

## **Correlación entre datos de satélites y datos en tierra, a partir de análisis geoestadísticos utilizando semivariogramas y técnicas de kriging, en la región de la Sabana de Carora, estado Lara-Venezuela**

Jesús Alberto Moncada Gómez <sup>1</sup>  
Manoel De Araujo Sousa Júnior <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS),  
Prolongación Calle Mara Quinta FUNVISIS, Urb. Llanito, código postal 1070, edo. Miranda,  
Caracas-República Bolivariana de Venezuela.  
e-mail: [JMONCADA@FUNVISIS.GOB.VE](mailto:JMONCADA@FUNVISIS.GOB.VE)

<sup>2</sup> Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).  
Departamento de Engenharia Rural. Sala 3320. Predio 42, Avenida Roraima, n° 1000. Cidade  
Universitária. Bairro Camobi. CEP 97105-900. Santa Maria – RS. Brasil.  
email: [MANOEL.DER.UFSM@GMAIL.COM](mailto:MANOEL.DER.UFSM@GMAIL.COM)

**Abstract.** Bolivarian Republic of Venezuela is located in northern of South America, between the tectonic plate, Caribbean and South America, it a country with seismic hazard. The following research aims to know whether the satellite gravity data source can serve as primary source data for the study of subsurface gravity models, based on a geostatistical analysis and kriging interpolation techniques, consequently, support the expansion of seismic micro-zoning study by Venezuelan Foundation of Seismological Research (FUNVISIS). The study area is located in west-central region of the country, between states of Lara, Falcón, Trujillo and Zulia, with an approximate area of 22,630 km<sup>2</sup>. The Investigation is in five phases: 1) project definition, 2) field data collection and satellite data available, 3) statistical and geostatistical analysis based on the study of semivariograms; 4) interpolation using the kriging technique and; 5) Generation of Pearson correlation models generated from field and satellite data. Validation of the semivariograms shows errors between (0.011 and 0.053) with a correlation coefficient of 97%. The correlation between the satellite data with field data is of 91.7%, which means that satellite data can be used as primary source data for gravity modeling of basement in this area of study.

**Palabras claves:** gravimetría, geoestadística, semivariogramas, kriging, correlación.

### **1. Introducción.**

En Venezuela actualmente se encuentra vigente la norma COVENIN 1756-2001 “Edificaciones Sismorresistentes”, la cual tiene alcance nacional y sitúa el área de estudio dentro de la zona 4, de peligrosidad sísmica moderada (0,25 g). Sin embargo, hay que tomar en cuenta que la respuesta del suelo varía de un lugar a otro, dependiendo de sus características físicas, por lo tanto se podría estar sobreestimando o subestimando el valor real de aceleración del frente de ondas sísmicas al momento de un evento.

Una manera de atenuar éste riesgo es estudiando cada zona detalladamente, tomando en cuenta desde la respuesta de sitio hasta la vulnerabilidad de las diferentes edificaciones presentes.

La Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) en conjunto con otras instituciones nacionales e internacionales, han promovido y desarrollado el proyecto de Microzonificación Sísmica en distintas ciudades del país. En los estudios donde se involucran diferentes técnicas de las geociencias, de ingeniería sísmica y en un futuro inmediato la percepción remota a nivel satelital, con el fin de determinar los efectos de sitio que puedan modificar la respuesta sísmica localmente.

Una de las técnicas utilizadas en las geociencias es la prospección geofísica, la cual incluye el método gravimétrico. Este método se basa en la medida en superficie de las

pequeñas variaciones o anomalías de la componente vertical del campo de gravedad terrestre (Cantos, 1974), utilizando la energía potencial natural del planeta para modelar estructuras geológicas y cuantificar espesores de los diferentes estratos, principalmente sedimentarios en el subsuelo. Esto es de suma importancia debido que el frente de ondas sísmicas al propagarse a través de un medio blando desarrolla variaciones en espacio, amplitud, contenido de frecuencias y duración.

