

Universidad de las Ciencias Informáticas

“FACULTAD 6”



**Trabajo de Diploma para optar por el título de
Ingeniero en Ciencias Informáticas**

Título:

**“Herramienta para graficar variogramas
experimentales y ajustados”**

Autoras:

Arianna Braña Sarmiento

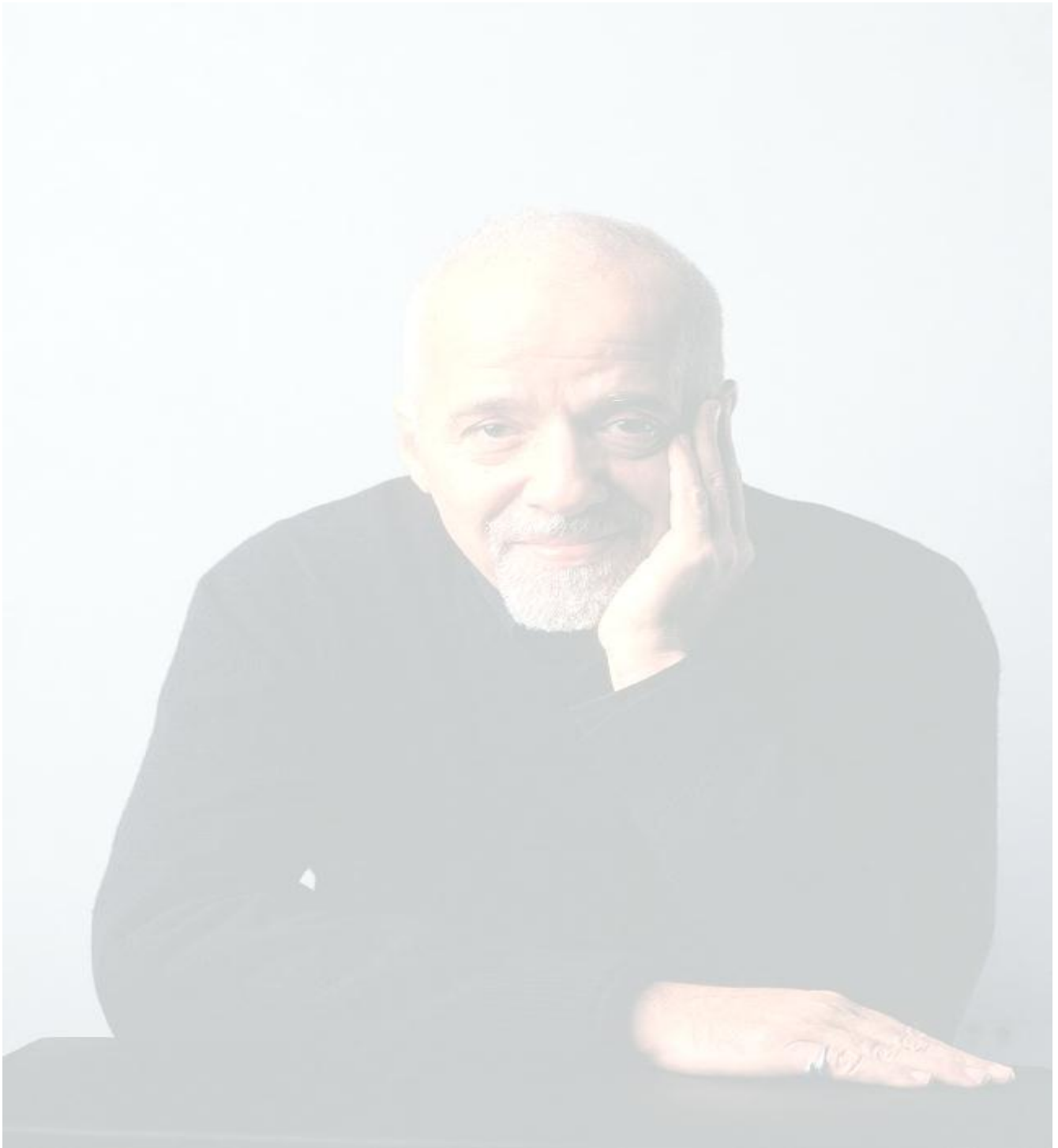
Danaysi Lazo Tamayo

Tutor:

M.Sc. Eddy Dangel Quesada Rodríguez

La Habana, junio del 2015

“Año 57 de la Revolución”



*“Es la posibilidad de realizar un sueño lo que hace
que la vida sea interesante”*

Paulo Coelho



Declaración de autoría:

Declaramos ser autoras del trabajo titulado: “Herramienta para graficar variogramas experimentales y ajustados” y reconocemos a la Universidad de las Ciencias Informáticas los derechos patrimoniales de la misma, con carácter exclusivo.

Para que así conste firmamos la presente a los ____ días del mes de _____ del año _____.

Arianna Braña Sarmiento

Danaysi Lazo Tamayo

Firma del Autor

Firma del Autor

M.Sc. Eddy Dangel Quesada Rodríguez

Firma del Tutor

Datos del contacto:

Tutor:

- M.Sc. Eddy Dangel Quesada Rodríguez

Especialidad de graduación: Ingeniero en Ciencias Informáticas

Años de graduado: 7

Correo Electrónico: edquezada@uci.cu

Breve descripción: Graduado en el año 2008 de Ingeniería en Ciencias Informáticas en la Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI), la Habana, Cuba. Se ha desempeñado como profesor de varias asignaturas docentes y optativas en la UCI y tiene la categoría docente de profesor Asistente. El profesor también posee la categoría científica de Máster en Informática Aplicada y actualmente ocupa el cargo de Jefe de Departamento en el centro productivo GEYSED. El mismo cuenta con más de 5 años de experiencia en el desarrollo de software asociado a las ramas de la Geología y la Minería, siendo autor de varias investigaciones publicadas en revistas y eventos científicos nacionales e internacionales.

Autoras:

- Danaysi Lazo Tamayo

Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI)

Correo Electrónico: dltamayo@estudiantes.uci.cu

- Arianna Braña Sarmiento

Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI)

Correo Electrónico: abraña@estudiantes.uci.cu

Agradecimientos:

De Danaysi:

Con la presente tesis de grado concluyo una parte muy importante de mi vida. En estos 5 años de universidad he vivido experiencias inolvidables y creo que es muy importante agradecerles a todas las personas que de una forma u otra han contribuido en mi realización personal:

A mi mamá por estar ahí siempre que lo he necesitado, por ser madre y padre para mi hermano y para mí, por las noches de desvelo, los buenos y malos momentos, por darme fuerzas para seguir y no rendirme. Te doy las gracias mamita por guiarme, sin ti no habría podido llegar hasta aquí. Esto también es por ti.

A mi hermano, por ser parte de mi fuente de inspiración. Te quiero.

A mi familia, que con su locura siempre han sabido apoyarme en los momentos más crítico que he tenido. A mi abuelo Sergio que aunque no se encuentra físicamente entre nosotros sé que está muy orgulloso de mí. A mi prima Daymelis por enseñarme a ser fuerte frente a los obstáculos más duros de la vida. A Tania por confiar en mí en todo momento.

A Juan M., por quererme como si fuese su hija. Por su apoyo incondicional.

A mi Tutor Eddy, sin el cual no estuviéramos hoy aquí. Gracias por ser tan exigente y estar ahí para nosotras aunque sabíamos que no podías. Por estar todo

el tiempo disponible, por aguantar nuestras malcriadeces. Gracias por su apoyo en la investigación e inculcarme el deseo de hacer cosas con calidad, por su amistad, su comprensión y dedicación durante el desarrollo del trabajo.

A mis nuevos y viejos amigos de dentro y fuera de la universidad sin los cuales no hubiera podido pasar estos 5 años: A Enrique, Marleivis, Yeni, Yaithieri, Abel, Chadis, Ihosbanny, Luis D, Pollo, Elizabeth, Leonel, Yohan.

A Mayi, por ser la hermana que no tuve, por esos buenos y no tan buenos consejos que me dio. Por saber soportarme cada vez que tenía un mal día. Por enseñarme a disfrutar la vida.

A Alexander, por tanto cariño, por apoyarme en mis decisiones aunque no fueran las correctas. Por hacerme reír cuando lo que quería en realidad era llorar.

A Ana M, por tantos buenos y malos momentos que pasamos juntas. Por tanto apoyo que me dio cuando más lo necesite.

A Yaima, por tantas fiestas compartidas y por ser esa personita especial que es.

A Angélica, que en tan poco tiempo supo quererme como una hermana.

A Frank Yasel, por ser tan especial en mi vida. Por pasar conmigo los mejores y los peores momentos en la universidad. Por haberme enseñado a compartir mis problemas con los demás.

A Darian por tantas noches que me ayudo a estudiar. Por ser mi mejor amigo a pesar de los comentarios.

A Frank Abel por quererme tanto en tan poco tiempo.

A mi compañera de tesis por no haberse rendido nunca a pesar de los problemas. Por haber sido también una amiga.

A las niñas del fútbol con las que compartí buenos momentos, gracias por su preocupación y por hacer que mi vida aquí fuera más agradable.

Al grupo Sensuales en la pista, por tantos momentos divertidos y por tantos limones compartidos.

A los profesores que han contribuido a alcanzar este gran sueño, en especial a los profesores: Aime, Adisley, Dagoberto, Enier, Solangel y el Jeem.

A todos muchas gracias.

De Arianna:

La vida es hermosa y una de las principales características de esta hermosura es que la podemos compartir y disfrutar con quienes amamos, podemos ayudar y guiar a muchas personas si ellas lo permiten, pero también podemos ser guiados y ayudados durante nuestra vida; por esto mismo, mediante estos agradecimientos quiero agradecer y exaltar la labor de:

Mi tutor Eddy por cada detalle y momento dedicado para aclarar cualquier tipo de duda que me surgiera, por la claridad y exactitud con la que me enseñó cada lección. Porque a pesar de sus problemas no nos abandonó y dedico todo su tiempo en enseñarnos y orientarnos demostrando ser un excelente tutor y más que eso un amigo.

De mis padres Yolanda y Robinson que junto con mi hermanita Arianne recorrieron de alguna forma este camino conmigo que no fue nada fácil, en especial a mi mamita de mi corazón que gracias a sus consejos, a su amor infinito y su inmenso apoyo lo complicado de lograr esta meta se ha notado menos. Les agradezco y hago presente mi gran afecto hacia ustedes, mi hermosa familia. Gracias a mi Noni Noni por ser mi apoyo incondicional, por estar siempre pendiente de mí y levantarme cada vez que me sentía derrotada. Por ser una de las pocas personas que siempre confió en que podía hacer este sueño realidad por los dos.

Gracias a mi novio Darlon por sus innumerables consejos para la realización de esta tesis, por su incansable apoyo, cariño, confianza y soportar mis descargas cuando me encontraba mal.

A Urbano que ha sido como un padre para mí, el cual me ha brindado su apoyo y cariño incondicional. Por estar pendiente de todos mis pasos y darme fuerzas para seguir luchando.

A Noraima por ser como una hermana para mí, que siempre me apoyo y me alentó para seguir adelante. Nosotras somos las dos mosqueteras que luchamos contra viento y marea para realizar nuestras metas.

Agradecerles a todas mis amigas en especial Yeni y Blanca que estuvieron presentes durante toda o la mayor parte de la realización y desarrollo de esta tesis.

Gracias a mi segunda madre Surama que siempre estuvo al tanto de mis pasos y me ayudó en uno de los momentos más difíciles de mi vida acá en la universidad.

A mi compañera de tesis porque a pesar de que tuvimos algunas discordias supimos rebasarlas para hacer este sueño realidad, por confiar en mí y ser una buena amiga y compañera.

A mi amigo Jeem que siempre he podido contar con él y ha estado presente en las buenas y malas cosas de mi vida acá en la universidad.

A mi grupo 6503 por compartir conmigo momentos maravillosos y ayudarme a estudiar para las pruebas.

Gracias a la revolución y a mi universidad, por haberme permitido formarme en ella junto con todas esas personas que de manera directa o indirecta hicieron de mí una mejor persona, y gracias a ellos hoy mi sueño se hace realidad.

Este es un momento muy especial que espero perdure en el tiempo no solo en la mente de las personas a quienes agradecí, sino también a quienes invirtieron su tiempo para echarle una mirada a mi proyecto de tesis, a ellos les agradezco con todo mi ser.

Dedicatoria:

De Danaysi:

Le dedico este trabajo de diploma:

A mi abuelo Sergio que desde el cielo me guía.

A mi mamá que es la fuente de toda mi inspiración por brindarme todo su amor y dedicación.

A mi hermanito para que le sirva de guía en sus estudio.

De Arianna:

A mi mamita Yolanda por ser la mejor madre de esta tierra. Por darme fuerzas y levantarme cada vez que me sentía derrotada. Por ser mi apoyo, mi guía y mi ejemplo a seguir.

A papito Robinson por todos los consejos y por haber depositado toda su confianza y fe en que este hermoso sueño se hiciera realidad.

A mi Titi Arianne por ser la hermanita más linda que existe, por ser mi confidente y mi amiga. Espero que con este triunfo ser una guía para ella.

Resumen

La utilización de los métodos de estimación geoestadísticos permite determinar con mayor certeza los valores de concentración de minerales en las empresas mineras. El análisis estructural es una de las operaciones previas realizadas antes de la estimación de los recursos minerales la cual ayuda a determinar los patrones de comportamiento espacial de los ensayos geoquímicos. La complejidad matemática y computacional de las operaciones realizadas para realizar el análisis estructural y la estimación de recursos minerales, hacen que los sistemas de cómputos especializados en esta rama sean pocos y costosos. En la presente investigación se desarrolló una herramienta informática que permite calcular y graficar variogramas experimentales a partir de los valores de los ensayos geoquímicos. La herramienta desarrollada también permite el ajuste de los variogramas experimentales utilizando 8 modelos teóricos de variogramas. Durante la construcción de la herramienta se utilizó la metodología de desarrollo de software *AUP*, permitiendo documentar correctamente la aplicación, utilizando los artefactos propuestos por esta metodología y empleando el lenguaje de modelado *UML*. Para un correcto funcionamiento de la herramienta se le realizaron pruebas de software y también se le realizaron pruebas de comparación con datos publicados en bibliografías especializadas en la temática.

Palabras claves: correlación, geoestadística, geoquímico, mineral, variograma.

Abstract

The use of geostatistical estimation methods allows determining with greater certainty the minerals concentration values in mining companies. The structural analysis is one of the previous operations made before estimating mineral resources which helps to determine spatial behavior patterns of geochemical tests. Mathematical and computational complexity of operations performed to make the structural analysis and estimation of mineral resources, make computation systems specialized in this field to be few and expensive. In this research a software tool was developed that allows calculating and charting experimental variograms from the values of the geochemical tests. The tool developed also allows adjusting the experimental variograms using 8 theoretical models of them. During the creation of the tool, the software development methodology *AUP* was used, allowing the application to be properly documented using the artifacts proposed by this methodology and using the modeling language *UML*. For proper functioning of the tool software tests were made as well as comparing testing to data published in specialized bibliographies on the subject.

Keywords: correlation, geostatistics, geochemistry, mineral, variogram.



INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA GEOESTADÍSTICA	6
1.1 GEOESTADÍSTICA	6
1.1.1 Etapas del análisis geoestadístico	6
1.1.2 Métodos de estimación geoestadísticos.....	7
1.2 VARIABLES REGIONALIZADAS.....	7
1.2.1 Continuidad espacial de las variables regionalizadas.....	7
1.2.2 Descripción de los métodos de continuidad espacial.....	8
1.3 VARIOGRAMA	9
1.3.1 Variograma experimental.....	10
1.3.2 Variograma ajustado o modelo.....	11
1.3.3 Modelos de variogramas	13
1.4 ANÁLISIS DE LAS SOLUCIONES EXISTENTES	14
1.5 CONCLUSIONES PARCIALES	15
CAPÍTULO II: PRESENTACIÓN DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN DE LA HERRAMIENTA PARA GRAFICAR VARIOGRAMAS EXPERIMENTALES Y AJUSTADOS.	16
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN	16
2.2 ARTEFACTOS GENERADOS POR LA METODOLOGÍA DE SOFTWARE UTILIZADA	20
2.2.1 Modelo de dominio.....	20
2.2.2 Requisitos del sistema.....	22
2.2.3 Modelo de casos de uso.....	23
2.2.4 Diagrama de paquetes.....	27
2.2.5 Modelo de diseño.....	27
2.2.6 Diagrama de componentes.....	29
2.3 CONCLUSIONES PARCIALES	30
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y PRUEBAS DE LA HERRAMIENTA PARA GRAFICAR VARIOGRAMAS EXPERIMENTALES Y AJUSTADOS.....	31
3.1 RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN DEL CÁLCULO DE UN VARIOGRAMA EXPERIMENTAL CON UN CONJUNTO DE DATOS	31
3.2 PRUEBAS DE SOFTWARE REALIZADAS AL SISTEMA PROPUESTO.....	34
3.2.1 Pruebas de caja blanca.....	34
3.2.2 Pruebas de caja negra	39
3.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS.....	43
3.4 CONCLUSIONES PARCIALES	43
CONCLUSIONES GENERALES	44

Tabla de Contenido



RECOMENDACIONES	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
BIBLIOGRAFÍA GENERAL	49



TABLA 1: ECUACIONES DE LOS MODELOS DE VARIOGRAMAS.	13
TABLA 2: DESCRIPCIÓN DEL CU GRAFICAR VARIOGRAMA EXPERIMENTAL.....	24
TABLA 3: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LOS VALORES DE LA FUNCIÓN VARIOGRAMA EXPERIMENTAL UTILIZANDO UN ACIMUT DE 0°.....	32
TABLA 4: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LOS VALORES DE LA FUNCIÓN VARIOGRAMA EXPERIMENTAL UTILIZANDO UN ACIMUT DE 90°.....	33
TABLA 5: CAMINOS BÁSICOS OBTENIDOS DEL GRAFO.....	37
TABLA 6: CASO DE PRUEBA PARA EL CAMINO BÁSICO NO.1.....	37
TABLA 7: CASO DE PRUEBA PARA EL CAMINO BÁSICO NO. 2.....	38
TABLA 8: CASO DE PRUEBA PARA EL CAMINO BÁSICO NO. 3.....	38
TABLA 9: CASO DE PRUEBA PARA EL CAMINO BÁSICO NO. 4.....	39
TABLA 10: CASO DE PRUEBA PARA EL CAMINO BÁSICO NO. 5.....	39
TABLA 11: CASOS DE PRUEBA DEL CUS GRAFICAR VARIOGRAMA EXPERIMENTAL.....	40
TABLA 12: VARIABLES DEL CUS GRAFICAR VARIOGRAMA EXPERIMENTAL.....	42

FIGURA 1: PARES DE MUESTRA FORMADOS PARA DETERMINAR LA CORRELACIÓN ESPACIAL ENTRE VARIABLES MUESTREADAS.	8
FIGURA 2: PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DEL VARIOGRAMA EXPERIMENTAL. TOMADO DE (SUAREZ 2006).	10
FIGURA 3: REPRESENTACIÓN DEL VARIOGRAMA EXPERIMENTAL. TOMADO DE (CASSIRAGA 2007).	11
FIGURA 4: REPRESENTACIÓN DE UN VARIOGRAMA AJUSTADO A PARTIR DE UN VARIOGRAMA EXPERIMENTAL. TOMADO DE (CASSIRAGA 2007).	11
FIGURA 5: PARÁMETROS DEL VARIOGRAMA AJUSTADO. TOMADO DE (CASSIRAGA 2007).	12
FIGURA 6: ESQUEMA DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN.	16
FIGURA 7: ESQUEMA DE PASOS PARA GRAFICAR UN VARIOGRAMA EXPERIMENTAL.	17
FIGURA 8: MODELO DE DOMINIO.	20
FIGURA 9: DIAGRAMA DE CASOS DE USO.	24
FIGURA 10: DIAGRAMA DE PAQUETES.	27
FIGURA 11: DIAGRAMA DE CLASES DEL DISEÑO VARIOGRAMA EXPERIMENTAL.	28
FIGURA 12: CLASE VARIOGRAMACONTROLLER Y UN FRAGMENTO DE CÓDIGO DONDE SE EVIDENCIA EL PATRÓN DE DISEÑO SINGLETON. .	29
FIGURA 13: DIAGRAMA DE COMPONENTES.	30
FIGURA 14: DATOS SIMULADOS DE UN DEPÓSITO DE HIERRO TOMADOS DEL LIBRO PRACTICAL GEOESTADISTIC 2000. TOMADO DE (CLARK 1979).	31
FIGURA 15: GRÁFICA DEL VARIOGRAMA EXPERIMENTAL UTILIZANDO LA HERRAMIENTA DESARROLLADA UTILIZANDO UN ACIMUT DE 0°. .	32
FIGURA 16: GRÁFICA DEL VARIOGRAMA EXPERIMENTAL UTILIZANDO LA HERRAMIENTA DESARROLLADA UTILIZANDO UN ACIMUT DE 90°.	33
FIGURA 17: CÓDIGO DEL MÉTODO PARA REALIZAR VARIOGRAMA EXPERIMENTAL.	35
FIGURA 18: GRAFO DE FLUJO DEL MÉTODO PARA REALIZAR VARIOGRAMA EXPERIMENTAL.	36
FIGURA 19: RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CAJA NEGRA	43

Introducción

La minería es una de las actividades más antiguas realizadas por el hombre desde épocas prehistóricas, con el fin de obtener los materiales minerales necesarios para la elaboración de sus herramientas. Las técnicas de explotación mineras han evolucionado a lo largo de la historia de acuerdo al avance tecnológico y al aumento del volumen de extracción de minerales. A partir de la Revolución Industrial (Ashton 2008) y la Primera y Segunda Guerra Mundial (Vallejos and Martínez 1990) las actividades mineras tuvieron un aumento significativo a nivel mundial para sostener la producción de la maquinaria industrial y bélica de los países industrializados. Los métodos de estimación de recursos minerales existentes hasta mediados del siglo XX se basaban en principios matemáticos simples y empíricos, los cuales disminuían los beneficios económicos, producto a la incertidumbre en los cálculos de volúmenes de extracción.

Los métodos de estimación de recursos minerales basados en modelos matemáticos simples son conocidos como métodos clásicos de estimación. Estos métodos clásicos de estimación de recursos minerales son utilizados para realizar estimaciones globales en un yacimiento mineral y presentan en la mayoría de los casos, problemas de precisión para realizar estimaciones locales. Los recursos minerales que yacen bajo el subsuelo de la corteza terrestre presentan diferentes patrones de distribución espacial, los cuales describen su aleatoriedad o isotropía. Los métodos de estimación clásicos no toman en cuenta los diferentes patrones de distribución espacial de los recursos minerales para la estimación de los mismos, lo cual provoca incertidumbre en la estimación y aumenta los costos de la producción minera.

A partir de 1950 se comenzó a desarrollar la Teoría de la Variable Regionalizada por (Matheron 1963) y (Krige 1976) mejorando los resultados de las estimaciones locales de recursos minerales. En la Teoría de la Variable Regionalizada se determinan los patrones de correlación espacial entre los valores geoquímicos de un yacimiento mineral utilizando principios estadísticos y probabilísticos. Esta teoría fue generalizada en la Geoestadística (Chica Olmo 1987; Deutsch and Journel 1992; Houlding 2000), en la cual se estudia fundamentalmente el comportamiento caótico de mineralizaciones.

Según (Journel and Huijbregts 1978), la Geoestadística es una rama de la estadística que describe la continuidad espacial de cualquier fenómeno natural. Tiene como interés fundamental la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos (Warrick and Myers 1987). La misma resulta una herramienta útil para describir la continuidad espacial como rasgo distintivo y fundamental de los

fenómenos naturales. Una de las principales etapas de la Geoestadística es el análisis estructural, en la cual se utilizan modelos matemáticos que ayuden a describir los distintos patrones de comportamiento espacial de un fenómeno espacial. La principal función matemática utilizada para determinar los patrones de comportamiento espacial es el variograma (Krajewski and Gibbs 1993). En la minería los métodos geoestadísticos de estimación de recursos minerales utilizan la función variograma para la asignación de los pesos a las variables muestreadas empleadas durante la estimación.

En la actualidad el análisis estructural y la estimación de recursos minerales a partir de métodos geoestadísticos se realiza de forma automatizada. La complejidad de las operaciones matemáticas empleadas y la magnitud de los datos geoquímicos utilizados para la estimación requieren de sistemas de cómputos especializados para realizar estas operaciones. La mayoría de los sistemas informáticos especializados en la estimación de recursos minerales son de carácter privativo y sus costos de adquisición son elevados.

En Cuba la industria minera constituye uno de los principales renglones de la economía nacional, principalmente la explotación de yacimientos lateríticos ubicados al norte de la provincia de Holguín para la obtención del níquel y el cobalto. Aunque el níquel y el cobalto sean los minerales más explotados en Cuba solo existe un grupo reducido de menos de diez empresas mineras dedicadas a esta actividad. La mayoría de las empresas mineras cubanas están dedicadas a la explotación de otros minerales como el cobre, oro, plata, cromo, mármol y áridos para la construcción. Este último grupo de empresas mineras no tienen altos ingresos económicos en comparación con las empresas mineras dedicadas a la explotación de níquel y cobalto.

Con el objetivo de garantizar la producción minera cubana se han comprado varios software extranjeros especializados para esta rama. Estos sistemas informáticos han sido adquiridos por empresas mineras cubanas asociadas fundamentalmente a la extracción del níquel y el oro. Existen un grupo considerable de empresas mineras, instituciones geológico-mineras y universidades cubanas que no tienen acceso a estos sistemas informáticos, afectando negativamente la docencia, investigación y la producción en otras ramas de la minería.

Como resultado a todas estas limitantes surge como necesidad la creación de un producto informático geológico-minero nacional. Mediante una colaboración entre la Oficina Nacional de Recursos Minerales (ONRM) y la Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI), se sentaron las bases para la conformación del mismo. Evaluando esta idea, se crea el Proyecto Sistema Minero Cubano en el Departamento

Geoinformática de la Facultad 6. Con este proyecto en marcha se origina el desarrollo de Sistema de Análisis y Modelado de Yacimientos Minerales (Syam).

Syam en su versión 1.0 permite la gestión y administración de Bases de Datos geológicas, la visualización tridimensional de superficies de terreno y pozos de perforación. Este sistema se encuentra actualmente en desarrollo donde una de las metas fundamentales durante este período es la incorporación de un módulo de modelos de bloques y un módulo de estimaciones de recursos minerales. Para desarrollar el módulo de estimación de recursos minerales, varios miembros del equipo de desarrollo de Syam han realizado investigaciones asociadas a la estimación de recursos “*Propuesta de implementación de un algoritmo para la estimación de recursos minerales sólidos*” (Reyes and Pazos 2012) y al análisis de la correlación espacial “*Herramienta para la creación de semivariogramas*” (González 2013), siendo esta última insuficiente para las necesidades de Syam.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expresado, se plantea como **problema de investigación**: ¿Cómo determinar los patrones de comportamiento espacial a partir de los ensayos geoquímicos de un yacimiento mineral?

El **objeto de estudio** consiste en el proceso de análisis estructural de los ensayos geoquímicos de un yacimiento mineral; enmarcando la investigación en el **campo de acción** representación gráfica del comportamiento espacial de los ensayos geoquímicos de un yacimiento mineral.

Para darle solución al problema planteado se define como **objetivo general**: Desarrollar una herramienta informática que grafique variogramas experimentales y ajustados a partir de modelos teóricos.

La **Hipótesis** de la siguiente investigación se expresa a continuación: Si se desarrollar una herramienta informática que grafique variogramas experimentales y ajustados a partir de modelos teóricos entonces se podrá determinar los patrones de comportamiento espacial a partir de los ensayos geoquímicos de un yacimiento mineral.

Para cumplir con este objetivo se identificaron las siguientes **tareas de investigación**:

1. Elaborar la documentación asociada a la fundamentación teórica de la investigación.
2. Caracterizar los diferentes tipos y modelos de variograma.
3. Definir las tecnologías y los requerimientos funcionales necesarios para la elaboración de la propuesta de solución.

4. Diseñar e implementar la propuesta de solución.
5. Realizar las pruebas necesarias para el correcto funcionamiento de la propuesta de solución.

Durante el desarrollo de la investigación se manejaron diferentes **métodos científicos** para el procesamiento de la información recopilada y para darle cumplimiento al objetivo general del presente trabajo. A continuación se detallan los utilizados:

Métodos teóricos

Método histórico-lógico: permitió realizar un estudio de la evolución de los diferentes sistemas informáticos que determinan los patrones de comportamiento espacial de los recursos y reservas minerales en dos y tres dimensiones. Se utilizó para investigar la evolución de los métodos de estimación de reservas minerales para una mejor detección de errores y estudiar las diferentes formas de determinar la continuidad espacial.

Método analítico-sintético: permitió realizar un estudio detallado de la documentación existente como *“Principles of geostatistics”*, *“Análisis geoestadístico en el estudio de la explotación de los recursos minerales”*, *“A Variogram Primer: Basics of Using Variograms”* para tomar los principales conceptos, características y definiciones referentes a la Geoestadística y a los diferentes tipos de variogramas.

Método hipotético-deductivo: permitió dada la problemática identificar el problema de investigación y obtener la hipótesis.

Técnicas de recopilación de la información

Análisis documental: permitió revisar aproximadamente 10 artículos, 30 libros y 5 revistas especializadas en los temas referentes a la presente investigación.

El presente trabajo de diploma está estructurado en 3 capítulos los cuales se centran en:

Capítulo 1. *“Fundamentación teórica del análisis estructural de los ensayos geoquímicos de un yacimiento mineral”*: en este capítulo se realizó un análisis detallado de los principales conceptos y características referentes a la geoestadística y al variograma. Además se analizaron las soluciones existentes que determinan el comportamiento espacial de las variables muestreadas.

Capítulo 2. *“Presentación de la propuesta de solución de la herramienta para graficar variogramas experimentales y ajustados”*: en este capítulo se definieron las principales herramientas y tecnologías a



utilizar, así como los requisitos funcionales y no funcionales junto con los diferentes diagramas que se modelan.

Capítulo 3. *“Resultados y pruebas de la herramienta para graficar variogramas experimentales y ajustados”*: en este capítulo se analiza mediante pruebas de software y de comparación el correcto funcionamiento de la aplicación.

