

**CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA DE UN ÁREA *ONSHORE* SOBRE LA
CUENCA DEL SINÚ: ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE UN ESTUDIO DE
GEOQUÍMICA DE SUPERFICIES**

NUBIA ANDREA VILLOTA SALAZAR

MARTHA VIVIANA ROA CORDERO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE MATEMÁTICAS
ESPECIALIZACIÓN EN ESTADÍSTICA
BUCARAMANGA
2010**

**CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA DE UN ÁREA *ONSHORE* SOBRE LA
CUENCA DEL SINÚ: ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE UN ESTUDIO DE
GEOQUÍMICA DE SUPERFICIES**

NUBIA ANDREA VILLOTA SALAZAR

MARTHA VIVIANA ROA CORDERO

Monografía para optar por el título de Especialistas en Estadística

Director

DIANA MARCELA PÉREZ VALENCIA
Estadística MSc. Estadística

Codirector

GERMÁN MORENO ARENAS
Matemático PhD. Estadística

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE MATEMÁTICAS
ESPECIALIZACIÓN EN ESTADÍSTICA
BUCARAMANGA
2010**

*A mis padres y a mi hermano, por su amor y apoyo incondicional.
A Dalila por su compañía, afecto y lealtad.
Gracias por ayudarme a soportar la levedad del mundo, por darle verdadero
sentido a mi vida.*

*Nubia Andrea Villota Salazar
29 de Octubre de 2010*

A mamá, por espantar el miedo, a su guerra implacable contra los días grises.

*Martha Viviana Roa Cordero
29 de Octubre de 2010*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres, quienes con muchos sacrificios y esfuerzos me formaron y educaron, a ellos les debo todos mis logros, mis deseos de superación, mi amor por la ciencia. Agradezco a mi hermano por su constante apoyo desde nuestros primeros días y porque desde la distancia me ha acompañado en éste difícil proceso. A Martha Viviana, porque su leal amistad y respaldo permitieron que todo nuestro trabajo pudiese llegar a feliz término. Finalmente quiero agradecer al Laboratorio de Biotecnología del Instituto Colombiano del Petróleo – ECOPETROL S.A, no solo por permitirme utilizar sus datos para la realización del presente documento, si no por todos los conocimientos adquiridos, las experiencias vividas, por las maravillosas personas que he conocido y con las que he compartido mi cotidianidad, en todos estos años de permanencia laboral.

Nubia Andrea Villota Salazar

Agradezco profundamente a todos y cada uno de mis familiares por mostrarme la ruta en contravía del mundo, a mamá, por enseñarme a creer, a resistir, a quebrantar el silencio, a Oscar, por ser el ancla que detiene el naufragio, al papá José por enseñarme a leer y a escribir, a la mamá Alicia por pintar en mi rostro el color de la esperanza, a Lizeth Juliana, Carlos Fernando, Manfred, Johann, Oscar Fernando y Nathalie, por ser la extensión de mis sueños. Agradezco muy especialmente a Andreita, por soportar a mi lado la infinita nimiedad del ser, a su constancia e inteligencia, a su terca manera de mostrarme este camino de números que hoy apenas comienza. Finalmente quiero agradecer al Laboratorio de Biotecnología del Instituto Colombiano del Petróleo ECOPETROL S.A, por los días viejos y los retos nuevos, por facilitar la información que se analiza en el presente documento y por ser el escenario de un capítulo que siempre llevaré grabado en la memoria.

Martha Viviana Roa Cordero

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	19
OBJETIVOS	20
OBJETIVO GENERAL	20
OBJETIVOS ESPECIFICOS	20
1. MARCO REFERENCIAL	21
2. MATERIALES Y MÉTODOS	26
3. RESULTADOS	29
3.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO	29
3.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL	34
3.3 PREDICCIÓN	47
4. CONCLUSIONES	52
5. BIBLIOGRAFIA	55

LISTA DE FIGURAS

	pág.
FIGURA 1. ESQUEMA CLÁSICO DE UN VARIOGRAMA	24
FIGURA 2. GRILLA DE MUESTREO, CUENCA DEL SINU, TUBARÁ	27
FIGURA 3. DIAGRAMA BOX-PLOT VARIABLES MICROBIOLÓGICAS	29
FIGURA 4. GRÁFICOS EXPLORATORIOS PARA LAS VARIABLES BUTANOL Y HEXANO	30
FIGURA 5. GRÁFICOS EXPLORATORIOS PARA LA VARIABLES METANOL Y METANO	31
FIGURA 6. GRÁFICO POR CUARTILES DE LOS RECUENTOS DE BACTERIAS OXIDADORAS DE HIDROCARBUROS C2-C6 Y METANO	32
FIGURA 7. VARIOGRAMAS EMPÍRICOS OMNIDIRECCIONALES VARIABLE BUTANOL	34
FIGURA 8. VARIOGRAMAS DIRECCIONALES ESTIMADOR CLÁSICO	36
FIGURA 9 ESTIMACIÓN DEL MODELO POR EL MÉTODO “BY EYE”, VARIABLES BUTANOL Y HEXANO	38
FIGURA 10. ESTIMACIÓN DEL MODELO POR EL MÉTODO “BY EYE”, VARIABLES METANOL Y METANO	39
FIGURA 11. VALIDACIÓN DEL MODELO PARA LA VARIABLE BUTANOL, MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS ORDINARIOS, MODELO MATERN, NUGGET FIJO A CERO	40
FIGURA 12. VALIDACIÓN DEL MODELO PARA LA VARIABLE HEXANO, MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS ORDINARIOS, MODELO MATERN, NUGGET FIJO A CERO	41
FIGURA 13. VALIDACIÓN DEL MODELO PARA LA VARIABLE METANOL, MÉTODO DE MÁXIMA VEROSIMILITUD, MODELO EXPONENCIAL, NUGGET FIJO A CERO	43

FIGURA 14. VALIDACIÓN DEL MODELO PARA LA VARIABLE METANO, MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS ORDINARIOS, MODELO CIRCULAR, NUGGET FIJO A CERO	44
FIGURA 15. RESULTADOS KRIGING ORDINARIO VARIABLE BUTANOL	48
FIGURA 16. RESULTADOS KRIGING ORDINARIO VARIABLE HEXANO	49
FIGURA 17. RESULTADOS KRIGING ORDINARIO VARIABLE METANOL	50
FIGURA 18. RESULTADOS KRIGING ORDINARIO VARIABLE METANO	50

LISTA DE TABLAS

	pág.
TABLA 1. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DATOS TRANSFORMADOS (BOX Y COX $\lambda = 2$)	31
TABLA 2. CORRELACIONES VARIABLES MICROBIOLÓGICAS	34
TABLA 3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS POR EL MÉTODO "BY EYE"	40
TABLA 4. PARÁMETROS ESTIMADOS POR LOS MODELOS SELECCIONADOS	46

RESUMEN

TITULO

CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA DE UN ÁREA ONSHORE SOBRE LA CUENCA DEL SINÚ: ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE UN ESTUDIO DE GEOQUÍMICA DE SUPERFICIES*

AUTORES

Nubia Andrea Villota Salazar
Martha Viviana Roa Cordero**

PALABRAS CLAVE

Microbiología de superficie, área prospecto, geoestadística, *Kriging*, bacterias oxidadoras de hidrocarburos, bacterias metanotróficas, concentraciones anómalas.