El propósito y la importancia de éste trabajo consiste en la obtención, a través de un estudio geoestadístico e interpolaciones con técnicas de kriging a partir de datos gravimétricos de origen satelital y datos gravímetros en tierra en la región de la Sabana de Carora, de una correlación que permita conocer si los datos de origen satelital poseen iguales o parecidas respuestas a los datos adquiridos en tierra, con la intención que puedan dar una respuesta efectiva, rápida y de menor costo a nivel local, para la elaboración de los distintos modelados gravimétricos del subsuelo y así contribuir a la expansión del estudio de Microzonificación Sísmica en todo el país.

El área de estudio (figura 1), se encuentra ubicada en la región centro-occidental del país, entre las coordenadas UTM 1076610m y 1204110m Norte y 275100m y 452600m Este, conformada por 19 municipios de los estados Falcón, Lara, Trujillo y Zulia.



Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

## 2. Metodología de trabajo.

La figura 2 presenta de forma esquemática los cinco bloques como se desarrolló el presente documento, en primer lugar, la definición del proyecto, seguido de la adquisición de los datos, el análisis estadístico y geoestadístico, la interpolación y por último, su correlación.

### 2.1. Adquisición de datos

Para la gravedad absoluta en la superficie terrestre (figura 3a), se utilizaron los datos de las campañas gravimétricas realizadas entre los estados Falcón, Lara, Trujillo y Zulia durante el proyecto Tupure-Carora entre PDVSA (Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima) y FUNVISIS (Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas). Las estaciones fueron adquiridas con gravímetros digitales de la casa fabricante Scintrex modelos CG-3 y CG-5, con resoluciones de lectura de 0,005 mgal y 0,001 mgal respectivamente y con una baja deriva

instrumental de 0,002 mgal/día (Scintrex, 1995; Scintrex, 2006). Estas estaciones fueron controladas con GPS diferenciales con errores milimétricos en las componentes horizontales y errores centimétricos en la componente vertical. Los datos fueron tomados con distintos distanciamientos entre estaciones: desde 250 m hasta los 3000 m con un espaciamento no homogéneo.

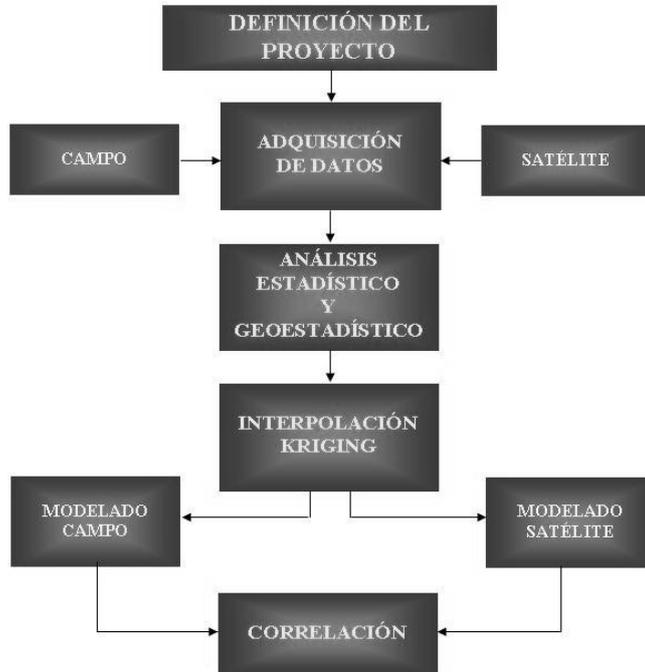


Figura 2. Diagrama metodológico.

Para la gravedad absoluta a nivel satelital (figura 3b), los datos derivan del Modelo Geopotencial Global del campo gravitatorio terrestre EGM 2008 (PAVLIS, et al. 2008), el cual se desarrolló a partir de datos satelitales de las misiones CHAMP (*Challenging Mini-Satellite Payload for Geosciences and Applications*) y GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) con una resolución espacial de 3.7 Km.

