

CARTOGRAFÍA APLICADA AL CONTROL AMBIENTAL EN DERRAMES DE HIDROCARBUROS

¹Pablo Danilo Ordóñez Gutiérrez

¹EP PETROECUADOR

Autor para correspondencia: pablotro25@gmail.com

Recibido: 2019/08/20

Aprobado: 2019/11/30

DOI: <https://doi.org/10.26621/XV21.2019.12.A02.PUCESI.2550.6684>

RESUMEN

Este caso de estudio se basa en un derrame de petróleo originado por un deslizamiento de tierra del año 2008 que llevó a la fractura del oleoducto del Sistema de Oleoductos Trans Ecuatoriano (SOTE) y el poliducto Shushufindi-Quito, ambos ubicados en la región noreste de Ecuador, en la parroquia Gonzalo Díaz, del cantón El Chaco, en la provincia de Napo. Los datos de tres campañas diferentes de muestreo de suelo (2008, 2009 y 2010) se organizaron utilizando geodatabases que condujeron a un análisis de auto-correlación del parámetro de hidrocarburos totales de petróleo (TPH, por sus siglas en inglés) y sus mapas de contaminación resultantes. Solo la información de la campaña 2009 fue interpolada considerando una variografía según la distribución de las muestras de ese año. El resultado de este análisis es la mejora en la forma en que se tuvieron que tomar nuevas muestras de suelo para el proceso de limpieza y remediación, con el resultado de la recuperación de un total de 10.5 hectáreas afectadas directamente, donde se realizaron procesos de inoculación de bacterias que degradan los hidrocarburos en ecosistemas sensibles de la región amazónica del Ecuador.

Palabras clave: derrame, TPH, auto correlación, variografía, bacterias, remediación

ABSTRACT

This study case is based on an oil spill originated by a landslide in 2008 that led to the pipeline rupture of the Trans Ecuadorian Pipeline System (SOTE) and the Shushufindi-Quito Multiproduct Pipeline, both located in the northeast region of Ecuador, in Gonzalo Diaz Parish, El Chaco Canton, in the province of Napo. The data of the three different soil sampling campaigns (2008-2009 and 2010) was organized using geodatabases which resulted in an auto-correlation analysis of the Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) parameter and their resulting pollutions maps. Only the information from the 2009 campaign was interpolated considering a variography according to the samples distribution of that year. The result of this analysis is the improving in the way that new soil samples had to be taken for the cleaning and restoring process, resulting in the recovering of a total of 10.5 hectares affected directly, where bacteria inoculation processes, which degrade the fragile hydrocarbon ecosystems of the Ecuadorian Amazon region, were held.

Keywords: oil spill, TPH, auto-correlation, variography, bacteria, remediation

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la cartografía digital a través del uso de los sistemas de información geográfica (SIG) posee una gran potencialidad de planificación sobre procesos de remediación de suelo invaluable.

Del mismo modo conforme avanzan los algoritmos de visualización de información resulta cada vez más evidente la necesidad de obtener mapas de derrames de hidrocarburos sobre esta herramienta (Ivanov, 2008); es así que trabajos realizados demuestran que la estadística espacial enfocada hacia la zonificación de mayor concentración de determinado contaminante permite mejorar tareas de campo para la optimización de toma de muestras (Hengl, 2009).

En ese sentido, la auto correlación de puntos de monitoreo para verificación de procesos de remediación ambiental visualizada sobre sistemas de información geográfica permitió determinar la mejor locación de bacterias con capacidad degradadora de hidrocarburos a fin de acelerar y mejorar condiciones iniciales de suelo contaminado en líneas del tiempo (Narváez-Flórez, 2008), evidenciado para el caso del derrame de petróleo del Sistema Oleoducto Trans ecuatoriano (SOTE) PK 101+450 valores de TPH en el año 2008 de 69337 mg/kg disminuidos a valores de 70 mg/kg para el año 2010 (dos años y seis meses después).

En el presente trabajo, se busca demostrar y promover las bondades que desempeña el uso de los SIG como herramienta para el control ambiental de los procesos de remediación de suelos.

A partir de la comparación de tres campañas de muestreo en zonas pantanosas y de orillas de esteros ubicadas sobre terrazas aluviales del Río Quijos de los años 2008, 2009 y 2010, mediante el análisis de los datos de correlación de los valores del parámetro TPH para suelo, conforme a la distancia de distribución sobre cada georreferenciación de muestras en zonas con contaminación de hidrocarburos.

Estos valores obtenidos de los análisis de laboratorio se comparan con el Reglamento Ambiental para Operaciones Hidrocarburíferas del Ecuador (RAOHE), cuyo umbral de registro fue el de ecosistemas sensibles (TPH < 1000 mg/kg se considera bajo la norma establecida), en suelo, verificándose sobre la comparación de la distribución de muestras que el año 2009 obtuvo mayor correlación como base del mapeo para control ambiental de un derrame de hidrocarburos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

La locación del estudio es el punto de control PK 101+450 del trazado del SOTE, ubicado en la cuenca del río Quijos, sector Piedra Fina, Parroquia Gonzalo Díaz de Pineda, del cantón El Chaco, Provincia de Napo (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de derrame en distribución político administrativa del Ecuador

El derrame al que se hace referencia fue ocasionado por un deslizamiento o corrimiento de tierra en el año 2008, el cual afectó una zona de 10.5 hectáreas de pastizales y vegetación herbácea, tal como se detalla en la Figura 2, donde se incorpora la fotointerpretación del reconocimiento de fallas geológicas cercanas al Volcán El Reventador.