DESCRIPCIÓN

La microbiología de superficie es una técnica geoquímica indirecta de exploración de petróleo y gas, que permite evaluar la presencia de microafloramientos en superficies prospecto con base en la cuantificación de poblaciones bacterianas oxidadoras de hidrocarburos C2-C8 y bacterias metanotróficas (C1), mediante la detección de concentraciones anómalas. Para el cultivo de las bacterias de interés fueron empleadas dos técnicas microbiológicas de cultivo: alcoholes y compuestos hidrocarbonados, como fuentes de carbono. Se desarrolló un análisis geoestadístico de las variables microbiológicas medidas en un área sospechosa de la cuenca del Sinú, departamento de Atlántico, (previa verificación de los supuestos de estacionariedad y anisotropía), por medio de un análisis estructural de la información georreferenciada y posterior interpolación de datos para predicción espacial por la técnica de *Kriging* ordinario. Se describe la distribución de las variables en el área de estudio de acuerdo al modelo geoestadístico que demostró el mejor ajuste, luego de emplear las técnicas "by eye", máxima verosimilitud (clásica "ML" y restringida "REML") y mínimos cuadrados (ponderados "WLS" y ordinarios "OLS"), asumiendo un nugget fijo a cero, un nugget sugerido y un nugget estimado por el programa (geoR), en todas sus posibles combinaciones. Se construyen los gráficos de superficie que representan el área de estudio y posibilitan la ubicación geográfica de las áreas que presentan concentraciones bacterianas anómalas, y se clasificó el área de estudio de acuerdo a las concentraciones bacterianas registradas, detectando comportamientos anómalos posiblemente relacionados a líneas sísmicas previamente identificadas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Matemáticas. Directores: Diana Marcela Pérez Valencia – Germán Moreno Arenas.

ABSTRACT

TITLE

MICROBIOLOGICAL CHARACTERIZATION OF AN ONSHORE AREA OVER THE CUENCA OF SINU: GEOSTATISTICAL ANALYSIS OF A SURFACE GEOCHEMICAL STUDY*

AUTHORS

Nubia Andrea Villota Salazar
Martha Viviana Roa Cordero**

KEY WORDS

Microbial surface technique, leaflet area, geostatistics, kriging, hydrocarbon-oxidizing bacteria, methanotrophic bacteria, anomalous concentrations.

DESCRIPTION

The microbial surface technique is an indirect geochemical technique of oil and gas exploration which assesses the presence of microseeps in leaflet surfaces based on the quantification of C2-C8 hydrocarbon-oxidizing bacterial populations and methanotrophic bacteria (C1) by detecting abnormal concentrations. For the cultivation of bacteria of interest, two microbiological culture techniques were used: alcohols and hydrocarbon compounds as carbon sources. A geostatistical analysis of the microbiological variables measured in a suspicious area over the Cuenca of Sinu, Atlántico department, (upon verification of the assumptions of stationarity and anisotropy), was developed through structural analysis and subsequent geo-referenced data interpolation for spatial prediction through the ordinary Kriging technique. It describes the distribution of the variables in the study area according to the geostatistical model that fitted the best, after use, "by eye", maximum likelihood (classical "ML" and restricted "REML) , and least squares (weighted "WLS" and ordinary "OLS") techniques, assuming a fixed zero nugget, a nugget suggested and nugget estimated by the program, in all possible combinations. Thus, the surface charts which represent the study area are designed, allowing the geographical location of areas with abnormal bacterial concentrations and classified the study area according to the recorded bacterial concentrations, detecting anomalous behavior possibly related to seismic lines previously identified.

* Work Degree

** Faculty of Science. Mathematics Department. Directors: Diana Marcela Pérez Valencia - Germán Moreno Arenas.

GLOSARIO

Anisotropía: Fenómeno de correlación de los datos de una variable en el que la correlación depende de la dirección en la que éstos sean medidos.

Bacteria: Microorganismo procariota unicelular caracterizado por la ausencia de membrana nuclear claramente definida, la cual es una particularidad de las células de organismos superiores.

Estacionariedad: Independencia de la esperanza de una variable, la covarianza o la correlación, con respecto al sentido en que se determinan. En geoestadística hace referencia a la propiedad de una variable regionalizada cuya función de distribución conjunta es invariable con respecto a cualquier traslación del vector h .

Estacionariedad estricta: hace referencia a una distribución de dimensiones finitas que permanece invariante para cualquier traslación arbitraria de los puntos por medio de un vector h . Físicamente esto significa que el fenómeno es homogéneo en el espacio. En términos espaciales, esto implica isotropía.

Equiparar: Comparar, relacionar una cosa con otra, considerándolas iguales o equivalentes.

Geoestadística: Rama de la estadística que trata fenómenos espaciales. Su interés fundamental es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos. Aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de procesos en el espacio.

Isotropía: Supuesto de la teoría geoestadística en el que las funciones de semivarianza muestral en varias direcciones tienen el mismo comportamiento. Si

la correlación entre los datos no depende de la dirección en la que ésta se calcule se dice que el fenómeno es isotrópico.

Kriging: Conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción. Recibe su nombre en honor al geólogo sudafricano D. G. Krige por sus trabajos pioneros en interpolación espacial.

Medio de cultivo: Formulación de sustancias, en forma líquida, semisólida o sólida, la cual contiene constituyentes naturales o sintéticos destinados a dar soporte a la multiplicación (con o sin inhibición de ciertos microorganismos), identificación o preservación de viabilidad de microorganismos.

Metabolismo: Conjunto de reacciones químicas que efectúan constantemente las células de los seres vivos con el fin de sintetizar sustancias complejas a partir de otras más simples, o degradar aquellas para obtener estas.

Metabolito: Sustancia química producida por cualquiera de las múltiples y complejos procesos físicos o químicos involucrados en el mantenimiento de la vida.

Microafloramientos: Altas concentraciones de hidrocarburos ligeros analíticamente detectables en suelos, sedimentos o aguas. Estos afloramientos no son visibles y solo pueden ser detectados por la determinación de cambios en las propiedades de los suelos o sedimentos.

Microorganismo aerobio: Microorganismo que requiere oxígeno para permanecer metabólicamente activo.

Modelo: Esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento.

Modelo geoestadístico zmatern: Modelo empírico de variograma que se caracteriza por su flexibilidad y porque puede representar varios comportamientos a distancias cortas.

MOST: Microbial Oil Survey Techique (Técnica para la búsqueda microbiana de petróleo).

MPOG: Microbial Prospection of Oil and Gas (Prospección microbiana de petróleo y gas).

Offshore: Fuera del continente, costa afuera.

Onshore: En el continente, costa adentro.

Oxidación: Reacción química donde un metal o un no metal cede electrones, y por tanto aumenta su estado de oxidación. La reacción química opuesta a la oxidación se conoce como reducción, es decir cuando una especie química acepta electrones.

Variable regionalizada: Variable medida en el espacio de forma que presente una estructura de correlación

INTRODUCCIÓN

El análisis de suelos y sedimentos superficiales es uno de los métodos geoquímicos más antiguos empleados en la búsqueda de hidrocarburos. La exploración geoquímica del petróleo es la búsqueda de ocurrencias de compuestos asociados al petróleo cerca a la superficie, y sus productos de alteración, los cuales sirven como indicadores para la localización de acumulaciones de petróleo y gas aun no descubiertas (Schumacher, et al., 2003; Wagner, et al., 2002). Los compuestos hidrocarbonados ligeros pueden residir en los suelos o sedimentos poco profundos en diferentes formas, tales como, gas libre en la porosidad, gas intersticial ocluido entre poros y granos y gas adsorbido dentro de las partículas sedimentarias.