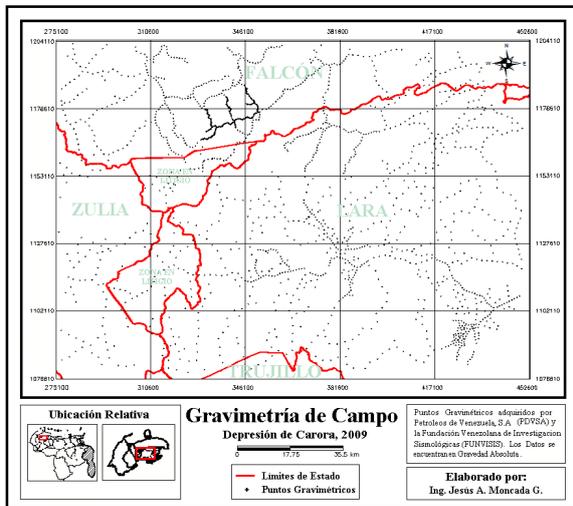


Figura 3a

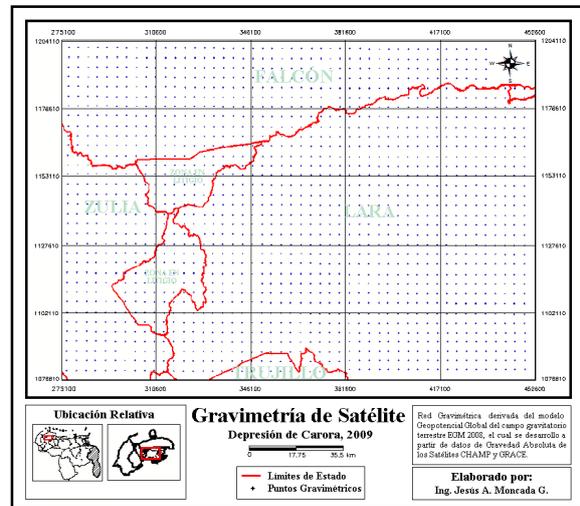


Figura 3b

Figura 3. Recopilación de datos gravimétricos de campo (a) y de satélites disponibles (b).

## **2.2. Análisis estadístico y geoestadístico**

El estudio geoestadístico o estudio de semivariogramas permite representar cuantitativamente la variación de un fenómeno regionalizado en el espacio a través de una interpretación de estructuras de correlación espacial. (Isaaks & Srivastava, 1989; Druck, *et al.* 2004). El análisis estadístico y geoestadístico, fue elaborado con la herramienta del módulo de análisis geoestadístico (análisis exploratorio) de SPRING versión 5.1.3.

El análisis de semivariogramas contempló los siguientes pasos:

- Levantamiento de semivariogramas experimentales.
- Ajuste de los modelos teóricos de semivariogramas.
- Validación del modelo a ser utilizado en el procedimiento de kriging.

El ajuste de los modelos teóricos de los semivariogramas se realiza a partir del cálculo de cada uno de los modelos transitivos: esférico, exponencial y gaussiano, con el propósito de evaluar el mejor ajuste.

## **2.3. Interpolación kriging**

Con los parámetros definidos y los modelos de los semivariogramas ajustados se procedió a realizar la interpolación con cada uno de los datos, a una resolución de 180 m (máxima para el SPRING), con el objetivo de llevar tanto los datos de campo como los de satélites a una misma resolución y así poder correlacionarlos.

El método de kriging se diferencia de los otros métodos de interpolación, por hacer la estimación de la matriz de covarianza espacial que determina los pesos atribuidos de las diferentes muestras, el tratamiento de redundancia de los datos, la vecindad a ser considerada en el procedimiento inferencial y el error asociado al valor estimado (Isaaks & Srivastava, 1989; Druck, *et al.* 2004).

Diferente de otras técnicas de inferencia, el kriging prioriza la estimación de estructuras de dependencia espacial y requiere que la hipótesis de estacionariedad sea asumida para que esa estructura pueda ser estimada (Isaaks & Srivastava, 1989; Druck, *et al.* 2004).

## **2.4. Correlación de Pearson**

Los dos modelos generados, fueron convertidos cada uno a la representación de muestras para poder ser correlacionados por el programa SPRING. Para esto se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson que es un índice estadístico, el cual mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas (Llopis, 2009).

## **3. Resultados**

### **3.1. Semivariogramas generados con datos de campo y datos de satélite**

La figura 4, muestra el resultado de los cuatros semivariogramas generados para datos de campo y de satélite, los cuales representan las cuatro direcciones donde se encuentra la continuidad espacial de los datos.