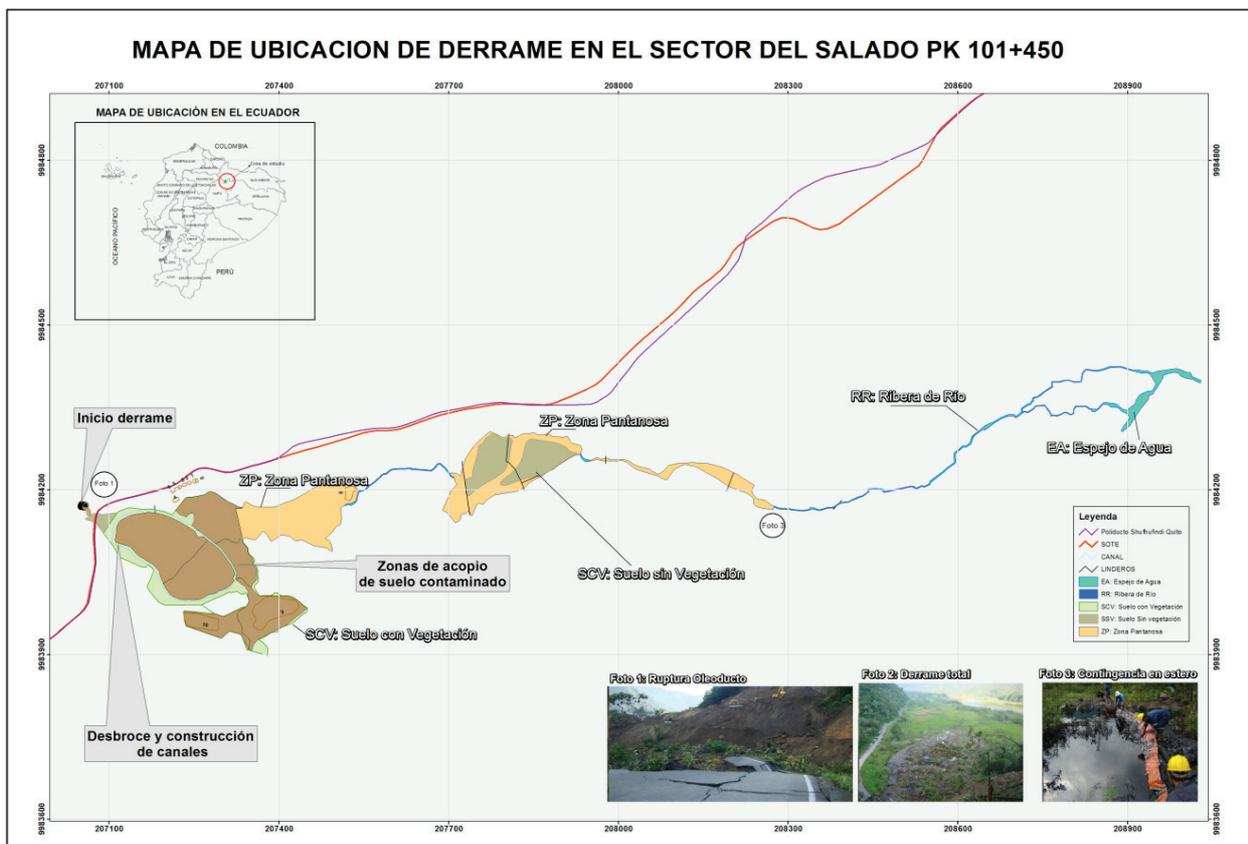


Figura 2. Ubicación referencial de derrame y visualización de imágenes ASTER GDEM en zona de derrame

La consolidación de un proceso de mejoramiento a las condiciones anteriores a un derrame sigue la secuencia de un proyecto de biorremediación ambiental aplicando biotecnologías de mejoramiento del suelo; este proceso de reconfiguración se observa en la Figura 3.

Sobre el proceso de remediación, la base del monitoreo ambiental, llevado a cabo con mapas de monitoreo de la

descontaminación de suelo de diferentes años, permite determinar zonas de mayor atención para el proceso de inoculación de bacterias *in situ*. Los datos con los que se presenta este trabajo son informes de laboratorio de muestras de suelo cuyo parámetro de análisis es TPH registrados para los años 2008, 2009 y 2010; dichos informes fueron ejecutados en laboratorios acreditados en el país, según el método de cromatografía de gases.

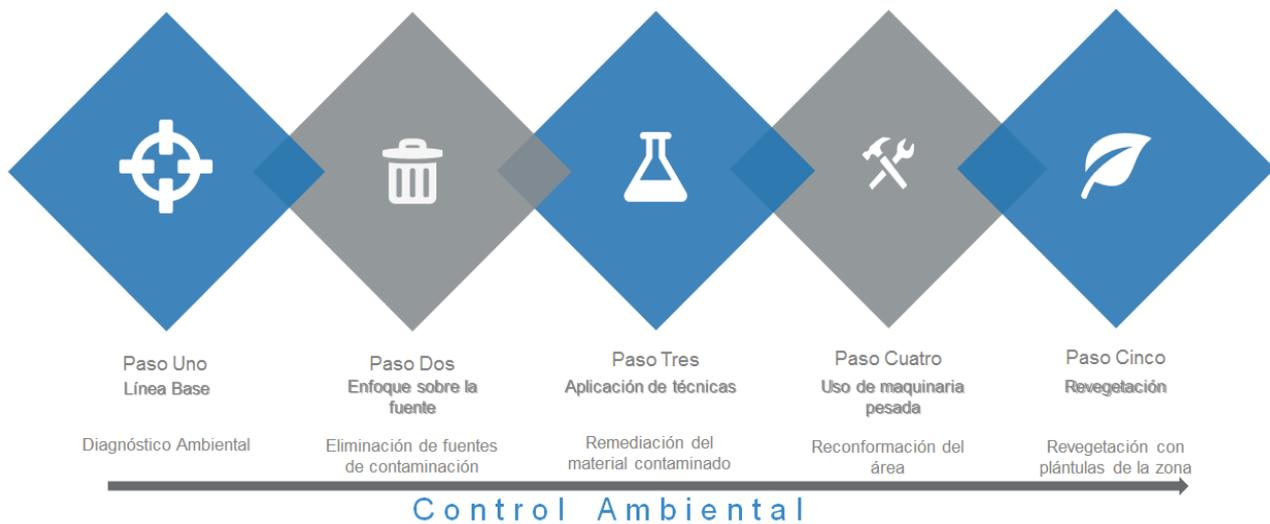


Figura 3. Proceso de remediación de fuentes de contaminación

METODOLOGÍA

La metodología ocupada para el control ambiental desde una perspectiva cartográfica integra de forma mixta diferentes métodos, de acuerdo a la Figura 4.

Topografía y Geodesia: se la realiza con la cuantificación del área medida utilizando la técnica de radiación topográfica con estaciones totales de precisiones angulares menores a 5" (5 segundos) con ajuste GPS diferenciales empatados a la red geodésica del Instituto Geográfico Militar (IGM), del año 2008.

Estructuración cartográfica: adaptando un catálogo de objetos nacional (CON) para el orden y registro cronológico de toda la información cartográfica de acuerdo a las directrices del Consejo Nacional de Geo Informática – CONAGE, (Figura 5).