La presencia de hidrocarburos ligeros está influenciada por las características mineralógicas de la matriz, la humedad y la actividad microbiana, entre otros. Los microorganismos que se encuentran asociados a estas acumulaciones tienen un rol muy importante en la oxidación de los gases que se encuentran migrando desde los reservorios de crudo, lo que trae como consecuencia una disminución en la concentración de hidrocarburos ligeros. El anterior es un fenómeno que ha sido reportado en varios estudios de áreas prospecto; sin embargo, se espera que algunas condiciones ambientales y nutricionales puedan llegar a influenciar el crecimiento de los organismos de interés y por lo tanto su cantidad, en lugares donde sea posible encontrar altas concentraciones de hidrocarburos (Wagner, et al. 2002).

La microbiología de superficies, a diferencia de las metodologías convencionales que analizan y cuantifican por diferentes técnicas cada una de las formas en que pueden estar presentes compuestos relacionados con el petróleo cerca de la superficie, es un método indirecto de exploración geoquímica del petróleo que

utilizan técnicas microbiológicas para determinar la presencia de hidrocarburos en el subsuelo, a través de la detección de concentraciones anómalas de bacterias específicas, que indiquen la presencia de microfugas o escapes de compuestos ligeros provenientes de posibles reservorios, en áreas sospechosas (Malizia, et al. 2009; Wagner, et al. 2002). Para su cultivo, la literatura reporta básicamente dos técnicas que emplean hidrocarburos (en forma gaseosa) y alcoholes como fuentes de carbono, ambas metodologías han sido empleadas en estudios anteriores aunque no de forma conjunta (Hitzman, 1956; Wagner, et al., 2002).

La caracterización del área prospecto de la cuenca del Sinú, realizada en el presente documento, pretende predecir los valores que adoptan las variables microbiológicas en sitios no muestreados, teniendo en cuenta que la migración de hidrocarburos es considerada un fenómeno de correlación espacial, de modo tal que se pueda construir una superficie que permita conocer la distribución espacial de las poblaciones evaluadas y establecer su utilidad como indicador de acumulaciones de hidrocarburos en el subsuelo. La geoestadística por su parte, se constituye en la pieza fundamental de éste documento, dado que los datos trabajados corresponden a variables aleatorias regionalizadas o variables que pueden tomar ciertos valores de acuerdo a una determinada distribución de probabilidad y pueden acoplarse a Sistemas de Información Geográfica que permitan visualizar el fenómeno de interés.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

A pesar de que las técnicas geomicrobiológicas para la caracterización de superficies en la búsqueda de petróleo y gas son antiguas y bien estudiadas, su implementación en la industria del petróleo a nivel mundial, en general, no ha sido sistemática.

La prospección microbiológica de superficies, sin embargo resulta una técnica sencilla, confiable y económica que puede aportar evidencia contundente a cerca de la dinámica de poblaciones bacterianas en asociación con la presencia de microafloramientos y por ende, facilitar la toma de decisiones sobre posibles explotaciones de áreas sospechosas, en combinación con los resultados de otros análisis geoquímicos y sísmicos pertinentes.

El propósito fundamental del presente documento consiste en la aplicación de técnicas geoestadísticas para el análisis de información georreferenciada, obtenida por el Instituto Colombiano del Petróleo (ECOPETROL-ICP) en un área *onshore* sobre la cuenca del Sinú. Se pretende lograr la respectiva caracterización microbiológica de la zona prospecto, por medio de la descripción de la distribución de las variables medidas en la superficie y la aplicación de técnicas de interpolación para predecir el comportamiento de las variables en los puntos no muestreados.

El presente ejercicio académico pretende además, sentar un precedente en el análisis de información espacial en Colombia, ya que son escasas las publicaciones conocidas al respecto y poco el dominio de las técnicas geoestadísticas aplicadas a este tipo de fenómenos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar microbiológicamente un área prospecto *onshore* sobre la Cuenca del Sinú, empleando técnicas geoestadísticas.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Establecer los modelos estadísticos que describen el comportamiento de las variables de interés sobre el área de estudio.
- Construir una superficie que represente la distribución de las variables evaluadas en el área prospecto, a partir de técnicas de interpolación.
- Determinar estadísticamente las zonas geográficas que presentan anomalías microbiológicas o concentraciones elevadas de bacterias indicadoras de posibles acumulaciones de hidrocarburos en el subsuelo.

1. MARCO REFERENCIAL

La prospección microbiológica de superficies es una técnica antigua que permite explorar la presencia de petróleo y gas a través de metodologías microbiológicas en áreas prospecto, basado en el principio de migración vertical de hidrocarburos a la superficie. Microbiológicamente, este fenómeno puede detectarse a través de la aplicación de técnicas indirectas de recuento de poblaciones bacterianas especializadas, capaces de oxidar dichos compuestos para utilizarlos como fuentes de carbono.

Las poblaciones bacterianas de interés pueden clasificarse entonces, de acuerdo a la capacidad de oxidar los compuestos hidrocarbonados específicos que se encuentran disponibles debido al efecto de migración superficial. De este modo pueden identificarse dos grandes grupos bacterianos, a saber: bacterias oxidadoras de metano y bacterias oxidadoras de C2 a C8.

Las bacterias metanotróficas o metanotróficas por su parte, constituyen un subgrupo fisiológico aerobio conocido como bacterias metilotróficas, que se caracterizan por su incapacidad para degradar compuestos que contengan uniones carbono – carbono y que gracias a las particularidades de su maquinaria enzimática, pueden utilizar entre otros compuestos monocarbonados, el metanol como fuente adicional de carbono y energía (Hanson, 1996).

El metabolismo de compuestos hidrocarbonados más complejos, llevado a cabo por bacterias oxidadoras de C2 a C8, implica la participación de una variedad de rutas enzimáticas que será dependiente de las habilidades metabólicas de cada género en particular y que puede ponerse en evidencia a escala de laboratorio, por suministro de fuentes de carbono y energía específicas para cada grupo de interés.

Existen dos metodologías para evaluar la presencia de poblaciones metanotrofas y bacterias oxidadoras de C2 a C8 en el laboratorio: método de cultivo en placa para microorganismos que crecen en presencia de alcoholes (MOST) (Hitzman, 1956; Kappa, 1997) y método de cultivo en placa para microorganismos que crecen en presencia de hidrocarburos (MPOG). La variación fundamental de estas dos técnicas consiste en el suministro de un alcohol como única fuente de carbono, para evidenciar el metabolismo intermediario de la oxidación de los gases de los hidrocarburos livianos, o en proporcionar el hidrocarburo directamente para evaluar la presencia de oxigenasas, enzimas indispensables para el catabolismo inicial de los compuestos de interés, respectivamente.

Aunque de forma general se espera que la cuantificación de estos microorganismos en el laboratorio permita determinar la presencia de posibles reservorios de petróleo y gas, por medio de la identificación de los centros donde se concentran las mayores poblaciones de interés (concentraciones anómalas), el crecimiento de las bacterias puede estar considerablemente influenciado por condiciones ambientales, geológicas y mineralógicas, que entre otras, pueden dificultar la interpretación de los resultados (Kappa, 1997).

El interés principal en el análisis estadístico de información proveniente de estudios de este tipo de fenómenos consiste básicamente en estimar los valores que adoptan las variables en lugares no muestreados para caracterizar microbiológicamente áreas prospecto y aportar evidencia adicional a los análisis geoquímicos y sismológicos, con el fin de contribuir a la toma de decisiones sobre la utilidad de un campo determinado para la explotación de yacimientos de petróleo y gas.