Capítulo I: Fundamentación teórica del análisis estructural de la Geoestadística

En este capítulo se presenta las definiciones y conceptos teóricos de la Geoestadística, se indican cuáles son los pasos principales que se deben seguir para desarrollar un estudio geoestadístico. Se expone todo el contenido relacionado con los conceptos y definiciones fundamentales respecto al análisis estructural de los ensayos geoquímicos. Se describe además el variograma como principal forma de medir la continuidad espacial de variables muestreadas. Se explican los pasos para el cálculo del variograma experimental y como se le ajustan a este modelos teóricos para obtener el variograma ajustado. Por último se realiza un análisis de los principales software geoestadísticos existentes en el mundo asociado al análisis del comportamiento espacial.

1.1 Geoestadística

La Geoestadística es una ciencia que comprende un conjunto de herramientas y técnicas que sirven para analizar y predecir los valores de una variable que está distribuida en el espacio de forma continua, es conocida también como estadística espacial (Suarez 2006). George Matheron introdujo el término de geoestadística a la minería en los años 60 y la definió como “*la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de los fenómenos naturales*” (Matheron 1963; Viera and González 2002). La Geoestadística cuenta con métodos de estimación geoestadísticos y está compuesta por tres etapas: análisis exploratorio de los datos, análisis estructural y las predicciones, las cuales se describen a continuación.

1.1.1 Etapas del análisis geoestadístico

Según (Moral García 2004) para realizar un trabajo geoestadístico es necesario llevar a cabo los siguientes pasos:

1. **Análisis exploratorio de los datos:** es la etapa en la cual se estudian los datos sin tener en cuenta se distribución espacial. En esta etapa se comprueba la consistencia de los datos, eliminándose los erróneos e identificando si se corresponden a una distribución estadística.
2. **Análisis Estructural:** en esta etapa se determina la continuidad espacial de las variables muestreadas

a través del cálculo del variograma experimental o cualquier función que explique dicha continuidad. A este variograma se le ajusta uno o varios modelos teóricos.

3. **Predicciones:** en esta etapa se estima la variable en los puntos no muestrales, considerando la estructura de correlación espacial seleccionada e integrando la información obtenida de forma directa en los puntos muestrales.

1.1.2 Métodos de estimación geoestadísticos

Los métodos de estimación geoestadísticos en honor a Danie Krige son conocidos como krigeado o krigeaje. Según (Viera and González 2002) “el krigeado es una técnica de estimación local que ofrece el mejor estimador lineal insesgado de una característica desconocida que se estudia.” La idea fundamental del krigeado está estrechamente relacionada con conceptos sobre la dependencia espacial; los lugares que disten menos entre sí tendrán unos valores de los atributos más semejantes que los correspondientes a los puntos o bloques que estén más separados (Welhan 2001).

1.2 Variables regionalizadas

La aplicación de la Geoestadística ha impulsado los estudios referentes al análisis espacial de cualquier variable que se encuentre distribuida de forma continua en un área específica. Una variable regionalizada es una función que describe un fenómeno natural geográficamente distribuido (Matheron 1965). Según (Matheron 1970) la teoría de las variables regionalizadas tiene dos objetivos fundamentales: expresar las características estructurales de una variable regionalizada mediante una forma matemática adecuada y resolver de manera satisfactoria el problema de la estimación de una variable regionalizada a partir de un conjunto de muestras, asignando errores a las estimaciones. Estas variables presentan características cualitativas ligadas estrechamente a la estructura del fenómeno natural que ellas representan, las cuales son: localización, continuidad, anisotropía y fenómeno de transición (Rodríguez 1999).

1.2.1 Continuidad espacial de las variables regionalizadas

En la estimación de recursos minerales utilizando métodos geoestadísticos se realiza un estudio del comportamiento espacial de los ensayos geoquímicos. En este estudio se utilizan técnicas para determinar la correlación espacial de los ensayos, como es el caso de la función de covarianza, función del correlograma y la función del variograma. En (Tulcanaza 1992) se definen estos métodos para analizar la correlación espacial de variables, los cuales se describirán posteriormente.

Para determinar la correlación espacial entre variables muestreadas en una posición espacial es necesario formar pares de muestras como se muestra en la Figura 1, donde por cada par de muestra se forma un vector de distancia \vec{h} .

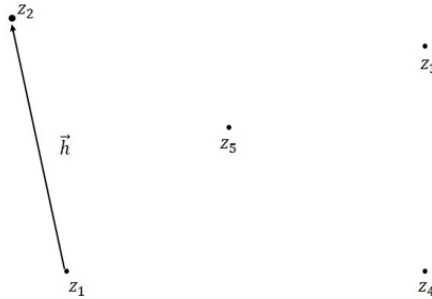


Figura 1: Pares de muestra formados para determinar la correlación espacial entre variables muestreadas.

1.2.2 Descripción de los métodos de continuidad espacial

Los métodos utilizados para la descripción de la continuidad o correlación espacial están basados en funciones matemáticas. Estas funciones se aplican a los pares de valores muestreados y sus fórmulas matemáticas tienen algunas variables en común como la distancia de separación h , la cantidad de muestras $N(h)$, el valor de la variable muestreada z , la media de los valores muestreados m y la desviación estándar σ .

- **Función de covarianza ($C(h)$):** en esta función se indica el grado de variación conjunta de dos variables aleatorias. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$C(h) = \frac{1}{N(h)} * \sum_{i=1}^n z_1 * z_2 - (m_1 * m_2)$$

$$m_1 = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^n z_1$$

$$m_2 = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^n z_2$$

- **Función de Correlograma ($p(h)$):** es la función de covarianza estandarizada por las desviaciones estándar de todos los datos cuyas ubicaciones están separadas por una distancia determinada. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$p(h) = \frac{C(h)}{\sigma_1^2 * \sigma_2^2}$$

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^n z_1^2 - m_1^2$$

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^n z_2^2 - m_2^2$$

- **Función variograma ($\gamma(h)$):** esta es la herramienta básica y fundamental de la geoestadística, la que con un uso adecuado permite abordar el estudio de la distribución espacial de los datos, su interpretación y relación con los aspectos geológicos conocidos. Además es la herramienta de mayor interés para la presente investigación donde en el siguiente epígrafe se explica detalladamente. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 N(h)} \sum_{i=1}^n (z_1 - z_2)^2$$

1.3 Variograma

El variograma es un soporte para las técnicas de kriging ya que permite representar cuantitativamente la variación de un fenómeno regionalizado en el espacio. Según ([Journel and Huijbregts 1978](#)) en términos matemáticos se puede definir el variograma como la media de los cuadrados de las diferencias entre pares de muestras separados por una distancia h . El uso de variogramas permite analizar el grado de independencia de los datos en el espacio geométrico y las zonas de influencia de cada dato. Existen tres tipos de variogramas: variograma teórico, variograma experimental, variograma ajustado o modelo. En la práctica, el análisis estructural está compuesto por dos fases ([Haining 2003](#)):

- El cálculo del variograma experimental.
- El ajuste a este de un modelo teórico.

1.3.1 Variograma experimental

El variograma experimental proporciona una idea inicial de la variabilidad espacial de los datos, siendo el más idóneo para representar u obtener una estructura clara (Cassiraga 2007). Se realiza a partir de parejas de datos de las variables muestreadas y preferiblemente en una dirección. Según (Krajewski and Gibbs 1993) para el cálculo del variograma experimental se debe tener en cuenta los siguientes parámetros, en la Figura 2 se representan gráficamente:

- **La dirección** en la que será calculado el variograma, dos ángulos α y β que definen una dirección en el espacio con tolerancias angulares $d\alpha$ y $d\beta$ respectivamente.
- **El incremento** es la distancia a la que se calcularán los puntos del variograma experimental.
- **Tolerancia del incremento** corresponde a la tolerancia en la separación, de manera que los puntos puedan encontrarse a una distancia mayor o menor al paso.
- **Ancho de banda** representa la distancia máxima a que pueden estar alejados los segundos puntos del par con respecto a la línea que define la dirección de cálculo.
- **Tolerancia angular** corresponde al ángulo dentro del cual se considera válido un punto para el cálculo de la diferencia.
- **Profundidad / elevación** corresponde a la dirección, medida en el plano vertical del azimuth, en la que se calcula el variograma.

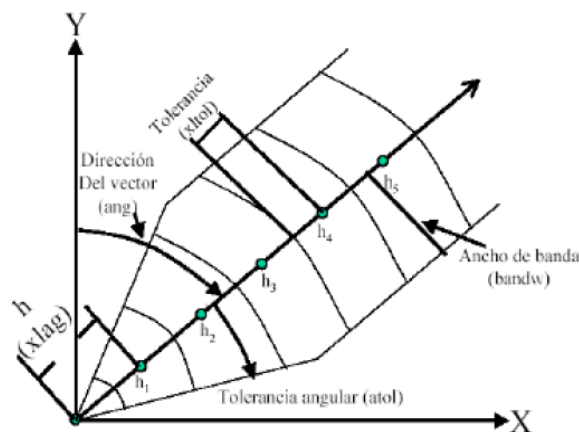


Figura 2: Parámetros para el cálculo del variograma experimental. Tomado de (Suarez 2006).

El cálculo del variograma experimental depende de la distancia entre los puntos establecida previamente, el proceso consiste en tomar todos los pares de puntos que tengan la distancia *lag* entre ellos y aplicar la fórmula del variograma experimental $\gamma(h)$. Finalmente se representan gráficamente los valores obtenidos de $\gamma(h)$ en función de *h* como se muestra en la Figura 3.

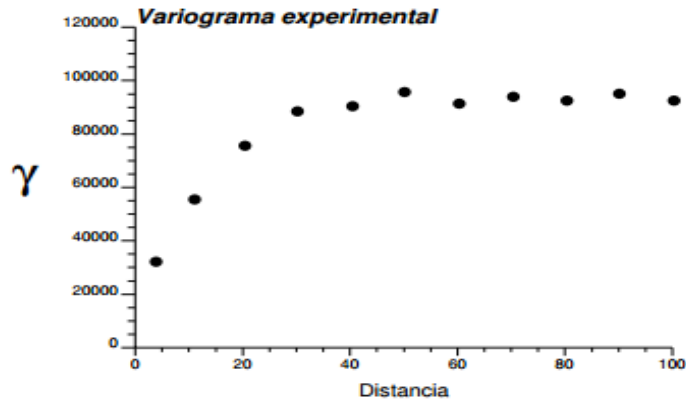


Figura 3: Representación del variograma experimental. Tomado de (Cassiraga 2007).

1.3.2 Variograma ajustado o modelo

El variograma experimental obtenido no es utilizado en el proceso de estimación. Se ajusta un modelo de variograma, definido en todas las direcciones del espacio y para todas las distancias, en torno al variograma experimental obtenido, como se muestra en la Figura 4. Se usará este modelo como si fuera el variograma de la función aleatoria que representa la variable en estudio.

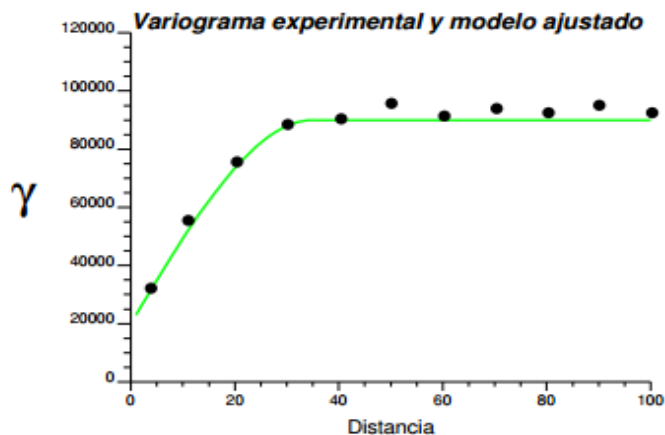


Figura 4: Representación de un variograma ajustado a partir de un variograma experimental. Tomado de (Cassiraga 2007).

Según (Journel and Huijbregts 1978; Krajewski and Gibbs 1993) el variograma ajustado posee parámetros que caracterizan tres elementos importantes en la variabilidad de un atributo que son: la discontinuidad en el origen, el valor máximo de variabilidad y el área de influencia de la correlación. Estos parámetros se muestran también en la Figura 5.

- **Efecto Pepita**

El efecto pepita (C_0) representa la discontinuidad en el variograma para distancias que sean menores que la menor distancia dada entre los puntos muestrales. Esta discontinuidad se puede dar también debido a errores en la medición o a una pobre precisión analítica.

- **Meseta**

La meseta (C) es el valor máximo que alcanza el variograma cuando la variable es estacionaria. Teóricamente, la meseta coincide con el valor de la varianza y por tanto un buen estimador de la misma será la varianza experimental de los datos. Una meseta baja indica una pequeña cantidad de variabilidad en la muestra observada, y una alta meseta indica una gran cantidad de variabilidad observada.

- **Alcance**

El alcance (a) es la distancia en la cual las muestras se presentan independientes una de otra. Es descrito como una medida del área de influencia de la muestra, debido a que el mismo es la distancia en alguna dirección sobre la cual los datos son correlacionados.

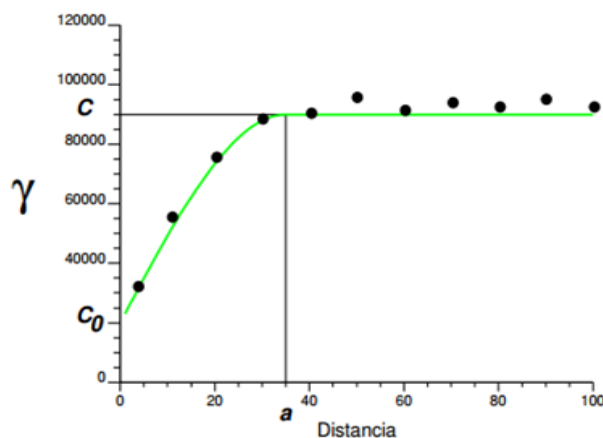


Figura 5: Parámetros del variograma ajustado. Tomado de (Cassiraga 2007).

1.3.3 Modelos de variogramas

Los modelos teóricos de variogramas son funciones matemáticas, las cuales por lo general describen una curva en un plano. Estas funciones matemáticas son utilizadas para interpretar los posibles patrones de correlación espacial y para la asignación de pesos en los métodos de estimación geoestadísticos. Según (Armstrong 1998) los principales modelos teóricos de variogramas utilizados en sistemas geológico-mineros se mencionan a continuación con sus respectivas ecuaciones donde:

h : distancia

a : alcance

C : meseta

C_0 : efecto pepita

Tabla 1: Ecuaciones de los modelos de variogramas.

