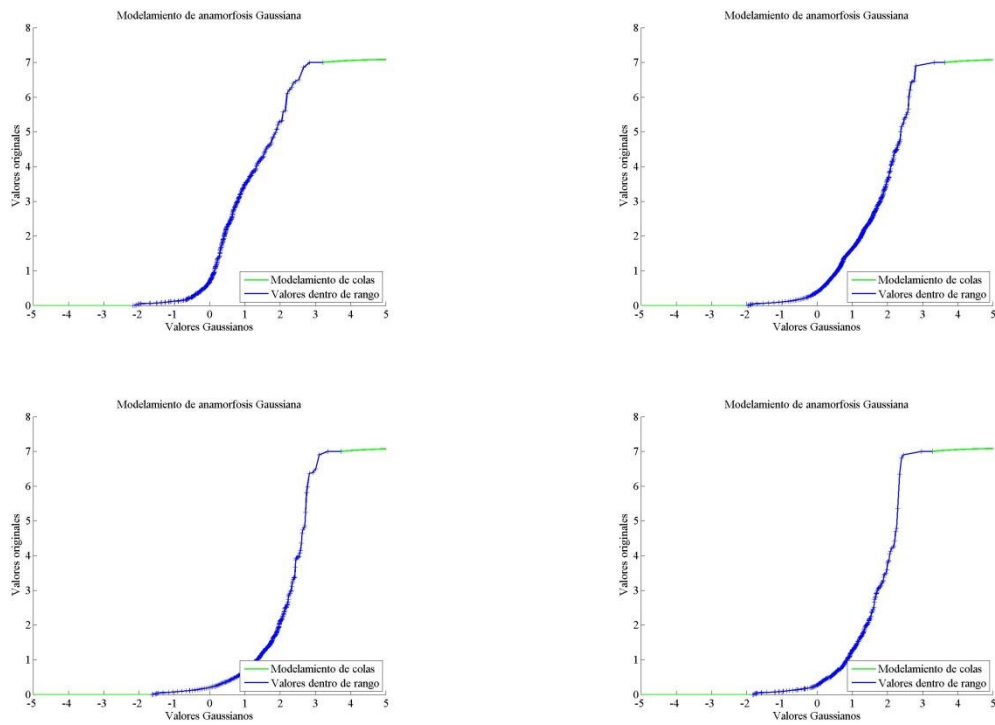


**Figura 7-5: Histogramas de datos Gaussianos de ley de carbonato según dominios**

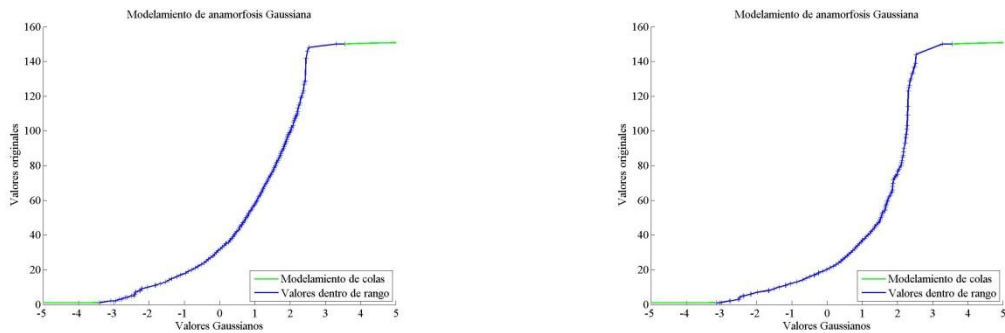


**Figura 7-6: Histogramas de datos Gaussianos de consumo de ácido según dominios**

A continuación (Figura 7-7 y Figura 7-8) se muestran las funciones de anamorfosis modeladas, incluyendo el modelamiento de las colas de ambas variables estudiadas. Como los datos de leyes de carbonato y consumo de ácido fueron truncadas a un valor umbral de 7% y 150 kg/t respectivamente, la extrapolación de la cola superior involucra una holgura de un 5% sobre el valor límite.



**Figura 7-7: Modelamiento de anamorfosis para ley de carbonato según dominios**



**Figura 7-8: Modelamiento de anamorfosis para consumo de ácido según dominios**

### 7.1.3 Bigaussianidad

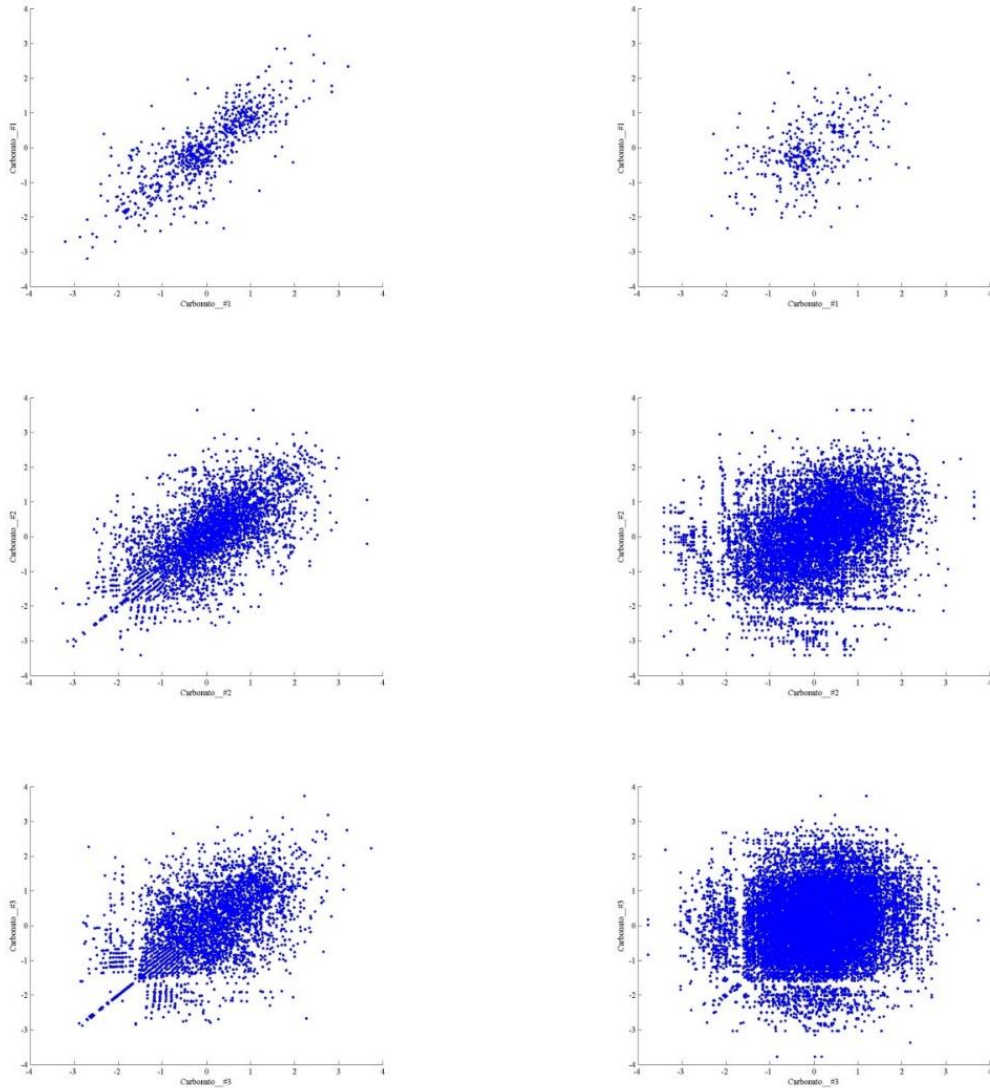
Una vez realizada la transformación se procede a verificar la hipótesis de multi gaussianidad, aunque para esto sólo se revisan las nubes de correlación diferida y la relación entre el variogramas de diferentes órdenes.

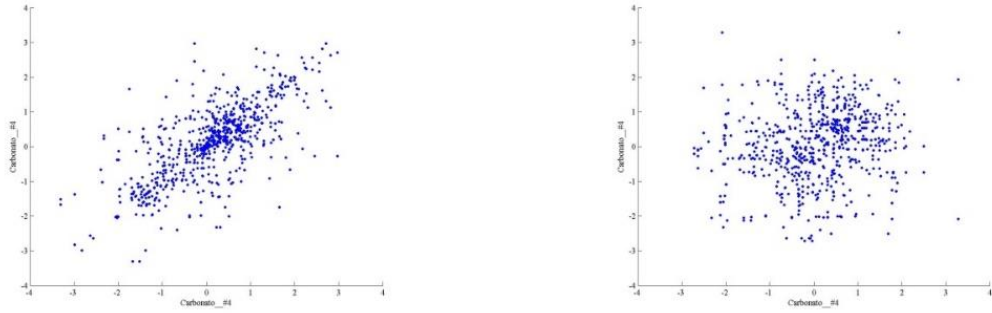
- Nubes correlación diferida

Con el fin de confirmar el carácter bigaussiano de los datos transformados, se consideran las nubes de correlación diferidas para los distintos dominios de simulación y variables. Lo relevante de estos gráficos es la forma de la nube a distintas distancias. Para distancias muy grandes los datos no deben tener correlación, mientras a distancias bajas, se estima que los

puntos de la nube deben estar cerca de la diagonal, ya que los datos se encuentran correlacionados.

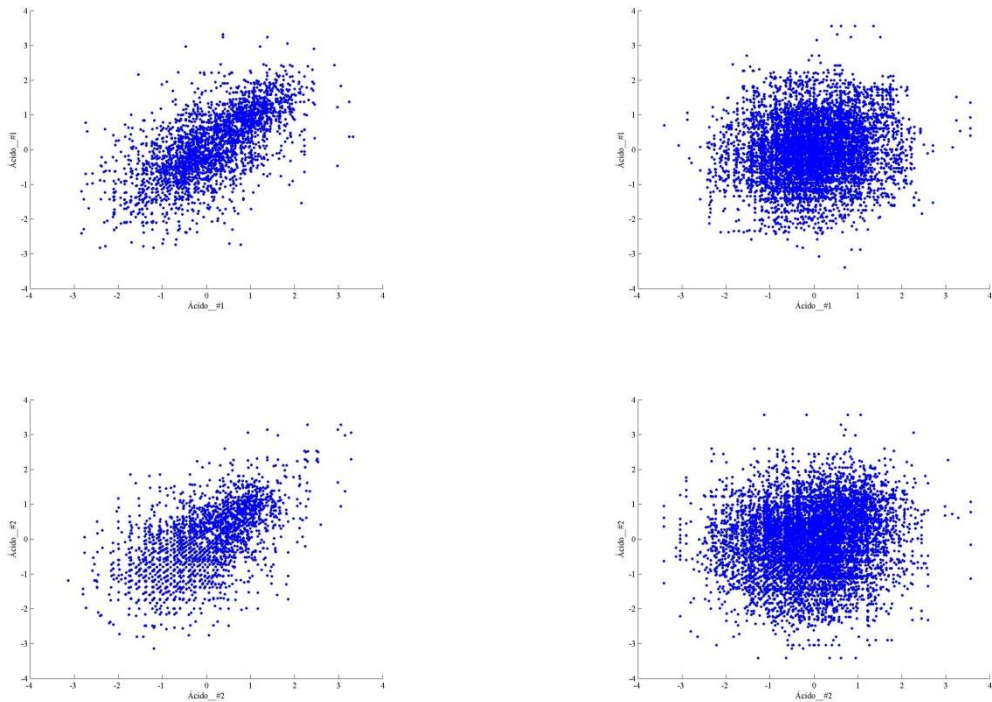
La Figura 7-9 muestra las nubes de correlación diferida para los distintos dominios de simulación, considerando los valores Gaussianos de las leyes de carbonato. Se puede observar que los pares a 5 metros de distancia (figura de la izquierda) muestran una alta correlación, pero los pares a una distancia de 90 metros (figura de la derecha) muestran una baja correlación.





**Figura 7-9: Nubes de correlación diferida para ley de carbonato (izq: distancia 5 metros, der: distancia 90 metros) para cada dominio de simulación**

La Figura 7-10 muestra las nubes de correlación diferidas para los dos dominios de simulación de consumo de ácido, considerando una distancia de 5 (izquierda) y 90 metros (derecha). Se puede observar una fuerte correlación a distancias pequeñas que desaparece al aumentar la distancia.



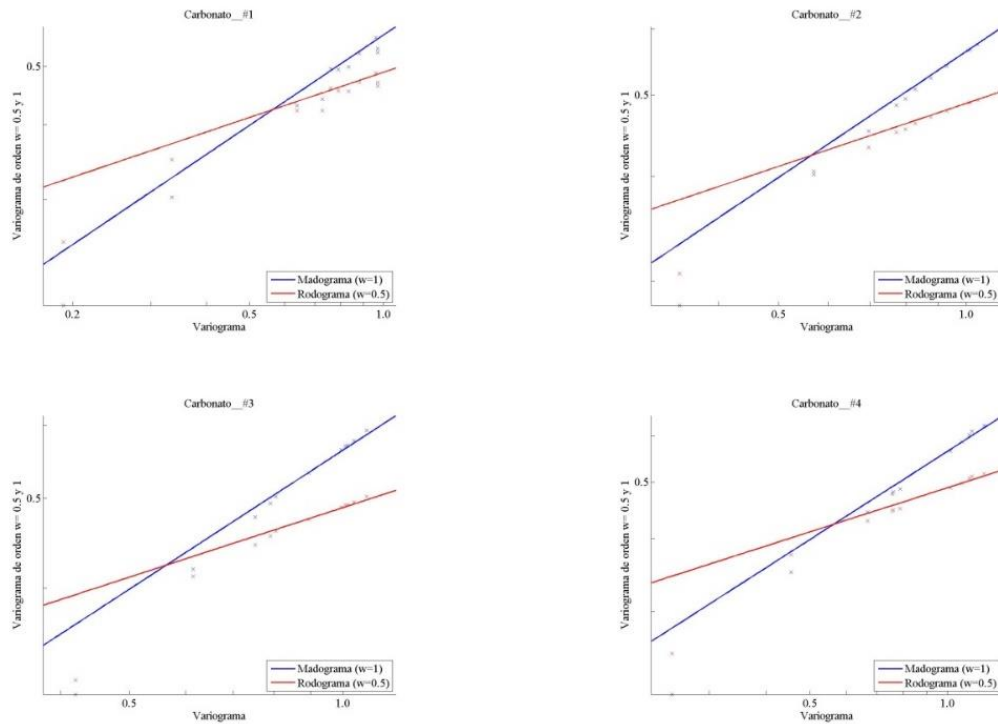
**Figura 7-10: Nubes de correlación diferida para consumo de ácido (izq: distancia 5 metros, der: distancia 90 metros) para cada dominio de simulación**

- Comparación entre madograma, rodograma y variograma

Para corroborar la bigaussianidad de los datos, se examina la relación entre el variograma  $\gamma(h)$  y el madograma o rodograma (variogramas de orden 1 y 0.5 respectivamente), la cual debe corresponder a una línea recta en escala log-log (Emery, 2015). Esta similitud termina

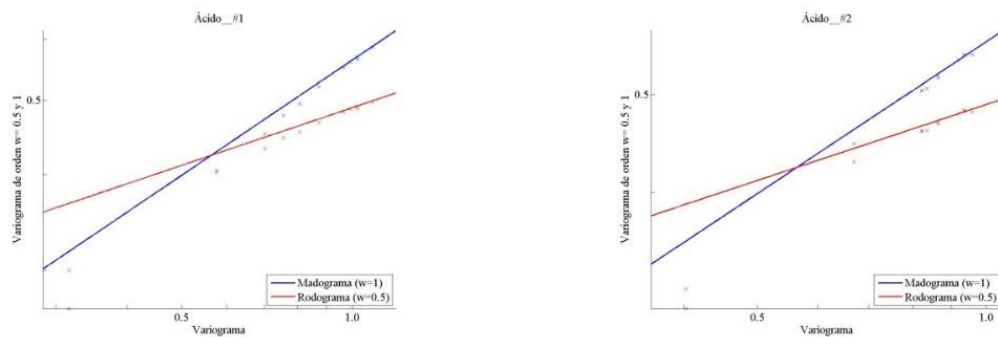
por validar la hipótesis de bigaussianidad.

La Figura 7-11 muestra los resultados para la ley de carbonato en los distintos dominios, los que presentan consistencia con el modelo bigaussiano.



**Figura 7-11: Comparación variogramas vs. madogramas y rodogramas – ley de carbonato, para cada dominio de simulación**

Análogamente, en la Figura 7-12 se exhibe los resultados para el consumo de ácido, mostrando también coherencia con el modelo bigaussiano.



**Figura 7-12: Comparación variogramas vs. madogramas y rodogramas – consumo de ácido para cada dominio de simulación**

### 7.1.4 Variogramas

El análisis variográfico fue desarrollado para cada unidad mineralizada de la siguiente forma:

- Primero se calcularon los variogramas experimentales omnidireccionales, para observar el alcance del variograma y posibles estructuras.
- Luego se calculó un variograma omniplanar (horizontal) y otro vertical para observar posibles variaciones en el variograma con respecto al caso anterior.

Sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre los variogramas omnidireccionales, omniplanares verticales, por lo que fue considerado el caso omnidireccional.

