

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Postgrados

**Zonificación sísmica para la ciudad de Esmeraldas, aplicando
técnicas geoestadísticas y análisis geológicos**

Ángel Patricio Chávez Cueva

Richard Resl, Ph.Dc., Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del Título de
Magister en Sistemas de Información Geográfica

Quito, noviembre de 2013

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Postgrados

HOJA DE APROBACION DE TESIS

**Zonificación sísmica para la ciudad de Esmeraldas, aplicando
técnicas geoestadísticas y análisis geológicos**

Ángel Patricio Chávez Cueva

Richard Resl, Ph. Dc.
Director de Tesis

Pablo Cabrera Barona, Ms.
Miembro del Comité de Tesis

Richard Resl, Ph. Dc.
**Director de la Maestría de Sistemas
De Información Geográfica**

Stella de la Torre, Ph.D.
**Decana del Colegio de Ciencias
Biológicas y Ambientales**

Víctor Viteri Breedy, Ph.D.
Decano del Colegio de Posgrados

Quito, noviembre 2013

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Nombre: ANGEL PATRICIO CHAVEZ CUEVA

C. I.: 0921905881

Quito, noviembre de 2013

Dedicatoria

Quiero dedicarle este trabajo a mi Dios que me ha dado la sabiduría, la fortaleza y sobre todo la oportunidad para saber superarme para lograr vencerme y terminar con este trabajo.

A mi amada esposa, por su apoyo incondicional, cada día compruebo que Diosito te envió para mí.

Agradecimientos

A la Universidad San Francisco de Quito al programa UNIGIS y sobre todo a su cuerpo docente, ya que por medio de ellos he recibido el conocimiento intelectual en Sistemas de Información Geográfica.

Especial agradecimiento a la tutora del grupo 2011A, cuyo apoyo y paciencia viabilizó la culminación con mis estudios en el programa, sin su soporte no lo habría logrado.

A mi tutor de tesis por su contingente en el desarrollo y presentación de este trabajo.

Resumen

El presente documento corresponde al análisis geológico estructural e interpretación de un raster de zonificación sísmica sobre la Provincia, cantón y ciudad de Esmeraldas el cual se la obtuvo en base a un modelo de interpolación, el mismo que fue seleccionado en base a las mejores características estadísticas y geoestadísticas presentes en los diferentes modelos de interpolación (determinísticos y geoestadísticos) que fueron evaluados a nivel de todo el Ecuador en base a datos sísmicos históricos y contemporáneos de varias fuentes oficiales y reconocidas a nivel nacional e internacional.

El análisis geoestadístico realizado muestra que el método de interpolación de Base Radial, presenta la menor media de error en comparación a los demás métodos de interpolación usados en este estudio, por lo cual el raster generado por este método será usado para el análisis geológico estructural e interpretación de la zonificación sísmica.

La zonificación sísmica previamente evaluada geológicamente muestra que la provincia de Esmeraldas se encuentra sujeta a posibles eventos sísmicos en la escala de entre 5 a 8.8 Mw (magnitud de momento) que según la escala INQUA o ESI2007 son considerados como dañinos, por las afectaciones que sufriría el terreno. Localmente la ciudad de Esmeraldas se vería afectada por magnitudes menores pero que de todas formas causaría un impacto.

Abstract

The present document corresponds to the structural geological analysis and interpretation of seismic zoning raster on the Esmeraldas Province, which was obtained based on an interpolation model, same as was selected based on statistical and geostatistical best features present in the different interpolation models (deterministic and exact) which were evaluated at the level of Ecuador, based on historical and contemporary seismic data from various recognized official national and international sources.

The geostatistical analysis performed shows that the method of Radial Basis Interpolation, has the lowest mean error compared to other interpolation methods used in this study, so the raster generated by this method will be used for structural geological analysis and interpretation of seismic zoning.

The seismic zoning previously evaluated geologically shows that the Esmeraldas province is subject to potential seismic events in the range of 5 to 8.8 Mw (moment magnitude) that according to the scale INQUA / ESI 2007 are considered as harmful, for the damages it would suffer on the ground. Locally the Esmeraldas city be affected by lower magnitudes but anyway cause an impact.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	7
Abstract	8
1 INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 Antecedentes	17
1.2 Objetivos y preguntas de investigación	17
1.2.1 Objetivos generales	17
1.2.2 Objetivos específicos	18
1.2.3 Preguntas de investigación	18
1.3 Hipótesis.....	18
1.4 Justificación.....	19
1.5 Alcance.....	20
2 MARCO TEÓRICO	20
2.1 Magnitud Local (ML).....	21
2.2 Magnitud de Ondas Superficiales (Ms).....	22
2.3 Magnitud de Ondas de Cuerpo (Mb).....	23
2.4 Magnitud de momento (Mw).....	24
2.5 ESDA (Exploratory Spatial Data Analyst)	27
2.5.1 Análisis de tendencia	28
2.5.2 Semivariograma	28
2.6 Métodos de interpolaciones deterministas y exactas.....	28

2.6.1	IDW (Inverse Distance Weighted)	29
2.6.2	Función Base Radial	30
2.6.3	Técnicas de interpolación geoestadísticas: Kriging Ordinario	31
2.6.3.1	El modelado del semivariograma en el kriging.	33
2.6.3.1.1	Vecindad en el Kriging.	34
2.6.3.1.2	Validación cruzada y validación	34
2.7	Sismicidad y ambiente tectónico	35
2.7.1	Niveles de Intensidad en la Escala ESI 2007	38
2.8	Definición de términos	56
3	METODOLOGÍA.....	58
3.1	Ubicación del área de estudio.	58
3.2	Flujograma del desarrollo	59
3.3	Justificación de la metodología seleccionada	60
3.4	Herramientas de investigación utilizada	61
3.5	Fuentes y recolección de datos	62
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	62
4.1	Resultados	62
4.1.1	Recolección y depuración de datos.....	62
4.1.2	Transformación de Magnitudes	63
4.1.3	ESDA (Exploratory Spatial Data Analyst).....	63
4.1.3.1	Histograma.....	63
4.1.3.2	Gráficos de probabilidad normal Q-Q Plot	64
4.1.3.3	Transformación Logarítmica:.....	65

4.1.3.4	Transformación Box-Cox:	66
4.1.3.5	Análisis de tendencia Globales.....	69
4.1.3.5.1	Tendencia E-W	69
4.1.3.5.2	Tendencia N-S.....	70
4.1.3.6	Semivariograma	71
4.1.4	Métodos de Interpolación Determinista y Exacta.....	73
4.1.4.1	IDW (Inverse Distance Weight)	73
4.1.4.2	Función Base Radial	74
4.1.5	Técnicas de interpolación estadística.....	78
4.1.5.1	Kriging Ordinario	78
4.1.5.1.1	Función Circular.....	79
4.1.5.1.2	Función esférica.	83
4.1.5.1.3	Función Exponencial.....	85
4.1.5.1.4	Función Gauss.....	87
4.1.5.2	Cuadro comparativo Krigging	89
4.1.6	Cuadro comparativo de los métodos determinísticos y geoestadísticos.....	90
4.1.7	Generación de mapas:	91
4.1.7.1	Análisis morfoestructural	91
4.1.7.1.1	GEOLOGIA REGIONAL	91
4.1.7.1.2	GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA LOCAL.....	94
4.1.7.1.3	SISMICIDAD Y TECTÓNICA.....	97
4.1.7.2	Validación de resultados geoestadísticos.....	99
4.2	Análisis de los resultados	105

5. CONCLUSIONES FINALES 107

6. REFERENCIAS 109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico de la Varianza dentro del Semivariograma.....	34
Figura 2. Ubicación de Placas Tectónicas	35
Figura 3. Cuadro Descriptivo de las Intensidades ESI 2007	37
Figura 4. Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	58
Figura 5. Flujograma metodología aplicada para Zonificación Sísmica	59
Figura 6. Base de datos unificada.....	62
Figura 7. Histograma de variable Mw	63
Figura 8. Q-Q Normal, variable Mw	64
Figura 9. Histograma aplicando transformación Logarítmica sobre la variable Mw.....	65
Figura 10. Q-Q Normal aplicando transformación Logarítmica sobre la variable Mw.....	65
Figura 11. Histograma aplicando transformación Box-Cox ($\lambda=1$) sobre la variable Mw	66
Figura 12. Histograma aplicando transformación Box-Cox ($\lambda=2$) sobre la variable Mw	66
Figura 13. Valores extremos altos “Outliers”	67
Figura 14. Valores extremos bajos “Outliers”	68
Figura 15. Tendencia E-W	70
Figura 16. Tendencia N-S.....	70
Figura 17. Semivariograma con orden al Norte	72
Figura 18. Semivariograma con orden al Sur.....	72
Figura 19. Semivariograma con orden al Suroeste	72
Figura 20. Semivariograma con orden al Noreste.....	72
Figura 21. Comparación Errores IDW P=1 y P=2	74
Figura 22. Modelado con función Completely Regularized Spline	75
Figura 23. Modelado con función Spline with Tensión.....	76
Figura 24. Modelado con función inverse multiquadric	76
Figura 25. Modelado con función Multiquadric.....	77
Figura 26. Modelado con función Plate Spline.....	77

Figura 27. Construcción Semivariograma, Función Circular	80
Figura 28. Valores observados frente a valores predichos, modelo circular	80
Figura 29. Errores de la estimación, modelo circular	81
Figura 30. Errores estandarizados, modelo circular	82
Figura 31. Probabilidad normal de los errores, modelo circular	82
Figura 32. Probabilidad normal de los errores, modelo circular	82
Figura 33. Construcción Semivariograma, Función Esférica.....	83
Figura 34. Valores observados frente a valores predichos, Función Esférica.....	83
Figura 35. Errores de la estimación, función esférica	84
Figura 36. Errores estandarizados, función esférica	84
Figura 37. Probabilidad normal de los errores, función esférica	84
Figura 38. Probabilidad normal de los errores, función esférica	84
Figura 39. Construcción Semivariograma, Función Exponencial.....	85
Figura 40. Valores observados frente a valores predichos, Función Exponencial	85
Figura 41. Errores de la estimación, función Exponencial	86
Figura 42. Errores estandarizados, función Exponencial	86
Figura 43. Probabilidad normal de los errores, función Exponencial	86
Figura 44. Probabilidad normal de los errores, función Exponencial	86
Figura 45. Construcción Semivariograma, Función Gauss	87
Figura 46. Valores observados frente a valores predichos, Función Gauss	87
Figura 47. Errores de la estimación, función Gauss.....	88
Figura 48. Errores estandarizados, función Gauss	88
Figura 49. Probabilidad normal de los errores, función Gauss.....	88
Figura 50. Probabilidad normal de los errores, función Gauss.....	88
Figura 51. Geología Regional de la Prov. De Esmeraldas	91
Figura 52. Geología y Geomorfología Local (Provincia, Cantón, Ciudad).....	95
Figura 53. Clasificación de zonas por geomorfología.	95
Figura 54. Ubicación de eventos sísmicos y fallas activas.....	100

Figura 55. Interpretación de lineamientos coincidentes con eventos sísmicos	100
Figura 56. Zonificación sísmica en la Prov. De Esmeraldas y alrededores	101
Figura 57. Posible Continuidad de falla interpretada, tomando en consideración la anomalía de Mw	102
Figura 58. Ejercicio de posible dinámica de fallas Galera y Esmeraldas	103
Figura 59. Zonificación a nivel Cantonal y local	104

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos Estadísticos IDW, P1 y P2.....	74
Tabla 2. Datos Estadísticos Funciones por Base Radial.....	78
Tabla 3. Cuadro Comparativo de Estadísticas, Funciones Kriging.	89
Tabla 4. Cuadro Comparativo entre las funciones o modelos que presentaron mejores patrones	90
Tabla 5. Fallas Activas dentro de la Prov. De Esmeraldas	98

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En vista que el INOCAR a través del Centro de Alerta de Tsunamis y otras organizaciones no gubernamentales junto a los municipios se encuentran en la ejecución de varios proyectos de apoyo y ejecución, vinculados con el análisis, y gestión de planes de contingencia ante eventos tsunamigénicos, en los cuales el análisis de componentes como el área de inundación por tsunamis, zona de deslizamientos, grados de sismicidad, etc. juegan un papel muy importante a la hora de elaborar planes de evacuación.

Es por este motivo que ejecutar el análisis de vulnerabilidad sísmica es importante, ya que añadiendo una componente más a los estudios mejorarían los planes de ejecución.

Para este caso se analizará la amenaza de carácter sísmico tectónico para la provincia de Esmeraldas, enfocando o afinando el estudio hacia el Cantón de Esmeraldas y en lo posible acorde a la escala gráfica de resultados, a la ciudad de Esmeraldas.

1.2 Objetivos y preguntas de investigación

1.2.1 *Objetivos generales*

- Cuantificar el nivel de amenaza por medio de la zonificación sísmica tanto por intensidad como por magnitud sísmica para la provincia de Esmeraldas, particularizando al cantón y a la ciudad de Esmeraldas

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar el mejor modelo de interpolación de superficie en cuanto a las anomalías sísmica en base al mejor resultado de las interpolaciones espaciales deterministas, exactas y geoestadísticas.
- Validar geológicamente el resultado de la interpolación.

1.2.3 Preguntas de investigación

¿Cómo y hasta qué punto, el resultado del método de interpolación seleccionado es el más idóneo o el correcto?

¿Cómo y hasta qué punto, la superficie de anomalía sísmica seleccionada requerirá un método de convalidación?

1.3 Hipótesis

Hipótesis 1. En base a datos sísmicos de magnitudes de momentos se pueden generar superficies de anomalías sísmicas, al modificar ciertos datos en los interpoladores se puede observar que esta superficie tiende a cambiar minoritaria o mayoritariamente.

Hipótesis de causa 1. Existen algunos métodos de interpolación de datos cada uno de estos métodos dan un resultado diferente.

Hipótesis de solución 1: Sistemáticamente aplicar un proceso que depure y valide que método de interpolación es el más efectivo o idóneo acorde a la distribución espacial de los datos y a los valores.

Hipótesis de Causa 2: Estadísticamente se obtendrá una respuesta en base a interpolación de datos pero como saber que geológicamente responde bien el modelo de interpretación?.

Hipótesis de solución 2: Se puede hacer una validación geológica estructural, en la cual sobre el raster de anomalías sísmicas se sobrepondrán las estructuras interpretadas, para de esta manera buscar alguna relación.

1.4 Justificación

El principal problema por el cual se realiza el estudio de zonificación sísmica para la Provincia de Esmeraldas, es por la cantidad de eventos sísmicos localizados en la región, por lo cual es necesario realizar modelos a partir de datos históricos para realizar prevención y de cualquier evento que pueda suceder a futuro.

En el procesamiento el problema radica en ajustar el raster de magnitudes de interpolación más apropiado para poder realizar una interpretación geológica estructural para de esta manera generar una o más hipótesis de amenazas en base a una zonificación sísmica con respecto a las magnitudes de momento que se pueden dar en determinadas áreas y determinar cuáles serían sus efectos sobre el terreno en base a la escala INQUA O ESI 2007

Al tener un sin número de datos sísmicos (históricos y contemporáneos), el problema es tratarlos adecuadamente para trabajar con aquellos datos que estadísticamente se encuentren dentro de los parámetros para categorizarlo como un dato fidedigno y de esta manera pueda ser considerado dentro del conjunto de datos que después de varios procesos estadísticos darán como resultado una o algunas superficies de anomalías sísmicas que posteriormente serían analizadas tal como lo indica el párrafo anterior.

El siguiente problema es asegurar que esa superficie de anomalía sea correcta o por lo menos verificar que tiene respuesta con alguna evidencia o rasgo geológico estructural.

1.5 Alcance

El estudio propuesto tiene como fin generar una herramienta adicional para que pueda ser considerada en un estudio más a detalle en cuanto al análisis de riesgos naturales. O para que pueda ser considerada como criterio al momento de construir alguna infraestructura o ejecutar alguna obra de característica civil. Directamente podría ser útil para prefecturas, Secretaria Nacional de Gestión de Riesgos. Zonificaciones sísmica han sido generadas anteriormente, pero nunca se ha aplicado el análisis geoestadístico de los datos para observar cual es la mejor superficie de interpolación que se podría usar para realizar el análisis.

2 MARCO TEÓRICO

Al momento de producirse un sismo, gran parte de la energía se libera en forma de calor y una pequeña parte mediante la propagación de diversas tipos de ondas que hacen vibrar la corteza terrestre. Dentro de estas ondas encontramos las de Cuerpo que viajan a grandes distancias a través de la roca, identificándose las ondas P, primarias o de compresión, que producen que las partículas experimenten un movimiento paralelo a la dirección de propagación y las ondas S, secundarias o de corte, inducen un movimiento transversal. Otro tipo de onda son las Superficiales, las cuales se deben a reflexiones y refracciones de las ondas de cuerpo cuando éstas llegan a la superficie o a una interface entre estratos, se identifican dentro de éstas ondas las Rayleigh con movimiento vertical y elíptico, y las Love con movimiento horizontal.

Con la finalidad de medir y analizar el movimiento producido por un sismo fue diseñado a finales del siglo pasado el sismógrafo; el registro obtenido se denomina sismograma que es un

gráfico de las ondas sísmicas o una representación amplificada del movimiento del terreno. La diferencia en el arribo de las ondas P y S, permite la localización del epicentro del sismo. El tamaño de los sismos puede ser expresado en términos de su Magnitud o de su Intensidad.

La Intensidad es un índice de los efectos causados por un temblor y depende de las condiciones del terreno, la vulnerabilidad de las edificaciones y la distancia epicentral. Para estandarizar los niveles de intensidad se utilizan escalas tal como la Escala Mercalli Modificada (MM).

La Magnitud es un valor único y es una medida cuantitativa del sismo relacionada con la energía sísmica liberada. Teóricamente la magnitud no tiene límite superior, pero está limitada por la resistencia de las rocas en la corteza terrestre y la longitud de ruptura probable en la falla. Para su determinación han sido creadas diferentes escalas, dependiendo del tipo de onda en que se basa la medición tenemos:

2.1 Magnitud Local (ML).

La idea de medir la magnitud de un sismo basado en un registro instrumental fue introducida en 1935 por Charles Richter, Sismólogo de California Technological Institute. Fue definida para sismos locales en California para un radio de aproximadamente 600 km y se determina a partir de la máxima amplitud registrada por un sismógrafo Wood Anderson con constantes específicas (período = 0.8 segundos, amplificación estática = 2800 y factor de amortiguamiento = 0.8) ubicado a 100 kilómetros de la fuente sísmica. Para su determinación se utiliza la siguiente expresión (1):

$$ML = \log A - \log A_0 \quad (1)$$

Donde A es la máxima amplitud de la traza registrada y A_0 la amplitud máxima que sería producida por un sismo patrón, siendo éste aquel que produciría una deflexión de 0.001 mm en un sismógrafo ubicado a 100 km del epicentro.

Ya que la escala de magnitud es logarítmica, el incremento en una unidad de magnitud significa un aumento en diez veces de la amplitud de las ondas en el sismograma, lo cual no debe confundirse con lo que sucede con la energía sísmica liberada en donde un incremento en magnitud equivale a un aumento de aproximadamente 31.5 veces de energía.

El mayor problema con la magnitud local M_L o de Richter radica en que es difícil relacionarla con las características físicas del origen del terremoto. Además, existe un efecto de saturación para magnitudes cercanas a 8.3 – 8.5, debido a la ley de Gutenberg-Richter del escalamiento del espectro sísmico que provoca que los métodos tradicionales de magnitudes (M_L , M_b , M_S) produzcan estimaciones de magnitudes similares para temblores que claramente son de intensidad diferente. A inicios del siglo XXI, la mayoría de los sismólogos consideró obsoletas las escalas de magnitudes tradicionales, siendo éstas reemplazadas por una medida físicamente más significativa llamada momento sísmico (M_w), el cual es más adecuado para relacionar los parámetros físicos, como la dimensión de la ruptura sísmica y la energía liberada por el terremoto.

2.2 Magnitud de Ondas Superficiales (M_s).

Esta escala se basa en la amplitud máxima producida por las ondas superficiales Rayleigh con período en el rango de 18 a 22 segundos. La expresión para determinar su valor es la siguiente (2):

$$M_s = \log\left(\frac{A}{T}\right) + 1.66 \log D + 3.30 \quad (2)$$

Donde A es la máxima amplitud horizontal del terreno medida en micrómetros, T es el período de la onda en segundos y D la distancia epicentral en grados.

2.3 Magnitud de Ondas de Cuerpo (Mb).

La determinación de la magnitud MS para los sismos con profundidad focal mayor a 50 kilómetros se dificulta, debido a que no se generan ondas de superficie con suficiente amplitud; para compensar ésto se utilizó un factor de corrección de tal forma que se pudieran utilizar las ondas de cuerpo. La magnitud mb se basa en la amplitud de ondas de cuerpo con períodos cercanos a 1.0 segundos, para su determinación se utiliza la siguiente expresión (3):

$$Mb = \log\left(\frac{A}{T}\right) + Q(D \times H) \quad (3)$$

Donde A es la amplitud del terreno en micrómetros, T es el período en segundos y Q es un factor de atenuación que está en función de la distancia D en grados y la profundidad focal h en kilómetros.

Las escalas de magnitud Ms y Mb no reflejan adecuadamente el tamaño de sismos muy grandes, subestiman su valor y da una estimación poca exacta de la energía liberada, lo que se ha denominado saturación de las escalas de magnitud. Las máximas magnitudes Mb se encuentran alrededor de 6.5 a 6.8, y la magnitud Ms entre 8.3 a 8.7. Así también la magnitud definida empíricamente con base en la amplitud de las ondas sísmicas no permite definir el tamaño del sismo en términos del proceso físico de ruptura y de las dimensiones de la zona de dislocación.

La introducción del concepto de Momento Sísmico en la sismología, ha aportado una medida para designar el tamaño de un sismo que está en función directa de las propiedades físicas de

la roca y de las dimensiones del área que sufre la ruptura. Es a partir de este concepto que se ha desarrollado la magnitud de momento.

2.4 Magnitud de momento (M_w)

Es una escala logarítmica usada para medir y comparar sismos. Está basada en la medición de la energía total que se libera en un terremoto. Fue introducida en 1979 por Thomas C. Hanks y Hiroo Kanamori como la sucesora de la escala de Richter.

Una ventaja de la escala de magnitud de momento es que no se satura cerca de valores altos. Es decir, a diferencia de otras escalas, ésta no tiene un valor por encima del cual todos los terremotos más grandes reflejen magnitudes muy similares.

Otra ventaja que posee esta escala es que coincide y continúa con los parámetros de la escala de Richter.

Por estas razones, la escala de magnitud de momento es la más usada por sismólogos para medir y comparar terremotos de grandes proporciones. El Centro Nacional de Información Sísmica (National Earthquake Information Center) de los Estados Unidos, dependiente del Servicio geológico de EE.UU. (USGS) usa esta escala para la medición de terremotos de una magnitud superior a 3.5.

A pesar de lo anterior, la escala de Richter es la que goza de más popularidad en la prensa. Luego, es común que la prensa comunique la magnitud de un terremoto en «escala de Richter» cuando éste ha sido en realidad medido con la escala de magnitud de momento. En algunos casos esto no constituye un error, dada la coincidencia de parámetros de ambas escalas,

aunque se recomienda indicar simplemente «magnitud» y evitar la coletilla «escala de Richter» para evitar errores.

La magnitud de momento sísmico (M_w) resume en un único número la cantidad de energía liberada por el terremoto (llamada momento sísmico, M_0). La "w" en el subíndice del símbolo « M_w », proviene de la palabra inglesa «work», que significa «trabajo».

M_w coincide con las estimaciones obtenidas mediante otras escalas, como por ejemplo la escala de Richter. Es decir, M_w permite entender la cantidad de energía liberada por el terremoto (M_0) en términos del resto de las escalas sísmicas. Es por esto que se usa M_w en vez de M_0 como parámetro de la escala.

Los períodos de oscilación de las ondas sísmicas grandes son proporcionales al momento sísmico (M_0). Es por esto que se suele medir la magnitud de momento M_w a través de los períodos de oscilación por medio de sismógrafos.

La relación entre M_w y M_0 está dada por una fórmula desarrollada por Hiroo Kanamori en el Instituto de Sismología de California, que es la que sigue (4):

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7 \quad (4)$$

Obsérvese que la magnitud de momento sísmico (M_w) se obtiene a partir de una función logarítmica. Por tanto, es una variable adimensional. En cambio, el momento sísmico (M_0), al ser una variable que mide energía (fuerza x desplazamiento), tiene como unidad derivada la N x m o dina x cm. Más concretamente, el momento sísmico (M_0) es una cantidad que combina el área de ruptura y la compensación de la falla con una medida de la resistencia de las rocas mediante la siguiente ecuación (5):

$$M_0 = \mu \times A \times u \quad (5)$$

μ es el módulo de deformación de las rocas involucradas en el terremoto. Usualmente es de 30 gigapascales.

A es el área de ruptura a lo largo de la falla geológica donde ocurrió el terremoto.

u es el desplazamiento promedio de A .

Para obtener las de conversión entre ML (d), mb, Ms a Mw, se usaron las siguientes relaciones de magnitudes propuesta por Cahuari para zonas de subducción Peruana (2008) (6,7):

$$mb = 0.5624 * Mw + 2.198 \quad (6)$$

$$Mw = 0.9588 * mb + 0.458 \quad (7)$$

Estas magnitudes son válidas para rango entre 5.1 y 6.8, presentando un factor de correlación de 0.86 y 0.75 para mb y Mw, (8, 9)

$$Ms = 1.2626 * Mw - 1.3646 \quad (8)$$

$$Mw = 0.7044 * Ms + 1.702 \quad (9)$$

Estas magnitudes son válidas para rango entre 4.5 y 6.8, presentando un factor de correlación de 0.90 para Ms y Mw (10, 11)

$$MI(d) = 0.7795 * Mw + 0.9618 \quad (10)$$

$$Mw = 0.9879 * MI(d) + 0.3316 \quad (11)$$

Estas magnitudes son válidas para rango entre 4.5 y 6.8, presentando un factor de correlación de 0.80 y 0.90 para MI(d) y Mw.\

2.5 ESDA (Exploratory Spatial Data Analyst)

El ESDA analiza la autocorrelación espacial y direccional de los datos como paso previo a la aplicación de algunas técnicas de interpolación espacial como el Kriging

Con el análisis exploratorio se consigue:

- Examinar la distribución de los datos
- Detectar valores extremos (outliers) locales y globales.
- Buscar tendencias globales.
- Examinar la autocorrelación espacial y variación direccional de los datos.
- Entender la covariancia entre múltiples variables (no se va aplicar en este trabajo).
- Realizar transformación de los datos, si es que se necesita para ajustar un modelo de interpolación.