La geoestadística por su parte, se constituye en una herramienta útil para el desarrollo de análisis de variables aleatorias medidas en diferentes sitios de una región con características de continuidad, lo que permite la ejecución de

mediciones en puntos espaciales fijos de acuerdo a técnicas de muestreo probabilístico (patrones espaciales) y su posterior interpolación para el desarrollo de las predicciones pertinentes.

Cuando el análisis geoestadístico obedece a propósitos de predicción como el que se presenta en este documento, se direcciona el análisis en dos etapas claramente definidas: análisis estructural de la información georreferenciada para describir la correlación entre los puntos muestreados y una segunda fase de predicción espacial por medio de la técnica de Kriging.

El análisis estructural o espacial de los datos está compuesto por el cálculo del semivariograma experimental y su posterior ajuste a un modelo teórico conocido. El cálculo del variograma permite la determinación de las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado, es decir, tener conocimiento de cómo la variable cambia de una localización a otra, o según la distancia.

El variograma es un estadístico descriptivo cuantitativo que puede ser representado gráficamente para caracterizar la continuidad espacial del set de datos. El variograma modela como dos valores en el espacio se ponen en correlación, en la Figura 6 se observa el esquema general de un variograma. El umbral o sill es denotado como la varianza de la muestra, el rango es la distancia a la cual las muestras están correlacionadas espacialmente y el nugget indica la discontinuidad del semivariograma para distancias que sean menores que la menor distancia que se da entre los puntos muestrales (*Giraldo, 2004*).

predictor sea igual a la varianza de la variable, garantizando de este modo, varianza mínima de predicción.

La validación de las predicciones hechas por la técnica de Kriging se logra por métodos de validación cruzada aplicados previamente a los modelos seleccionados durante el análisis estructural de la información, que permiten evaluar la bondad de ajuste del modelo de semivariograma elegido con respecto a los datos muestrales.

La validación cruzada consiste en excluir la observación de uno de los n puntos muestrales y con los $n-1$ valores restantes y el modelo de semivariograma escogido, predecir vía kriging el valor de la variable en estudio en la ubicación del punto que se excluyó. Se piensa que si el modelo de semivarianza elegido describe bien la estructura de autocorrelación espacial, entonces la diferencia entre el valor observado y el valor predicho debe ser pequeña. Este procedimiento se realiza en forma secuencial con cada uno de los puntos muestrales y así se obtiene un conjunto de n “errores de predicción”. La forma descriptiva de la validación cruzada consiste en la construcción de un gráfico de dispersión de los valores observados contra los valores predichos. En la medida en que la nube de puntos se ajuste más a una línea recta que pase por el origen, mejor será el modelo de semivariograma utilizado para realizar el kriging (Giraldo, 2004; Díaz, 2002).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En Agosto de 2008 fueron recolectadas 489 muestras de suelo para análisis gasométrico y microbiológico, en una región prospecto ubicada sobre la Cuenca del Sinú, Departamento de Atlántico.

El muestreo se llevó a cabo siguiendo una grilla definida por investigadores del Instituto Colombiano del Petróleo, que tuvo en cuenta las líneas sísmicas presentes en la zona, con espaciamiento entre muestras y líneas de muestreo de 550 m. Las muestras destinadas para análisis microbiológico fueron recolectadas a una profundidad entre 30 y 60 cm en bolsas de papel kraft empleando una espátula estéril. Posteriormente fueron depositadas en bolsas plásticas de sello hermético y conservadas con hielo a una temperatura inferior a los 10 °C, hasta que fue garantizada la continuidad de la cadena de frío en el Laboratorio. Se manejaron cantidades de muestra entre los 50 y 100 g de suelo. En la Figura 1 se observan espacialmente los puntos de muestreo sobre el área de Tubará (Cuenca del Sinú, Departamento de Atlántico).

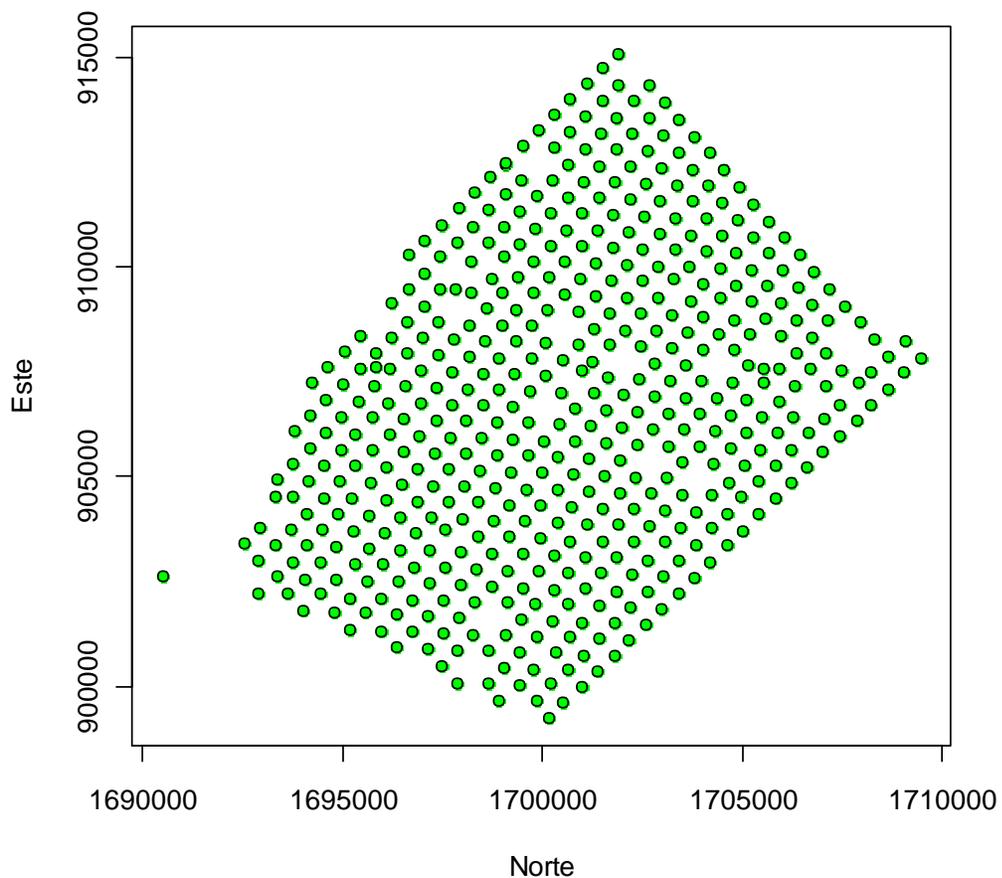
Las muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Biotecnología del Instituto Colombiano del Petróleo, ECOPETROL S.A, siguiendo procedimientos internos de recuento de viables en placa y técnicas reportadas en la literatura para cultivo en alcoholes e hidrocarburos como fuentes de carbono para los microorganismos de interés. En la cuantificación de bacterias oxidadoras de hidrocarburos de C2 a C6 se empleó Medio Salino Mineral-ICP y Nitrate Mineral Salts (Whittenbury, et al., 1970) con butanol 0.75% y atmosfera de hexano como fuentes de carbono respectivamente. De otra parte, en la evaluación de bacterias oxidadoras de C1 se emplearon los medios de cultivo ya mencionados, pero adicionando metanol 2.5% y atmosfera de metano respectivamente.

Para el cultivo de bacterias oxidadoras de hidrocarburos de C2-C6 (butanol y hexano), se utilizó temperatura de incubación de 32°C por 7 días, mientras que

para favorecer el crecimiento de bacterias metanotróficas (metanol y metano), se empleó temperatura de 22°C (ambiente) por 10 días. (Hitzman, 1956; Rasheed, et al., 2008).