En la Tabla 7-4 se muestran los parámetros considerados para el cálculo de los variogramas experimentales, directos y cruzados.

**Tabla 7-4: Parámetros de variogramas experimentales**

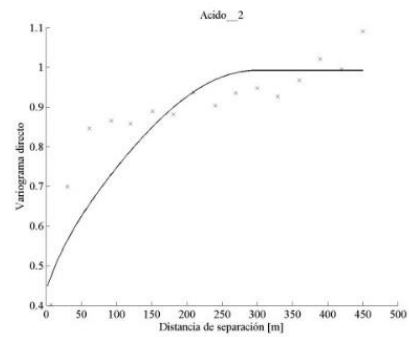
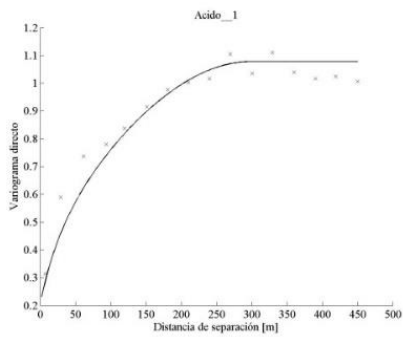
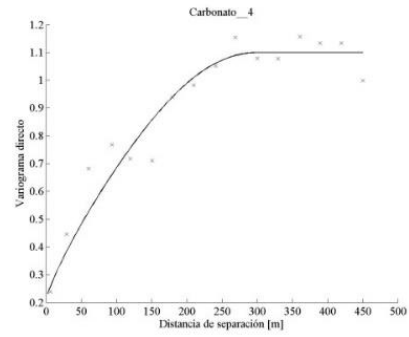
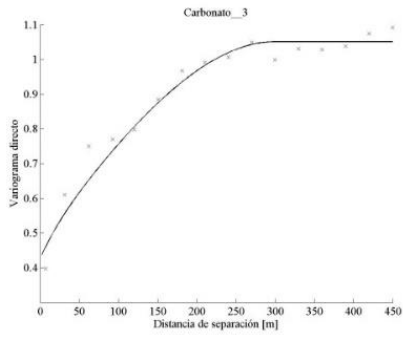
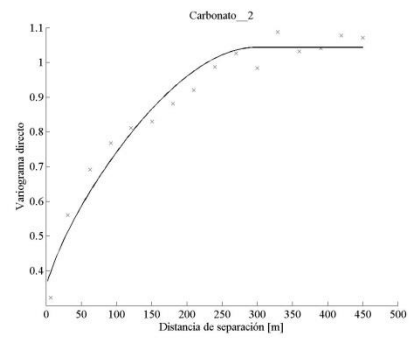
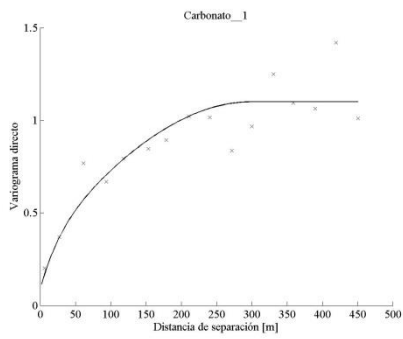
Parámetro	Unidad	Valor
Azimut	°	0
Tolerancia azimut	°	90
Dip	°	0
Tolerancia dip	°	90
Paso	m	30
Número de pasos	#	15
Tolerancia paso	m	15

En la Tabla 7-5 se muestran los parámetros considerados para el modelamiento de los variogramas. El ajuste de los variogramas se realizó mediante un método semi-automático.

**Tabla 7-5: Estructuras de variogramas modelados**

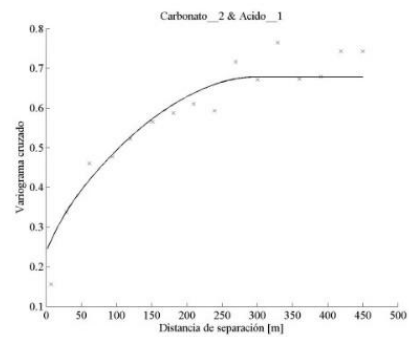
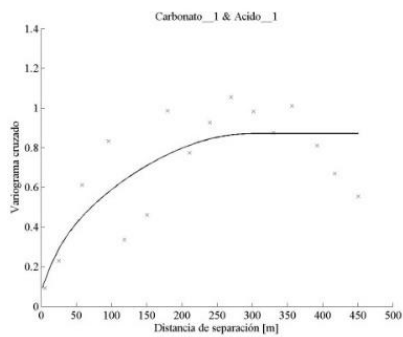
Estructura	Tipo	Alcance [m]
1	Exponencial	75
2	Exponencial	100
3	Esférico	150
4	Esférico	200
5	Esférico	250
6	Esférico	300

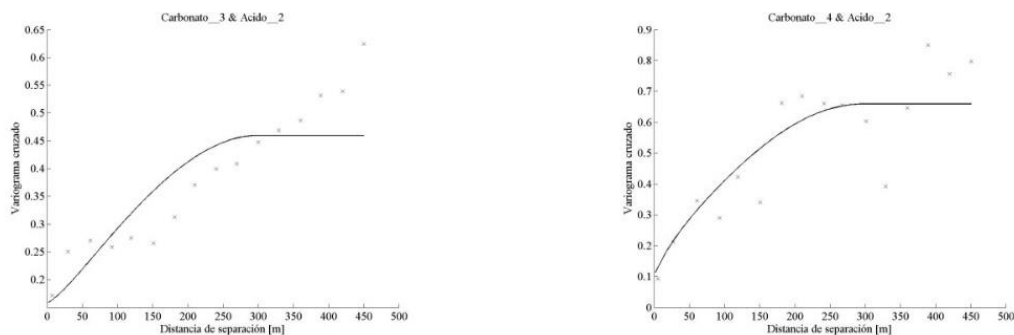
En la Figura 7-13 se muestran los variogramas directos, experimentales y modelados, para las dos variables estudiadas y para cada dominio de simulación.



**Figura 7-13: Variogramas directos de variables Gaussianas**

Los variogramas cruzados entre las variables ley de carbonato y consumo de ácido se muestran en la Figura 7-14.





**Figura 7-14: Variogramas cruzados de variables Gaussianas**

### 7.1.5 Validación

Para la validación se considera la técnica de validación cruzada que consiste en simular cada uno de los sitios con mediciones a partir de las otras mediciones y comparar el valor simulado con el valor de la base de datos, para ver la calidad del ajuste del modelo. A continuación, se muestra la estadística de los valores reales y predichos (promedio de 30 simulaciones realizadas) para los mismos puntos muestreados. Se puede observar en la Tabla 7-6 que existe una similitud entre las distribuciones para ambas variables.

**Tabla 7-6: Estadística de simulación cruzada**

Parámetro	Ley de carbonato [%]		Consumo de ácido [kg/t]	
	Real	Predicción	Real	Predicción
Número de datos	8284	8284	4764	4764
Media	0.67	0.67	31.23	30.77
Varianza	0.94	0.53	472.83	260.44
Mínimo	0	0	1	4.82
1-cuantil	0.12	0.21	17	19.23
Mediana	0.28	0.41	25	25.81
3-cuantil	0.79	0.86	38	38.6
Máximo	7	6.49	150	118.6

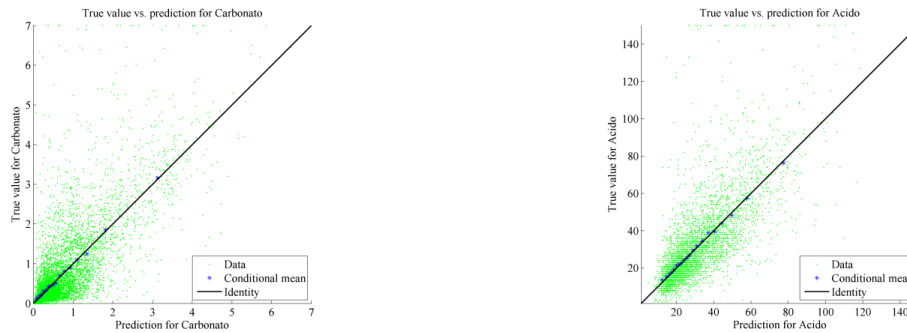
Los errores entre los valores reales y los obtenidos mediante el promedio de treinta simulaciones se muestran en la Tabla 7-7, donde se ve que existe un buen ajuste para ambas variables. Es necesario señalar que el coeficiente de correlación entre el consumo de ácido y las leyes de carbonato es de 0.72 para los valores reales mientras que para los valores simulados el coeficiente es de 0.77, por lo tanto no sólo se reproduce la distribución de los datos, sino que también se reproduce la correlación entre las distintas variables.



**Tabla 7-7: Estadística de errores de validación cruzada**

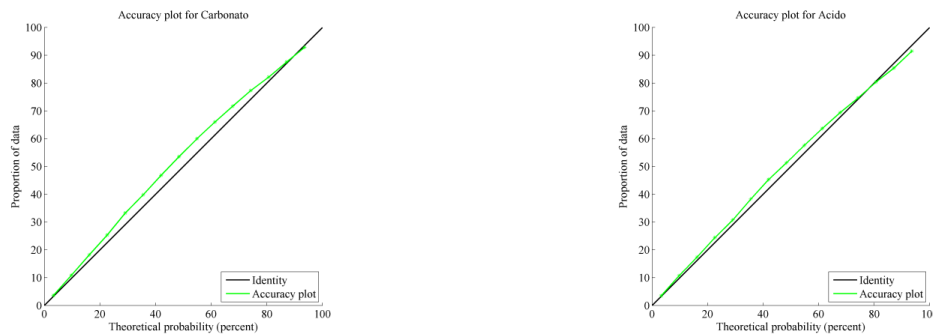
Variable	Media errores	Desv. errores
Ley carbonato [%]	0.35	0.54
Consumo de ácido [kg/t]	3.96	11.54

La Figura 7-15 muestra los gráficos de dispersión entre la media de los valores simulados y los valores de los sitios muestreados, exhibiendo un buen ajuste del modelo, sin la presencia de sesgo global ni condicional. También se puede observar que no existen distintas poblaciones en los gráficos y que corresponde a una sola población de datos.



**Figura 7-15: Dispersión entre valores reales y promedio de 30 simulaciones**

La Figura 7-16 muestra los gráficos de incertidumbre donde se compara una probabilidad teórica de pertenencia a un intervalo con la proporción de datos que pertenecen efectivamente a dicho intervalo, para las dos especies de interés, mostrando un buen ajuste, aunque levemente conservador para las leyes de carbonato.



**Figura 7-16: Gráficos de incertidumbre**

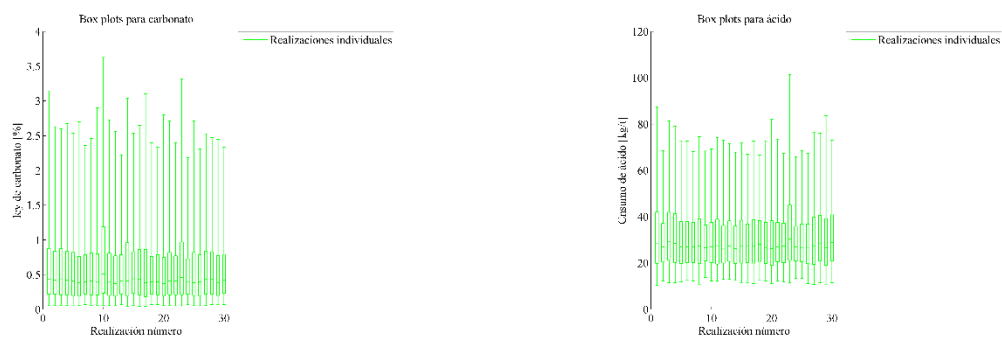
### 7.1.6 Resultados

Para la realización de las cosimulaciones se consideró el método de bandas rotantes. La cantidad de líneas utilizadas en la simulación de bandas fue de 500. La discretización del bloque fue de 3x3x3, en otras palabras cada bloque corresponde al promedio de 27 puntos, y el condicionamiento fue realizado mediante cokriging simple, debido a que se conoce la media

de los datos gaussianos, la que por construcción es cero, con una vecindad de 20 datos y un radio de búsqueda de 300 metros.

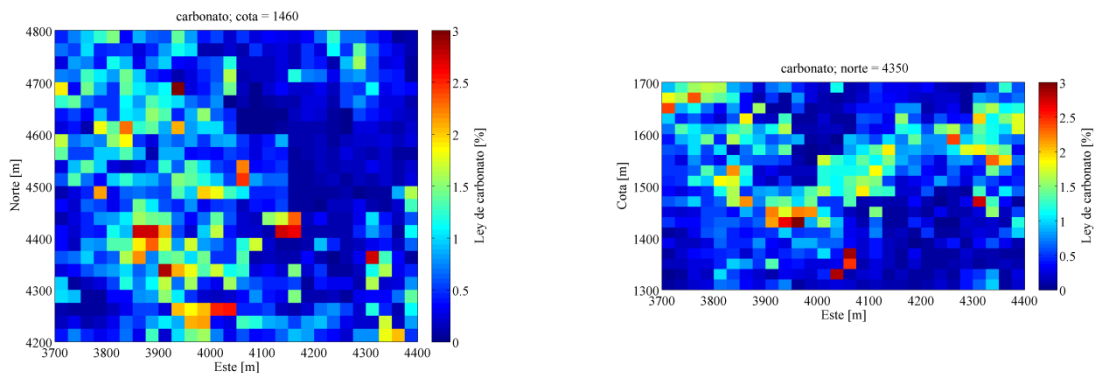
Las simulaciones fueron realizadas considerando la misma grilla de 25 x 25 x 20 metros que se consideró para las simulaciones plurigaussianas, y se realizaron 30 simulaciones en total, una para cada escenario generado de unidades mineralizadas, para incorporar la variabilidad de las unidades mineralizadas en la simulación, y por tanto en la variabilidad de las leyes de carbonato y consumo de ácido.

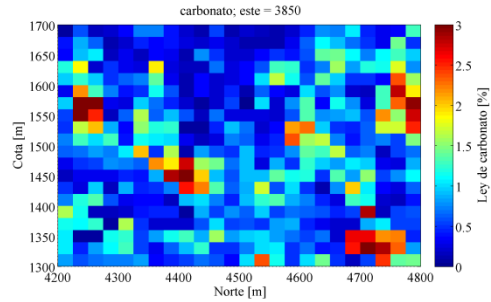
La Figura 7-17 muestra los diagramas de caja para las distintas realizaciones de cosimulaciones, mostrando el rango de los valores obtenidos para las dos variables de interés.



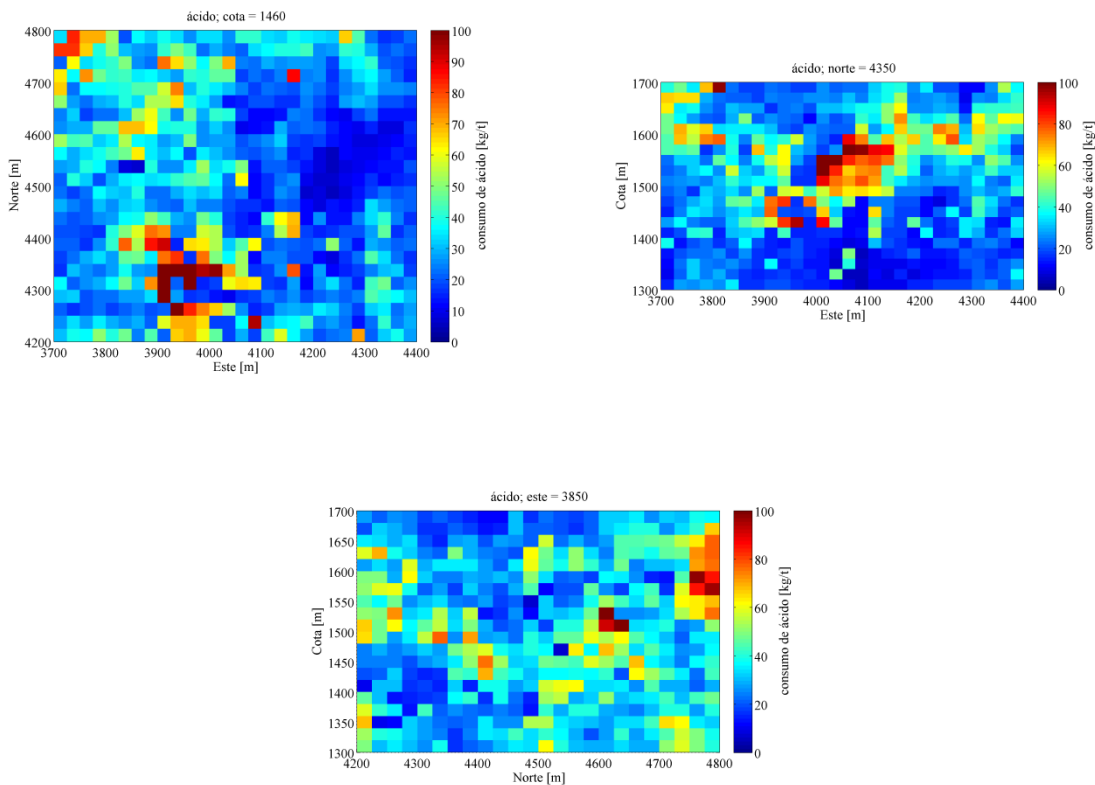
**Figura 7-17: Rango de valores simulados en cada realización**

A continuación, en la Figura 7-18 y en la Figura 7-19, se muestran distintas vistas de los resultados de la realización número uno de las leyes de carbonato y consumo de ácido, donde se puede ver las zonas que presentan mayores leyes de carbonato y consumo de ácido, respectivamente.