Modelos de variogramas	Ecuación
Modelo efecto pepita	$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h = 0 \\ 1 & \text{para los otros casos} \end{cases}$
Modelo esférico	$\gamma(h) = \begin{cases} C + C_0 * \left(1.5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) & \text{para } h < a \\ C + C_0 & \text{para } h \geq a \end{cases}$
Modelo exponencial	$\gamma(h) = C + C_0 * \left(1 - e^{-\frac{3h}{a}} \right)$
Modelo gaussiano	$\gamma(h) = C + C_0 * \left(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right)$
Modelo lineal	$\gamma(h) = C + C_0 * \frac{h}{a}$

Modelo potencia	$\gamma(h) = C_0 + \frac{C}{a} * h^\alpha$
Modelo efecto hueco	$\gamma(h) = C + C_0 * \left(1 - \frac{a * \text{sen} \left(\pi * \frac{h}{a}\right)}{\pi * h}\right)$
Modelo cúbico	$\gamma(h) = \begin{cases} C + C_0 * \left(7 \left(\frac{h}{a}\right)^2 - 8.75 \left(\frac{h}{a}\right)^3 + 3.5 \left(\frac{h}{a}\right)^5 - 0.75 \left(\frac{h}{a}\right)^7\right) & \text{para } h < a \\ C + C_0 & \text{para } h \geq a \end{cases}$
Modelo penta-esférico	$\gamma(h) = \begin{cases} C + C_0 * \left(1.875 \left(\frac{h}{a}\right) - 1.25 \left(\frac{h}{a}\right)^3 + 0.375 \left(\frac{h}{a}\right)^5\right) & \text{para } h < a \\ C + C_0 & \text{para } h \geq a \end{cases}$

1.4 Análisis de las soluciones existentes

El análisis estructural es una de las principales operaciones realizada por sistemas informáticos geológicos-mineros con el objetivo de describir los patrones de correlación espacial de los ensayos geoquímicos y estimar los recursos minerales con mayor precisión. Los sistemas informáticos con estas características más utilizados en Cuba son:

- CAE-Studio 3, antiguamente conocido como Datamine 3.
- Geovia-Gems, antiguamente conocido como GEMCOM-Gems.
- Isatis
- SGeMS¹

Los sistemas CAE-Studio 3 y GEOVIA-Gems están especializados en las operaciones mineras y solo utilizan los variogramas para la estimación de recursos minerales. Los sistemas Isatis y SGems son especializados para las operaciones geoestadísticas, siendo Isatis el sistema más utilizado del mundo. De los sistemas informáticos antes mencionados, solo el sistema SGems tiene licencia de código abierto, lo cual permite analizar más a fondo sus funcionalidades. El resto de los sistemas tienen licencias de

¹ SGeMS: Software de Modelado Geoestadístico de Stanford (The Stanford Geostatistical Modeling Software).

carácter privativo y los costos de las mismas son elevados por lo cual no se logró obtener información de los procesos que realizan, además es imposible acceder a su código y en la bibliografía existente no explica cómo se realizan estos procesos.

Todos los sistemas mencionados anteriormente tienen como característica principal que utilizan el variograma como herramienta fundamental para determinar los posibles patrones de correlación espacial. Otra característica importante es que no todas utilizan los mismos modelos de variogramas teóricos para ajustar los variogramas experimentales, siendo los modelos pepita, esférico, exponencial y gaussiano los coincidentes en estos sistemas.

1.5 Conclusiones Parciales

Luego de finalizar el presente capítulo se puede concluir lo siguiente:

- Los métodos de estimación geoestadística permiten obtener buenos resultados en las estimaciones de recursos minerales, pero necesitan utilizar el variograma para asignarle pesos a los valores muestreados en dependencia de su correlación espacial.
- Después de realizar un análisis de la bibliografía especializada en la Geoestadística y revisar las principales soluciones existentes, se determinó que para realizar una buena estimación de recursos minerales es necesario realizar un análisis estructural de las variables muestreadas y se debe utilizar el variograma para determinar los posibles patrones de correlación espacial.
- El análisis de las principales soluciones existentes permitió identificar las principales características y funcionalidades comunes entre estos sistemas para la creación y ajuste de variogramas experimentales y ajustados.
- El sistema SGems, aunque actualmente se encuentre discontinuado su desarrollo, fue el referente fundamental para el análisis de las principales funciones matemáticas utilizadas para la creación de variogramas ajustados, el mismo es de código abierto y está desarrollado con tecnologías similares a las utilizadas por el grupo de desarrollo del proyecto Sistema Minero Cubano.

Capítulo II: Presentación de la propuesta de solución de la herramienta para graficar variogramas experimentales y ajustados.

En el presente capítulo se describe la herramienta desarrollada para graficar variogramas experimentales y ajustados. Primeramente se describe de manera general la herramienta, puntualizando sus cuatro pasos fundamentales utilizados para la creación de los variogramas experimentales. Posteriormente se menciona la metodología de desarrollo de software, las herramientas, tecnologías utilizadas para la construcción de la herramienta y por último se explican a través de diagramas los flujos de trabajo de la metodología utilizada.

2.1 Descripción de la propuesta de solución

La herramienta desarrollada tiene como objetivo fundamental, describir gráficamente los patrones de continuidad espacial de un yacimiento mineral a partir de los datos geoquímicos muestreados. La misma no utiliza base de datos e importa sus datos a partir de ficheros de texto. Los datos importados se corresponden a variables medidas en una posición espacial. A partir de estos datos importados, el sistema realiza un análisis estadístico básicos de los mismos, posteriormente se puede calcular el variograma experimental a partir de los parámetros configurados por el usuario y por último se puede realizar el ajuste del variograma experimental a partir de los modelos teóricos de variogramas definidos anteriormente en el Capítulo 1. En la Figura 6, se muestra un esquema que muestra el flujo de trabajo básico de la aplicación desarrollada.

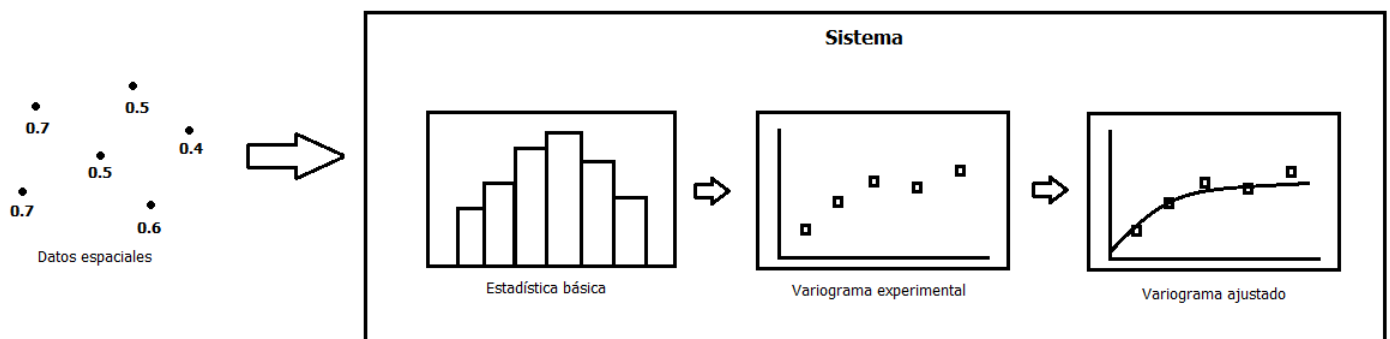


Figura 6: Esquema de la propuesta de solución.

Capítulo II: Presentación de la propuesta de solución de la herramienta para graficar variogramas experimentales y ajustados

El propósito fundamental de la propuesta solución es graficar variogramas experimentales y realizar el ajuste de los mismos a partir de modelos de teóricos. Antes de graficar un variograma experimental es necesario calcular los valores del mismo utilizando la ecuación de variograma descrita anteriormente en el Capítulo 1. Para calcular el variograma experimental se definió un procedimiento compuesto de cuatro pasos, el cual es ejemplificado gráficamente en el esquema de la Figura 7 y cuyos pasos se describen a continuación.

- Paso 1.** Se forman todas las parejas de muestras posibles a partir de los datos espaciales importados.
- Paso 2.** Se filtran todas las parejas de muestras que estén separadas a una cierta distancia y que se encuentren en una misma dirección del espacio.
- Paso 3.** Se calculan todos los valores de la función variograma en dependencia de la distancia de incremento.
- Paso 4.** Se grafican los valores del variograma experimental en correspondencia con la distancia del incremento.

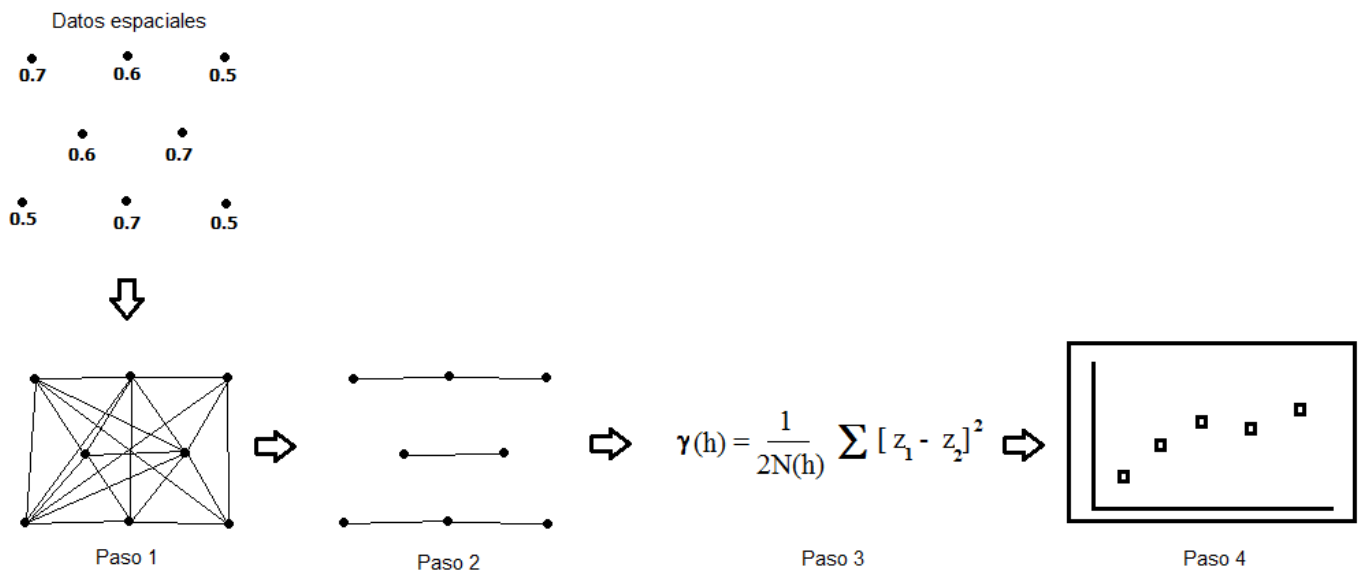


Figura 7: Esquema de pasos para graficar un variograma experimental.

Para el desarrollo de la propuesta de solución se escogieron herramientas y tecnologías compatibles con las utilizadas en el Sistema de Análisis y Modelado de Yacimientos Minerales (Syam) del proyecto Sistema Minero Cubano. Esto permite una posible integración de las funcionalidades de la herramienta desarrollada con el sistema Syam. A continuación se describen la metodología de desarrollo de software empleada, así como las principales herramientas:

Proceso Unificado Ágil (AUP)

La metodología de desarrollo de software Proceso Unificado Ágil (AUP), permite un desarrollo iterativo e incremental, dirigido por casos de usos y centrado en una arquitectura robusta (Figueroa, Solís et al.). Esta metodología es una versión compacta de la metodología RUP, la cual utiliza solamente los artefactos necesarios para el desarrollo de proyectos pequeños, como es el caso de la propuesta de solución.

Lenguaje de modelado

Para el desarrollo de la propuesta de solución se utilizó el lenguaje de modelado UML² en su versión 2.0, el mismo es un lenguaje gráfico que permite visualizar, especificar, construir y documentar un sistema de software. Este lenguaje ofrece un estándar para modelar los principales artefactos de un sistema, incluyendo aspectos conceptuales, tales como procesos de negocios, funciones del sistema y aspectos concretos como expresiones de lenguajes de programación, esquemas de bases de datos y componentes de software reutilizables (Booch, Rumbaugh et al. 1999).

Herramienta CASE³

Las herramientas CASE permiten organizar y manejar la información de un proyecto informático, permitiéndole a los participantes del proyecto que los sistemas se tornen más flexibles y comprensibles. De las herramientas CASE existentes se utilizó para el desarrollo de la propuesta de solución *Visual Paradigm* en su versión 8.0, la cual fue creada para soportar el ciclo completo de vida del proceso de desarrollo de software, permitiendo la captura de requisitos, análisis, diseño e implementación. Permite

² UML: Lenguaje Unificado de Modelado (Unified Modeling Language).

³ CASE: Ingeniería de Software Asistida por Computadora (Computer Aided Software Engineering).

realizar ingeniería directa e inversa, además de que sus diseños son centrados en casos de usos y enfocados al negocio (López 2012).

Lenguaje de programación C/C++

El lenguaje de programación C/C++ permite varios paradigmas de programación como la estructurada, la orientada a objetos y la genérica. Este lenguaje permite la reutilización de varias bibliotecas de clases empleadas en los campos de la Geometría Computacional y la Estadística. El mismo es utilizado en el sistema Syam desarrollado en el proyecto Sistema Minero Cubano.

El C/C++ se compila y produce un código máquina nativo, lo que le permite mayor rapidez en la ejecución de las operaciones, siendo unos de los lenguajes más utilizados en sistemas de análisis y procesamiento. Otra característica importante es que permite un desarrollo multiplataforma y el código fuente puede ser compilado utilizando compiladores de código abierto o privativo.

Framework de desarrollo

Para el desarrollo de la aplicación se utilizó el framework de desarrollo *Qt Framework* en su versión 5.4.1. Este *framework* es utilizado generalmente para la creación de aplicaciones en C/C++ con interfaz de usuario. El mismo cuenta con una amplia comunidad internacional de desarrollo, ya que se utiliza fundamentalmente para el entorno de escritorio *KDE* utilizado por varias distribuciones de *GNU/Linux*.

Producto a la utilización del *Qt Framework* se decidió utilizar la biblioteca de clases *QCustomPlot* como proveedora de los componentes gráficos necesarios para la graficación de variogramas experimentales y ajustados. También para el desarrollo de la propuesta de solución se utilizó la biblioteca de clases *glm* para el cálculo de funciones matemáticas y para el trabajo con vectores y matrices que se encuentran en *OpenGL Mathematics*.

Entorno de desarrollo integrado

El entorno integrado de desarrollo utilizado para la codificación de la solución fue *QtCreator* en su versión 3.3.1. El *QtCreator* forma parte de las herramientas de desarrollo propuestas por el *Qt Framework*, el mismo permite la integración de varias tecnologías desarrolladas en C/C++ y el *framework* utilizado. Este

permite una fácil integración entre el marco de trabajo y el lenguaje de programación, lo que facilita la implementación de la investigación.

2.2 Artefactos generados por la metodología de software utilizada

La metodología empleada es un proceso simplificado de RUP⁴ por lo que no está obligado a hacer uso de todas las actividades y entregables definidos, sino que se puede configurar el proceso para que se adapte únicamente a aquellas partes que se consideren importantes, por lo que se decidió realizar los siguientes flujos de trabajo.

2.2.1 Modelo de dominio

El modelo de dominio es una representación de clases relacionadas entre sí, que permiten representar los conceptos más significativos del problema a resolver. En el siguiente modelo de dominio se capturan los conceptos más importantes en el contexto del sistema. Su objetivo es comprender y describir las clases más significativas del sistema y se toma como el punto de partida para el diseño de éste. De esta manera el mapa de conceptos del modelo de dominio constituye una primera versión del sistema. A continuación se muestra el diagrama de dominio de la investigación en la Figura 8.