El ESDA, permite investigar gráficamente los datos muestrales para un mejor conocimiento de los mismos antes de usar las técnicas de interpolación, este análisis incluye: Histogramas, Gráficos de probabilidad normal QQ Plot, Análisis de tendencia y Semivariogramas; donde:

“histogramas y gráficos QQ Plot. ayudan a identificar que los datos muestrales se encuentran dentro de una distribución normal de datos, de no cumplirse esto se procederá aplicar dos tipos de transformaciones (Logarítmica o Exponencial) para lograr llevar los datos a una distribución normal.

Se considera parte de la transformación Box-Cox, cuando $\lambda=0$, la fórmula (12) es:

$$Y(s) = \ln(Z(s)) \text{ para } Z(s) > 0 \quad (12)^1$$

¹ CARDENAS MORENO, Antonio. "Análisis Geoestadístico". Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. 2da Edición, 2008. Editorial Alfaomega Ra-Ma. Página 754 – 865.

La transformación logarítmica se utiliza cuando los datos presentan una asimetría positiva y por lo tanto existe un grupo de datos con valores muy elevados.

2.5.1 Análisis de tendencia

Identifica que tipo de ecuación y de que orden se aplica mejor al modelo de interpolación.

2.5.2 Semivariograma

Explora y cuantifica la dependencia espacial de una variable, es decir su autocorrelación espacial. Uno de los principales objetivos de la variografía es explorar y cuantificar la dependencia espacial de una variable, es decir, su autocorrelación espacial. (Antonio Moreno, et al. 2008). Para medir la autocorrelación espacial se construye el semivariograma empírico donde se representa en el eje Y, la mitad de las diferencias al cuadrado entre cada par de lugares y en el eje X la distancia que los separa. De este gráfico (Figura 12, 13, 14, 15) los pares de lugares que estén más próximos, y que aparezcan más a la izquierda del eje X, tendrán valores más similares, más cerca del origen del eje Y. A medida que los puntos se alejan hacia la derecha estarán separados por mayores distancias y a medida que estén situados más altos sobre el eje Y, presentarán mayores diferencias entre ellos. Si esto ocurre, los datos tendrán dependencia espacial. Cuando la autocorrelación espacial solo depende de la distancia entre dos lugares se dice que hay isotropía. Pero si en la autocorrelación espacial hay influencias direccionales se dice que hay anisotropía, es decir, que la autocorrelación varía según la dirección elegida

2.6 Métodos de interpolaciones deterministas y exactas

La interpolación de datos ofrece la ventaja de proyectar mapas o superficies continuas a partir de datos discretos; sin embargo, la utilización de una buena cantidad de puntos del área en

estudio limita su utilización (Johnston et al. 2001). Dependiendo del tipo de datos analizados, su costo y dificultad de obtención determinan que tan valioso es finalmente el uso de la interpolación. Otro aspecto a mencionar, es que la precisión en el mapa generado, a partir de las características de un suelo en particular, depende en gran medida de la estructura espacial de los datos, donde entre más fuerte la correlación espacial, mejor la calidad del mapeo (Kravchenko 2003).

Las técnicas de interpolación deterministas se pueden clasificar en dos grupos en función del número de datos muestrales utilizados para estimar el valor de la variable en los puntos no muestrales. Técnicas globales que son las que tienen en cuenta todos los puntos muestrales en cualquier valor estimado (polinomio global) y las locales que sólo emplean los puntos muestrales que están en la vecindad de cada punto no muestral (IDW, polinomio local y funciones en base radial).

A su vez se diferencian entre técnicas de interpolación exactas y aproximadas cuya distinción reside en si el resultado del proceso de interpolación reproduce exactamente los valores en los puntos muestrales o lo hace sólo de manera aproximada. Será mucho más aceptable un método de interpolación que consiga un valor exacto en los valores observados que aquel procedimiento que no lo haga. El IDW y las funciones de Base Radial son interpoladores exactos, mientras que el polinomio global y local son inexactos.

2.6.1 IDW (*Inverse Distance Weighted*)

El método IDW es similar al Kriging ordinario, ya que da más peso a los valores cercanos a un punto, pero posee una menor complejidad del cálculo. El IDW utiliza un algoritmo simple basado en distancias (Johnston et al. 2001). Diversos autores han comparado el interpolador Kriging con el IDW en condiciones no tropicales (Gotway et al. 1996, Kravchenko y Bullock 1999, Mueller et al. 2001, Schloeder et al. 2001, Kravchenko 2003, Mueller et al. 2004). Ambos

modelos, Kriging ordinario e IDW, asumen que las predicciones son una combinación lineal de los datos, como lo muestra la ecuación (14) (Gotway et al. 1996, Schloeder et al. 2001).

Donde $\hat{z}(s_o)$ es el valor estimado en el punto interpolado s_o ; n es el número de observaciones vecinas usadas para la estimación y λ_i es el peso dado al valor observado $z(s_i)$ en las cercanías del valor s_o (Lozano et al. 2004). Este último parámetro hace la diferencia entre Kriging y el IDW.

$$\hat{z}(s_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i) \quad i=1, \dots, n$$

Por otro lado, el IDW calcula el peso de los valores de acuerdo a la relación inversa de la distancia (Schloeler et al. 2001) con a la ecuación (15)

$$\lambda_i = \frac{[d(s_i, s_o)]^{-p}}{\sum_{i=1}^n [d(s_i, s_o)]^{-p}} \quad i=1, \dots, n \quad (15)$$

Donde p es el parámetro del exponente que controla que tan rápido los pesos de los puntos tienden a cero (al aumentar su valor) conforme aumenta la distancia del sitio de interpolación. Entre mayor sea p , mayor peso es dado a los puntos más cercanos y por consiguiente se obtiene superficies más continuas o suaves y las predicciones tienden hacia el promedio de la muestra (Schloeder et al. 2001). Los valores p usualmente están entre 1 y 3, donde 2 es el más común (Gotway et al. 1996) y se lo conoce como distancia inversa al cuadrado.

2.6.2 Función Base Radial

Las funciones de base radial son técnicas de interpolación exacta. La superficie creada debe pasar por cada punto muestral. Hay cinco funciones de base diferentes: Completely regularized spline (figura 17), spline with tensión (figura 18), inverse multiquadric (figura 19),

multiquadric (figura 20), plate spline (figura 21). Cada función de base tiene diferente forma y da como resultado una superficie de interpolación distinta. Sin embargo conceptualmente son similares, ya que es como ajustar una goma elástica a través de todos los puntos muestrales minimizando la curvatura total de la superficie.

2.6.3 Técnicas de interpolación geoestadísticas: Kriging Ordinario

Dentro de los interpoladores usados existe un grupo llamado Kriging, nombre dado por su creador, el ingeniero en minas sudafricano D.G. Krige. Hasta el día de hoy, todos los interpoladores geoestadísticos están en el grupo de los Kriging (con sus variantes), los cuales ofrecen no solo predicciones y superficies de respuesta requeridas, sino también mapas de probabilidades y cuantiles (Johnston et al. 2001). El método Kriging cuantifica la estructura espacial de los datos -mediante el uso de variogramas llamados algunas veces semivariogramas debido a su similitud en el cálculo- y los predice mediante la interpolación, usando estadística. Se asume que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que va disminuyendo conforme se aleja del punto de interés. La medición de la probabilidad, efectuada por los métodos Kriging, hace la diferencia con respecto a los métodos determinísticos para interpolaciones espaciales, de los cuales los más usados son el de ponderación de distancias inversas (IDW: inverse distance weighting) y “splines” o ajuste por curvas (Burrough y McDonnell 1998). Ambos modelos, Kriging ordinario e IDW, asumen que las predicciones son una combinación lineal de los datos, como lo muestra la ecuación (16) (Gotway et al. 1996, Schloeder et al. 2001).

$$\hat{z}(s_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i) \quad i=1, \dots, n \quad (16)$$

Donde $z^{\wedge}(s_o)$ es el valor estimado en el punto interpolado s_o ; n es el número de observaciones vecinas usadas para la estimación y λ_i es el peso dado al valor observado $z(s_i)$ en las cercanías del valor s_o (Lozano et al. 2004). Este último parámetro hace la diferencia entre Kriging y el IDW. El método ordinario de Kriging obtiene los pesos (o influencia) de los valores, resolviendo la ecuación Kriging mostrada en la siguiente ecuación (17) (Schloeder et al. 2001).

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma[d(s_i, s_j)] + m = \gamma[d(s_o, s_i)], \quad i=1, \dots, n ; \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (17)$$

Donde n es el número de observaciones, m es el multiplicador Lagrange usado para la minimización de las restricciones, λ es el peso dado a cada una de las observaciones y la suma de todos los λ es igual a uno. Los subíndices i y j denotan los puntos muestreados, el subíndice 0 es el punto en estimación, s simboliza la medición efectuada (variable medida) y $d(s_i, s_o)$ es la distancia entre s_i y s_o a partir del semivariograma:

$$\gamma[d(s_i, s_o)] = \text{var}[z(s_i) - z(s_o)] \quad (18)$$

Esta semivarianza calculada es una medida para determinar la similitud entre observaciones, en donde a mayor similitud, menor semivarianza (Lozano et al. 2004). Los pesos (λ) o las relevancias de los valores, son determinados con el fin de asegurar que el error promedio para el modelo sea cero y además la varianza del error es minimizada (Schloeder et al. 2001), lo cual ofrece una predicción no sesgada. Pese a ello y como menciona Benmostefa (2006), este método requiere de supuestos estadísticos muy fuertes, como que la hipótesis intrínseca de estacionalidad sea aceptada, lo cual raramente se observa en la naturaleza.

2.6.3.1 El modelado del semivariograma en el kriging.

El semivariograma permite analizar la auto-correlación espacial de la variable, ajustando a una función matemática que indique el semivariograma teórica, que mejor sintetiza los datos observados. Las funciones del semivariograma y de la covarianza, cuantifican la asunción de que las cosas que están más próximas, tienden a ser similares que las que están más lejos. Ambas miden la fuerza de la correlación estadística, en función de la distancia. El semivariograma es definido como (19):

$$\gamma(S_i, S_j) = \frac{1}{2} \text{var}(Z(S_i) - Z(S_j)) \quad (19)$$

Donde *var* es la varianza. Si dos lugares: γ están más próximos el uno del otro, en términos de distancia medida $d(S_i, S_j)$, se espera que sean similares y que la diferencia de sus valores sea pequeña. Por lo contrario, si S_i y S_j se alejan, se harán menos similares y la diferencia en sus valores se hará mayor. Existen varios modelos de funciones; para este trabajo se hizo referencia a los modelos: Circular (figura 23 a 28), Esférico (figura 34), Exponencial (figura 35 a 40) y Gauss (figura 41 a 46), pero hay unos parámetros γ son comunes para todos, los cuales fueron comparados para verificar cual era el modelo más óptimo a utilizar. (Para este párrafo y el siguiente hacer referencia a la figura 22). La meseta o sill es el valor estable de γ ; coincide con el valor de la varianza normal de esa variable. Muchas veces está conformada por dos partes: una discontinuidad en el origen, que se denomina efecto Nugget, y la meseta parcial (partial sill), que juntos conforman la meseta o sill. A su vez el Nugget, que representa la varianza mínima y el punto en que la recta corta al eje Y, se debe a errores de medida o variaciones de micro-escala.

El alcance o range es la distancia a partir de la cual el valor de γ se estabiliza. Indica la influencia espacial de la auto-correlación en la variable, es decir, la distancia hasta la cual, cada punto influye en su entorno. El alcance muestra que la variabilidad de un hecho

geográfico, no aumenta más la distancia de separación, por lo que los valores de ese hecho son independientes entre sí, cuando están separados por esa distancia. La auto-correlación por lo tanto, sólo aparece dentro del alcance del semivariograma .

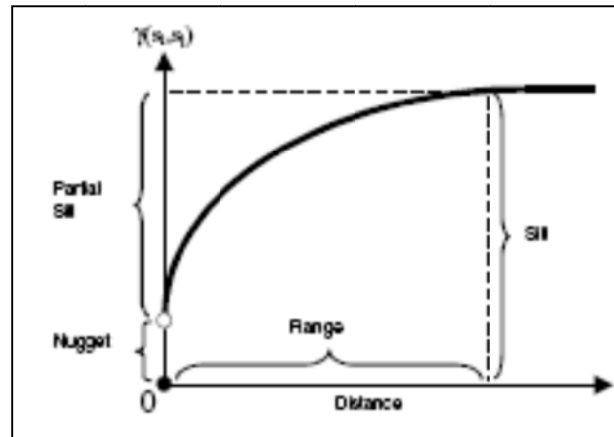


Figura 1. Gráfico de la Varianza dentro del Semivariograma

Fuente: CARDENAS MORENO, Antonio. "Análisis Geoestadístico". Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. 2da Edición, 2008

2.6.3.1.1 *Vecindad en el Kriging.*

Se basa en el conocimiento de la localización de los lugares, y la auto-correlación espacial de los datos, que se puede obtener mediante el ESDA, y mediante el asistente geoestadístico del ArcMap, el cual por default selecciona la vecindad requerida, para el tipo de distribución que tengan los datos que se utilizan en este trabajo.

2.6.3.1.2 *Validación cruzada y validación*

Cuando se predicen valores de lugares no muestrales, se dispone de dos herramientas: la validación cruzada y la validación, con las cuales se puede comprobar la validez del modelo

que se está utilizando; además, permiten tomar una decisión sobre el modelo que proporciona las mejores predicciones.

La validación cruzada (cross validation) utiliza todos los datos muestrales, para estimar el modelo de auto-correlación. Cada vez quita un dato muestral y lo predice con el resto de la muestra; después compara el valor predicho de ese punto, con el valor observado. Este procedimiento se repite con cada uno de los puntos muestrales, y al final la validación cruzada compara los valores observados, con los calculados.

La validación, por el contrario, divide la muestra en dos partes: La una, la utiliza para calcular la tendencia y la auto-correlación, que se van a utilizar en la predicción

2.7 Sismicidad y ambiente tectónico

La componente en estudio está localizado frente a un activo margen de subducción entre la placa de nazca y la Sudamericana (figura 02) (Eguez et al., 2003, Beck & Susan, 1992; Espinoza, 1992; Mendoza & Dewey, 1984).



Figura 2. Ubicación de Placas Tectónicas

Fuente: La tierra y su dinámica (http://fresno.pntic.mec.es/msap0005/2eso/Tema_07/Tema_07.html)

La placa oceánica de Nazca esta subduciendo a lo largo de la trinchera o fosa Ecuador (Figura 47) en dirección N80°E a una velocidad de 6 a 8 cm/año (Baldock 1983, Barazangi & Isacks 1976, Benitez 1995, Bourdon & Eissen et al. 2003, Gustcher et al., 1999, Stern 2004, White et al., 2003) y a dado origen a diferentes niveles de deformación en la corteza continental hasta la formación de la Cordillera de los Andes y la consecuente formación de sistemas de fallas activas y capaces y cadenas de volcanes (Chunga et al., 2009).

El margen de subducción ecuatoriano es una de las áreas más activa en el mundo y dentro del corto registro histórico que tenemos, ha sido escenario de fuertes terremotos de $M_s \geq 6.9 \leq 8.8$ reportados desde 1877 (Chunga et al., 2009).

Entre el segmento oceánico y margen costero, Gustcher et al., (1999) menciona desplazamientos verticales de una gran falla cortical segmentada de cerca 500 Km de longitud, localizada entre la fosa norte ecuatoriana (Esmeraldas) y sur colombiana (region Tumaco). En este segmento nueve fuertes terremotos han sido registrado el siglo pasado: (1) Tumaco – Esmeraldas, 1877, (2) Esmeraldas, 1906 [2], 1907, 1942, 1958 y 1979. Gustcher et al. (1999) indica que los terremotos de Manabi, 1956 y 1998, pudieron ser también una consecuencia de la reactivación de la falla cortical segmentada. En la fosa ecuatoriana – Golfo de Guayaquil – norte de Perú, se han registrado seis terremotos $M_s \geq 6.9 \leq 7.8$, en los años 1901 [2 eventos], 1933, 1953 [2 eventos], 1959 (Silgado, 1957; Swenson & Beck, 1996)

El análisis de Magnitudes en este estudio será en relación a las magnitudes de momento (M_w) según los resultados obtenidos en el análisis previo para la obtención del Raster de Superficie, también se añadirá la escala de intensidad ESI 2007 (Environment Seismic Intensity Scale) (figura 48), o también conocida como escala de intensidad INQUA (Michetti et al, 2004), que complementa las escalas existentes (MSK, MM, EMS, etc.) y se ocupa de los efectos generados por los sismos en el medio ambiente dando escalas desde el nivel I al XII. Esta escala es una herramienta útil para los sismos de magnitudes muy altas donde el daño en la

infraestructura y edificaciones es tan grande que no permite obtener información por la saturación de escalas. Así mismo es muy útil en sitios poco poblados ya que la ausencia de infraestructura y edificaciones dificulta asignar la intensidad con las escalas convencionales.

En definitiva, la escala ESI-2007 permite cuantificar las evidencias de sismos históricos y pre-históricos y asignarles intensidades en función de las dimensiones de los efectos primarios (rupturas superficiales, elevación/subsidencia del terreno) y secundarios (agrietamientos, deslizamientos, licuefacción, efectos hidrológicos y sobre la vegetación, etc.) que producen los terremotos e implementarlos en los catálogos sísmicos convencionales (Silva et al., 2008; Reicherter et al., 2009).

CHART OF THE INQUA ENVIRONMENTAL SEISMIC INTENSITY SCALE 2007-ESI 07
by The Spanish Working Group (modified from Silva et al. 2008)

OBSERVED	PRIMARY EFFECTS		SECONDARY EFFECTS WITH GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL RECORD				OTHER SECONDARY EFFECTS		AFFECTED AREA AND TYPE OF RECORD		
	SURFACE RUPTURES	TECTONIC UPLIFT/SUBSID	GROUND CRACKS	SLOPE MOVEMENTS	LIQUEFACTION PROCESSES	ANOMALOUS WAVES AND TSUNAMIS	HYDROGEOLOGICAL ANOMALIES	TREE SHAKING	Affected AREA	Type of RECORD	
IV	Offset	Length	Width	Length	ENVIRONMENTAL EFFECTS ARE VERY RARE AND CANNOT BE USED AS DIAGNOSTIC						
OBSERVED DAMAGING DESTRUCTIVE VERY DESTRUCTIVE DEVASTATING	a	ASSENT	ASSENT	Rare and local	Rare and local	cm	Temporary level changes	Temporary level changes	Rare and local	Geological frequent and exceptionally geomorphological	
		VII	Rare and local	Permanent ground dislocation (<10 cm)	cm	10 ¹ -10 ² m ³	cm	Temporary sea-level changes	Temp. turbidity changes		Local within epicentral zone
		VIII	km	<1 m	dm	10 ¹ -10 ² m ³	cm	Waves <1 m	Temporary F + Q changes		100 km ²
b	X	km	<10 m	m	10 ¹ -10 ² m ³	cm	1-2 m	Temp. turbidity changes	Temp. spring drying	1,000 km ²	
		km	>10 m	m	10 ¹ -10 ² m ³	cm	3-5 m	Temp. turbidity changes	Permanent river changes	5,000 km ²	
		km	>100 km	>10 m	m	>10 ² m ³	cm	>10 m	Permanent river changes	10,000 km ²	
c	XI	km	>100 km	>10 m	km	>5 m	cm	cm	cm	50,000 km ²	
		km	>100 km	>10 m	km	>5 m	cm	cm	cm	50,000 km ²	
		Dip and strike-slip offset of coseismic ruptures	Permanent ground dislocation	Width and length of cracks and fractures in soils and rocks	Bulk volume of mobilized material	Dimension of liquified levels and sand boils	Dimension of sea-level changes, standing waves and tsunamis	Base-level changes in springs, rivers, aquifers	Tree branches and tree-trunk falling, ruptures, etc...		

Michetti et al., 2007. Environmental Seismic Intensity scale-ESI 2007. Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, 74. Servizio Geologico d'Italia, APAT, Rome, Italy
Silva et al., 2008. Catalogue of the geological and environmental effects of earthquakes in Spain in the ESI-2007 Macroseismic scale, Geotemas, 6. Spain

Figura 3. Cuadro Descriptivo de las Intensidades ESI 2007

Fuente: Catálogo de los efectos geológicos al medio ambiente. España. Silva et al, 2008

2.7.1 Niveles de Intensidad en la Escala ESI 2007

I a III. EFECTOS NO PERCEPTIBLES EN EL AMBIENTE: Pueden ser usados como diagnósticos

IV – AMPLIAMENTE OBSERVADO: Primeros efectos inequívocos sobre el Ambiente

Efectos primarios ausentes.

Efectos secundarios:

- a) En raras ocasiones suceden pequeñas variaciones locales del nivel de agua en pozos y/o en el caudal de manantiales y fuentes. En muy raras ocasiones ocurren pequeñas variaciones de las propiedades físicas - químicas del agua y de la turbidez del agua en los lagos, manantiales, fuentes y pozos, especialmente dentro de grandes acuíferos kársticos que son los más propensos a este fenómeno.
- b) En cuencas cerradas (lagos e incluso mares) se pueden formar pequeños seiches centimétricos que comúnmente solo son detectados por los mareógrafos, aunque excepcionalmente pueden ser vistos. Característicos en el campo lejano de fuertes terremotos. Oleaje anómalo es percibido por todo el mundo en pequeñas embarcaciones, por algunas personas en barcos y por la mayoría en la costa. El agua de piscinas y estanques se agita y algunas veces puede desbordarse.
- c) Ocasionalmente, muy pocos casos de grietas muy finas (mm) en zonas donde la litología (ej. depósitos aluviales poco compactados, suelos saturados) y/o morfología (laderas escarpadas o cimas de colinas) son más propensos a este fenómeno.

- d) Excepcionalmente pueden ocurrir caídas de rocas, y pequeños deslizamientos existentes pueden reactivarse. Fundamentalmente en laderas donde el equilibrio es ya muy inestable (ej. laderas o cuestas, escarpadas y cortadas, desarrolladas sobre suelos saturados o material coluvial poco compactado, así como en cortes y taludes artificiales de caminos, carreteras, ferrocarriles y canteras o areneros a cielo abierto).

- e) Las ramas de los árboles pueden verse sacudidas.

V – FUERTE: Efectos marginales sobre el Ambiente (Los efectos naturales afectan marginalmente al terreno y solo en ocasiones excepcionales dejan evidencia en el registro geológico -procesos de liquefacción y en ningún caso afectan al registro geomorfológico permanente del paisaje afectado).

Efectos primarios ausentes.

Efectos secundarios:

- a) En raras ocasiones ocurren variaciones apreciables en el nivel de agua en pozos y/o caudal en manantiales y fuentes, así como pequeñas variaciones en las propiedades físico-químicas y turbidez del agua de lagos, manantiales, fuentes y pozos.

- b) En cuencas cerradas (lagos e incluso mares) se pueden formar pequeños seiches decimétricos que comúnmente pueden ser observados. Característicos en el campo lejano de fuertes terremotos. Oleaje anómalo de pocas decenas de centímetros es percibido por todo el mundo en todo tipo de embarcaciones y en la costa. Piscinas y estanques comúnmente se desbordan.

- c) Localmente se desarrollan finas grietas de anchura milimétrica, y longitud decimétrica a métrica, en zonas donde la litología (ej. depósitos aluviales poco compactados, suelos

saturados) y/o morfología (laderas o escarpes de colinas) son más propensos a este fenómeno.

- d) En raras ocasiones ocurren caídas de rocas, deslizamientos rotacionales y flujos de tierras, a pequeña escala (muy locales), especialmente a lo largo de pendientes donde el equilibrio es inestable (ej. laderas o cuestas escarpadas sobre materiales sedimentarios poco compactados o suelos saturados, así como en cortes y taludes artificiales de caminos, carreteras, ferrocarriles y canteras o areneros a cielo abierto). Ocasionalmente se pueden generar pequeños deslizamientos submarinos que dan lugar a oleajes anómalos transitorios en zonas litorales.
- e) Las ramas de los árboles y arbustos se sacuden ligeramente y en muy raros casos pueden caer ramas muertas o frutos.
- f) Extremadamente raros casos de licuefacción (volcanes de arena) de pequeño tamaño (cm) en áreas propensas a este tipo de fenómeno (llanuras costeras y fondos aluviales recientes arenosos con nivel freático muy somero).

VI – LIGERAMENTE DAÑINO: Efectos moderados sobre el Ambiente (Los efectos naturales pueden dejar alguna traza significativa en el terreno, pero por lo general con un grado de supervivencia en el paisaje muy corto, de semanas o pocos meses. El registro geológico de procesos de licuefacción y deslizamientos comienza a ser significativo)

Efectos primarios ausentes.

Efectos secundarios:

- a) Registro común de variaciones significativas en el nivel de agua en pozos y/o caudal en manantiales y fuentes, así como pequeñas variaciones en las propiedades físico-químicas y turbidez del agua de lagos, manantiales, fuentes y pozos.
- b) Oleaje anómalo de varias decenas de centímetros producen inundaciones limitadas en zonas de costa y ribera. Piscinas, estanques y pequeñas lagunas comúnmente se desbordan.
- c) *Ocasionalmente se observan **fracturas** de anchura mili a centimétrica y longitud métrica en depósitos aluviales poco compactados y/o suelos saturados. Especialmente a lo largo de pendientes escarpadas y márgenes (orillas) de ríos, donde pueden alcanzar de 1 a 2 cm de anchura. Algunas agrietamientos milimétricos pueden desarrollarse en carreteras pavimentadas (asfaltos / empedrados).*
- d) Ocasionalmente pueden ocurrir caídas de rocas y deslizamientos de hasta ca. 103 m³, especialmente donde el equilibrio es inestable y existen fuertes pendientes. (ej. Laderas o cuestas escarpadas sobre materiales sedimentarios poco compactados, suelos saturados, o rocas fracturadas / meteorizadas). Ocasionalmente pueden suceder eventos de deslizamientos submarinos o subacuáticos en zonas costeras y lagos generando oleaje anómalo que por lo general solo es detectado por registros instrumentales.
- e) Las ramas de árboles y arbustos son sacudidas visiblemente. Algunas pocas ramas inestables y copas de árboles pueden romperse y caer, dependiendo de la especie y del estado de madurez de los frutos.
- f) *En raras ocasiones pueden ocurrir casos de licuefacción (volcanes de arena), pequeños en tamaño (cm), en áreas propensas a este tipo de fenómeno como llanuras costeras y fondos aluviales recientes con nivel freático muy somero.*

VII – DAÑINO: Efectos apreciables sobre el Ambiente (Los efectos naturales pueden dejar trazas significativas en el terreno, pero por lo general con un grado de supervivencia en el registro geomorfológico muy corto, de meses o pocos años, muy excepcionalmente permanentes. El registro geológico de procesos de liquefacción, deslizamientos comienza a ser bastante significativo en áreas propicias)

Efectos primarios: Muy raramente observados, casi exclusivamente en zonas volcánicas. Pueden generarse rupturas superficiales de falla limitadas, con longitud de decenas a centenares de metros y desplazamiento (offset) centimétrico, esencialmente asociadas a terremotos tectó-volcánicos muy *superficiales*.

