

Trabajo de Diploma

En opción al Título de

Ingeniero Geólogo

Título: Estudio comparativo de la efectividad del Kriging Puntual e Inverso de una Potencia de la Distancia, en la estimación 3D de Ni, Fe y Co. Bloque 048, yacimiento Punta Gorda.

Autor: Daniel Núñez Elías

Tutores: Ms.C Jorge Luis Urrea Abraira

Dr.C Arístides Alejandro Legrá Lobaina

Colaborador: Ing. Yorjenis Maceo Rustán

Moa, 2017

“Año 59 de la Revolución”

PENSAMIENTOS

“La generosidad congrega a los hombres y la aspereza los aparta. El elogio oportuno fomenta el mérito, y la falta de elogio oportuno lo desanima. Solo el corazón heroico puede prescindir de la aprobación humana, y la falta de aprobación mina el mismo corazón heroico (...) La adulación es vil, y es necesaria la alabanza. La alabanza justa regocija al hombre bueno, y molesta al envidioso. La alabanza injusta daña a quien la recibe, pero daña más a quien la hace. La alabanza excesiva repugna con razón al ánimo viril. Los que desean toda la alabanza para sí, se enojan de ver repartida la alabanza entre los demás. El vicio tiene tantos cómplices en el mundo, que es necesario que tenga algunos cómplices la virtud. Se puede ser y se debe ser cómplice de la virtud”.

José Julián Martí Pérez

“Cada persona brilla con luz propia entre todas las demás. No hay dos fuegos iguales. Hay fuegos grandes y fuegos chicos y fuegos de todos los colores. Hay gente de fuego sereno, que ni siquiera se entera del viento, y gente de fuego loco, que llena el aire de chispas. Algunos fuegos, fuegos bobos, no alumbran ni queman, pero otros arden la vida con tantas ganas que no se les puede mirar sin parpadear, y quien se acerca se enciende”.

José Julián Martí Pérez

“Criticar no es morder, ni tenacear, ni clavar en la áspera picota; no es consagrarse impiamente a escudriñar con miradas avaras en la obra bella, los lunares y manchas que la afean. Es señalar con noble intento el lunar negro, y desvanecer con mano piadosa la sombra que oscurece la obra bella”.

José Julián Martí Pérez

“No te rindas, por favor no cedas, aunque el frío queme, aunque el miedo muerda, aunque el sol se esconda, y se calle el viento, aún hay fuego en tu alma, aún hay vida en tus sueños. Porque la vida es tuya y tuyo también es el deseo, porque cada día es un comienzo nuevo, porque esta es la hora y el mejor momento”.

Mario Benedetti

DEDICATORIA

- A mi madre Niurka Elías Guerra por ser el motor impulsor de mis ganas de ser mejor cada día. Todo lo que he logrado y lograré es para ella.
- A mi abuela Nancy Amalia Borrero Fabars por predicar con su ejemplo en cada momento, y enseñarme gran parte de los valores aprendidos.
- A mi padre Daniel Núñez Borrero por ayudarme siempre en lo que ha podido.
- A mi tío Degler Núñez Borrero por su cariño, entrega y apoyo decisivo en todos mis emprendimientos.
- A mi amiga Elizabeth Pérez Ruz por su invaluable amistad y comprensión en todos los momentos de su corta vida.
- Al mejor amigo de mi vida Adrián Dahomey Ojeda Aleaga por compartir conmigo momentos inolvidables y cambiar el curso de la historia.
- A mis amigos Betsy Yuveni Viguera Torres y Carlos Enrique Rivero Basterrechea por ser mis inseparables hermanos en la distancia.
- A mis amigos: Marelis Susel Pérez Montero por ser la compañía que me revolucionó; Yanoski Salgado Batista por llevarme a descubrir un mundo nuevo, Rogelio Aguirre Pérez por hacer una diferencia en mi vida y Luis Alberto Periche Paterson por ser un excelente amigo.
- A todos mis alumnos y compañeros extranjeros que tanto me han ayudado en mi estancia en la universidad.
- A mi madrastra, Teresa Hernández González, por su amor y atención desinteresada en tan poco tiempo; y mi padrastro Juan Cedeño Reyes por ser uno de los mejores hombres del mundo.
- A mis madres María Ruz Roldán, Marcia González Panceiro, Ana Julia Zamora Torres y Haymé Barrera Pérez por sus consejos y apoyo incondicional en mis decisiones.
- A todos mis compañeros de estudio y aventuras en el IPVCE “Silberto Álvarez Aroche”, especialmente a Lhianella Ramos Escobedo, Arletys María Verdecia Mogena y Marianna Milanés Verdecia.
- A mis amigos Joe Pérez Vaillant, Ernesto Bridón Acosta y Desniel Torres Torres por ser mis compañeros de aventura y de vida en Santiago de Cuba.
- A mis compañeros del Departamento de Matemáticas del ISMM: Tania Guevara Pérez, Marledis Pupo Mulgado, Magbis González Roblejo, Ada Guillarte Noa, Anay Rodríguez Cervantes, Yisel Ribera Samón, Johnny Luis Caballero Núñez, Ricardo Quevedo Mejías, José Antonio Alayo Llorent y Alié Lamorú Reyes; por haberme formado como docente y matemático durante cinco años.

A todos los que no creyeron en mí y pensaron que las dificultades me derrumbarían.

AGRADECIMIENTOS

- A Almira Irina José Ferreira Gamboa por haber sido durante cinco años mi amiga incondicional y mi sustento económico en disímiles ocasiones.
- A mis tutores: el Dr.C Arístides Alejandro Legrá Lobaina por la confianza depositada en mí y todas sus enseñanzas y al Ms.C Jorge Luis Urrea Abaira por ser para mí un padre y enseñarme a amar la Geoestadística.
- A Yorgenis Maceo Rustán, Nelsy Domínguez Ramírez y María Vargas Meriño por su contribución en mi aprendizaje de Geoestadística.
- A mi amiga Keilín Matos Pérez por ser mi equipo perfecto, y a su familia, por su atención y ayuda incondicional durante los cinco años.
- A todos mis compañeros de grupo durante los cinco años por haberme soportado en los momentos buenos y malos: Ernesto, Luis, Júlio, Emanuel, Norges, Wilfredo, Carlos Luis, Adrián, Arian, Luis Alberto, Danelis, Geysi, Dayanet, Lisebel, Mariela, Maidelín, Alisneydis, Danai, Yusbel y Arianna.
- A mis profesores en todos los niveles de enseñanza que durante estos 17 años de estudio aportaron su granito de arena en mi formación integral.
- A Luis Ramón Blanco Zamora y su esposa por sus atenciones durante los inicios de la carrera.
- A mi grupo de amigos de la Brigada Artística de Danza del ISMM por tantas aventuras vividas: Yinet, Lizandra, Yalina, Darennis, Iroidis, Miguel Ángel, Denisbel, Pedro y Ramón.
- A mis amigos mecánicos inolvidables: Juan, Raymond, Geiser, Alejandro, Yoelvis, Guillermo, Over, Cuba, Elioikis, Dani, Ángel, Densi y Javier; por ser el piquete más loco del cual he formado parte y mis fieles amigos durante cinco años.
- A mis amigos del Secretariado de la FEU del ISMM del curso 2016-2017 por ser buenos dirigentes y amigos, especialmente a Walter Ramírez Santos, Luis Enrique Espinosa Guerra, Yasmany Medina Zaldívar y Víctor Orlando Samé González.
- A mi ex-novia Yudisley Abad Leyva y a su familia por regalarme a Moa como casa y por todas sus atenciones.
- A mi familia santiaguera conformada por Maida Aranda Aranda, Raúl Bridón Lafita y Azalia Bridón Aranda, por ser siempre tan atentos conmigo.
- A la dirección del Departamento de Geología y al Consejo de Dirección de la Facultad Geología y Minas, por mantener a nuestra facultad en la cima de los mejores resultados.
- A Flor María Reyes Hernández, Ramón Edi Peña Abreu, Lázaro Fernández Martínez y Vilma Guerra Correoso por su contribución en la realización de la tesis.

A todos los que han contribuido en mi formación profesional: ¡Muchas gracias!

RESUMEN

Los yacimientos de corteza de meteorización desarrollados sobre rocas ultrabásicas en la oriental región de Moa constituyen uno de los principales intereses económicos del país, debido a sus elevados contenidos de Ni, Fe y Co. En ocasiones, la variabilidad de la distribución de estos contenidos hace complejo el proceso de estimación de recursos y reservas; y la explotación del yacimiento. Entre los métodos utilizados para estimar los recursos en los yacimientos lateríticos, destacan el Kriging Puntual (KP) y el Inverso de una Potencia de la Distancia (IPD), los que han confirmado su validez en la modelación de los contenidos de variables de interés como el Ni, Fe y Co, pero mucho queda por decir sobre su efectividad estadística. El término “efectividad” es tomado en el sentido de que la desviación cuadrática promedio entre los valores estimados y los valores verdaderos sea la más pequeña posible y a la consecuente disminución del error de estimación. Las deficiencias aún existentes de estos métodos, nos hacen preguntarnos: ¿Cuál es el más efectivo?, ¿Qué pasa con el error de estimación si el valor real no se conoce? Estas consideraciones sugirieron la realización de este análisis geoestadístico de ambos estimadores que permitió evaluar su efectividad en la estimación 3D de los contenidos de las variables Ni, Fe y Co presentes en los yacimientos lateríticos cubanos, tomando como referencia el bloque O48 perteneciente al yacimiento Punta Gorda.

ABSTRACT

The weathering bark deposits developed on rocks ultrabasic in the western region of Moa constituting one of the main economic interests of the country, due to their high contents of Ni, Fe and Co. In occasions, the distribution of variability of these contents makes complex the process of estimating resources and reserves; and the exploitation of the deposit. Among the methods used to estimate resources in the lateritic deposit, the Punctual Kriging (PK) highlights and the Inverse of a Power of the Distance (IPD), those that have confirmed its validity in the modelation of the contents of variables of interest like Ni, Fe and Co, but much is to say about its statistical effectiveness. The term "effectiveness" could be understood in the sense of that quadratic deviation average between estimated values and real values shall be the smallest as possible and to the consequent decrease of the estimating error. The outstanding existing deficiencies of these methods make us wonder: Which is the most effective? What will really happen within the estimate error if the real value is unknown? These considerations suggested to set out a geoestadistic analysis of both appraisers that allowed to evaluate their effectiveness in the 3D estimation of the contents variables for Ni, Fe and Co present in Cuban lateritic deposits, taking as reference Block O48 belonging to Punta Gorda deposit.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I: MARCO TEÓRICO CONTEXTUAL.....	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Trabajos relacionados con la aplicación de la Geoestadística para la modelación y estimación 3D de recursos en yacimientos lateríticos cubanos....	6
1.3 Regularidades de los estudios geoestadísticos	10
1.4 Características físico-geográficas y geológicas del área de estudio	12
1.4.1 Ubicación geográfica	12
1.4.2 Características geológicas de la región de Moa	14
1.4.3 Características geológicas del yacimiento Punta Gorda.....	19
1.4.4 Características geológicas del Bloque O48	25
1.5 Conclusiones.....	27
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.....	28
2.1 Introducción.....	28
2.2 Metodología de trabajo.....	28
2.3 Materiales.....	30
2.4 Origen de los datos	30
2.4.1 Perforación	30
2.4.2 Topografía	31
2.4.3 Análisis químicos	32
2.5 Métodos geoestadísticos aplicados	32
2.4.1 Regularidades de la estimación mediante KP	32
3.4.2 Regularidades de la estimación mediante IPD	34
2.6 Conclusiones.....	36

CAPITULO III: ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	37
3.1 Introducción.....	37
3.2 Datos de la exploración.....	37
3.3 Regularización de la bases de datos.....	40
3.4 Análisis exploratorio de los datos	42
3.4.1 Despliegue de los datos	42
3.4.2 Estadística básica.....	45
3.4.3 Análisis de valores extremos en la distribución de las variables.....	47
3.4.4 Estudio de correlación	51
3.5 Análisis variográfico	51
3.6 Modelo de bloques 3D	54
3.7 Estimación de las variables Ni, Fe y Co	56
3.7.1 Análisis de error.....	58
3.8 Conclusiones.....	59
CONCLUSIONES.....	60
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del yacimiento Punta Gorda.....	13
Figura 2. Vista satelital del yacimiento Punta Gorda. Escala: 1:20 000.	14
Figura 3. Modelo geológico teórico de formación de las cortezas lateríticas en el macizo ofiolítico Moa - Baracoa, según Muñoz et al, (2007).	17
Figura 4. Distribución de las menas en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda, modificado por Núñez, 2017.....	40
Figura 5. Ubicación geográfica de los pozos del bloque O48 del yacimiento Punta Gorda, según las redes de muestro seleccionadas.....	43
Figura 6. Distribución espacial del horizonte de escombros en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.....	44
Figura 7. Distribución espacial del horizonte de mena en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.....	44
Figura 8. Distribución espacial del horizonte de roca madre en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.....	44
Figura 9. Distribución espacial de los contenidos de Ni en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.....	48
Figura 10. Distribución espacial de los contenidos de Fe en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.....	48
Figura 11. Distribución espacial de los contenidos de Co en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.....	49
Figura 12. Comportamiento del coeficiente de correlación de las variables por horizonte y red. Bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.....	51
Figura 13. Modelo de bloques en 3D utilizado en la estimación.....	55
Figura 14. Comportamiento del coeficiente de correlación entre los valores estimados de Ni, Fe y Co por los métodos KP e IPD.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los datos por horizonte y tipo de mena. Bloque O48 del yacimiento Punta Gorda, modificado por Núñez, 2017.	39
Tabla 2. Promedio de los contenidos de Ni, Fe y Co a intervalos de 3 m de muestreo.	41
Tabla 3. Estadígrafos globales para los datos de exploración del bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.	45
Tabla 4. Medidas de posición por horizontes en cada tipo de red seleccionada del bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.	46
Tabla 5. Medidas de dispersión por horizontes en cada tipo de red del bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.	47
Tabla 6. Medidas de forma por horizontes en cada tipo de red. Bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.	48
Tabla 7. Histogramas de frecuencia de las variables por horizonte en cada tipo de red. Bloque O48, yacimiento Punta Gorda.	50
Tabla 8. Parámetros utilizados en la confección de los variogramas horizontales y verticales.	52
Tabla 9. Ecuaciones de los variogramas modelos empleados en la estimación. ...	53
Tabla 10. Modelo de probabilidad para cada horizonte. bloque O48, yacimiento Punta Gorda.	55
Tabla 11. Parámetros de los elipsoides de búsqueda utilizados en la estimación.	56
Tabla 12. Valores promedio de Ni, Fe y Co estimados por horizonte y tipo de red mediante los métodos KP e IPD.	58
Tabla 13. Valores de la varianza del KP en las estimaciones de Ni, Fe y Co por horizonte y tipo de red.	58

INTRODUCCIÓN

Los yacimientos de corteza de meteorización desarrollados sobre rocas ultrabásicas en la oriental región de Moa constituyen uno de los principales intereses económicos del país, debido a sus elevados contenidos de Ni, Fe y Co. En ocasiones, la variabilidad de la distribución de estos contenidos hace complejo el proceso de estimación de recursos y reservas y la explotación del yacimiento.

La clasificación de los recursos en las categorías de Medidos, Indicados o Inferidos; considera un error permisible en la estimación según la categoría de investigación. La estimación de recursos, en sus inicios, se basó en el uso de los valores medios o medias ponderadas, en los métodos de Bloques Geológicos, Perfiles Paralelos, entre otros; conocidos como métodos “clásicos”.

El desarrollo acelerado de técnicas informáticas aplicadas a las Geociencias ha proporcionado la introducción de nuevas herramientas para estimar los valores desconocidos a partir de los reales, conocidos como métodos “modernos” o geoestadísticos. Éstos, prestan un mayor interés en las estimaciones a nivel local que en las globales. La estimación local busca estimar o predecir el valor de la variable de interés en un sector del campo estudiado, a partir de datos disponibles de un conjunto discreto de puntos; haciéndolos más eficientes que los “clásicos” pues proporcionan la mayor información posible de la variabilidad de la distribución de estos contenidos.

Los métodos geoestadísticos buscan el mejor estimador que minimice la varianza del error de estimación, y parten de que la variabilidad o continuidad de las variables distribuidas en el espacio tienen una estructura determinada, que posibilita crear un modelo de bloques adecuado donde los bloques son definidos con dimensiones convenientes a la unidad de selección minera, teniendo en cuenta el espaciamiento entre muestras y el alcance estructural, es decir, la distancia hasta la cual las muestras se encuentran correlacionadas espacialmente.

En la práctica, ningún método es categóricamente mejor que otro, de modo que la elección de uno u otro, no es trivial. Para determinar el más adecuado, se han

desarrollado técnicas que permiten el análisis de los errores cometidos durante la estimación como es el caso de la validación cruzada, la cual divide el conjunto de datos en dos sub-conjuntos, y luego, los datos del primer sub-conjunto son utilizados para interpolar los valores del segundo de manera que las diferencias entre los valores estimados y los valores reales, indican la calidad del estimador.

En el caso de los yacimientos ferroniquelíferos del nordeste de Cuba, la introducción de métodos automatizados para la estimación de recursos ha permitido el uso de herramientas geoestadísticas y como consecuencia se ha incrementado la precisión y exactitud de los estimados, por lo que la utilización de estos métodos ha tomado auge.

Entre los métodos utilizados para estimar los recursos en los yacimientos lateríticos, destacan el Kriging Puntual (KP) y el Inverso de una Potencia de la Distancia (IPD), los que han confirmado su validez en la modelación de los contenidos de variables de interés como el Ni, Fe y Co, pero mucho queda por decir sobre su efectividad estadística.

El método IPD se basa en una combinación lineal de los valores proporcionales al inverso de la distancia euclidiana entre las localizaciones muestreadas y la que se desea estimar, estos valores son calculados teniendo en cuenta la distancia entre la localización a estimar y la localización de la muestra.

Esta técnica de estimación utiliza directamente los valores muestreados en el proceso de estimación y refiere pesos de acuerdo a las distancias entre los datos, sin tener en cuenta la continuidad espacial de la información disponible, a diferencia del krigeaje, que sí utiliza los resultados del análisis estructural. La función de interpolación obtenida por este método es continua y tiende a mostrar extremos locales en los sitios con datos. Este estimador no toma en cuenta las redundancias que existen entre los datos.

En el caso del kriging, el problema consiste en encontrar la mejor estimación lineal posible del contenido de un panel, teniendo en cuenta la información disponible, mediciones que han sido obtenidas tanto en el interior como externamente al

panel que se desea estimar. Este estimador efectúa una ponderación, es decir, atribuye un peso a cada valor observado, los pesos son calculados de manera que minimice la varianza de estimación resultante, teniendo en cuenta las características geométricas del problema (Matheron, 1970). Al minimizar la varianza de estimación se garantiza el uso óptimo de la información disponible. Para ello es fundamental el conocimiento del comportamiento estructural de la información, contando con el modelo de semivariograma teórico que refleje fielmente las características de variabilidad y correlación espacial de la información disponible. (Cuador, 2004).

No existe un método por muy actualizado que sea, que permita obtener los resultados reales. Las deficiencias aún existentes de éstos, nos hacen preguntarnos: ¿Cuál de estos métodos empleados es el más efectivo?, ¿Qué pasa con el error de estimación si el valor real no se conoce? El término “efectividad” podría ser tomado en el sentido de que la desviación cuadrática promedio entre los valores estimados y los valores verdaderos sea la más pequeña posible y a la consecuente disminución del error de estimación.

Estas consideraciones sugieren la realización de un análisis geoestadístico de ambos estimadores que permita evaluar su efectividad en la estimación 3D de los contenidos de las variables Ni, Fe y Co presentes en los yacimientos lateríticos cubanos, tomando como referencia el Bloque O48 perteneciente al yacimiento Punta Gorda.

Problema científico

Necesidad de evaluar la efectividad de los métodos KP e IPD en la estimación 3D de Ni, Fe, Co en yacimientos ferroniquelíferos, caso de estudio Bloque O48 del yacimiento Punta Gorda al nordeste de Cuba.

Objeto de estudio

Los métodos KP e IPD en la evaluación de Ni, Fe y Co.

Objetivo general

Evaluar la efectividad de los métodos KP e IPD en la estimación de Ni, Fe, Co en los yacimientos ferroniquelíferos del nordeste de Cuba.

Campo de acción

Efectividad de los métodos KP e IPD

Hipótesis

Si se aplican técnicas de correlación en estimaciones realizadas por los métodos KP e IPD, se podrá evaluar la efectividad de éstos, en la estimación 3D de Ni, Fe, Co en yacimientos ferroniquelíferos.

Objetivos específicos

- Sistematizar el conocimiento sobre el objeto de investigación y el campo de acción.
- Modelar geoquímicamente los horizontes de la corteza del bloque O48.
- Comparar la efectividad de los métodos KP e IPD, aplicando técnicas de correlación, al estimar en 3D valores puntuales de Ni, Fe y Co en el Bloque O48.

CAPITULO I: MARCO TEÓRICO CONTEXTUAL

1.1 Introducción

La producción de níquel y cobalto a partir de la explotación de las cortezas ferroniquelíferas existentes en la región de Moa han constituido para el país uno de los principales renglones económicos históricos dando lugar al desarrollo de las empresas del níquel. Las inversiones realizadas por el país en estas producciones superan los millones de dólares y las exportaciones por este concepto han ubicado a Cuba entre los países mayores productores de níquel.