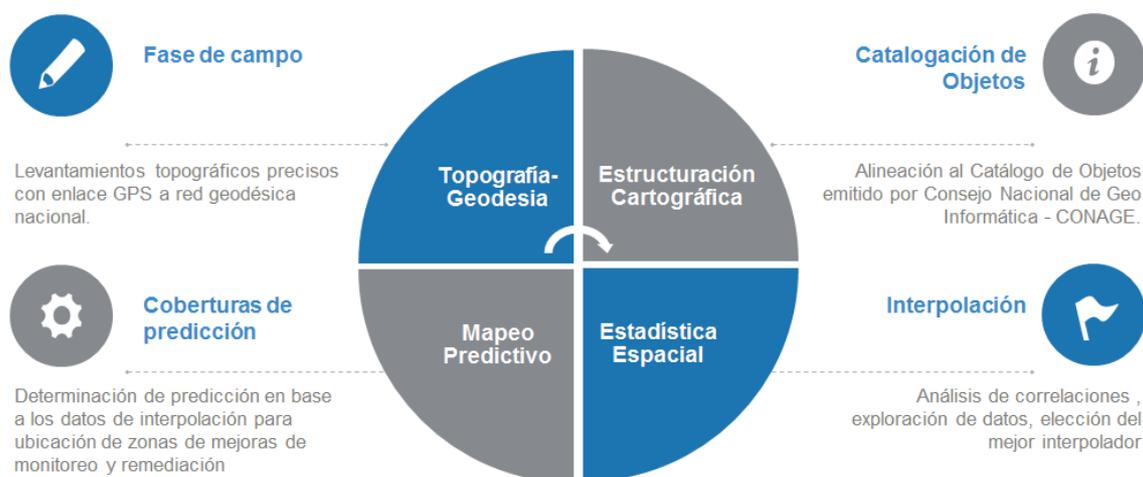


Figura 4. Metodología cartográfica aplicada al control de contaminación



Figura 5. Estructura del catálogo de objetos (CON) – Geodatabase

Estadística espacial: utilizando pruebas estadísticas definiendo hipótesis nulas, para el análisis de patrones donde concurren la aleatoriedad espacial completa (CSR, por sus siglas en inglés) con la exhibición de clustering o dispersión estadísticamente significativa, se utiliza el índice I de Moran y el análisis de punto caliente G_i^* de Getis Ord. (Buzai, 2009).

Previo a la definición del índice I de Moran cuando de punto caliente, es necesario mencionar que el coeficiente de variación mide la heterogeneidad u homogeneidad de los datos de una variable (Anselin, 2003), expresada a partir de la siguiente expresión:

$$CV = \left(\frac{S}{\bar{x}}\right) * 100,$$

donde S es la desviación estándar y se la conoce como media aritmética.

Además, es necesario definir que Skewness (CS) es el coeficiente de asimetría analizado en un histograma, el cual indica la cantidad y la dirección del sesgo, esto es, la desviación desde la simetría horizontal (Mancebo Quintana, 2008). El valor del coeficiente de asimetría puede ser positivo o negativo o incluso no definido. Si el coeficiente de asimetría es 0, los datos son perfectamente simétricos, aunque es bastante improbable para los datos del mundo real. Como regla general:

- Si el coeficiente de asimetría es menor que -1 o mayor que 1, la distribución es extremadamente sesgada.
- Si el coeficiente de asimetría se encuentra entre -1 y -0,5 o entre 0,5 y 1, la distribución es moderadamente sesgada.
- Si el coeficiente de asimetría se encuentra entre -0,5 y 0,5, la distribución es aproximadamente sesgada.

Cuando el valor de CS es mayor a 0, es necesario realizar una transformación tipo logarítmica para considerar a los datos dentro de una distribución normal (Fuenzalida, 2015).

I de Moran es, esencialmente, el coeficiente de correlación de Pearson con una matriz de pesos definida por el usuario que mantiene el rango entre -1 y 1.

La estructura **de I de Morans** es la siguiente:

$$I = (n / S_0) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j / \sum_{i=1}^n z_i^2,$$

donde Z_i es la desviación de un atributo para el parámetro i de su media $(x_i - \bar{x})$, w_{ij} es el peso espacial entre el parámetro i y el j , n es igual al número total de parámetros, y S_0 es el agregado de todos los pesos espaciales:

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$$

Análisis predictivo: utilizando interpoladores estocásticos como lo es Kriging para la determinación de zonas de contaminación con niveles de confianza sobre el 80%.

Kriging estima el valor de la variable "Z" en un punto X_0 no medido con anterioridad, para ello se realiza una suma ponderada de los pesos de la variable por el valor mismo de dicha variable, de tal manera que ecuación básica que representa Kriging es (Fuenzalida, 2015):

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

donde

$Z_{(s_i)}$ = es el valor medido en la ubicación $n.^\circ i$

λ_i = un peso desconocido para el valor medido en la ubicación $n.^\circ i$

S_0 = la ubicación de la predicción

N = el número de valores medidos

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Topografía: la cuantificación de áreas contaminadas con técnicas topográficas y geodésicas se observan en la Tabla 1:

Tabla 1. Obtención de áreas medidas

| ITEM | AREA (m ²) |
|---------------------------|------------------------|
| SCV: Suelo con vegetación | 50787.3497 |
| EA: Espejo de agua | 4278.572 |
| RR: Ribera de río | 478.64 |
| ZP: Zona pantanosa | 38561.15 |
| SSV: Suelo sin vegetación | 11111.91 |
| Área total de medición | 105375.222 |

Estructuración cartográfica: En función de las necesidades de la empresa, se plantean adaptaciones en el CON, definiendo cerca de 16 categorías que contienen 234 objetos. De acuerdo a este enfoque se presentan para la categoría de mitigación y remediación ambiental la propuesta del desglose de objetos cartográficos (Figura 6).

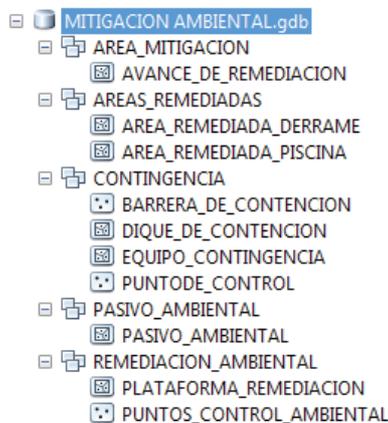


Figura 6. Estructura de geodatabase basado en el CON

Estadística espacial:

Año 2008: se registran 12 muestras, con presencia de discontinuidad de los datos, de acuerdo a lo analizado en las figuras 7, 8 y 9, ya que a partir de este monitoreo se aumentaron 38 muestras distribuidas de forma aleatoria dentro del polígono de zonas pantanosas para el año 2009, con la finalidad de obtener una distribución lo más cercano a la normalidad.

Sobre la base del análisis de su histograma, se puede concluir que no existe una distribución normal, ya que los

resultados del índice de I Morans son negativos. Cabe deducir, por tanto, que la distribución de las muestras es aleatoria respecto del parámetro TPH.