**Figura 7-18: Secciones con valores simulados de ley de carbonato**



**Figura 7-19: Secciones con valores simulados de consumo de ácido**

## 7.2 SIMULACIÓN CON TRASLAPE DE DOMINIOS

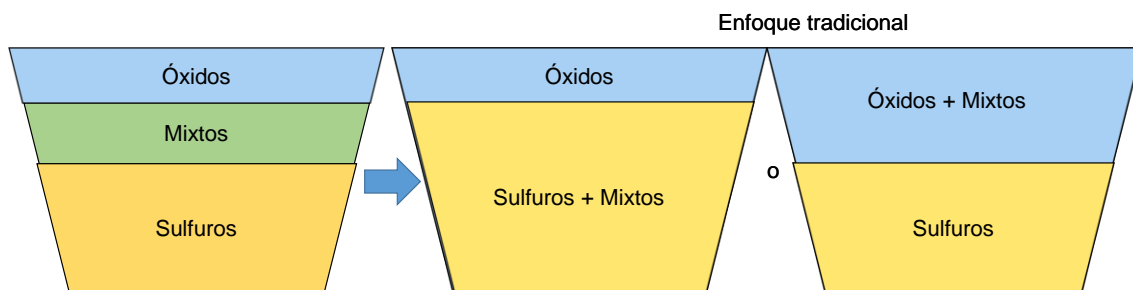
En esta sección se presenta el desarrollo y los resultados del modelo de simulación que considera un traslape entre los distintos dominios de simulación; en otros palabras, al menos dos dominios tienen a una unidad mineralizada en común, como parte de su información. Es necesario señalar que la metodología es similar a la que involucra el traslape entre las unidades asociadas a diferentes variables, con excepción de la definición de dominios a

simular.

La idea es definir variables auxiliares en dominios que agrupan unidades mineralizadas, las cuales constituyen un dominio de simulación, para luego analizar la continuidad espacial con los otros dominios a simular. A partir de la definición de variables anterior, se cuenta con más de un valor simulado para cada bloque, pero el valor seleccionado para cada unidad mineralizada corresponderá al dominio donde la variable es más relevante.

Esta metodología puede ser explicada con un ejemplo que considera como variable de interés las leyes de cobre y las unidades geológicas de estimación corresponden a óxidos, sulfuros y mixto. A partir de ello se generan tres variables auxiliares: cobre general, cobre óxido y cobre sulfuro. Las unidades óxidos y sulfuros incluyen los datos correspondientes al materia mixto, para incluir esa información a la simulación en las unidades óxidos y sulfuros.

La Figura 7-20 muestra cómo, de manera tradicional, son separadas las unidades de un yacimiento, donde el material mixto puede ser considerado con los óxidos o con los sulfuros, permitiendo utilizar esa información para la simulación de una unidad.



**Figura 7-20: Esquema tradicional de definición de dominios**

Por el contrario, la Figura 7-21 muestra que se pueden considerar tres dominios, aportando el material mixto información para la simulación de óxidos y de sulfuros. La unidad mixta también se considera como un dominio aparte, ya que su simulación permitiría mantener el tipo de contacto con ambas unidades sin generar una correlación indebida entre el material oxidado y el sulfurado.



**Figura 7-21: Esquema propuesto de definición de dominios**

### 7.2.1 Definición de dominios de simulación

En esta sección, análogamente al caso que no considera traslape entre dominios, se busca definir los distintos dominios de simulación para cada variable, de acuerdo a los criterios estadísticos, geológicos y de distribución espacial.

- Ley de carbonato

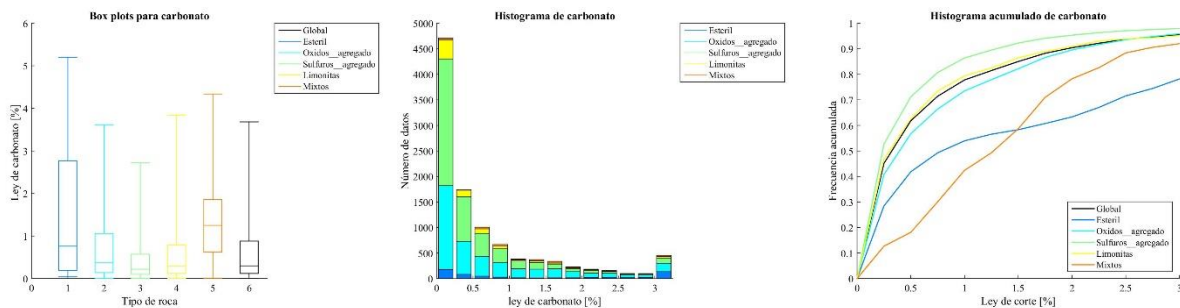
A partir de los correlogramas presentados en la sección anterior se puede observar que existe una considerable correlación entre el material sulfurado y las limonitas. Así como también existe una alta correlación entre el material oxidado y mixto. Al igual que en el caso expuesto en la sección anterior, óxidos y sulfuros deben ir en dominios de simulación separados, debido a la baja correlación entre estas unidades y al salto en ley media en el contacto.

El material mixto presenta una alta correlación con las limonitas, por tanto esa información puede aportar a la simulación tanto de óxidos como de sulfuros. La Tabla 7-8 muestra las nuevas variables generadas para la posterior definición de dominios de simulación.

**Tabla 7-8: Variables de ley de carbonato**

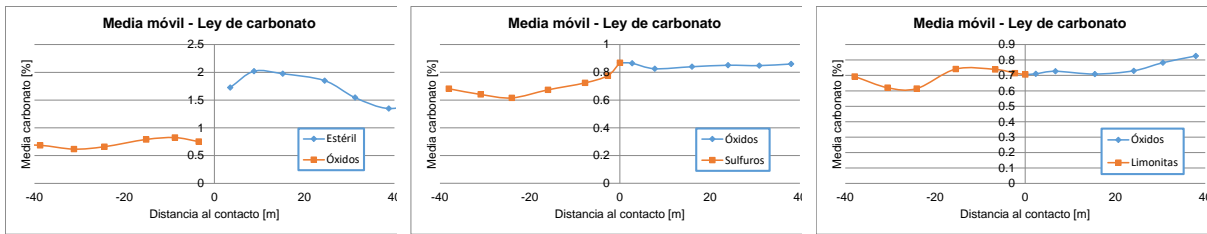
Variables	Unidades mineralizadas
Carbonato estéril	Estéril
Carbonato limonitas	Limonitas
Carbonato mixto	Mixtos
Carbonato óxido agregado	Óxidos-Mixtos-Limonitas
Carbonato sulfuro agregado	Sulfuros-Mixtos-Limonitas

En la Figura 7-22 se presentan la distribución y el rango de las leyes de carbonato para los dominios de simulación.



**Figura 7-22: Distribución de ley de carbonato según dominios de simulación**

La Figura 7-23 muestra las medias de ley de carbonato en la frontera entre los distintos dominios para los principales contactos, mostrando que existe un tipo de contacto suave entre los dominios a simular, lo que es un resultado de la definición de estas variables.



**Figura 7-23: Media móvil de ley de carbonato en el contacto según dominio**

- Consumo de ácido

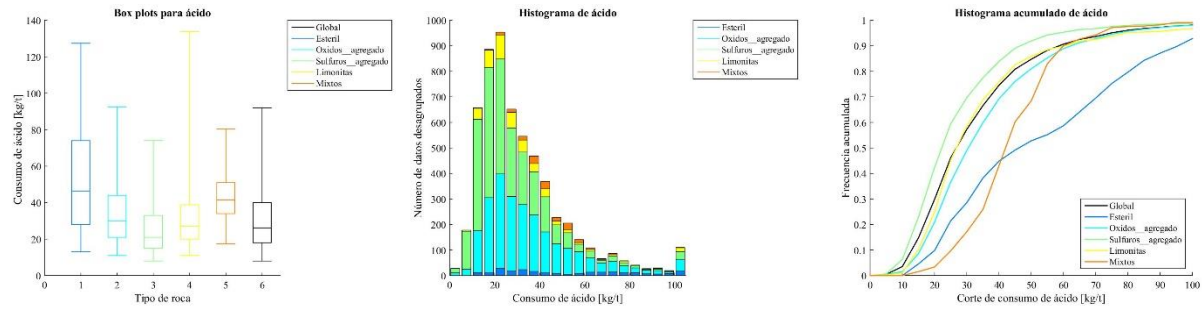
A partir de los correlogramas presentados en la sección anterior se puede observar que existe una fuerte correlación entre el material sulfurado y las limonitas. Así como también existe una alta correlación entre el material oxidado y mixto. Al igual que en el caso expuesto en la sección anterior, óxidos y sulfuros deben ir en dominios separados, debido a la baja correlación entre estas unidades. Al igual que para el caso de las leyes de carbonato, el material mixto presenta una alta correlación con las limonitas, por tanto esa información puede aportar a la simulación de óxidos y sulfuros. La Tabla 7-9 muestra las nuevas variables generadas para la posterior definición de dominios de simulación.

**Tabla 7-9: Variables de consumo de ácido**

VARIABLES	UNIDADES MINERALIZADAS
Ácido estéril	Estéril
Ácido limonitas	Limonitas
Ácido mixto	Mixtos
Ácido óxido agregado	Óxidos-Mixtos-Limonitas
Ácido sulfuro agregado	Sulfuros-Mixtos-Limonitas

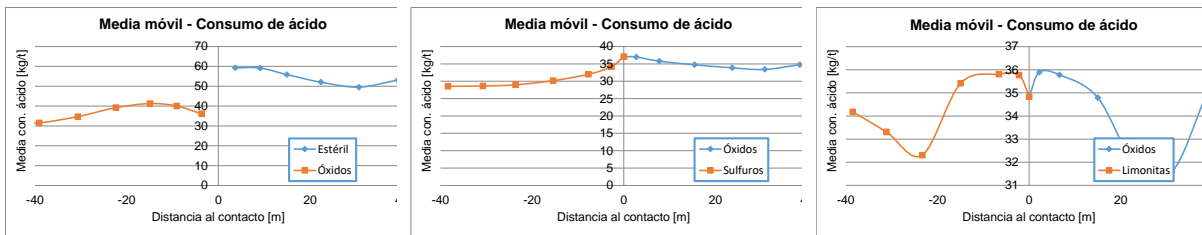
Cabe señalar que en este caso, los dominios coinciden para las dos variables, pero pudo haberse definido dominios diferentes, tal como fue en el caso que no considera traslape entre los dominios, donde los dominios definidos para el consumo de ácido no coinciden con los de leyes de carbonato.

En la Figura 7-24 se presentan la distribución y el rango de consumo de ácido para los dominios de simulación.



**Figura 7-24: Distribución de consumo de ácido según dominios de simulación**

La Figura 7-25 muestra las medias de consumo de ácido en la frontera entre los distintos dominios para los principales contactos. Al igual que en el caso de leyes de carbonato existe un tipo de plots de contacto suave entre los distintos dominios, lo cual se debe a la forma en que los dominios fueron definidas.



**Figura 7-25: Media móvil de consumo de ácido en el contacto según dominio**

## 7.2.2 Anamorfosis

Al igual que en el caso sin traslape entre dominios, la etapa siguiente consiste en una anamorfosis Gaussiana de las variables a simular. La Tabla 7-10 muestra los principales estadísticos de la transformación de cada variable para los distintos dominios a simular, donde se observa que tienen media cero y desviación uno.

**Tabla 7-10: Estadística de transformación gaussiana**

Variable	Unidad	Número datos	Media	Desv.	Mínimo	Máximo
Ley de carbonato [%]	Estéril	619	0	1	-3.2	3.22
	Óxidos+Mixtos+Limonitas	4034	0	1	-3.78	2.77
	Sulfuros+Mixtos+Limonitas	4713	0	1	-3.84	3.74
	Limonitas	806	0	1	-3.31	3.28

	Mixtos	276	0	1	-2.98	2.98
Consumo de ácido [kg/t]	Estéril	254	0	0.99	-2.92	2.95
	Óxidos+Mixtos+Limonitas	2385	0	1	-3.42	3.58
	Sulfuros+Mixtos+Limonitas	2673	0	1	-3.43	3.59
	Limonitas	374	0	1	-3.16	3.15
	Mixtos	174	0	0.99	-2.84	2.84

En la Figura 7-26 y en la Figura 7-27 se muestran los histogramas para los distintos dominios de simulación y variables transformadas de ley de carbonato y consumo de ácido. En estas figuras se puede ver la forma típica de las distribuciones normales.

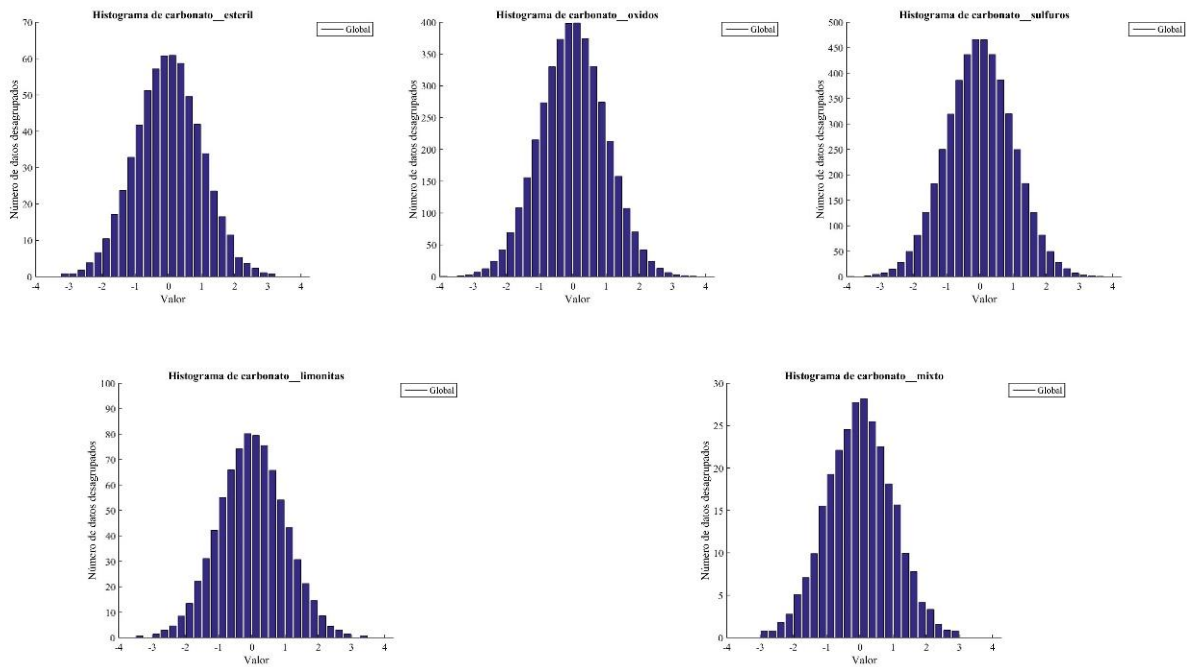
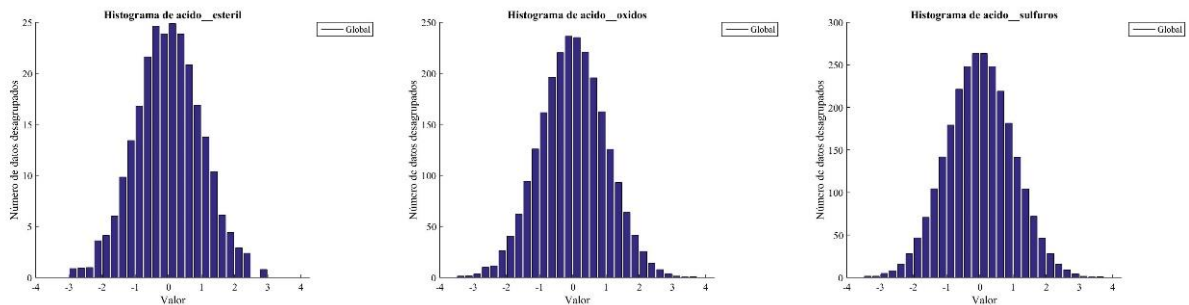
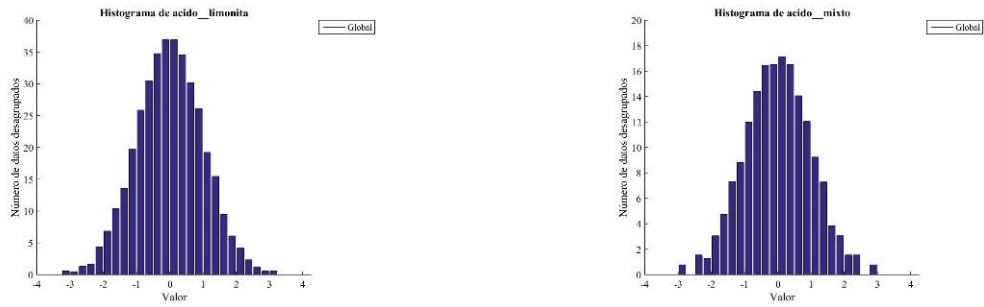