El perfeccionamiento de esta industria en el tiempo, a partir de las exigencias cada vez mayores del mercado internacional en cuanto a las regulaciones relacionadas con el aprovechamiento óptimo de los recursos minerales, ha propiciado la modernización paulatina de las técnicas y métodos de estimación de recursos.

En los últimos años, la realización de estimaciones precisas se ha convertido en un asunto de vital importancia debido a los escándalos que en esta materia se han producido en algunas partes del mundo. Han de emplearse, entonces, métodos eficientes y adaptables a la situación geológica imperante en el lugar de estudio, que permitan obtener resultados fiables.

La estimación de los contenidos de variables de interés concentradas en los yacimientos moenses, como son el Ni, Fe y Co, no constituye una tarea fácil dada la variabilidad de la distribución de los elementos en el suelo y la complejidad geológica de los yacimientos surgidos como resultados de la superposición de eventos geológicos en el tiempo. Se hace necesario, entonces, conocer las características geológicas y geoquímicas, de forma que se pueda establecer el estudio del comportamiento espacial de las diferentes variables. De igual forma, las bases de datos y superficies topográficas deben poseer la calidad necesaria para ser incluidas en los procesos de creación de modelos 3D.

Las técnicas geoestadísticas basadas en modelos 3D, entre las que se encuentran el KP y el IPD, ofrecen un mayor grado de detalle en la modelación y estimación

de los yacimientos lateríticos debido a su grado de precisión en cuanto a las estimaciones locales, permitiendo establecer un modelo de bloques 3D que caracteriza la distribución espacial y cuantitativa de los elementos químicos útiles; así como precisar la cantidad de recursos existentes.

En el presente capítulo se ofrece una panorámica del estado actual de las investigaciones relacionadas con la modelación y estimación 3D de recursos en los yacimientos lateríticos cubanos y se detallan las características de interés para la modelación y la estimación presentes en el área de estudio.

1.2 Trabajos relacionados con la aplicación de la Geoestadística para la modelación y estimación 3D de recursos en yacimientos lateríticos cubanos

Desde 1993, año en que se introdujeron en las investigaciones cubanas los conceptos geoestadísticos y la utilización del variograma como herramienta que caracteriza la continuidad espacial de las variables geológicas, en los yacimientos lateríticos, se han desarrollado trabajos que con la evolución de esta ciencia han ido creciendo en madurez y precisión.

Los temas relacionados con la modelación, estimación o simulación de determinados parámetros geológicos en estos yacimientos han transitado por diferentes etapas de desarrollo hasta llegar a las técnicas 3D, las cuales permiten una mejor visualización y estudio de las variables en el espacio. En este sentido se realizó una revisión bibliográfica que permitiera compilar los trabajos que en materia de modelación y estimación 3D se ha realizado en los yacimientos lateríticos cubanos, arrojando los resultados que a continuación se relatan.

(Legrá, 1999), en su tesis doctoral, aplica técnicas modernas como la interpolación polinómica, la Geoestadística lineal, la interpolación por splines en espacios euclidianos R^n , técnicas de la Teoría de los Elementos Finitos y de la Optimización Binaria; al estudio y explotación de los yacimientos lateríticos. En la investigación presenta modelaciones tridimensionales de los parámetros geoquímicos en el programa "Tierra", creado por el autor para el procesamiento de la información geológica de este tipo de yacimiento. En el trabajo desarrollado se demuestra que

es posible modelar los yacimientos lateríticos atendiendo a ciertas características geológicas productos del proceso de intemperización y de la yacencia y que uniendo esta modelación con técnicas adecuadas de planificación y control, entonces, el sistema resultante permite el seguimiento de la extracción del mineral (en toda la explotación del yacimiento) y la toma de las decisiones necesarias para disminuir los parámetros que influyen negativamente en el proceso: pérdidas, empobrecimiento, no cumplimiento del volumen y de la calidad del mineral enviado por unidad de tiempo al proceso metalúrgico, buen uso del equipamiento y permite lograr afectaciones ecológicas pequeñas. De esta forma ofrece una “Metodología para el pronóstico, planificación y control integral de la minería” con aplicaciones prácticas en la empresa “Cmtd. Ernesto Che Guevara”.

(Lavaut, 2000), realiza un “Estudio preliminar de las redes de perforación y muestreo para el cálculo del mineral laterítico” en el yacimiento Yagrumaje Norte. En este trabajo se utiliza el método de variantes para evaluar la eficiencia de las redes de 100×100 m y 33.33×33.33 m y se calcula además la densidad óptima de la red usando expresiones matemáticas que consideran las áreas a explorar y el grado de variabilidad; concluyendo con la necesidad de argumentar las redes según las condiciones geólogo – geomorfológicas y genéticas, considerando así no usar redes con carácter regional y propone disponer de perforaciones según una red más densa que la de 33.33×33.33 m para precisar las redes óptimas en la exploración geológica y para la explotación. Finalmente estima, de forma preliminar, que para la exploración detallada (categoría probable) es suficiente la red de 33.33×33.33 m mientras que para la categoría probada es suficiente una cuadrícula de 23.57 m.

(Cuador, 2002), en su tesis doctoral “Estudio de estimación y simulación geoestadística para la caracterización de parámetros geólogo-industriales en el yacimiento laterítico Punta Gorda”, introduce una metodología óptima para la simulación y caracterización de los recursos en este tipo genético de yacimientos, teniendo como aporte fundamental la organización y aplicación de los elementos fundamentales para la estimación y la utilización por vez primera en Cuba, para

yacimientos lateríticos, de las técnicas de simulación geoestadística. La metodología propuesta es aplicada en la caracterización de los parámetros geólogo-industriales de algunos bloques del yacimiento Punta Gorda con el objetivo fundamental de estimar y caracterizar los recursos minerales in situ, determinándose mediante el kriging de bloque los contenidos de Ni, Fe y Co, sobre la base de la modelación bi y tridimensional de las variables en cuestión y finalmente los recursos a escala local y global.

(Martínez y Pérez, 2005), en su artículo “¿Cuál es el mejor método para estimar variables en yacimientos lateríticos de níquel y cobalto?”, comparan los errores puntuales asociados a varios algoritmos de estimación y simulación, tomando como caso de estudio el bloque O48 del Yacimiento Punta Gorda. La comparación se basó en los resultados de la técnica de jackknife. Los métodos de estimación y simulación empleados fueron: inverso de la distancia, krigeage simple, krigeage ordinario, krigeage multigaussiano, krigeage lognormal, krigeage con modelo de spline, simulación gaussiana secuencial y simulación condicional por el método de bandas rotantes, esta última con 100 bandas aleatorias. En todos los casos se alcanzaron resultados similares con respecto a la media de los errores, a excepción del krigeage con modelo de spline. La diferencia entre los métodos sólo se hace evidente al comparar las distribuciones de frecuencias de dichos errores. Se demuestra que la exactitud de la estimación, en este caso de estudio, está más influenciada por las características de los datos experimentales y de la estrategia (o elipsoide) de búsqueda, que por los métodos de estimación que se empleen. De esta forma se analizaron los métodos más usados en la estimación de recursos y reservas, fundamentalmente aquellos que han sido concebidos para determinar el valor medio de las variables en una región del espacio tridimensional con un soporte de bloques, de volumen V predefinido. Constituye este trabajo el antecedente principal de la presente investigación.

(Arias, 2008), en su tesis de maestría “Influencia de la red de exploración en la determinación del potencial de recuperable de menas lateríticas níquelíferas en un sector del yacimiento Pinares Oeste”, aplica procedimientos combinados de

estimación y simulación geoestadística con el objetivo fundamental de caracterizar la influencia que ejerce el nivel de información en la precisión con que son determinados los recursos recuperables. Las estimaciones y modelaciones realizadas para las leyes de las variables níquel y hierro, fueron realizadas sobre modelos tridimensionales, obteniéndose una nueva metodología para la determinación de los recursos recuperables y su precisión.

(Johnson, 2009) en su trabajo de diploma realiza el “Modelo de recursos del sector CRIII-1 del yacimiento ferroniquelífero Cantarrana” mediante el uso del software GEMCOM, para ello parte de un análisis geoestadístico que le permitió crear el modelo de recursos 3D del yacimiento y el posterior cálculo de recursos. En este trabajo se obtuvieron importantes características de los parámetros geólogo-industriales del yacimiento y se aplicó la técnica de validación cruzada en la verificación de la estimación.

(Urra, 2011), en su tesis de maestría, realiza un “Modelo 3D de la presa de rechazo nueva” de la empresa Cmdt. Pedro Sotto Alba con el objetivo de estimar los recursos minerales en este depósito. Este nuevo modelo digital 3D de la distribución de los elementos químicos útiles y nocivos contenidos en el material limonítico depositado en la presa de rechazo, permitió conocer por primera vez dentro de un depósito artificial, la distribución de las fracciones limoníticas menores que 0,85 mm y la distribución de los elementos químicos útiles y nocivos que intervienen en el proceso de lixiviación ácida a presión.

Destacan también los trabajos de elaboración y actualización de proyectos geólogo-mineros y de estimación de recursos y reservas, realizados por el Centro de Proyectos del Níquel (CEPRONIQUEL) a nivel nacional (Moa, Santiago de Cuba, Villa Clara, La Habana), como uno de los pioneros en el empleo de la modelación y estimación 3D en el estudio de los yacimientos lateríticos mediante el uso del software GEMCOM. De igual forma las estimaciones realizadas por los departamentos de Geología de las empresas “Cmdt. Ernesto Che Guevara” y “Cmdt. Pedro Sotto Alba” en los yacimientos que tienen concesionados, se basan en la utilización de la modelación 3D de los parámetros geológicos, mediante el

uso de modernas técnicas geoestadísticas en software como GEMCOM e ISATIS. Otros trabajos en esta materia son desarrollados por el Centro de Investigaciones de Níquel y la Empresa Geominera Oriente.

1.3 Regularidades de los estudios geoestadísticos

La Geoestadística se encarga del estudio de muestras repartidas en el espacio a partir de modelos aleatorios (Martínez, 2006) y destaca como una de las herramientas más completas en la modelación de los contenidos de Ni, Fe y Co en los yacimientos lateríticos cubanos, con una efectividad probada durante más de 20 años. Los métodos de estimación propuestos por esta ciencia, permiten describir detalladamente los parámetros geólogo-industriales y tienen en cuenta las características de la variabilidad y correlación espacial de las menas, por lo que se adaptan a las complejidades de estos yacimientos.

La herramienta básica de la Geoestadística es el variograma, el cual se emplea para cuantificar la correlación entre observaciones. Los modelos de variograma se usan en la estimación sobre puntos no muestreados, procedimiento que se conoce como krigeage (o kriging en inglés) en honor al ingeniero sudafricano Danie Krige, quien, junto Herbert Sichel llevaron a cabo los primeros pasos de la naciente ciencia en las minas de oro de Witwatersrand. Las principales bases teóricas de la geoestadística fueron creadas por Georges Matheron hacia los años 60 y 70, en el Centro de Investigación de Fontainebleau, junto a su equipo de jóvenes investigadores. (Martínez, 2006).

(Martínez, 2006) para designar las ramas de esta ciencia, recomienda la clasificación propuesta por el Centro de Geoestadística de la Escuela de Minas de París, que la separa en:

1. Geoestadística lineal
2. Geoestadística no estacionaria
3. Geoestadística multivariada

4. Simulaciones
5. Geoestadística no lineal

En la actualidad los estudios geoestadísticos se han aplicado a numerosas ramas del conocimiento como la industria petrolera, la minería, las ciencias del mar, la hidrogeología, la pesca, el medio ambiente, las ciencias agrícolas y forestales, la ingeniería civil, procesamiento de imágenes, cartografía, ciencias de materiales, salud pública, meteorología, edafología, finanzas, entre otras.

La estimación geoestadística puede hacerse de dos formas (Cuador, 2000):

- ❖ Estimación puntual: sólo se obtiene un valor estimado en una localización deseada o en los puntos de una red de estimación definida sobre la región de estudio.
- ❖ Estimación de bloque: se obtiene el valor medio de la propiedad que se estima en bloques definidos sobre el dominio, rectángulos para aplicaciones en dos dimensiones y paralelepípedos para tres dimensiones.

Los puntos o bloques a estimar deben ser seleccionados de los definidos en una región rectangular que cubra el dominio, con el objetivo de contornear la zona de interés, es decir, seleccionar los puntos, cuadrículas o bloques que están dentro de los límites de la región de estudio, en el caso minero la zona mineralizada de interés, (Cuador, 2000).

Estas estimaciones, según Martínez (2006), constan de tres pasos básicos para su aplicación práctica:

1. Análisis exploratorio de los datos
2. Análisis estructural (cálculo y modelado de los variogramas)
3. Predicción (krigeage o simulación)

El análisis exploratorio de datos se realiza con el objetivo de describir la data. En este paso se determinan los detalles sobre la distribución a la que se ajustan los datos y con qué precisión lo hacen, y se realiza la caracterización estadística de las variables al calcular los estadígrafos de posición, dispersión y forma. Previo a esta etapa se realiza una revisión de la confiabilidad de la base de datos, realizando su validación y corroborando en el campo de ser necesario, la existencia de valores anómalos.

El análisis estructural tiene como objetivo fundamental la confección y modelamiento de los variogramas experimentales y modelos. En esta etapa se realiza la determinación de fenómenos que pueden afectar sensiblemente el resultado de la estimación (presencia de tendencia regionales y locales, mala continuidad espacial de la data relacionada con el efecto pepita, etc.), se estudia la ley de distribución de las funciones aleatorias a través del estudio variográfico y se analiza la presencia de anisotropía con su correspondiente interpretación geológica.

El último paso se realiza para definir el método de simulación o estimación que mejor se ajusta a las características de los datos, para ello se realiza un análisis exhaustivo de los errores locales y globales de ajuste en correspondencia con el variograma empleado que permita definir cuál es el mejor estimador. Finalmente se valida la estimación acorde al error cometido.

1.4 Características físico-geográficas y geológicas del área de estudio

1.4.1 Ubicación geográfica

El yacimiento Punta Gorda, al cual pertenece el bloque O48, ocupa un área total de 7 452 Km² y se encuentra ubicado dentro de los límites del macizo montañosos Moa –Baracoa, al noreste de Moa, municipio más oriental de la provincia de Holguín. Limita al norte con las aguas del Océano Atlántico, la carretera a Punta Gorda y la parte baja del cauce del río Moa; al sur con los yacimientos Camarioca Norte y Este; al oeste con el yacimiento Moa Oriental, separado de él por el límite

natural del arroyo Los Lirios y el cañón del río Moa; y al este con el río Yagrumaje que lo separa del yacimiento Yagrumaje.

El área está limitada por las coordenadas del sistema Lambert siguientes:

$$X = 699\ 800 - 704\ 100$$

$$Y = 218\ 600 - 221\ 900,$$

Las coordenadas geográficas latitud (φ) y longitud (λ) son:

$$\varphi = 20^{\circ} 38' 2''$$

$$\lambda = 74^{\circ} 52' 8''$$

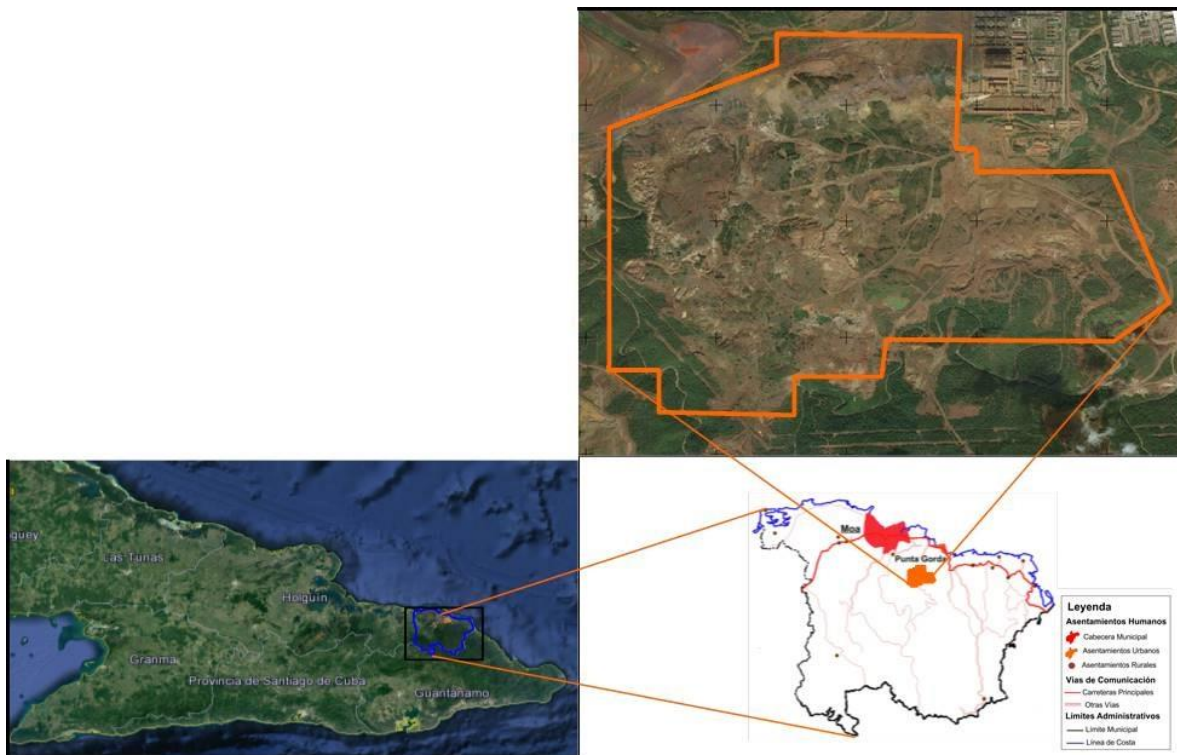


Figura 1. Ubicación geográfica del yacimiento Punta Gorda.



Figura 2. Vista satelital del yacimiento Punta Gorda. Escala: 1:20 000.

1.4.2 Características geológicas de la región de Moa

El desarrollo de la era Mesozoica en Cuba se produjo según el modelo geotectónico que caracteriza a los sistemas de arcos insulares y cuencas marginales, que se desarrollaron en las periferias de los márgenes continentales como consecuencia de la convergencia, (Rodríguez, 1998).

A fines del Maestrichtiano se estima ocurre la extinción del arco volcánico cretácico cubano, iniciándose los procesos de compresión de sur a norte que originan, a través de un proceso de acreción, el emplazamiento del complejo ofiolítico según un sistema de escamas de sobre-corrimiento con mantos tectónicos altamente dislocados de espesor y composición variable.

Los movimientos de compresión hacia el norte culminaron con la probable colisión y obducción de las paleounidades tectónicas sobre el borde pasivo de la plataforma de Bahamas. A partir del Eoceno Medio y hasta el Mioceno Medio las fuerzas de compresión tangenciales se reducen, tomando importancia para la región los movimientos verticales que caracterizan y condicionan la morfotectónica regional, iniciándose a partir del Mioceno Medio el proceso de ascenso del actual territorio de la isla de Cuba.

Los movimientos verticales responsables de la formación del sistema de horts y grabens, van a caracterizar los movimientos tectónicos recientes, sin obviar la influencia que sobre Cuba Oriental tienen los desplazamientos horizontales que ocurren a través de la falla Oriente desde el Eoceno Medio-Superior, que limita la placa norteamericana con la placa del Caribe, generándose un campo de esfuerzos de empuje con componentes fundamentales en las direcciones norte y noreste, que a su vez provocan desplazamientos horizontales de reajuste en todo el Bloque Oriental Cubano, (Rodríguez, 1998).

La complejidad geológica en la que se encuentra la región de Moa, es el resultado de la evolución de diferentes eventos geológicos que experimentó el territorio en épocas pasadas dando lugar a una amplia variedad de estilos tectono-estratigráficos, morfológicos y litológicos que influyen en la génesis, conservación y explotación de las cortezas lateríticas.

En el estudio publicado por (Iturralde, 1998), sobre la constitución geológica de Cuba, reconoce que en el territorio cubano se pueden distinguir dos niveles estructurales principales: el substrato plegado y el neoa autóctono; ambos se encuentran mezclados con distintos grados de aloctonía.

El substrato plegado en el macizo ofiolítico Mayarí-Baracoa, sobre el cual se encuentran los depósitos ferroniquelíferos de Moa, presenta unidades de naturaleza oceánica conformadas por las ofiolitas septentrionales, además de las rocas del arco volcánico del Cretácico, las secuencias de la cuenca de piggy back del Campaniense Tardio-Daniense, el arco de islas volcánico del Paleógeno y las

rocas de las cuencas de piggy back del Eoceno Medio-Oligoceno. Las unidades de naturaleza continental están ausentes. El neoa autóctono está constituido por materiales terrígenos y carbonatados poco deformados del Eoceno Superior Tardío al Cuaternario, que cubren las rocas del cinturón plegado discordantemente.

Es característico en la región la presencia de rocas de origen mantélico como dunitas, piroxenitas, lherzolitas, harzburgitas y en ocasiones wherlitas, parcial o totalmente serpentinizadas. En algunos sectores, dentro del complejo se ha evidenciado la presencia de peridotitas plagioclásicas y otras rocas de la zona de transición manto-corteza oceánica.

Dentro de las rocas que se localizan en el basamento de la corteza oceánica se encuentran los gabros normales, gabros olivínicos, noritas y troctolitas. Estas rocas se encuentran en mayor o menor grado serpentinizadas. Además de las rocas antes mencionadas se hallan rocas pertenecientes a la zona de transición entre las que se encuentran los diques de gabro-pegmatitas, cromititas y peridotitas plagioclásicas.