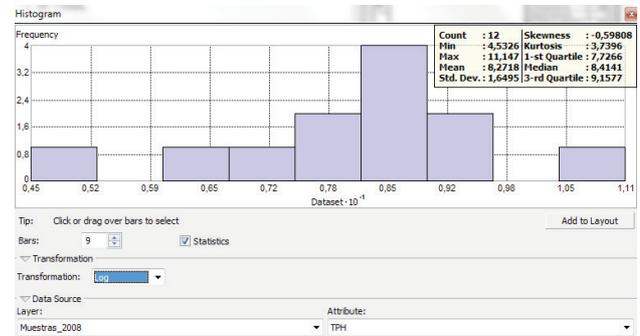


Figura 7. Histograma del parámetro TPH para el año 2008

Respecto al valor del índice I de Morans es -0.097105, para este muestreo es necesario que existan un mínimo de 30 puntos para que sean valores confiables sobre el análisis del índice I de Morans y análisis de Hot Spots (Getis - Ord Gi*).

Por otro lado, para el análisis de la dispersión o agrupación de datos, estos se obtuvieron a partir del promedio del vecino más cercano, el mismo que detalla una dispersión de los datos del año 2008 conforme lo observado en la Figura 8.

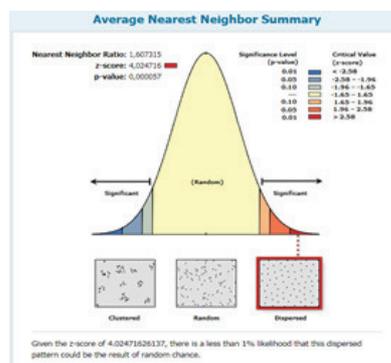
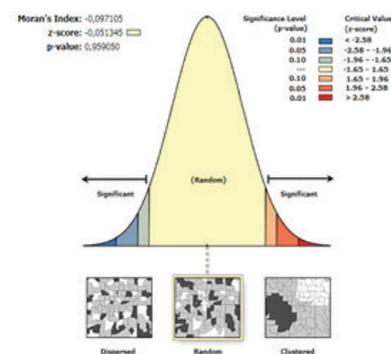


Figura 8. I de Morans y dispersión de datos de TPH para el año 2008

La no significancia hace mención a que no se encuentran valores extremos. Sin embargo, el mapeo de puntos calientes distingue valores anómalos en la sector medio de la zona pantanosa; este valor es 69337 mg/kg de TPH, conforme lo observado en la Figura 9.

Año 2009: se registran 50 muestras con mayor contaminación y principal tratamiento con el objetivo del manejo de remediación ambiental en el área del suelo con vegetación y zona pantanosa, para lo cual se diseña un

muestreo aleatorio simple, ya que existen procesos de intervención de biopilas para mejoramiento de la condición actual del terreno.

Sobre la base del análisis de su histograma se puede concluir que no existe una distribución normal, los datos del índice de I Morans es positivo por lo que la distribución de las muestras es aleatoria respecto del parámetro TPH, de acuerdo a lo observado en las Figuras 10 y 11.

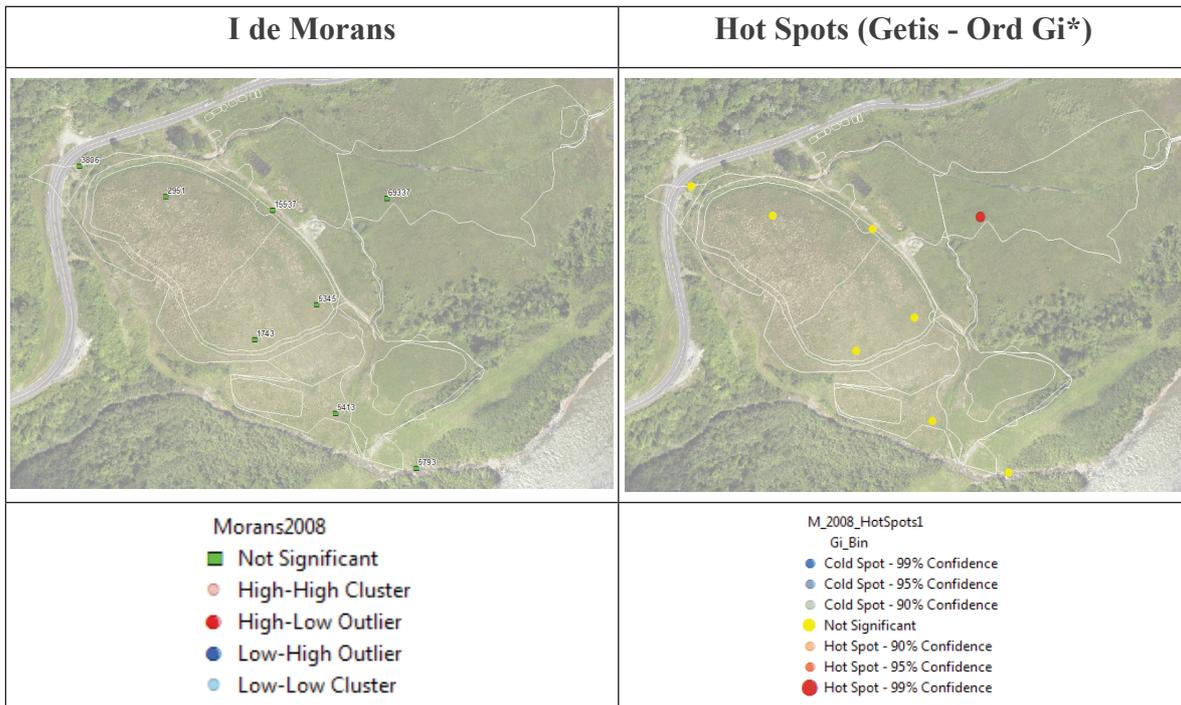


Figura 9. Mapeo de I de Morans y Hot Spots para TPH año 2008

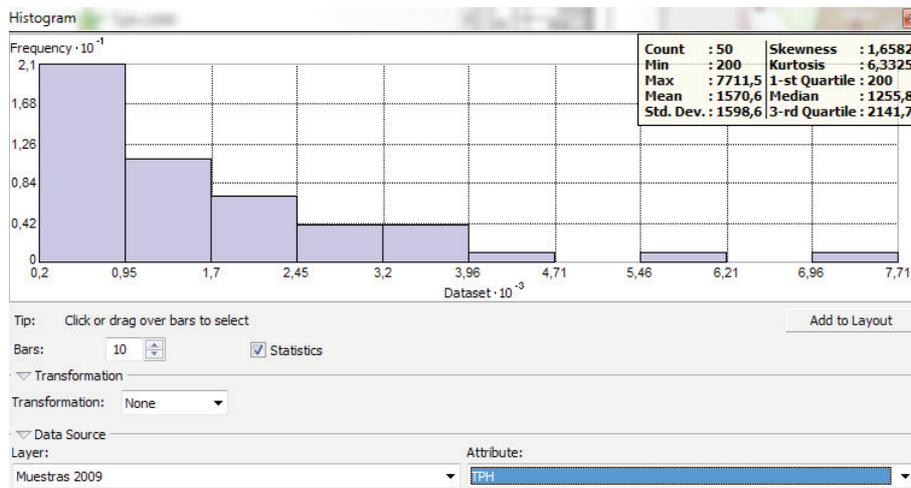


Figura 10. Histograma del parámetro TPH para el año 2009

El valor del índice I de Morans es 0.355427, para el análisis de la dispersión o agrupación de datos se obtuvo información del promedio del vecino más cercano, el mismo que detalla una aleatoriedad de los datos (Figura 11).