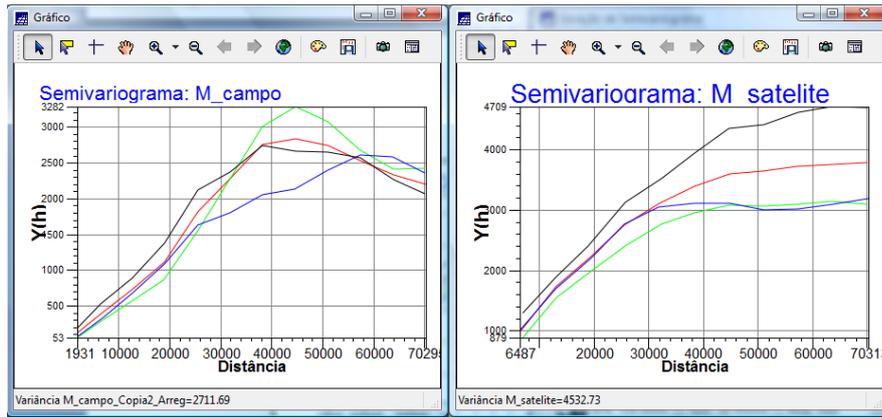


Figura 4a

Figura 4b

Figura 4. Semivariogramas generados con datos de campo (a) y datos de satélite (b).

### 3.2. Análisis estadístico de la validación de los semivariogramas

La figura 5, muestra los resultados estadísticos del error de los semivariogramas generados con los modelos transitivos esférico para los datos de campo y el modelo anidado (esférico + esférico) de datos satelitales.

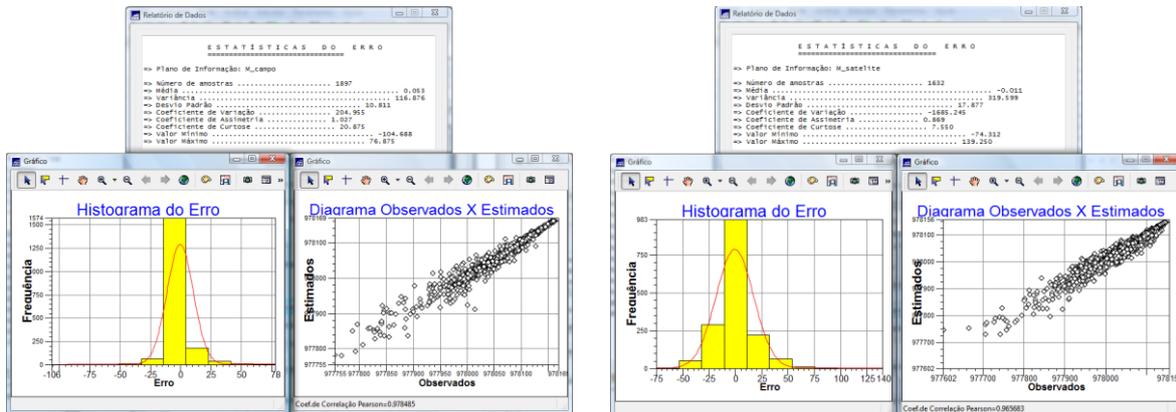


Figura 5a

Figura 5b

Figura 5. Resumen estadístico del error del semivariograma esférico para datos de campo (a) y resumen estadístico del error del semivariograma anidado (esférico + esférico) para datos de satélite (b).

La validación de los semivariogramas muestran errores muy bajos (0,053) como el valor más alto y un coeficiente de correlación de 97 %, lo que indica el buen ajuste de los modelos en el estudio de los semivariogramas que se utilizaron para la interpolación con la técnica de kriging.

### 3.3. Modelado con datos de gravedad absoluta, utilizando interpolación con técnica kriging a una resolución de 180 m para datos de campo y de satélite.