La presencia de estas rocas, pertenecientes a la zona de transición, genera contenidos anómalos de Al_2O_3 y SiO_2 en las cortezas lateríticas sobre ellas desarrolladas, pues debido a las condiciones tropicales y subtropicales de la región combinadas con los factores petrológicos, estructurales y geomorfológicos se han formado cortezas de intemperismo dadas por la descomposición de las rocas primarias que forman perfiles de alteración intempérica caracterizados por una zonalidad vertical química y mineralógica, ver figura 3.

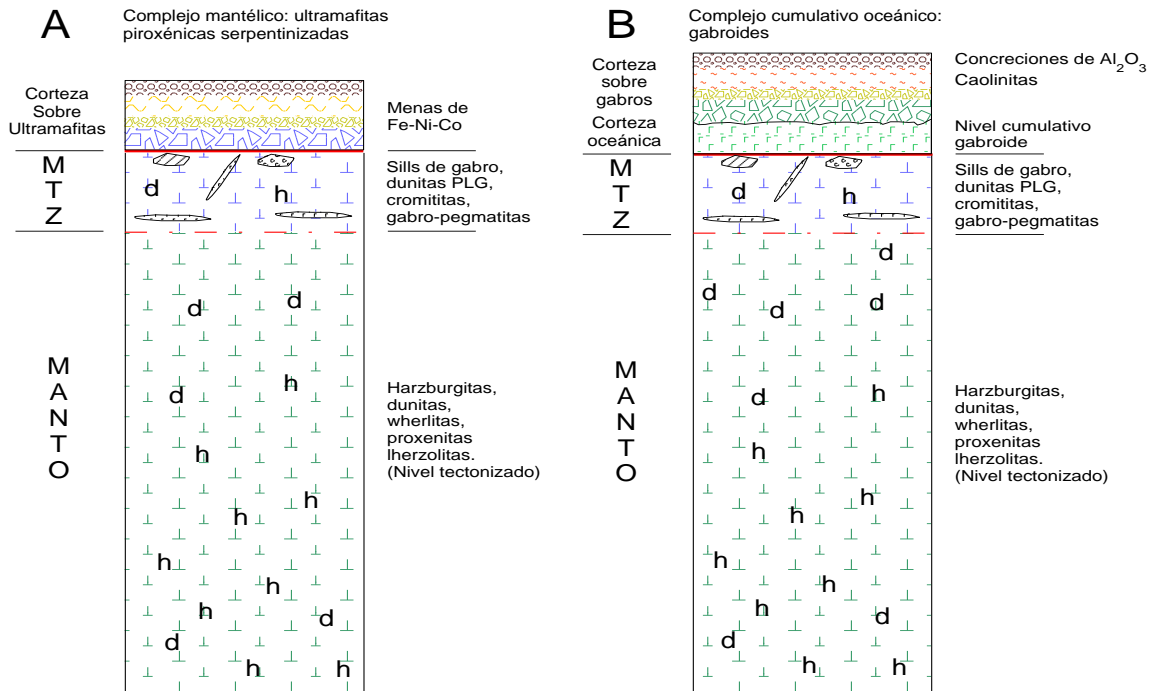


Figura 3. Modelo geológico teórico de formación de las cortezas lateríticas en el macizo ofiolítico Moa - Baracoa, según Muñoz et al, (2007).

En el área las lateritas son principalmente oxidadas (compuestas fundamentalmente por óxidos e hidróxidos de hierro en la parte superior del perfil sobreyaciendo las rocas mantélicas y alteradas); donde los minerales primarios (olivino, serpentina y piroxenos) se desintegran de las celdas elementales por hidrólisis, liberando sus componentes como iones en disolución acuosa. El magnesio se lixivia casi completamente y en menor medida la sílice, el hierro bivalente es removido pero se oxida y precipita rápidamente como hidróxido férrico, que cristaliza progresivamente a goethita y otros óxidos e hidróxidos.

La transformación mineralógica explica las tendencias globales de algunos elementos como el magnesio, el hierro y la sílice. El comportamiento del níquel y el cobalto se diferencia de los elementos mayoritarios antes mencionados, a medida que los minerales primarios se alteran, estos elementos liberados, en forma de iones, tienden a asociarse por afinidad geoquímica con los nuevos óxidos e hidróxidos de hierro. Luego se incorporan a la estructura cristalina de la goethita a través una combinación de adsorción y reemplazo de Fe^{3+} . El níquel y

el cobalto también se concentran en los óxidos de manganeso, donde precipitan por reacción de reducción-oxidación. El níquel y el cobalto se adhieren a la celda elemental de la goethita, neutralizando las cargas negativas; lo que facilita la extracción por la lixiviación ácida a presión.

La goethita se transforma progresivamente en hematita, esta transformación implica una pérdida de níquel, debido a que no se acomoda fácilmente en la estructura cristalina de este mineral. Esta transformación también implica un cambio de coloración de pardo amarillo a rojo ladrillo, así como, la formación de concreciones y corazas hematíticas.

Las zonas u horizontes presentan particulares propias en cuanto a su coloración, granulometría y densidad; estas características están en correspondencia con la intensidad del proceso de meteorización que ha tenido lugar en dicho punto de alteración intempérica.

Las menas lateríticas residuales se formaron durante el proceso de lateritización de las ultramafitas serpentinizadas, en estas menas existe un enriquecimiento de las concentraciones de algunos elementos químicos de importancia económica: Fe, Al, Ni, Co, Mn y Cr, entre otros.

Los cambios entre horizontes se establecen por la composición química de los metales principales (Fe, Ni, Co, Al, Si, Mg), y responden a la composición compleja de la mineralogía de las menas lateríticas; los contactos entre los diferentes horizontes no son fijos, es decir, no están separados mediante un contacto sensu estricto sino, más bien, constituyen una zona de transición entre los horizontes o capas, generalmente se trata de contactos sinuosos entre los horizontes. (Muñoz, 2004).

En las cortezas de meteorización es frecuente encontrar fragmentos o bloques de rocas primarias, los que se localizan en los diferentes horizontes, aunque presenta una mayor distribución hacia la parte inferior del corte laterítico.

1.4.3 Características geológicas del yacimiento Punta Gorda

Geología

El yacimiento Punta Gorda, es el del tipo laterítico-saprolítico o de perfil completo, según la clasificación cubana; oxidado, según la clasificación mostrada por (Elías, 2002) y ecuatorial húmedo sobre rocas ultramáficas altamente serpentinizadas en áreas bien drenadas según la clasificación de (Golightly, 1979). Cuenta con una corteza de intemperismo de espesor de 25-35 metros, siendo el más potente de los yacimientos de la zona, y en él se encuentran tres grandes conjuntos litológicos: el basamento, la corteza de meteorización laterítica y las lateritas redepositadas.

En el basamento se revela una alta complejidad tectónica y mediana complejidad petrológica. La roca que predomina es la peridotita serpentizada en mayor o menor grado. De acuerdo a estudios anteriores y a las observaciones de campo, las peridotitas presentes son harzburgitas de color azul verdoso oscuro, con contenido variable de piroxenos rómbicos y olivino. En menor grado aparecen piroxenos monoclinicos. Tanto los piroxenos como el olivino han sido transformados a minerales del grupo de la serpentina, siendo ocasional la presencia de relictos de los minerales primarios (Quintas et al, 2002; Almaguer et al, 2005 citado en Almaguer, 2005).

En el área se localizan fajas de serpentinita foliada, esquistosa y budinada, que coinciden con las zonas de contacto entre mantos tectónicos imbricados. Las fajas deformadas están completamente cortadas y desplazadas por varios sistemas de fallas más jóvenes. Las budinas, fundamentalmente son de peridotitas, que se presentan fracturadas y rodeadas por serpentinitas esquistosas. Estas fajas se orientan preferentemente al N60°E.

Se observan algunas tendencias distributivas entre las áreas con peridotitas y las que contienen las fajas de micromelanges (serpentinitas foliadas y budinadas), presentándose dos áreas relativamente pequeñas con predominio de peridotitas: al sudoeste y centro norte, mientras que, ocupando la porción central y el borde

oriental y norte del yacimiento se alternan las peridotitas con fajas de micromelanges. La zona central se caracteriza por presentar la forma de un gran arco cóncavo hacia el norte. Las fajas foliadas contenedoras de gabro, aunque ocupan áreas relativamente pequeñas, producen una corteza contaminada, caracterizada por el aumento de sílice y alúmina y la disminución de hierro, níquel y cobalto.

La corteza de meteorización está desarrollada principalmente sobre peridotitas de tipo harzburgitas serpentinizadas en distinto grado y por serpentinitas, las cuales ocupan la mayor parte del yacimiento y en menor grado por material friable producto del intemperismo químico del gabro olivínico, plagioclasita y anfibolita, ubicado el primero hacia las zonas este y norte del yacimiento y los otros dos tipos de corteza hacia la parte este del depósito mineral. Los horizontes meníferos que conforman el perfil friable son, de arriba hacia abajo (Quinta et. al., 2002 modificado por Núñez, 2017):

- ❖ Horizonte 1: Ocre estructural con concreciones ferruginosas (OIC). Presentan color pardo oscuro con concreciones ferruginosas que aumentan de tamaño hacia la superficie donde forman bloques de distintas dimensiones y forma.
- ❖ Horizonte 2: Ocre inestructural sin concreciones ferruginosas (OI). Presenta color pardo oscuro.
- ❖ Horizonte 3: Ocre estructural final (OEF). Se caracteriza por sus estructuras terrosas y color pardo amarillento hasta amarillo, se distingue la estructura de la roca madre.
- ❖ Horizonte 4: Ocre estructural inicial (OEI). Se caracteriza por su color amarillento, pasando en algunos lugares a colores rojizos y verdosos cerca del límite inferior de la litología. Se reconoce la estructura de la roca madre que le dio origen.

- ❖ Horizonte 5: Serpentina lixiviada (SL). Las rocas como regla están manchadas de ocre. La ocreización se observa en forma de manchas de los hidróxidos de hierro. El grado de intemperismo es irregular y las más intemperizadas están representadas por rocas claras donde en forma de una red de vetillas tiene lugar la serpentización. Son rocas friables y ligeramente compactas de color gris verdoso las cuales conservan la estructura de la roca madre.
- ❖ Horizonte 6: Corteza a partir de gabros (CG). Son materiales arcillosos de color pardo lustroso de diferentes tonalidades (desde pardo oscuro brillante hasta colores ladrillo y crema). Estos materiales son pobres en hierro, níquel y cobalto con contenidos perjudiciales al proceso de sílice y aluminio. Esta litología está presente en la parte este del yacimiento y en menor proporción en su parte norte.

Las lateritas redepositadas están presentes hacia el norte y este con una distribución discontinua. Los materiales que lo componen, tuvieron su fuente de suministro en terrenos donde existió una corteza friable desarrollada, lo que determinó que las litologías presentes en este conjunto tengan alguna semejanza a las capas componentes del perfil friable. Básicamente están formados por lateritas redepositadas, intercaladas en ocasiones con arcillas pardo oscuras con material carbonizado, lentes conglomeráticos y arenosos con fragmentos predominantes de ultramafitas y en ocasiones de gabros. También pueden presentarse algunos horizontes calcáreos con gran contenido de fauna. Internamente esta secuencia presenta varios ciclos erosivos-acumulativos, marcado por discordancias erosivas intraformacionales. Por lo general estos depósitos están estratificados, pudiéndose observar estratificación paralela y cruzada. El buzamiento de las secuencias es suave hacia el norte y nordeste.

Petrología

Las rocas que componen el yacimiento Punta Gorda están representadas por el complejo del corte ofiolítico, el complejo ultramáfico-metamorfizado (peridotitas y sus serpentinitas) y el complejo cumulativo (gabros olivínico y plagiogranitas).

Como representante del complejo ofiolítico en el contexto del yacimiento y por orden de abundancia, encontramos los tipos rocosos: serpentinitas y harzburgitas serpentinizadas. Ambas litologías cubren la totalidad del área del yacimiento, siendo las primeras las más abundantes (alrededor de un 80% del yacimiento); y a ellas se asocian la masa fundamental de mineralización.

El complejo cumulativo aparece en la zona más al este del yacimiento (zona de las proximidades del río Yagrumaje, llamada también de alto escombros). Se trata de rocas poco abundantes que determinan áreas no mineralizadas para Fe, Ni, Co, representadas por plagioclasitas, anfibolitas y gabros olivínicos, las dos primeras son las menos abundantes y se encuentran muy diseminadas por toda el área del sector este en forma de pequeños cuerpos aislados. (Vargas, 2009).

Mineralogía

Desde el punto de vista mineralógico la fase más abundante en el yacimiento es la goethita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)-hematita (Fe_2O_3), aunque también existen fases de gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), minerales arcillosos y serpentinitas, estas mineralizaciones se manifiestan en todos los horizontes de la corteza, caracterizándose de manera general, desde el punto de vista químico, por la presencia de menas con un buen contenido de Fe y Ni y bajas concentraciones de SiO_2 y MgO respecto a la roca madre. Granulométricamente predomina la fase aleurolítica, aunque puede encontrarse también la psamítica con menor frecuencia que la anterior. (Bergues et. al. 1987).

Según (Muñoz et. al. 2005) la composición de las menas del yacimiento Punta Gorda resulta sumamente compleja y está constituida por óxidos, smectitas, minerales del grupo de la serpentina y minerales primarios de las ultramafitas

serpentinizadas, sumando entre el horizonte limonítico (LB) y el serpentinitico (SB) no menos de 25 a 30 minerales. El principal mineral portador del Ni en el horizonte limonítico es la goethita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y del Co es la asbolana ($m(\text{Co}, \text{Ni})\text{O} \cdot \text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$).

Hidrografía

La red fluvial está representada por los ríos Moa (al norte) y sus afluentes: arroyo Los Lirios (al oeste) y arroyo La Vaca (área central), además del río Yagrumaje (al este y sur). La fuente de alimentación principal de estos ríos y arroyos, son las precipitaciones atmosféricas, desembocando las arterias principales en el Océano Atlántico, formando deltas cubiertos de sedimentos palustres y vegetación típica de manglar. La mayor parte del yacimiento está ocupado por la zona de divisorias entre el río Yagrumaje y el arroyo La Vaca, presentando un relieve suavemente ondulado que alcanza una altura de 174 m hacia el sur disminuyendo su altura hasta 20 m al norte y nordeste. La divisoria del río Yagrumaje presenta cotas que van de 174 m hasta 134 m con una cima plana a suavemente ondulada. (Cuenca, 2009).

Hidrogeología

Las aguas subterráneas del yacimiento Punta Gorda siguen la morfología del terreno, con flujos predominantes hacia el norte en la mayor parte del área, pudiendo tener sentido diferente y hasta opuesto hacia los principales cursos de aguas superficiales. El gradiente varía entre 0.03° y 31.7° (De Miguel, 1998, 2004).

Las rocas acuíferas (serpentinitas agrietadas), presentan un importante flujo por la zona del contacto con la corteza impermeable, donde se produce el movimiento lateral del agua, mientras que en las lateritas, con algunas excepciones (en los OIC y redepósitos), el movimiento del agua es fundamentalmente de ascenso capilar, que varían entre 0.0 m a 25.5 m, correspondiendo los mayores valores al corte completo, inalterado aun por el laboreo minero.

La profundidad de las aguas subterráneas se encuentran entre 0 y 27.4 m, correspondiente el nivel 0 a los cursos de aguas corrientes superficiales y a las excavaciones mineras que han descubierto las aguas subterráneas (De Miguel, 1998, 2004).

De manera general, desde el punto de vista hidrogeológico, el yacimiento está caracterizado por dos zonas. La primera zona comprende los bloques T-46, 47, S-42, 43, 44, 45, 46, 47, R-42, 43, 44, 45, 46 y 47; donde existen las mayores potencias de los horizontes acuíferos con poca variación de las profundidades de los niveles del agua subterránea en el tiempo, es decir, que las menas siempre están inundadas, correspondiendo con la zona de descarga natural de las aguas provenientes del sur. La segunda zona comprende el resto del yacimiento donde prácticamente las lateritas no contienen agua con excepción de sectores locales que en períodos de seca quedan sin agua o con potencias acuíferas pequeñas casi siempre inferiores a los 2 m. La fuente principal de alimentación de las aguas subterráneas la constituye las abundantes precipitaciones atmosféricas. (Vargas, 2009).

Geomorfología

El yacimiento Punta Gorda ocupa la divisoria de las aguas y la vertiente norte de una cadena de colinas con una orientación NE–SW ubicada en el bloque morfotectónico El Toldo dentro del macizo montañoso Moa-Baracoa, el cual ha manifestado los máximos levantamientos relativos de la región (Rodríguez, 1998). El basamento está representado por rocas del complejo máfico y ultramáfico de la secuencia ofiolítica, sobre las cuales se ha desarrollado un relieve de montañas bajas de cimas aplanadas ligeramente diseccionadas.

Dentro del yacimiento se distinguen varios niveles hipsométricos enmarcados entre 10 y 180 m. Los menores niveles se localizan hacia el límite norte del yacimiento y aumentan progresiva y suavemente hacia el límite sur. La mayor elevación es el alto de La Calinga con 110 m sobre el nivel del mar, (Vera, 2001).

La distribución de las pendientes con valores del orden de 10-15° (inclinados) está de manera homogénea hacia el este del yacimiento, aunque podemos encontrar sectores hacia el sur y el oeste, coincidiendo con el área del nacimiento del arroyo La Vaca. Los mayores valores se observan en las alturas con máximas pendientes entre 30° y 45°, coincidiendo con los márgenes del arroyo Los Lirios y el río Yagrumaje, (Vargas, 2009).

Constituye una regularidad en este yacimiento el hecho de que valores bajos de rugosidad coinciden con valores bajos de pendiente, observándose una relación directa entre ambos parámetros, aunque en algunas áreas, fundamentalmente hacia la mitad norte del yacimiento, esta relación se invierte.

Tectónica

El área del yacimiento se encuentra limitada por dos grandes fallas regionales que pasan por los valles de los ríos Moa y Cayo Guam (De Dios, 2000). Por otro lado, el área central del yacimiento se encuentra bajo la influencia de una falla de primer orden que se corresponde con el río Moa, a partir de ella se desarrollan en el yacimiento toda una serie de fracturas de segundo orden, entre los que se destacan las que se encuentran en los arroyos “Los Lirios”, “La Vaca” y el río “Yagrumaje” ; a partir de las cuales, y en forma de plumajes, se desarrollan una serie de pequeñas fracturas a todo lo largo y ancho del área del yacimiento. Estas fracturas tienen carácter premineral, ya que en caso contrario hubieran afectado seriamente el cuerpo mineral presente en el yacimiento, en cuestión (Cuenca, 2009).

1.4.4 Características geológicas del bloque O48

El bloque O48, de 300 X 300 metros de área, cumple con las características de un perfil laterítico típico de clima húmedo tropical con roca madre ultrabásica fuertemente serpentizada y un drenaje bueno, coincidiendo tal descripción con uno de los puntos de la clasificación de (Golightly, 1979). Solo están presentes las zonas limonítica y saprolítica, siendo esta última la menos desarrollada; la zona intermedia smectita-cuarzo es insipiente y las estructuras en boulders son raras;

solo existen algunos bloques flotantes de rocas frescas o poco alteradas en las partes intermedia y baja del perfil. (Martínez y Pérez, 2006).

Según la clasificación de los dominios geológicos caracterizados en la tesis doctoral de (Vera, 2001), este bloque se ubica en el dominio I, el cual es el más extenso del depósito y se ubica hacia la mitad sur del mismo, destacándose por presentar los sectores más extensos y potentes de una corteza y su capa útil in situ con el más bajo grado de desmembramiento en todo el depósito, rodeados por sectores extensos menos potentes en los que el corte de erosión es más profundo. Este dominio ocupa los niveles hipsométricos más elevados con un marcado predominio de las pendientes superiores a 10 grados dentro del fondo general de bajas pendientes propias para todo el depósito. En este dominio los extensos sectores de corteza y su capa útil de elevadas potencias coinciden con las áreas de baja pendiente y rugosidad, mientras que los sectores de poca potencia se asocian a las pendientes más elevadas y a las mayores rugosidades.

Otra de las características distintivas de este dominio son sus contenidos significativamente más elevados de hierro, níquel y cobalto dentro de los límites del yacimiento, tanto para toda la corteza como para su capa útil. Los mayores contenidos de cobalto, tanto para toda la corteza como para su capa útil en este dominio se asocian a los sectores de baja potencia, en los que el nivel de erosión es suficientemente profundo, al tiempo que tienden a disminuir hacia los sectores donde la corteza y su capa útil son más potentes.

El níquel presenta un comportamiento geoquímico que difiere muy poco del cobalto, con la diferencia de que cuando el nivel del corte de erosión es más profundo, los contenidos de níquel se incrementan, mientras que los de cobalto disminuyen, al igual que como sucede con el hierro. En este dominio la distribución del hierro es muy semejante a la del cobalto; los contenidos más elevados de hierro se localizan tanto en los sectores donde la corteza es potente y el nivel de erosión más bajo como en sectores donde presenta poca potencia y el corte de erosión es suficientemente profundo. En los sectores donde el nivel de erosión es muy profundo los contenidos de hierro disminuyen significativamente.

Otra característica muy distintiva de este dominio es su potencia de escombro significativamente baja con relación al resto del yacimiento lo que está determinado por el carácter marcadamente erosivo del relieve en este dominio. (Vera, 2001).