Efectos secundarios: El área afectada es generalmente inferior o del orden de 10 km².

- a) Localmente se registran variaciones significativas en el nivel de agua en pozos y/o caudal de manantiales y fuentes. Raramente, pequeños manantiales o fuentes pueden temporalmente secarse, y/o aparecer otros nuevos. Comúnmente se producen variaciones apreciables en las propiedades físico-químicas y turbidez del agua de lagos, manantiales, fuentes y pozos.
- b) Olas anómalas, incluso de más de un metro de altura producen inundaciones limitadas en zonas de costa y ribera, dañando y arrastrando objetos de distintas dimensiones. Se producen desbordamientos en lagunas, estanques e incluso ríos.
- c) Fracturas de hasta 5 - 10 centímetros de ancho y centenares de metros de longitud son comúnmente observadas en depósitos aluviales poco compactados y/o suelos saturados. Raramente también se observan fracturas de hasta 1 centímetro de ancho en materiales arenosos secos y suelos arcillosos. Son comunes las grietas centimétricas en caminos pavimentados (asfalto o empedrados).

- d) Comúnmente ocurren deslizamientos aislados y dispersos en áreas especialmente propensas donde el equilibrio es inestable (ej. laderas o cuestas de alta pendiente sobre materiales sedimentarios poco compactados, suelos saturados o rocas fracturadas / meteorizadas). Caída de rocas apreciable en desfiladeros y gargantas escarpadas o acantilados costeros. Su tamaño es a veces considerable (103 – 105 m³). En materiales arenosos secos, areno-arcillosos y suelos arcillosos los volúmenes son normalmente hasta 100 m³. Rupturas, derrumbes y caídas (rocas) pueden afectar las orillas de los ríos y terraplenes o taludes artificiales (ej. cortes de caminos, canteras, etc.) desarrollados en materiales sedimentarios poco compactados o rocas fracturadas/meteorizadas. Se pueden generar deslizamientos submarinos o subacuáticos significativos que provocan oleajes anómalos en zonas costeras de mares y lagos observados por la mayoría de las personas en embarcaciones y puertos.
- e) En zonas boscosas los árboles y arbustos son sacudidos vigorosamente. Muchas ramas y copas de árboles rompen y caen.
- f) Raros casos de licuefacción (volcanes de arena) de hasta 50 cm de diámetro pueden desarrollarse en áreas propensas a este tipo de fenómeno como (llanuras costeras y fondos aluviales recientes con nivel freático muy somero.
- g) En zonas secas o semiáridas, pueden levantarse nubes de polvo en el área epicentral.
- h) Piedras e incluso pequeños cantos y troncos de árboles pueden ser arrojados al aire dejando huellas de caída en suelos blandos.

VIII – MUY DAÑINO: Efectos considerables sobre el Ambiente (Los efectos naturales dejan trazas significativas y en algunas ocasiones permanentes en el terreno. El registro

geomorfológico comienza a ser algo significativo y el registro geológico de rupturas de falla – excepcionalmente- procesos de liquefacción y deslizamientos ya toma un cuerpo notable).

Efectos primarios: Raramente observados.

Las rupturas de falla pueden alcanzar hasta varios centenares de metros de longitud, con desplazamientos (offset) de pocos centímetros (< 5 cm), particularmente durante terremotos muy superficiales, como ocurre en eventos tectó-volcánicos. Subsistencia o elevación tectónica de la superficie del terreno puede presentar valores máximos de orden centimétrico.

Efectos secundarios: El área afectada es generalmente inferior o del orden de 100 km².

- a) Los manantiales y fuentes pueden cambiar, generalmente de forma temporal, tanto su caudal y/o posición altimétrica (sobrepresión). Algunas manantiales y fuentes pequeñas pueden incluso secarse. Las variaciones en el nivel del agua en los pozos son comunes y significativas. Las propiedades físico-químicas y, más comúnmente la temperatura, cambia en manantiales y/o pozos. El agua de lagos, ríos y manantiales frecuentemente puede volverse turbia, incluso ligeramente fangosa. Localmente se pueden producir emisiones de gases normalmente sulfurosos.
- b) Olas anómalas de entre 1-2 m de altura producen inundaciones en zonas de costa y ribera, dañando y arrastrando objetos de distintas dimensiones. Se producen desbordamientos violentos en lagunas, estanques y ríos. Erosión y acumulación de restos flotantes en las playas, donde los arbustos e incluso árboles débilmente enraizados pueden ser arrancados y arrastrados hacia el interior.
- c) Fracturas de hasta 50 centímetros de anchura y centenares de metros de longitud son comúnmente observadas en depósitos aluviales poco compactados y/o suelos saturados.

En raros casos pueden desarrollarse fracturas de hasta 1 cm de anchura en rocas competentes o firmes. Son comunes grietas decimétricas y pequeñas ondulaciones de presión en caminos y zonas pavimentadas (asfalto o empedrados).

- d) Deslizamientos pequeños a moderados (103 – 105 m³) pueden ocurrir extensamente en áreas propensas. Raramente pueden también ocurrir en laderas de poca pendiente donde el equilibrio es inestable (ej. pendientes o laderas sobre materiales sedimentarios poco compactados, suelos saturados o rocas fracturadas / meteorizadas). Caída de rocas en desfiladeros escarpados y acantilados costeros. Su tamaño es a veces grande (105 - 106 m³). Algunos deslizamientos pueden ocasionalmente obturar valles estrechos causando lagos temporales e incluso permanentes. Rupturas, derrumbes y caídas (rocas) pueden afectar las márgenes (orillas) de los ríos, los terraplenes y taludes artificiales (p.ej. cortes de caminos, canteras, etc.) desarrollados en materiales sedimentarios poco compactados o rocas fracturadas/meteorizadas. Es común la generación de deslizamientos submarinos en zonas costeras.
- e) Los árboles se sacuden fuertemente. Muchas ramas se rompen y caen. Más raramente, troncos en equilibrio pueden desenraizarse y caer, especialmente en laderas con fuerte pendiente.
- f) Los Procesos de Licuefacción pueden ser frecuentes en el área epicentral, dependiendo de las condiciones locales. Los efectos más característicos son volcanes de arenas de hasta ca. 1 m de diámetro; chorros de agua (Water fountains) pueden ser visibles en aguas tranquilas de lagos someros (lagoones, salinas, zonas pantanosas); extensiones laterales y asentamientos locales (subsistencia hasta aprox. 30 cm) con agrietamientos paralelos a los cuerpos de agua (márgenes de ríos, lagos, canales y líneas de costa).
- g) En zonas secas o semiáridas, pueden levantarse nubes de polvo en el área epicentral.

- h) Piedras e incluso pequeños cantos y troncos de árboles pueden ser arrojados al aire dejando huellas de caída en suelos blandos.

IX – DESTRUCTIVO: Los efectos en el ambiente son generalizados, constituyendo una fuente de peligrosidad considerable, y empiezan a ser importantes para la determinación de la intensidad. (Los efectos naturales dejan trazas considerables y permanentes en el terreno.

El registro geomorfológico de este tipo de eventos comienza a ser un dato muy significativo, mientras que en el registro geológico, rupturas de falla, procesos de liquefacción, deslizamiento y excepcionalmente tsunamis es una pauta común).

Efectos primarios: Comúnmente observados.

Las rupturas de falla pueden alcanzar una longitud de unos pocos kilómetros, con desplazamientos (offset) de algunas decenas de centímetros (10 – 20 cm). Subsistencia o elevación tectónica de la superficie del terreno con valores máximos de orden decímetro.

Efectos secundarios: El área afectada es generalmente inferior o del orden de 1000 km².

- a) Los manantiales y fuentes pueden cambiar, generalmente de forma temporal, tanto su caudal y/o posición altimétrica (sobrepresión). Algunas manantiales y fuentes pueden incluso secarse. Las variaciones en el nivel del agua en los pozos son comunes y significativas. Las propiedades físico-químicas y, más comúnmente la temperatura, cambia en manantiales y/o pozos. El agua de lagos, ríos y manantiales frecuentemente puede volverse muy turbia, incluso ligeramente fangosa. Localmente se pueden producir

emisiones de gases normalmente sulfurosos y, ocasionalmente tanto la hierba como los arbustos alrededor de estos puntos de emisión pueden arder.

- b) Se producen **Olas anómalas** de **varios metros** de altura en cuerpos de agua y cursos fluviales. En zonas de llanura de inundación los cauces de agua pueden incluso variar sus cursos, fundamentalmente ocasionado por procesos de subsidencia. Pueden aparecer y/o desaparecer pequeñas lagunas. Dependiendo de la topografía de la línea de costa y el fondo marino, pueden producirse **tsunamis peligrosos de algunos metros de runup** provocando la inundación de zonas extensas a lo largo del litoral. Erosión generalizada de las zonas de playa, donde los arbustos e incluso árboles pueden ser arrancados y arrastrados hacia el interior.
- c) Fracturas de hasta 100 centímetros de anchura y centenares de metros de longitud son comúnmente observadas en depósitos aluviales poco compactados y/o suelos saturados. En rocas competentes o firmes pueden desarrollarse fracturas de hasta 10 cm de anchura. En caminos y zonas pavimentadas (asfalto o empedrados) es común el desarrollo de grietas decimétricas significativas, así como pequeñas ondulaciones de presión.
- d) Deslizamientos extensos y frecuentes en áreas propensas, incluso en laderas de poca pendiente en condiciones de equilibrio inestable (ej. pendientes o laderas escarpadas sobre materiales sedimentarios poco compactados, suelos saturados o rocas fracturadas / meteorizadas). Caída de rocas en desfiladeros escarpados y acantilados costeros. Su tamaño es frecuentemente grande (**105 m³**) y a veces muy grande (**106m³**). Algunos deslizamientos pueden ocasionalmente obturar valles estrechos, causando lagos temporales e incluso permanentes. Las orillas de los ríos, así como terraplenes y taludes artificiales (ej. cortes de caminos, canteras, etc.) frecuentemente colapsan. Son frecuentes grandes deslizamientos submarinos o subacuáticos en zonas costeras y lagos. e) Los árboles se sacuden vigorosamente. Las ramas y troncos de árboles de pequeño diámetro,

frecuentemente se rompen y caen. Algunos árboles situados en laderas de fuerte pendiente pueden ser desenraizados y colapsar.

- e) Los Procesos de Licuefacción y eyección de agua son frecuente. Los efectos más típicos son: Volcanes de arena de hasta 3 m de diámetro; chorros de agua (Water fountains) pueden ser visibles en aguas tranquilas de lagos someros (lagoones, salinas, zonas pantanosas); extensiones laterales y asentamientos locales (subsistencia hasta ca. 30 cm), con agrietamientos paralelos a los cuerpos de agua (márgenes de ríos, lagos, canales y líneas de costa).
- f) En zonas secas o semiáridas, pueden levantarse nubes de polvo en el área epicentral.
- g) Pequeños cantos y troncos de árboles pueden ser arrojados al aire desplazándose varios metros (dependiendo de la pendiente del terreno) dejando huellas de caída en suelos blandos.

X – MUY DESTRUCTIVO. Los Efectos Ambientales se convierten en una de las fuentes de peligrosidad dominantes y son esenciales para la evaluación de la intensidad. (Los efectos Ambientales son dominantes sobre otro tipo de criterios en la evaluación de los daños, en el registro geomorfológico y fundamental

Efectos primarios: Comienzan a ser importantes.

Las rupturas de falla se convierten en un fenómeno característico. Pueden alcanzar una longitud de decenas de kilómetros, con desplazamientos (offset) decimétricos hasta unos pocos metros (1 - 2 m). Desarrollo de micrograbens y depresiones tectónicas alargadas en terremotos con hipocentros muy superficiales. En el caso de eventos tectó-volcánicos la longitud de las rupturas puede ser muy inferior. Puede ocurrir subsidencia o elevación tectónica del terreno con valores máximos de unos pocos metros.

Efectos secundarios: El área afectada es generalmente inferior o del orden de 5000 km².

- a) Los manantiales y fuentes cambian significativamente tanto su caudal como su posición altimétrica (sobrepresión). Algunas manantiales y fuentes pueden secarse incluso permanentemente. Las variaciones en el nivel del agua en los pozos son comunes y significativas. Las propiedades físico-químicas de manantiales y/o pozos y, más comúnmente la temperatura en fuentes termales, sufren fuertes variaciones. El agua de manantiales, ríos e incluso grandes lagos a menudo se vuelve muy fangosa. Las emisiones de gases, normalmente sulfurosos, son comúnmente observadas. La hierba y los arbustos en el entorno de estos puntos de emisión pueden arder.

- b) Se producen **Olas anómalas de varios metros** de altura incluso en grandes lagos y ríos. En zonas de llanura de inundación los cauces de agua pueden sufrir significativos cambios de curso temporales e incluso permanentes, debido a la generalización de procesos de subsidencia. Pueden aparecer y/o desaparecer lagunas de entidad. Dependiendo de la topografía de la línea de costa y el fondo marino, pueden producirse **tsunamis de hasta 5 m de runup** provocando la inundación generalizada de zonas costeras bajas de hasta miles de metros de penetración tierra adentro. Pequeños bloques pueden ser arrastrados hacia el interior. Erosión significativa generalizada de las zonas costeras bajas que producen significativos cambios la geometría de la línea de costa. La mayoría de la vegetación litoral (arbustos y árboles) es mayoritariamente arrasada y arrastrada hacia el interior.

- c) Son frecuentes grandes grietas en el terreno con aberturas de hasta más de 1 m de anchura, principalmente en depósitos aluviales poco compactados y/o suelos saturados. En rocas competentes pueden alcanzar varios decímetros de anchura. Se desarrollan grietas anchas en caminos pavimentados (asfalto o empedrados), acompañadas por significativas

ondulaciones de presión. En suelos enlosados y bordillos de aceras pueden desarrollarse estructuras de tipo pop-up de altura centimétrica y de extensión métrica a decamétrica.

- d) Grandes deslizamientos y caídas de rocas ($> 10^5 - 10^6 \text{ m}^3$) son frecuentes, prácticamente con independencia del estado del equilibrio y pendiente de las laderas, causando lagos de obturación temporales o permanentes. Las márgenes de los ríos, terraplenes, taludes y excavaciones artificiales típicamente colapsan. Levees, terraplenes y represas de tierra pueden incluso sufrir serios daños
- e) Los árboles se sacuden fuertemente. Muchas ramas y troncos de árboles se rompen y caen. Algunos árboles pueden ser desenraizados y colapsar incluso en laderas de poca pendiente.
- f) Los Procesos de Licuefacción, eyección de agua y compactación del suelo pueden cambiar el aspecto de extensas zonas, aplanando la topografía de llanuras costeras y llanuras de inundación fluviales y aluviales; volcanes de arenas de hasta aproximadamente 6 m de diámetro. Los procesos de subsidencia $> 1 \text{ m}$ produciendo grandes y largas grietas debido a extensiones laterales son comunes a lo largo de márgenes de ríos, lagos, y canales. Grandes deslizamientos submarinos o subacuáticos son frecuentes en zonas costeras y lagos.
- g) En zonas secas o semiáridas, pueden levantarse nubes de polvo en el área epicentral.
- h) Cantos y bloques (de hasta 2-3 metros de diámetro) pueden ser arrojados al aire desplazándose centenares de metros incluso en zonas de suave pendiente, dejando trazas y huellas de caída en suelos blandos.

XI – DEVASTADOR. Los Efectos Ambientales se hacen totalmente esenciales para evaluar la intensidad debido a la saturación de los daños estructurales en edificaciones

(Los efectos Ambientales llegan a ser esenciales para evaluaciones de Intensidad dada la casi total saturación de otro tipo de criterios para estimar los niveles de daños)

Efectos primarios: Dominantes.

Las rupturas de falla primarias pueden extenderse desde varias decenas de kilómetros hasta unos 100 km, acompañadas por desplazamientos de varios metros (> 2m). Es patente el desarrollo de fosas tectónicas, depresiones alargadas y lomas de presión. Las líneas de drenaje pueden desplazarse ostensiblemente. Puede ocurrir subsidencia o elevación tectónica del terreno con valores de muchos metros.

Efectos secundarios: El área afectada es generalmente inferior o del orden de 10.000 km².

- a) Los manantiales y fuentes cambian significativamente tanto su caudal como su posición altimétrica (sobrepresión). Algunas manantiales y fuentes pueden secarse incluso permanentemente. Las variaciones en el nivel del agua en los pozos son comunes y significativas. Las propiedades físico-químicas de manantiales y/o pozos y, más comúnmente la temperatura en fuentes termales, sufren fuertes variaciones. El agua de manantiales, ríos e incluso grandes lagos a menudo se vuelve muy fangosa. Las emisiones de gases, normalmente sulfurosos, son comúnmente observadas. La hierba y los arbustos en el entorno de estos puntos de emisión pueden arder.

- b) Se producen Olas anómalas de varios metros de altura incluso en grandes lagos y ríos. En zonas de llanura de inundación los cauces de agua pueden sufrir significativos cambios de curso temporales e incluso permanentes, debido a la generalización de procesos de subsidencia y desplomes de los márgenes. Pueden aparecer y/o desaparecer lagunas de entidad. Dependiendo de la topografía de la línea de costa y el fondo marino, pueden

producirse tsunamis de hasta 15 m de runup provocando la inundación y devastación de vastas zonas costeras bajas con penetraciones kilométricas tierra adentro. Incluso bloques de diámetro métrico pueden ser arrastrados hacia el interior a lo largo de grandes distancias. Erosión importante generalizada de las zonas costeras bajas que producen cambios muy notorios en la geometría de la línea de costa. La vegetación litoral (arbustos y árboles) es arrasada y arrastrada hacia el interior.

- c) Son muy frecuentes grandes grietas en el terreno con aberturas de varios metros de anchura, principalmente en depósitos aluviales poco compactados y/o suelos saturados. En rocas competentes pueden alcanzar hasta 1 m de anchura. Grietas muy anchas se desarrollan en caminos pavimentados (asfalto o empedrados), acompañadas por grandes ondulaciones de presión. En suelos enlosados y bordillos de aceras pueden desarrollarse estructuras de tipo pop-up de altura centimétrica y de extensión métrica a decamétrica.
- d) Grandes deslizamientos y caídas de rocas ($> 10^5 - 10^6 \text{ m}^3$) son frecuentes, independientemente del estado de equilibrio y pendiente de las laderas, causando lagos de obturación temporales o permanentes. Las márgenes (orillas) de los ríos, terraplenes, taludes y excavaciones artificiales típicamente colapsan. Terraplenes y represas de tierra pueden incluso incurrir en serios daños. Deslizamientos considerables pueden tener lugar hasta 200-300 kilómetros de distancia epicentral. Grandes deslizamientos submarinos o subacuáticos son frecuentes en zonas costeras y lagos.
- e) Los árboles se sacuden violentamente. Muchas ramas se rompen y caen. Incluso árboles enteros pueden desenraizarse del terreno y caer peligrosamente.
- f) Los Procesos de Licuefacción cambian el aspecto de extensas zonas, aplanando la topografía de llanuras costeras y llanuras de inundación fluviales y aluviales, acompañadas por procesos de subsidencia generalizados que pueden exceder varios metros. Los

volcanes de arena de gran tamaño son numerosos; grandes y largas grietas debido a extensiones laterales afectan severamente a las márgenes de ríos, lagos y canales.

- g) En áreas secas, se levantan grandes nubes de polvo.
- h) Grandes bloques, incluso de varios metros de diámetro pueden ser arrojados al aire desplazándose cientos de metros, incluso en laderas de poca pendiente, dejando impresiones o huellas características en suelos blandos o poco consolidados.

XII – COMPLETAMENTE DEVASTADOR. Efectos Ambientales son el único criterio para determinar la intensidad (Los efectos Ambientales son ahora la única herramienta disponible para evaluar la intensidad, los demás criterios para estimar el nivel de daños se encuentran saturados por el colapso generalizado de todo tipo de construcciones)

Efectos primarios: Dominantes.

Las rupturas de falla se extienden como mínimo varios centenares de kilómetro, acompañadas por desplazamientos de hasta decenas de metros. Es patente el desarrollo de grandes fosas tectónicas, depresiones alargadas y lomas de presión. Las líneas de drenaje pueden desplazarse ostensiblemente. Los cambios en el paisaje y en la geomorfología inducidos por estas rupturas primarias pueden alcanzar tamaños y extensiones extraordinarios (ejemplos típicos son la elevación y/o subsidencia de líneas costa de hasta varios metros, la aparición o desaparición de la vista de elementos paisajísticos significativos, los ríos cambian de curso, formación de cascadas, y formación o desaparición de lagos).

Efectos secundarios: El área afectada es generalmente inferior o del orden de 50.000 km².

- a) Los manantiales y fuentes cambian significativamente tanto su caudal como su posición altimétrica (sobrepresión). Algunas manantiales y fuentes pueden secarse incluso permanentemente. Las variaciones en el nivel del agua en los pozos son comunes y significativas. Las propiedades físico-químicas de manantiales y/o pozos y, más comúnmente la temperatura en fuentes termales, sufren fuertes variaciones. El agua de manantiales, ríos e incluso grandes lagos a menudo se vuelve muy fangosa. Las emisiones de gases, normalmente sulfurosos, son comúnmente observadas. La hierba y los arbustos en el entorno de estos puntos de emisión pueden arder.
- b) Desarrollo de Olas gigantes en lagos y ríos que causan importantes inundaciones en las zonas de ribera. En zonas de llanura de inundación los cauces de agua pueden sufrir significativos cambios de curso permanentes, e incluso invertirse el sentido de la corriente, debido a la generalización de procesos de subsidencia y desplomes de los márgenes. Pueden aparecer y/o desaparecer lagos de extensión significativa. Dependiendo de la topografía de la línea de costa y el fondo marino, pueden producirse tsunamis de varias decenas de metros de runup provocando la inundación y devastación de vastas zonas costeras bajas con penetraciones de varios kilómetros tierra adentro. Grandes bloques pueden ser arrastrados hacia el interior a lo largo de grandes distancias. Erosión devastadora y generalizada de las zonas costeras bajas que producen cambios muy notorios en la geometría de la línea de costa. La vegetación litoral (arbustos y árboles) es arrasada y arrastrada hacia el interior.
- c) Grandes grietas en el terreno con aberturas de varios metros de anchura son muy frecuentes, de hasta más de 1 metro en el sustrato rocoso competente, y de hasta más de 10 metros en depósitos aluviales poco compactados y/o suelos saturados, donde pueden extenderse a lo largo de varios kilómetros de longitud. En suelos enlosados y bordillos de aceras pueden desarrollarse estructuras de tipo pop-up de altura centimétrica y de extensión métrica a decamétrica.

- d) Grandes deslizamientos y caídas de rocas (> 105 - 106 m³) son frecuentes, independientemente del estado de equilibrio y pendiente de las laderas, causando muchos lagos de obturación temporales o permanentes. Las márgenes (orillas) de los ríos, terraplenes, taludes y excavaciones artificiales típicamente colapsan. Terraplenes y represas de tierra pueden incluso incurrir en serios daños. Deslizamientos considerables pueden tener lugar en hasta 200-300 kilómetros de distancia epicentral. Grandes deslizamientos submarinos o subacuáticos son frecuentes en zonas costeras y lagos.

- e) Los árboles se sacuden violentamente. Muchas ramas se rompen y caen. Incluso árboles enteros pueden desenraizarse del terreno y caer peligrosamente.

- f) Los Procesos de Licuefacción cambian el aspecto de extensas zonas, aplanando la topografía de llanuras costeras y llanuras de inundación fluviales y aluviales, acompañadas por procesos de subsidencia generalizados que pueden exceder varios metros. Los volcanes de arena de gran tamaño son muy numerosos; grandes y largas grietas debido a extensiones laterales afectan severamente a las márgenes de ríos, lagos y canales.

- g) En áreas secas, se levantan grandes nubes de polvo.

- h) Bloques de grandes dimensiones pueden ser arrojados al aire desplazándose cientos de metros, incluso en laderas de poca pendiente, dejando impresiones o huellas características en suelos blandos o poco consolidados.

2.8 Definición de términos

Tabla 1. Definiciones técnicas

Fuente: varias fuentes

Geoestadística	Estudio estadístico de fenómenos naturales que distribuyen de forma continua en el espacio y/o tiempo. <i>Ing. Ángel Fernández Cortez, Universidad de Almería</i>
Registro Sísmico	Registros del movimiento del terreno como una función del tiempo o sismogramas, proporciona los datos básicos que los sismólogos usan para estudiar las ondas elásticas http://ingenieriageofisica.scienceontheweb.net
Interpolaciones deterministas	Los métodos de interpolación determinísticos calculan un valor para celda de la cuadrícula usando únicamente las propiedades físicas de las muestras de elevación (<i>Goovaerts, 1997</i>).
Interpolaciones probabilísticas	Los métodos de interpolación probabilísticos, en contraste con los métodos determinísticos, infieren una gran cantidad de información utilizando las muestras disponibles (<i>Maune et al., 2001</i>). Los métodos de interpolación probabilísticos más comunes son los métodos geoestadísticos derivados de la forma genérica de Kriging (<i>Goovaerts, 1997</i>)
Geología	Es la ciencia que concierne a estudios de la Tierra y los materiales de los que está constituida, los procesos que los formaron durante el tiempo geológico y el modelado de su superficie en el pasado y en el presente. http://www.sisman.utm.edu.ec/libros/FACULTAD%20DE%20CIENCIAS%20MATEM%C3%81TICAS%20F%C3%8DSICAS%20Y%20QU%C3%8DMICAS/INGENIER%C3%8DA%20CIVIL/04/GEOLOGIA/navarrete-e-apuntes-de-geologia-general.pdf

<p>Geología estructural</p>	<p>La geología estructural es aquella que se encarga del estudio de las estructuras de la corteza terrestre. De esta manera, analiza la relación entre las diversas rocas que la conforman.</p> <p>http://definicion.de/geologia/#ixzz2aauRYUKT</p>
<p>Riesgo</p>	<p>Se define como la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. [1] Los factores que lo componen son la amenaza y la vulnerabilidad.</p> <p>http://www.ciifen-int.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=84&Itemid=111&lang=es</p>
<p>Vulnerabilidad</p>	<p>Vulnerabilidad son las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza.</p> <p>http://www.ciifen-int.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=84&Itemid=111&lang=es</p>
<p>Sismicidad</p>	<p>Rama de la geofísica que estudia los sismos y las propiedades elásticas de la Tierra. Sus principales objetivos son: a) el estudio de la propagación de las ondas sísmicas en el interior de la Tierra a fin de conocer su estructura interna, b) el estudio de las causas que dan origen a eventos sísmicos y c) la prevención de da.</p> <p>http://sismicidad.wikispaces.com/Conceptos+basicos</p>
<p>Tectónica de placas</p>	<p>Teoría geológica que explica los diferentes fenómenos geológicos a partir de los movimientos de las placas litosféricas rígidas sobre la aenosfera blanda, movimientos que se deben a las corrientes de convección existentes en el manto.</p> <p>http://www.proyectosfindecarrera.com/definicion/tectonica-placas.htm</p>

3 METODOLOGÍA

3.1 Ubicación del área de estudio.

El área de estudio se ubica en la provincia de Esmeraldas, cantón Esmeraldas, y el análisis involucra localmente a la ciudad de Esmeraldas.