Como controles de crecimiento se utilizaron microorganismos pertenecientes a la colección de cepas del Instituto Colombiano del Petróleo, recuperadas de estudios anteriores y que tienen una demostrada actividad metabólica sobre las fuentes de carbono proporcionadas.

Figura 2. GRILLA DE MUESTREO, CUENCA DEL SINU, TUBARÁ



Los datos obtenidos a partir del tratamiento de las muestras en las condiciones ya descritas, corresponden a conteos de bacterias o de Unidades Formadoras de Colonias por gramo de suelo (UFC/g), que se informan en expresión de logaritmo.

Adicionalmente, fue necesario transformar las variables de interés según Box y Cox, $\lambda=2$, para garantizar una tendencia hacia la normalidad en los datos.

El análisis geoestadístico fue llevado a cabo en los programas SPSS 15.0 y R 2.11.1 paquete geoR (Ribeiro, 2006), software de libre acceso. Para la determinación de los modelos estadísticos que mejor describen la distribución de las variables de estudio y el cálculo de su respectivos parámetros, se emplearon las técnicas "by eye" (trazando posibles comportamientos sobre los variogramas empíricos), máxima verosimilitud (clásica "ML" y restringida "REML") y mínimos cuadrados (ponderados "WLS" y ordinarios "OLS"), asumiendo un nugget fijo a cero, un nugget sugerido (0.1) y un nugget estimado por el programa, probando todas las posibles combinaciones.

La verificación de los modelos resultantes se realizó a través de la metodología "cross validation", técnica que compara los valores predichos con los valores verdaderos y permite decidir qué modelo estadístico escoger ó que método de predicción proporciona mejores resultados, a través de un set de gráficos que presentan el comportamiento de los datos y sus respectivos valores de error. Los modelos seleccionados en éste estudio fueron aquellos que luego de probar todas las opciones ya descritas, mostraron el comportamiento esperado en los gráficos "cross validation" y demostraron el menor error, por lo tanto son los únicos que serán presentados.

Como método de predicción se utilizó la técnica estadística de interpolación kriging, la cual trabaja con un predictor lineal insesgado de mínima varianza (Ribeiro, 2006).

3. RESULTADOS

3.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO

El análisis descriptivo de los datos es fundamental para la aplicación de la teoría geoestadística. En el diagrama de caja y bigotes (Figura 2) se observa que las concentraciones de bacterias oxidadoras de hidrocarburos C2-C6 son mayores respecto a las concentraciones de bacterias oxidadoras de C1, igualmente se encuentra una alta dispersión en los valores registrados, siendo mayor en las mediciones realizadas con medio MSM+Metanol. En general, los recuentos realizados en medios NMS con atmosfera de hidrocarburos son ligeramente menores a los efectuados en medios MSM-ICP con alcoholes.

Figura 3. DIAGRAMA BOX-PLOT VARIABLES MICROBIOLÓGICAS

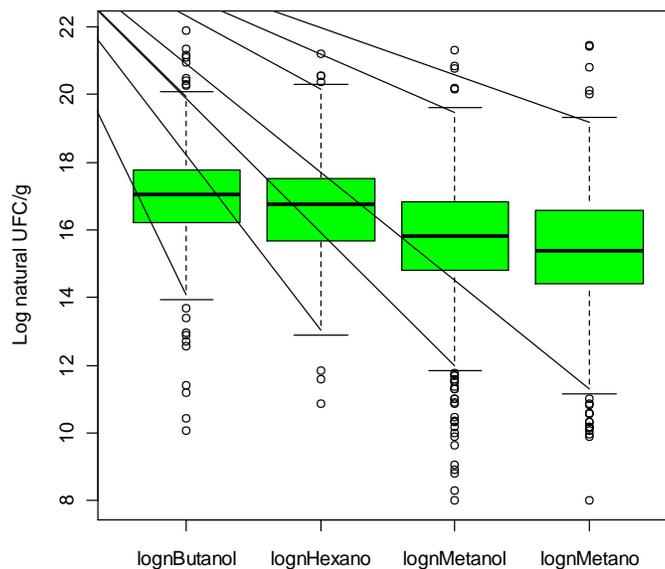


Figura 3. Diagrama de cajas de las variables microbiológicas evaluadas en las muestras recolectadas del área de Tubará, Cuenca del Sinú. Se observa la presencia de valores atípicos. Ésta información corresponde a los datos sin transformar.

Aunque es clara la presencia de varios datos atípicos, los valores de los coeficientes de variación indican que no existen problemas de variabilidad, los datos son poco heterogéneos (CV menores al 30%) (Giraldo, 2004). Nuevamente se registra que la condición de crecimiento que presenta la menor dispersión es la de NMS+Hexano (Ver Tabla 1).

En las Figuras 4 y 5 se encuentran los gráficos exploratorios de las variables evaluadas. Los histogramas son unimodales y muestran sesgos a la izquierda, aunque es clara una tendencia a la normalidad. Los gráficos de dispersión muestran la ausencia de tendencia en los datos respecto a las coordenadas de medición, lo cual indica que el valor promedio de las variables microbiológicas es constante a lo largo de la región de estudio, satisfaciendo así el supuesto de estacionariedad necesario en la teoría geoestadística, los valores que asumen las variables de estudio no están relacionadas con su ubicación geográfica (estacionariedad estricta).