Figura 7-26: Histogramas de datos Gaussianos de ley de carbonato según dominios

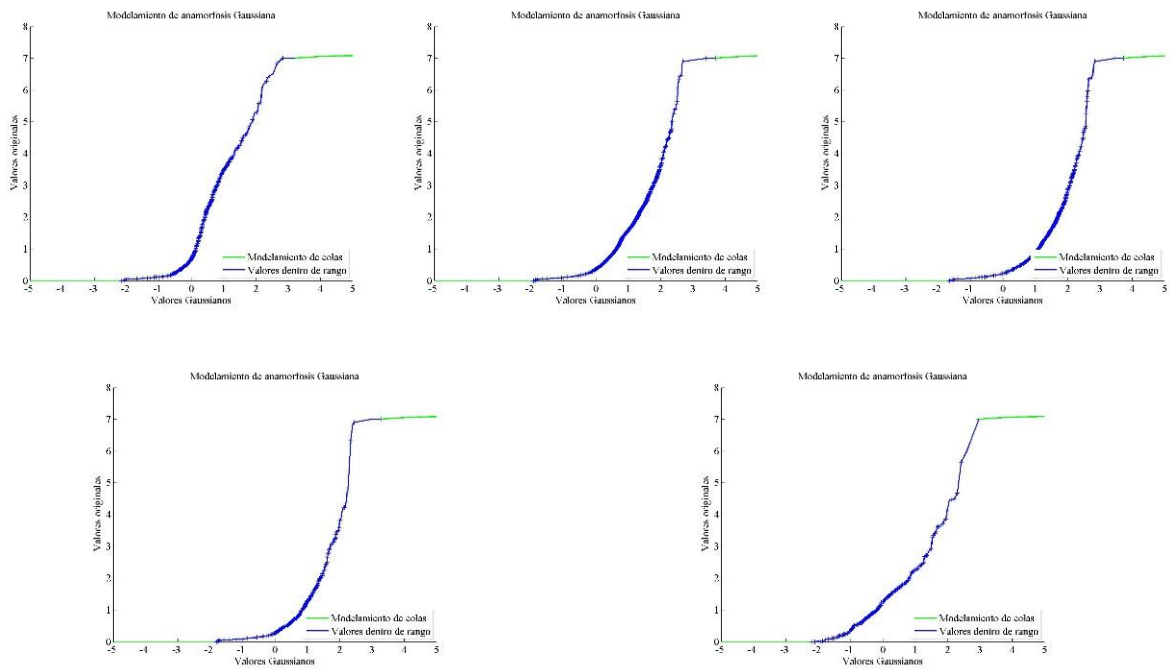




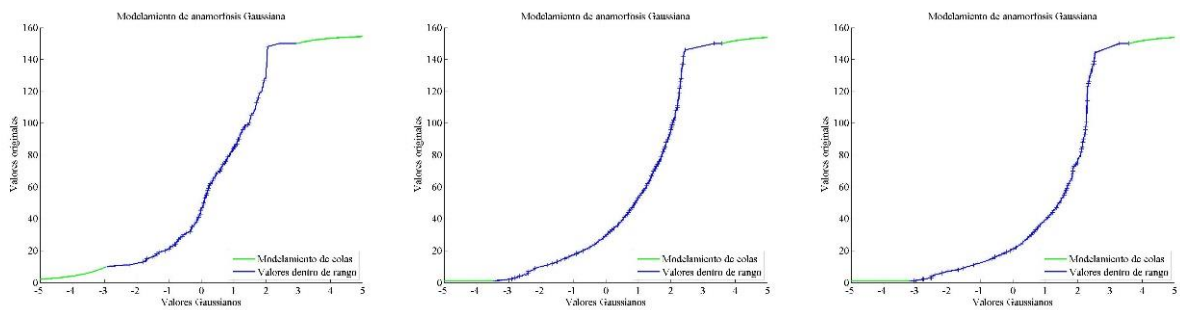


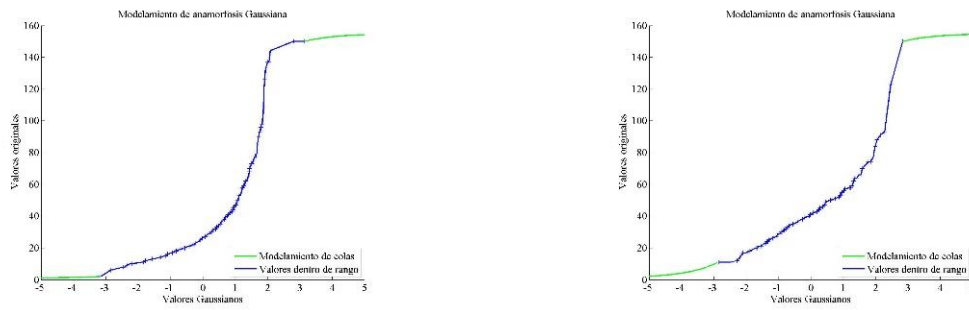
**Figura 7-27: Histogramas de datos Gaussianos de consumo de ácido según dominios**

A continuación (Figura 7-28 y Figura 7-29) se muestran los modelos de anamorfosis de ambas variables estudiadas. Los parámetros considerados son los mismos que los utilizados para el caso sin traslapar.



**Figura 7-28: Anamorfosis modelada de ley de carbonato según dominios**





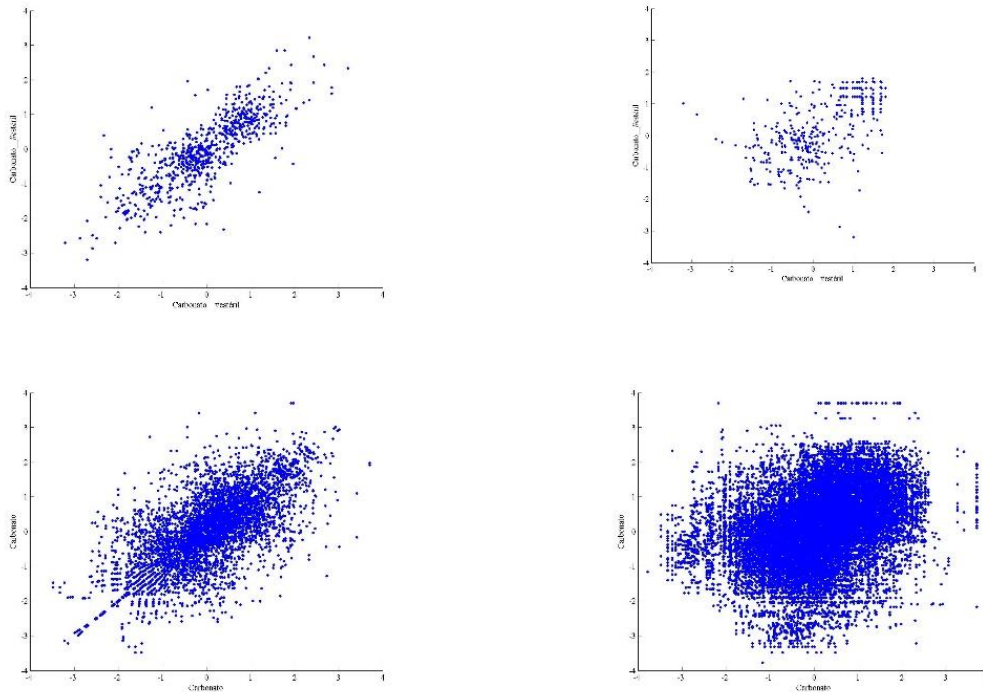
**Figura 7-29: Anamorfosis modelada de consumo de ácido según dominios (izq. a der. estéril, oxido, sulfuro, limonita y mixto)**

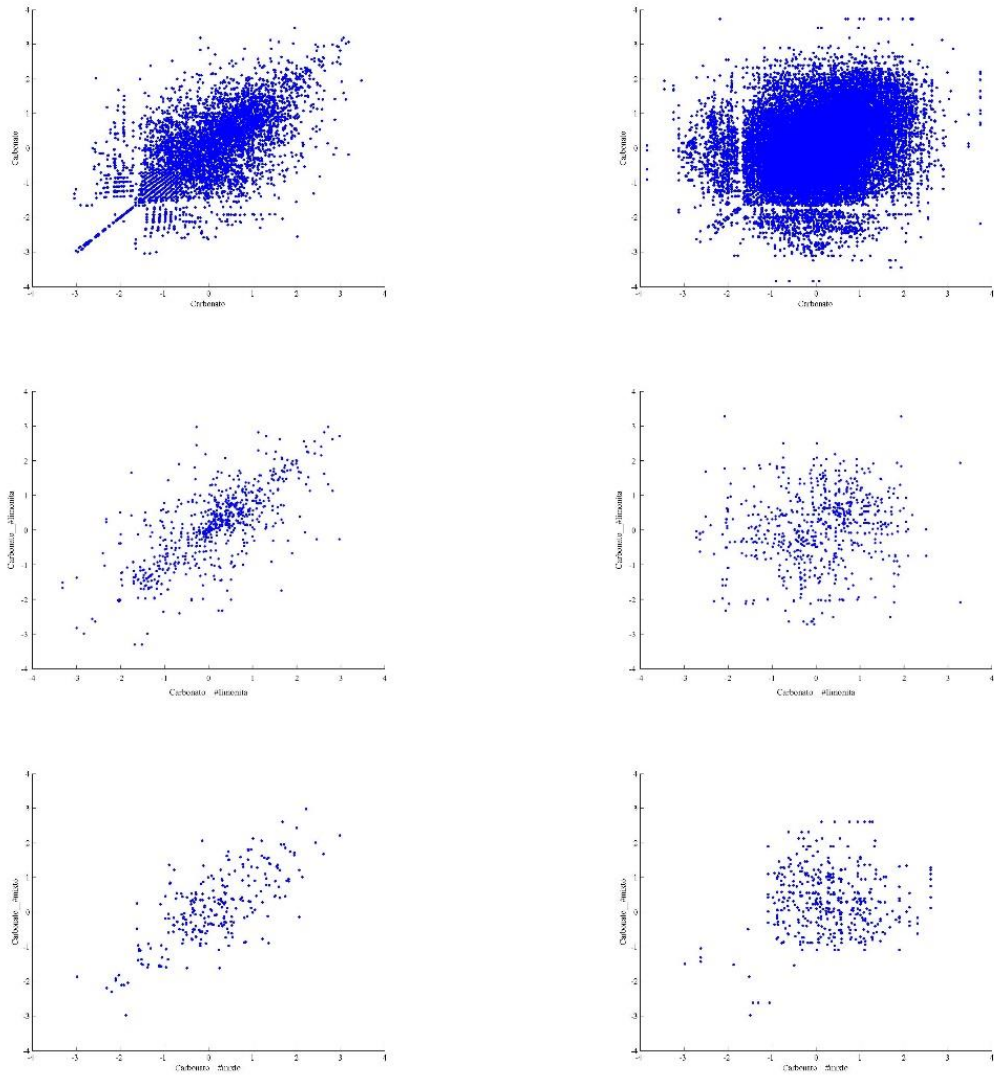
### 7.2.3 Bigaussianidad

Para verificar la multigaussianidad de las variables se revisan las nubes de correlación diferida y la relación entre variogramas de diferentes órdenes.

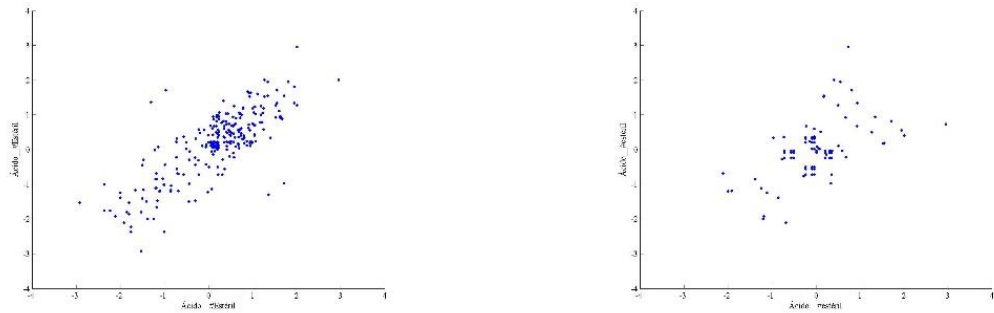
- Nubes de correlación diferida

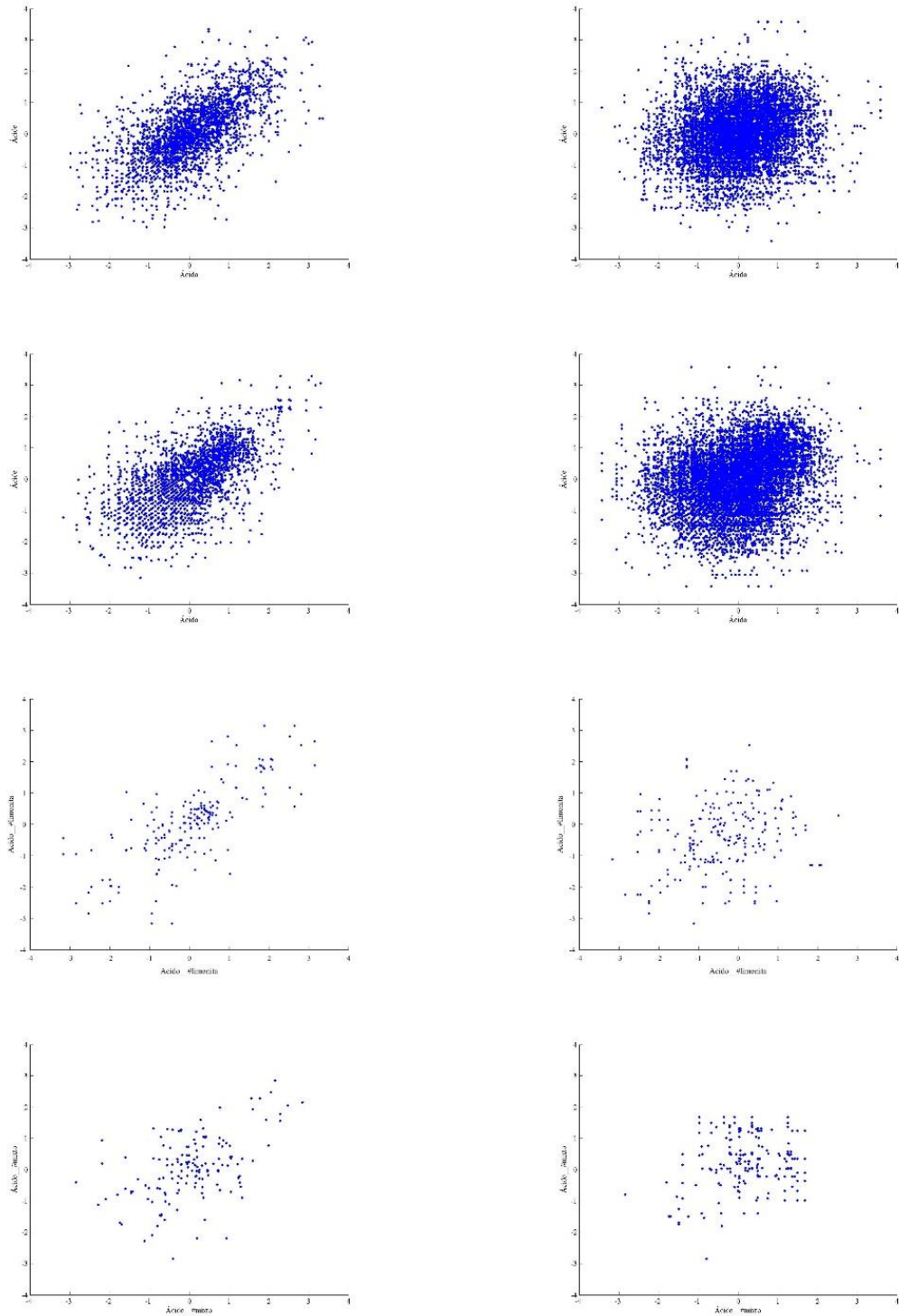
A continuación (Figura 7-30 y Figura 7-31) se muestran las nubes de correlación diferida para los distintos dominios a simular, considerando los valores Gaussianos de las leyes de carbonato. De manera análoga al caso sin traslape, se puede observar que los pares a 5 metros de distancia (figura de la izquierda) muestran una alta correlación, pero los pares a una distancia de 90 metros (figura de la derecha) muestran una baja correlación.