1.5 Conclusiones

1. En los yacimientos lateríticos cubanos se han desarrollado trabajos de modelación y estimación geoestadística 3D de la composición química de la corteza, que han introducido y perfeccionado la aplicación de estas técnicas en la industria cubana del níquel.
2. La complejidad geológica de la región de Moa, es el resultado de la evolución de diferentes eventos geológicos que experimentó el territorio en épocas geológicas, pasadas dando lugar a una amplia variedad de estilos tectono-estratigráficos, morfológicos y litológicos que influyen en la génesis, evolución y explotación de las cortezas lateríticas.
3. El yacimiento Punta Gorda presenta características geológicas que pudieran dificultar la modelación y estimación de los recursos (pendientes, fallas, diferentes niveles hipsométricos).

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

2.1 Introducción

El objetivo fundamental de este capítulo es exponer el organigrama de trabajo seguido en el desarrollo de la investigación y ofrecer una descripción de los métodos y materiales empleados en la obtención de los datos geoquímicos y en la realización de la estimación y modelación del yacimiento en estudio.

2.2 Metodología de trabajo

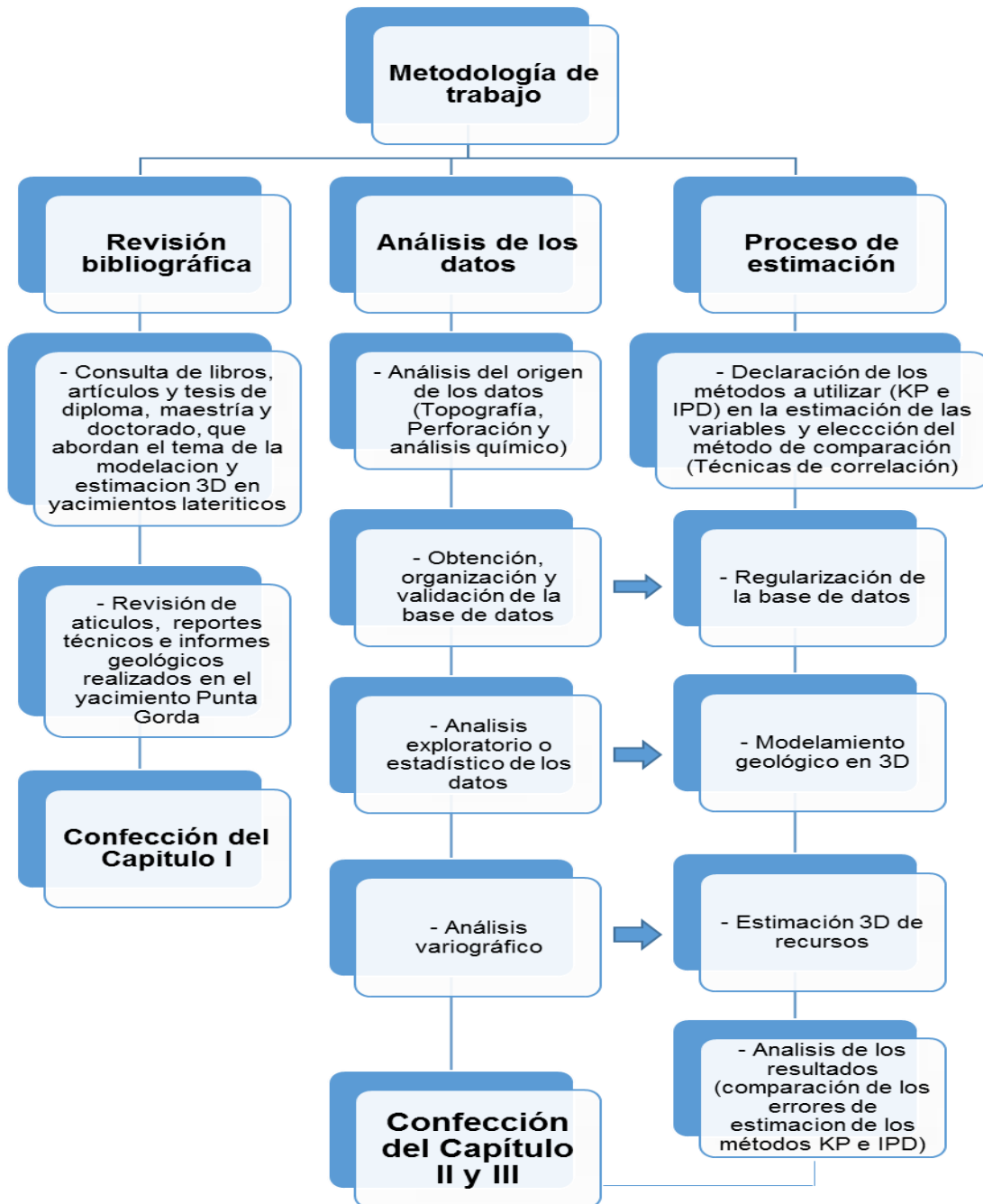
El desarrollo de la investigación estuvo dividido en tres etapas fundamentales de trabajo encaminadas al cumplimiento de los objetivos trazados de manera satisfactoria. En cada etapa se desarrollaron acciones propias que condujeron al logro de los objetivos específicos.

En la primera etapa (revisión bibliográfica) se consultaron más de 40 escritos, compuestos por libros, tesis y artículos de revistas, relacionados con la temática de la modelación y estimación 3D de yacimientos lateríticos, así como informes y reportes técnicos realizados por las empresas CEPRONIQUEL, Geominera Oriente y “Comdt. Ernesto Che Guevara” en el yacimiento Punta Gorda. El resultado de esta etapa fue la elaboración del Estado del arte (Trabajos relacionados con la aplicación de la Geoestadística para la modelación y estimación 3D de recursos en yacimientos lateríticos cubanos) y la recopilación de las principales características geológicas del yacimiento Punta Gorda y el bloque O48.

La segunda etapa (análisis de los datos) agrupa el conjunto de procedimientos a realizar previo a la estimación, con la finalidad de definir la cantidad, calidad y confiabilidad de los datos. El resultado principal de este período es la realización del análisis variográfico, que según (Chica, 1983) es el punto de partida de un estudio geoestadístico y una de sus etapas fundamentales.

La tercera etapa (proceso de estimación) es el eje fundamental de la investigación, en ella se realizaron las tareas correspondientes al procesos de estimación desde la elección de los métodos a utilizar hasta la validación de los resultados. Su resultado principal fue la obtención de las estimaciones de Ni, Fe y Co en los diferentes horizontes por cada tipo de red seleccionada.

En el flujograma siguiente, se refleja la metodología de trabajo empleada:



2.3 Materiales

A partir de los datos de Ni, Fe y Co obtenidos de los muestreos realizados en la red de perforación 8.33×8.33 m, se elaboró una base de datos en formato Excel que contiene las columnas siguientes:

- X (coordenada en la dirección este-oeste)
- Y (coordenada en la dirección sur-norte)
- Z (coordenada en la dirección vertical)
- Desde (metro donde comienza el muestro)
- Hasta (metro donde termina el muestro)
- Ni (concentración porcentual de Ni)
- Fe (concentración porcentual de Fe)
- Co (concentración porcentual de Co)

Esta base de datos fue exportada posteriormente a formato Access para realizar las consultas pertinentes para el análisis estadístico y la elaboración del fichero con el formato establecido para ser introducido en el software SGeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software), con el cual se realizó la modelación y estimación. Se utilizó además el software GEMCOM (Gemcon International, Canadá) y el Past en el análisis estadístico.

2.4 Origen de los datos

2.4.1 Perforación

El yacimiento Punta Gorda para su exploración y explotación fue dividido en 88 bloques cuadrados (administrativos) de $300,00 \times 300,00$ m. Cada bloque fue explorado en dos etapas. La primera se realizó mediante una red de hasta 81 pozos equidistantes, a una distancia de 33,33 m uno de otro en cada dirección

este-oeste y sur-norte, a la cual se le llama Red de Exploración (R_1). La segunda red de cada bloque (llamada Red de Explotación, R_2) se realizó hasta 361 pozos a una distancia de 16,16 m uno de otro en cada dirección este-oeste y sur-norte. El estudio del bloque O48 (agotado) tuvo un tratamiento único ya que se le realizó una red especial (R_3) de hasta 1 369 pozos equidistantes, a una distancia de 8,33 m uno de otro en cada dirección geográfica. (Legrá et al, 2015).

Los métodos de perforación utilizadas en el yacimiento, de manera general, en las dos etapas fueron: perforación espiral, perforación a columna y perforación integral (espiral + a columna). El equipo de perforación utilizado fue la máquina perforadora soviética U.G.B 50 M montada sobre camión de Gaz 66, también soviético.

La perforación espiral se realizó con el objetivo de muestrear los horizontes friables de la corteza utilizando láminas helicoidales de 135 mm de diámetro. El método "a columna" permitió la obtención de testigos de las rocas componentes del basamento utilizando varillas y tubos portatestigos con coronas de tungsteno de 91 mm de diámetro. En la perforación integral (combinación de los métodos mencionados) se siguieron los mismos regímenes que por separado. (Bergues et al. 1987).

2.4.2 Topografía

Los estudios topográficos realizados en el yacimiento han pasado por diferentes etapas acorde a las campañas de exploración realizadas (1969-1972, 1973-1976, 1981-1985). Los valores de x , y , z , registrados en la base de datos proceden de registros de estudios de altimetría, triangulación, nivelación, etc. El replanteo de las coordenadas de los puntos de triangulación utilizados para el enlace de las poligonales, ha sido constante en las tres campañas. El resultado principal de estos trabajos es la confección de varias planchetas, planos y mapas a diferentes escalas del yacimiento y sus bloques. Los teodolitos empleados en las mediciones son de la marca suiza Leica.

2.4.3 Análisis químicos

Los análisis químicos de las muestras tomadas en el bloque O48 en la red de $33,33 \times 33,33$ m, fueron realizados en el laboratorio Central del I.C.R.M y el de la Delegación de Oriente (Bergues et al. 1987). En el caso de las muestras tomadas en la red de $8,33 \times 8,33$ m fueron analizadas en el laboratorio de la empresa “Cmdt. Ernesto Che Guevara” a través de la técnica de espectrometría de absorción atómica (Fernández, 2017).

2.5 Métodos geoestadísticos aplicados

2.4.1 Regularidades de la estimación mediante KP

En términos geológicos el krigeado consiste en encontrar la mejor estimación lineal posible de la ley de un bloque o zona, considerando la información disponible, es decir las leyes de las diferentes muestras que se han tomado, sea al interior, sea al exterior del bloque que se quiere estimar, (Cuador, 2004).

El krigeado consiste en efectuar una ponderación es decir atribuir un peso λ_i a la ley Z_i de cada muestra i :

$$Z^*_S = \lambda_1 Z_1 + \lambda_2 Z_2 + \dots + \lambda_n Z_n$$

estos pesos se calculan de manera de hacer mínima la varianza de estimación resultante, considerando las características geométricas del problema (formas, dimensiones e implantación relativa del bloque y de las muestras).

Según David (1977), la estimación por kriging parte del conocimiento de los valores de la variable W en un conjunto de n puntos P_i , o sea, se conocen los datos (P_i, W_i) con $i=1,2,\dots,n$. Se supone estudiada la variabilidad del comportamiento de W en el dominio D que se investiga, y esta variabilidad se expresa por el variograma $\gamma(h)$ que es una función de la distancia euclidiana h definida entre puntos del dominio D . La expresión analítica de este variograma, usualmente se obtiene mediante el ajuste de uno o varios modelos teóricos a un variograma experimental y debe cumplir cierta restricción, basada en la necesidad de que la varianza de cualquier estimación debe ser nula o positiva. La estimación

por kriging del valor de W en un panel A se define como:

$$W_e = W(A) = \sum_{i=1}^k a_i W(P_i)$$

donde debe anotarse que son considerados k puntos ($k \leq n$) para realizar esta estimación.

Se quieren encontrar valores adecuados de a_i (conocidos como pesos o ponderadores) tales que se cumplan dos condiciones:

1. $\sum_{i=1}^k a_i = 1$

2. Se minimice la varianza de estimación:

$$\sigma_e^2 = 2 \sum_{i=1}^k a_i \gamma(P_i, A) - \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_i a_j \gamma(P_i, P_j) - \gamma(A, A)$$

donde $\gamma(P_i, A)$ indica la variabilidad de cada punto P_i con respecto al panel A , el valor $\gamma(P_i, P_j)$ es la variabilidad entre los puntos P_i y P_j y finalmente $\gamma(A, A)$ es la variabilidad total del panel A . O sea, que la varianza de estimación depende de la relación de las muestras con el panel A , de la relación entre las muestras, y de la variación de calidad dentro del panel a estimar (Clark, 1977 citado en Legrá et al, 2015).

Aplicando el método de los multiplicadores de Lagrange (David, 1977) se ha demostrado que los valores a_i se determinan resolviendo el sistema de ecuaciones siguiente:

$$\begin{cases} \gamma_{11}a_1 + \gamma_{12}a_2 + \dots + \gamma_{1k}a_k + \mu = \gamma_{1A} \\ \gamma_{21}a_1 + \gamma_{22}a_2 + \dots + \gamma_{2k}a_k + \mu = \gamma_{2A} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{k1}a_1 + \gamma_{k2}a_2 + \dots + \gamma_{kk}a_k + \mu = \gamma_{kA} \\ a_1 + a_2 + \dots + a_k = 1 \end{cases}$$

Donde se ha simplificado la notación tomando $\gamma_{ij} = \gamma(P_i, P_j)$ y tomando $\gamma_{iA} = \gamma(P_i, A)$. El valor auxiliar μ es el multiplicador de Lagrange. La varianza de estimación ahora queda determinada por la expresión:

$$\sigma_e^2 = \sum_{i=1}^k a_i \gamma(P_i, A) + \mu - \gamma(A, A)$$

Manteniendo el mismo variograma para todo el dominio D y asumiendo constantes el tamaño y la forma del panel A, se tiene que para un conjunto dado de k puntos, la varianza de estimación solo depende de la posición geométrica de los puntos P_i ya que son las distancias entre cada dato usado y el panel los que determinan los valores de cada término $\gamma(P_i, A)$ y de cada peso a_i . O sea σ_e^2 no depende de los valores particulares $W(P_i)$, $i=1, 2, \dots, k$.

De esta formulación puede derivarse el caso de la estimación puntual considerando idealmente el panel A con las dimensiones de un punto P_e . La expresión $\gamma(P_i, A)$ se reduce a $\gamma(P_i, P_e)$ y $\gamma(A, A) = 0$.

Para realizar la práctica de la estimación por kriging el primer paso es realizar un correcto análisis variográfico determinando los elementos del mismo: el efecto pepita, alcance, meseta, anisotropía, zona de influencia y tipo de variograma.

Finalmente, teniendo en cuenta las características particulares del problema, se deberá establecer el tipo de kriging que se utilizará y así como sus respectivos parámetros (forma y dimensiones de los paneles, estrategias de búsqueda, tratamiento de los pesos negativos, uso de Drift, etc.).

3.4.2 Regularidades de la estimación mediante IPD

El método de Inverso de una Potencia de la Distancia (IPD) consiste en una media ponderada de los valores conocidos donde los factores de ponderación son los inversos de potencias de las distancias entre cada punto conocido y el punto donde se estima. Esta modelación tiene los elementos descritos a continuación. Dados k puntos $(P_i; W_i)$ de R^{n+1} se estima el valor de W en un punto P mediante la

ecuación:

$$W_{est} = \frac{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{d_i^q} W_i \right)}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{d_i^q} \right)}$$

La ecuación anterior es válida cuando el punto P (donde se estima) es diferente a todos los puntos P_i . Si para algún índice i , $P=P_i$, entonces se toma $W_{est}=W_i$. Nótese que d_i^q es la potencia de exponente q de la distancia euclidiana d entre el punto P_i y el punto P. La distancia euclidiana espacial entre dos puntos P_i y P_j se calcula mediante la ecuación:

$$d(P_i;P_j) = \sqrt{\alpha_x(x_i - x_j)^2 + \alpha_y(y_i - y_j)^2 + \alpha_z(z_i - z_j)^2}$$

Para el caso del plano la distancia euclidiana entre dos puntos P_i y P_j se calcula mediante la ecuación:

$$d(P_i;P_j) = \sqrt{\alpha_x(x_i - x_j)^2 + \alpha_y(y_i - y_j)^2}$$

donde α_x , α_y y α_z son factores de anisotropía de las escalas de las dimensiones.

Esta técnica matemática de estimación utilizan directamente los valores muestreados en la estimación y refiere pesos de acuerdo a la distancia euclidiana entre los datos, sin tener en cuenta un análisis de variabilidad en la información disponible.

Es intuitivo suponer que la influencia potencial del valor de una muestra sobre un punto o bloque a estimar decrece cuando este se aleja de dicho punto. El atributo estimado cambiará como función inversa de la distancia. En otras palabras, se asigna mayor peso a los valores de las muestras más próximas y menor peso a las más alejadas del punto de estimación.

Para aplicar el método es necesario en primer lugar escoger el valor del exponente del inverso de la distancia. Por la fórmula queda claro que en la medida que este aumenta disminuye la influencia de los valores de las muestras más

alejadas, en esa misma medida aumenta la de las más próximas. Con el incremento de la potencia, la interpolación de las leyes entre 2 puntos pasa del principio de los cambios graduales al principio de los vecinos más cercanos. Se debe resaltar que difícilmente en la naturaleza la concentración de un elemento químico se subordine a la ley de la línea recta y mucho menos al principio de las zonas de influencia. Un exponente igual a dos produce una interpolación intermedia (solución de compromiso) entre ambos principios. Por esta razón, el método se conoce también como inverso de la distancia al cuadrado. Los exponentes más usados en la práctica son 2, 3 y 1.

Si el exponente es cero el método del inverso de la distancia se reduce a una media aritmética dentro de la vecindad de búsqueda o sea a todas las muestras se le asigna un mismo peso independientemente de la distancia que la separa del punto a estimar.

2.6 Conclusiones

1. Se verificó la confiabilidad en el origen de los datos geoquímicos y topográficos, en cuanto a la perforación, topografía y análisis químicos.
2. La base de datos contiene toda la información necesaria para la aplicación de los métodos KP e IPD.

CAPITULO III: ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

3.1 Introducción

En el presente capítulo se exponen los principales resultados con sus respectivas interpretaciones, obtenidos en el desarrollo del estudio geoestadístico de las variables Ni, Fe y Co en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda. El análisis exploratorio de datos se realizó para cada variable en cada horizonte en cada red de exploración seleccionada y la modelación se realizó con la base del levantamiento topográfico del bloque O48. Las estimaciones se realizaron para cada variable, en cada horizonte por cada tipo de red, mediante los métodos Kriging puntual e Inverso de una potencia de la distancia, lo que permitió realizar la comparación de la efectividad de ambos métodos en la estimación 3D de Ni, Fe y Co en los yacimientos lateríticos cubanos.

3.2 Datos de la exploración

Los valores de los contenidos de los elementos químicos y del levantamiento topográfico utilizados fueron obtenidos de la campaña de perforación realizada por la empresa "Cmtd. Ernesto Che Guevara" en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda, a una red especial de exploración de 8,33 m en cada eje de coordenadas (x;y) con una longitud de muestreo de 1m en la dirección vertical.

La base de datos (BD) de trabajo contiene 25 265 registros, pertenecientes a 1 263 pozos perforados en una red $8,33 \times 8,33$ m. A partir de esta BD se extrajo una red independiente de $16,16 \times 16,16$ m con 4 740 registros pertenecientes a 231 pozos y otra de $33,33 \times 33,33$ m que contiene 1 382 registros pertenecientes a 77 pozos.

Los datos fueron provistos en formato Access y sometidos a un proceso de validación que permitió corregir los errores comunes que ocurren en la confección de las BD y que pudieran distorsionar la estimación. La ubicación geográfica de las perforaciones se hizo corresponder con el levantamiento topográfico, como parte de este proceso.

Entre las funciones de la validación aplicada a la base de datos se tienen las siguientes:

- 1) Búsqueda de contenidos de elementos químicos repetidos
- 2) Coordenadas repetidas en los pozos de exploración
- 3) Desde y/o hasta repetidos en un mismo intervalo de pozo
- 4) Elevaciones erróneas de la cota de los pozos
- 5) Distancia entre pozos erróneas de las red de exploración aplicada
- 6) Contenidos de elementos químicos con valores en cero
- 7) Contenidos de elementos químicos fuera de los rangos permisibles
- 8) Contenidos de elementos químicos con valores negativos
- 9) Discontinuidad en el registro de cada intervalo del pozo de exploración
- 10) Solapamiento de las muestras en los diferentes intervalos

La magnitud de los errores detectados fue despreciable y, en sentido general, los datos presentan la calidad requerida para ser usados en los diferentes estudios geoestadísticos y de estimación de recursos.

El agrupamiento de los registros se realizó en 3 horizontes y 9 tipos de menas, acorde a las “Condiciones para clasificar las menas en un perfil” (Anexo 1), confeccionada por la empresa “Cmtd. Ernesto Che Guevara”, que considera solamente los contenidos de Ni y Fe, como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 1. Clasificación de los datos por horizonte y tipo de mena. Bloque O48 del yacimiento Punta Gorda, modificado por Núñez, 2017.