Figura 4. GRÁFICOS EXPLORATORIOS PARA LAS VARIABLES BUTANOL Y HEXANO

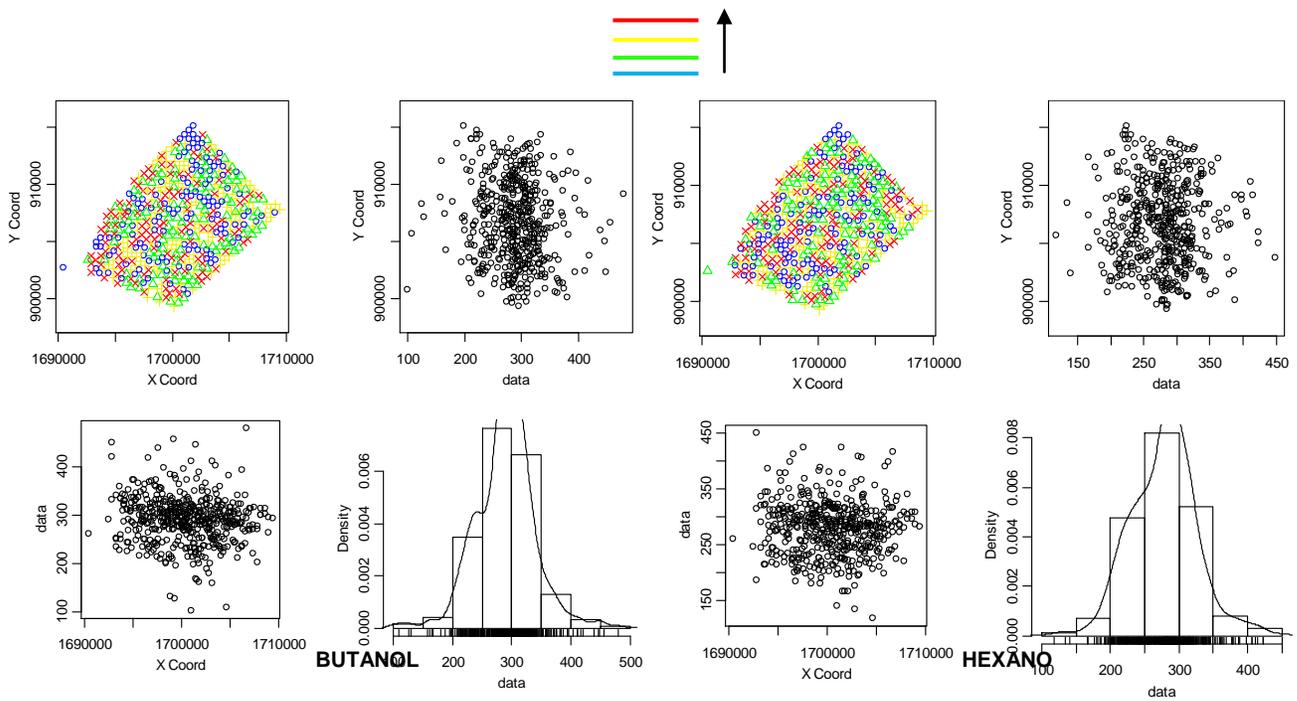


Figura 5. GRÁFICOS EXPLORATORIOS PARA LA VARIABLES METANOL Y METANO

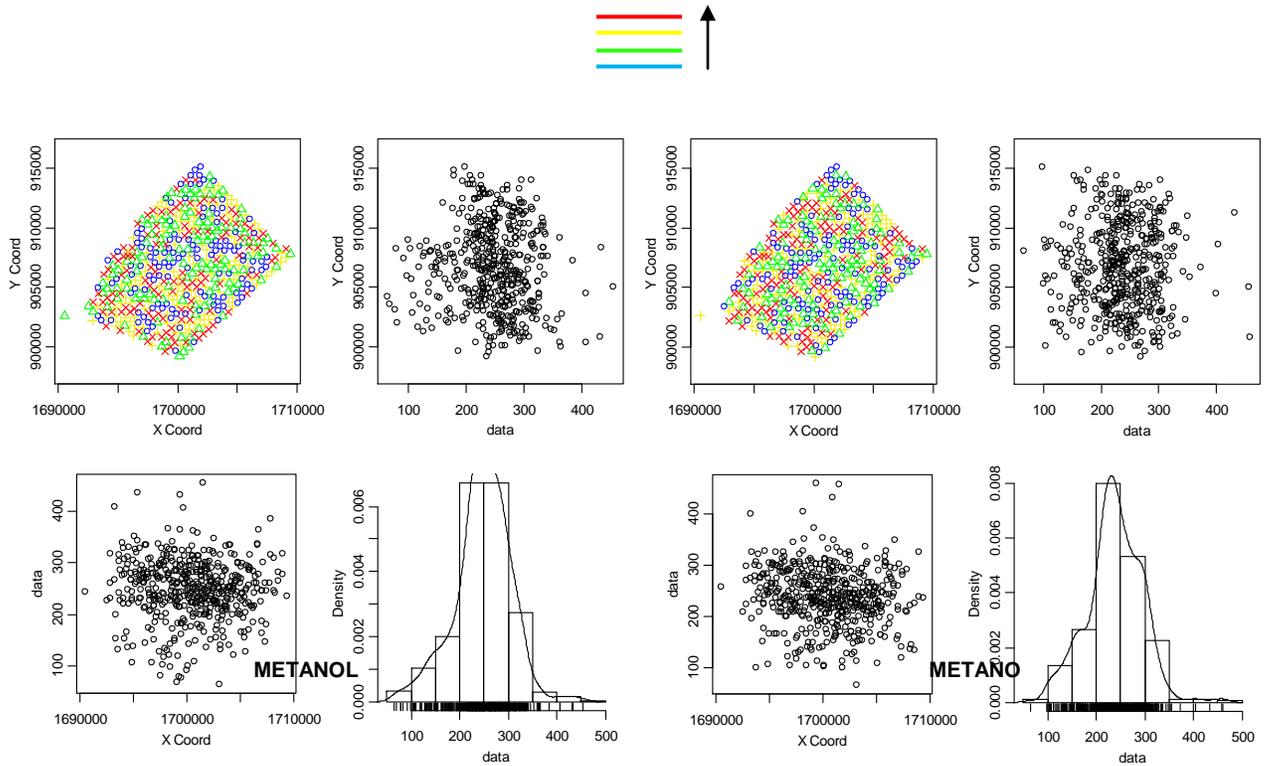
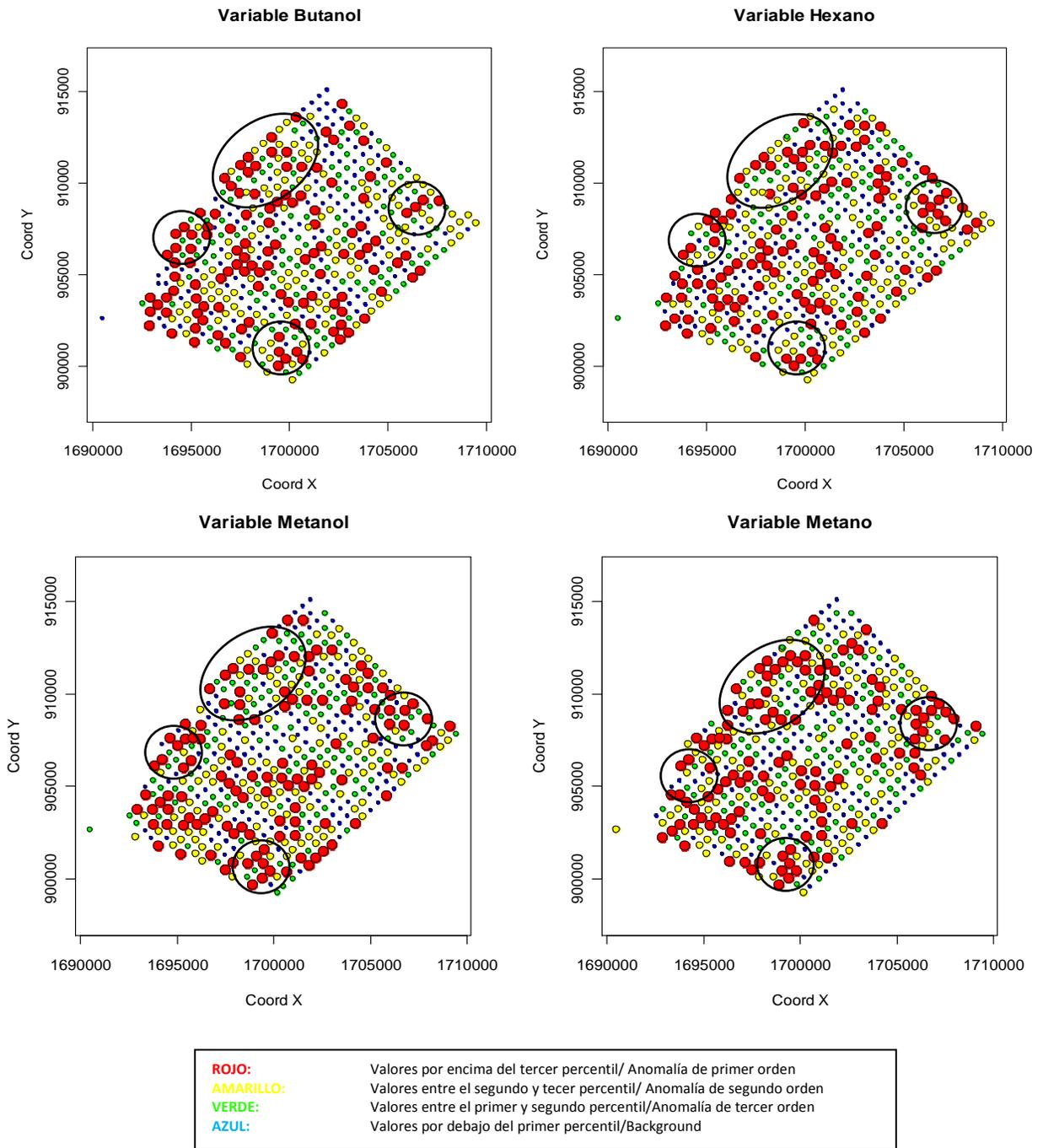