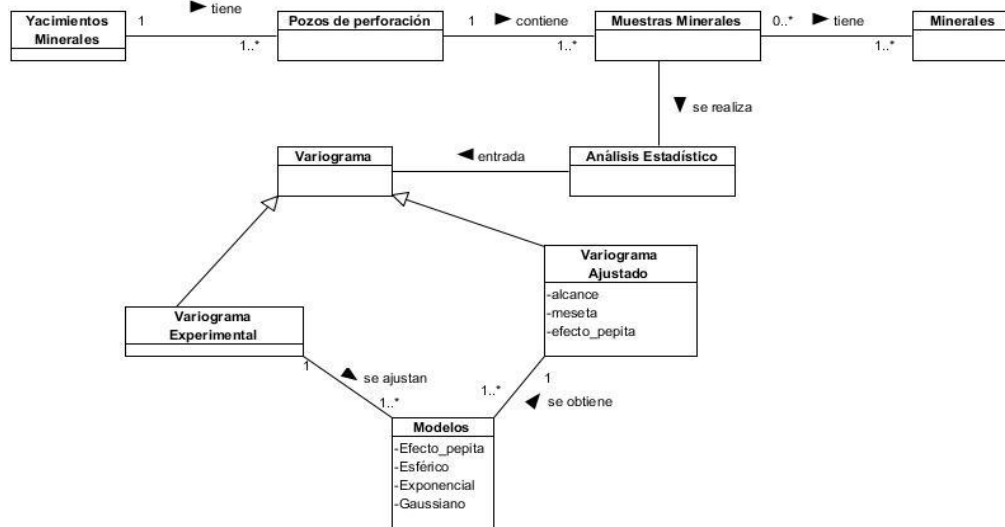


Figura 8: Modelo de dominio.

⁴ RUP: Proceso de Desarrollo Unificado (Rational Unified Process).

En este diagrama se refleja todo el proceso llevado a cabo para la construcción del variograma experimental y el ajuste del mismo a partir de los modelos teóricos. A través de las relaciones entre las clases se define el flujo de estos procesos. Los números en las relaciones muestran la cantidad de instancias de una clase a otra.

A continuación se describen las clases asociadas al dominio observadas en la figura anterior.

2.2.1.1 Descripción de las clases del dominio

Yacimientos minerales: la clase “Yacimientos minerales” representa el concepto de una acumulación natural de minerales en la corteza terrestre, en forma de uno o varios cuerpos minerales, los cuales en este estado, pueden ser objeto de extracción y explotación industrial.

Pozos de perforación: la clase “Pozos de perforación” representa el resultado de una excavación que se realiza en un terreno utilizando métodos mecánicos, obteniéndose muestras de roca para su posterior análisis.

Muestras minerales: la clase “Muestras minerales” representa el concepto de una porción del subsuelo extraída de un yacimiento mineral con el objetivo de estudiar detalladamente una zona mineral.

Minerales: la clase “Minerales” representa el concepto de una sustancia natural, homogénea, inorgánica, de composición química definida. Pueden hallarse en la superficie de la tierra formados de manera espontánea y resulta una parte útil de una explotación minera.

Análisis estadístico: la clase “Análisis estadístico” representa el análisis que emplea técnicas estadísticas para interpretar datos, ya sea para ayudar en la toma de decisiones o para explicar los condicionantes que determinan la ocurrencia de algún fenómeno.

Variograma: la clase “Variograma” representa en concepto una función que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida, obteniendo como resultado la influencia de los datos a diferentes distancias.

2.2.2 Requisitos del sistema

Los requisitos para un sistema son la descripción de los servicios proporcionados por el sistema y sus restricciones operativas. Representan una condición o capacidad que necesita el usuario para resolver un problema o un objetivo. Además se comportan como características que debe cumplir un sistema para satisfacer una norma o contrato (Sommerville 2011).

2.2.2.1 Requisitos Funcionales

Muestran las funcionalidades que deben satisfacerse para cumplir con las especificaciones del software (Sommerville 2011). Para el desarrollo de la herramienta para graficar variogramas experimentales y ajustados, se definieron a partir de reuniones con integrantes del equipo de desarrollo 13 requisitos funcionales agrupados en 5 casos de uso los cuales se listan a continuación.

RF1 Importar fichero de datos espaciales.

RF2 Pagar tabla de datos espaciales.

RF3 Mostrar valor mínimo de una variable.

RF4 Mostrar valor máximo de una variable.

RF5 Mostrar valor medio de una variable.

RF6 Mostrar varianza de una variable.

RF7 Mostrar desviación estándar de una variable.

RF8 Mostrar histograma de una variable.

RF9 Crear posibles pares de datos existentes.

RF10 Filtrar los pares de datos según la dirección y la distancia de incremento.

RF11 Calcular los gamma.

RF12 Graficar los puntos del variograma experimental.

RF13 Ajustar variograma experimental.

2.2.2.2 Requisitos no funcionales

Son aquellos requerimientos que no se refieren directamente a las funciones específicas que proporciona el sistema, sino a las propiedades emergentes de éste como la fiabilidad, el tiempo de respuesta y la capacidad de almacenamiento (Sommerville 2011). Los requisitos no funcionales del sistema son:

Requerimientos de usabilidad

- El sistema debe poseer una interfaz entendible, de fácil acceso y que facilite la localización de las diferentes funcionalidades presentes en ella.

Apariencia o interfaz externa

- El sistema debe poseer una apariencia profesional con un diseño gráfico sencillo que facilite la localización de las funciones del sistema.

Requerimientos de software del sistema

- Las computadoras que utilizarán el software deben tener instalado Windows 7, Windows 8 y cualquier distribución de GNU/LINUX basada en Debian.

Requerimientos de hardware

- Las computadoras que utilizarán el software deberán contar con un microprocesador con velocidad de procesamiento igual o superior a un 1 GHz, memoria RAM de 256 o mayor y el disco duro que posea debe tener como mínimo 16 MB.

2.2.3 Modelo de casos de uso

El modelo de casos de uso describe la funcionalidad propuesta del sistema. Según (Sommerville 2011) un modelo de caso de uso es un modelo de las funciones previstas del mismo y su entorno, que sirve como un contrato entre el cliente y los desarrolladores. Su objetivo fundamental es comunicar el comportamiento del sistema al cliente o usuario, representando las relaciones existentes entre actores y casos de uso.

Caso de Uso

Un caso de uso representa una unidad discreta de interacción entre este y un usuario (humano o máquina). Especifican una secuencia de acciones que deben devolver al usuario un resultado de valor.



2.2.3.1 Diagrama de casos de uso

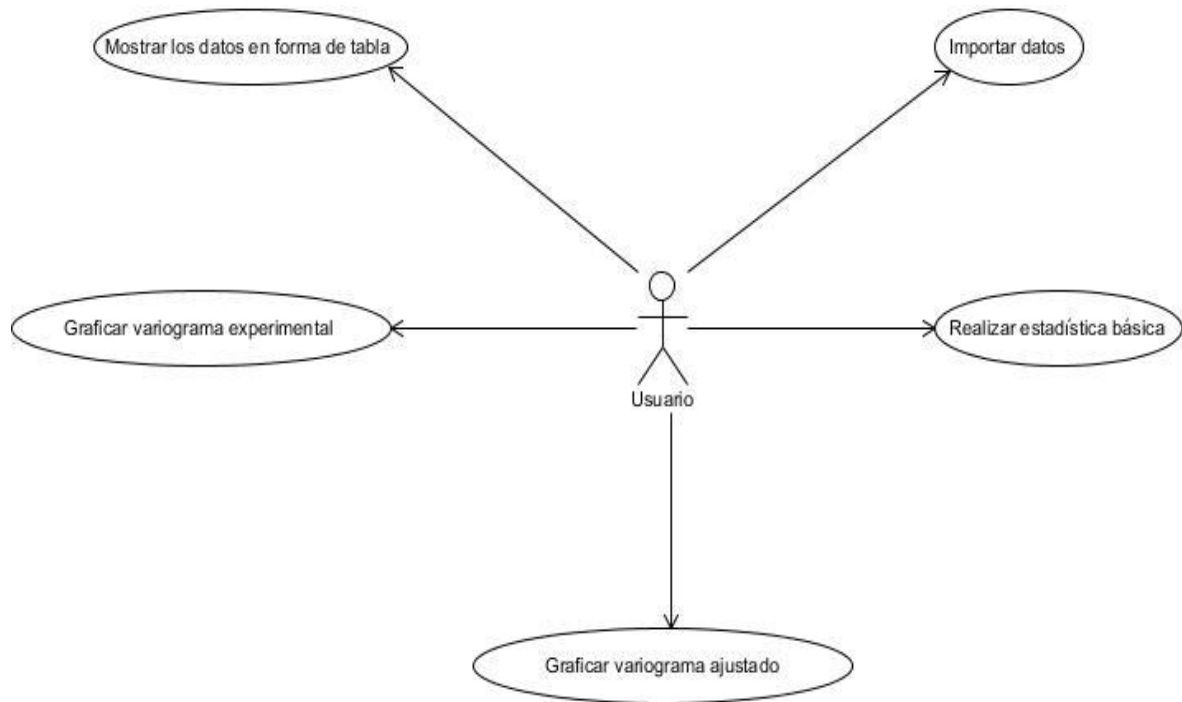


Figura 9: Diagrama de casos de uso.

La Figura 9 muestra los 5 casos de uso del sistema, de ellos 2 son arquitectónicamente significativos (Graficar variograma experimental y Graficar variograma ajustado). El actor Usuario podrá realizar todas las funcionalidades del sistema.

2.2.3.2 Descripción de los casos de uso del sistema

Mediante la descripción de los casos de uso del sistema el actor lleva a cabo una detallada secuencia de eventos para terminar un determinado proceso a través del sistema. La siguiente tabla describe los procesos de graficar un variograma experimental omnidireccional y direccional.

Tabla 2: Descripción del CU Graficar variograma experimental.

Caso de uso	Graficar variograma experimental
Objetivo	Mostrar al usuario una gráfica con el variograma experimental calculado.

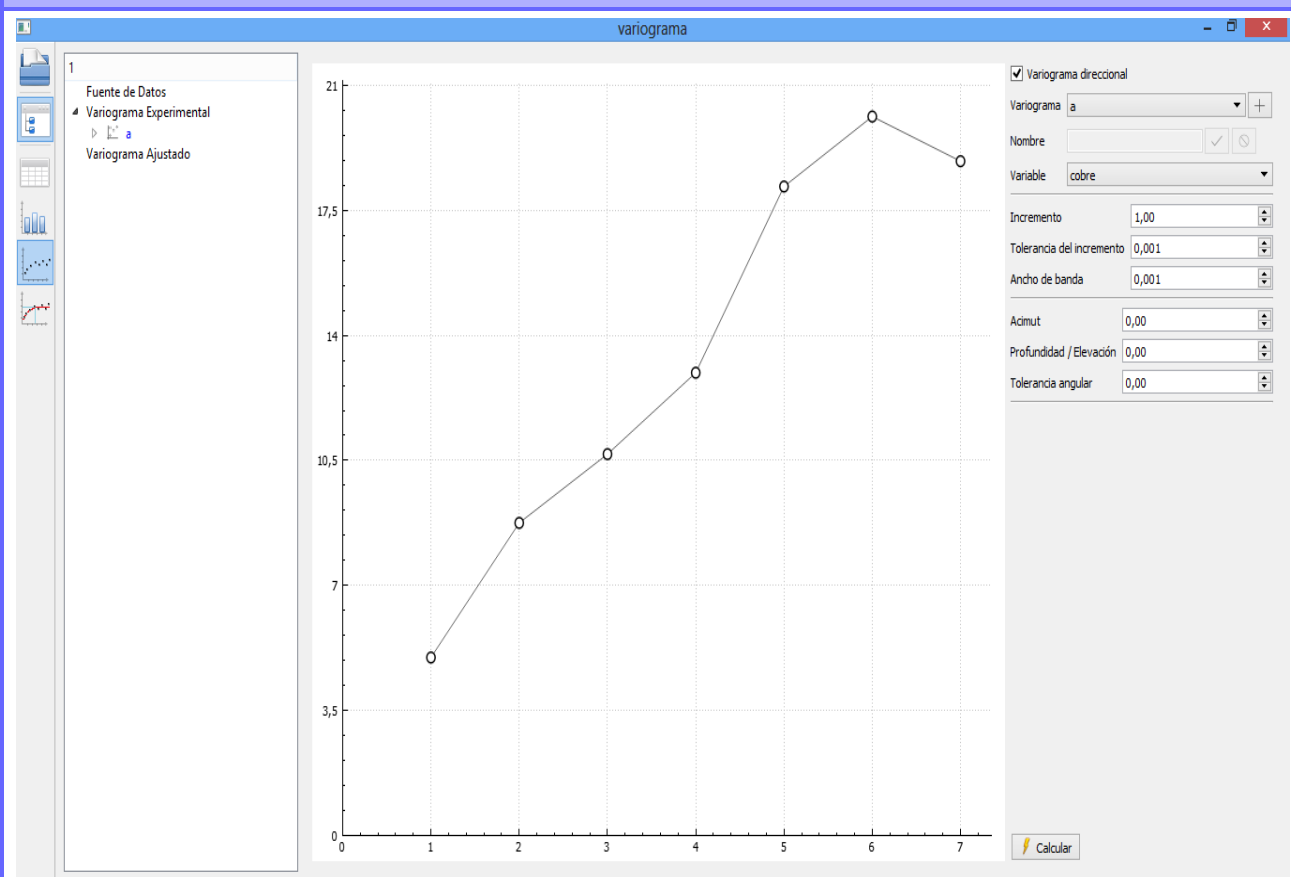
Capítulo II: Presentación de la propuesta de solución de la herramienta para graficar variogramas experimentales y ajustados

Actores	Usuario	
Resumen	<p>El CU se inicia cuando el usuario da clic en el botón “Variograma Experimental” y realiza alguna de las siguientes operaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Graficar variograma experimental omnidireccional: cuando el usuario deshabilita la opción “Variograma direccional”. • Graficar variograma experimental direccional: cuando el usuario da clic en el botón “Variograma experimental” de la barra de herramienta. <p>Termina cuando se muestra una gráfica con el variograma experimental escogido por el usuario.</p>	
Complejidad	Alta	
Prioridad	Crítico	
Precondiciones	<ul style="list-style-type: none"> • Que el sistema tenga los datos cargados. • Que todos los campos aparezcan deshabilitados excepto el del nombre. 	
Pos condiciones	<p>En dependencia de la acción del usuario:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se grafica un variograma experimental omnidireccional. • Se grafica un variograma experimental direccional. 	
Flujo de eventos		
Flujo básico Graficar variograma experimental		
	Actor	Sistema
1	Selecciona el botón “Variograma Experimental”.	
2		Muestra la interfaz para que el usuario seleccione el variograma experimental que desea graficar.
3	<p>Selecciona cual acción realizar:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Graficar variograma experimental omnidireccional. • Graficar variograma experimental direccional 	
4	Inserta un nombre para el variograma que desea graficar y da clic en el botón “Añadir”.	
5		Añade el nuevo variograma en la “Vista de objetos”.