Los valores de los puntos calientes se encuentran en la zona inicial del derrame y en la zona central para el año 2009, de acuerdo a Figura 12.

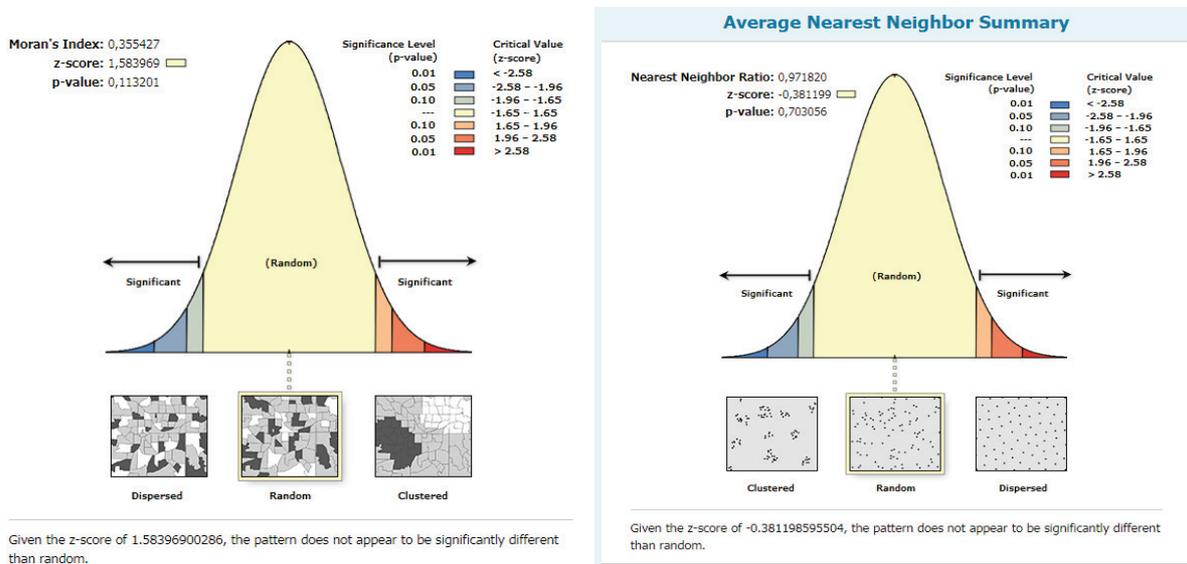


Figura 11. I de Morans y aleatoriedad del parámetro TPH para el año 2009

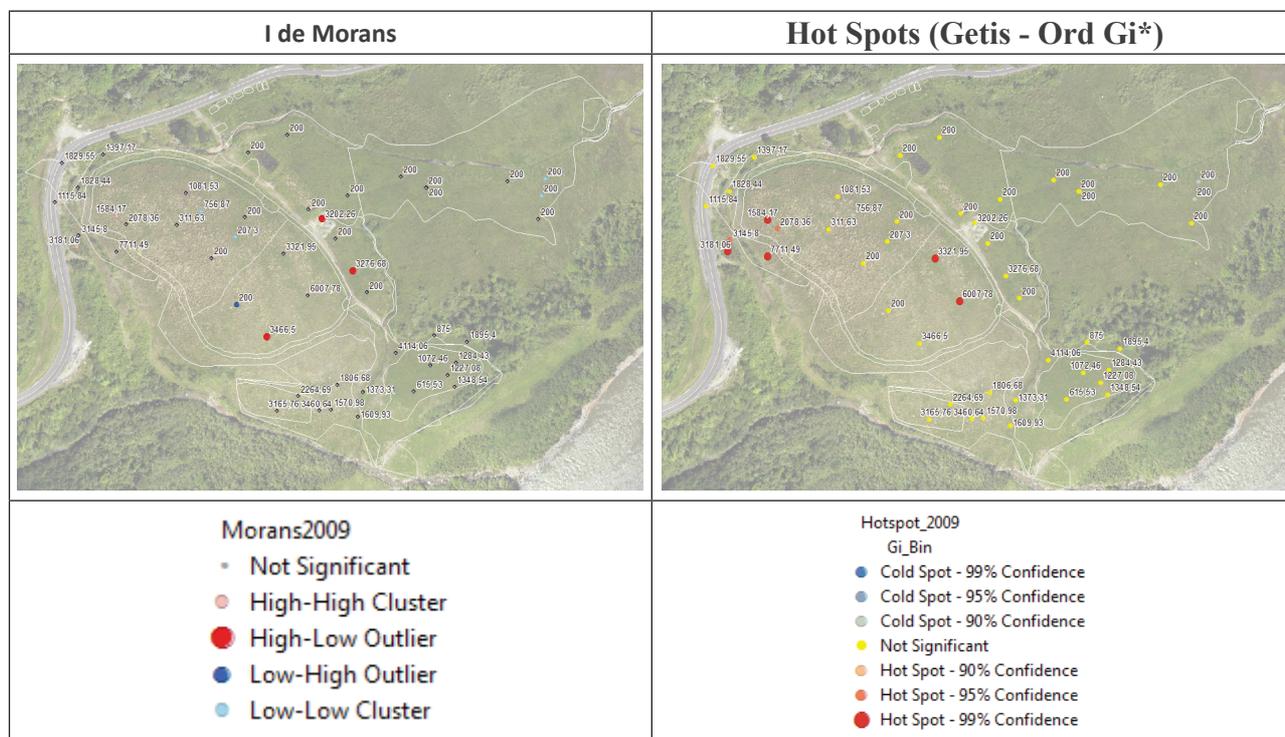


Figura 12. Mapeo de I de Morans y Hot Spots para TPH año 2009

Los colores rojos del índice I de Morans hacen mención a los valores de magnitud alta de TPH cercanos a valores de TPH bajos; con esto se distinguen valores extremos de los valores consolidados o agrupados.

Con lo verificado en torno a la ubicación de puntos extremos de contaminación cuanto de puntos calientes, se logra georreferenciar zonas en las que se deben considerar la inoculación¹ de bacterias (puntos de color verde) en la Figura 13, dichos organismos permiten el mejoramiento y aceleración de lotes de suelo en el proceso de descontaminación (Narváez, 2008), para llegar a parámetros que la normativa ambiental considere como aceptables para ecosistemas sensibles.