Tabla 1. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DATOS TRANSFORMADOS (Box y Cox $\lambda = 2$)

Estadísticos	Norte	Este	Butanol	Hexano	Metanol	Metano
MINIMO	1690503	899238	101.2	118.2	64.1	64.1
1ER CUARTIL	----	----	262.9	245.3	219.7	207.4
MEDIANA	----	----	290.6	281.5	249.9	237.1
PROMEDIO	----	----	289.4	278.1	247.5	237.9
3ER CUARTIL	----	----	315.7	307.0	283.7	275.2
MAXIMO	1709445	915099	479.9	449.9	454.5	460.5
CV (%)	----	----	8,71	8,66	12,52	12,42

Figura 6. GRÁFICO POR CUARTILES DE LOS RECUENTOS DE BACTERIAS OXIDADORAS DE HIDROCARBUROS C2-C6 Y METANO



En la Figura 6 se presentan los gráficos por cuartiles correspondientes a cada punto de muestreo en las coordenadas del área de estudio, las zonas en rojo

representan las concentraciones microbianas más altas. Los datos que se encuentran en la zona azul corresponden a aquellos que se consideran background, o valores de fondo, los datos en verde, anomalías de tercer orden, en amarillo, anomalías de segundo orden, y en rojo, anomalías de primer orden. La anterior es una clasificación primaria de la información que ha sido empleada en estudios similares (Kappa, 1997) debido a que permite apreciar de forma general la distribución de las concentraciones microbianas en el área. Como se presentará más adelante, las técnicas geoestadísticas trabajan sobre superficies por principio continuas y no sobre gráficos de punto por punto o tipo vector.

Aunque existe cierta similitud entre los mapas que representan las poblaciones oxidadoras de C2-C6, así como entre los que representan las poblaciones oxidadoras de C1, son evidentes diferencias en varios puntos de las respectivas graficas. En teoría, aquellos puntos redundantemente anómalos en una categoría de primer orden en los cuatro mapas, son aquellos que tienen mayor importancia a nivel prospectivo (Kappa, 1997), en la Figura 5 son señalados algunos de ellos.

La Tabla 2 muestra correlaciones significativas entre las variables de estudio a diferentes niveles de intensidad. Como era de esperarse las correlaciones son más fuertes entre las técnicas que evalúan la misma población microbiana, siendo la más alta entre las variables metanol y metano ($p=0.601$, $p=0.01$). Lo anterior lógicamente se ve reflejado en las similitudes encontradas entre los mapas que fueron ya descritas. Las correlaciones también pueden ser una forma de medir qué tanta diferencia hay en los resultados, producto de la aplicación de cada una de las técnicas, por lo que se puede afirmar que indican que cada variable aporta una porción importante de explicación diferente del fenómeno de estudio.

Tabla 2. CORRELACIONES VARIABLES MICROBIOLÓGICAS

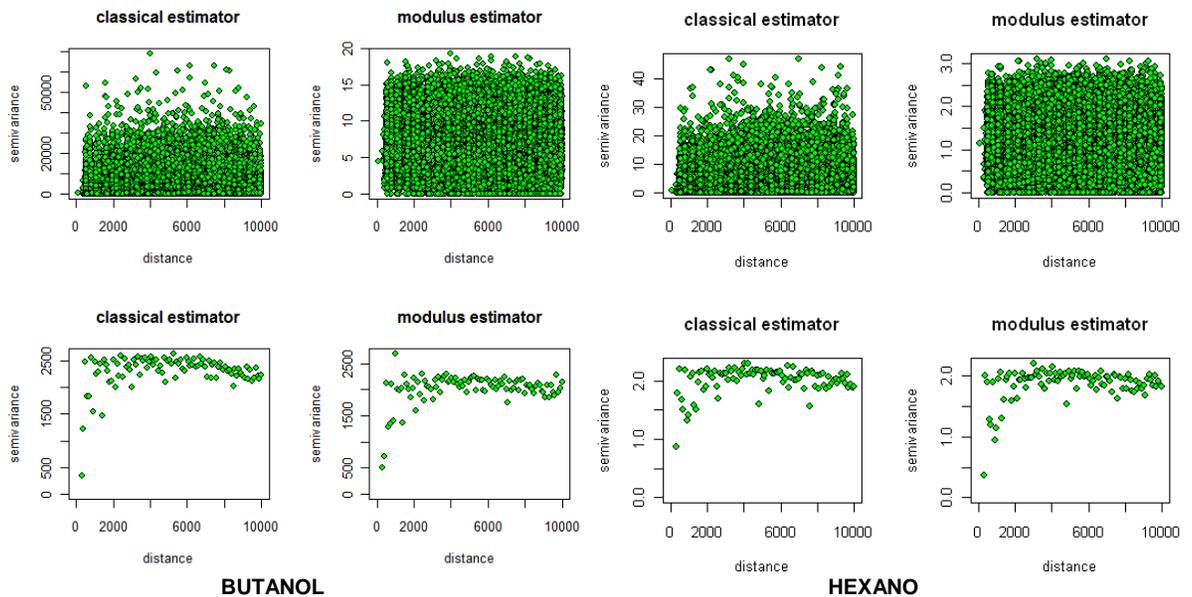
			Correlaciones			
			UFCg BUTANOL	UFCg HEXANO	UFCg METANOL	UFCg METANO
Rho de Spearman	UFCgBUTANOL	Coefficiente de correlación	1,000	,489**	,391**	,376**
		Sig. (bilateral)	.	,000	,000	,000
		N	492	492	492	492
	UFCgHEXANO	Coefficiente de correlación	,489**	1,000	,407**	,348**
	Sig. (bilateral)	,000	.	,000	,000	
	N	492	492	492	492	
	UFCgMETANOL	Coefficiente de correlación	,391**	,407**	1,000	,601**
	Sig. (bilateral)	,000	,000	.	,000	
	N	492	492	492	492	
	UFCgMETANO	Coefficiente de correlación	,376**	,348**	,601**	1,000
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	.	
	N	492	492	492	492	