Horizonte	Tipo de mena	Nomenclatura	Cantidad de registros
de Escombros (29%)	Mena Ferrosa Fuera de Balance	(FF)	101
	Mena Ferrosa de Balance	(FB)	4133
	Mena Laterítica Niquelífera Fuera de Balance	(LF)	3035
de Mena (69%)	Mena Laterítica Niquelífera de Balance	(LB)	13188
	Mena Serpentinítica Niquelífera Friable de Balance	(SB)	3956
	Mena Serpentinítica Dura de Balance	(SD)	254
de la Roca madre (2%)	Mena Serpentinítica Niquelífera de Fuera de Balance	(SF)	295
	Roca Estéril	(RE)	226
	Zona No Definida	(ZND)	77

La información obtenida de esta clasificación permitió determinar que en el bloque predomina el horizonte de mena (69 %), seguido del horizonte de escombros (29 %) y en menor medida el horizonte de la roca madre (2 %). El tipo de mena predominante es la LB (52 %), lo que nos permite afirmar que el bloque es más limonítico que saprolítico (16 %).

El tipo de mena declarado como Zona No Definida (ZND) se introdujo para clasificar los registros con las condiciones de $0.7 \leq Ni < 0.9$ y $Fe < 12$ y fue incluida dentro del horizonte de roca madre por sus bajos contenidos de hierro, este rango no fue definido en la clasificación propuesta por dicha empresa. Esto conllevó a realizar una modificación en la "Identificación gráfica de las menas de la concepción Punta Gorda" (Anexo 2) propuesta por la empresa, como se muestra en la figura 4.

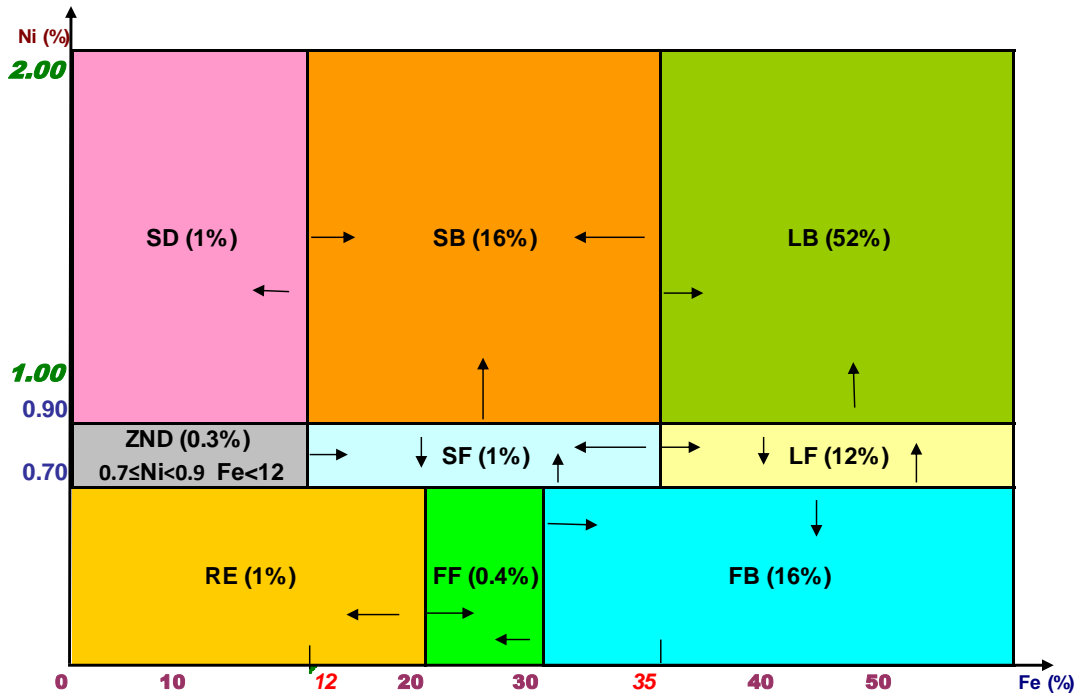


Figura 4. Distribución de las menas en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda, modificado por Núñez, 2017.

3.3 Regularización de la bases de datos

La regularidad en la distribución de las muestras obtenidas en los pozos es un requisito indispensable para la realización de una correcta estimación. Los estudios geoestadísticos se hacen más simples cuando la distribución espacial de los datos es homogénea, pues existe una equidistancia entre pozos y entre las longitudes de las muestras. Lamentablemente, no en todas las campañas de exploración es posible garantizar esta consecutividad en el muestreo, en estos casos se hace necesario hacer una regularización en los datos.

Este proceso consiste en la manipulación de los datos antes de la estimación, las coordenadas de las muestras son desplazadas virtualmente del lugar original donde fueron referidas y se generan nuevos intervalos a partir de promedios de diferentes muestras; esto no es aconsejable debido a que influye directamente en los errores de la estimación.

El análisis realizado de los datos de trabajo, arrojó que todas las muestras fueron tomadas a intervalos de 1 m de longitud cada uno y los pozos fueron perforados a una distancia de 8,33 m uno de otro en cada eje de coordenadas x e y, por tal motivo no fue necesario realizar la regularización de la BD.

El análisis global en la BD de los promedios a intervalos de 3 m muestra que los contenidos de Ni y Fe se muestran variables hasta los intervalos que incluyen los 27 y 30 metros respectivamente, valores desde donde comienza a mostrarse de forma estable. Los contenidos de Co varían hasta el intervalo que incluye los 18 m, a partir de donde se mantiene estable con un promedio aproximado de 0.080 %.

La distribución de estas variables en profundidad indican que el Boque O48 presenta un comportamiento típico de un perfil laterítico *in situ*, dado por la distribución inversa de los contenidos de Ni y Fe, incremento del Ni y disminución del Fe, según muestra la tabla 2.

Tabla 2. Promedio de los contenidos de Ni, Fe y Co a intervalos de 3 m de muestreo.

Longitud (L)	Variable		
	Ni	Fe	Co
L <3	0.63	42.35	0.042
3 ≤ L <6	0.68	43.13	0.044
6 ≤ L <9	0.79	44.29	0.051
9 ≤ L <12	0.89	44.36	0.061
12 ≤ L <15	0.96	43.87	0.069
15 ≤ L <18	1.01	43.09	0.075
18 ≤ L <21	1.05	42.38	0.078
21 ≤ L <24	1.08	41.76	0.079
24 ≤ L <27	1.10	41.28	0.079
27 ≤ L <30	1.11	41.03	0.079
30 ≤ L <33	1.11	40.93	0.078
33 ≤ L <36	1.11	40.88	0.078
36 ≤ L <39	1.11	40.86	0.078
39 ≤ L <42	1.11	40.85	0.078
42 ≤ L ≤ 44	1.11	40.85	0.078

3.4 Análisis exploratorio de los datos

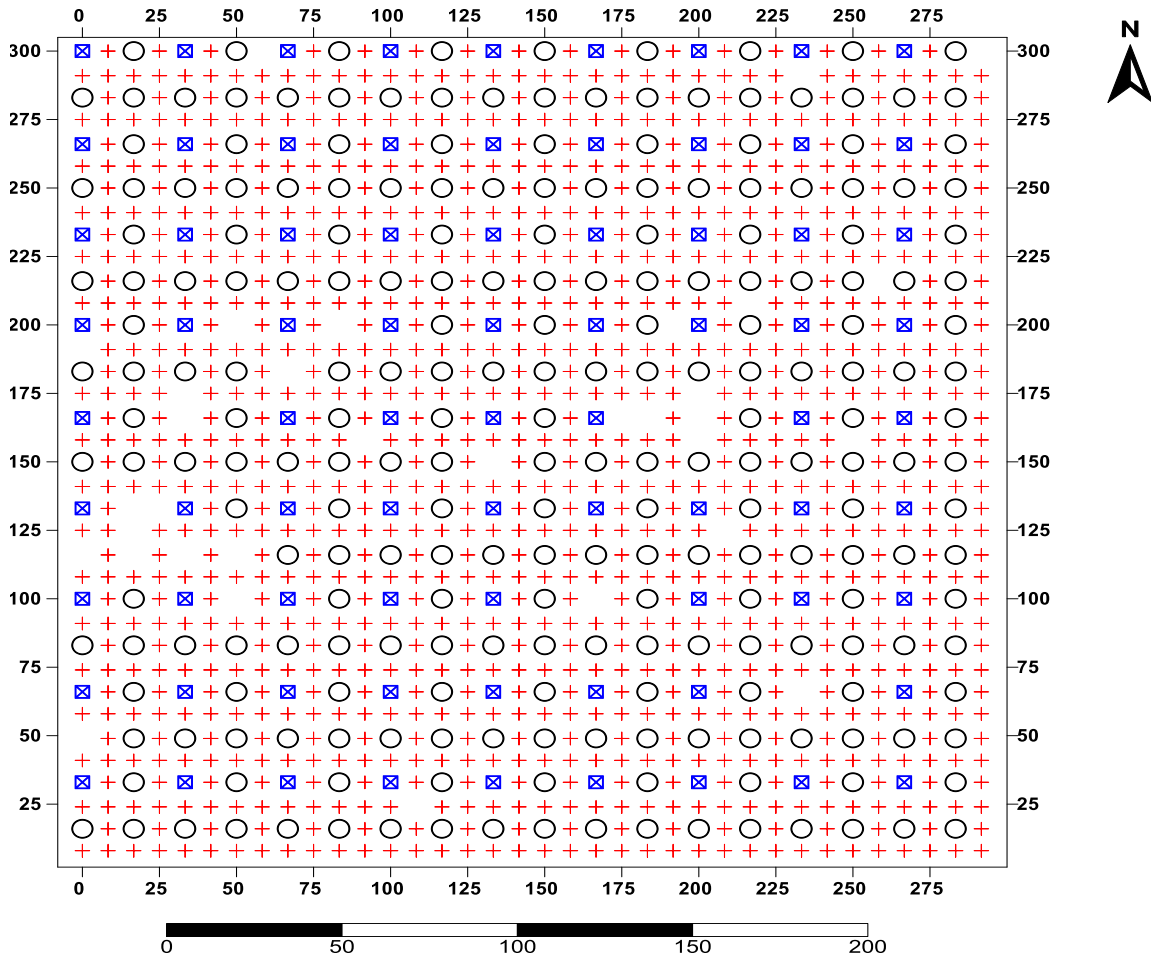
El análisis exploratorio de los datos permitió desplegar los mismos en diferentes formas, caracterizar estadísticamente las diferentes variables estudiadas (Ni, Fe y Co), determinar la distribución que rige el comportamiento de los datos geoquímicos, detectar la presencia de valores extremos o poblaciones mixtas que puedan influir negativamente en el procesamiento geoestadístico, y estudiar la correlación existente en las variables por horizontes.

Estos exámenes se realizaron en los tres horizontes en que se dividieron los datos (Escombro, Mena y Roca Madre) para cada red de perforación ($8,33 \times 8,33$ m, $16,16 \times 16,16$ m y $33,33 \times 33,33$ m). Las desviaciones identificadas sirvieron de base durante el estudio variográfico y el proceso de estimación de los recursos.

3.4.1 Despliegue de los datos

El despliegue de los datos se realiza con el objetivo de visualizar en 2D y 3D los datos de la exploración y verificar la red de perforación y muestro en que fueron tomados.

En este caso, se desplegó el espaciamiento de los pozos en las tres redes de exploración seleccionadas, obsérvese la existencia de pequeñas zonas donde no se realizaron perforaciones, lo cual provoca la inexistencia de datos en esos puntos, donde la estimación se realizara por interpolación del estimador, ver figura 5.



Legenda:

- + Red 8.33x8.33
- Red 16.16x16.16
- ⊠ Red 33.33x33.33

Figura 5. Ubicación geográfica de los pozos del bloque O48 del yacimiento Punta Gorda, según las redes de muestro seleccionadas.

El despliegue de los datos en 3D alerta sobre la ocurrencia de pequeñas intercalaciones de un horizonte en otro, en las figuras 6, 7 y 8 se muestran las distribuciones de cada horizonte en el bloque, nótese que el horizonte de escombros se distribuye desde las cotas superiores (120 m) hasta las inferiores (70 m) donde se localiza la roca madre y viceversa, de igual forma existen 194 pozos que comienzan en el horizonte de mena intercalándose con pozos que presentan escombros.

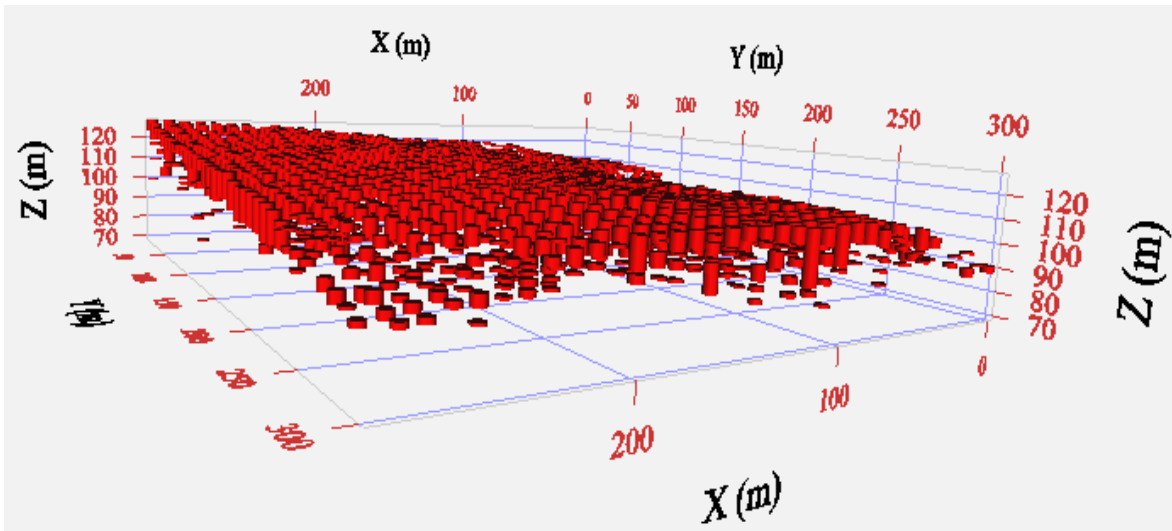


Figura 6. Distribución espacial del horizonte de escombro en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.

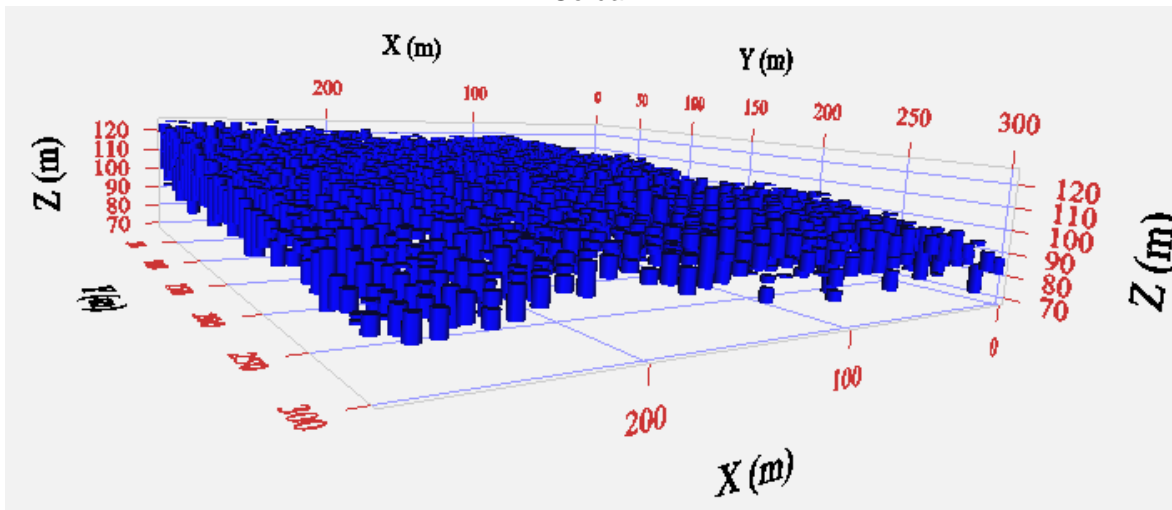


Figura 7. Distribución espacial del horizonte de mena en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.

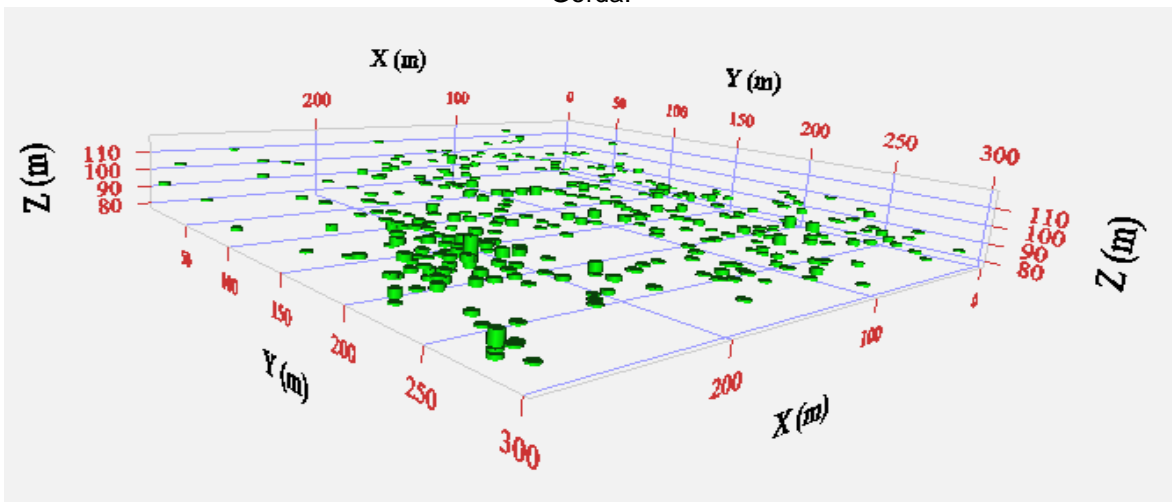


Figura 8. Distribución espacial del horizonte de roca madre en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.

3.4.2 Estadística básica

El análisis estadístico de los contenidos de Ni, Fe y Co obtenidos de las perforaciones de exploración se realizó con el objetivo de evaluar la distribución y estructura espacial de los datos geoquímicos. En el análisis univariado se calcularon los estadígrafos fundamentales de tendencia central, dispersión y forma, además de la construcción de los histogramas para cada variable en cada horizonte por red.

La varianza del Ni (0.18) muestra que existe una distribución normal de esta variable dentro del bloque, en relación a la varianza del Fe (110.14) cuyo alto valor indica una aparente mezcla de poblaciones. Los menores valores de varianza pertenecen a la variable Co lo que indica poca dispersión en su distribución.

Los contenidos de Co presentan los valores más alto del coeficiente de variación (0.714), influenciados por valores extremos que generan una distribución asimétrica irregular (skewness = 2.070), ver tabla 3.

Tabla 3. Estadígrafos globales para los datos de exploración del bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.

Bloque O48	Variable	Mínimo	Máximo	Moda	Media	Mediana	Varianza	Desv. Est.	Coef. Var.	Skewness	Curtosis
	Ni	0.01	3.54	1.00	1.11	1.10	0.18	0.43	0.39	0.34	0.22
	Fe	1.54	59.60	47.00	40.84	45.00	110.14	10.49	0.26	-1.51	1.27
	Co	0.001	0.920	0.029	0.070	0.064	0.003	0.050	0.714	2.070	10.160

El análisis estadístico de las variables en cada horizonte por tipo de red (ver tablas 4 y 5) muestra que en el escombro los contenidos de las tres variables analizadas presentan un mismo comportamiento en todas las redes, en relación a los principales parámetros o medidas de posición.

Las variables Ni y Fe en el horizonte de mena presentan un comportamiento similar para las tres redes, no siendo así para el Co que muestra una tendencia al incremento de su contenido desde la red de 8,33×8,33 m hasta las más espaciadas.

Los contenidos de Ni y Fe en el horizonte de roca madre presenta una ligera variación, los valores más altos se presentan en las redes de $8,33 \times 8,33$ m y $33,33 \times 33,33$ m y los menores en la red de $16,16 \times 16,16$ m. Los contenidos promedios de Co más altos fueron reportados en la red de $33,33 \times 33,33$ m.

El análisis de los valores de las variables por horizontes en las diferentes redes de exploración muestra que los promedios de Ni, Fe y Co no presentan una variación significativa de una red a otra.

El hecho de que los valores del coeficiente de variación estén ubicados por debajo de 1, a excepción del Co en el horizonte de roca madre de las redes de $8,33 \times 8,33$ m y $16,16 \times 16,16$ m que presentan 1.000 y 1.300 respectivamente, justifica la utilización de técnicas de Geoestadística Lineal en el tratamiento de los datos, pues según Cuador (2004), se producen mejores resultados cuando esto ocurre.

Tabla 4. Medidas de posición por horizontes en cada tipo de red seleccionada del bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.