Al observar los modelados generados por las interpolaciones hechas con kriging tanto para los datos de campo (figura 6a) como para los datos de satélite (figura 6b), se puede verificar la gran similitud que poseen ambas imágenes. Los valores máximos de gravedad

absoluta se encuentran hacia el centro del mapa, exactamente donde se encuentra la Depresión de Carora y hacia los extremos nor-oeste (estado Falcón) y oeste (estado Zulia). Los mínimos de gravedad se observan en las mismas coordenadas de ambos mapas. Hay una variabilidad en cuanto a los valores de los datos, debido a la fuente de los mismos. El rango de los valores de gravedad absoluta para el modelado con datos de campo se encuentra entre 977758,8750 y 978169,0625 miligales, mientras que para el modelado con datos de satélite los valores oscilan entre 977674,4375 y 978155,2500 miligales.

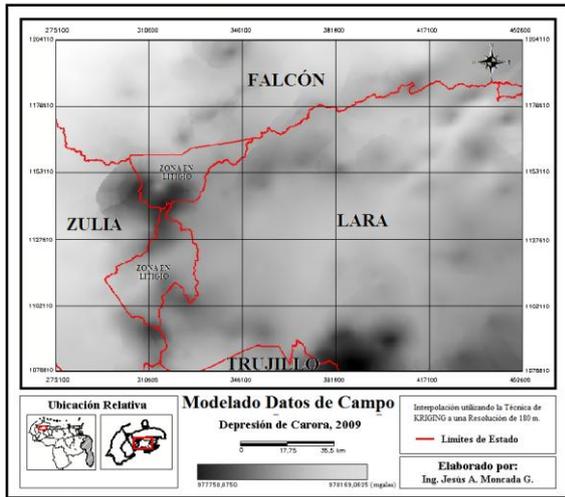


Figura 6a

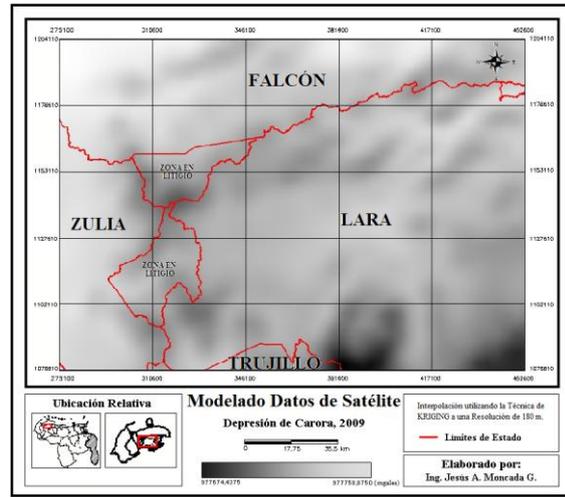


Figura 6b

Figura 6. Modelados utilizando datos de gravedad absoluta para datos de campo (a) y satélite (b).

### 3.4. Análisis estadístico de los modelados generados a través de la interpolación con técnica kriging para datos de campo y datos de satélite.

La estadística que se observa en la figura 7 representa el comportamiento de los datos generados a través de la interpolación con las técnicas de kriging.

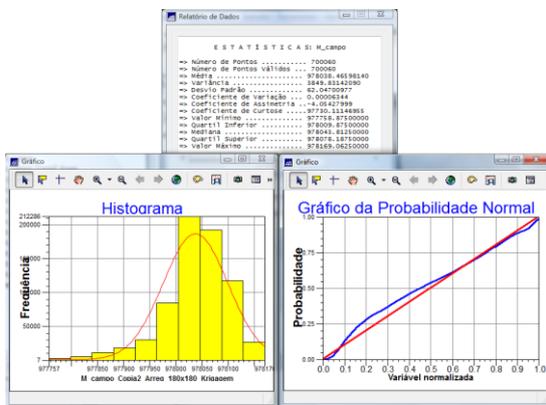


Figura 7a

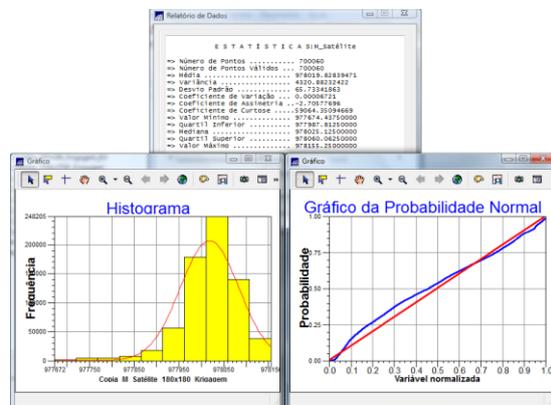


Figura 7b

Figura 7. Análisis estadístico del modelado generado a través de la interpolación con técnica kriging para datos de campo (a) y datos de satélite (b)