**Figura 7-30: Nubes de correlación diferida para ley de carbonato para cada dominio de simulación (izq: distancia 5 metros, der: distancia 90 metros)**



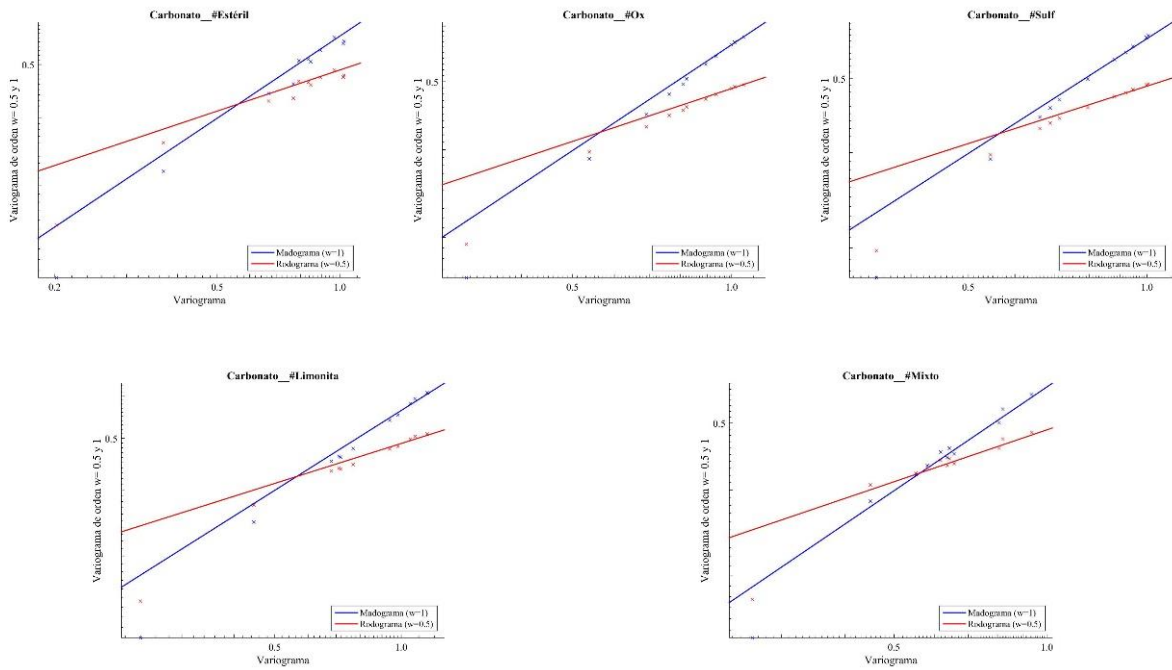


**Figura 7-31: Nubes de correlación diferida para consumo de ácido para cada dominio de simulación (izq: distancia 5 metros, der: distancia 90 metros)**

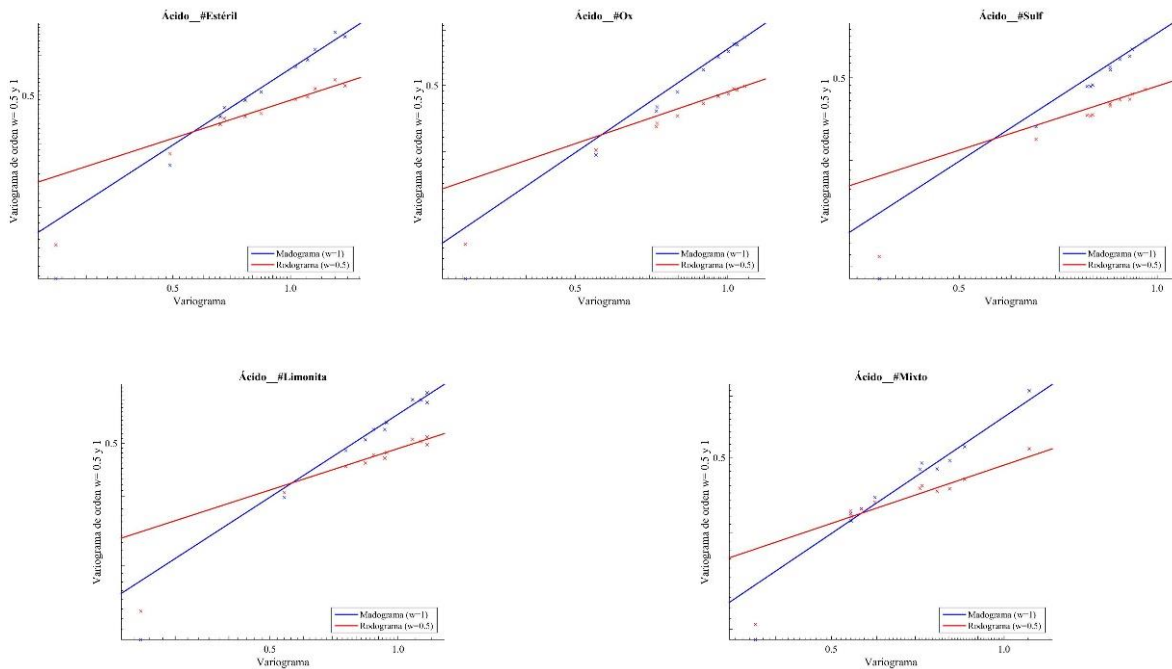
- Comparación entre variogramas, madograma y rodograma

En la Figura 7-32 y en la Figura 7-33 se muestra la comparación realizada para la ley de carbonato y consumo de ácido en los distintos dominios, las que presentan resultados

consistentes con el modelo bigaussiano.



**Figura 7-32: Comparación entre variogramas, madogramas y rodogramas – ley de carbonato para el primer dominio de simulación**



**Figura 7-33: Comparación madogramas y rodogramas – consumo de ácido para el segundo dominio de simulación**

## 7.2.4 Variogramas

Al igual que en las simulaciones que no consideran traslape entre dominios, se consideraron variogramas omnidireccionales, debido a que no se detectaron direcciones preferenciales de continuidad.

En la Tabla 7-11 se muestran los parámetros considerados para el cálculo de los variogramas experimentales, directos y cruzados.

**Tabla 7-11: Parámetros de variogramas experimentales**

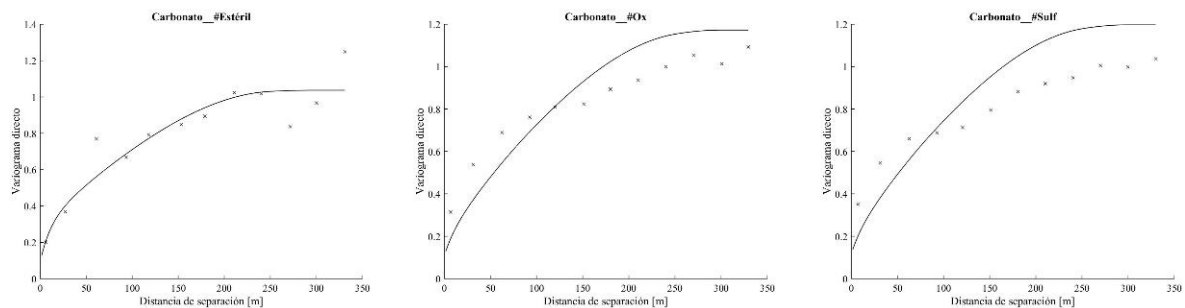
Parámetro	Unidad	Valor
Azimut	°	0
Tolerancia azimut	°	90
Dip	°	0
Tolerancia dip	°	90
Paso	m	30
Número de pasos	#	11
Tolerancia paso	m	15

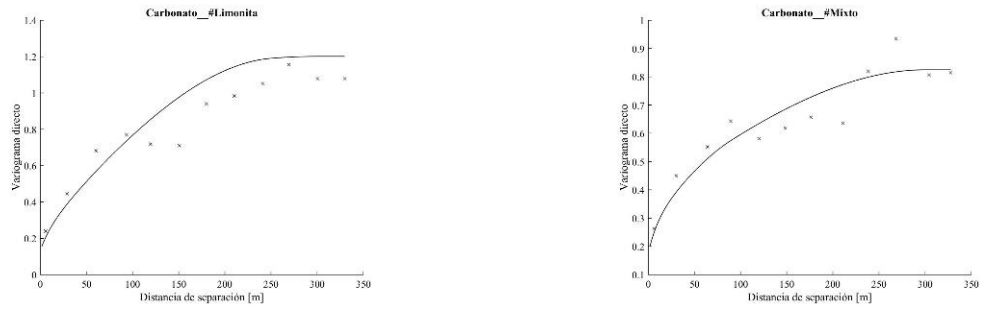
En la Tabla 7-12 se muestran los parámetros utilizados para el modelamiento de los variogramas, el que consideró también un efecto pepita. El ajuste de los variogramas se realizó mediante un método semi-automático.

**Tabla 7-12: Estructuras de variogramas modelados**

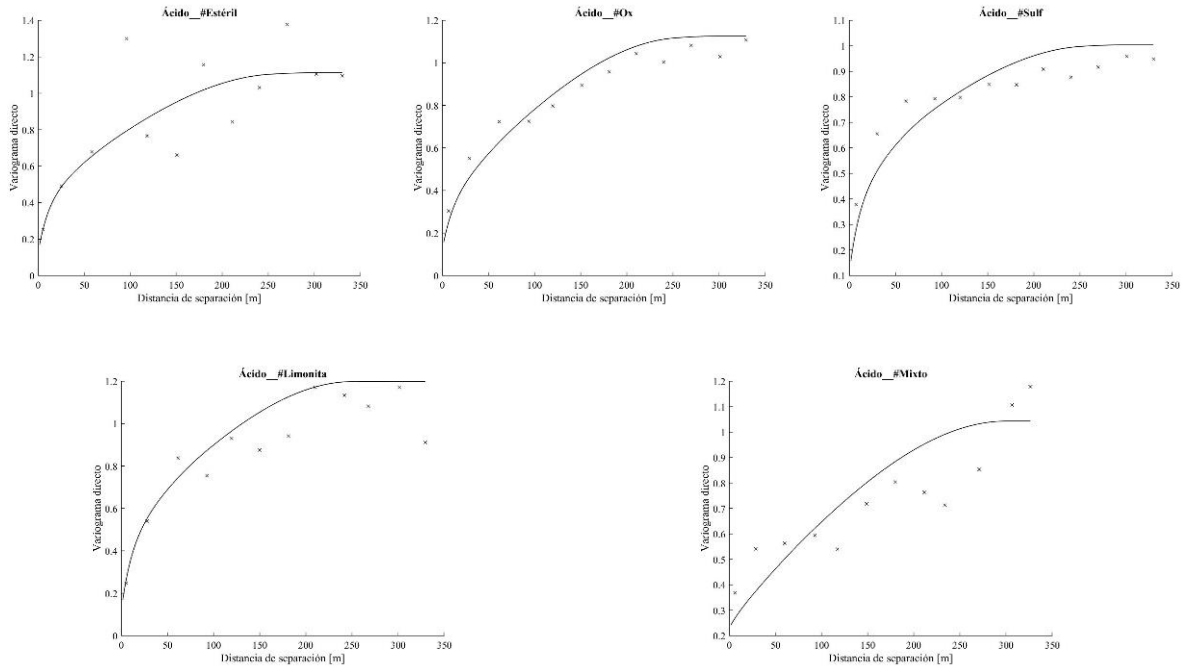
Estructura	Tipo	Alcance [m]
1	Exponencial	30
2	Exponencial	60
3	Esférico	90
4	Esférico	150
5	Esférico	250
6	Esférico	300

A continuación se muestran los variogramas directos, experimentales y modelados, para las dos variables estudiadas.



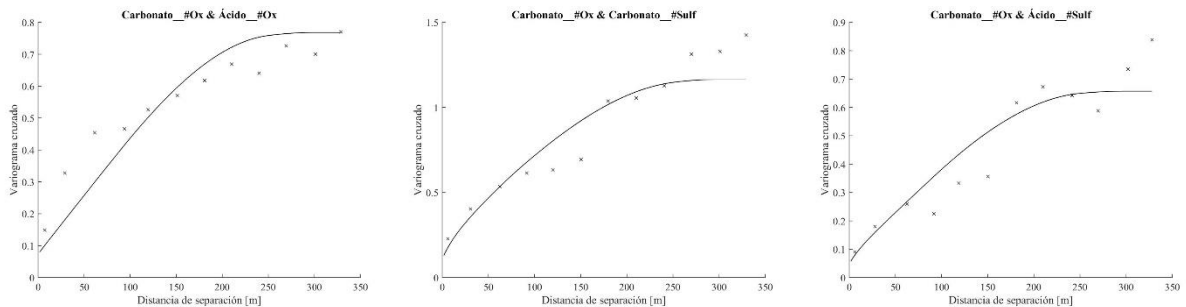


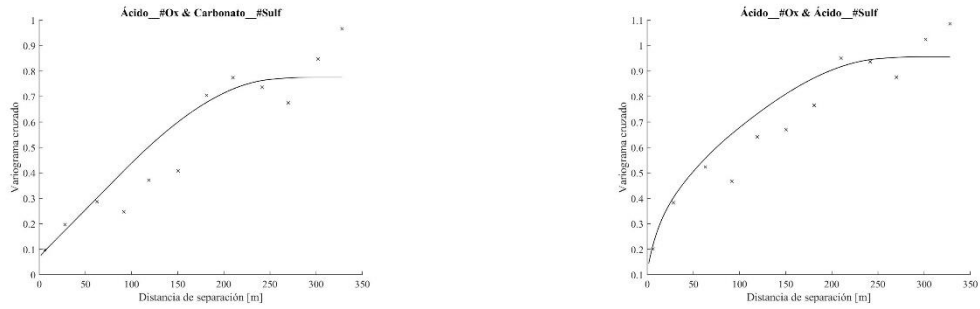
**Figura 7-34: Variogramas directos de variables Gaussianas – ley de carbonato**



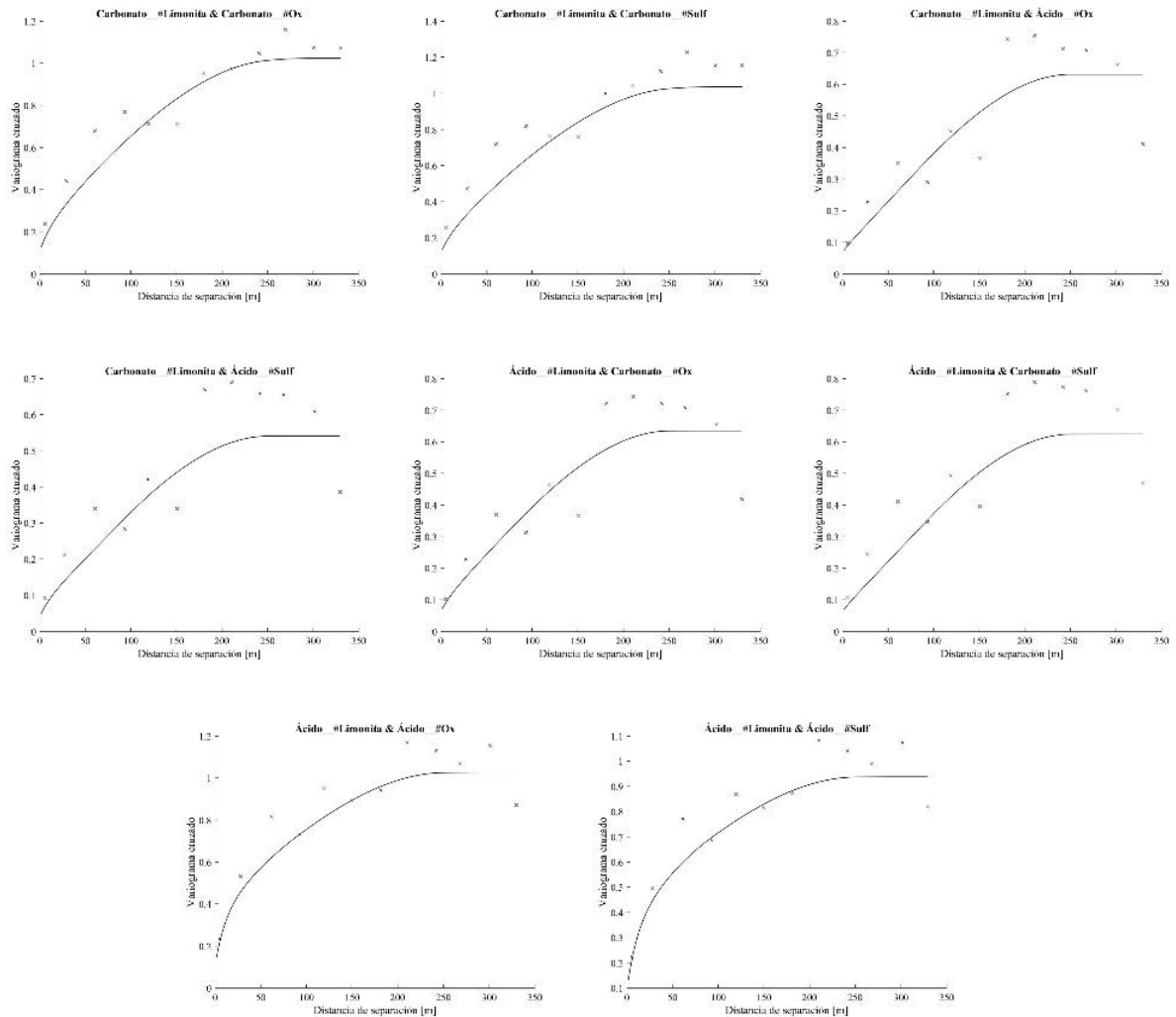
**Figura 7-35: Variogramas directos de variables Gaussianas – consumo de ácido**

Adicionalmente se muestran algunos de los variogramas cruzados más relevantes del estudio. No se muestra la totalidad de los variogramas cruzados debido a la gran cantidad de estos. La Figura 7-36 muestra los variogramas cruzados entre las variables ley de carbonato y consumo de ácido entre los dominios oxidado y sulfurado.