Capítulo II: Presentación de la propuesta de solución de la herramienta para graficar variogramas experimentales y ajustados

6		Habilita los campos correspondientes para graficar el variograma experimental.
7	Selecciona la variable que desea graficar.	
8	Llena los campos disponibles del variograma experimental y selecciona el botón "Calcular".	
9		Muestra la gráfica del variograma experimental calculado y termina el caso de uso.

Prototipo de Interfaz



Relaciones	CU Incluidos	No procede
	CU Extendidos	No procede
Asuntos pendientes	No procede	

2.2.4 Diagrama de paquetes

El diagrama de paquetes muestra cómo un sistema está dividido en agrupaciones lógicas mostrando las dependencias entre esas agrupaciones (Larman 1999). El diagrama de la Figura 10 muestra una organización lógica de la estructura de la herramienta desarrollada.

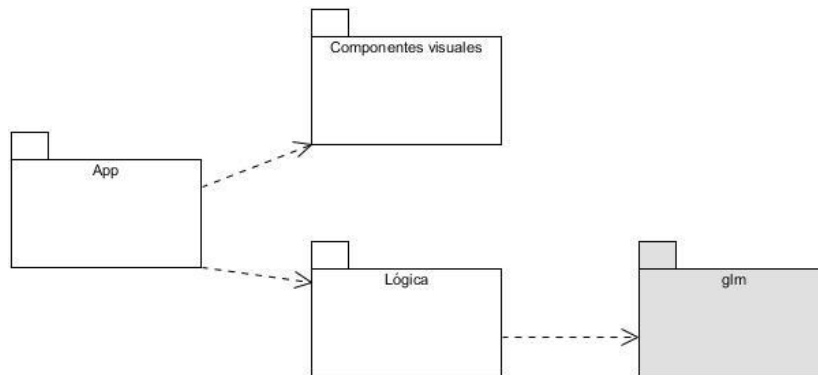


Figura 10: Diagrama de paquetes.

Como se puede ver en la figura anterior el sistema desarrollado se estructuró de forma tal que fuera compatible con la estructura de Syam donde la lógica fue encapsulada en 4 paquetes. Primeramente en el paquete **App** van a estar contenidas las clases: formulario principal y controladora principal. En el paquete **Componente Visual** se encuentran todas las interfaces de usuario del sistema utilizando el *framework Qt* para la visualización de los datos y graficación de variogramas. Por su parte en el paquete **Lógica** se encuentran las clases principales para la construcción del variograma. Por último **glm** que no es más que un conjunto de clases de funciones matemáticas que permiten el trabajo con matrices y vectores en *OpenGL Mathematics*.

2.2.5 Modelo de diseño

El propósito y objetivo del análisis debe alcanzarse de algún modo en todo proyecto. La manera exacta de ver y emplear el análisis puede diferir de un proyecto a otro y una de las variantes es no utilizar en absoluto el modelo de análisis para describir los resultados del análisis. Además según (Pressman 2005) en el proyecto se analizan los requisitos como parte integrada de la captura de requisitos o en el diseño, por lo que se puede pasar directamente al modelo de diseño. En este es donde se modela el sistema y se encuentra su forma para que soporte todos los requisitos, incluyendo los no funcionales y las restricciones que se le suponen.

2.2.5.1 Diagrama de clases del diseño

Un diagrama de clases muestra un conjunto de clases, interfaces y colaboraciones, así como sus relaciones. Los diagramas de clase del diseño pueden realizarse globalmente o por casos de uso, en el sistema informático del trabajo de diploma se realizó por casos de uso quedando 5 diagramas de clases del diseño de los cuales 2 son significativos para el sistema: Graficar variograma experimental y Graficar variograma ajustado. En la Figura 11 se muestra el diagrama de clases del diseño del CU Graficar variograma experimental en el cual solo se mostrará el esquema sin atributos, ni métodos para una mejor comprensión de las clases.

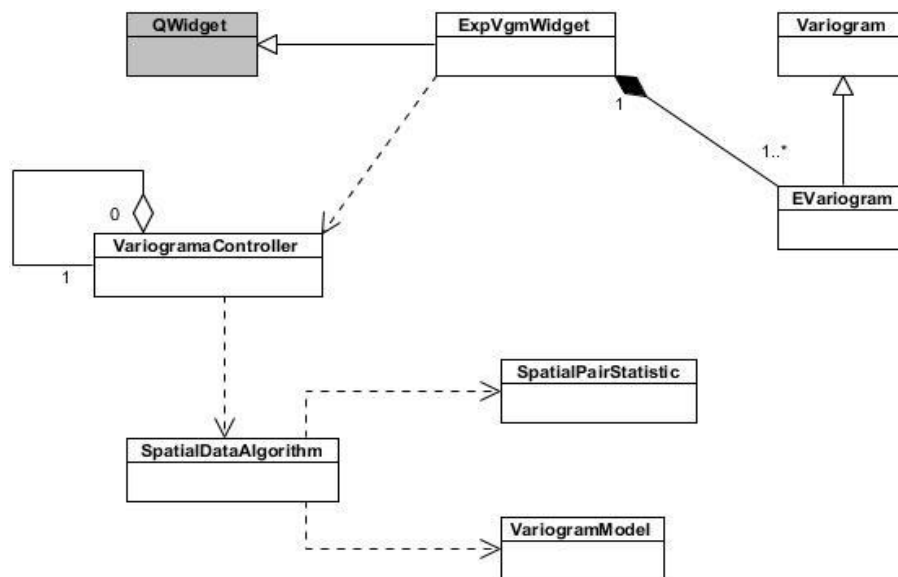


Figura 11: Diagrama de clases del diseño Variograma Experimental.

Se utilizaron buenas prácticas de codificación basadas en los patrones de diseño *GRASP*⁵ y *GOF*⁶ siendo estos últimos de mayor interés para la presente investigación. Estos patrones se clasifican en 3 grandes categorías basadas en su propósito: creacionales, estructurales y de comportamiento, los cuales se pueden evidenciar en el diagrama de clases del diseño anterior.

⁵ GRASP: Patrones de Asignación de Responsabilidades (General Responsibility Assignment Software Patterns).

⁶ GOF: Banda de cuatro (Gang of Four).

En el actual trabajo se utilizaron 4 patrones GOF: Singleton, Fachada, Observador y Modelo-Vista-Controlador. De estos solo se pueden evidenciar dos en la clase **VariogramaController**, primeramente se encuentra Fachada, utilizada como punto de acceso al resto de las clases y funcionalidades del sistema. Luego se encuentra el patrón Singleton que representa la estructura única de la clase a través de una sola instancia de esta, la instancia se almacena en un atributo estático de la clase y se accede a ella a través del método Instance, como se muestra en la Figura 12.

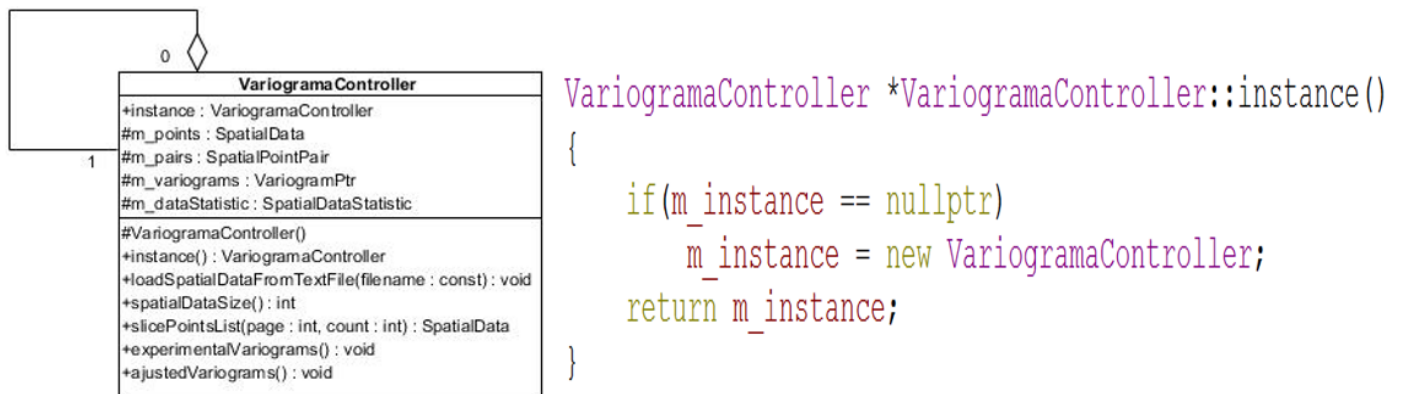


Figura 12: Clase VariogramaController y un fragmento de código donde se evidencia el patrón de diseño Singleton.

2.2.6 Diagrama de componentes

Representa cómo un sistema de software es dividido en componentes y muestra las dependencias entre estos. Este tipo de diagrama prevalece en el campo de la arquitectura de software pero pueden ser usados para modelar y documentar cualquier arquitectura de sistema. En el diagrama de componentes de la presente investigación todo el código fuente está empaquetado en un solo componente de tipo ejecutable, donde este ejecutable va depender de bibliotecas de clases externas del *framework Qt*. A continuación se muestra el diagrama de componentes en la Figura 13.

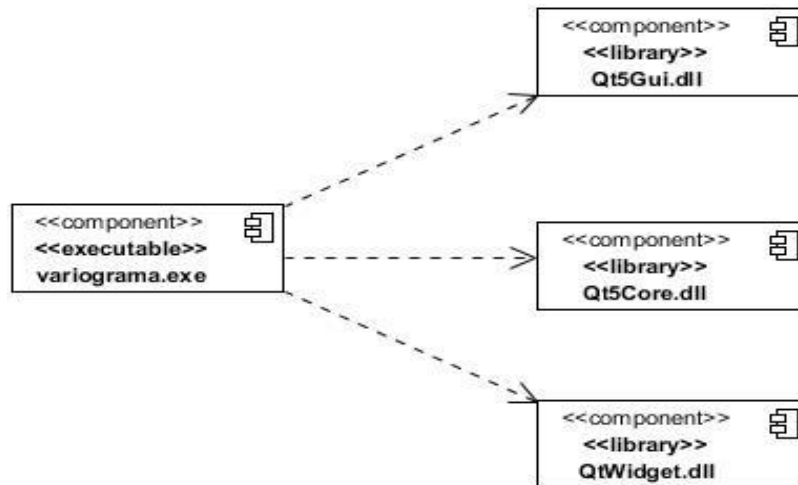


Figura 13: Diagrama de componentes.

2.3 Conclusiones parciales

En este capítulo se arribó a las siguientes conclusiones:

- El uso de la metodología de desarrollo de software *AUP* permitió mejorar la organización durante el proceso de elaboración y construcción de la herramienta, ya que se utilizaron los principales flujos de trabajos y artefactos propuestos por la misma. Esta metodología también es utilizada por los miembros del proyecto Sistema Minero Cubano y se puede adaptar en el desarrollo de aplicaciones informáticas pequeñas y medianas.
- La organización lógica de las clases, los paquetes del sistema desarrollado, la utilización del lenguaje de programación C/C++ y del *framework* de desarrollo Qt permitirá una fácil integración con el sistema Syam y con cualquier otro sistema de esta temática que utilice herramientas similares.
- La utilización de los patrones de diseño y del estándar de codificación utilizado en el proyecto Syam permitió una codificación correcta de las clases, un código fuente legible y escalable.



Capítulo III: Resultados y pruebas de la herramienta para graficar variogramas experimentales y ajustados

En el presente capítulo se realizaran una serie de pruebas de software y de comparación con el objetivo de verificar que la herramienta desarrollada satisfaga las necesidades de los usuarios a partir de los requerimientos establecidos. Se reflejan además, los resultados alcanzados en las pruebas realizadas.

3.1 Resultados de la comparación del cálculo de un variograma experimental con un conjunto de datos

En la presente investigación se realizó una comparación entre los valores alcanzados con la herramienta propuesta y los resultados experimentales publicados en la bibliografía especializada. En esta prueba se utilizaron los datos experimentales del libro *Practical Geostatistic 2000*, los cuales se corresponden a los datos simulados de un depósito de hierro, como se muestre en la Figura 14. En el capítulo 9 de este libro, se muestran los valores correspondientes al cálculo del variograma experimental en las direcciones vertical y horizontal, como se muestran en las Tabla 3 y Tabla 4.

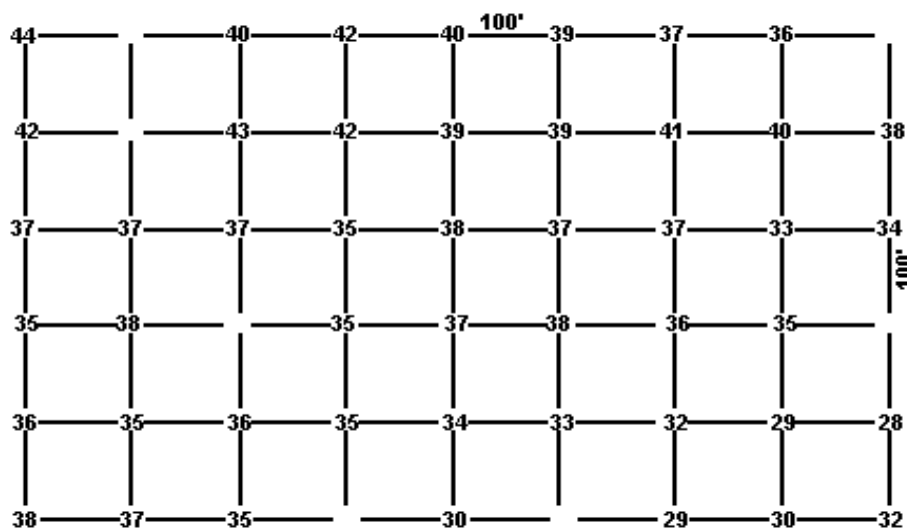


Figura 14: Datos simulados de un depósito de hierro tomados del libro Practical Geostatistic 2000. Tomado de (Clark 1979).

Primeramente se utilizó la herramienta desarrollada para calcular el variograma experimental de los datos mostrados en la Figura 14. En este cálculo se utilizó un incremento de 100 unidades y un acimut de 0°, el cual representa a la dirección vertical. En la Figura 15 se muestra una gráfica del variograma experimental

Capítulo III: Resultados y pruebas de la herramienta para graficar variogramas experimentales y ajustados

utilizando la herramienta desarrollada y en la Tabla 3 se muestran los valores del variograma experimental en correspondencia con el incremento. De forma similar se calculó los valores del variograma experimental utilizando una dirección horizontal con acimut de 90° y un incremento de 100 unidades, cuyos resultados se muestran en la Figura 16 y en la Tabla 4.