Se generaron 700060 puntos para cada modelado. Las medidas de tendencia central son bastantes similares para ambos modelados (Media Campo = 978038,4660 y Media Satélite = 978019,8284), (Mediana Campo = 978043, y Mediana Satélite = 978025,1250).

La desviación estándar de los datos (Modelado Campo = 62,0470 y Modelado Satélite = 65,7334) indican que los valores puntuales tienden a estar dispersos respecto a su media aritmética, conservando la misma proporción ambos modelados de acuerdo a sus valores tan similares. De igual manera sucede con los valores representados por las varianzas, indican una alta dispersión de los datos respecto a los valores esperados en igual proporción para ambos.

De acuerdo con los histogramas de frecuencias, ambos poseen un comportamiento unimodal, concentrándose sus datos alrededor del valor de la media de cada población. Sus coeficientes de asimetría indican un leve sesgo hacia la izquierda por ser estos negativos y de valores bajos. Los coeficientes de Curtosis para ambos modelados tienden a una distribución Leptocúrtica.

El gráfico de probabilidad normal para ambos modelados, presenta el mismo comportamiento (figura 7). Se puede apreciar bastante similitud entre los valores observados (línea curva azul) y los valores esperados (recta en rojo) con una pequeña desviación al inicio de los ejes del gráfico, lo que certifica la buena calidad de los datos y un buen ajuste a una distribución normal..

### 3.5. Coeficiente de correlación de Pearson entre los modelados generados a través de la interpolación con técnica kriging para datos de campo y datos de satélite.

En la figura 8 se puede apreciar el buen ajuste de la correlación de Pearson en un 91,7 %, entre los modelados generados con datos de campo y con datos de satélite.

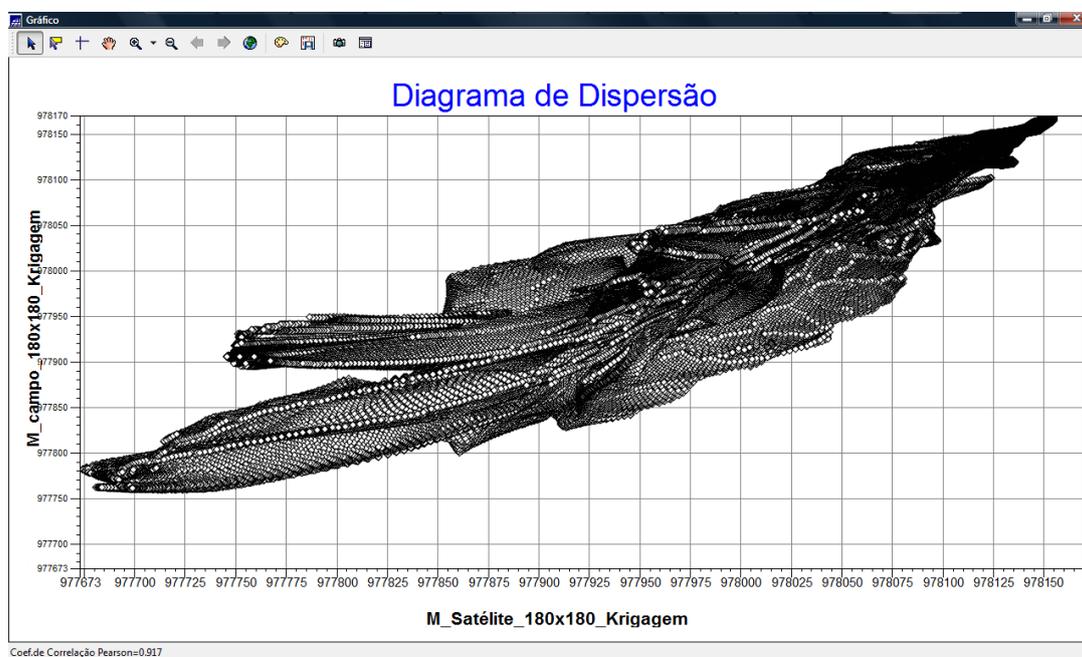


Figura 8. Coeficiente de correlación de Pearson entre los modelados generados.