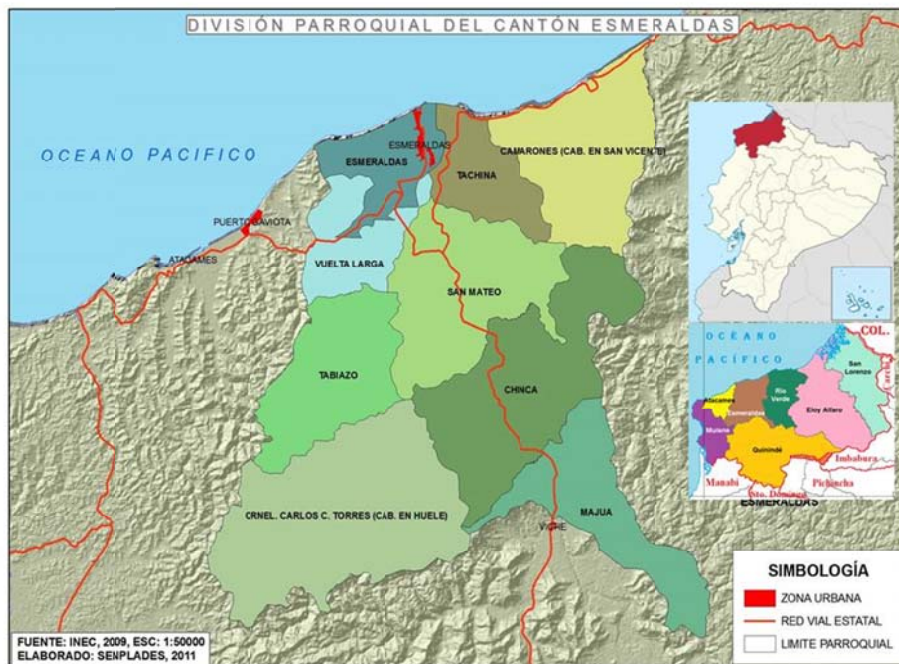


Figura 4. Mapa de ubicación de la zona de estudio

Fuente: INEC 2009.

3.2 Flujograma del desarrollo

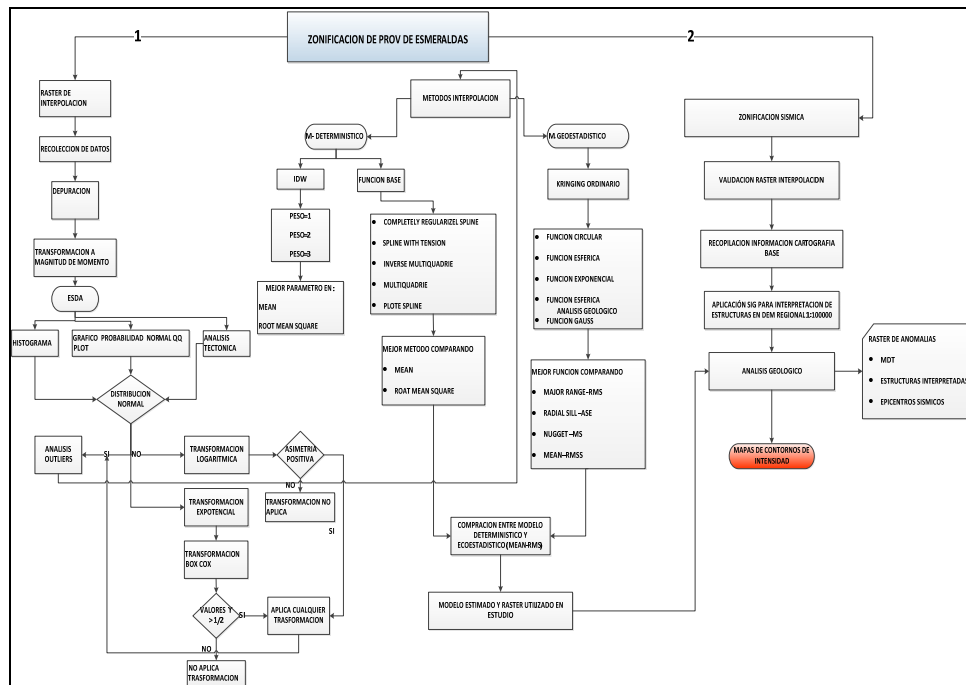


Figura 5. Flujograma metodología aplicada para Zonificación Sísmica

Fuente: Autor 2013

La metodología aplicada abarca dos fases o partes importantes, la primera consiste en la obtención del raster de interpolación y la segunda trabaja directamente en la zonificación sísmica dependiendo del resultado de la primera.

Para la obtención del raster de interpolación primeramente se debe de realizar la recolección de datos de varias fuentes (CERESIS, USGS, INSTITUTO GEOFÍSICO DE LA EPN), posteriormente se debe de depurar los datos, es decir borrar los datos repetidos, los datos sin valores de magnitud, posteriormente transformamos los datos a magnitud de momento, con las fórmulas citadas en el marco teórico. Posteriormente aplicamos el ESDA con el fin de determinar si los datos se encuentran dentro de una distribución normal caso contrario aplicar

las diferentes transformaciones (logarítmicas y exponenciales) para llevar los datos a una distribución normal y así conseguir aplicar los diferentes métodos de interpolación (determinísticos y geoestadísticos). Dentro de los métodos de interpolación determinísticos se aplicarán el IDW (inverse distance weight) y la función de Base Radial, en cada uno se aplicarán diferentes pesos en el caso del IDW y diferentes funciones en el caso de la Base Radial el fin en ambos casos es comparar el Mean (media) y el Root mean square (media cuadrática) y así obtener el modelo estimado rasterizado más idóneo. En el caso de los modelos de interpolación Geoestadístico se usará el kriging ordinario con sus diferentes funciones (circular, esférica, exponencial, Gauss) se comparan los resultados de todas las funciones seleccionando la mejor en cuanto a sus valores de; Range, Partial sill, nugget, mean, RMS, ASE, MS, RMSS, el modelo seleccionado se comparará con el modelo determinístico y se seleccionará el que presente mejores parámetros en cuanto al Mean y Root Mean Square.

Posteriormente se trabajará directamente sobre la zonificación sísmica, en donde se realizará la validación del modelo estimado rasterizado seleccionado de entre los métodos determinísticos y geoestadísticos, para lo cual se realizará la interpretación estructural de un DEM Regional a escala 1:100.000, combinando con los datos históricos y contemporáneos de epicentros, además del modelo estimado de anomalía seleccionado de los dos métodos de interpolación, todo esto manejado dentro de un SIG se obtendrá como resultado el mapa de contornos de intensidad INQUA o ESI 2007.

3.3 Justificación de la metodología seleccionada

Para realizar el modelamiento sísmico mediante valores históricos ocurridos en el área de estudio, es necesario realizar interpolaciones con datos geográficos, por lo cual se procede a realizar pruebas de métodos de interpolación, para verificar mediante indicadores estadísticos, cuál de los métodos se ajusta mejor a los datos de sismicidad, los indicadores son RMS (Error Medio Cuadrático), Ms (Media Cuadrática), ASE (Error promedio estándar), RMSS (Error medio

cuadrático estandarizado). El método de interpolación que se ajusta de mejor manera a los datos de magnitud sísmica es Método en Base Radial, puesto que la media de error, es baja, en comparación a los demás métodos.

3.4 Herramientas de investigación utilizada

Las herramientas aplicadas para el modelamiento sísmico, fueron utilizadas durante todo el proceso de desarrollo.

En el proceso de transformación de magnitudes, se aplicaron las fórmulas establecidas para calcular la Magnitud de Momento, que es la indicador principal con el cual se va a trabajar.

Para realizar la depuración de los datos sísmicos, se utiliza la herramienta ESDA (Datos Análisis de Datos Espaciales Exploratorios), está comprendido dentro la extensión Geoestatistical Analyst del ArcGis 9.3, cuya finalidad es determinar y adoptar una distribución normal en los datos, además de encontrar y corregir si es necesario datos anómalos (fuera de la distribución normal). También el ESDA analiza la autocorrelación espacial y direccional de los datos como paso previo a la aplicación de algunas técnicas de interpolación espacial.

La herramienta de interpolación consiste en agrupar datos espaciales con similares características para proyectar superficies continuas a partir de datos discretos y depurados, para ello se realiza la depuración de datos por medio del ESDA, existen métodos de interpolación tanto deterministas que consiste en el análisis de numero de datos muestrales para estimarlos valores de la variable en los puntos no muestrales; mientras métodos de interpolación exactos consiste en que el resultado de la interpolación está en función de los valores en los puntos muestrales.

3.5 Fuentes y recolección de datos

Se recolectaron los datos sísmicos históricos, tomados por Instituciones que monitorean sismos a nivel local y regional las Instituciones son:

CERESIS (Catálogo del Proyecto SISRA, hasta 1991)

IG-EPN (Datos sísmicos hasta 2009)

USGS (Metadatos de eventos sísmicos hasta 2009)

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Resultados

4.1.1 Recolección y depuración de datos

Se realizó la recolección de datos de tres instituciones de los datos sísmicos históricos producidos, posteriormente se compiló la información en una sola base de datos, distribuyendo la información ordenadamente, para posteriormente eliminar los registros duplicados en cuanto a su posición (Long. /Lat.), magnitud, año y mes.

Se unificó los registros de las tres bases de datos en columnas ordenadas y con el contenido mostrado en la figura4. El número de datos agrupados fue de 8636 registros.

ID	Shape*	Year	Month	Day	Hour	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude	Scale	Mw	Log	City_Ref	Distance	Asimut	Font	Catalog	Index
0	Point	1979	12	13	06:12:56.00	1.53	-79.2	107	2.4	Mb	2.75912	1.614912		0	0	KGE	SSRA	1
1	Point	1979	12	13	08:28:32.20	1.19	-77.33	60	2.4	Mb	2.75912	1.614912		0	0	KGE	SSRA	2
2	Point	1979	12	13	05:10:08.70	1.19	-77.32	60	2.7	Mb	3.04676	1.114279		0	0	KGE	SSRA	3
3	Point	1996	03	10	18:23:45.37	-4.62	-76.04	105	3.1	Mw	3.1	1.131402		0	0	MEC	USGS	4
4	Point	1991	04	02	12:42:14.60	0.19	-79.04	10	3.1	Mw	3.1	1.131402		0	0	MEC	USGS	5
5	Point	2003	06	03	00:02:27.50	-8.93	-80.64	33	3.1	Mw	3.1	1.131402		0	0	MEC	USGS	6
6	Point	1992	3	10	16:34:45	-4.62	-76.04	105	3.1	Mw	3.1	1.131402		0	0	ecode	ecode	7
7	Point	1991	4	2	12:42:15	0.19	-79.04	10	3.1	Mw	3.1	1.131402		0	0	ecode	ecode	8
8	Point	2003	6	3	22:28	-8.93	-80.64	33	3.1	Mw	3.1	1.131402		0	0	ecode	ecode	9
9	Point	1979	12	24	02:28:28.00	1.19	-76.01	279	2.8	Mb	3.14264	1.145063		0	0	KGE	SSRA	10
10	Point	1979	12	21	03:08:15.00	1.19	-77.33	202	2.8	Mb	3.14264	1.145063		0	0	KGE	SSRA	11
11	Point	1980	01	03	23:09:04.00	1.19	-77.33	60	2.9	Mb	3.23852	1.179116		0	0	KGE	SSRA	12
12	Point	1979	12	23	21:10:14.90	1.19	-76.36	275	2.9	Mb	3.23852	1.179116		0	0	KGE	SSRA	13
13	Point	1995	10	3	05:23	-2.4	-77.36	33	3.3	Mw	3.3	1.193922		0	0	ecode	ecode	14
14	Point	1996	12	23	14:47	0.35	-79.64	33	3.3	Mw	3.3	1.193922		0	0	ecode	ecode	15
15	Point	1979	12	19	20:40:43.90	3.48	-77.33	202	3	Mb	3.3344	1.204293		0	0	KGE	SSRA	16
16	Point	1999	04	01	06:16:02.05	-1.15	-77.25	200	3.4	Mw	3.4	1.223775		0	0	MEC	USGS	17
17	Point	1995	05	15	03:10:17.31	-2.35	-80.79	33	3.4	Mw	3.4	1.223775		0	0	MEC	USGS	18
18	Point	2005	2	19	10:30:32	-2.92	-76.7	126	3.4	Mw	3.4	1.223775		0	0	ecode	ecode	19
19	Point	1999	4	1	6:16:02	-1.15	-77.25	200	3.4	Mw	3.4	1.223775		0	0	ecode	ecode	20
20	Point	2000	4	7	18:20:23	-1.53	-77.52	166	3.4	Mw	3.4	1.223775		0	0	ecode	ecode	21

Figura 6. Base de datos unificada.

Fuente: Autor 2011 - 2012

Posteriormente, para evitar duplicidad de registros, fueron eliminados aquellos datos cuya posición (Lat/Long), magnitud (Mw), año y mes coincidían dentro de la base de datos. Encontrando 396 registros duplicados.

4.1.2 Transformación de Magnitudes

Se transformaron todas las magnitudes a magnitudes de momento (Mw), usando la fórmula de Kanamori, tal como se observa en la fórmula número 11.

4.1.3 ESDA (Exploratory Spatial Data Analyst)

4.1.3.1 Histograma.

La distribución de la variable Mw, es agrupada en 100 clases o intervalos, esto, para obtener una mejor visualización.

El cuadro de resumen estadístico (parte superior derecha de la figura 5) proporciona las características de centralidad, dispersión y asimetría.

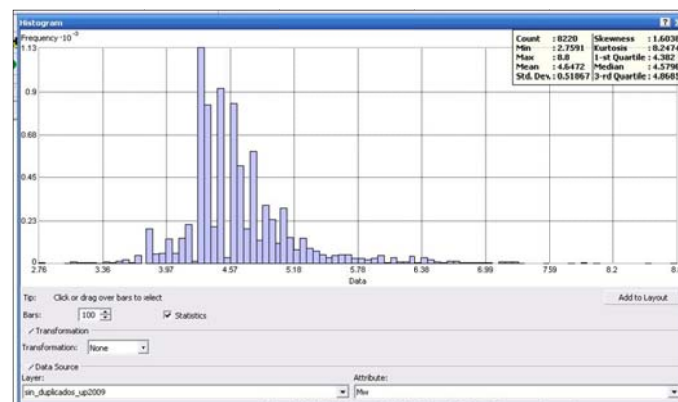


Figura 7. Histograma de variable Mw

Fuente: Autor 2011 - 2012

El hecho que la media y la mediana no se aproximen ni coinciden en el orden centesimal, el skewnes (coeficiente de asimetría) está lejos del 0 y su valor es menor a la media lo que indica una distribución sesgada de manera positiva, la Kurtosis es de 8.4, razones por la cual se evidencia la falta de normalidad de la variable.

4.1.3.2 Gráficos de probabilidad normal Q-Q Plot

El gráfico Q-Q normal (figura 3) representa los cuantiles reales y teóricos de una distribución normal, en el eje X figuran los cuantiles de una distribución normal y en el eje Y los cuantiles de una variable que se está analizando.

Se puede observar en el gráfico la poca alineación de los puntos con la recta que representaría la distribución normal.

Por el análisis del histograma y el gráfico de probabilidad se puede determinar que los registros **no están dentro de una distribución normal de datos**, por lo cual se procederá aplicar las transformaciones logarítmica (figura 6 y 7) y exponencial (figura 8 y 9), con lo cual se tratará de conseguir una total o próxima distribución normal en los registros.

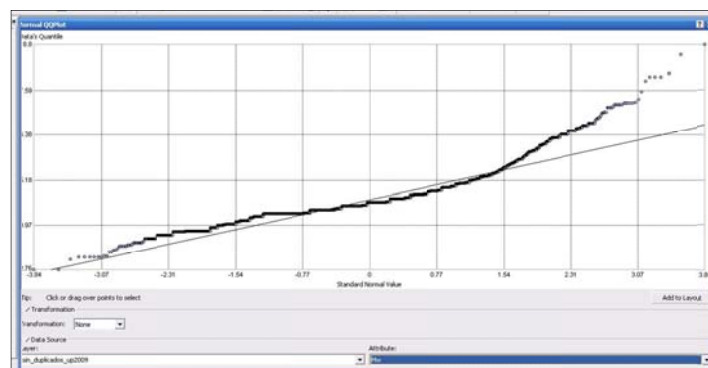


Figura 8. Q-Q Normal, variable Mw

Fuente: Autor 2011 – 2012

4.1.3.3 Transformación Logarítmica:

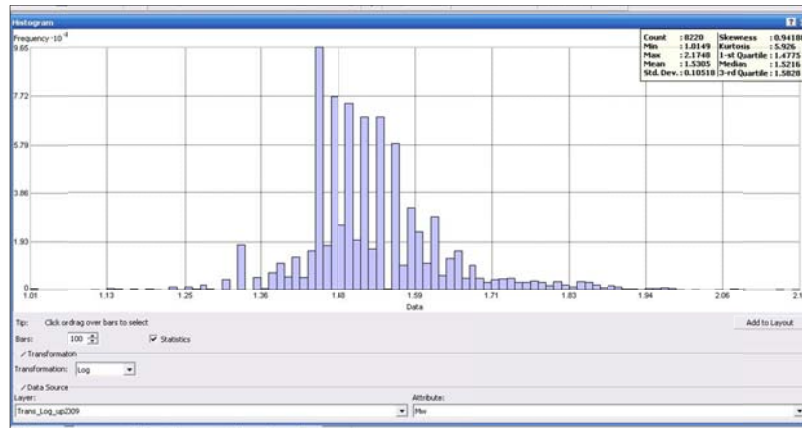


Figura 9. Histograma aplicando transformación Logarítmica sobre la variable Mw

Fuente: Autor 2011 - 2012

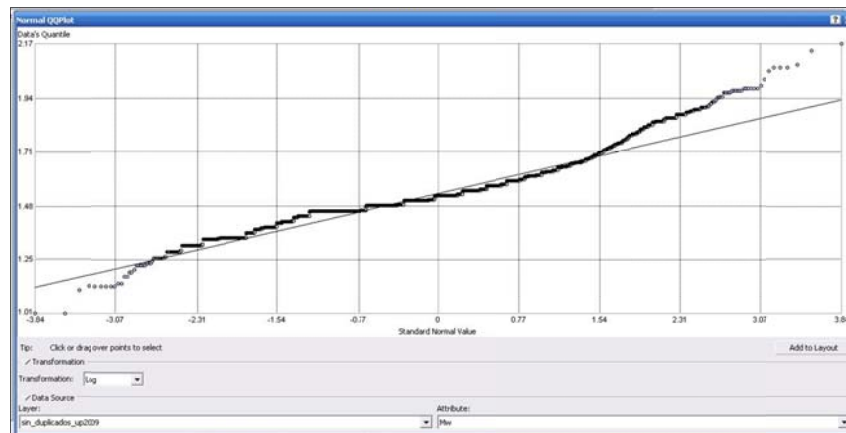


Figura 10. Q-Q Normal aplicando transformación Logarítmica sobre la variable Mw

Fuente: Autor 2011 - 2012

Se considera parte de la transformación Box-Cox. cuando $\lambda=0$, la fórmula (12) es:

$$Y(s) = \ln(Z(s)) \text{ para } Z(s) > 0$$

La transformación logarítmica se utiliza cuando los datos presentan una asimetría positiva y por lo tanto existe un grupo de datos con valores muy elevados.

Para este caso al realizar la transformación logarítmica sobre los registros la media y la mediana son semejantes hasta el orden centesimal, el skewness está próximo a 0 (caso ideal = 0), la kurtosis a pesar de ser 5.9 es menor a la kurtosis indicada sin usar la transformación, el valor ideal para la kurtosis debería ser 3.

4.1.3.4 Transformación Box-Cox:

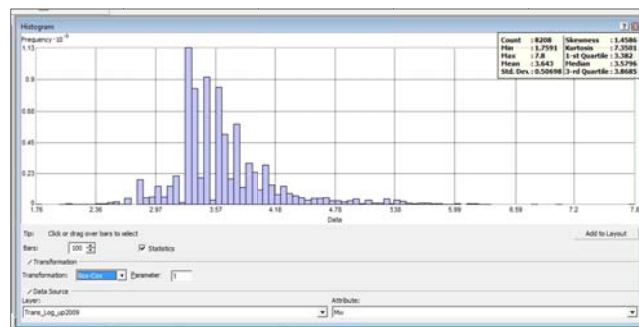


Figura 11. Histograma aplicando transformación Box-Cox ($\lambda=1$) sobre la variable Mw

Fuente: Autor 2011 - 2012

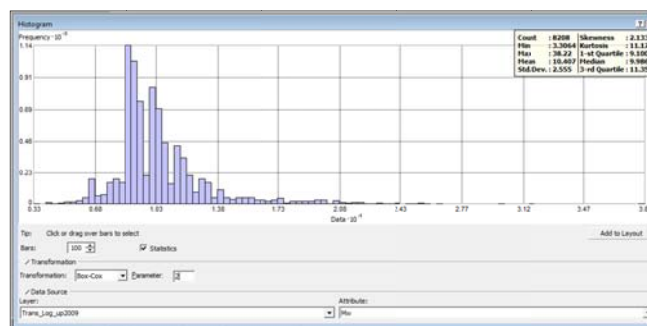


Figura 12. Histograma aplicando transformación Box-Cox ($\lambda=2$) sobre la variable Mw

Fuente: Autor 2011 - 2012

$$Y(s) = \frac{(Z(s^\lambda) - 1)}{\lambda} \quad \text{para } \lambda \neq 0 \quad (13)$$

Siendo $Y(s)$ el valor de la resultante de la transformación, $Z(s)$ el valor original de la variable y λ el exponente al que elevo la variable original. La transformación de la raíz cuadrada es un caso especial de transformación Box-Cox cuando $\lambda=1/2$. Cuanto menor sea el valor de λ , mejor será la proximidad de los valores a una distribución normal.

Para este caso se realizó la transformación con valores de $\lambda=1$ y 2 , pero en ninguno de los dos casos hubo buenos resultados.

En este punto se concluye que la transformación a usar será la logarítmica, dicha transformación se aplicará sobre la variable Mw usando la fórmula 12.

Una vez conseguido llevar los datos a una distribución normal usando el método de transformación logarítmica, se procedió a buscar valores anómalos que corresponden a valores extremos “**outliers**” altos (figura 11) y bajos (figura 12), tanto en el histograma como en el gráfico de probabilidades normal Q-Q, con el fin de analizarlos y determinar si los mismos influyen de manera negativa en los resultados.

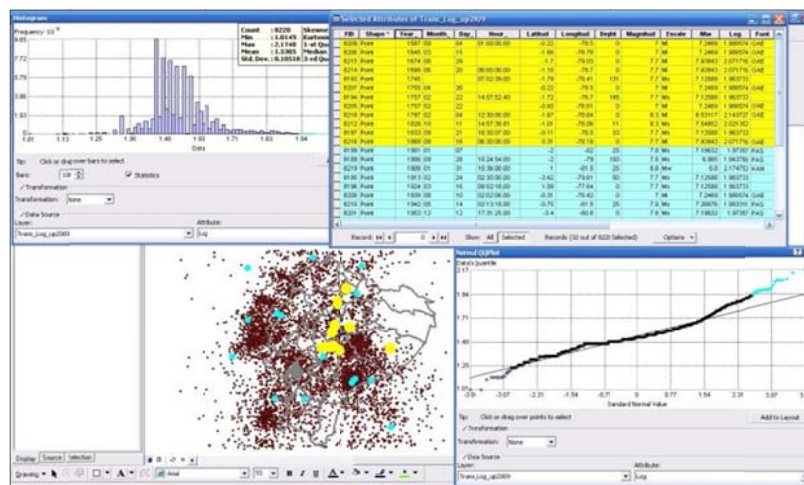


Figura 13. Valores extremos altos “Outliers”

Fuente: Autor 2011 - 2012

Para los Outliers de carácter alto (figura 11) se consideran a 32 registros como anómalos, los mismos determinados en base al análisis visual tanto del histograma de frecuencias como el gráfico de probabilidad Q-Q plot. Al observar la tabla de atributos de estos registros, se observa que las magnitudes de momento se encuentran entre 7.2 Mw y 8.8Mw, lo que se considera bastante grande, considerando también que cronológicamente estos registros corresponden a los años desde 1587 a 1998. Los registros de los años entre 1587 a 1971 corresponden a los registros históricos del catálogo proyecto SISRA (Programa para la Mitigación de los Efectos de los Terremotos en la Región Andina), no fue sino hasta inicios del siglo XIX que los historiadores de la fecha describían con mayor exactitud los eventos vividos durante y después de un evento sísmico, consecuentemente de esto se realizaron estimaciones más valederas de las magnitudes de estos eventos a partir de aquella fecha, por ende para este estudio se tomaron como valores anómalos aquellos registros que estén antes del año 1900.