Red (m)	Horizonte	Variable	Mínimo	Máximo	Moda	Media	Mediana
8.33 x 8.33	Horizonte de escombros	Ni	0.01	0.89	0.84	0.62	0.65
		Fe	20.02	59.00	46.00	44.12	44.80
		Co	0.001	0.600	0.029	0.040	0.030
	Horizonte de Mena	Ni	0.90	3.54	1.00	1.32	1.27
		Fe	1.54	59.60	48.00	40.30	45.40
		Co	0.001	0.920	0.050	0.080	0.080
	Horizonte de Roca Madre	Ni	0.06	0.89	0.80	0.69	0.75
		Fe	4.00	34.90	11.00	16.53	14.70
		Co	0.002	0.270	0.025	0.030	0.030
16.16 x 16.16	Horizonte de escombros	Ni	0.12	0.89	0.83	0.62	0.65
		Fe	20.80	58.90	47.00	44.28	45.00
		Co	0.005	0.500	0.029	0.048	0.030
	Horizonte de Mena	Ni	0.90	3.54	1.10	1.36	1.30
		Fe	5.10	57.20	49.20	39.76	46.30
		Co	0.001	0.740	0.034	0.098	0.090
	Horizonte de Roca Madre	Ni	0.17	0.89	0.80	0.64	0.73
		Fe	5.00	34.50	5.60	12.75	10.03
		Co	0.002	0.270	0.017	0.030	0.020
33.33 x 33.33	Horizonte de escombros	Ni	0.11	0.89	0.84	0.61	0.64
		Fe	20.50	54.20	46.60	43.92	44.60
		Co	0.009	0.290	0.031	0.051	0.040
	Horizonte de Mena	Ni	0.90	2.77	1.00	1.32	1.25
		Fe	8.80	54.90	48.60	40.97	46.10
		Co	0.010	0.920	0.033	0.108	0.090
	Horizonte de Roca Madre	Ni	0.50	0.89	0.89	0.72	0.73
		Fe	8.20	32.00	12.00	17.03	13.50
		Co	0.020	0.110	0.049	0.044	0.030

Tabla 5. Medidas de dispersión por horizontes en cada tipo de red del bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.

Red (m)	Horizonte	Variable	Varianza	Desv. Est.	Coef. Var.
8.33 x 8.33	Horizonte de escombros	Ni	0.03	0.18	0.29
		Fe	19.67	4.43	0.10
		Co	0.001	0.03	0.750
	Horizonte de Mena	Ni	0.10	0.32	0.24
		Fe	124.58	11.16	0.28
		Co	0.003	0.060	0.750
	Horizonte de Roca Madre	Ni	0.02	0.17	0.25
		Fe	59.47	7.70	0.47
		Co	0.001	0.030	1.000
16.16 x 16.16	Horizonte de escombros	Ni	0.03	0.19	0.31
		Fe	21.66	4.65	0.11
		Co	0.001	0.044	0.917
	Horizonte de Mena	Ni	0.12	0.36	0.26
		Fe	167.21	12.93	0.33
		Co	0.004	0.070	0.714
	Horizonte de Roca Madre	Ni	0.04	0.20	0.31
		Fe	55.87	7.45	0.58
		Co	0.001	0.039	1.300
33.33 x 33.33	Horizonte de escombros	Ni	0.03	0.19	0.31
		Fe	20.42	4.51	0.10
		Co	0.001	0.042	0.824
	Horizonte de Mena	Ni	0.11	0.34	0.26
		Fe	126.74	11.25	0.27
		Co	0.005	0.075	0.694
	Horizonte de Roca Madre	Ni	0.01	0.13	0.18
		Fe	60.37	7.57	0.44
		Co	0.001	0.026	0.591

3.4.3 Análisis de valores extremos en la distribución de las variables

El agrupamiento de los valores de las variables acorde a los horizontes Escombros, Mena y Roca madre, permitió la creación de tres poblaciones representativas de los principales horizontes de la corteza.

En la tabla 6, los valores del skewness indican una asimetría de los datos con respecto a la media, haciendo las distribuciones unilaterales a la derecha para valores negativos y unilaterales a la izquierda para valores positivos.

La curtosis por su parte revela distribuciones de frecuencia en su mayoría leptocúrticas (curtosis > 0), con colas relativamente anchas o agudas, lo que refleja una distribución más apuntada que la normal.

Tabla 6. Medidas de forma por horizontes en cada tipo de red. Bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.

Horizonte	Variable	Red (m)					
		8.33 x 8.33		16.16 x 16.16		33.33 x 33.33	
		Skewness	Curtosis	Skewness	Curtosis	Skewness	Curtosis
de Escombros	Ni	-0.49	-0.73	-0.49	-0.75	-0.48	-0.75
	Fe	-1.44	4.50	-1.07	2.49	-1.22	3.65
	Co	3.60	27.73	3.87	26.58	2.36	7.19
de Mena	Ni	1.11	1.62	1.09	1.44	1.07	0.79
	Fe	-1.26	0.33	-1.16	-0.15	-1.29	0.31
	Co	1.91	9.61	1.35	4.06	2.17	14.41
de Roca Madre	Ni	-1.13	0.69	-0.80	-0.60	-0.33	-1.23
	Fe	0.75	-0.31	1.33	0.96	0.85	-0.88
	Co	2.51	9.68	3.42	14.37	0.80	-0.37

Las figuras 9,10 y 11, muestra la distribución espacial de los contenidos de Ni, Fe y Co, en los tres horizontes de clasificación. La escala de colores muestra la variabilidad tanto en profundidad como horizontalmente.

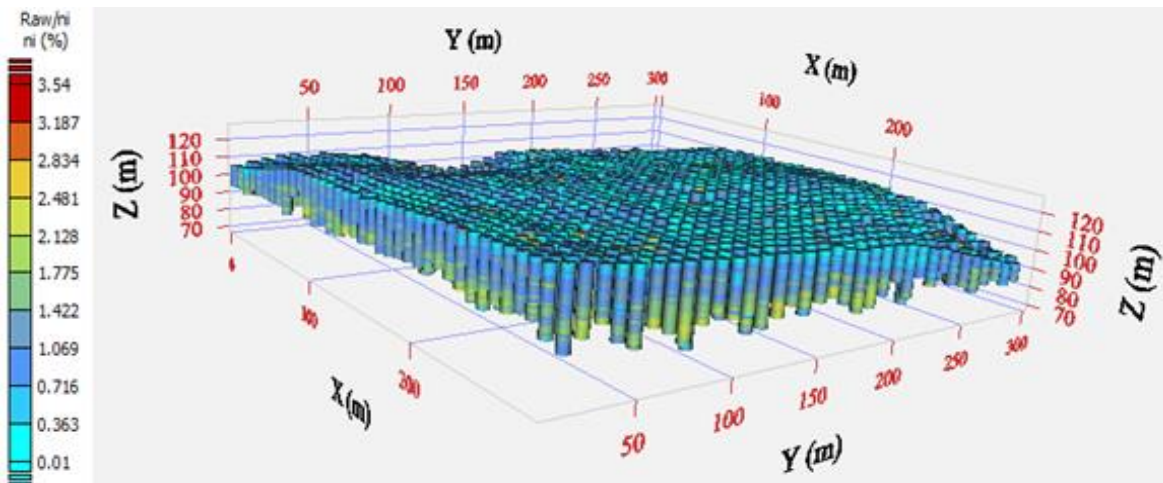


Figura 9. Distribución espacial de los contenidos de Ni en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.

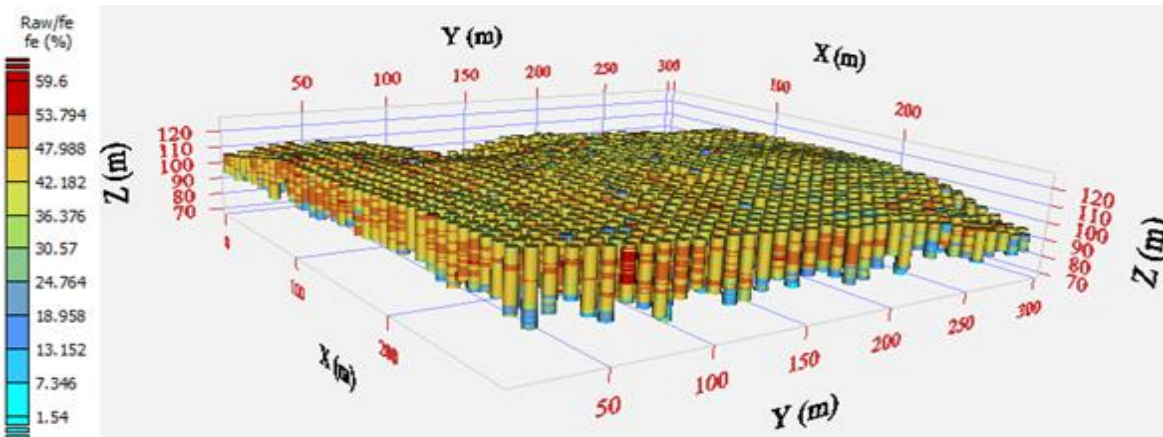


Figura 10. Distribución espacial de los contenidos de Fe en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.

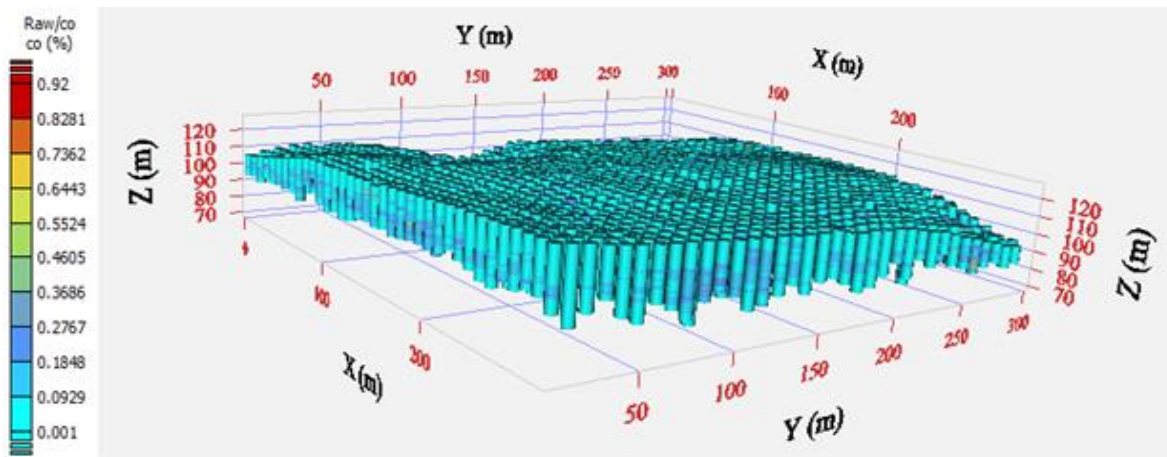


Figura 11. Distribución espacial de los contenidos de Co en el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.

El reflejo de estos parámetros de forma se puede apreciar en los histogramas de frecuencia de cada variable por horizonte y red (ver tabla 7), los cuales muestran la existencia de poblaciones extremas dentro de cada horizonte, indicando que ninguna de las variables en estudio tiene una tendencia a la distribución normal.

Los valores extremos dentro de cada horizonte fueron incluidos dentro del proceso de estimación, dado que los modelos contemplaron el universo de la población con el objetivo de considerar la influencia de estos valores en la estimación. El efecto de la exclusión de los valores extremos durante estimación debe ser evaluado como parte de próximos ejercicios de validación.

Tabla 7. Histogramas de frecuencia de las variables por horizonte en cada tipo de red. Bloque O48, yacimiento Punta Gorda.

Horizonte	Variable	Red 8.33 x 8.33 m	Red 16.16 x 16.16 m	Red 33.33 x 33.33 m
Horizonte de escombros	Ni			
	Fe			
	Co			
Horizonte de Mena	Ni			
	Fe			
	Co			
Horizonte de Roca Madre	Ni			
	Fe			
	Co			

3.4.4 Estudio de correlación

El estudio de correlación entre las variables se realizó con el objetivo de verificar la existencia de un comportamiento similar entre dos de ellas en un mismo horizonte. La mayoría de los valores del coeficiente de correlación están cercanos a cero, revelando que las variables son independientes y no proporcionales entre sí, como se muestra en el gráfico de la figura 12.

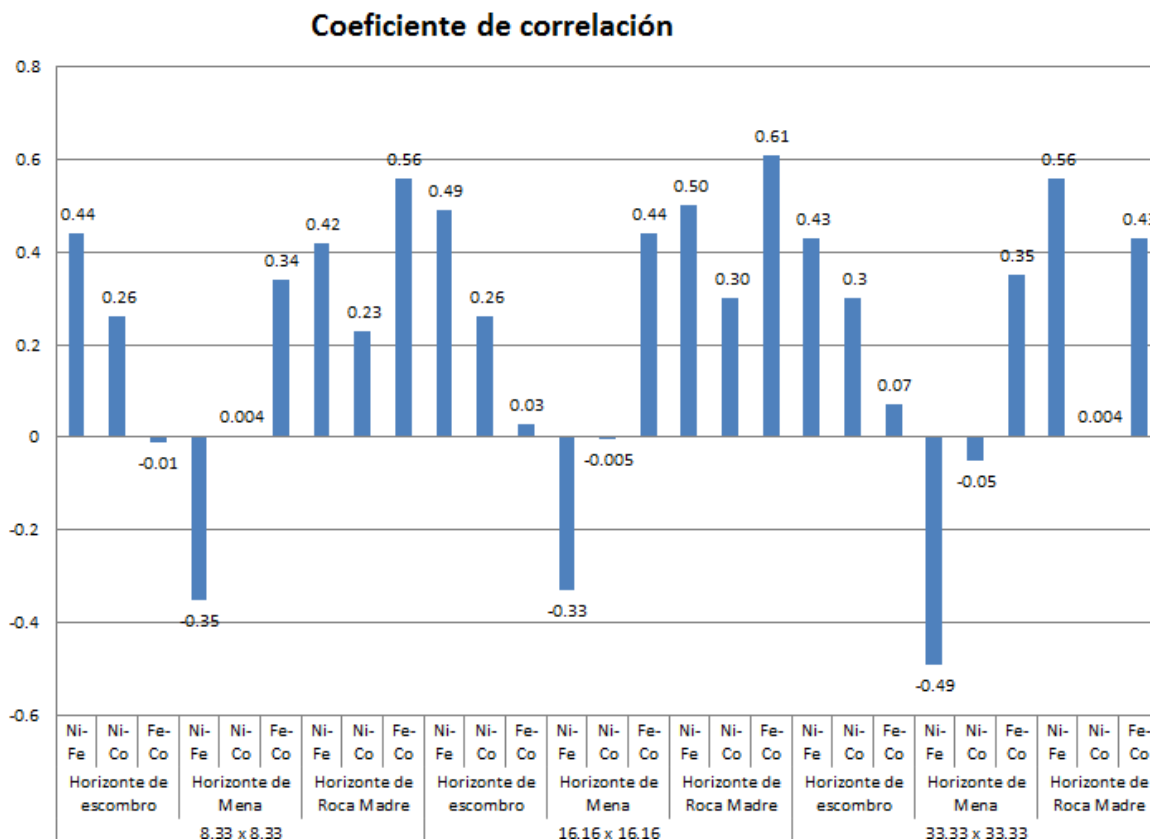


Figura 12. Comportamiento del coeficiente de correlación de las variables por horizonte y red. Bloque O48 del yacimiento Punta Gorda.

3.5 Análisis variográfico

El comportamiento espacial de las variables fue estudiado con el objetivo de definir la mayor y menor dirección de continuidad de las mismas en cada horizonte por tipo de red, para ello se realizaron los variogramas experimentales en las direcciones horizontal y vertical; en los casos donde la cantidad de muestras era

insuficiente y el comportamiento de los elementos era muy variables, se utilizó el variograma omnidireccional.

En la tabla 8, se agrupan los parámetros utilizados en la confección de los variogramas experimentales, en la dirección vertical se usaron los mismos parámetros para toda la variografía.

Tabla 8. Parámetros utilizados en la confección de los variogramas horizontales y verticales.

Variograma				
Parámetro	Horizontal			Vertical
	Red 8.33 x 8.33	Red 16.16 x 16.16	Red 33.33 x 33.33	Tres redes
Number of lags	10	10	10	10
Lag separation	8	16	33	1
Lag tolerance	4	8	16.5	0.5
Azimuth	0°, 45°, 90°, 135°	0°, 45°, 90°, 135°	0°, 45°, 90°, 135°	0°
Dip	0	0	0	90°
Tolerance	22.5	22.5	22.5	45
Bandwidth	50	50	50	50

El análisis de los variogramas direccionales arrojó que de los 27 variogramas horizontales realizados, solo 3 presentan anisotropía del tipo geométrica (cambio en el alcance) y el resto mantiene un comportamiento isotrópico. Las anisotropías corresponden a las variables: Co en el horizonte de mena de la red $8,33 \times 8,33$ m con un alcance de 80 m en la dirección norte, Fe en el horizonte de escombros de la red de $16,16 \times 16,16$ m con un alcance de 80 m hacia el este y Co en el horizonte de escombros de la red de $33,33 \times 33,33$ m con un alcance de 90 m hacia el este, siendo las direcciones de mayor continuidad referidas las que fueron utilizadas en la estimación.

En cuanto a los variogramas verticales, estos muestran anisotropía de tipo geométrica en todos los casos. El efecto pepita está presente también en todos, lo cual puede deberse a errores en el muestreo o en la realización de los análisis químicos, principalmente.

El ajuste de los variogramas experimentales en ambas direcciones permitió determinar los modelos matemáticos a ser utilizados durante el proceso de estimación de las variables en el modelo de bloques, este ajuste (ver anexos 3,4 y 5), arrojó los resultados expuestos en la tabla 9.

Tabla 9. Ecuaciones de los variogramas modelos empleados en la estimación.

Variograma modelo			
Red	Horizonte	Variable	Fórmula
8.33 x 8.33	Horizonte de escombro	Ni	$0.002 + 0.019 \text{ Exp } (8,8,6) + 0.014 \text{ Exp } (67,67,8)$
		Fe	$3 + 10 \text{ Sph } (11,11,4) + 6.55 \text{ Sph } (80,80,13)$
		Co	$0.0003 + 0.00055 \text{ Exp } (9,9,7) + 0.00055 \text{ Exp } (69,69,8)$
	Horizonte de Mena	Ni	$0.013 + 0.059 \text{ Sph } (10,10,8) + 0.029 \text{ Exp } (72,72,13)$
		Fe	$5 + 72 \text{ Sph } (10,10,9) + 45 \text{ Exp } (91,91,14)$
		Co	$0.006 + 0.0022 \text{ Sph } (9,7,5) + 0.0007 \text{ Sph } (40,30,12)$
	Horizonte de Roca Madre	Ni	$0.007 + 0.016 \text{ Sph } (7,7,4) + 0.0067 \text{ Sph } (24,24,6)$
		Fe	$10 + 41 \text{ Gaus } (7,7,6) + 8 \text{ Sph } (20,20,9)$
		Co	$0.00034 + 0.0007 \text{ Gaus } (12,12,12) + 0.00027 \text{ Sph } (28,28,14)$
16.16 x 16.16	Horizonte de escombro	Ni	$0.005 + 0.0175 \text{ Sph } (20,20,4) + 0.0124 \text{ Exp } (61,61,9)$
		Fe	$4 + 12 \text{ Sph } (25,25,4) + 5.2 \text{ Exp } (118,50,6)$
		Co	$0.0006 + 0.001 \text{ Exp } (24,24,5) + 0.00039 \text{ Sph } (113,113,16)$
	Horizonte de Mena	Ni	$0.02 + 0.06 \text{ Sph } (15,15,6) + 0.046 \text{ Exp } (40,40,15)$
		Fe	$5 + 100 \text{ Exp } (12,12,12) + 62 \text{ Sph } (82,82,19)$
		Co	$0.0008 + 0.001 \text{ Sph } (8,8,4) + 0.0031 \text{ Exp } (35,35,10)$
	Horizonte de Roca Madre	Ni	$0.005 + 0.03 \text{ Sph } (25,25,3) + 0.007 \text{ Exp } (80,80,7)$
		Fe	$5 + 31 \text{ Sph } (22,22,11) + 19 \text{ Sph } (144,144,13)$
		Co	No variograma (caótico)
33.33 x 33.33	Horizonte de escombro	Ni	$0.003 + 0.011 \text{ Sph } (18,18,3) + 0.022 \text{ Sph } (42,42,5)$
		Fe	$2 + 12 \text{ Gaus } (30,30,3) + 6.5 \text{ Sph } (40,40,4)$
		Co	$0.00043 + 0.00076 \text{ Sph } (36,36,15) + 0.0006 \text{ Sph } (125,75,16)$
	Horizonte de Mena	Ni	$0.02 + 0.04 \text{ Sph } (16,16,5) + 0.0515 \text{ Sph } (36,36,9)$
		Fe	$7 + 41 \text{ Sph } (19,19,8) + 75.5 \text{ Sph } (35,35,9)$
		Co	$0.001 + 0.002 \text{ Sph } (36,36,3) + 0.003 \text{ Sph } (47,47,7)$
	Horizonte de Roca Madre	Ni	No variograma (pocas muestras)
		Fe	No variograma (pocas muestras)
		Co	No variograma (pocas muestras)

La estructura general de los variogramas modelos está representada por el efecto pepita y una o dos estructuras esféricas, gaussianas o exponenciales con sus respectivos alcances en cada tipo de horizonte. En algunas variables del horizonte de roca madre no se construyeron variogramas por la baja representatividad de las muestras, mostrándose de forma errática, sin posibilidades de obtener modelos ajustados para la estimación.

3.6 Modelo de bloques 3D

El modelo de bloques (MDB) en 3D realizado acorde a las características geométricas del Bloque O48 fue de $8 \times 8 \times 3$ m. En su confección se utilizó la red de perforación $8,33 \times 8,33$ m como referencia para la realización de todas las estimaciones, garantizando la comparación de la efectividad de los métodos KP e IPD sobre una misma definición de tipo de horizonte en cada USM (Unidad de Selectividad Minera).