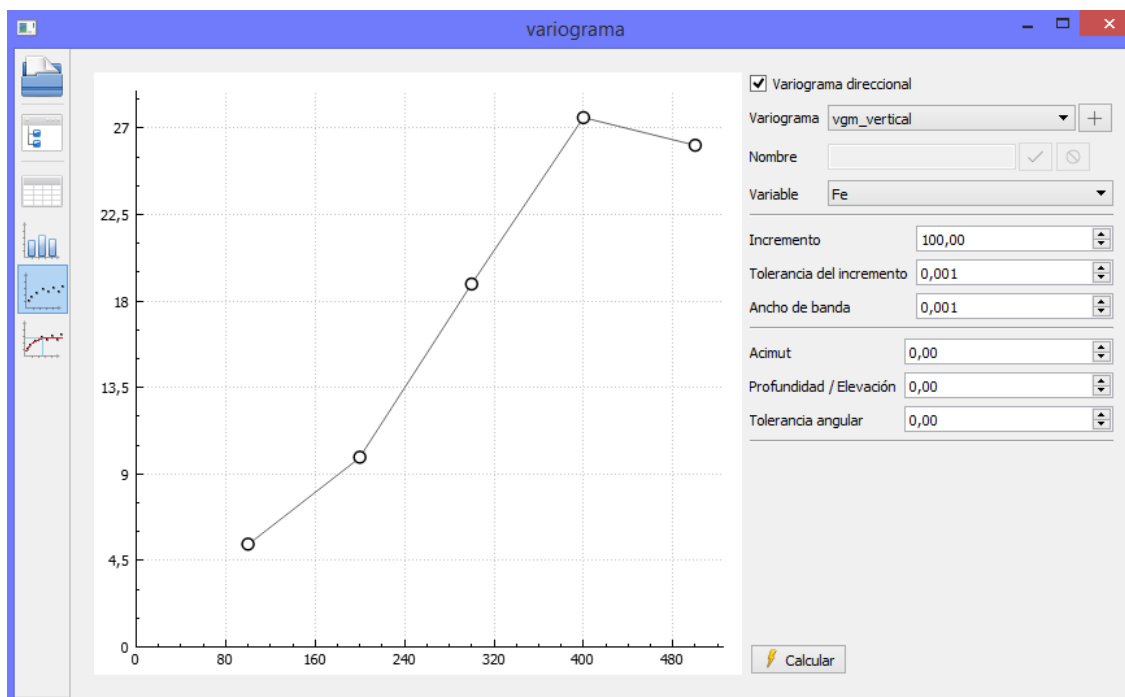


Figura 15: Gráfica del variograma experimental utilizando la herramienta desarrollada utilizando un acimut de 0° .

Tabla 3: Comparación de los resultados del cálculo de los valores de la función variograma experimental utilizando un acimut de 0° .

Incremento	Pares de muestras	Variograma (Libro)	Variograma (Aplicación)
100	36	5.35	5.34722
200	27	9.87	9.87037
300	21	18.88	18.881
400	13	27.54	27.5385
500	5	26.1	26.1

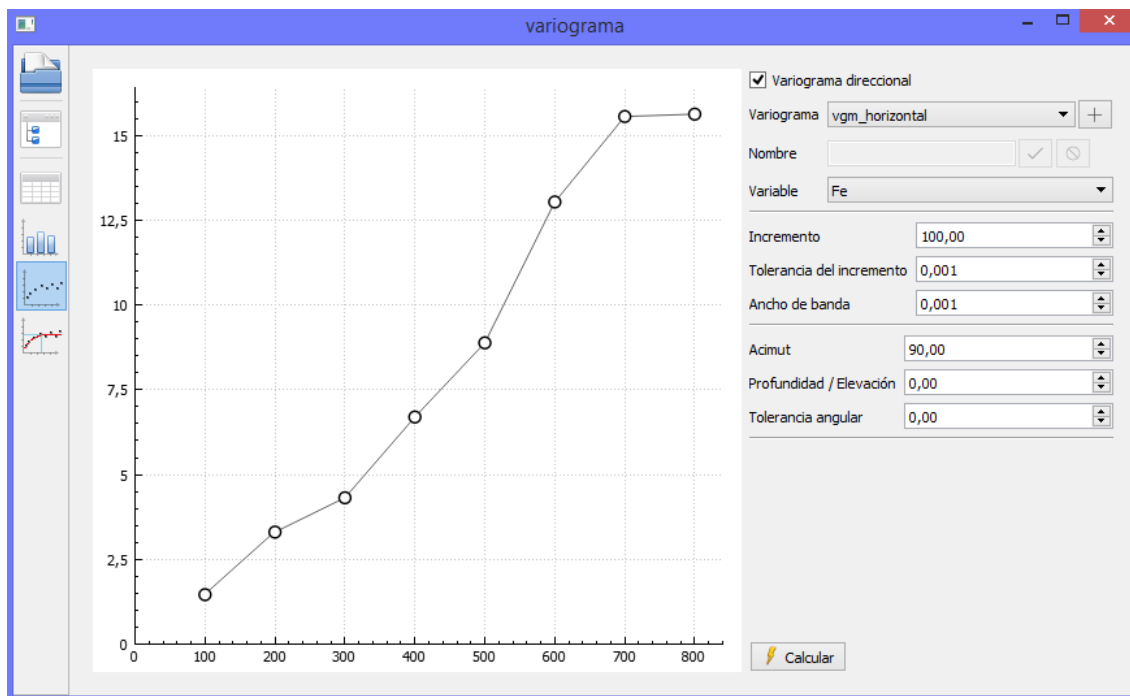


Figura 16: Gráfica del variograma experimental utilizando la herramienta desarrollada utilizando un acimut de 90°.

Tabla 4: Comparación de los resultados del cálculo de los valores de la función variograma experimental utilizando un acimut de 90°.

Incremento	Pares de muestras	Variograma (Libro)	Variograma (Aplicación)
100	36	1.46	1.45833
200	33	3.30	3.30303
300	27	4.31	4.31481
400	23	6.70	6.69565
500	17	8.88	8.88235

Para determinar la veracidad de los datos obtenidos, se utilizó la herramienta estadística GNU- PSP, en la cual se realizó un análisis comparativo de muestras utilizando una correlación de Pearson y una prueba T-Student para muestras pareadas. En estas pruebas se obtuvo una correlación $c = 1$ y una T-Student $t = 0,85$ lo cual muestra que no existen diferencias significativas entre los valores comparados.

3.2 Pruebas de software realizadas al sistema propuesto

Las pruebas de software son un mecanismo vital para la garantía de la calidad del software. A través de las pruebas se puede detectar, documentar y rectificar errores en el sistema que comprometan su funcionalidad, antes de ser liberado a los usuarios finales (Pressman 2005). Además se verifica el cumplimiento de los requisitos funcionales y no funcionales del sistema. Según (Juristo, Moreno Ana et al. 2004) las pruebas fundamentales son denominadas: pruebas de caja blanca y pruebas de caja negra, a continuación se describen:

Las pruebas de caja blanca: son el tipo de pruebas de software que se realiza sobre las funciones internas de un módulo. Las pruebas de caja blanca están dirigidas a las funciones internas por lo cual es necesario conocer la lógica del programa.

Las pruebas de caja negra: son el tipo de pruebas de software que ejercitan los requisitos funcionales desde el exterior del módulo. En este tipo de prueba solo interesa su forma de interactuar con el medio que le rodea por lo que no es necesario conocer la lógica del programa, únicamente la funcionalidad que debe realizar.

3.2.1 Pruebas de caja blanca

Las pruebas de caja blanca se centran en cómo diseñar los casos de prueba atendiendo al comportamiento interno y la estructura del programa. Se comprueban los caminos lógicos del software proponiendo casos de prueba que ejerciten conjuntos específicos de condiciones. (Juristo, Moreno Ana et al. 2004).

De las diferentes técnicas de prueba caja blanca que existen se utilizó la técnica de camino básico. Esta técnica permite obtener una medida de la complejidad lógica de un diseño procedimental y usar esa medida como guía para la definición de un conjunto básico de caminos de ejecución. Los casos de prueba derivados del conjunto básico garantizan que durante la prueba se ejecuta por lo menos una vez cada sentencia del programa (Juristo, Moreno Ana et al. 2004).

Los pasos a realizar para aplicar esta técnica son:

1. Representar el programa en un grafo de flujo.
2. Calcular la complejidad ciclomática.

3. Determinar el conjunto básico de caminos independientes.
4. Derivar los casos de prueba que fuerzan la ejecución de cada camino.

En el siguiente subepígrafe se muestra la prueba de camino básico que se le aplicó al método `makeExperimentalVariogram` que se encuentra en la clase `SpatialDataAlgorithm` de la herramienta desarrollada.

3.2.1.1 Diseño de casos de pruebas para el método `makeExperimentalVariogram`.

```
void SpatialDataAlgorithm::makeExperimentalVariogram(std::shared_ptr<EVariogram> ev, const ListSPP &ld)
{
    ListSPP l;
    ev->clearValues();
    if(!l.empty())
    {
        SpatialPairStatistic stat(l);
        stat.compute();
        float maxlength = stat.max().at(SpatialPairStatistic::Length);
        // verificar si la tolerancia del lag tiene que ser en porcentaje
        float lag = ev->lag();
        while (lag <= maxlength)
        {
            ListSPP ll = findByLag(l, lag, ev->lagTolerance());
            if(!ll.empty())
            {
                ListV values = findValues(ll, ev->variable());
                if(!values.empty())
                {
                    float g = VariogramModel::gamma(values);
                    ev->addValue(lag, g);
                    // prueba de valores
                    std::cout << "lag: " << lag << " | gamma: " << g << " | pairs: " << ll.size() << std::endl;
                }
            }
            lag += ev->lag();
        }
    }
}
```

Figura 17: Código del método para realizar variograma experimental.

Paso 1: Representar el método en un grafo de flujo.

El grafo de flujo se utiliza para representar flujo de control lógico de un programa. Para ello se utilizan los elementos siguientes (Juristo, Moreno Ana et al. 2004) :

- *Nodos*: representan cero, una o varias sentencias en secuencia. Cada nodo comprende como máximo una sentencia de decisión.
- *Aristas*: líneas que unen dos nodos.
- *Regiones*: áreas delimitadas por aristas y nodos. Cuando se contabilizan las regiones de un programa debe incluirse el área externa como una región más.
- *Nodos predicados*: cuando en una condición aparecen uno o más operadores lógicos. Se crea un nodo distinto por cada una de las condiciones simples.

A continuación se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** el grafo que corresponde al método para graficar variograma experimental.

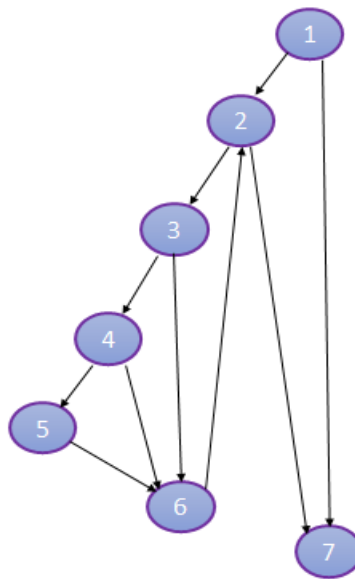


Figura 18: Grafo de flujo del método para realizar variograma experimental.

Paso 2: Calcular la complejidad ciclomática

La complejidad ciclomática se puede calcular de tres formas y estas deben tener el mismo resultado para asegurar que el cálculo de la complejidad sea correcto.

- $V(G) = \text{Número de regiones del grafo.}$
 $V(G) = 5$

- $V(G) = \text{Aristas} - \text{Nodos} + 2$
 $V(G) = 10 - 7 + 2$
 $V(G) = 5$
- $V(G) = \text{Nodos Predicado} + 1$
 $V(G) = 4 + 1$
 $V(G) = 5$

Paso 3: Determinar el conjunto básico de caminos independientes.

Un camino independiente es cualquier camino del programa que introduce, por lo menos, un nuevo conjunto de sentencias de proceso o una condición, respecto a los caminos existentes. En términos del diagrama de flujo, un camino independiente está constituido por lo menos por una arista que no haya sido recorrida anteriormente a la definición del camino.

Tabla 5: Caminos básicos obtenidos del grafo.

No.	Caminos
1	1-2-3-4-5-6-2-7
2	1-2-3-4-6-2-7
3	1-2-3-6-2-7
4	1-2-7
5	1-7

Paso 4: Derivar los casos de prueba que fuerzan la ejecución de cada camino.

Tabla 6: Caso de prueba para el camino básico No.1.

Camino	1-2-3-4-5-6-2-7
Entrada	std::shared_ptr<EVariogram> ev = Puntero que representa la clase Variograma Experimental.

	const ListSPP &ld = Lista de los pares de puntos espaciales.
Resultado esperado	Realizar variograma experimental
Resultado de la prueba	Satisfactorio

Tabla 7: Caso de prueba para el camino básico No. 2.

Camino	1-2-3-4-6-2-7
Entrada	std::shared_ptr<EVariogram> ev = Puntero que representa la clase Variograma Experimental. const ListSPP &ld = Lista de los pares de puntos espaciales.
Resultado esperado	Realizar variograma experimental
Resultado de la prueba	Satisfactorio

Tabla 8: Caso de prueba para el camino básico No. 3.

Camino	1-2-3-6-2-7
Entrada	std::shared_ptr<EVariogram> ev = Puntero que representa la clase Variograma Experimental. const ListSPP &ld = Lista de los pares de puntos espaciales.
Resultado esperado	Realizar variograma experimental
Resultado de la prueba	Satisfactorio

Tabla 9: Caso de prueba para el camino básico No. 4.

Camino	1-2-7
Entrada	std::shared_ptr<EVariogram> ev = Puntero que representa la clase Variograma Experimental. const ListSPP &ld = Lista de los pares de puntos espaciales.
Resultado esperado	Realizar variograma experimental
Resultado de la prueba	Satisfactorio

Tabla 10: Caso de prueba para el camino básico No. 5.

Camino	1-7
Entrada	std::shared_ptr<EVariogram> ev = Puntero que representa la clase Variograma Experimental. const ListSPP &ld = Lista de los pares de puntos espaciales.
Resultado esperado	Realizar variograma experimental
Resultado de la prueba	Satisfactorio

3.2.2 Pruebas de caja negra

La prueba de caja negra permite obtener un conjunto de condiciones de entrada que ejercitan completamente todos los requisitos funcionales de un programa (Juristo, Moreno Ana et al. 2004). En ellas se ignora la estructura de control, concentrándose en los requisitos funcionales del sistema y ejercitándolos. Para la realización de la prueba de caja negra se seleccionó la técnica de partición equivalente.

La técnica de partición equivalente permite examinar los valores válidos e inválidos de las entradas existentes en el software. Descubre de forma inmediata una clase de errores que requerirían la ejecución de muchos casos antes de detectar el error genérico, reduciendo así el número de clases de prueba que hay que desarrollar (Juristo, Moreno Ana et al. 2004). A continuación se muestra el diseño de caso de prueba realizadas al caso de uso “Graficar variograma experimental”.

Casos de pruebas

Sección (SC): Graficar variograma experimental.

Tabla 11: Casos de prueba del CUS Graficar variograma experimental.

Escenario	EC 1.1 Graficar variograma experimental introduciendo los datos correctos.		
Descripción	Se grafica correctamente el variograma experimental.		
Variables	Nombre	V	Letras, números o cualquier combinación de letras y números. Ejemplo: Ana, 4n4, 45@.
	Incremento	V	$X_{min} \leq h \leq X_{max}$
	Tolerancia del incremento	V	$\leq \frac{lag}{2}$
	Ancho de banda	V	$X_{min} \leq h \leq X_{max}$
	Acimut	V	$0^\circ \leq ang \leq 360^\circ$
	Profundidad / Elevación	V	$-90^\circ \leq dip \leq 90^\circ$
	Tolerancia angular	V	$\leq 45^\circ$
Respuesta del sistema	El sistema grafica el variograma experimental de manera exitosa.		
Flujo central	<ol style="list-style-type: none"> 1. Seleccionar la opción Graficar variograma. 2. Introducir el nombre del variograma para que se habiliten los campos de los datos. 3. Introducir los datos. 4. Seleccionar la opción Calcular. 		
Escenario	EC 1.2 Graficar variograma experimental introduciendo los datos Incorrectos.		
Descripción	Se intenta graficar el variograma experimental con datos erróneos.		