**Figura 7-36: Principales variogramas cruzados de variables Gaussianas–súlfuros y óxidos**  
 Por otro lado, la Figura 7-37 muestra los variogramas cruzados entre el dominio de limonitas y los dominios oxidado y sulfurado, para las dos variables de interés.



**Figura 7-37: Variogramas cruzados de variables Gaussianas – limonitas, súlfuros y óxidos**

## 7.2.5 Validación



Al igual que en el caso sin traslape, se considera la técnica de validación cruzada, considerando como predicción al promedio de 30 simulaciones para los sitios muestreados. Se puede observar en la Tabla 7-13, que existe una similitud entre la distribución de los valores reales y las predicciones para ambas variables.

**Tabla 7-13: Estadística de validación cruzada**

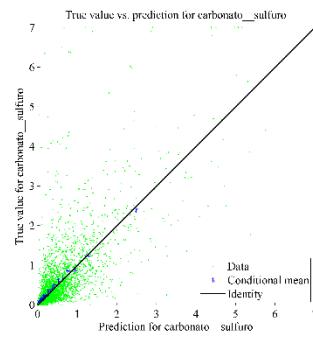
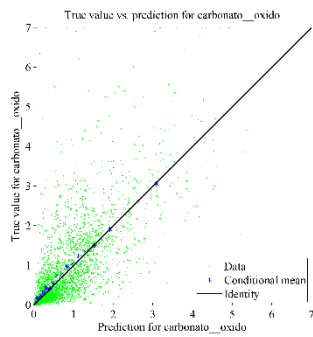
Parámetro	Ley de carbonato [%]		Consumo de ácido [kg/t]	
	Real	Predicción	Real	Predicción
Número de datos	8284	8284	4764	4764
Media	0.67	0.63	31.23	31.99
Varianza	0.94	0.58	472.83	284.92
Mínimo	0	0	1	1.55
1-cuantil	0.12	0.16	17	20.53
Mediana	0.28	0.34	25	27.21
3-cuantil	0.79	0.79	38	39.16
Máximo	7	6.34	150	142.49

Los errores entre los valores reales y los obtenidos mediante el promedio de treinta simulaciones se muestran en la Tabla 7-14, donde se puede ver que existe un buen ajuste para ambas variables. Es necesario señalar que el coeficiente de correlación entre el consumo de ácido y las leyes de carbonato es de 0.72 para los valores reales mientras que para los valores simulados el coeficiente es de 0.80, por lo tanto no sólo se reproduce la distribución de los datos, sino que también se reproduce la relación entre las variables.

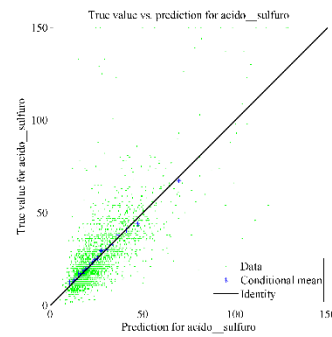
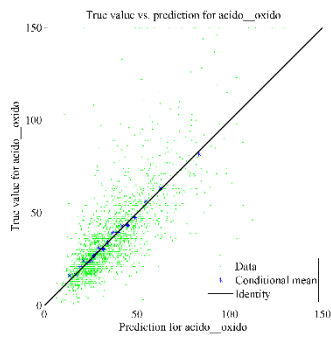
**Tabla 7-14: Errores de validación cruzada**

Variable	Media errores	Desv. errores
Ley carbonato [%]	0.32	0.29
Consumo de ácido [kg/t]	3.33	6.64

A continuación (Figura 7-38 y Figura 7-39) se muestran los gráficos de dispersión entre los valores simulados y los valores de los sitios muestreados, exhibiendo un buen ajuste del modelo, sin la presencia de sesgo global ni condicional.

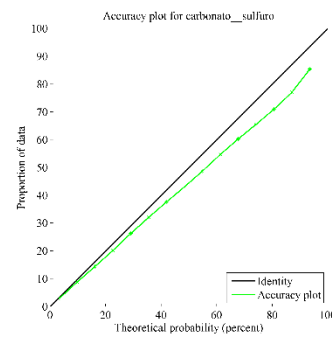
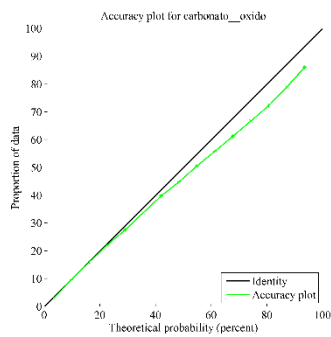


**Figura 7-38: Dispersión entre valores reales y promedio de 30 simulaciones - ley de carbonato**

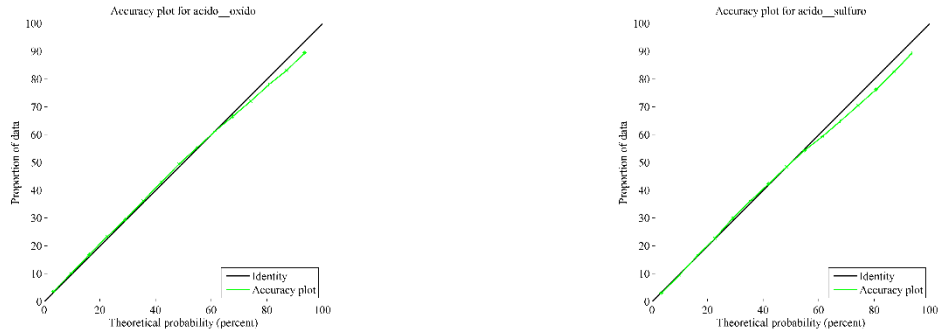


**Figura 7-39: Dispersión entre valores reales y promedio de 30 simulaciones - consumo de ácido**

A continuación (Figura 7-40 y Figura 7-41) se muestran los gráficos de incertidumbre donde se compara la probabilidad teórica de pertenencia a un intervalo con la proporción de datos que pertenecen efectivamente a dicho intervalo, para las dos especies de interés, mostrando un buen ajuste para las dos variables en los dos dominios principales. Sin embargo, los resultados son levemente optimistas para el caso del carbonato.



**Figura 7-40: Gráficos de incertidumbre – ley de carbonato**

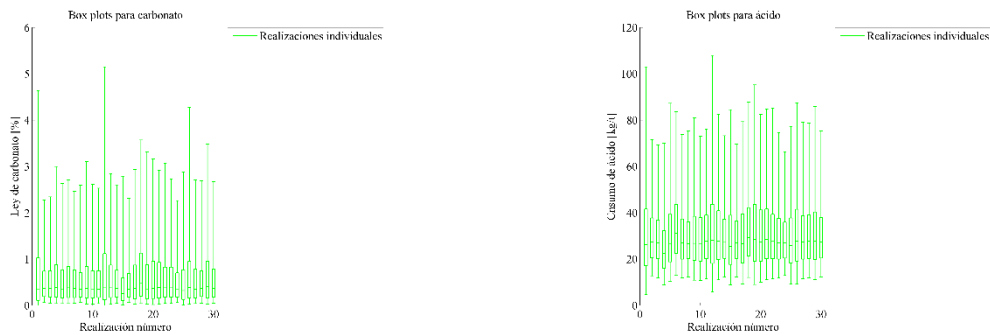


**Figura 7-41: Gráficos de incertidumbre – consumo de ácido**

### 7.2.6 Resultados

Para la realización de las cosimulaciones se utilizaron los mismos parámetros que para el caso sin traslape, es decir se utilizó el método de bandas rotantes con 500 líneas. La discretización de bloque fue de 3x3x3, en otras palabras cada bloque corresponde al promedio de 27 puntos dentro del bloque, y el condicionamiento fue realizado mediante cokriging simple, debido a que se conoce la media de los datos Gaussianos, la que por construcción es cero, con una vecindad de 20 datos, en un radio de búsqueda de 300. La grilla utilizada corresponde a 25 x 25 x 20 metros y se realizaron 30 simulaciones, una para cada simulación de unidades mineralizadas.

El rango de los valores obtenidos para las dos variables de interés se presenta en la Figura 7-42.



**Figura 7-42: Rango de valores simulados**

A continuación (Figura 7-43 y Figura 7-44) se muestran distintas vistas de los resultados de la realización número 1 de las leyes de carbonato y consumo de ácido, donde se observan las zonas que presentan mayores leyes de carbonato y consumos de ácido, respectivamente. Se observa una alta similitud con el caso que no considera traslapes los dominios de simulación.

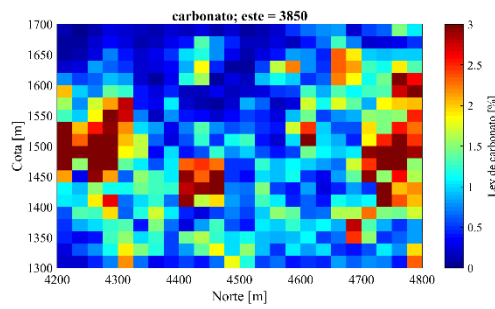
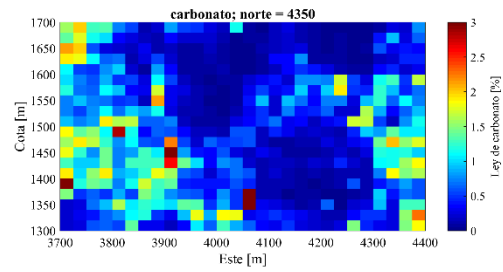
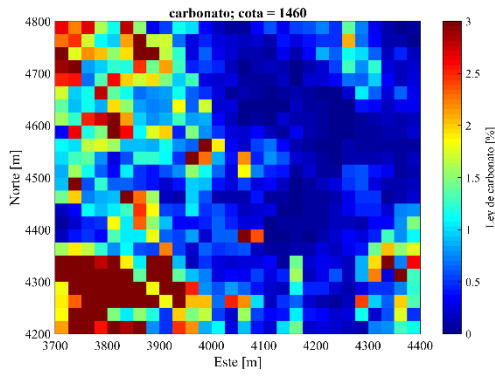
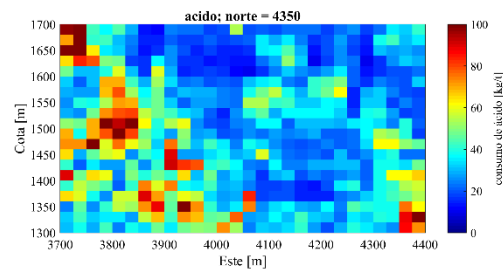
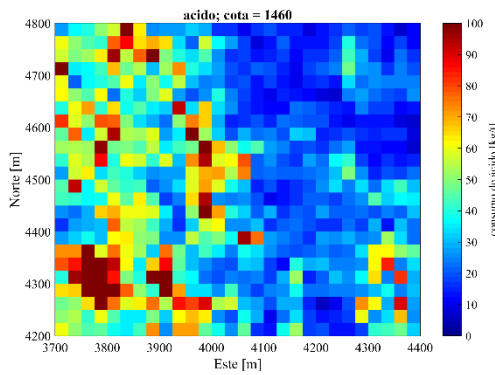
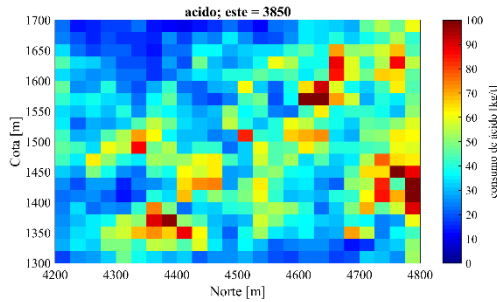


Figura 7-43: Secciones con valores simulados de ley de carbonato





**Figura 7-44: Secciones con valores simulados de consumo de ácido**

### 7.3 COMPARACIÓN DE MODELOS

A partir de cada uno de los modelos de simulación se obtuvieron 30 realizaciones de las variables de interés, una por cada simulación de las unidades mineralizadas en el yacimiento. A partir de esto se busca cuantificar la incertidumbre del consumo de ácido y de las leyes de carbonato en el yacimiento. Para ello, se realizan análisis de los siguientes parámetros:

- Distribución de valores medios, varianza y correlaciones de los valores simulados.
- Análisis de las nubes de dispersión entre los datos condicionantes y los valores simulados.
- Inventario de recursos disponibles considerando ciertos valores de corte.
- Reproducibilidad de la relación entre las variables para las distintas unidades mineralizadas.

#### 7.3.1 Distribución de medias

- Incertidumbre global

La Tabla 7-15 muestra el rango de las medias de las simulaciones para los dos modelos considerados, uno sin traslape entre los dominios (caso base) y otro que considera un traslape entre óxidos y sulfuros para las dos variables estudiadas. En la tabla se ve que para ambas variables, el rango y el promedio son similares en ambos modelos.

**Tabla 7-15: Medias globales**

	Modelo sin traslape		Modelo con traslape	
	Carbonato [%]	C.de ácido [kg/t]	Carbonato [%]	C.de ácido [kg/t]
Mínimo	0.58	29.89	0.52	26.57
Promedio	0.65	31.55	0.65	31.91
Máximo	0.88	36.68	0.92	35.53

- Incertidumbre por unidad mineralizada

Las siguiente tablas (Tabla 7-16 y Tabla 7-17) muestran los valores mínimos, promedios y máximos de las medias de las simulaciones para los dos modelos considerados, uno sin traslape entre dominios (caso base) y otro que considera un traslape entre óxidos y sulfuros para las dos variables estudiadas. En este caso, los datos son mostrados por unidad mineralizada.

**Tabla 7-16: Medias de ley de carbonato por unidad mineralizada**

Unidad	Modelo sin traslape			Modelo con traslape			M. geológico
	Mínimo [%]	Promedio [%]	Máximo [%]	Mínimo [%]	Promedio [%]	Máximo [%]	N° bloques
Estéril	0.21	1.04	3.17	0.22	1.05	3.28	733
Óxido	0.02	0.76	3.45	0.02	0.73	3.59	11486
Sulfuro	0.04	0.49	3.11	0.04	0.52	3.49	10050
Limonitas	0.10	0.77	4.16	0.07	0.75	3.98	656
Mixto	0.42	1.31	2.40	0.15	1.50	2.65	115

**Tabla 7-17: Medias de consumo de ácido por unidad mineralizada**

Unidad	Modelo sin traslape			Modelo con traslape			M. geológico
	Mínimo [kg/t]	Promedio [kg/t]	Máximo [kg/t]	Mínimo [kg/t]	Promedio [kg/t]	Máximo [kg/t]	N° bloques
Estéril	19.49	34.82	76.96	19.99	43.10	78.69	733
Óxido	12.26	34.57	116.94	13.10	35.22	112.75	11486
Sulfuro	10.07	27.61	74.31	10.98	27.00	70.36	10050
Limonitas	14.53	31.85	100.33	14.93	34.37	94.47	656
Mixto	30.18	44.52	62.90	27.37	45.11	69.44	115

Se observa que los valores medios de ley de carbonato y consumo de ácido son similares en los dos modelos estudiados y sus valores son similares a los que tienen los sitios muestreados según unidad mineralizada, los cuales son mostrados en la Tabla 7-18.

**Tabla 7-18: Medias desagrupadas de sitios muestreados**

Unidad	Carbonato [%]		Consumo de ácido [kg/t]	
	Promedio	N° datos	Promedio	N° datos
Estéril	1.51	619	53.08	254
Óxido	0.75	2952	35.15	1837
Sulfuro	0.41	3631	23.54	2125
Limonitas	0.67	806	33.83	374
Mixto	1.37	276	43.23	174

### 7.3.2 Distribución de varianzas

La Tabla 7-19 muestra el rango de las varianzas de las simulaciones para los dos modelos considerados, uno sin traslape entre los dominios (caso base) y otro que considera un traslape entre óxidos y sulfuros para las dos variables estudiadas.

**Tabla 7-19: Varianza global de simulaciones**

	Modelo sin traslape		Modelo con traslape	
	Carbonato [%]	C.de ácido [kg/t]	Carbonato [%]	C.de ácido [kg/t]
Mínimo	0.33	187.22	0.37	194.93
Promedio	0.49	265.80	0.65	331.24

Máximo	0.93	515.74	1.72	614.46
--------	------	--------	------	--------

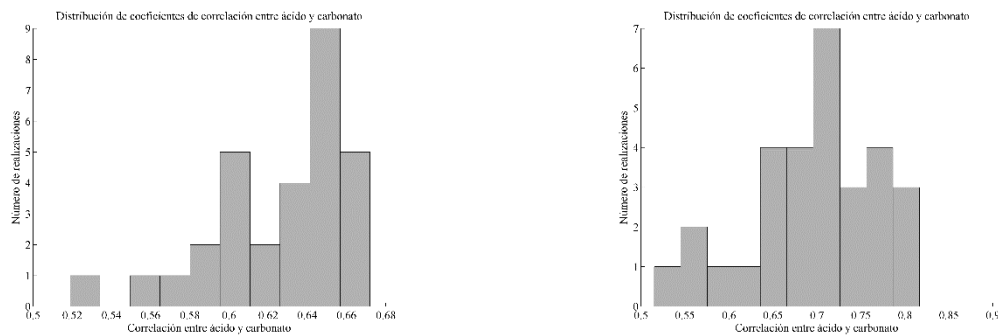
Se observa que para ambas variables la varianza es mayor cuando se considera un traslape entre los dominios. Se puede creer que la diferencia en la varianza puede ser efecto de los diferentes modelos variográficos utilizados. La Tabla 7-20 muestra las varianzas obtenidas al considerar los variogramas del modelo sin traslape en la definición del modelo traslapado, pero la diferencia entre ambos modelos se mantiene. Por tanto esta diferencia se debe a la definición misma de los dominios.