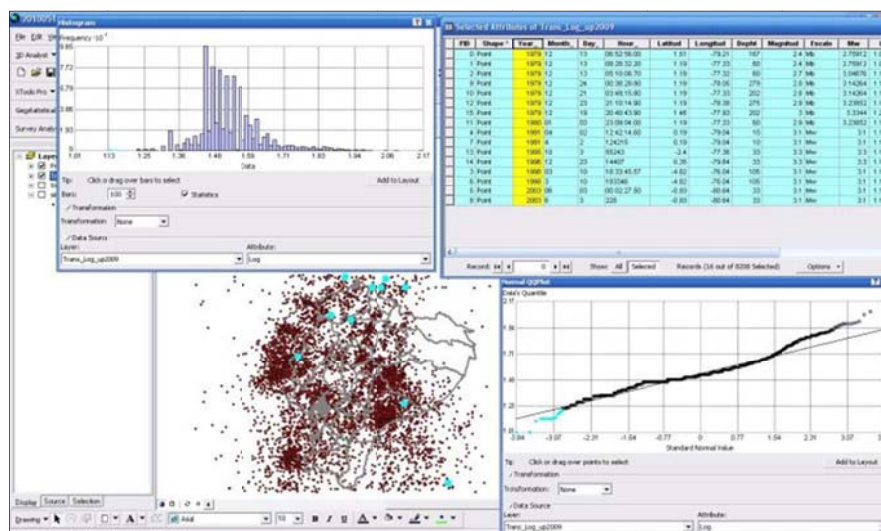


Figura 14. Valores extremos bajos “Outliers”

Fuente: Autor 2011 - 2012

Los Outliers de carácter bajo (figura 12), corresponde a registros de magnitud de momento de entre 2.75Mw y 3.33Mw, cronológicamente corresponde a registros desde el año 1979 a 2003,

la mayoría correspondiente a los catálogos SISRA y USGS, estos registros no presentan factores por los cuales puedan ser considerados como anómalos, por lo tanto se mantendrán dentro de la base de datos.

4.1.3.5 Análisis de tendencia Globales

El análisis de tendencias globales en los registros con respecto a la magnitud, se lo realizará con dos fines, el primero para detectar si los datos pueden estar ajustados, por funciones de primero, de segundo o de tercer grado, sobre los planos que son proyectados (N-S) y (E-O) y el segundo, si se descubre que existe tendencia, habrá que tomar la decisión de cómo modelarla sobre la superficie

4.1.3.5.1 Tendencia E-W

Según este gráfico (figura 13), la tendencia de la curva es de una ecuación de grado dos, con tendencia a disminuir las magnitudes de eventos hacia el centro, geográficamente podemos ubicar la zona de la Cordillera interandina como la que menos ha presentado eventos de magnitudes considerables. Pudiendo apreciar que los valores van en descenso desde el Oeste (Océano y sector costero) hacia el centro los valores más bajos de magnitudes Mw, la misma geográficamente se ubica en la región interandina para posteriormente incrementar la curva hacia el Este (Oriente del Ecuador)

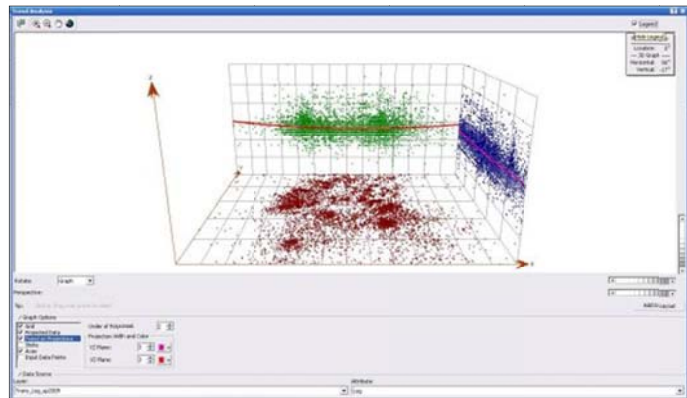


Figura 15. Tendencia E-W

Fuente: Autor 2011 – 2012

4.1.3.5.2 *Tendencia N-S*

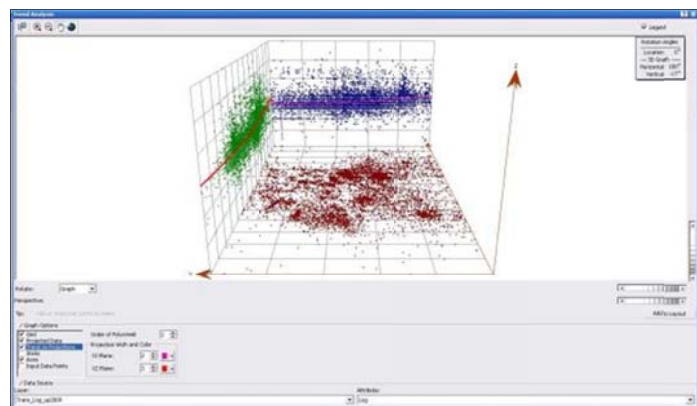


Figura 16. Tendencia N-S

Fuente: Autor 2011 - 2012

Según este gráfico se puede observar que hay un incremento de la magnitud Mw de manera lineal desde el Norte hacia el Sur, por lo que se podría concluir que la región Sur del País se concentra los registros sísmicos con mayores valores, pudiendo asumir que ha existido o que existe mayor dinámica de eventos generadores de sismos hacia el Sur del País.

El ESDA me indica que los datos están en distribución normal, por lo tanto es aplicable todos los métodos de interpolación, el siguiente paso será generar varias superficies por interpolación tanto por métodos espaciales deterministas y exactas: IDW y Funciones de base Radial. Y por métodos de Interpolación Geoestadística “Kriging”, las técnicas de interpolación espacial determinística mediante funciones polinómicas no serán tomadas en consideración ya que sus resultados son inexactos (Antonio Moreno, 2008).

4.1.3.6 Semivariograma

Con el cuadro de diálogo “Show Search Direction” (Figura 15), se puede comprobar de modo interactivo cómo al variar el ángulo de dirección de la banda, varía también la nube de puntos del semivariograma, pudiendo detectar así la existencia de una variable con distribución espacial por isotropía o anisotropía, comparando la distribución de nube de los puntos cuando la “Flecha” se la disponga preferiblemente en sentidos opuestos, para este caso se hará la comparación comparando la nube de puntos cuando la “Flecha” apunte al Norte (figura 15), al Sur (figura 16), al Suroeste (figura 17) y al Noreste (figura 18).

El fin será detectar si en los datos muestrales no hay influencias direccionales (isotropía) o si es que la hubiera es decir si hubiera una autocorrelación espacial (anisotropía), para que en el momento de elegir el método de búsqueda de la vecindad dentro del método de interpolación Kriging, sepamos si se lo hará con un círculo (caso de isotropía) o de una elipse (caso de anisotropía).

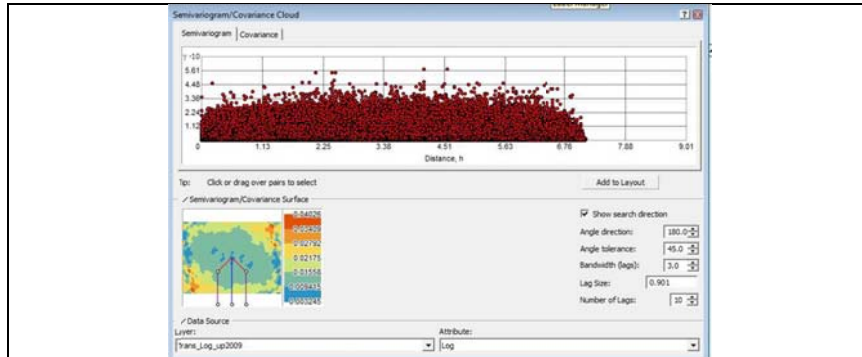


Figura 17. Semivariograma con orden al Norte
Fuente: Autor 2011 - 2012

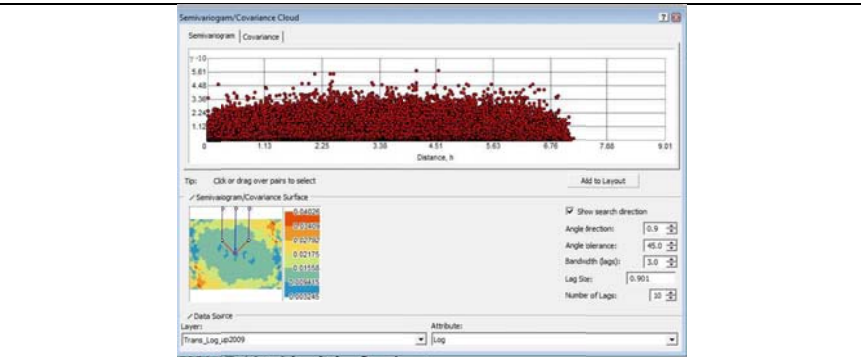


Figura 18. Semivariograma con orden al Sur
Fuente: Autor 2011 - 2012

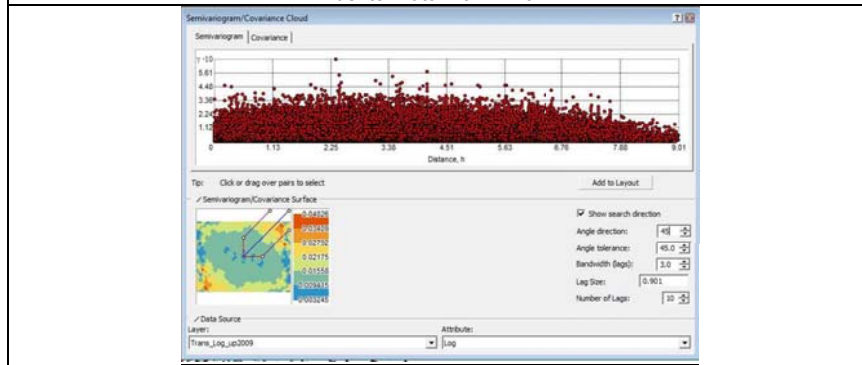


Figura 19. Semivariograma con orden al Suroeste
Fuente: Autor 2011 - 2012

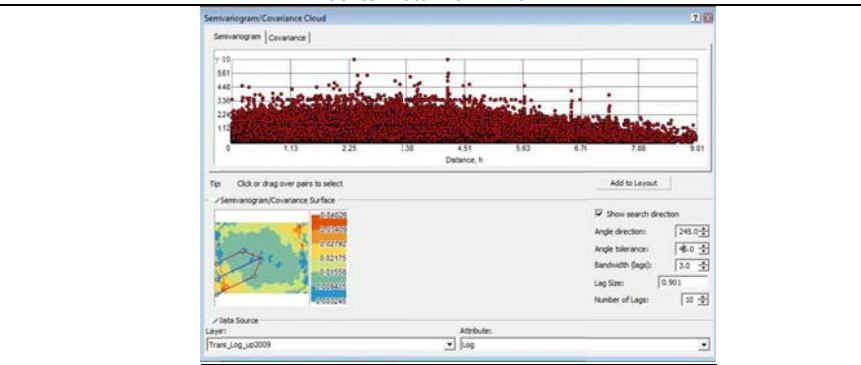


Figura 20. Semivariograma con orden al Noreste
Fuente: Autor 2011 - 2012

Al hacer el análisis de los semivariogramas se puede observar que no hay variación en la nube de puntos al comprobar tanto al Sur como al Norte, por otro lado tampoco hay mayor variación al hacer la comparación en los sentidos SW y NE. Por lo tanto se puede concluir que **existe isotropía y el método de buscar en la vecindad del kriging será el círculo**

4.1.4 Métodos de Interpolación Determinista y Exacta

Se analizaron dos métodos de interpolación exacta para comprobar con cual método modela mejor los datos muestrales

4.1.4.1 IDW (Inverse Distance Weight)

El método IDW es similar al Kriging ordinario, ya que da más peso a los valores cercanos a un punto, pero posee una menor complejidad del cálculo. El IDW utiliza un algoritmo simple basado en distancias.

Se debe tomar en cuenta determinar el número de vecinos para calcular el valor predicho. Esto dependerá del tipo de datos y de la superficie que intentemos crear. Por defecto el programa establece 15 vecinos y un mínimo de 10.

Si no hay influencia direccionales en los pesos de los datos, consideramos los puntos igualmente en todas las direcciones y la forma de búsqueda de vecindad será un círculo, lo cual fue determinado por el semivariograma, para este caso se aplicó esta modalidad debido a que no existe influencia direccional con respecto al peso ajustado para el Mw.

Fueron generados dos modelos por interpolación de este tipo, ambas guardando las mismas características en cuanto a vecindad y distribución de los ejes, pero variando el factor p (peso que tendrá un punto muestral sobre el predicho), usando los valores de 1 y 2 (figura 19), respectivamente.

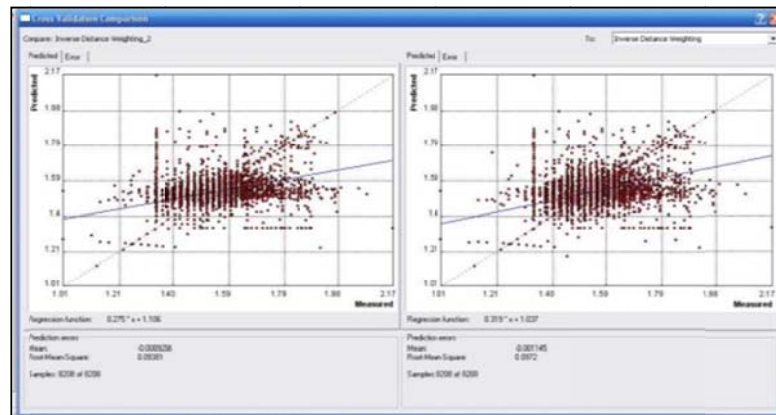


Figura 21. Comparación Errores IDW P=1 y P=2

Fuente: Autor 2011 - 2012

Tabla 1. Datos Estadísticos IDW, P1 y P2

P (peso/weight)	PREDICTION ERRORS	
	Mean	Root Mean Square
1	-0.001145	0.0972
2	-0.0009258	0.09381



Mejor parámetro

Por la tabla podemos observar que el **método IDW con peso 2 presenta una media de error (mean) y error medio cuadrático (Root Mean Square) más bajo** que el que se obtuvo con peso 1.

4.1.4.2 Función Base Radial

Las funciones de base radial son técnicas de interpolación exacta. La superficie creada debe pasar por cada punto muestral. Hay cinco funciones de base diferentes: Completely regularized spline (figura 20), spline with tensión (figura 21), inverse multiquadric (figura 22), multiquadric (figura 23), plate spline (figura 24). Cada función de base tiene diferente forma y da como resultado una superficie de interpolación distinta. Sin embargo conceptualmente son

similares, ya que es como ajustar una goma elástica a través de todos los puntos muestrales minimizando la curvatura total de la superficie.

Si comparamos los métodos con funciones de base radial (FBR) con el peso inverso de la distancia (IDW), otro interpolador exacto, observamos que el IDW nunca predice valores por encima de un máximo o por debajo de un mínimo valor muestral, mientras que las FBR si lo hacen.

La diferencia entre utilizar una u otra función no es muy grande. Se pueden probar varias y elegir la que presente un menor error. Cada función tiene un parámetro que controla el suavizado de la superficie. Para todos los métodos excepto para la función Inverse Multiquadric, donde ocurre lo contrario, un parámetro con valor más alto implica una superficie más suavizada.

Se compararon la media de error y la media de error cuadrática entre todos los métodos y se escogió la que presentaba los menores valores, para este caso resulto favorecido el Inverse Multiquadric.

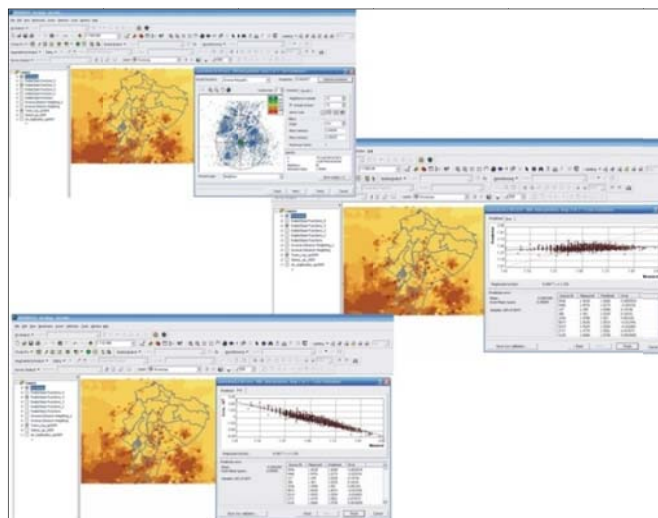


Figura 22. Modelado con función Completely Regularized Spline

Fuente: Autor 2011 - 2012

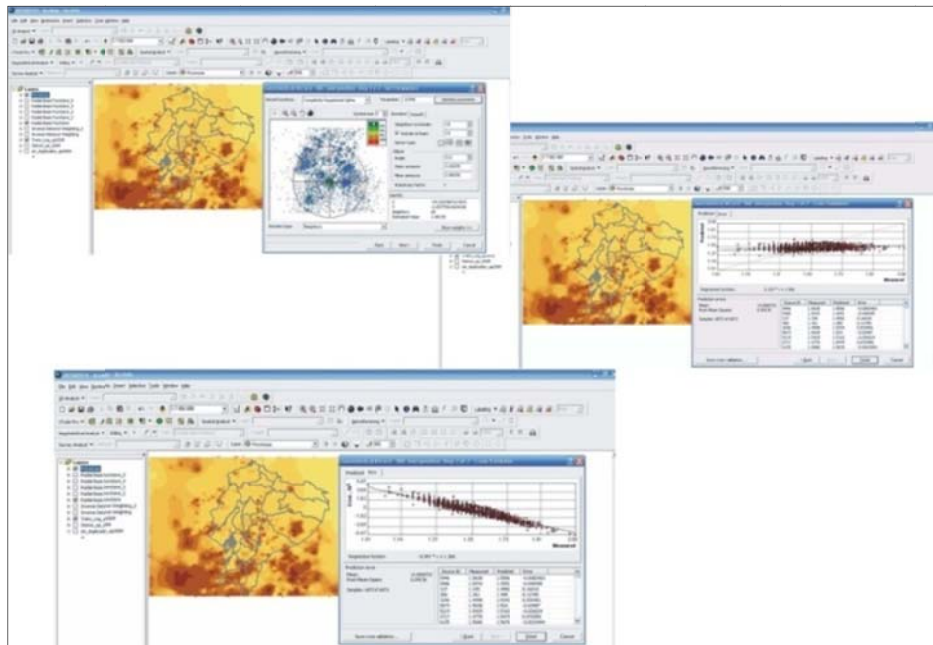


Figura 23. Modelado con función Spline with Tensión

Fuente: Autor 2011 - 2012

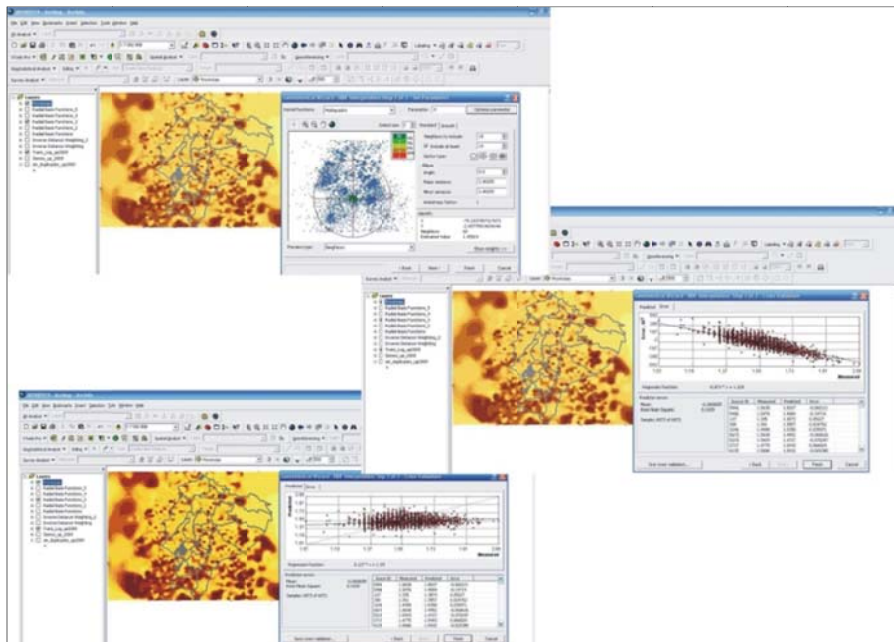


Figura 24. Modelado con función inverse multiquadric

Fuente: Autor 2011 - 2012

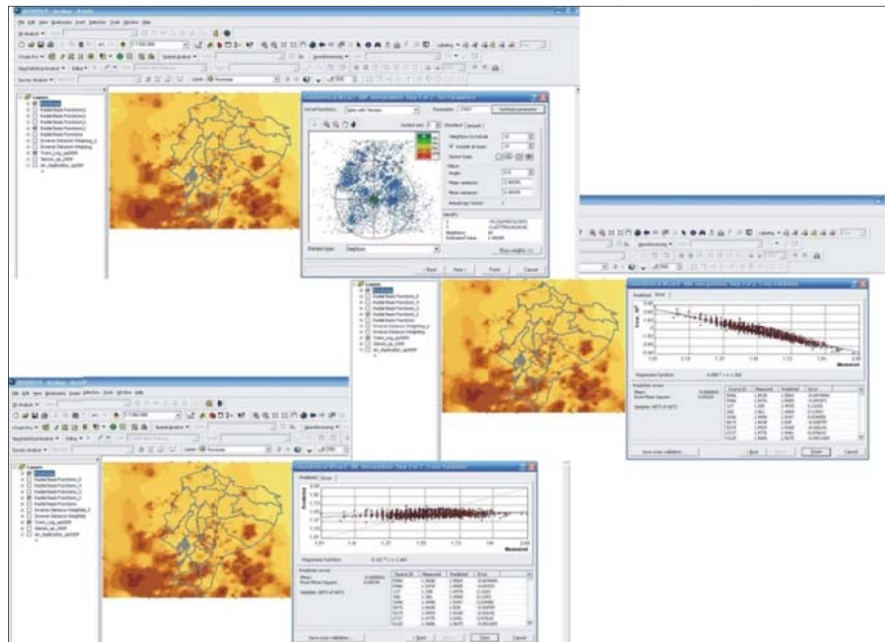


Figura 25. Modelado con función Multiquadric

Fuente: Autor 2011 - 2012

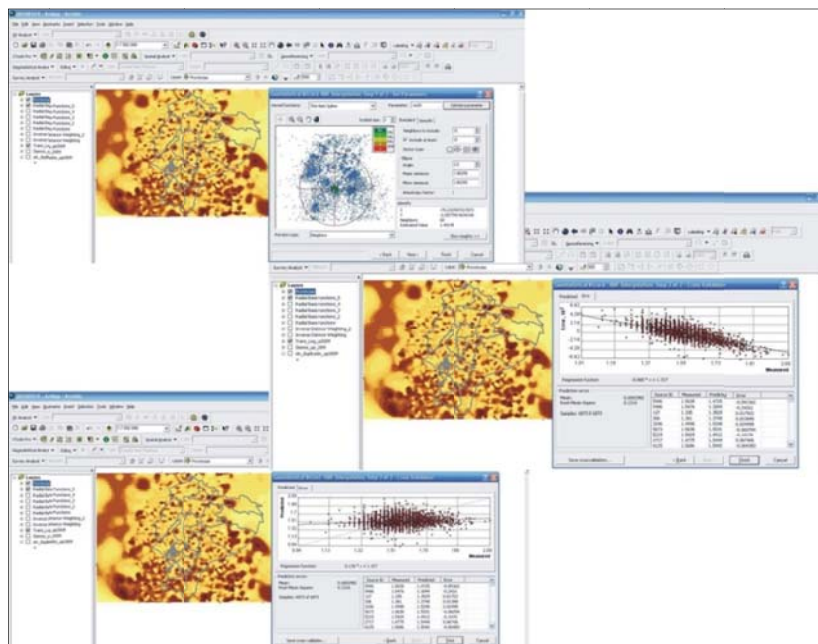


Figura 26. Modelado con función Plate Spline

Fuente: Autor 2011 - 2012

Tabla 2. Datos Estadísticos Funciones por Base Radial

Funciones	PREDICTION ERRORS	
	Mean	Root Mean Square
Completely regularized spline	-0.0000728	0.09136
Spline with tensión	0.0000602	0.09109
Inverse multiquadric	-0.0001589	0.09098
Multiquadric	-0.0000055	0.1039
Plate spline	0.0002982	0.1216



Mejor parámetro

Se puede concluir **que la función ideal a usar es la Multiquadric** ya que posee la más baja media de error en comparación a los demás métodos, sin considerar el error medio cuadrático ya que este difiere apenas en el orden de la milésima con respecto a los demás métodos

4.1.5 Técnicas de interpolación estadística

4.1.5.1 Kriging Ordinario

Para poder llevar a cabo esta labor, con el Analista Geoestadístico, y utilizando las herramientas de crear sub-clases, se divide la muestra en dos grupos de partida.

Para que las predicciones no sean sesgadas, la media de los errores tendría que estar próxima a cero. Y puesto que la media (mean prediction errors) está muy influida por la escala de los datos, es mejor utilizar la media estandarizada (mean standardized prediction errors), que también debería estar cerca de cero.

Se utilizó el kriging ordinario, considerado para muchos como el mejor estimador insesgado, este analista geoestadístico proporciona catorce funciones, aunque las más usadas son la esférica, exponencial, circular, gauss.

Se incluye a continuación los gráficos obtenidos para cada función. Partiendo por el gráfico donde se indica la función a ejecutar y los parámetros del semivariograma (figura; 26, 38, 44), En segundo lugar se tiene el gráfico que representa los valores observados, frente a los valores calculados o predichos (figura; 27, 33, 39, 45). En tercer lugar, el gráfico de los errores de estimación, obtenido restando, a los valores predichos, los observados (figura; 28, 34, 40, 46). En cuarto lugar el de los errores estandarizados (figura; 29, 35, 41, 47). En quinto lugar, el gráfico de probabilidad normal, que muestra los cuantiles de los errores estandarizados, frente a los correspondientes a una distribución normal (figura; 30, 36, 42, 48). Y por último el raster de superficie generado por la interpolación de esa función (figura; 31, 37, 43, 49).

4.1.5.1.1 *Función Circular*

El modelo del semivariograma dio como resultado una Isotropía, es decir los puntos utilizados para predecir se elegirán en todas las direcciones desde el lugar no muestral por lo tanto la forma de búsqueda de la vecindad de todas las funciones a usarse será el círculo.