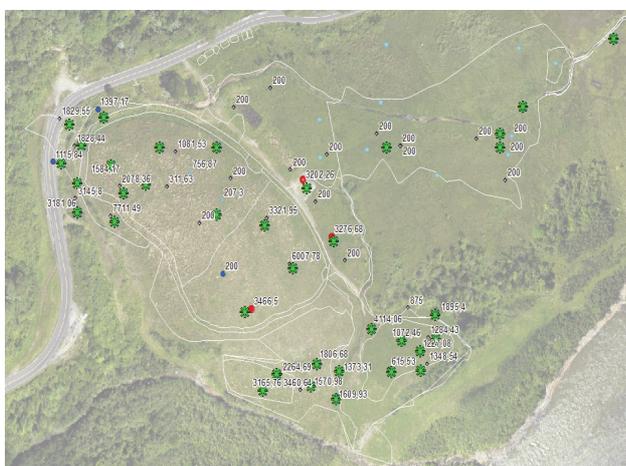


Figura 13. Ubicación de puntos para inoculación de bacterias para el año 2009

Cada bacteria, adaptada y mejorada en laboratorio, bajo condiciones controladas, fue distribuida sobre zonas de alto grado de contaminación por TPH en campo, permitiendo disminuir el valor de concentración de hidrocarburo en zonas de requerimientos puntuales de aceleración y masificación de capacidad de degradación de contaminante (ver análisis y figuras de los datos del año 2010); la lista de cada una de ellas se encuentra en la Tabla 2.

Tabla 2. Listado de bacterias inoculadas en zonas de contaminación

| CODIGO | NOMBRE CEPA |
|--------|-------------------------------|
| 77 | Burkholderia_cepacia |
| 78 | Ochrobactrum_anthropi |
| 79 | Bacillus_cereus_1 |
| 80 | Bacillus_cereus_1 |
| 81 | Bacillus_cereus_1 |
| 82 | Bacillus_mycooides_54% |
| 83 | Shewanella_putrefaciens_group |
| 84 | Bacillus_cereus |
| 85 | Shewanella_putrefaciens_group |
| 86 | Bacillus_cereus |
| 87 | Bacillus_mycooides |
| 88 | Bacillus_cereus |

Año 2010: el mapa de georreferenciación de 38 muestras distingue puntos debajo de la norma de los 1000 mg/kg de TPH para el umbral de comparación para ecosistemas sensibles.

Sobre el análisis de su histograma, se concluye que no existe una distribución normal; los datos del índice de I Morans son claros: es positivo, por lo que la distribución de las muestras es aleatoria respecto del parámetro TPH, datos encontrados en la Figura 14 y 15.



Figura 14. Histograma del parámetro TPH para el año 2010

El valor del índice I de Morans es 0.154963, cuyo índice describe existencia de clusters.

Para el análisis de la dispersión o agrupación de datos se obtuvo información del promedio del vecino más cercano, el mismo que detalla aleatoriedad de los datos.

¹ Inoculación: es la adición de microorganismos a un sitio contaminado, los cuales pueden adicionarse junto con nutrientes en condiciones de laboratorio para ser inyectados en zonas de trabajo para mejoramiento de la descontaminación.

Para este año los datos son clusterizados de acuerdo al índice I de Morans, esto se da ya que se logran obtener valores de TPH bajo 1000 mg/kg en los puntos de muestreo, por lo que es evidente que el proceso de remediación ambiental con inoculación de bacterias, reduce la brecha

de contaminación desde sus primeros monitoreos en la fase de diagnóstico ambiental inicial. El mapeo del muestreo y la búsqueda de puntos calientes se observa en la Figura 16.

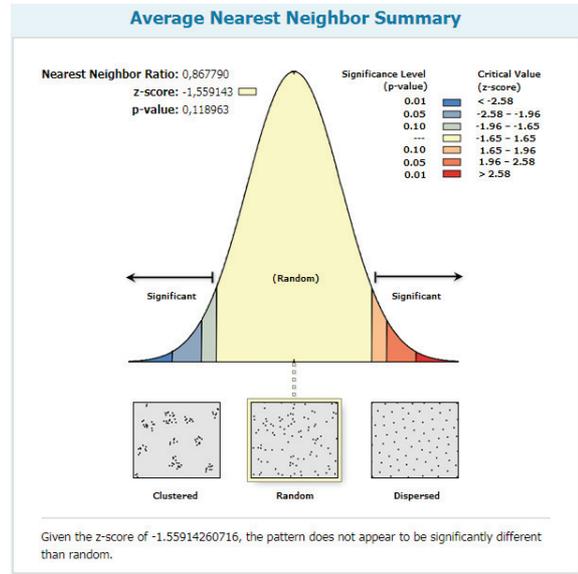
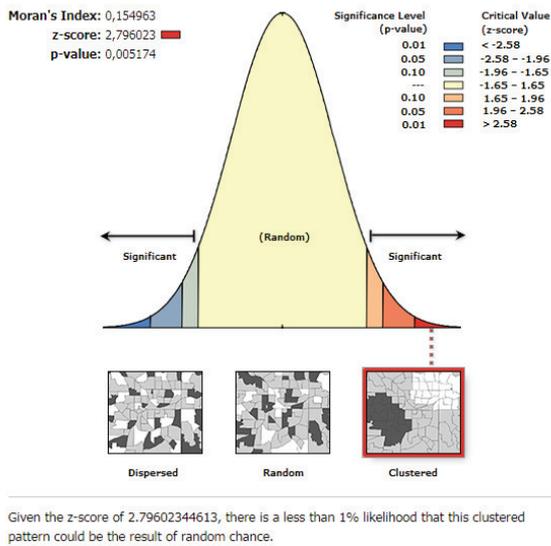