**Tabla 7-20: Varianza global de simulaciones**

	Carbonato [%]	C.de ácido [kg/t]
Mínimo	0.36	223.28
Promedio	0.66	348.05
Máximo	1.53	569.69

### 7.3.3 Distribución de coeficientes de correlación entre variables

La Figura 7-45 muestra la distribución del coeficiente de correlación entre la ley de carbonato y el consumo de ácido para los dos modelos considerados, uno sin traslape entre los dominios (caso base) y otro que considera un traslape entre óxidos y sulfuros.

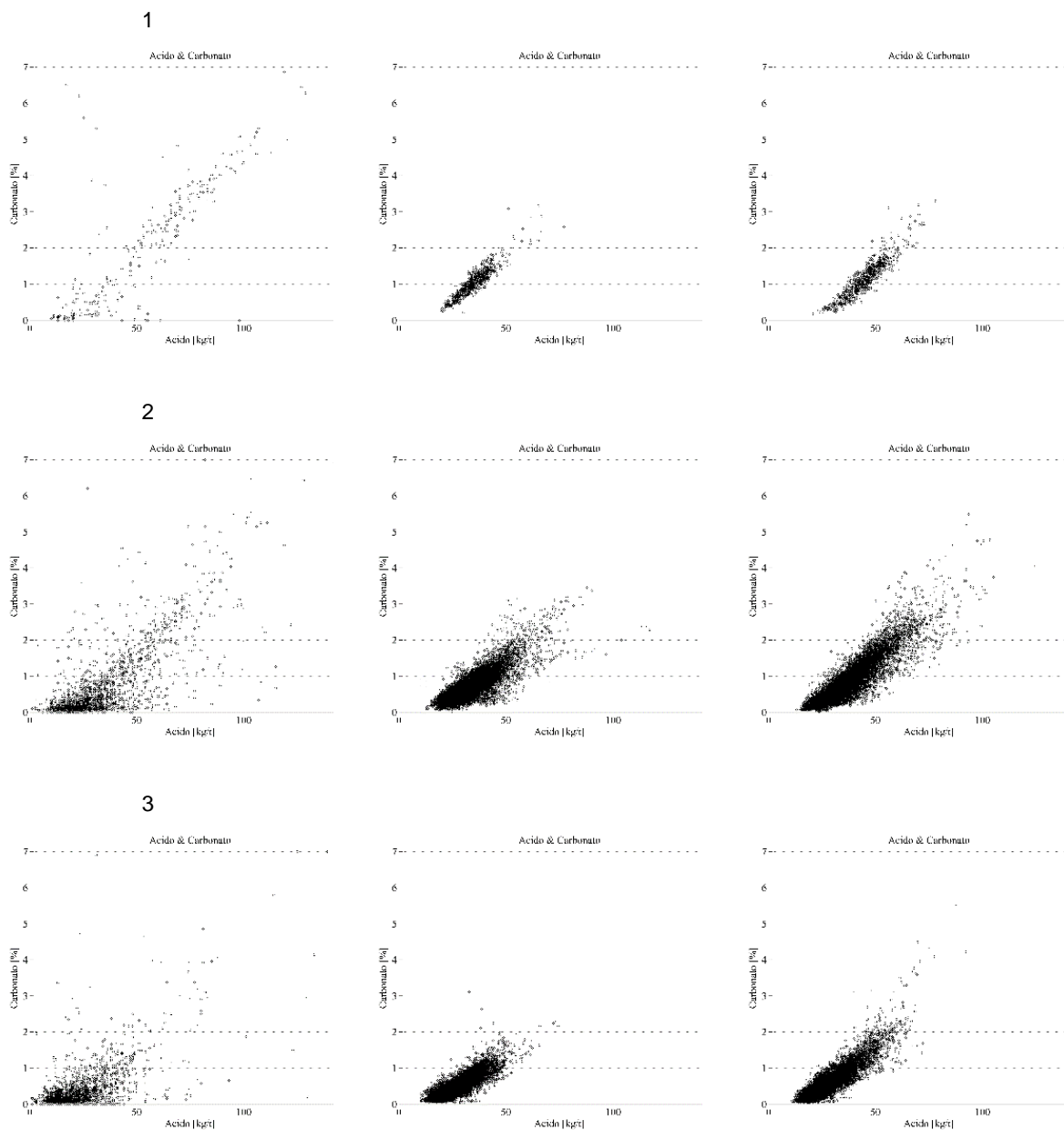


**Figura 7-45: Distribución de coeficientes de correlación (izq: caso sin traslape, der: caso con traslape)**

En la figura anterior se aprecia que el rango del coeficiente de correlación para el modelo que no considera traslape oscila entre 0.52 y 0.68, por debajo de 0.72 que es el valor de los datos muestreados. Por otra parte, el rango del coeficiente para el caso que involucra traslape es entre 0.55 y 0.80, siendo en promedio 0.69, lo que es más cercano al valor que tienen los datos muestreados.

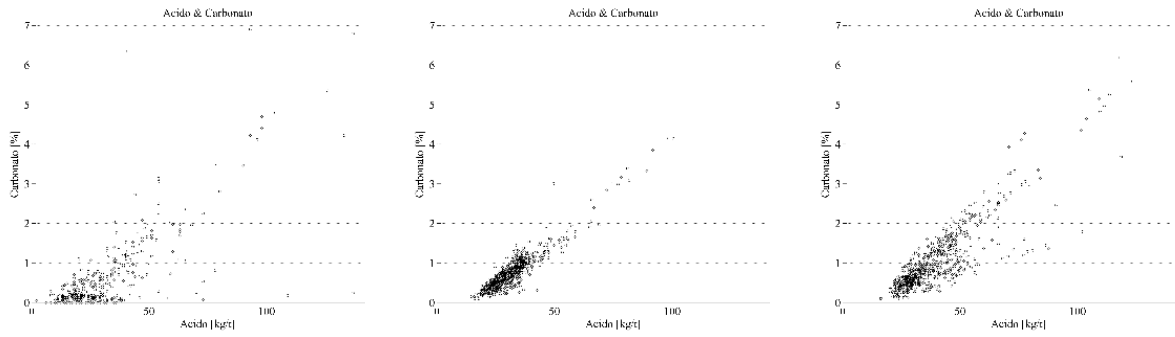
### 7.3.4 Comparación de diagramas de dispersión

La Figura 7-46 muestra los diagramas de dispersión entre las leyes de carbonato y el consumo de ácido para las distintas unidades mineralizadas consideradas en el estudio. Esto se realiza con el propósito de verificar de manera visual el comportamiento de las variables y su correlación. Se observa que ambos modelos tienden a replicar la dependencia de las variables de interés, para todas las unidades mineralizadas. Sin embargo, existe una menor dispersión de los datos simulados, debido a que se considera el promedio de los valores simulados en cada bloque, y el cambio de soporte atenúa la variabilidad.

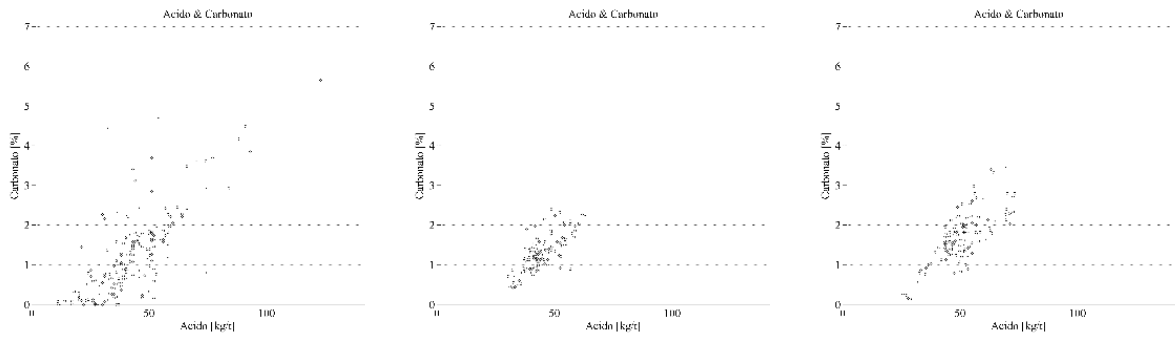




4

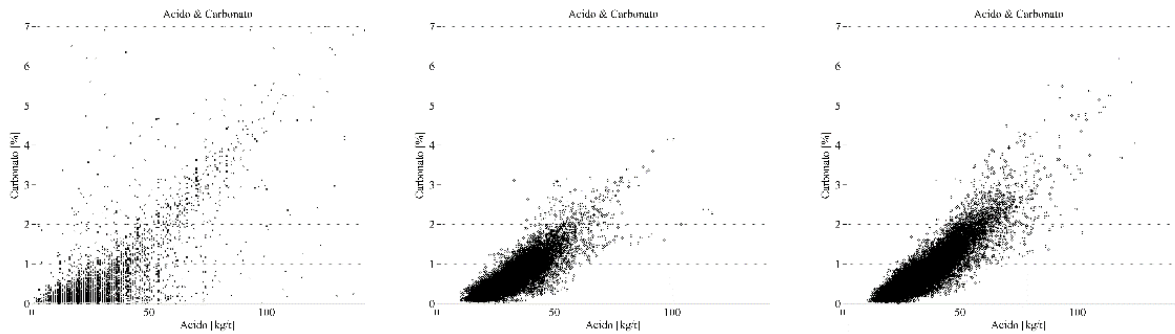


5



**Figura 7-46: Diagrama de dispersión entre variables por unidad (izq: muestras, med: caso sin traslape, der: caso con traslape, 1: estéril, 2: óxidos, 3: sulfuros, 4: limonita, 5:mixto)**

Adicionalmente se despliega en la Figura 7-47 los diagramas de dispersión global (sin ditinguir entre unidades mineralizadas) entre ambas variables.



**Figura 7-47: Diagrama de dispersión entre variables (izq: caso sin traslape, der: caso con traslape)**

### 7.3.5 Inventario de recursos

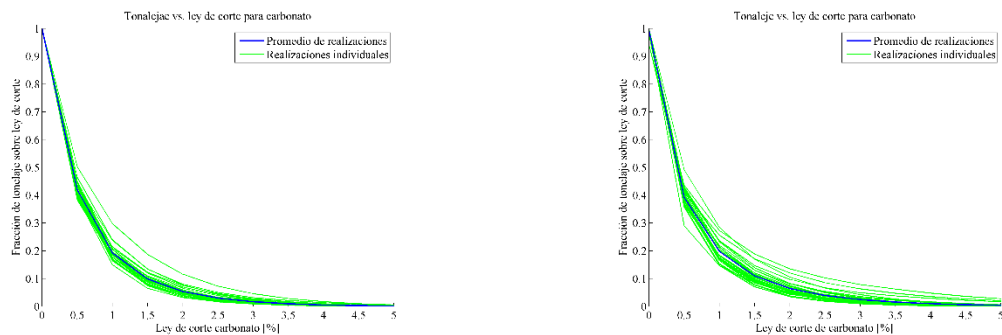
En esta sección se estudia el efecto en los recursos estimados al considerar o no el traslape entre los distintos dominios. Debido a que no se cuenta con una variable de interés económico, el interés es analizar el efecto en la proporción de los recursos al aplicar una ley de corte de

carbonato o un corte de consumo de ácido y también el efecto que esto tiene en la ley media de carbonato y consumo medio de ácido.

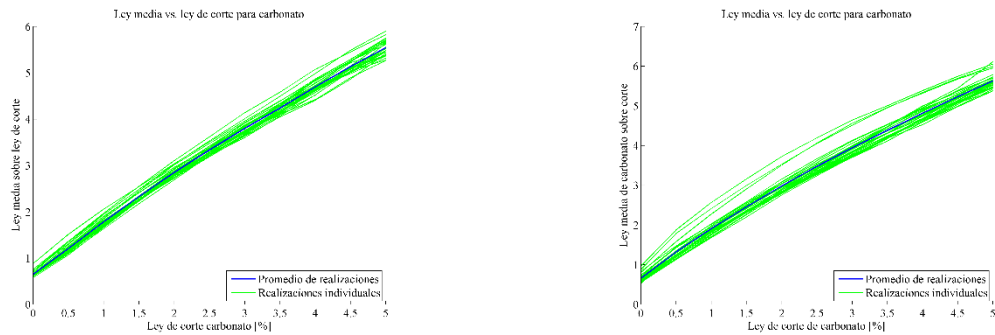
En la Tabla 7-21 se muestran los resultados de aplicar una ley de corte de carbonato, donde se puede apreciar el efecto que tiene en la fracción de los recursos y en la ley media de ambos modelos. Se puede observar la similitud entre los valores obtenidos para ambos modelos, y las diferencias pueden ser atribuidas a fluctuaciones propias de las simulaciones.

**Tabla 7-21: Recursos según ley de carbonato**

Modelo sin traslape			Modelo con traslape		
Ley de corte [%]	Tonelaje [%]	Ley media [%]	Ley de corte [%]	Tonelaje [%]	Ley media [%]
0.5	42.1	1.2	0.5	39.3	1.3
1	19.3	1.8	1	19.7	1.9
1.5	9.8	2.3	1.5	11.0	2.5
2	5.4	2.8	2	6.5	3.0



**Figura 7-48: Curva tonelaje - ley de corte de carbonato (izq: caso sin traslape, der: caso con traslape)**

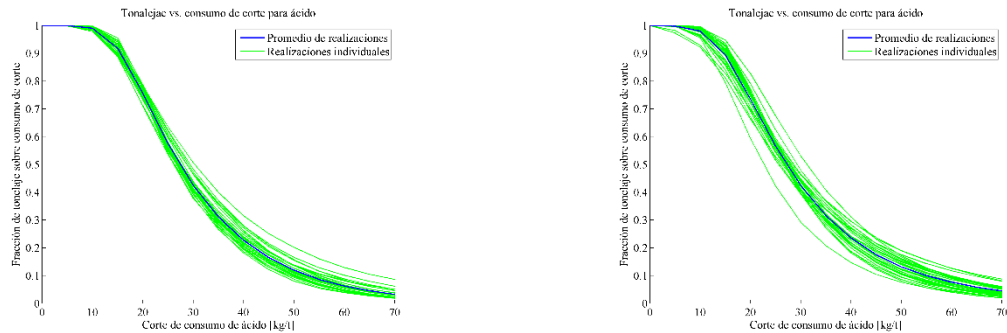


**Figura 7-49: Curva ley media - ley de corte de carbonato (izq: caso sin traslape, der: caso con traslape)**

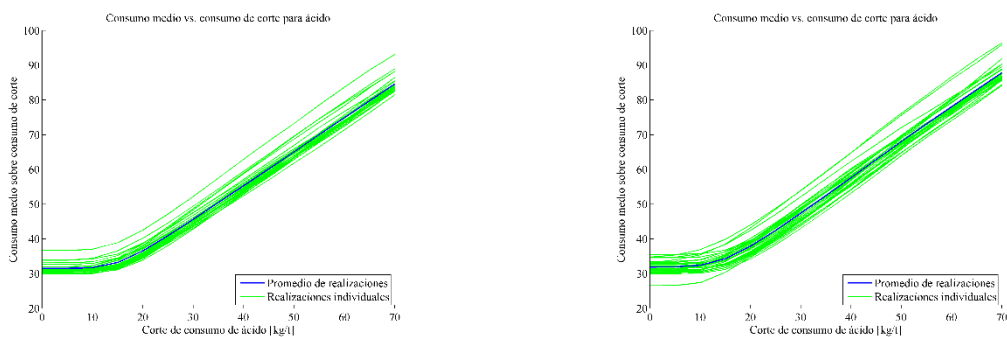
Análogamente, se muestra en la Tabla 7-22 los resultados de aplicar un consumo de ácido de corte y su efecto sobre la fracción de tonelaje obtenido y consumo medio. Al igual que en el caso del carbonato, se aprecia la similitud entre los valores obtenidos para ambos modelos.

**Tabla 7-22: Recursos según consumo de ácido**

Modelo sin traslape			Modelo con traslape		
C. de corte [kg/t]	Tonelaje [%]	C. medio [kg/t]	C. de corte [kg/t]	Tonelaje [%]	C. medio [kg/t]
15	91.7	33.2	15	89.5	34.3
30	42.3	45.7	30	42.4	47.4
45	16.5	60.2	45	17.6	62.9
60	6.3	74.9	60	7.7	78.1



**Figura 7-50: Curva tonelaje - corte de consumo de ácido (izq: caso sin traslape, der: caso con traslape)**



**Figura 7-51: Curva consumo medio - corte de consumo de ácido (izq: caso sin traslape, der: caso con traslape)**

En resumen, las distribuciones de los valores simulados en ambos modelos son parecidas, salvo por los coeficientes de correlación que están mejor reproducidos en el modelo con traslape de dominios.