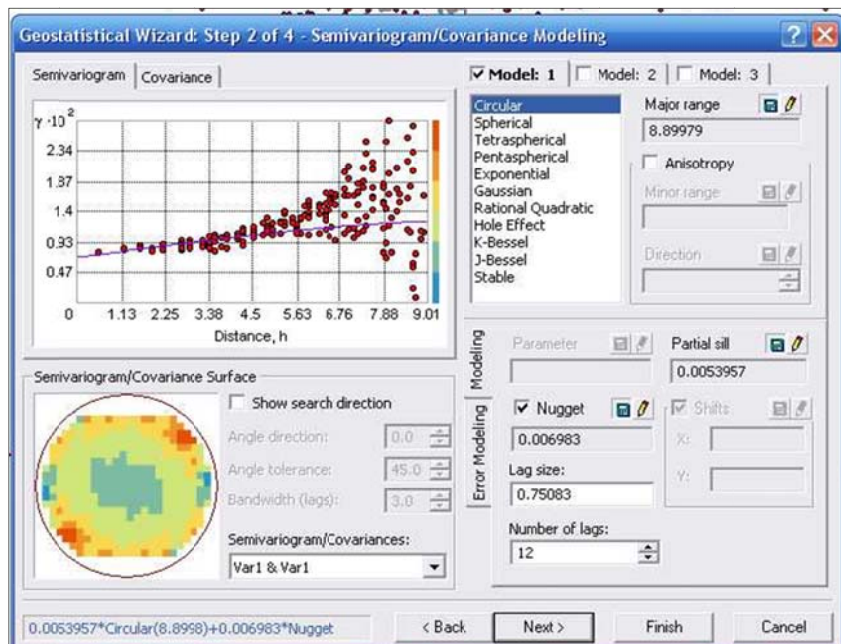


Figura 27. Construcción Semivariograma, Función Circular

Fuente: Autor 2011 - 2012

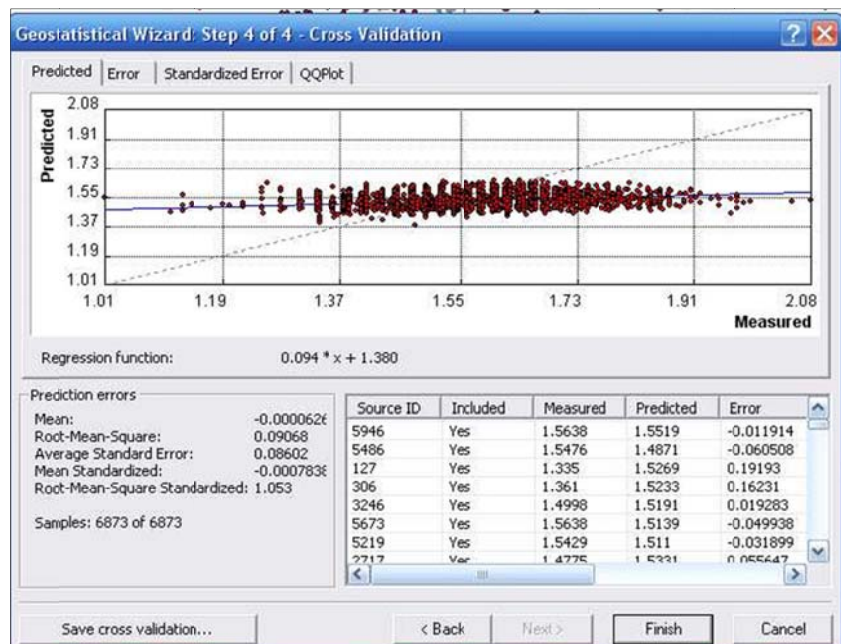


Figura 28. Valores observados frente a valores predichos, modelo circular

Fuente: Autor 2011 - 2012

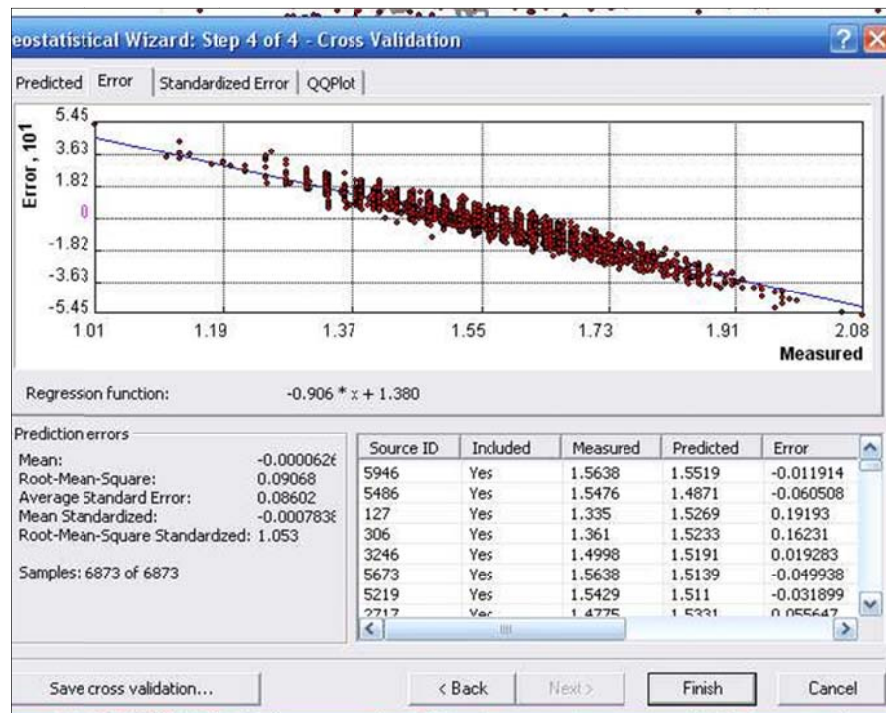


Figura 29. Errores de la estimación, modelo circular

Fuente: Autor 2011 - 2012

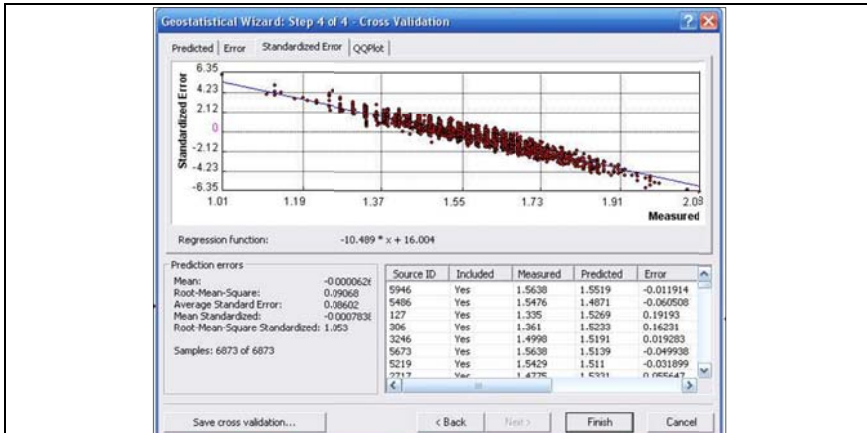


Figura 30. Errores estandarizados, modelo circular
Fuente: Autor 2011 - 2012

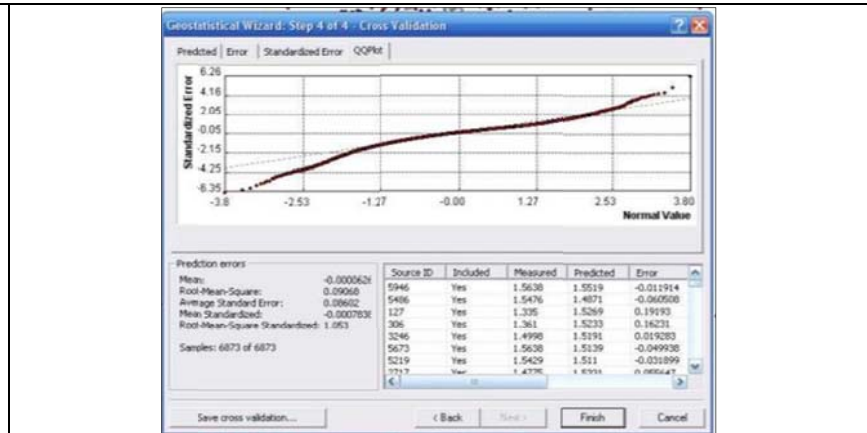


Figura 31. Probabilidad normal de los errores, modelo circular
Fuente: Autor 2011 - 2012

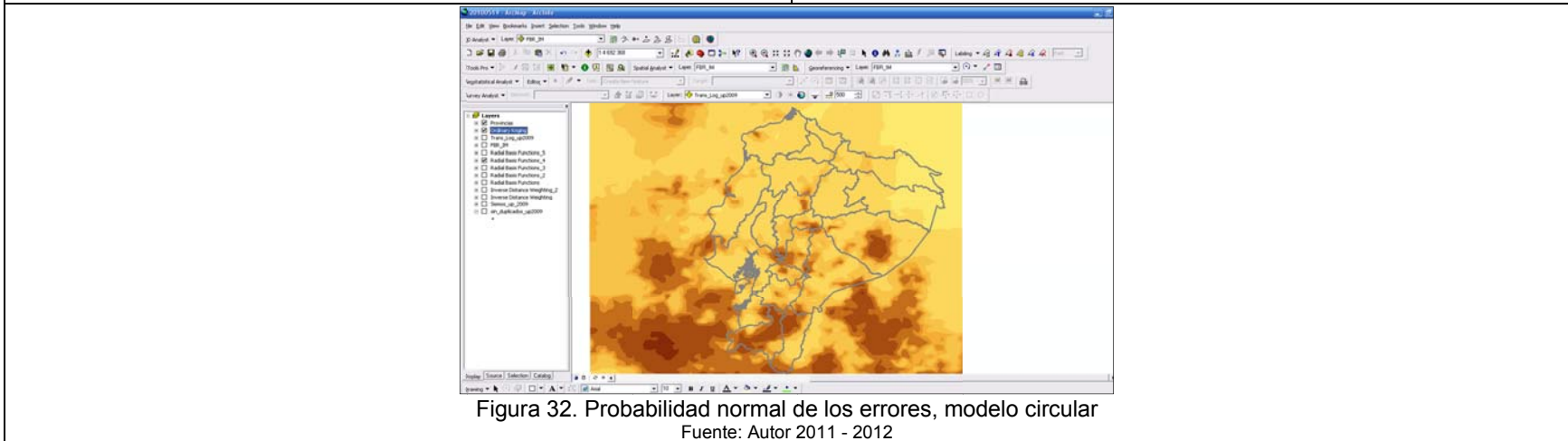


Figura 32. Probabilidad normal de los errores, modelo circular
Fuente: Autor 2011 - 2012

Para la función circular encontramos que el mayor rango es de 8.89979, la meseta parcial (partial sill) es de 0.0053957, el efecto nugget 0.006983. Con respecto a los errores predichos, la media es de -0.0000626, el error medio cuadrático es de 0.09068, el promedio del error estándar tiene como valor 0.08602, el error medio estandarizado es de -0.0007838, el error cuadrático medio estandarizado dio como valor 1.053.

4.1.5.1.2 Función esférica.

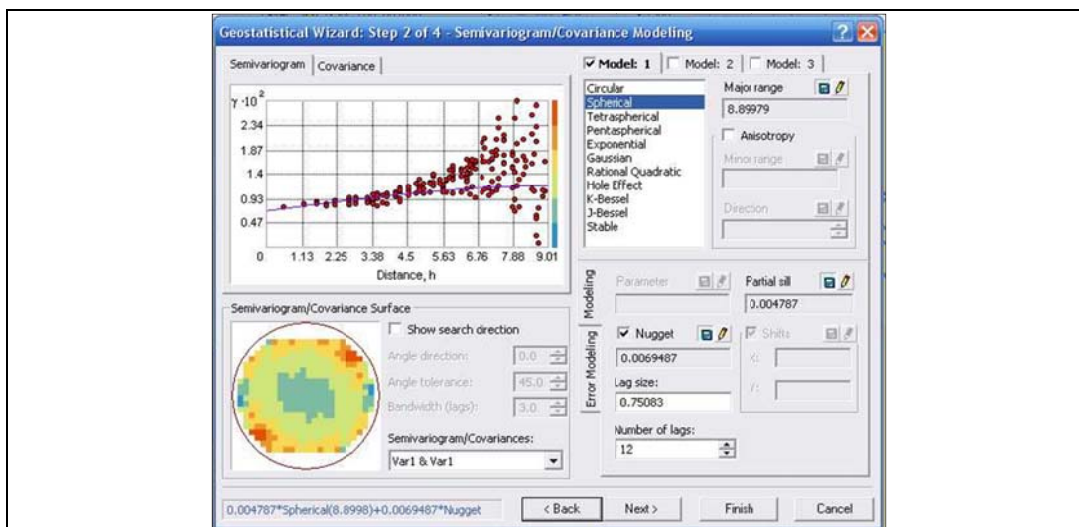


Figura 33. Construcción Semivariograma, Función Esférica
Fuente: Autor 2011 - 2012

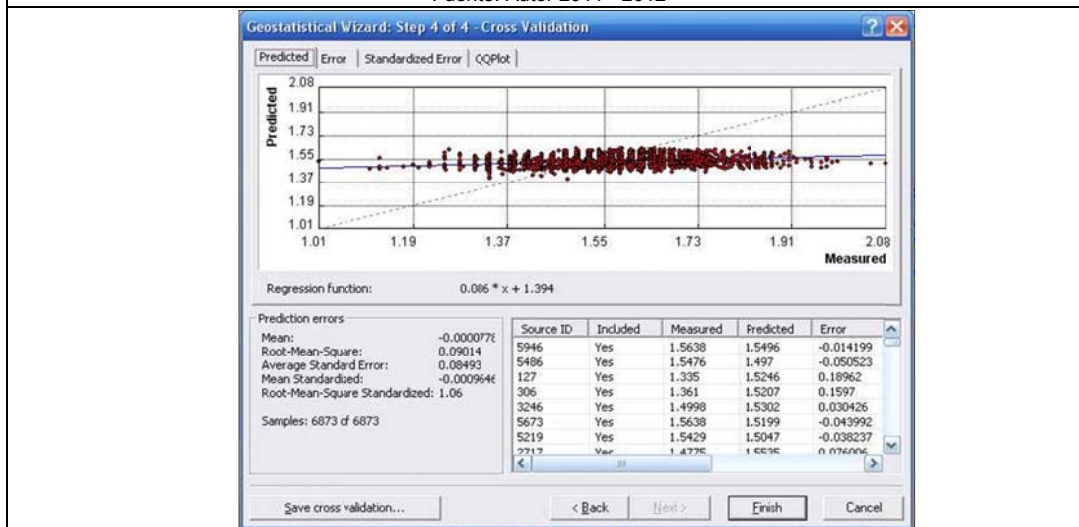


Figura 34. Valores observados frente a valores predichos, Función Esférica
Fuente: Autor 2011 - 2012

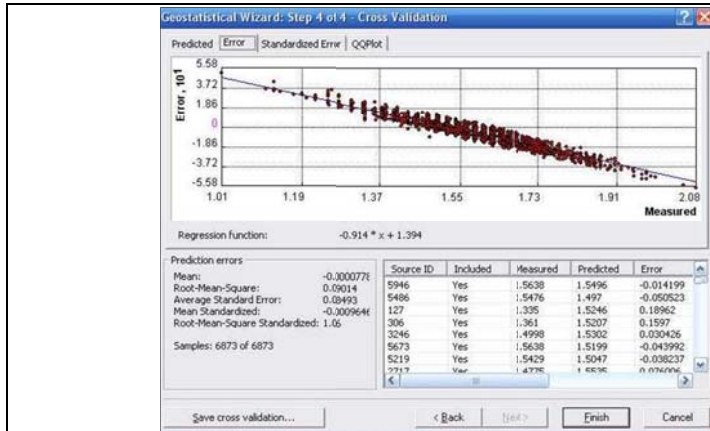


Figura 35. Errores de la estimación, función esférica
Fuente: Autor 2011 - 2012

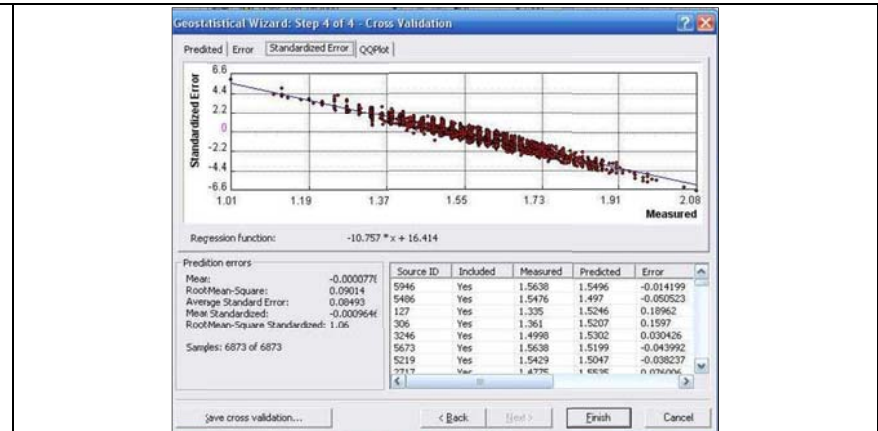


Figura 36. Errores estandarizados, función esférica
Fuente: Autor 2011 - 2012

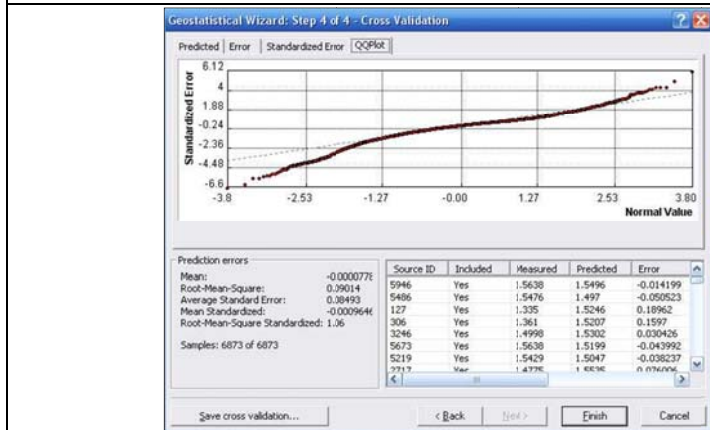


Figura 37. Probabilidad normal de los errores, función esférica
Fuente: Autor 2011 - 2012

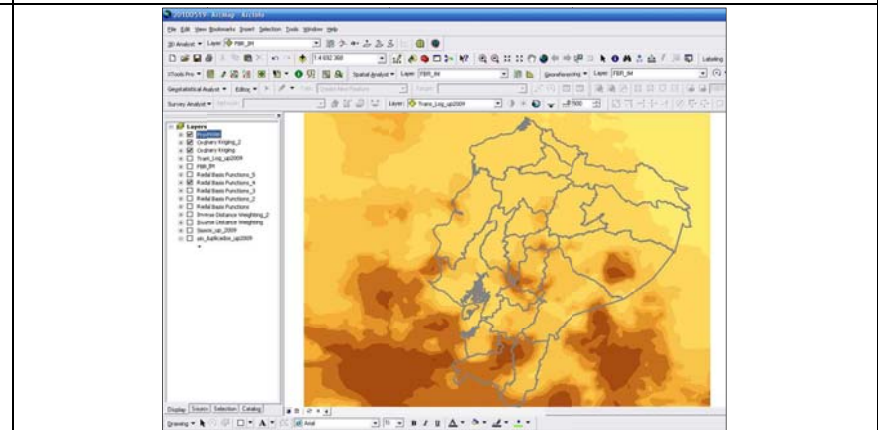


Figura 38. Probabilidad normal de los errores, función esférica
Fuente: Autor 2011 - 2012

Para la función esférica se puede apreciar en el cuadro estadístico de las figuras que el mayor rango es de 8.89979, la meseta parcial (partial sill) es de 0.004787, el efecto nugget 0.00694. Con respecto a los errores predichos, la media es de -0.0000778, el error medio cuadrático es de 0.9014, el promedio del error estándar tiene como valor 0.08493, el error medio estandarizado es de -0.0009646, el error cuadrático medio estandarizado dio como valor 1.06.

4.1.5.1.3 Función Exponencial.

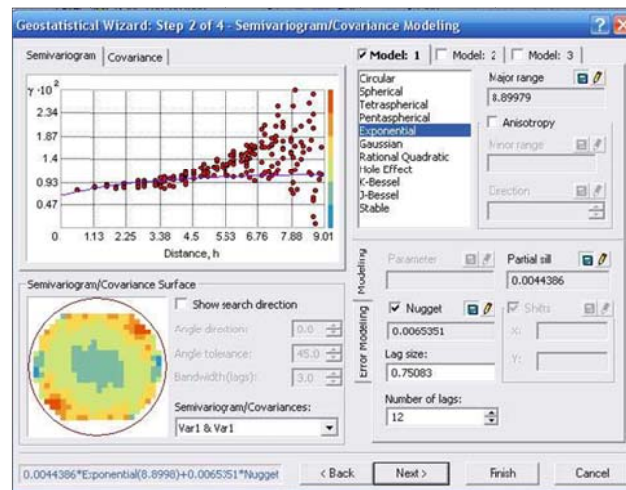


Figura 39. Construcción Semivariograma, Función Exponencial

Fuente: Autor 2011 - 2012

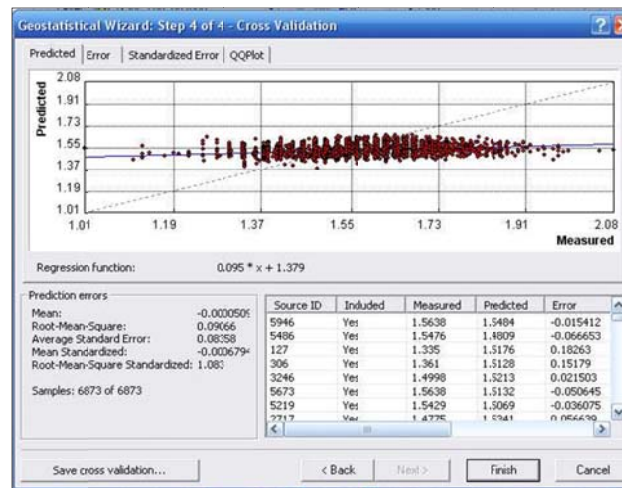


Figura 40. Valores observados frente a valores predichos, Función Exponencial

Fuente: Autor 2011 - 2012

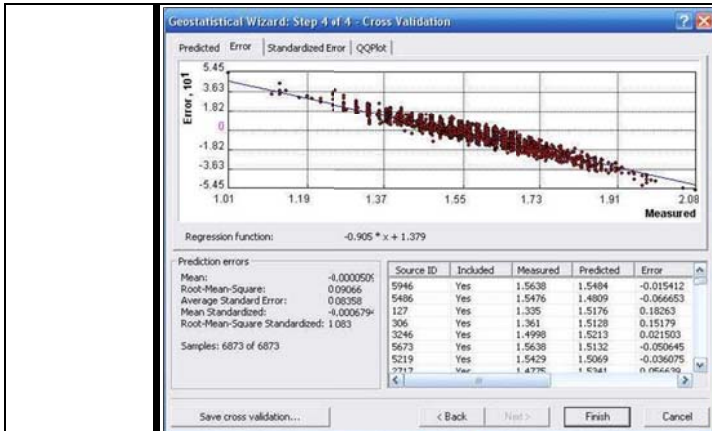


Figura 41. Errores de la estimación, función Exponencial
Fuente: Autor 2011 - 2012

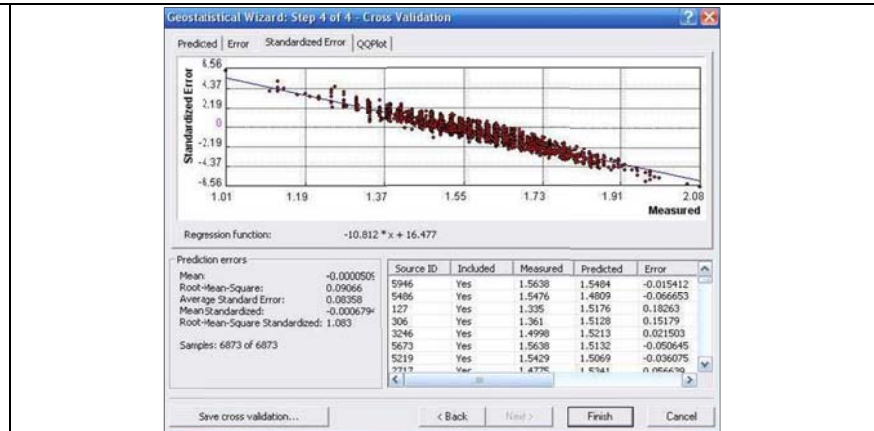


Figura 42. Errores estandarizados, función Exponencial
Fuente: Autor 2011 - 2012

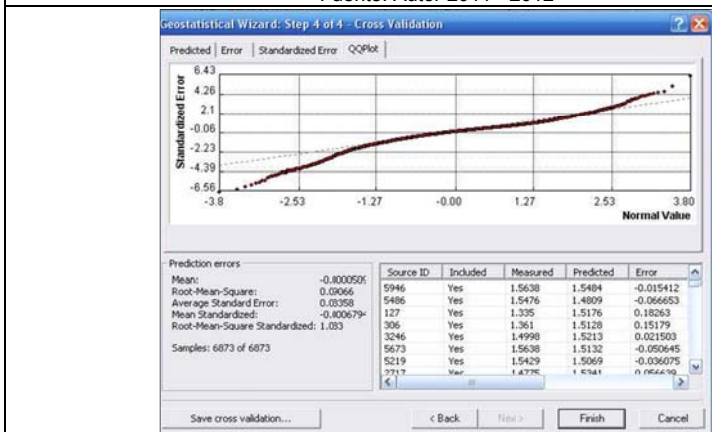


Figura 43. Probabilidad normal de los errores, función Exponencial
Fuente: Autor 2011 - 2012

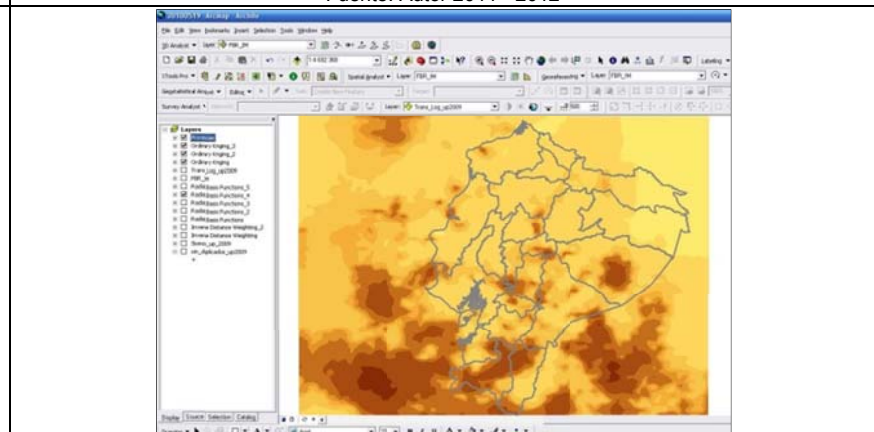


Figura 44. Probabilidad normal de los errores, función Exponencial
Fuente: Autor 2011 - 2012

Para la función exponencial se puede apreciar en el cuadro estadístico de las figuras que el mayor rango es de 8.89979, la meseta parcial (partial sill) es de 0.0044386, el efecto nugget 0.00653. Con respecto a los errores predichos, la media es de -0.0000509, el error medio cuadrático es de 0.9066, el promedio del error estándar tiene como valor 0.08358, el error medio estandarizado es de -0.0006794, el error cuadrático medio estandarizado dio como valor 1.083.