Figura 15. I de Morans y aleatoriedad del parámetro TPH para el año 2010

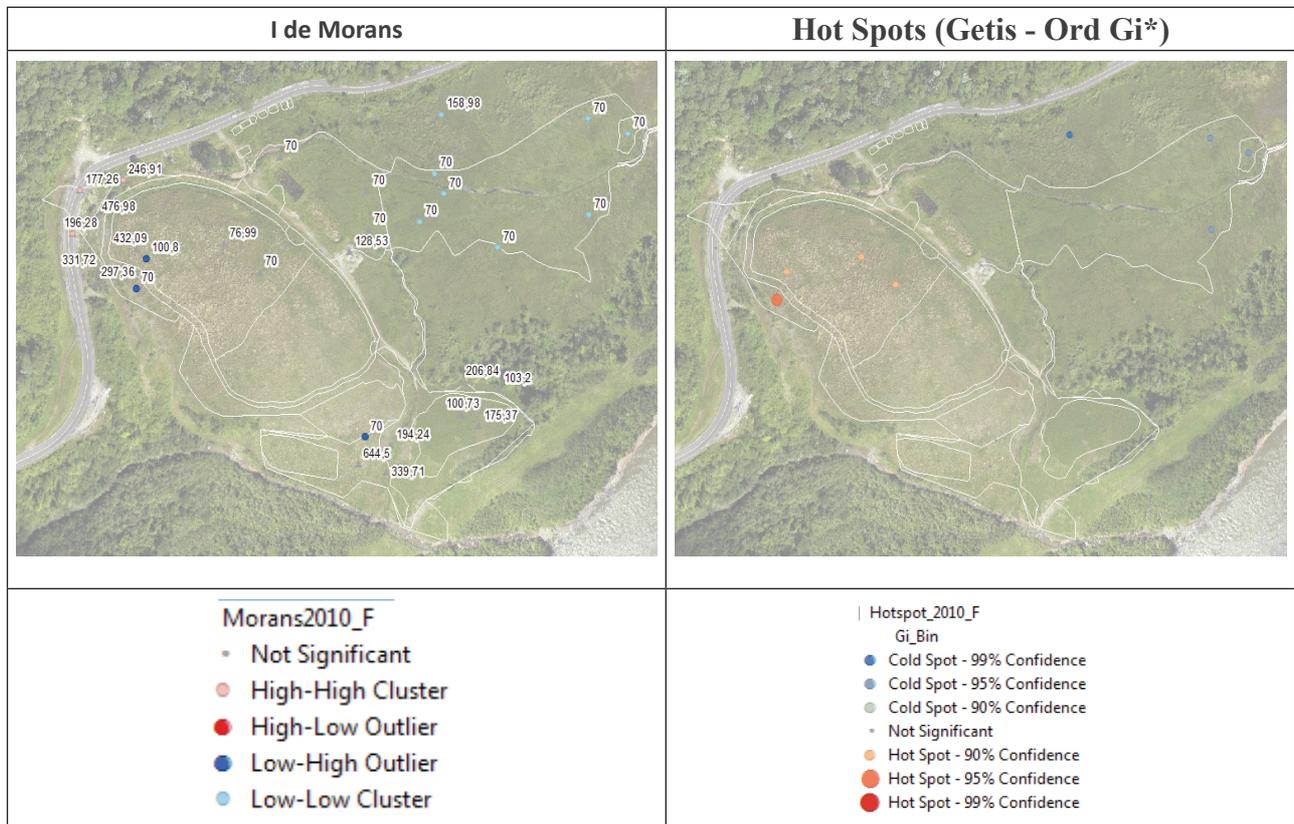


Figura 16. Mapeo de I de Morans y Hot Spots para TPH año 2010

La información obtenida del análisis exploratorio de datos de muestreo dentro de la estadística espacial se describe de forma pormenorizada en la Tabla 3. Los valores de p en el análisis del índice I de Morans

determinan una probabilidad de que el patrón espacial observado se haya creado mediante algún proceso aleatorio (Celemin, 2009), para el año de estudio.

Tabla 3. Resultados de la exploración de patrones de muestreo 2008-2010

| Año | Número de muestras | Interpolación | I Morans | Hot Spots |
|------|--------------------|---|---|------------------------|
| 2008 | 12 | No aplica por el número de puntos | -0,097105 necesita un mínimo de 30 puntos z=-0.0971; p=0.959 | Dispersión de datos |
| 2009 | 50 | Necesita transformación logarítmica para normalidad de datos (Kriging Esférico) | 0.355427 z=1.5839; p=0.1132 | Aleatoriedad |
| 2010 | 38 | Se aplica transformación de los datos encontrando efectos pepita | 0.154963 z=0.1549; p=0.0051 | Existencia de Clusters |

Si el valor de p es muy pequeño significa que es poco probable que el patrón espacial observado sea resultado de procesos aleatorios; para el caso del año 2010 sus datos están agrupados o clusterizados.

Si el $100 < CV < 200$, existe asimetría positiva y los valores de media, mediana y moda no son similares, por lo que se corrobora aplicar una transformación de tipo logarítmica para determinar normalidad en los datos.

Interpolación:

Sobre la base de los análisis de los años 2008 y 2010, se encuentra que no existe normalidad en los datos, siendo un impedimento para predecir locaciones con potencial contaminación en la zona de remediación utilizando Kriging.

De acuerdo a esto, se transforman los datos con una función logarítmica, encontrando los siguientes resultados (Figura 17):

Con la finalidad de optimizar las zonas de remediación, para el año 2009, se normalizan los datos previo proceso de interpolación partiendo de 8 clases o número de intervalos (de acuerdo a la expresión $\sqrt[n]{n}$ donde n es el número total de datos igual a 50), este valor es 7.07, dondese elige el valor superior de 8, encontrándose un valor de media aritmética igual a 1570.6 y de mediana 1255.8 de acuerdo a datos extraídos del histograma.

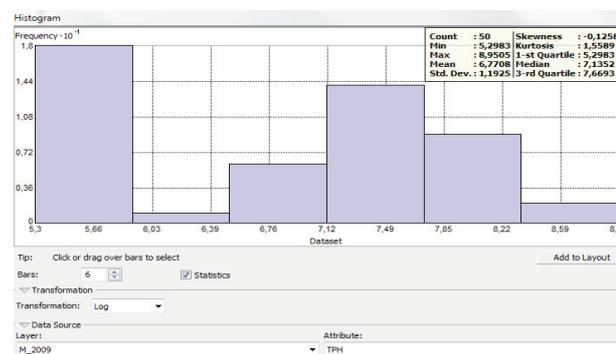


Figura 17. Histograma de datos de muestras de 2009 aplicando transformación logarítmica

El coeficiente de variación para el año 2009 es de CV= 101.78%; este valor mide la representatividad de la media, por lo que se denota la existencia de valores extremos concluyendo que la media no es representativa. El valor de Skewness (CS) o denominado como coeficiente de asimetría es igual a 1.6582 y su Kurtosis= 6.3325.

El valor de media aritmética es de 6.7708, el de mediana es de 7.1352, hay mayor similaridad en datos. El CV es de 17.61%. La media aritmética es representativa entre los datos de TPH.

El valor de CS o skewness es de -0.12584, por tanto si: $0 < |CS| < 0.5$, se acepta la función de distribución de probabilidad como normal.

El análisis de tendencia que poseen los datos se observa en la Figura 18.