## 7.4 ANÁLISIS EN LA FRONTERA

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, considerar o no un traslape entre dominios para algunas variables no tiene un mayor impacto en el desempeño global de los modelos de simulación, porque el efecto de la variación del traslape sólo involucra a los sitios de interés que se encuentran cerca del contacto entre las distintas unidades mineralizadas. Por tanto el efecto recae exclusivamente sobre una fracción relativamente pequeña de datos y no puede ser percibido al considerar simulaciones en todo el yacimiento.

En esta sección se analiza el impacto que tiene considerar el traslape entre dominios para los sitios que se encuentran en la vecindad del contacto entre unidades mineralizadas, los que podrían ser más susceptibles al efecto del traslape.

### 7.4.1 Metodología

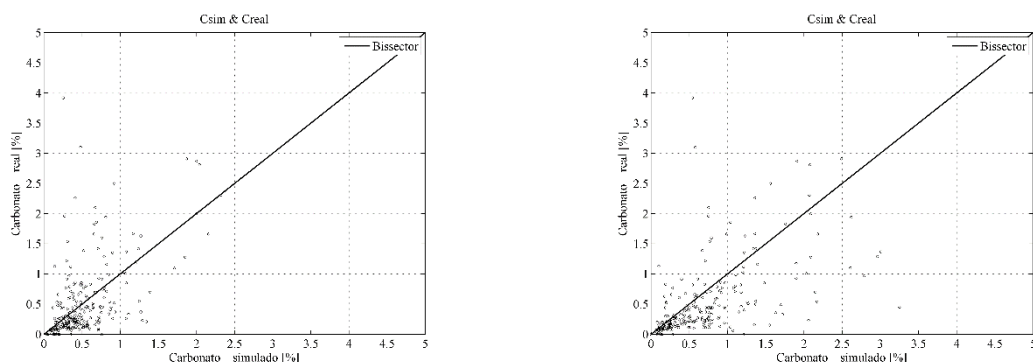
La metodología utilizada en el análisis de frontera es la siguiente:

- 1) Definir y codificar la unidad de transición como el material mixto y las limonitas, mientras que las unidades que presentan un contacto duro entre sí y blando con la unidad de transición son el material oxidado y sulfurado. El material estéril no será considerado en el análisis.
- 2) Generar una base de datos que contenga:
  - Todos los sitios muestreados de óxidos y sulfuros que se encuentran a menos de 30 metros de alguna muestra de la unidad de transición, estos corresponden a los sitios muestreados de óxidos y sulfuros que definen la frontera.
  - Todos los sitios muestreados de la unidad de transición (mixto y limonitas)
  - De aquellos sitios muestreados de óxidos y sulfuros que no se encuentran a menos de 30 metros de alguna muestra de la unidad de transición, generar una sub-muestra que considere como datos duplicados aquellos datos que se encuentren a menos de 50 metros entre sí. El propósito es incorporar datos de óxidos y sulfuros con poca influencia sobre los sitios que se encuentren en el contacto con la unidad de transición. Este procedimiento se realiza tanto para los datos de óxidos como para los de sulfuros, de manera independiente.
- 3) Utilizar los parámetros de simulación de cada modelo (transformación gaussiana, vecindad de búsqueda y dominios de simulación) para realizar una validación cruzada de los datos de interés. Sin embargo, el modelo variográfico utilizado es el mismo para ambos casos y corresponde al modelo de los dominios traslapados.

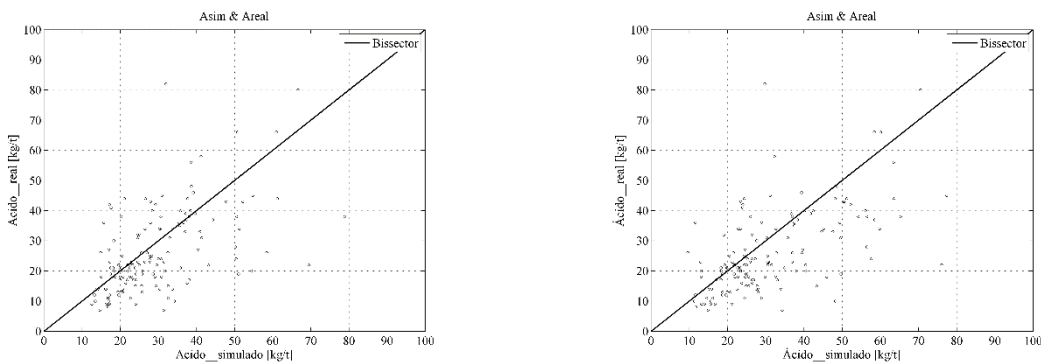
- 4) Analizar las diferencias entre los valores simulados y los reales para los sitios que se encuentran en los contactos óxido-transición y sulfuros-transición para las dos variables estudiadas.

### 7.4.2 Efecto en la frontera

A continuación (Figura 7-52 y Figura 7-53) se muestran los gráficos de dispersión entre los valores medios simulados y los valores reales para el material sulfurado que se encuentran cerca del contacto con la unidad de transición.



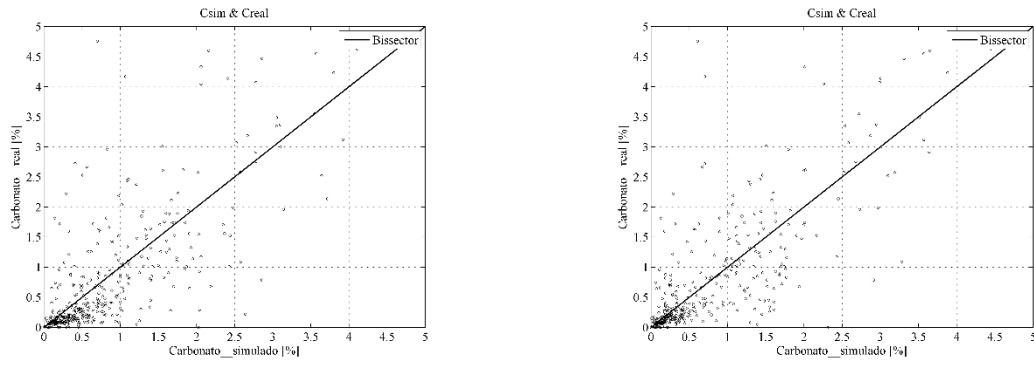
**Figura 7-52: Dispersión de ley de carbonato - sulfuros (izq: caso sin traslape, der: caso con traslape)**



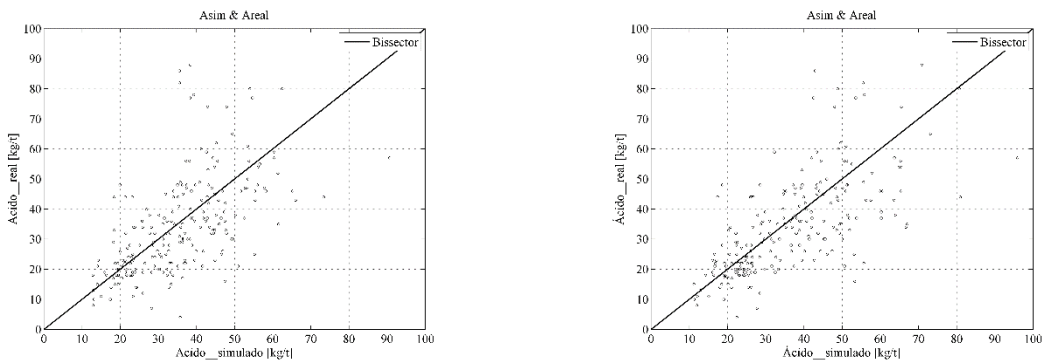
**Figura 7-53: Dispersión de consumo de ácido - sulfuros (izq: caso sin traslape, der: caso con traslape)**

Se observa que los pares de datos se encuentran más cerca de la diagonal al considerar un traslape entre dominios de simulación, en particular para el caso del consumo de ácido, debido a que esta variable se encuentra submuestreada con respecto a la ley de carbonato, por tanto involucrar las mediciones aledañas aporta información en la simulación.

Análogamente, la Figura 7-54 y la Figura 7-55 muestran los gráficos de dispersión de los valores medios simulados y los valores reales para el material oxidado que se encuentra cerca del contacto la unidad de transición.



**Figura 7-54: Dispersión de ley de carbonato - óxidos (izq: caso sin traslape, der: caso con traslape)**



**Figura 7-55: Dispersión de consumo de ácido - óxidos (izq: caso sin traslape, der: caso con traslape)**

En el caso del material oxidado no se observa una diferencia considerable al considerar o no el traslape entre dominios de simulación.

## 8 CONCLUSIONES

Cuantificar la incertidumbre de las variables de interés en un yacimiento ayuda en la toma de decisiones, ya que permite incluir la variabilidad, tanto de manera global como local, en los distintos procesos o evaluaciones que se realizan con los modelos de bloques, como lo son la planificación y la evaluación económica.

A continuación se exponen las principales conclusiones relacionadas a la metodología del estudio realizado:

- Con respecto a la determinación de la variable de control, es necesario mencionar que no existe una metodología estandarizada para determinar cuál variable categórica (litología, alteración, mineralización, etc) controla la distribución espacial de una variable de interés, dependiendo de cada yacimiento. Sin embargo, esta decisión recae en las estadísticas, continuidad espacial y aspectos geológicos presentes en el yacimiento. Es importante identificar el rol que juega la distribución espacial de las distintas unidades, ya que omitir este elemento genera un fracturamiento de la información, siendo esto un factor importante en los modelos geoestadísticos.
- Para generar distintos escenarios de la variable geológica de control se realizaron simulaciones plurigaussianas, las cuales consideran como dato de entrada un modelo interpretado del comportamiento espacial de la variable. Estas simulaciones cuantifican la incertidumbre y variabilidad de las unidades de mineralización.
- En los dos modelos (tanto con como sin traslape entre dominios de simulación) la definición de dominios de simulación fue realizada según los criterios de cada variable, generando dominios traslapados, iguales o disjuntos entre las distintas variables y considerando la correlación espacial entre variables y dominios, sin exhibir problemas matemáticos en su implementación.
- Es posible implementar un modelo de simulación que involucre el traslape entre dos dominios que presentan una frontera dura entre sí, pero que tienen una frontera blanda con una unidad mineralizada intermedia de transición. Esto permite que la unidad intermedia aporte información a los sitios de interés que se encuentran en los dos dominios.
- El desempeño global de ambos modelos fue similar, en términos de los valores medios obtenidos, la varianza y los recursos estimados, aunque el modelo con traslape mejora levemente la reproducibilidad de la correlación entre las distintas variables. Adicionalmente, al considerar las validaciones cruzadas en ambos modelos, se observa que éstos replican la distribución y el valor de los sitios medidos.
- El efecto del traslape entre distintos dominios de simulación no se puede apreciar con los criterios globales para el desempeño de modelos de simulación, debido a que la proporción

de datos que define un contacto entre distintas unidades es bajo, con respecto al total de los datos. Sin embargo, el efecto del traslape se observa en la validación cruzada de los datos que se encuentran en la cercanía del contacto, mostrando mayor precisión en las simulación. Por lo tanto esta metodología es idónea para situaciones donde el interés recae en el contacto entre unidades.

A continuación se exponen las principales conclusiones asociadas al estudio realizado:

- En el estudio del yacimiento Antucoya, la variable que controla la distribución de las leyes de carbonato y consumo de ácido es la mineralogía, pudiendo apreciar tendencias en la zonación vertical, existiendo unidades que representan distintas poblaciones de datos en el yacimiento.
- Las simulaciones plurigaussianas de las unidades mineralizadas mostraron que sobre un 80% del sector estudiado del yacimiento es catalogado como óxido o sulfuro.
- Los dos modelos considerados replicaron de manera similar la información provista por los datos, por lo que considerar un traslape entre dominios de simulación no tiene un impacto apreciable en las estadísticas globales del depósito.
- Para apreciar el impacto del traslape es necesario considerar exclusivamente los sitios cercanos al contacto entre las distintas unidades. En estos sitios se observa que el traslape muestra mejores resultados, dado que al considerar el traslape se observa una mayor similitud entre los valores reales y los simulados. En particular, el consumo de ácido, que tiene un número de mediciones más bajo, mostró ser más sensible a la utilización del modelo traslapado.

Como trabajos futuros se propone replicar esta metodología para otro tipo de yacimientos, en particular para depósitos del tipo sedimentario. Otro enfoque interesante es estudiar las diferencias entre los modelos simulados con un modelo de estimación mediante cokriging, para observar el efecto que tiene el suavizamiento del cokriging al considerar un traslape entre unidades. También se plantea estudiar un análisis de la incertidumbre con un modelo conjunto para el consumo de ácido y zona mineralizada.



## 9 BIBLIOGRAFÍA

- Arellano, M., 2003. "Distribución y control de la mineralización del pórfido cuprífero antucoya, II región, Chile" Memoria de Geología. Universidad Católica del Norte, 63 p.
- Armstrong, M., Galli, A., Beucher, H., Le Loc'h, G., Renard, D., Doligez, B., Eschard, R., Geffroy, F., 2011. "Plurigaussian Simulations in Geosciences". Springer, Berlin, 176 p.
- Bergholz, W. S. & Schreder, M. L., 2004. "Escondida – Phase IV Grinding Circuit". Proceedings 36° Annual Meeting. The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.
- Cáceres, A., 2010. "Simulación Conjunta de Unidades Geológicas y Leyes de Cobre en el Sector Sur-Sur del Depósito Rio Blanco-Los Bronces". Tesis de Magister de Geología. Departamento de Geología. Universidad de Chile, 189 p.
- Chilès JP., Delfiner P., 2012. "Geostatistics: modeling spatial uncertainty". Wiley, New York, 699 p.
- David, D., 2013. "Geometallurgical guidelines for miners, geologists and process engineer – Design to discovery" Second AUSIMM International geometallurgy conference, Australia.
- Desbarats, A. J., Dimitrakopoulos, R., 2000. "Geostatistical simulation of regionalized pore-size distributions using min/max autocorrelation factors", Mathematical Geology, Volumen. 32, Edición 8, 919 – 942 p.
- Dunham, S., Vann, J., Coward, S., 2011. "Beyond Geometallurgy – Gaining Competitive Advantage by Exploiting the Broad View of Geometallurgy". The First Ausimm International Geometallurgy Conference.
- Emery, X., 2011. "Geostadística". Departamento de Ingeniería en Minas, Universidad de Chile, Santiago, 144 p.
- Emery, X., 2012. "Simulación estocástica y geostadística no lineal". Departamento de Ingeniería en Minas, Universidad de Chile, Santiago, 183 p.
- Emery, X., 2005. "Variograms of order  $\omega$ : A tool to validate a bivariate distribution model". Mathematical Geology, Volumen 37, Edición 2, 163–181 p.
- Emery, X., Ortiz, J., Cáceres, A., 2008. "Geostatistical modelling of rock type domains with spatially varying proportions: application to a porphyry copper deposit". The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- Emery, X., Silva, D., 2009. "Conditional co-simulation of continuous and categorical variables for geostatistical applications". Computers & Geosciences, Volumen 35, Edición 6, 1234-1246 p.
- Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Proyecto Antucoya, noviembre 2010.

- Flores, L., 2005. "Hardness model and reconciliation of throughput models to plant results at Minera Escondida Ltda", 37° Annual meeting. Canadian Mineral Processors, Canadá.
- Mery, N., 2016. "Modelamiento geoestadístico de la incertidumbre en leyes y tipos de roca en un yacimiento ferrífero". Tesis de Magister en Minería. Departamento de Ingeniería de Minas. Universidad de Chile, 140 p.
- Maleki, M., Emery, X., 2015. "Joint Simulation of Grade and Rock Type in a Stratabound Copper Deposit". Mathematical Geosciences.
- Mellado, M., Cisternas, L., Gálvez E., 2009. "An analytical model approach to heap leaching, Hydrometallurgy, Volumen 95, Edición 1, 33-38 p.
- Padilla, G., Cisternas, L., Cueto Y., 2008. "On the optimization of heap leaching", Minerals Engineering, Volumen 21, Edición 9, 673-678 p.
- Suazo, C., Kracht, W., Alruiz, OM., 2010 "Geometallurgical modelling of the Collahuasi flotation circuit" Minerals Engineering 23.
- Powell, MS., 2013. "Utilising orebody knowledge to improve comminution circuit design and energy utilisation", Second AUSIMM International geometallurgy conference, Australia.
- Sciortino, M., Muinonen, J., Korczak, J., St-Jean, A., 2013. "Geometallurgical Modelling of the Dumont Deposit". Second AUSIMM International geometallurgy conference, Australia.
- Trujillo, J., Cisternas, L., Gálvez, E., Mellado, M., 2014. "Optimal design and planning of heap leaching process. Application to copper oxide leaching", Chemical Engineering Research and Design, Volumen 92, Edición 2, 308-317 p.