4.1.5.1.4 Función Gauss.

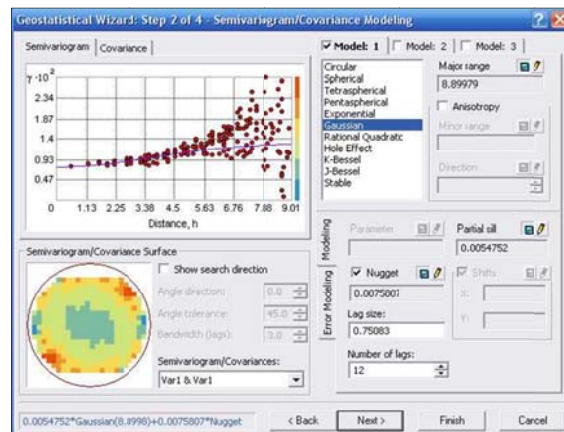


Figura 45. Construcción Semivariograma, Función Gauss

Fuente: Autor 2011 – 2012

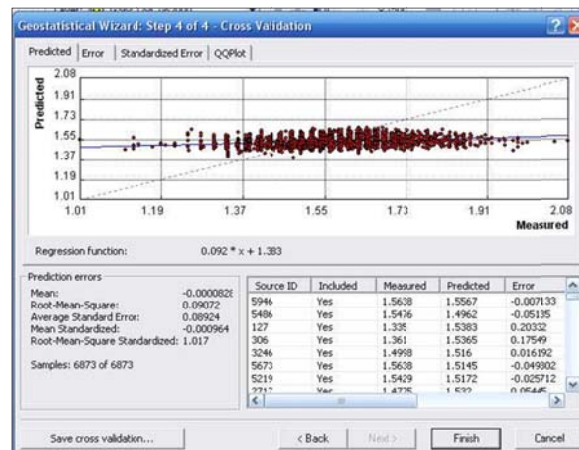


Figura 46. Valores observados frente a valores predichos, Función Gauss

Fuente: Autor 2011 - 2012

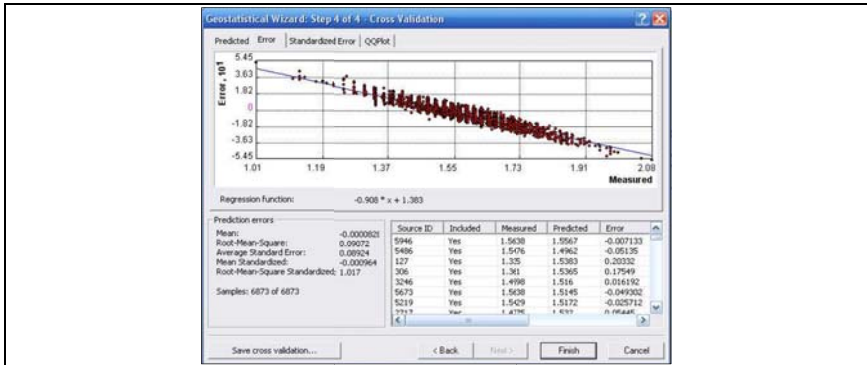


Figura 47. Errores de la estimación, función Gauss

Fuente: Autor 2011 - 2012

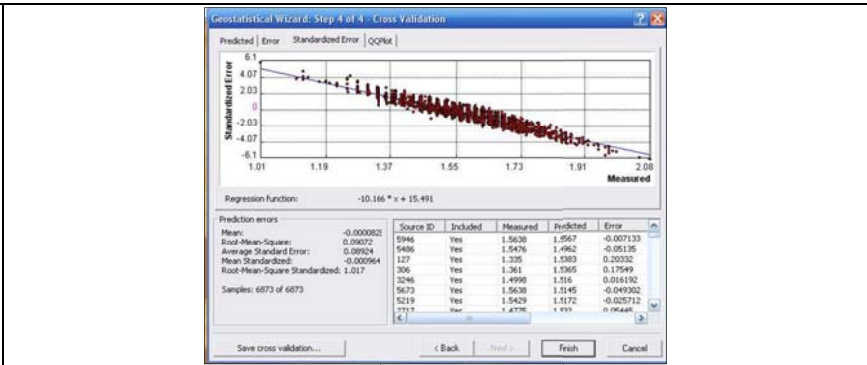


Figura 48. Errores estandarizados, función Gauss

Fuente: Autor 2011 - 2012

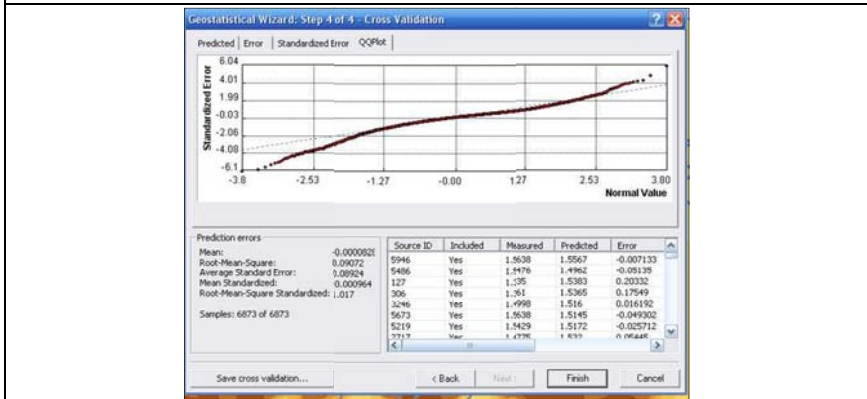


Figura 49. Probabilidad normal de los errores, función Gauss

Fuente: Autor 2011 - 2012

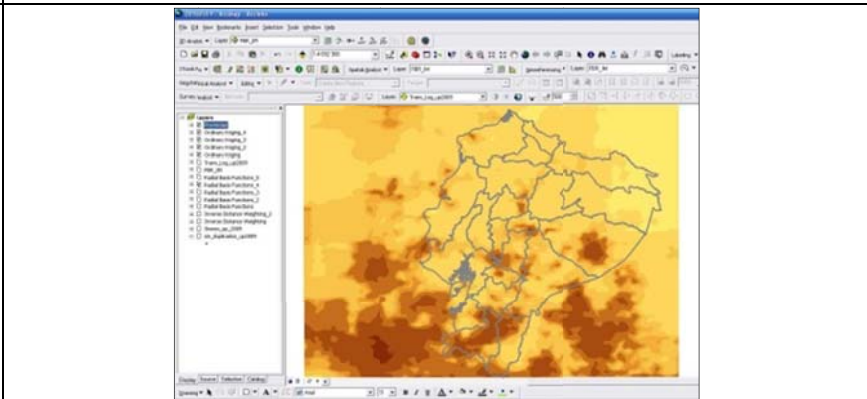


Figura 50. Probabilidad normal de los errores, función Gauss

Fuente: Autor 2011 - 2012

Para la función de gauss encontramos que el mayor rango es de 8.89979, la meseta parcial (partial sill) es de 0.0054752, el efecto nugget 0.0075807. Con respecto a los errores predichos, la media es de -0.0000828, el error medio cuadrático es de 0.09072, el promedio del error estándar tiene como valor 0.08924, el error medio estandarizado es de -0.000964, el error cuadrático medio estandarizado dio como valor 1.017.

4.1.5.2 Cuadro comparativo Kriging

Tabla 3. Cuadro Comparativo de Estadísticas, Funciones Kriging.

Parámetros	Circular	Esférico	Exponencial	Gaussiano	
Mayor Range.	8.89979	8.89979	8.89979	8.89979	
Partial Sill.	0.0053957	0.0044386	0.004787	0.0054752	
Nugget	0.006983	0.00653	0.00694	0.0075807	
ERROR	Mean	-0.000062	-0.000050	-0.0000778	-0.0000828
	RMS	0.09068	0.09066	0.09014	0.09072
	ASE	0.08602	0.08358	0.08493	0.08924
	MS	-0.01994	-0.01692	-0.01631	-0.02986
	RMSS	-0.000783	-0.000679	-0.0009646	-0.000964



Mejor parámetro

RMS. Root mean square.

MS. Mean Standardized.

ASE. Average Estándar Error.

RMSS. Root Mean Square Standardized

Según el cuadro comparativo de la tabla 3, el mejor modelo dentro del método de interpolación Kriging, es el Esférico, por presentar mejor ajuste, mayor área para la auto-correlación positiva de datos; además, los errores son menores y están normalmente distribuidos, según lo que indica el gráfico respectivo (figura 33) y los valores de RMS, ASE, MS y RMSS.

4.1.6 Cuadro comparativo de los métodos determinísticos y geoestadísticos

Tabla 4. Cuadro Comparativo entre las funciones o modelos que presentaron mejores patrones

Parámetros	INTERPOLACIÓN		
	IDW (P=2)	Base Radial (Multiquadric)	Kriging (Esférico)
Major Range.			8.89979
Partial Sill.			0.0044386
Nugget			0.00653
ERROR	Mean	-	-0.0000055
	RMS	0.000925	0.1039
	ASE		0.08358
	MS		-0.01692
	RMSS		-0.000679



Mejor parámetro

RMS. Root mean square.

MS. Mean Standardized.

ASE. Average Estándar Error.

RMSS. Root Mean Square Standardized

Según la tabla 4 del cuadro comparativo entre métodos de interpolación se puede observar que el valor de la media de error más baja la lleva la Base Radial, mientras que el error medio cuadrático lo lleva el Kriging. Se seleccionará el método y por ende el Raster de la Interpolación de Base Radial ya que la media de error es considerablemente más baja en comparación que el RMS.

4.1.7 Generación de mapas:

La información generada fue tratada mediante sistemas de información geográfica, con los que se obtuvo el producto deseado.

4.1.7.1 Análisis morfoestructural

Por medio de una imagen digital del terreno, se realizará la interpretación de geformas principalmente de lineamientos estructurales que muy posiblemente se refiera a fallas geológicas.

4.1.7.1.1 GEOLOGIA REGIONAL

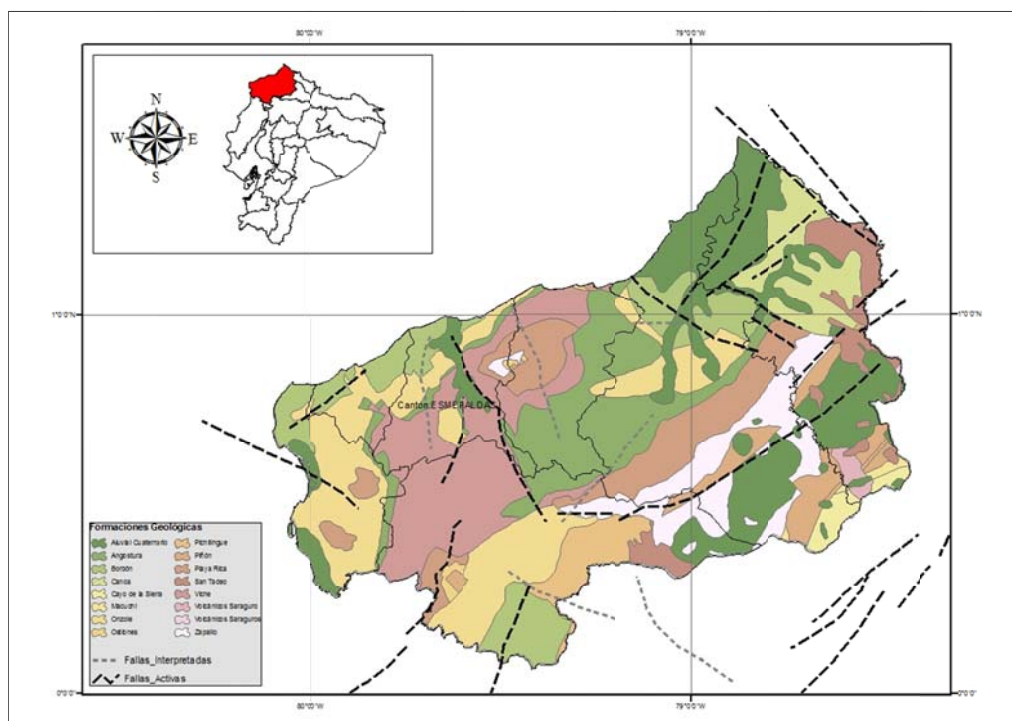


Figura 51. Geología Regional de la Prov. De Esmeraldas

Fuente: Mapa geológico Esmeraldas 1:100000 y modificaciones de autor 2011 - 2012

El área está ubicada geológicamente dentro de la Cuenca Borbón - Esmeraldas. El basamento profundo de esta cuenca está constituido por corteza oceánica (complejo ígneo Piñón). Esta corteza fue cubierta por sedimentos pelágicos y volcánico-clásticos de mar profundo depositados en la vecindad de un arco volcánico de islas (Grupo Chontal).

Este basamento fue construido durante el periodo cretácico, luego estos terrenos oceánicos fueron acrecionados al continente sudamericano durante el Eoceno. El piso marino en ese entonces estaba muy fracturado y se parecía a un conjunto de bloques o cajas dispuestos a varios niveles.

Ciclo 1: Sedimentación carbonática y turbidítica

Sobre este basamento preparado por la anexión de terreno oceánico al continente, poco tiempo después, en los altos submarinos eocénicos aparecieron arrecifes algáceos y foraminíferales (capas Ostiones) y se depositaron turbiditas y pelagitas en sus vecindades (formaciones Santiago y Zapallo) durante el tiempo que va del eoceno medio al eoceno superior.

Ciclo 2: Relleno detrítico progresivo de la cuenca

Más tarde entre el Oligoceno y el Mioceno medio, se comenzó a rellenar la cuenca con sedimento muy fino en ambientes epinerfíticos y en aguas relativamente profundas (formaciones Chumundé, Pambil y Viche). Conforme se rellenaba la cuenca las aguas fueron menos profundas y aparecen las facies del grupo Daule constituidas entre el Mioceno Medio y Mioceno superior (formaciones Angostura, Onzole y Borbón). El aporte de materiales terrígenos a la cuenca provenía de la cordillera andina. El volcanismo muy activo en ella, aportó en forma intermitente con enormes cantidades de ceniza y polvo volcánico a los sedimentos de la cuenca.

Ciclo 3: Colmatación y emersión de la cuenca

Una vez rellenada la cuenca, esta emerge en el Plioceno. Sobre ella se depositan capas continentales (formaciones Cachabí, San Tadeo) y comienzan los procesos de denudación y modelado de las tierras emergidas los cuales siguen hasta hoy en día.

Las tierras emergidas en la zona de ante-arco andino constituyen el actual sistema orográfico de la costa ecuatoriana. La convergencia de las placas Nazca y Sudamérica producen en esta zona de ante-arco distensiones tectónicas que resultan en levantamientos (horsts) y hundimientos de bloques (graben) conformando las cordilleras bajas y las planicies de la costa.

Actualmente la cuenca forma un amplio anticlinal cuyo eje está dislocado por la falla transversal "Esmeraldas". A lo largo del eje de la cuenca se forman domos y horsts donde afloran las rocas más antiguas de la cuenca. El anticlinal mencionado designa una estructura regional levemente combada. Las unidades geológicas de la cuenca se han acomodado a la tectónica de bloques del basamento, debido a ello no son evidentes estructuras de plegamiento convencional sino más bien bloques basculados y a escala de las capas de las formaciones, un sistema de diaclasamiento ortogonal distensivo.

El apilamiento sedimentario descrito como formación Onzole tiene en el área un espesor aflorante de unos 250 m. Su disposición estructural es subhorizontal a levemente inclinada. Las capas son paralelas, de espesor centimétrico a decimétrico, muy raramente se observan capas de espesor métrico. Internamente presentan en general estratificación masiva y ocasionalmente se observa laminación milimétrica paralela.

En donde está presente la formación Onzole el patrón estructural es un sistema ortogonal distensivo de diaclasas con espaciamiento decimétrico. A menudo las superficies de las fracturas están pintadas por hidróxidos de hierro y/o rellenas de venillas de yeso secundario. Este yeso se deposita desde las aguas capilares que circulan hacia arriba y que vienen cargadas de sulfatos extraídos de las mismas rocas. Siguiendo este mismo proceso se depositaron también los minerales hidratados de hierro.

En superficie expuesta a la intemperización las diaclasas evolucionan a una intensa fisuración mecánica, con una subsiguiente disgregación de la roca en tamaños de 2 a 150 mm). Al pie del talud se forman derrubios y con la lluvia se mojan y eventualmente dan origen a flujos de barro.

4.1.7.1.2 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA LOCAL

El territorio del cantón Esmeraldas está conformado en un 70 % por un sistema de colinas (figura 51). El resto está ocupado por tierras bajas de relleno fluvial, eluvial y coluvial. El sistema colinar rodea y enmarca los territorios planos.

Zona de Colinas

El sistema de colinas ha sido construido y modelado por los agentes geológicos que actuaron y actúan sobre un sustrato sedimentario detrítico marino. Este sustrato está constituido principalmente por una pila de sedimentos detríticos de grano fino a medio depositados en ambientes de aguas relativamente profundas sobre la plataforma marina. En el área, este apilamiento sedimentario recibe el nombre de formación Onzole, la cual ocupa extensas áreas de la provincia de Esmeraldas.

Las capas Onzole están en posición sub-horizontal o levemente inclinadas y su topografía al comienzo de su exposición a los agentes de erosión / denudación se caracterizaba por extensas mesas y mesas cuesta.

El levantamiento de estas capas empezó en el Plioceno y el modelado de mesas a colinas ha durado menos de un millón de años. Estas mesas se encuentran ahora bien disectadas y han evolucionado hacia colinas y valles.

Las colinas son angostas, redondeadas y están coronadas por cimas planas. Se muestran levemente disectadas por valles poco desarrollados y distancias interfluviales cortas.

El sistema de drenaje sobre los sedimentos finos de la formación Onzole es subdendrítico con una densidad media. Las cuencas vertiente han sido y están siendo modeladas por acelerados procesos de retroceso erosivo. En este territorio colinar no hay mucha presión constructiva urbana excepto en las

colinas que rodean el viejo casco urbano de la ciudad de Esmeraldas. En este sector la presión demográfica ha producido una colonización sucesiva de niveles cada vez más altos de estas laderas.

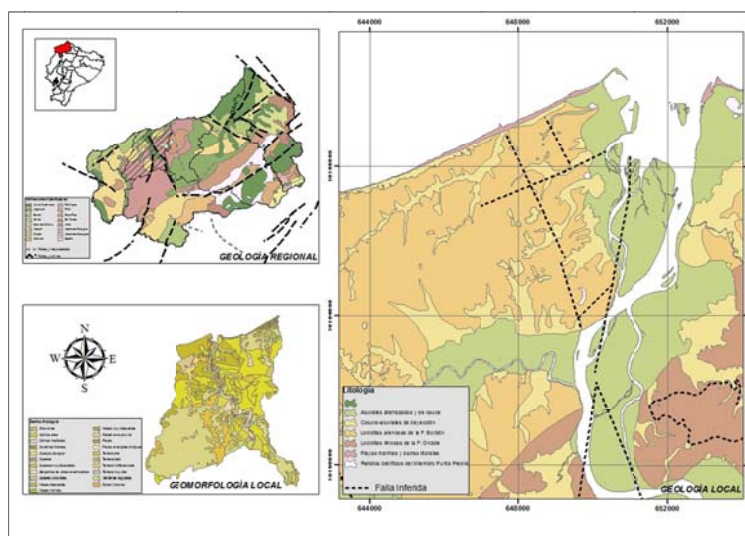


Figura 52. Geología y Geomorfología Local (Provincia, Cantón, Ciudad)

Fuente: Mapa geomorfológico Esmeraldas 1:100000 y modificaciones de autor 2011 – 2012

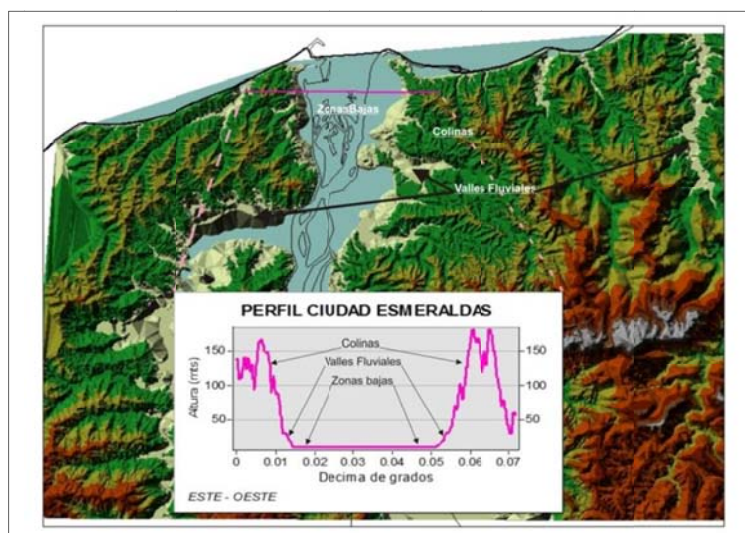


Figura 53. Clasificación de zonas por geomorfología.

Fuente: Autor 2011 – 2012

La sub zona de valles juveniles

Conforme avanza el proceso erosivo las cuencas vertiente evolucionan hacia valles amplios de topografía suave. Estos valles contienen múltiples depósitos de flujos de barro y escombros en su fondo (figura 51). En la desembocadura de estos se presentan regularmente conos de deyección. Estos depósitos provienen de los procesos de denudación de las colinas que los rodean. Entre los procesos más importantes de denudación están los deslizamientos de laderas y los subsecuentes flujos de lodo así como el posterior acarreo del material fino por las aguas superficiales.

Los valles intercolinarios son el segundo objetivo de urbanización después de las terrazas aluviales, sobre todo en el área circundante al suelo urbano consolidado de la ciudad de Esmeraldas y en el valle del río Teaone.

Zonas bajas

Las tierras bajas están constituidas por las terrazas aluviales escalonadas que rellenan los amplios valles en cuyo fondo corren los ríos Esmeraldas y Teaone (figura 5). Estas tierras bajas son el primer objetivo de ocupación de los urbanizadores y constructores y su colonización humana es creciente y acelerada.

El curso bajo del río Teaone tiene un patrón meandriforme hasta su desembocadura en el río Esmeraldas. El canal del río es relativamente delgado, de anchura más o menos uniforme y no ha construido islas. En este tramo, el río ya ha perdido su capacidad de transporte de sedimentos y aquí forma grandes depósitos aterrazados

A lo largo del canal actual se pueden observar afloramientos del sustrato (formación Onzole). Este río divago durante milenios a lo ancho y a lo largo del valle excavando, ampliando y rellenando este territorio con su carga de sedimentos. Este río atraviesa desde su nacimiento terrenos sedimentarios marinos finos detríticos. Su carga es principalmente arena, limo y arcilla y en menor cantidad grava con abundantes cantos blandos. Estos materiales son los que constituyen los depósitos de las terrazas del valle del Teaone.

En este valle se han diferenciado 3 niveles de terrazas aluviales (véase el mapa geológico). También se cartografió el terreno del curso activo del río en el que se pueden encontrarse algunos meandros y canales abandonados. Este terreno es susceptible de inundarse durante las crecidas interanuales y más aún durante las crecidas provocadas por el Fenómeno de El Niño.

El curso bajo del río Esmeraldas antes de desembocar en el Océano Pacífico forma un amplio estuario. En el canal actual se ha formado grandes barras de arena y limo conformando enormes islas.

El valle terminal del río Esmeraldas contiene 3 niveles de terrazas aluviales (véase la figura 4). El terreno del curso activo del río es susceptible de inundarse durante las crecidas interanuales y más aun durante las crecidas provocadas por el Fenómeno de El Niño. En el tramo final está sujeto a los aguajes de inundación durante la acción de las mareas altas.

Terrazas Aluviales Recientes. El nivel de terrazas más próximas a la ribera son inundables. Las que están en el tramo final del río, están sujetas a los *aguajes de inundación* por la acción de las mareas altas. Estas terrazas del nivel más bajo y cercano al río contienen bandas o diques de arena que bordean el cauce del río Esmeraldas seguidas hacia el interior de llanuras de inundación. Los materiales de este nivel de terrazas son limos y arenas.

Se han identificado 2 niveles más de estas amplias terrazas aluviales recientes. Estos niveles están escalonados hasta la cota de 20 msnm. Seguramente contienen algunos niveles de grava en su parte basal, en el contacto con la infrayacente formación Onzole. Sus depósitos de arcillas, limos y arenas corresponden a sedimentación en llanuras de inundación.

4.1.7.1.3 *SISMICIDAD Y TECTÓNICA.*

Téctonicamente y sísmicamente, la Prov. De Esmeraldas está afectada tanto por fallas geológicas desplazadas a lo largo y dentro de la Provincia, así como la zona de subducción del pacífico la cual se encuentra a 50 Km de la costa de la Provincia.

Son 18 fallas geológicas activas que atraviesan o contienen la Prov. De Esmeraldas (tabla 5), como se mencionó en la geología local, el cantón y por ende la ciudad de Esmeraldas, forman parte de la cuenca Borbón Esmeraldas, la misma forma un amplio anticlinal cuyo eje esta dislocado por la falla transversal o transcurrente “Esmeraldas” sobre la que se situa el Río Esmeraldas y en cuya desembocadura se acentúa la ciudad de Esmeraldas, podemos citar también la falla de Muisne ubicada sobre la localidad con el mismo nombre, es una falla también de tipo transversal.