## 4. Conclusiones y Recomendaciones

Los semivariogramas se generaron a partir de modelos transitivos. Los modelos que mejor se ajustaron fueron: un modelo esférico para los datos de campo con una sola estructura

y un modelo anidado (esférico + esférico) con dos estructuras, posiblemente debido a la presencia de diferentes grupos de datos (datos de los satélites CHAMP y GRACE), para los datos de satélite.

Los modelos generados con kriging poseen gran similitud tanto a nivel visual como a nivel estadístico. Los valores máximos de gravedad absoluta se encuentran hacia el centro del mapa (donde se encuentra la Depresión de Carora) y hacia los extremos nor-oeste y oeste, mientras que los mínimos de gravedad se observan en las mismas coordenadas de ambas imágenes. Hay una variabilidad aproximadamente de 70 miligales mayor en el rango de los datos de satélite respecto al rango de los datos donde oscilan los de campo.

Las medidas de tendencia central, son bastantes similares para ambos modelados. Esto no sólo indica lo similar de los datos sino el comportamiento de la distribución normal de los mismos, donde las medias son muy parecidas a las medianas. En cuanto a las medidas de dispersión, indican que los valores puntuales tienden a estar dispersos respecto a su media aritmética.

La correlación entre los datos de satélite con los datos de campo es de 91,7%, lo que significa que los datos de satélite pueden ser utilizados para los modelados gravimétricos del subsuelo en esta área de estudio.

Se recomienda realizar estudios en distintas zonas para observar el comportamiento de los datos de satélite, de manera de tener la certeza de utilizarlos como datos de primera fuente y así disminuir tiempo de trabajo en campo, personal, viáticos, transporte y hospedaje. Además se obtendrán datos con mayor homogeneidad y los procesamientos, interpretaciones y resultados serán más rápidos y en un corto plazo.

Se recomienda actualizar los datos de satélite con los nuevos datos que aportará la nueva misión espacial satelital GOCE (*Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*) puesto en órbita el 17 de marzo de 2009, lanzado por la Agencia Espacial Europea (ESA). (MUNDOGEO, 2009)

## 5. Referencias

- Cantos, F. **Tratado de Geofísica Aplicada**. España: Litoprint, 1974. 520 p.
- COVENIN. **Edificaciones sismorresistentes**. Caracas. COVENIN MINDUR 1756, 2001.
- Druck, S; Carvalho, M. S; Camara, G; Monteiro, A. M. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Planaltina, DF: Embrapa, 2004. 209 p.
- Isaaks, E. H.; Srivastava, R. M. **Applied Geostatistics – An Introduction to**. Oxford University Press, New York, 1989. 553 p.
- Llopis, J. M. **Curso SPSS**, Segunda Parte, 2009. Disponible en: [http://www.ual.es/personal/jmllopis/files/curso\\_spss\\_segunda\\_parte.pdf](http://www.ual.es/personal/jmllopis/files/curso_spss_segunda_parte.pdf). Acceso en: 12 de nov. 2009.
- MUNDOGEO. El Satélite Goce abastece el mejor mapa global de la gravedad de toda la historia. En Mundo Geo. Geoinformación para todos, 2009. Disponible en: [http://www.mundogeo.com.br/noticias-diarias.php?id\\_noticia=15266&lang\\_id=2](http://www.mundogeo.com.br/noticias-diarias.php?id_noticia=15266&lang_id=2). Acceso en: 30 de oct. 2009.
- Pavlis, N.K., S.A. Holmes, S.C. Kenyon, Y J.K. Factor **An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008**. 2008. Disponible en: 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, Abril 13-18.
- Scintrex. **CG-3/3M Autograv. Automated Gravity Meter. Operator Manual**. Canada, 1995.198 p.
- Scintrex. **CG-5 Autograv System. Operation**. Canada, 2006. 308 p.