La definición del tipo de horizonte (E, M y RM) a que pertenece cada bloque de $8 \times 8 \times 3$ m dentro del MDB se realizó mediante el establecimiento de dominios definidos a partir de datos de estimaciones de probabilidad, realizadas mediante la técnica de Kriging de Indicatrices utilizando los 25 265 registros tabulados en esta red, de los cuales 7 269 pertenecen al horizonte de escombros (0.29 de probabilidad de ocurrencia), 17 398 pertenecen al horizonte de roca madre (0.69 de probabilidad de ocurrencia) y 598 pertenecen al horizonte de roca madre (0.02 de probabilidad de ocurrencia).

Los variogramas experimentales utilizados en el ajuste (ver anexo 4) de los modelos matemáticos utilizados en esta estimación fueron confeccionados siguiendo los mismos parámetros expuestos en la tabla 8 para la red de $8,33 \times 8,33$ m. Los variogramas modelos fueron ajustados según las ecuaciones siguientes:

1. Horizonte de escombros: $0.04 + 0.007 \text{ Sph}(11,11,8) + 0.088 \text{ Exp}(83,83,14)$
2. Horizonte de mena: $0.04 + 0.007 \text{ Sph}(8,8,6) + 0.1 \text{ Exp}(80,80,17)$
3. Horizonte de roca madre: $0.009 + 0.008 \text{ Exp}(11,11,8) + 0.1 \text{ Sph}(91,64,20)$

En la tabla 10, se muestran los datos de estimación de la probabilidad de ocurrencia de los horizontes, nótese que no hay variación significativa entre los valores estimados y los obtenidos de las descripciones de los pozos de exploración.

Tabla 10. Modelo de probabilidad para cada horizonte. bloque O48, yacimiento Punta Gorda.

Validación del modelo de probabilidad		
Horizonte	Probabilidad de los datos reales	Probabilidad estimada
1 (Escombros)	0.29	0.29
2 (Mena)	0.69	0.68
3 (Roca Madre)	0.02	0.03

La definición de los horizontes dentro del MDB permitió definir la ubicación de las intercalaciones de un horizonte en otro dentro del bloque, figura 13.

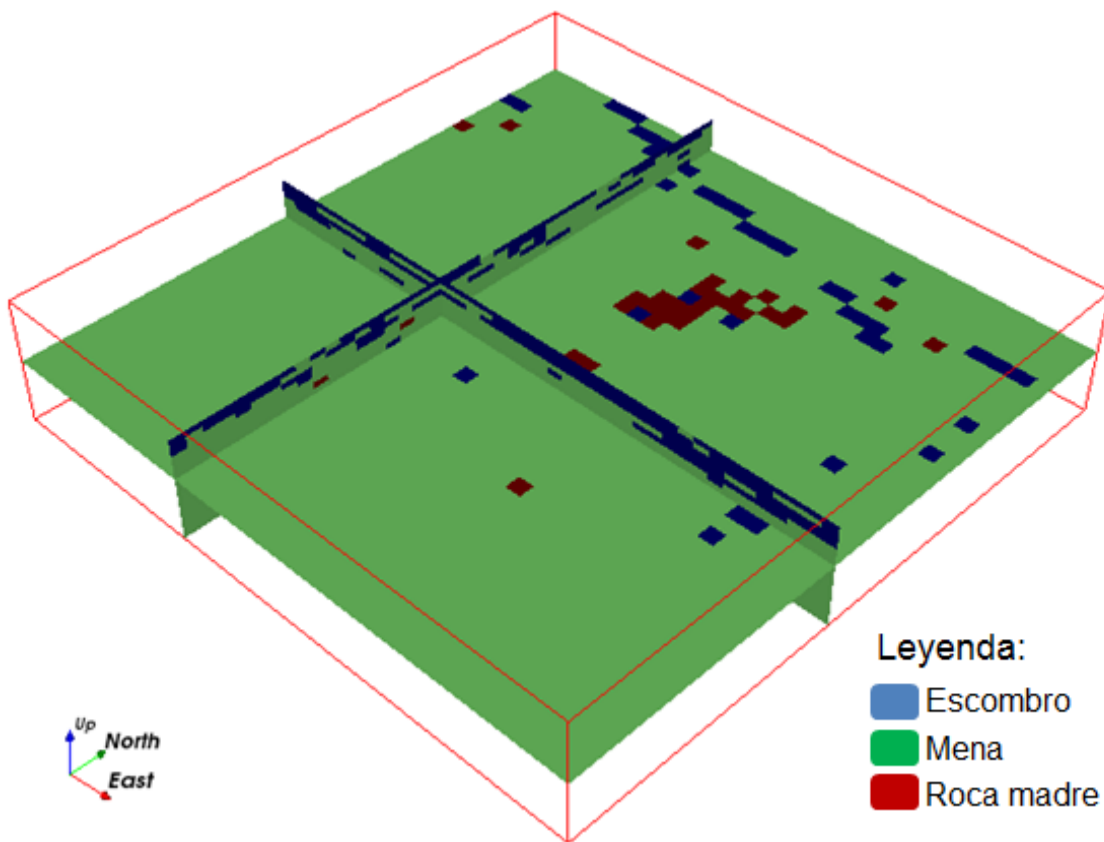


Figura 13. Modelo de bloques en 3D utilizado en la estimación.

3.7 Estimación de las variables Ni, Fe y Co

La estimación de recursos se realizó con el objetivo de comparar la efectividad de los métodos KP e IPD, evaluando el grado de correlación de la estimación de ambos métodos, al estimar en 3D valores puntuales Ni, Fe y Co en el bloque O48.

En las variables que presentaron una dirección preferencial de continuidad se utilizaron elipsoides de búsqueda anisótropo con alcance variables y en los casos donde los variogramas se comportaron de forma caótica, se utilizaron elipsoides de búsqueda isotrópicos con alcance proporcional en x y en y. La cantidad de muestras utilizadas se estandarizó para todos los elipsoides con mínimo de 1 y máximo de 12, ver tabla 11.

Tabla 11. Parámetros de los elipsoides de búsqueda utilizados en la estimación.

Red	Horizonte	Variable	Alcance			Angulos			Cantidad de muestras	
			X	Y	Z	X	Y	Z	Min	Max
8.33 x 8.33	Horizonte de escombros	Ni	50	50	5	0	0	0	1	12
		Fe	50	50	5	0	0	0	1	12
		Co	50	50	5	0	0	0	1	12
	Horizonte de Mena	Ni	80	80	5	0	0	0	1	12
		Fe	80	80	5	0	0	0	1	12
		Co	80	60	5	0	0	0	1	12
	Horizonte de Roca Madre	Ni	20	20	5	0	0	0	1	12
		Fe	20	20	5	0	0	0	1	12
		Co	20	20	5	0	0	0	1	12
16.16 x 16.16	Horizonte de escombros	Ni	50	50	5	0	0	0	1	12
		Fe	80	40	5	90	0	0	1	12
		Co	50	50	5	0	0	0	1	12
	Horizonte de Mena	Ni	60	60	5	0	0	0	1	12
		Fe	60	60	5	0	0	0	1	12
		Co	60	60	5	0	0	0	1	12
	Horizonte de Roca Madre	Ni	50	50	10	0	0	0	1	12
		Fe	50	50	10	0	0	0	1	12
		Co	50	50	10	0	0	0	1	12
33.33 x 33.33	Horizonte de escombros	Ni	70	70	5	0	0	0	1	12
		Fe	70	70	5	90	0	0	1	12
		Co	90	60	5	90	0	0	1	12
	Horizonte de Mena	Ni	50	50	8	0	0	0	1	12
		Fe	50	50	8	0	0	0	1	12
		Co	50	50	8	0	0	0	1	12
	Horizonte de Roca Madre	Ni	80	80	10	0	0	0	1	12
		Fe	80	80	10	0	0	0	1	12
		Co	80	80	10	0	0	0	1	12

Los gráficos de correlación entre los valores estimados de Ni, Fe y Co por KP e IPD, muestran un coeficiente cercano a uno en casi todos los casos (ver figura 14), lo que indica que ambos métodos tienen una efectividad estadística similar en la estimación puntual de Ni, Fe y Co.

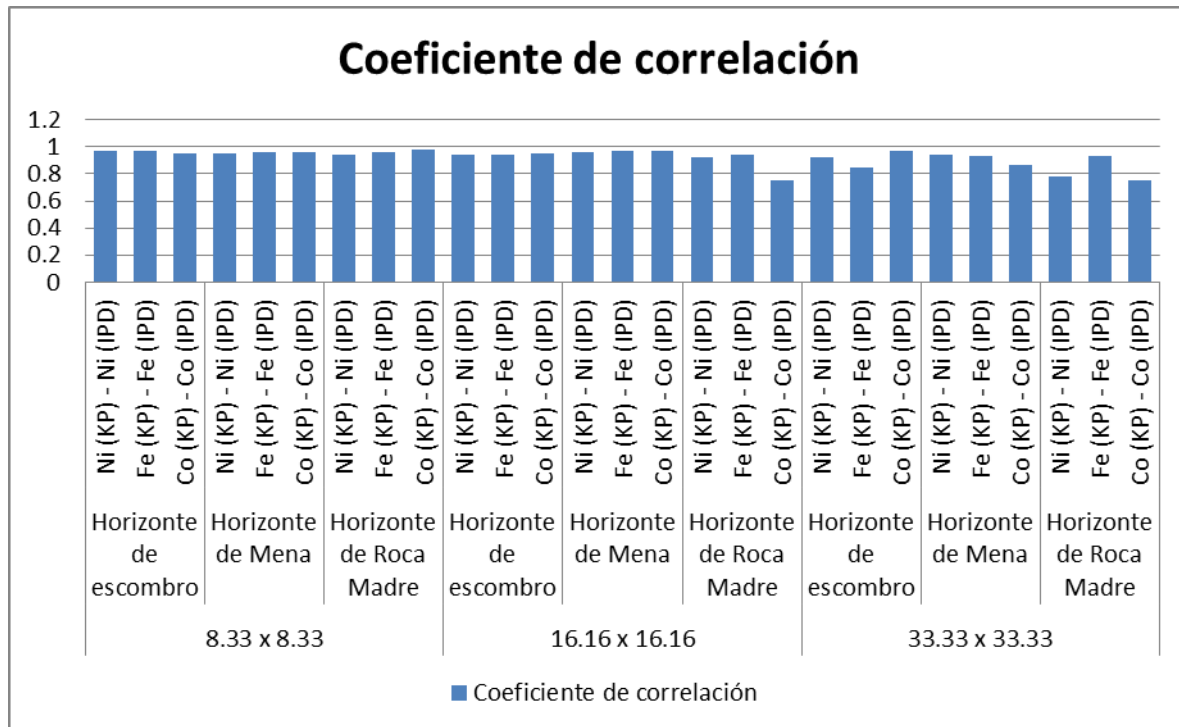


Figura 14. Comportamiento del coeficiente de correlación entre los valores estimados de Ni, Fe y Co por los métodos KP e IPD.

Esta afirmación se puede corroborar comparando los valores estimados por ambos métodos sobre un mismo modelo geológico, agrupados en la tabla 12, nótese que no existen variaciones significativas.

Tabla 12. Valores promedio de Ni, Fe y Co estimados por horizonte y tipo de red mediante los métodos KP e IPD.

Horizonte	Variable (%)	Red (m)					
		8.33 x 8.33		16.16 x 16.16		33.33 x 33.33	
		KP	IPD	KP	IPD	KP	IPD
Horizonte de escombros	Ni	0.58	0.59	0.59	0.60	0.60	0.60
	Fe	43.70	43.82	44.10	44.34	43.80	43.97
	Co	0.040	0.040	0.044	0.044	0.049	0.049
Horizonte de Mena	Ni	1.34	1.34	1.38	1.39	1.39	1.40
	Fe	34.76	35.13	33.04	33.35	36.62	37.56
	Co	0.079	0.080	0.083	0.084	0.099	0.103
Horizonte de Roca Madre	Ni	0.67	0.66	0.60	0.59	0.69	0.65
	Fe	15.44	15.30	12.09	11.68	14.83	14.96
	Co	0.035	0.034	0.038	0.040	0.038	0.040

3.7.1 Análisis de error

La evaluación del error en la estimación para el caso del KP se realizó incluyendo en la estimación el reporte de la varianza del kriging, la cual permite orientarnos acerca del error cometido en cada punto estimado, dichos valores aparecen agrupados en la tabla 13. Nótese que, de manera general, a medida que la red de datos se hace menos densa los valores de la varianza se hacen mayores.

Tabla 13. Valores de la varianza del KP en las estimaciones de Ni, Fe y Co por horizonte y tipo de red.

Varianza Kriging puntual				
Horizonte	Variable	Red (m)		
		8.33 x 8.33	16.16 x 16.16	33.33 x 33.33
Horizonte de escombros	Ni	0.02	0.03	0.03
	Fe	11.17	16.32	18.15
	Co	0.001	0.002	0.001
Horizonte de Mena	Ni	0.09	0.13	0.13
	Fe	103.04	152.09	137.93
	Co	0.004	0.005	0.006
Horizonte de Roca Madre	Ni	0.02	0.04	0.01
	Fe	45.23	42.88	0.01
	Co	0.001	0.014	0.014

En el caso del IPD una de sus limitantes, es que no muestra una variable que permita evaluar el error de la estimación.

3.8 Conclusiones

1. La distribución de las variables Ni y Fe en profundidad indican que el bloque O48 presenta un comportamiento típico de un perfil laterítico *in situ*, dado por la distribución inversa de sus contenidos, incremento del Ni y disminución del Fe.
2. El análisis de los contenidos por horizontes en las diferentes redes de exploración mostró que los valores promedios de las variables Ni, Fe y Co no presentan una variación significativa de una red a otra.
3. Los resultados de las estimaciones por ambos métodos son semejantes para todas las variables en cada horizonte.
4. Los valores de la varianza de estimación son semejantes para una red densa, a medida que la red de datos se hace menos densa el comportamiento comienza a variar, a excepción de Fe en la red de 33.33×33.33 m.
5. La efectividad global en la estimación puntual de Ni, Fe y Co de los métodos KP e IPD es semejante.

CONCLUSIONES

1. Se sistematizó en el conocimiento de los métodos Kriging Puntual e Inverso de una Potencia de la Distancia y su efectividad en la estimación puntual de Ni, Fe y Co en yacimientos lateríticos
2. La distribución de las variables Ni y Fe en profundidad indican que el Bloque O48 presenta un comportamiento típico de un perfil laterítico *in situ*, dado por la distribución inversa de sus contenidos, incremento del Ni y disminución del Fe.
3. El modelo probabilístico en 3D permitió establecer dominios geológicos por tipo de horizonte: escombros, mena y roca madre; logrando definir la distribución espacial de los mismos
4. Los modelos geoquímicos de Ni, Fe y Co no muestran variación significativa de una red a otra, a excepción del Co que muestra una variación brusca en la red de $33,33 \times 33,33$ m.
5. Los valores de la varianza de estimación son semejantes para una red densa, a medida que la red de datos se hace menos densa el comportamiento comienza a variar, a excepción de Fe en la red de $33,33 \times 33,33$ m.
6. Los métodos Kriging Puntual e Inverso de una Potencia de la Distancia tienen efectividad estadística semejante en la estimación puntual 3D de Ni, Fe y Co.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar los resultados de la estimación de las variables excluyendo los valores extremos.
2. Aplicar la técnica de validación cruzada en la evaluación de la efectividad de los métodos.
3. Establecer la comparación entre los valores promedio de la exploración geológica y los valores estimados para verificar la fidelidad de los métodos.
4. Evaluar la efectividad de otros métodos de estimación de Ni, Fe y Co en yacimientos lateríticos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera Fernández, I., Batista Legrá, Y., Bastola, S., Rojas Purón, L., 2016: Impacto visual generado por la explotación minera en el yacimiento Punta Gorda. *Minería y Geología*, Vol. 32 No. 4, p. 141-159, Moa, Holguín, Cuba.
- Agyei, G. Rojas Purón, A. Hernández Flores, A., 2010: Distribución fraccional de metales y minerales de la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología*, Vol. 26 No.4, p. 36-52, Moa, Holguín, Cuba.
- Almaguer Carmenates, Y., 2005: Evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias geológicas. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
- Arias del Toro, J. A., 2008: Influencias de la red de exploración en la determinación del potencial recuperable de menas lateríticas niquelíferas en un sector del yacimiento Pinares Oeste. Tesis presentada en opción al título académico de máster en Geología. Departamento de Geología, Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saiz Montes de Oca", Pinar del Río, Cuba.
- Bergues, P., Wilson, J. C., Rodríguez, A., Hardis, L., Rodríguez, R., Ortíz, M., 1987: Informe de la exploración orientativa y detallada en los yacimientos ferroniquelíferos y ferrocobálticos de la región Moa en los sectores Punta Gorda, Moa Oriental y Yagrumaje Oeste durante los años 1981-1985. Con cálculos de reservas al 1/10/87. Empresa de Geología Santiago. Fondo Geológico Nacional, ONRM, Moa, Holguín, Cuba.
- Chica Olmo, M., 1987: Análisis geoestadístico en el estudio de la explotación de los recursos minerales. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias. Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Granada, España.

- Cuador Gil, J. Q., 2002: Estudio de estimación y simulación geoestadística para la caracterización de parámetros geólogo-industriales en el yacimiento laterítico Punta Gorda. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Departamento de Geología, Universidad de Pinar del Río “Hermandos Saiz Montes de Oca”, Pinar del Río, Cuba.
- Cuador Gil, J. Q., 2004: Elementos de Geoestadística. Departamento de Informática, Universidad de Pinar del Río “Hermandos Saiz Montes de Oca”, Pinar del Río, Cuba.
- Cuenca Reyes, L., 2009: Presencia de óxidos de magnesio en el perfil laterítico del yacimiento Punta Gorda, Moa-Holguín. Tesis de diploma presentada en opción al título de ingeniero geólogo. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
- David, M., 1977: Geostatistical ore reserve estimation. Amsterdam Oxford New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- De Dios Leyva, D., 2000: Particularidades de la distribución espacial de las intercalaciones no industriales presentes en el sector central del yacimiento Punta Gorda. Tesis presentada en opción al título académico de master en Geología. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
- De Miguel Fernández, C., 1998: Informe hidrogeológico para la argumentación del Proyecto Ejecutivo de Drenaje en el yacimiento Punta Gorda de la industria Ernesto Che Guevara. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
- De Miguel Fernández, C., 2004: Informe hidrogeológico conclusivo sobre: Investigación ingeniero-geológica e hidrogeológica de la Base Minera Punta Gorda. Archivos de la Subdirección de Minas, Empresa Ernesto Che Guevara, Moa. Holguín, Cuba.

- Elias, M., 2002: Nickel laterite deposits-geological overview, resources and exploitation, in Giant Ore Deposits: characteristics, genesis and exploration. Centre for Ore Deposit Research, Special Publication 4. University of Tasmania, Tasmania.
- Fernández Martínez, L., 2017: Entrevista personal. Ingeniero Jefe del proyecto de perforación de la red densa del yacimiento Punta Gorda. Moa, Holguín, Cuba.
- Golightly, J. P., 1979: Nickeliferous laterites: a general description. International Laterite Symposium, New Orleans, Louisiana, February 19 to 21, Published by Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineering, Inc., Session 1, p. 3-23.
- Guardado Lacaba, R., Almaguer Carmenates, Y., 2001: Evaluación de riesgos por deslizamiento en el yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín. Minería y Geología, Vol. 28 No.1, p. 1-12, Moa, Holguín, Cuba.
- Iturralde Vinent, M. A., 1998, Sinopsis de la constitución geológica de Cuba. Acta geológica hispana, Vol. 33 No. 1-4, p. 9-56.
- Johnson Santiago, A., 2009: Modelo de recursos del sector CRIII-1 del yacimiento ferroniquelífero Cantarrana. Tesis de diploma presentada en opción al título de ingeniero geólogo. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
- Lavaut Copa, W., 2000: Estudio preliminar de las redes de perforación y muestreo para el cálculo del mineral laterítico. EMG Santiago de Cuba, Cuba.
- Legrá Lobaina, A. A., 1999: Metodología para el pronóstico, planificación y control integral de la minería en yacimientos lateríticos. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. CUJAE, La Habana, Cuba.

- Legrá Lobaina, A., Guillarte Noa, A., Guevara Pérez, T., 2015: Evaluación de modelos de variables geotecnológicas en un bloque de un yacimiento laterítico cubano. Primera parte: kriging e inverso de la distancia 2D. *Minería y Geología*, Vol. 31 No. 1, p. 29-51, Moa, Holguín, Cuba.
- Martínez Vargas, A., 2006: Modelación de los contenidos de hierro en yacimientos lateríticos heterogéneos de níquel y cobalto, Caso de estudio, yacimiento Moa Oriental. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias geológicas. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
- Martínez Vargas, A., Pérez Martínez, Y., 2000: Metodología para la modelación de yacimientos residuales de níquel. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
- Martínez Vargas, A., Pérez Melo, N., 2006: ¿Cuál es el mejor método para estimar variables en yacimientos lateríticos de níquel y cobalto? *Minería y Geología*, Vol. 22 No. 3, Moa, Holguín, Cuba.
- Matheron, G., 1970: La théorie des variables régionalisées et ses applications. Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Fascicule 5. Ecole de Minas de Paris. Francia.
- Muñoz Gómez, J. N., 2004: Geología y mineralogía de yacimientos residuales de menas lateríticas de Fe, Ni y Co. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
- Muñoz Gómez, J. N., Orozco Melgar, G., Rojas Purón, A., Cruz Orosa, I., 2005: Mineralogía de las menas lateríticas del yacimiento Punta Gorda: Implicaciones técnica-operativas durante la explotación. I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso de Minería, La Habana, Cuba.
- Muñoz Gómez, J. N., Rodríguez Infante, A., Martínez Vargas, A., Vera Sardiñas, O. L., López Martínez, R., 2007: Caracterización de los dominios geológicos

en las concesiones mineras Camarioca Norte y Camarioca Sur. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.