Tabla 5. Fallas Activas dentro de la Prov. De Esmeraldas

Nombre	Tipo de falla	Longitud de Falla (km)
Falla Quinindé	Inversa o de Socavamiento	18
Falla Cañaverál	Deslizamiento	40
Falla Muisne	Transcurrente izquierda	70
Falla Galera	Normal	25
Falla Buga	Inversa o de Socavamiento	25
Falla Esmeraldas	Transcurrente izquierda	65
Sin nombre	no definida	17
Falla Río Canandé	Transcurrente derecha	90
Falla Yanayaca	Transcurrente izquierda	43
Falla Carolina	no definida	24
Falla Tambo	no definida	14
Falla Santiago	Transcurrente derecha	38
Falla Concepción	No definida	12

Falla La Boca	Inversa o de Socavamiento	40
Falla Mira	No definida	14
Falla Patabi	no definida	14
Falla Mataje	No definida	10

4.1.7.2 Validación de resultados geoestadísticos.

Una vez obteniendo el resultado del análisis morfoestructural, al combinarlo con los datos sísmicos y la imagen de anomalías sísmicas, obtenida por la selección del método de interpolación, se podrá validar el resultado de la misma, así mismo se podrá realizar un diagnóstico de impacto o posibles consecuencias en los terrenos acorde a la escala INQUA

En la figura 52 se puede apreciar la distribución de los eventos sísmicos tanto históricos como contemporáneos, junto con la distribución de fallas, en la misma se puede distinguir que existen una concordancia de las fallas con los eventos sísmicos de 5.0 a 8.8 Mw, principalmente en las fallas Muisne, Esmeraldas y parte de la falla Yanayaca, las tres identificadas como fallas transcurrentes izquierdo.

Al sobreponer la imagen RADAR de la superficie, se pueden observar otros lineamientos que calzan perfectamente con los eventos sísmicos registrados, dándonos a pensar que los eventos sísmicos locales en continente son exclusivamente por el movimiento de fallas y todas posiblemente de tipo transcurrente (figura 53).

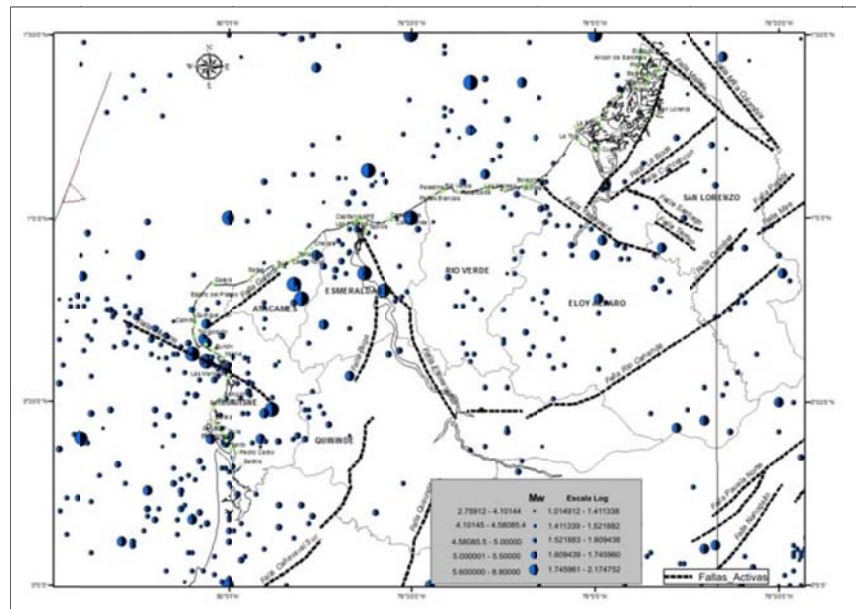


Figura 54. Ubicación de eventos sísmicos y fallas activas

Fuente: Información digital de estructuras Kervin Chunga 2010, Elaboración de figura Autor 2011 - 2012

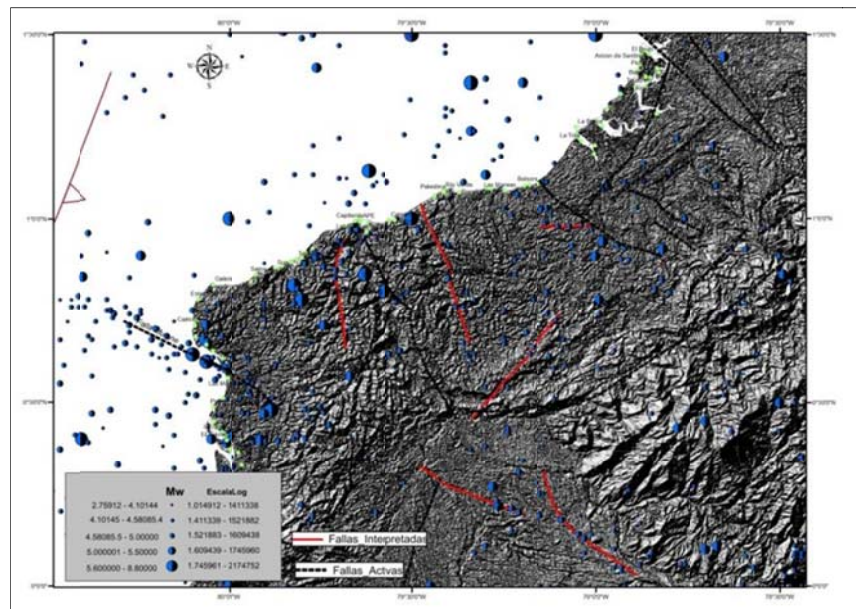


Figura 55. Interpretación de lineamientos coincidentes con eventos sísmicos

Fuente: Autor 2011 - 2012

Al sobreponer el raster de zonificación sísmica junto con la capa de fallas activas y fallas interpretadas obtenemos el siguiente gráfico (figura 54)

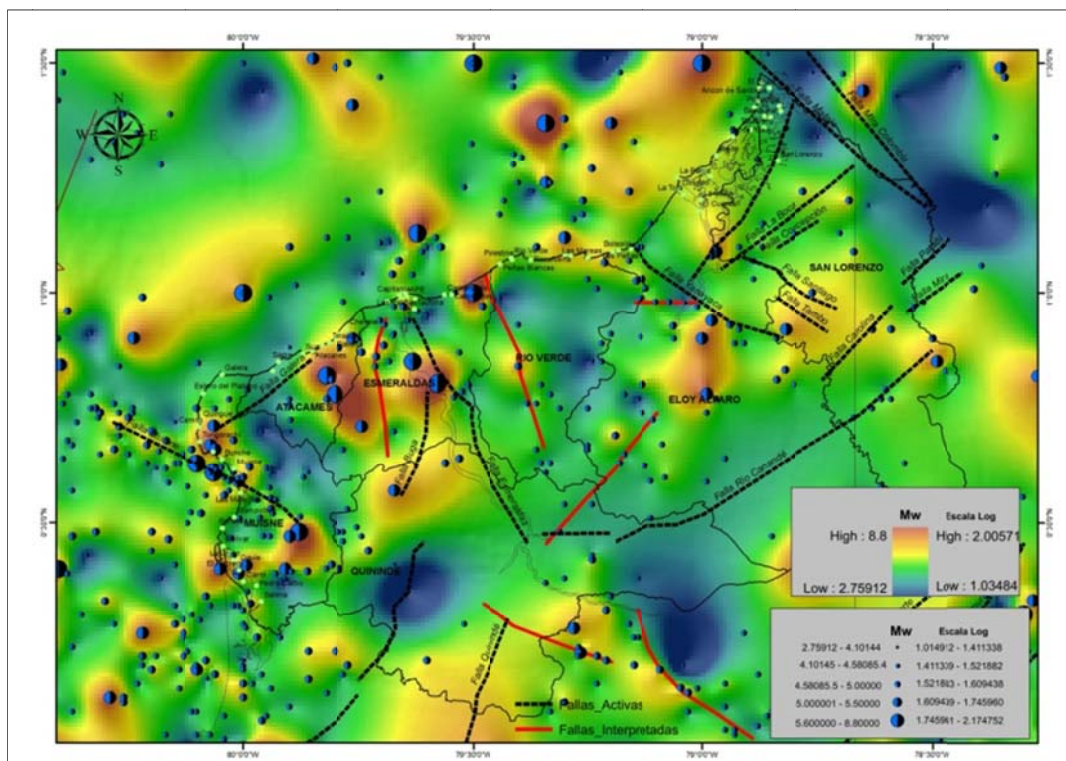


Figura 56. Zonificación sísmica en la Prov. De Esmeraldas y alrededores

Fuente: Autor 2011 - 2012

De la figura 54 podemos observar que gran número de las fallas tanto activas como interpretadas coinciden con los sectores de zonificación alta en cuanto a la magnitud de momento. Se puede observar que la falla encerrada de color morada (figura 55) correspondiente a una falla interpretada podría dar continuidad hacia el océano al presentarse una alineación tanto de la anomalía Mw (valores altos de Mw en el raster de zonificación), así como la presencia de sismos de magnitud considerables.

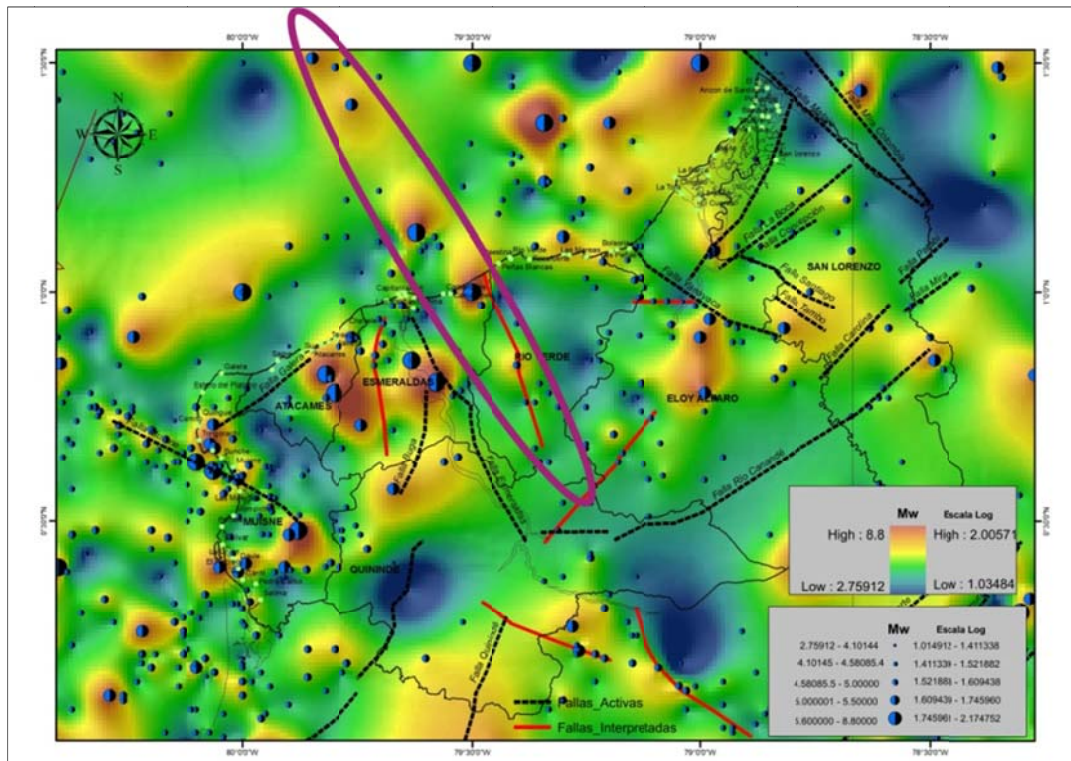


Figura 57. Posible Continuidad de falla interpretada, tomando en consideración la anomalía de Mw.

Fuente: Autor 2011 - 2012

Ahora bien haciendo un análisis de los sismos del sector encerrado en la figura anterior, dichos sismos no correspondería a la misma falla ya que el comportamiento generalmente es uniforme a lo largo de la misma. En la figura 56, la elipse de color naranja, encierra los eventos que han registrado profundidades no mayores a los 79 km y no menores de 25 Km, con de magnitudes de hasta 5.0 Mw, mientras que los eventos dentro de la elipse de color gris sobre la supuesta misma estructura corresponden a eventos de entre 15 a 20 Km de profundidad y magnitudes mayores a 6.0 Mw, comparando esta zona con los eventos suscitados a lo largo de la falla Esmeraldas tienen concordancia ya que estos eventos son de profundidades de entre 15 a 20 Km y magnitudes mayores a 6.0Mw. Entonces se podría asumir que estas anomalías junto con estos episodios sísmicos correspondían a la misma falla pero la cual fue desplaza horizontalmente por otra falla posiblemente de tipo dextral que correspondería a la falla Galera, este párrafo es a manera de ejercicio.

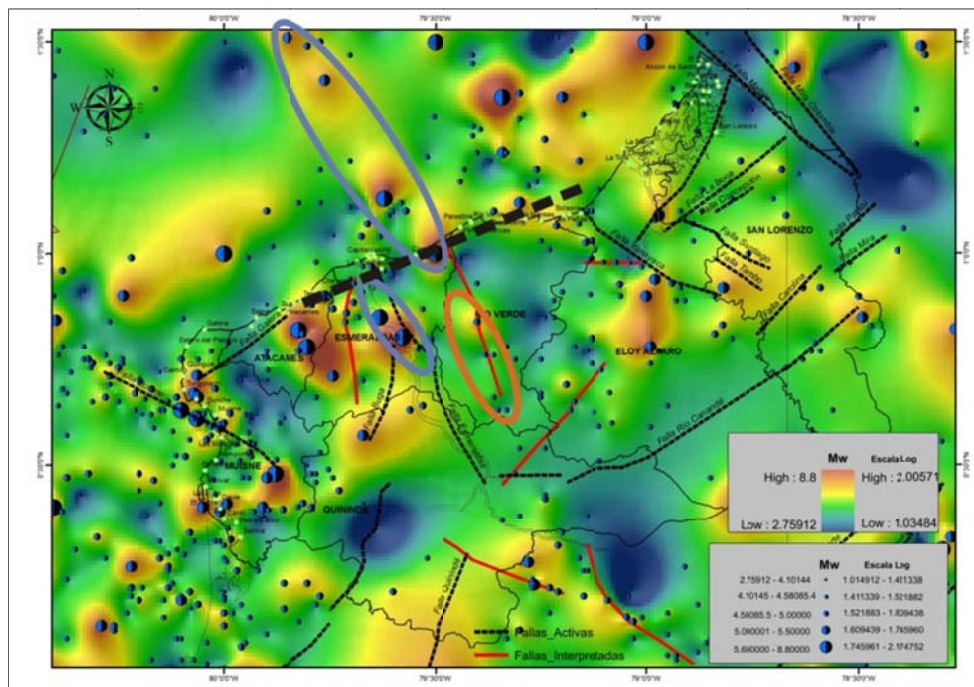


Figura 58. Ejercicio de posible dinámica de fallas Galera y Esmeraldas

Fuente: Autor 2011 - 2012

A nivel Cantonal trataremos de caracterizar el efecto que tiene la zonificación sísmica pero comparando ahora la escala Mw con la escala ESI 2007, para así tener una idea del daño a nivel cantonal, para esto se generarán isosistas, ya que a esta escala es más apreciable con contornos que con el raster de zonificación.

Según la figura 57 podemos observar que la falla Esmeraldas en su parte central podría generar sismos de hasta 8.8 Mw con su equivalencia en la escala de intensidad ESI 2007 al grado VIII, VII y VI. Considerados como “dañinos” (ver figura 3 y descripción de intensidades ESI 2007). Todo el cantón de Esmeraldas está sometido a niveles de Intensidad ESI 2007 de V a VIII, siendo la escala VI predominante o que mayor área cubre. Ubicándose sobre la ciudad de Esmeraldas, se puede observar que centralmente se considera eventos de escala ESI 2007 de VI, la cual cubriría toda la ciudad.

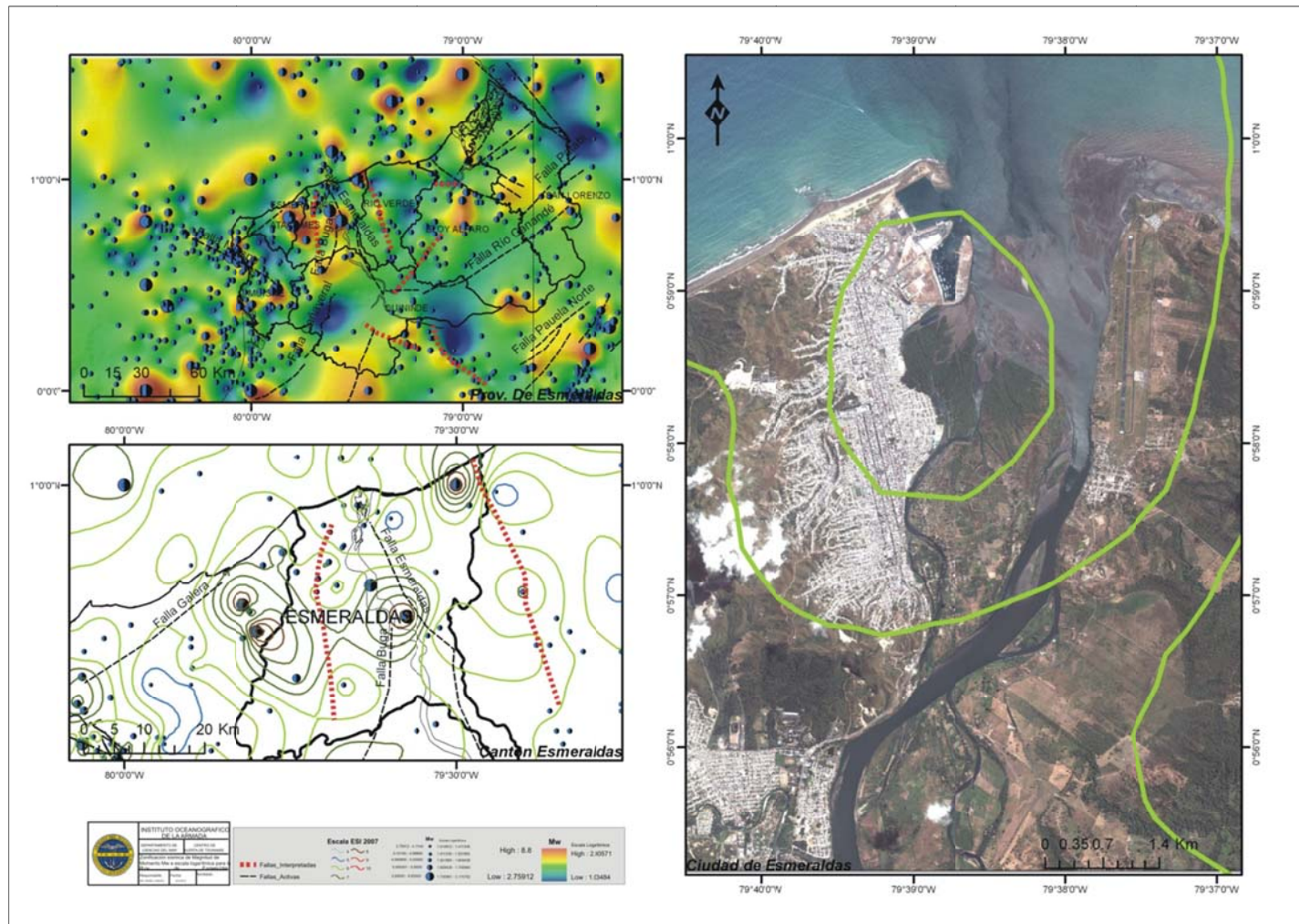


Figura 59. Zonificación a nivel Cantonal y local

Fuente: Autor 2011 - 2012

4.2 Análisis de los resultados

El estudio realizado dentro de este proyecto tiene como resultado final un mapa de zonificación sísmica el cual fue generado mediante métodos geostatísticos usando varios tipos de interpolación, donde fueron analizados datos sísmicos históricos y contemporáneos otorgados por organismos de control. Se realizaron varias pruebas con varios métodos de interpolación para lo cual el método más apropiado fue el “Base Radial, multiquadratic” de acuerdo a la distribución y cantidad de datos proporcionados.

La metodología aplicada para seleccionar el modelo de interpolación más aproximado a la realidad o el de menor error en base a la geostatística, es netamente matemático y estadístico por más bajo que haya sido el porcentaje de error en la desviación estándar de todas maneras sigue siendo un modelo conceptual que puede variar significativamente en menor probabilidad que los demás modelos, pero que sirve efectivamente para en base a los resultados, generar planes de mitigación, de evacuación y de contingencia ante los posibles daños colaterales que se evidenciaran en el terreno.

El resultado positivo de la convalidación geológica estructural que se realizó al modelo no es la única vía para convalidar dicho resultado, también podría haberse tomado en consideración la comparación con otros resultados de zonificaciones sísmicas como por ejemplo *El modelo de intensidades macrosísmicas desde el análisis de fallas activas y distribución espacial de sismos, presentada por el Dr. Kervin Chunga 2011. Posiblemente sumando el análisis estructural realizado y la comparación con los modelos de otros autores, hubiera mejorado el concepto o el propósito de la convalidación.*

El utilizar la clasificación o relación de magnitud sísmica con intensidad ESI-2007 aplicada para el Ecuador acorde a la clasificación calculada en la determinación de Isosistas de Intensidad según

la publicación "*Estimación de máximos niveles de sismicidad para el Litoral Ecuatoriano a través de la integración de datos geológicos y sismotectónicos*" fue práctico ya que hacer o realizar el proceso para esta determinación o cálculo sería un tema de tesis muy aparte vinculado directamente a la parte sísmica y matemática sin ninguna connotación geológica aplicada.

El diferenciar en esta tesis la fase de aplicación de los métodos geoestadísticos para determinar el raster más adecuado acorde a la comparación de los métodos de interpolación, con la sección dedicada al análisis de convalidación estructural para aquel raster y por último para generar el mapa de isosistas de intensidad ESI 2007, acorde a la relación de Magnitud de Momento e intensidad presentada en los resultados de la publicación "*Estimación de máximos niveles de sismicidad para el Litoral Ecuatoriano a través de la integración de datos geológicos y sismotectónicos*". Ha sido un poco complicado, ya que las tres partes que comprende esta tesis se la puede tomar como temas por separados, lo positivo es que se logró definir claramente en esta tesis que el objetivo final de esta tesis no es presentar cual fue el método de interpolación usado para generar el raster de zonificación de magnitud de momento, sino que el objetivo final es realizar un mapa temáticos de isosistas en base a la escala de intensidad ESI-2007 cuyo objetivo es cuantitativamente predecir los posibles daños que se generaran en el terreno

Los resultados de este proyecto servirán para estudios posteriores o en lo que refiere a organización y ordenamiento del territorio donde se puede indicar mediante el resultado, que zonas son más vulnerables de la provincia de Esmeraldas también se pueden realizar tareas de prevención mediante la capacitación al momento de un evento sísmico

5. CONCLUSIONES FINALES

- Según la tabla 4 del cuadro comparativo entre métodos de interpolación se puede observar que el valor de la media de error más baja la lleva la Base Radial, mientras que el error medio cuadrático lo lleva el Krigging. Se seleccionará el método y por ende el Raster de la Interpolación de Base Radial ya que la media de error es considerablemente más baja en comparación que el RMS.
- Geológicamente la ciudad de Esmeraldas se encuentra ubicada en las zonas denominadas bajas y de valles fluviales correspondientes a depósitos aluviales correspondientes a varios niveles de terraza aluvial, principalmente en las zonas bajas. Dichas zonas poco consolidadas.
- Según la figura 54, 55, 56, la provincia de Esmeraldas se encuentra sujeta a posibles eventos sísmicos significativos 5 a 8.8 Mw, teniendo en cuenta que hay evidencia histórica en la misma, además considerando que las 18 fallas que actúan dentro de la provincia son de carácter activo.
- Si se validará el ejercicio citado en la figura 57, la ciudad de Esmeraldas estaría afectada directamente por la acción de las fallas Galera y Esmeraldas, siendo la segunda la de mayor amenaza, debido a su historial sísmico.
- Por la escala de intensidad ESI 2007, el cantón de Esmeraldas se vería realmente afectado ya que concentra hasta eventos de intensidad VIII considerado como muy dañino, teniendo en cuenta que los efectos de dicha escala pueden perpetuarse hasta los 100 Km² y según la figura 58 en el mapa Cantonal se aprecia que sobre la localidad de Camaroneros puede darse eventos con esta intensidad y que dicha localidad se encuentra a 10 Km de la ciudad de Esmeraldas, motivo por el cual la ciudad si se vería afectada al estar dentro del rango de acción.
- Sobre la ciudad de Esmeraldas se podrían registrar intensidades de nivel VI (figura 57), las cuales por la descripción de los efectos en esta escala si tendrían un impacto significativo en la ciudad debido ya que como en estudios anteriores se sabe que la ciudad de

Esmeraldas esta acentuada sobre depósitos de terrazas aluviales compuestas por detritos, arenas y limos de las formaciones Onzole y Borbón poco consolidados y que además el 80% de las elevaciones que rodean a la ciudad están catalogadas como inestables y que parte de este porcentaje corresponden a los valles fluviales sobre los cuales existen un buen número de asentamientos de familias.

6. REFERENCIAS

CARDENAS MORENO, Antonio. "Análisis Geoestadístico". *Sistemas y Análisis de la Información Geográfica*. 2da Edición, 2008. Editorial Alfaomega Ra-Ma. Página 754 – 865.

JOHNSTON et al. "Using ArcGis Geoestatistical Analyst". *ESRI TRAINING*. Chater 6, pp. 131-166.

HENRIQUEZ, Carlos. "Materiales y métodos". *La geoestadística en el estudio de la variación espacial de la fertilidad del suelo mediante el uso del interpolador Kriging*". Página 75 – 86.

QUIÑONEZ MACIAS, María Fernanda y CHUNGA, Kervin . "Evaluación de la Vulnerabilidad Física de las Infraestructuras Eléctricas ante Amenazas Naturales: Estudio de peligrosidad sísmica para los componentes eléctricos del Sistema Nacional Interconectado" *Conversión a Escalas Mw*. Informe inédito, *estudio para UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO*. Marzo 2009. Página 9 -10.

CHUNGA, Kervin. "Evaluación de la Vulnerabilidad Física de las Infraestructuras Eléctricas ante Amenazas Naturales: Estudio de peligrosidad sísmica para los componentes eléctricos del Sistema Nacional Interconectado". Informe inédito. Ing. Kervin Chunga, Ing. Maria Fernanda Quiñónez, estudio para UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO. Marzo 2009.

Michetti, A.M. et al.: The INQUA Scale: An innovative approach for assessing earthquake intensities based on seismically-induced ground effects in natural environment. *Memorie Descrittive Della Carta Geologica D'Italia*, 67. APAT, SystemCart Srl, Roma, Italia. 2004.

INGECONSULT. "Plan de control de riesgos de laderas en la ciudad de Esmeraldas": Informe UCP-PATRA, para el Ilustre Municipio de Esmeraldas. Esmeraldas, Diciembre 2001.