Variables	Nombre	V	Letras, números o cualquier combinación de letras y números. Ejemplo: Ana, 4n4, 45@.
	Incremento	I	$X_{min} \leq h > X_{max}$
	Tolerancia del incremento	V	$\leq \frac{lag}{2}$
	Ancho de banda	V	$X_{min} \leq h \leq X_{max}$
	Acimut	I	$\geq 560^\circ$
	Profundidad / Elevación	I	$> 90^\circ$
	Tolerancia angular	I	$> 45^\circ$
Respuesta del sistema	El sistema no grafica el variograma experimental.		
Flujo central	<ol style="list-style-type: none"> 1. Seleccionar la opción Graficar variograma. 2. Introducir el nombre del variograma para que se habiliten los campos de los datos. 3. Introducir los datos. 4. Seleccionar la opción 		
Escenario	EC 1.3 Graficar variograma experimental dejando campos vacíos.		
Descripción	No se grafica el variograma experimental		
Variables	Nombre	I	(Vacío)
	Incremento	V	$X_{min} \leq h \leq X_{max}$
	Tolerancia del incremento	V	$\leq \frac{lag}{2}$
	Ancho de banda	V	$X_{min} \leq h \leq X_{max}$
	Acimut	I	(Vacío)
	Profundidad / Elevación	V	$-90^\circ \geq dip \leq 90^\circ$
	Tolerancia angular	V	$\leq 45^\circ$
Respuesta del sistema	El sistema no grafica el variograma experimental.		
Flujo central	<ol style="list-style-type: none"> 1. Seleccionar la opción Graficar variograma. 2. Introducir el nombre del variograma para que se habiliten los campos de los datos. 		

Capítulo III: Resultados y pruebas de la herramienta para graficar variogramas experimentales y ajustados

	<p>3. Introducir los datos.</p> <p>4. Seleccionar la opción Calcular.</p>
--	---

Tabla 12: Variables del CUS Graficar variograma experimental.

No	Nombre de campo	Clasificación	Valor nulo	Descripción
1.	Nombre	LineEdit	No	Permite insertar el nombre del variograma experimental que se desea graficar.
2.	Incremento	DoubleSpinBox	No	Permite elegir la distancia a la que se calcularán los puntos del variograma experimental.
3.	Tolerancia del incremento	DoubleSpinBox	No	Permite elegir la tolerancia en la separación de manera tal que los puntos puedan encontrarse a una distancia mayor o menor que el incremento.
4.	Ancho de banda	DoubleSpinBox	No	Permite elegir la distancia máxima a que pueden estar alejados los segundos puntos del par con respecto a la línea que define la dirección de cálculo.
5.	Acimut	DoubleSpinBox	No	Permite elegir la dirección en la que se calcula el variograma medida en un plano horizontal respecto al norte.
6.	Profundidad / Elevación	DoubleSpinBox	No	Permite elegir la dirección medida en el plano vertical del azimut, en la que se calcula el variograma.
7.	Tolerancia angular	DoubleSpinBox	No	Permite elegir el ángulo dentro del cual se considera válido un punto para el cálculo de la diferencia.

3.3 Resultados de las pruebas

Para probar el correcto funcionamiento de la herramienta desarrollada, fueron realizadas tres iteraciones de pruebas. Se obtuvieron un total de 8 no conformidades en la primera iteración y 3 en la segunda iteración, que fueron solucionadas satisfactoriamente en las regresiones correspondientes a sus respectivas iteraciones. En la tercera iteración no se detectaron no conformidades. En la siguiente gráfica se muestra un resumen de los resultados obtenidos:

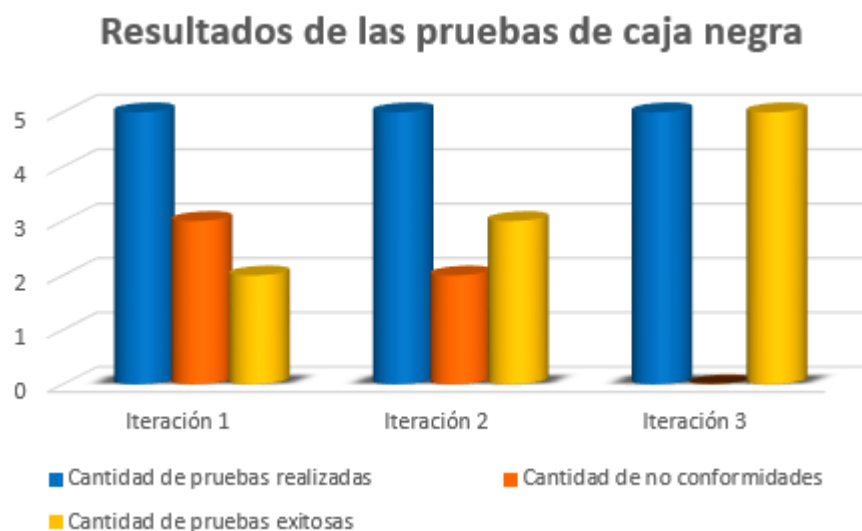


Figura 19: Resultados de las pruebas de caja negra

3.4 Conclusiones parciales

Luego de finalizar el presente capítulo se puede concluir lo siguiente:

- Después de realizar una prueba de comparación de casos utilizando datos experimentales publicados en la bibliografía especializada, se constató que la herramienta desarrollada es capaz de calcular los variogramas experimentales de forma correcta al igual que las herramientas profesionales internacionales.
- Las pruebas de software realizadas a la herramienta desarrollada permitieron corregir en no más de 20 días las deficiencias detectadas en la aplicación, referentes en su mayoría, a errores de validaciones en campos de entrada de datos del sistema.



Conclusiones generales

- Durante el desarrollo de la investigación se realizó un análisis profundo de bibliografías especializadas en los temas de estimación de recursos minerales y en la Geoestadística. Este análisis permitió identificar al variograma como método principal utilizado en el análisis estructural para determinar los patrones de continuidad espacial de ensayos geoquímicos.
- El análisis de las principales soluciones existentes permitió identificar las principales funcionalidades que debería tener el sistema en cuenta a la creación de variogramas experimentales y ajustados, así también como la priorización de los principales modelos teóricos de variogramas empleados en la Minería y la Geología.
- La utilización de la metodología de desarrollo de software *AUP* y el empleo de herramientas de desarrollo de código abierto y multi-plataformas, permitió que la herramienta desarrollada sea robusta, escalable y de fácil integración con el sistema Syam desarrollado en el centro GEYSED.
- La herramienta desarrollada consta de una fuerte fundamentación matemática por tanto se le realizaron varias pruebas de software y pruebas de comparación con datos experimentales publicados, lo cual permitió que las deficiencias encontradas en la herramienta fueran corregidas en no más de 20 días y que los resultados arrojados en el cálculo del variograma experimental sean los correctos al igual que una herramienta profesional.



Recomendaciones

Las autoras de la presente investigación recomiendan que para futuras investigaciones:

- Se le incluya a la herramienta desarrollada un módulo para graficar tridimensionalmente los datos espaciales.
- Se le incluya al componente de ajustar variogramas las funcionalidades necesarias para realizar el ajuste con más de un modelo teórico de variograma.
- Que se utilicen técnicas de programación concurrente para el cálculo de variogramas experimentales en juegos de datos grandes.
- Que se integren las funcionales del cálculo del variograma experimental en el sistema Syam.



Referencias bibliográficas

- Chica-Olmo, M. (1987). La geoestadística como herramienta de análisis espacial de datos.
- Haining, R. (2003). Spatial data analysis, theory and practice. Cambridge(UK).
- Matheron, G. (1965). LAS VARIABLES REGIONALIZADAS Y SU ESTIMACION, UNIVERSIDAD DE PARIS
- Tulcanaza, E. (1992). Técnicas geoestadísticas y criterios técnico-económicos para la estimación y evaluación de yacimientos mineros. Santiago de Chile.
- Armstrong, M. (1998). Basic linear geostatistics, Springer Science & Business Media.
- Ashton, T. S. (2008). La revolución industrial, 1760-1830, Fondo de Cultura Económica.
- Booch, G., J. Rumbaugh, et al. (1999). El lenguaje unificado de modelado, Addison-Wesley.
- Cassiraga, E. (2007). "Curso de geoestadística."
- Clark, I. (1979). Practical geostatistics, Applied Science Publishers London.
- Chica Olmo, M. (1987). "Análisis geoestadístico en el estudio de la explotación de los recursos minerales."
- Deutsch, C. V. and A. G. Journel (1992). "Geostatistical software library and user's guide." New York.
- Figuroa, R. G., C. J. Solís, et al. "Metodologías tradicionales vs. Metodologías ágiles." Universidad Técnica Particular de Loja, Escuela de Ciencias en Computación.(En línea), Disponible en: <http://adonisnet.files.wordpress.com/2008/06/articulo-metodologia-de-sw-formato.doc>.
- González, D. G. (2013). Herramienta para la creación de semivariogramas. La Habana, Universidad de las Ciencias Informáticas.
- Haining, R. (2003). Spatial data analysis, theory and practice. Cambridge (UK).

Referencias bibliográficas

- Houlding, S. (2000). Practical geostatistics: modeling and spatial analysis. Manual, Springer Science & Business Media.
- Journel, A. G. and C. J. Huijbregts (1978). Mining geostatistics, Academic press.
- Juristo, N., M. Moreno Ana, et al. (2004). "Técnicas de evaluación de Software." Visitar http://is. ls. fi. upm. es/udis/docencia/erdsi/Documentacion_Evaluacion_7. pdf.
- Krajewski, S. and B. L. Gibbs (1993). A Variogram Primer: Basics of Using Variograms, Gibbs Associates.
- Krige, D. (1976). A review of the development of geostatistics in South Africa. Advanced geostatistics in the mining industry, Springer: 279-293.
- Larman, C. (1999). UML y Patrones, Pearson.
- López, P. (2012). Ingeniería del software I. Práctica 1. Herramienta CASE Visual Paradigm.[citado el 21 Nov 2012].
- Matheron, G. (1963). "Principles of geostatistics." Economic geology **58**(8): 1246-1266.
- Matheron, G. (1965). LAS VARIABLES REGIONALIZADAS Y SU ESTIMACION, UNIVERSIDAD DE PARIS
- Matheron, G. (1970). La teoría de las variables regionalizadas y sus aplicaciones (traduction espagnole de Marco Alfaro, 2005), Les cahiers du CMM de Fontainebleau (Fasc. 5). Ecole desMines de Paris.
- Moral García, F. (2004). "Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales." Ecosistemas **13**: 1.
- Pressman, R. S. (2005). Software engineering: a practitioner's approach, Palgrave Macmillan.



Reyes , Y. and R. Pazos (2012). Propuesta de implementación de un algoritmo para la estimación de recursos minerales sólidos. La Habana Universidad de las Ciencias Informáticas.

Rodríguez, J. (1999). El concepto geoestadístico de variable regionalizada.

Sommerville, I. (2011). Ingeniería del Software

Suarez, C. (2006). "Geoestadística."

Tulcanaza, E. (1992). Técnicas geoestadísticas y criterios técnico-económicos para la estimación y evaluación de yacimientos mineros. Santiago de Chile.

Vallejos, J. P. and L. O. Martínez (1990). Expansión minera y desarrollo industrial: un caso de crecimiento asociado (Chile 1850-1914), Departamento de Historia, Universidad de Santiago de Chile.

Viera, M. A. D. and R. C. González (2002). "Geoestadística aplicada." Notas de curso. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA. Cuba.

Warrick, A. and D. Myers (1987). "Optimization of sampling locations for variogram calculations." Water Resources Research **23**(3): 496-500.

Welhan, J. (2001). Geostatistics and Spatial Modeling.



Bibliografía general

1. Isaaks, E.H., y Srivastava, R.M. (1989). An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford Univ. Press, New York, USA.
2. Moral, F.J. (2003). La Representación Gráfica de las Variables Regionalizadas. Geoestadística lineal. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Extremadura, Badajoz, España.
3. TULCANAZA, E. (1992). Técnicas geoestadísticas y criterios técnico-económicos para la estimación y evaluación de yacimientos mineros. E.Tulcanaza, Santiago, Chile.
4. MARSHALL, Chris. Enterprise modeling with UML: designing successful software through business analysis. Addison-Wesley Professional, 2000.
5. Matheron, G. 1962. Traite de Geostatistique Apliquee, Tome I. Memoires bureau de Recherches Geologiques et Minieres, N 24. Editions Bureau de Recherche et Minieres, Paris.
6. Cassiraga, E. (2007). "Curso de geoestadística."
7. Sommerville, I. (2011). Ingeniería de Software.
8. Sommerville, I. (2005). Software Engineering, PEARSON EDUCACIÓN. S.A.
9. Pressman, R. S. (1997). Ingeniería del Software: Un enfoque práctico, Mikel Angoar.
10. Figueroa, R. G., C. J. Solís, et al. "Metodologías tradicionales vs. Metodologías ágiles." Universidad Técnica Particular de Loja, Escuela de Ciencias en Computación. (En línea), Disponible en: <http://adonisnet.files.wordpress.com/2008/06/articulo-metodologia-de-sw-formato.doc>.
11. Johansen, E. (2006). "Patrones de diseño." Revista ABB (2): 62-65.
12. Larman, C. (1999). UML y Patrones, Pearson.
13. Cuevas, G., A. Amescua, et al. (2002). "Gestión del proceso software." Centro de Estudios Ramón Areces.
14. RUMBAUHG, J. I. JACOBSON (2000). El Lenguaje Unificado de Modelado. Manual de referencia. Madrid, Pearson Educación.
15. Booch, G., J. Rumbaugh, et al. (1999). El lenguaje unificado de modelado, Addison-Wesley.
16. Quintín, C.-G. J. "Comentarios al artículo Modelos geoestadísticos de la concentración del Ni en el dominio 7 del yacimiento Punta Gorda, publicado en Minería y Geología, Volumen 20 (1-2): 42-53, 2004."
17. Gutiérrez, J. (2007). "Introducción al Proceso de Pruebas."

18. Quintero, A. R. (2000). "Visión General de la Programación."
19. Aristegui O., J. L. (2010). "Los casos de prueba en la prueba de software." Lámpsakos 3: 27-34.
20. Welicki, L. (2011). "El Patrón Singleton ", from <http://msdn.microsoft.com/es-es/library/bb972272.aspx#EAAA>.
21. Warrick, A. and D. Myers (1987). "Optimization of sampling locations for variogram calculations." Water Resources Research **23**(3): 496-500.
22. Legrá-Lobaina, A. A. (1994). "Consideraciones sobre el cálculo de volúmenes geólogo-mineros por métodos clásicos." Minería & Geología **11**(2): 17-21.
23. Cuador-Gil, J. Q. (2005). "Estudios de estimación y simulación geoestadística para la caracterización de parámetros geólogo-industriales en el yacimiento laterítico Punta Gorda." Minería & Geología **21**(4): 48.