Pérez Melo, N., 2003: Comparación de métodos de estimación y simulación para el cálculo de los recursos tomando como ejemplo el bloque O48 del yacimiento Punta Gorda. Tesis presentada en opción al grado científico de máster en ciencias. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.

Quintas Caballero, F., Almaguer Carmenates, Y., Rodríguez Infante, A., Rodés A., Vargas A., 2002: Cartografía geológica del basamento del yacimiento Punta Gorda a escala 1:2 000. Subprograma del proyecto de Modelación Geotecnológica de la Empresa Ernesto Che Guevara. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.

Ramírez Durán, J., 2011: Caracterización por espectroscopia infrarroja de minerales asociados a cortezas ferroniquelíferas del yacimiento Punta Gorda en Moa, Holguín. Tesis de diploma presentada en opción al título de ingeniero geólogo. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.

Rodríguez Infante, A., 1983: Características geólogo-geomorfológicas del yacimiento Punta Gorda, Moa. Minería y Geología, Vol. I-83, p. 107-114, Moa, Holguín, Cuba.

Rodríguez Infante, A., 1998: Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.

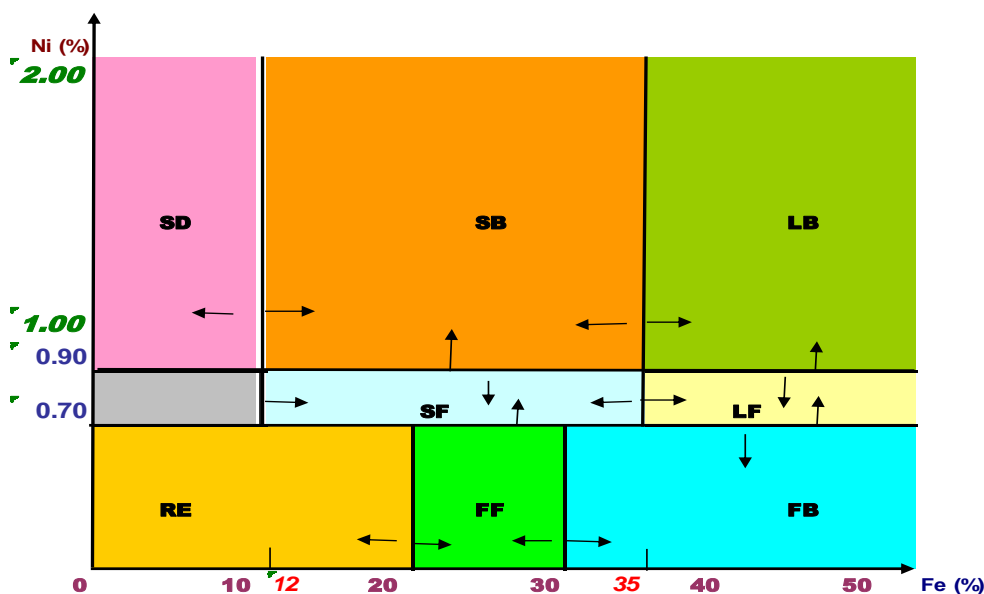
Rojas Purón, A., Simões Angélica, R., Orozco Melgar, G., 2012: Identificación mineralógica de los óxidos de manganeso del yacimiento laterítico Punta Gorda, Moa, Cuba. Minería y Geología, Vol. 28 No.1, p. 1-26, Moa, Holguín, Cuba.

- Suárez Blett, Y., 2004: Mapa geotecnológico del yacimiento Punta Gorda. Tesis de diploma presentada en opción al título de ingeniero geólogo. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
- Urra Abraira, J. L., 2011: Modelo 3D de la presa de rechazo nueva. Tesis presentada en opción al título académico de master en Geología. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
- Vargas Meriño, M. L., 2009: Informe de actualización del proyecto geológico del yacimiento Punta Gorda. CEPRONIQUEL, Moa, Holguín, Cuba.
- Vera Sardiñas, O. L., 2001: Procedimiento para la determinación de las redes racionales de exploración de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto en la región de Moa. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Departamento de Geología, ISMM, Moa, Holguín, Cuba.
- Vera Sardiñas, O. L., Rodríguez Vega, A., Cordobés Pedrianes, J. M., Legrá Lobaina, A. A., 2001: Dominios geológicos del yacimiento laterítico de Punta Gorda, Moa: delimitación y caracterización. *Minería y Geología*, 28 Nos.3-4, p. 55-66, Moa, Holguín, Cuba.
- Vera Yeste, A., 1979: Introducción a los yacimientos lateríticos de níquel cubanos. Editorial Orbe, La Habana, Cuba.

ANEXOS

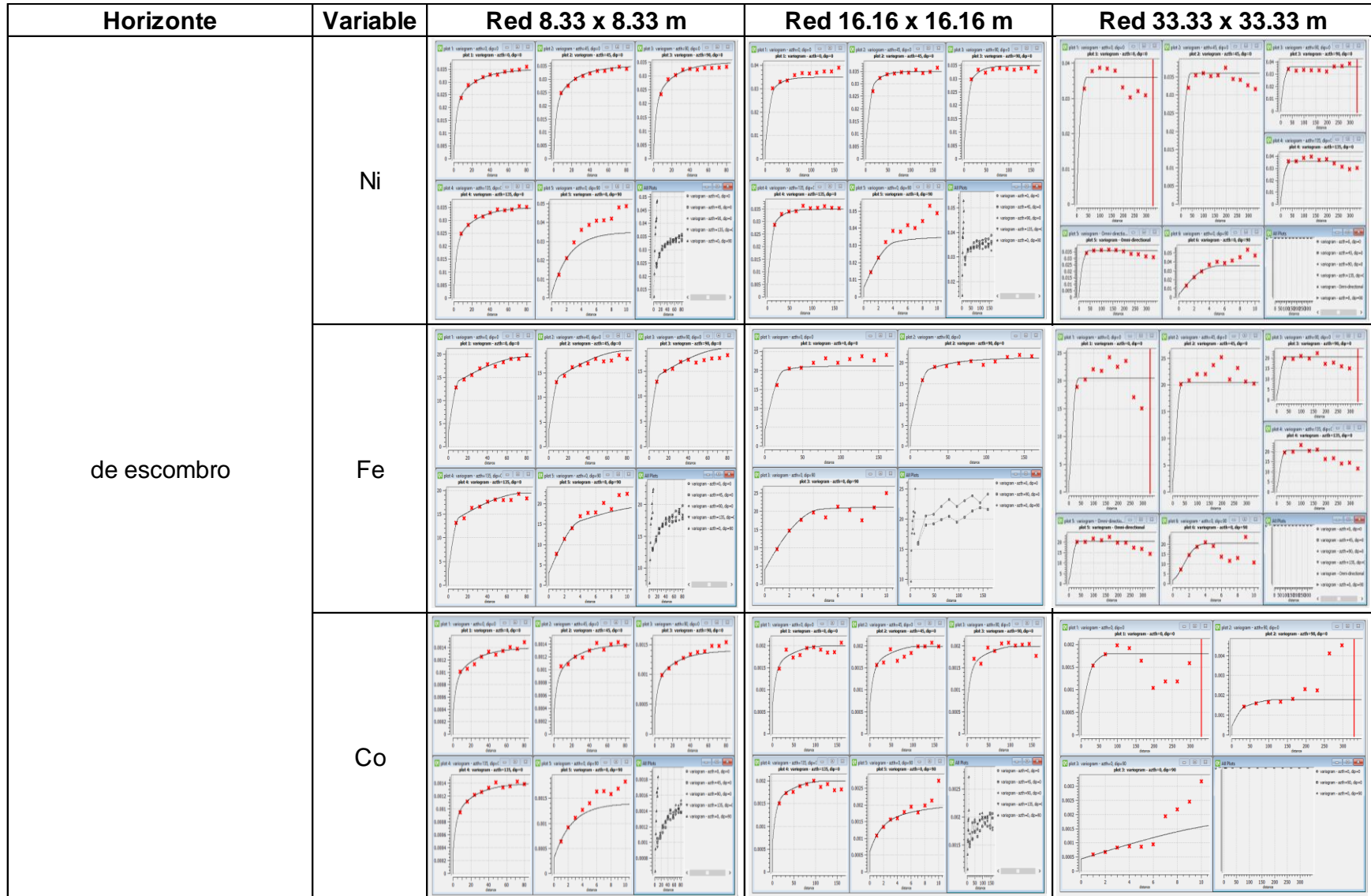
CONDICIONES PARA IDENTIFICAR LAS MENAS, EN UN PERFIL.				
HORIZONTE	T I P O D E M E N A	NOMENCLATURA	CONTENIDO LÍMITE DE Ni.	CONTENIDO LÍMITE DE Fe.
HORIZONTE DE ESCOMBRO	Mena Ferrosa Fuera de Balance	(FF)	Ni < 0.70 %	20.00 % <= Fe < 30.00 %
	Mena Ferrosa de Balance	(FB)	Ni < 0.70 %	Fe >= 30.00 %
HORIZONTE DE LA ROCA MADRE	Mena Laterítica Niquelífera Fuera de Balance	(LF)	0.70 % <= Ni < 0.90 %	Fe >= 35.00 %
	Mena Laterítica Niquelífera de Balance	(LB)	Ni >= 0.90 %	Fe >= 35.00 %
HORIZONTE DE LA ROCA MADRE	Mena Serpentinítica Niquelífera Friable de Balance	(SB)	Ni >= 0.90 %	12.00 % <= Fe < 35.00 %
	Mena Serpentinítica Dura de Balance	(SD)	Ni >= 0.90 %	Fe < 12.00 %
HORIZONTE DE LA ROCA MADRE	Mena Serpentinítica Niquelífera de Fuera de Balance	(SF)	0.70 % <= Ni < 0.90 %	12.00 % <= Fe < 35.00 %
	Roca Estéril	(RE)	Ni < 0.70 %	Fe < 20.00 %

Anexo 1. Condiciones para identificar las menas en un perfil. Empresa "Cmdt. Ernesto Che Guevara".

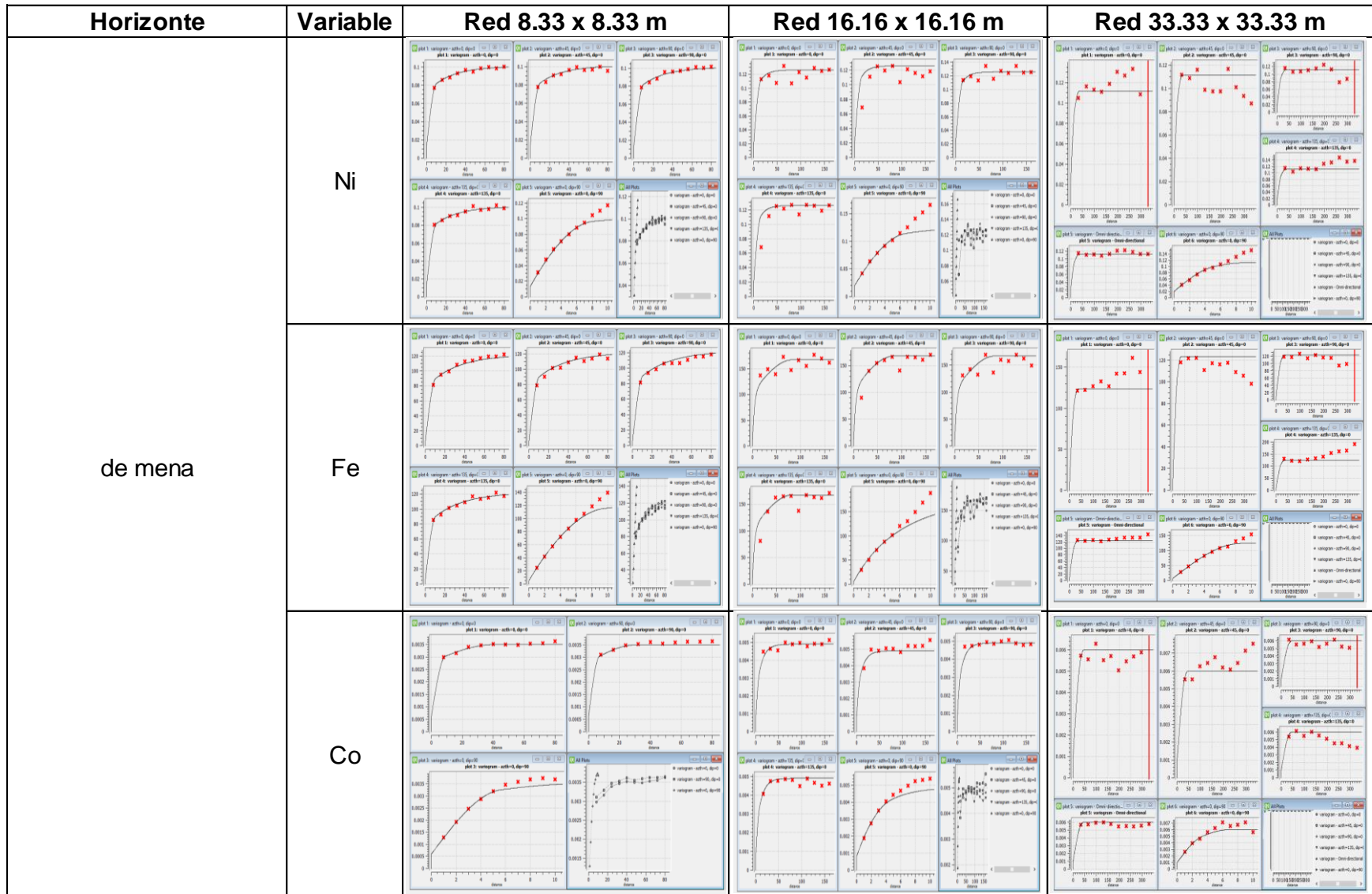


- | | | |
|------------------------------|-----------|--|
| Escombros | LF | Menas Lateríticas Niquelíferas Fuera de Balance |
| | FB | Menas Ferrosas de Balance |
| | FF | Menas Ferrosa Fuera de Balance |
| Materia Prima Mineral | LB | Menas Lateríticas Niquelíferas de Balance |
| | SB | Menas Serpentiníticas Niquelíferas Friables de Balance |
| Piso del Miner. | SD | Menas serpentiníticas Duras de balance |
| | SF | Menas Serpentiníticas Niquelíferas de Fuera de balance |

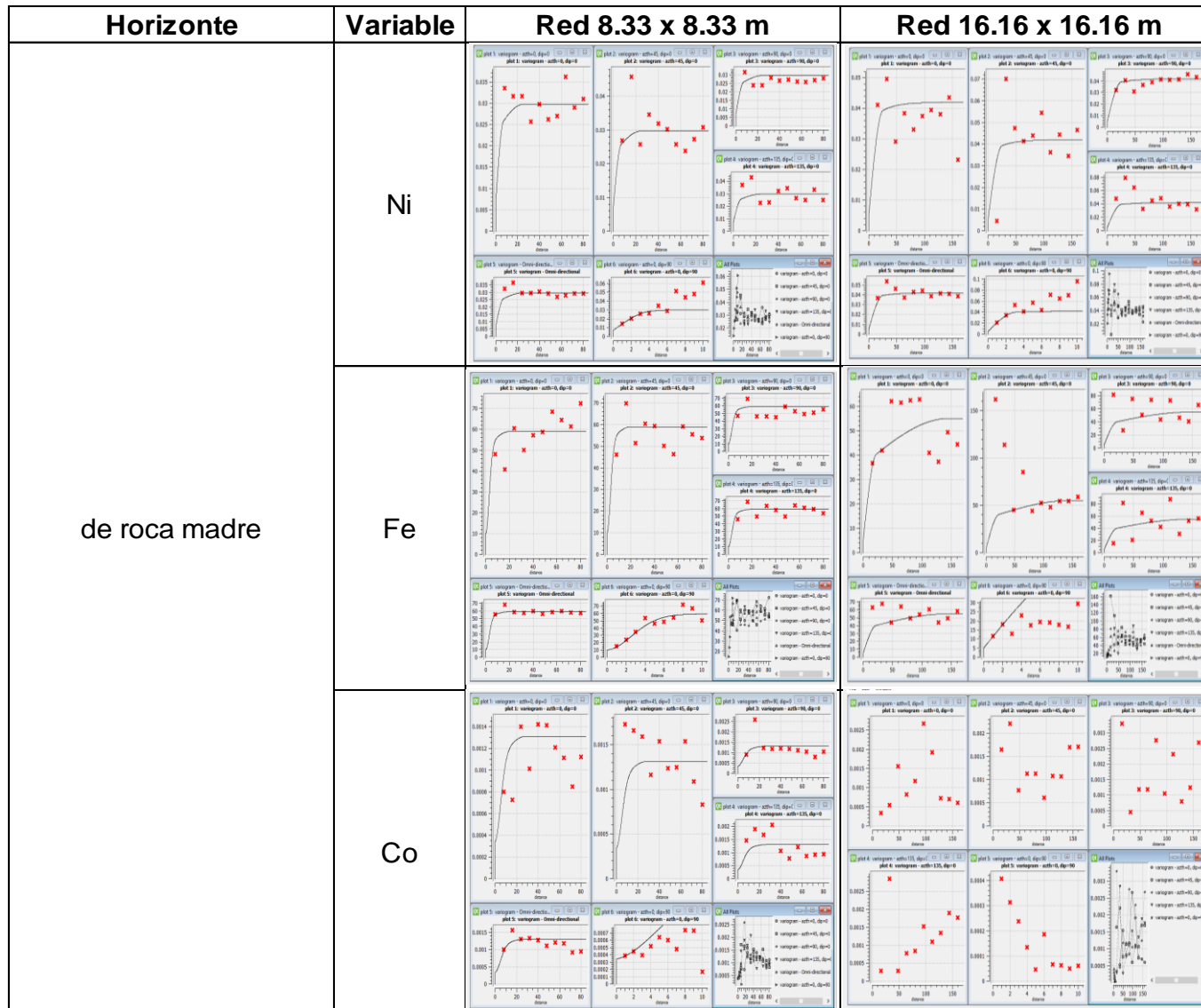
Anexo 2. Identificación gráfica de las menas de la concepción Punta Gorda. Empresa "Cmdt. Ernesto Che Guevara".



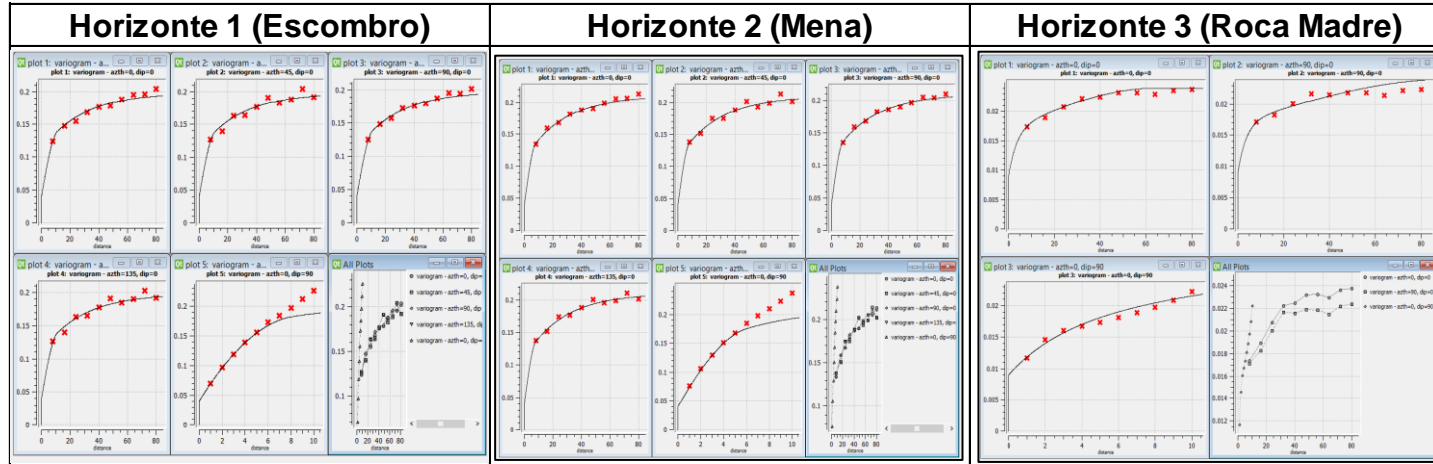
Anexo 3. Variogramas modelos utilizados en la estimación de Ni, Fe y Co en el horizonte de escombro por tipo de red. Núñez, 2017.



Anexo 4. Variogramas modelos utilizados en la estimación de Ni, Fe y Co en el horizonte de mena por tipo de red. Núñez, 2017.



Anexo 5. Variogramas modelos utilizados en la estimación de Ni, Fe y Co en el horizonte de roca madre por tipo de red. Núñez, 2017.



Anexo 6. Variogramas modelo utilizados en la estimación de la probabilidad de ocurrencia de los horizontes. Núñez, 2017.