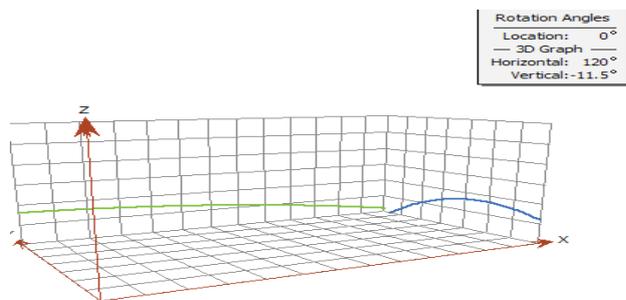


Figura 18. Análisis de influencia de direccionamiento de muestreo de 2009

Esta influencia es más fuerte en direccionamiento oeste – este, concordando con una curva de una sola concavidad, para determinar un orden 2 para la consolidación de remover una tendencia de direccionamiento del fenómeno de contaminación de forma espacial.

Para los datos de entrada en Kriging, se ingresa una transformación logarítmica de segundo orden para encontrar el mapa de predicción de la contaminación por TPH, ajustado al modelo esférico, ya que fue el modelo que presentó mejores resultados para la predicción del contaminante comparado con los modelos circular, exponencial, gaussiano, penta esférico, tetra esférico; esto se encuentra en la Figura 19.

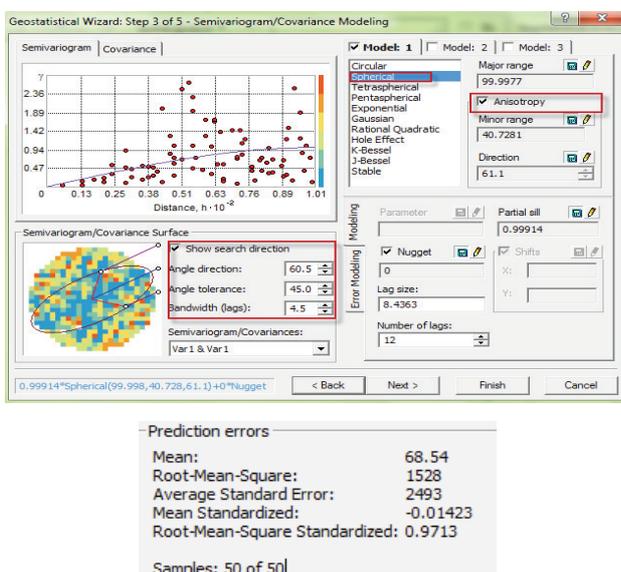


Figura 19. Análisis de variograma e ingreso de datos para interpolación

El resultado del mapa resultante del ingreso de estos parámetros para el modelo geoestadístico se encuentra en la Figura 20:

Para el año 2010, al poseer 38 muestras, se tiene un número de clases igual a 6.16, lo cual equivale a 7. Su valor de media aritmética es igual a 159.36 y su mediana 100.77; su coeficiente de asimetría es 1.9358, su kurtosis es de 6.54. De acuerdo a esto, se concluye que al encontrarse valores de $CS > 1$ se debe aplicar una transformación logarítmica. De acuerdo a esto, se calculó CV encontrando el valor de 83.71%, esto quiere decir que no existen problemas con los valores extremos. Este análisis resume que la función de distribución de los datos no se asemeja a una distribución normal, por lo que se aplica la transformación de los datos con una función logarítmica (Hengl, 2009), como se explica en la Tabla 4.

Tabla 4. Medidas de tendencia central del año 2010 sin transformaciones

| | |
|-------------------|-----------------------|
| Count: 38 | Skewness: 1,9358 |
| Min: 70 | Kurtosis: 6,54 |
| Max: 644,5 | 1-st Quartile: 70 |
| Mean: 159,36 | Median: 100,77 |
| Std. Dev.: 133,41 | 3-rd Quartile: 194,24 |

Los datos del año 2010, aplicando la transformación logarítmica mencionada, arrojan un valor de CV igual a 13.77%; este valor debe ser menor a 100 y lo cumple, siendo la media un valor de 4.8249, la mediana de 4.6128; el coeficiente de asimetría o sesgo (skewness) es igual a 0.8253, la diferencia entre la media y la mediana es menor a 1. El valor de CS es 0.8253.

Ello nos indica que no existe una curva de normalidad, por lo que lo recomendable es generar a los datos una conversión de normalización de raíz cuadrada.

En contraste con estos datos, dando la secuencia lógica de pasos del caso del año 2009, se debe ingresar al modelo de Kriging para encontrar la gráfica de variograma determinando curvatura para orden de remoción de segundo grado, así como de la conversión de los datos con función logarítmica.

Esto difiere de lo mencionado por (Anselin, 2003) ya que la distribución de los datos para este año presentan un efecto pepita puro (Figura 21).

hectáreas se logra en un periodo de 2.6 años (dos años seis meses), descontaminando valores extremos de 69337 mg/kg a 70 mg/kg de TPH gracias a la inoculación de bacterias in situ en zonas de acumulación de sedimentos, pantanos y orillas de esteros, focalizados de acuerdo al análisis de patrones de contaminación en los análisis exploratorios de cada año.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anselin, L., (2003). Exploratory Spatial Data Analysis and GeoDa. Urbana-Champaign, EU.: Center for Spatially Integrated Social Science. Recuperado de: www.csiss.org/events/conferences/2003/anselin_asa.pdf
- Buzai, G., (2009, 30 de abril). Análisis exploratorio de datos espaciales. Revista digital del Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (GESIG). Recuperado de <https://www.gesig-proeg.com.ar>
- Celemín, J., (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación. Revista Universitaria de Geografía. Recuperado de: www.redalyc.org/pdf/3832/383239099001.pdf.
- Fuenzalida, M., (2015). Evaluación de modelos geoestadísticos aplicados a la exposición al contaminante atmosférico PM10 en Chile. Ciencias Espaciales, 8(1), 441-457. <https://doi.org/10.5377/ce.v8i1.2060>
- Hengl, T., (2009). A practical Guide to Geostatistical Mapping. Recuperado de https://spatial-analyst.net/book/system/files/Hengl_2009_GEOSTATE2c1w.pdf
- Ivanov, Y.; Zatyagalova, V., (2008). A GIS approach to mapping oil spills in a marine environment, International Journal of Remote Sensing, Volumen 29 (n.21), 6297-6313. DOI: 10.1080/01431160802175587
- Mancebo Quintana, S.; Ortega Perez, E.; Valentin Criado, A. C.; Martín Ramos, B.; Martín Fernández, L., (2008). Libro SIG: aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental. Recuperado de <http://oa.upm.es/2080/>
- Narvárez-Flórez, S.; Gómez, M.; Martínez, M., (2008). Selección de bacterias con capacidad degradadora de hidrocarburos aisladas a partir de sedimentos del Caribe colombiano. Boletín de Investigaciones Marino Costeras – INVEMAR, Volumen 37 (n.1). Recuperado de https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0122-97612008000100004&script=sci_abstract&tlng=es, New York, 1993.