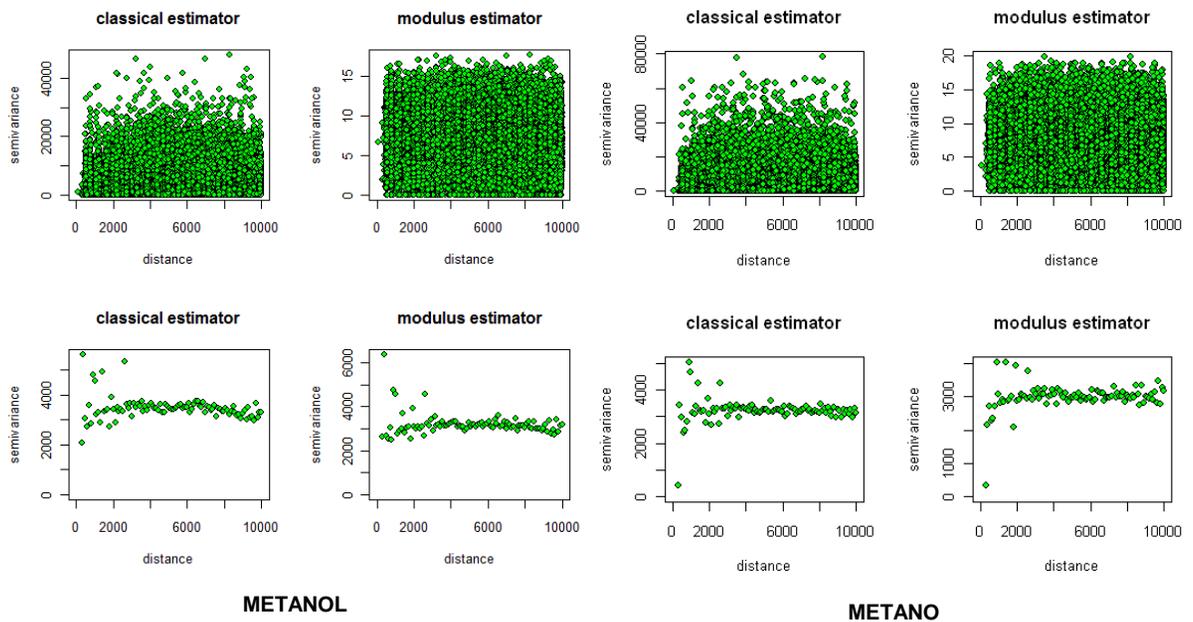
** - La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

3.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

A continuación se presenta el análisis estructural de los datos, el cual comprende la construcción de variogramas omnidireccionales y direccionales empíricos y su ajuste a un modelo teórico que debe ser estadísticamente validado (“cross validation”).

Figura 7. VARIOGRAMAS EMPÍRICOS OMNIDIRECCIONALES VARIABLE BUTANOL





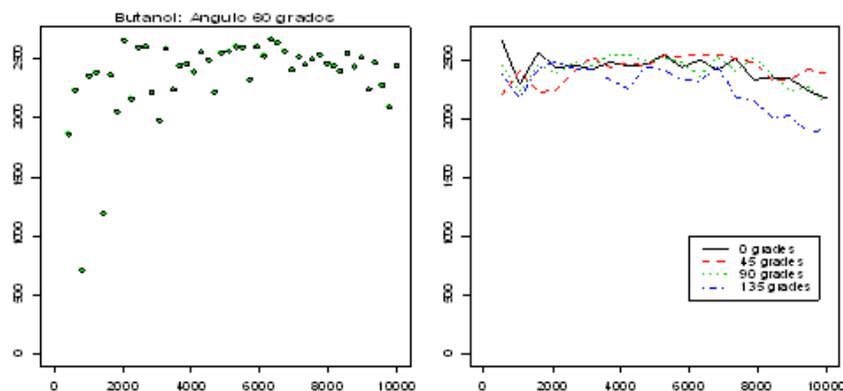
En la Figura 7 se encuentran los variogramas empíricos omnidireccionales (90°) calculados con el estimador clásico y "modulus", en gráficos tipo "cloud" y "bind", representando el promedio del variograma experimental en todas las direcciones posibles. Los gráficos tipo "cloud" permiten identificar algunos valores atípicos, especialmente en los variogramas construidos a partir del estimador clásico. En general, es posible observar una gran dispersión. El efecto nugget para las variables butanol y hexano puede considerarse de tipo cuadrático, lo cual indica que son variables sumamente continuas que no pueden cambiar rápidamente de un punto a otro. Los variogramas de las variables metano y metanol presentan un nugget mayor lo cual puede indicar que estas variables se comportan de forma muy irregular a distancias cortas.

Se aprecia en la estructura general de los datos, que en el caso de las variables butanol y hexano las correlaciones se hacen más fuertes según aumenta la distancia, hasta alcanzar la meseta (rango), distancia a la cual ya no existe correlación.

En el caso de las variables metanol y metano no es claro el comportamiento descrito para butanol y hexano, y por el contrario prevalece la meseta casi a lo largo de toda la distancia, las correlaciones se presentan a distancias muy cortas. Igualmente, para el caso de éstas variables se registra la presencia de varios valores atípicos que se ubican en la parte superior de la representación gráfica de la distribución de los datos restantes, es posible que se deban a errores en la medición, o a alguna característica particular de la muestra que aun no ha sido considerada, pero que lógicamente tiene un efecto sobre la distribución grafica de los datos restantes.

En la Figura 8 se muestran los variogramas direccionales de las variables de estudio, los cuales se construyen a diferentes ángulos con el propósito de observar posibles diferencias en su comportamiento. Para el caso de todas las variables se considera que existe ausencia de anisotropía, teniendo en cuenta que no se observa variación del comportamiento de los datos con respecto a las diferentes direcciones evaluadas. Los rangos y los umbrales no muestran cambios importantes. Se presume un comportamiento isotrópico, los valores que asumen estas variables solo dependen de la distancia, mas no de la dirección espacial ni de la posición geográfica.

Figura 8. VARIOGRAMAS DIRECCIONALES ESTIMADOR CLÁSICO



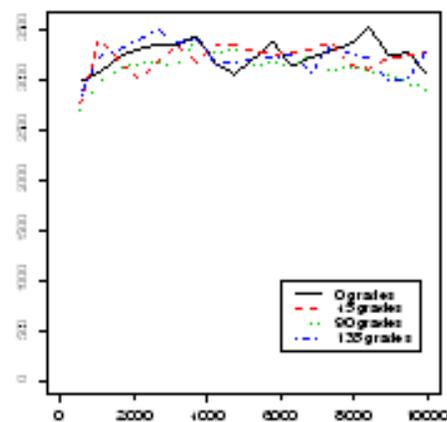
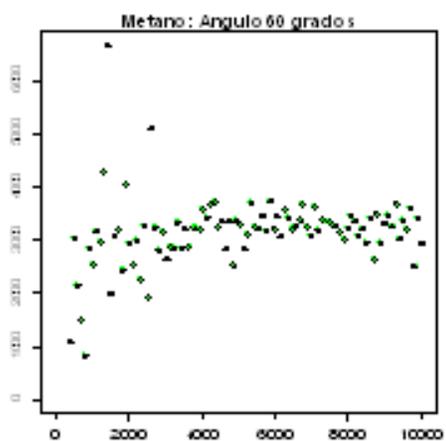
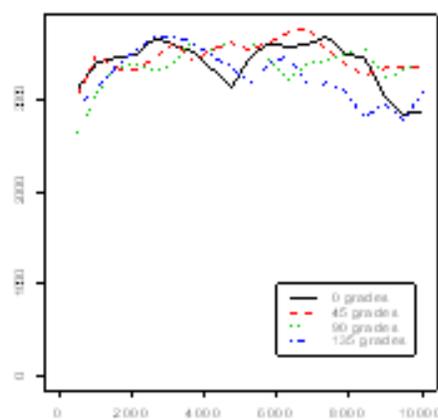
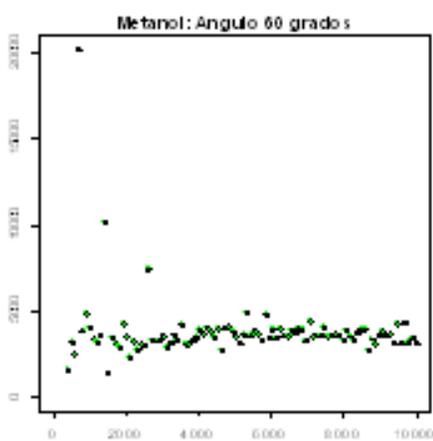
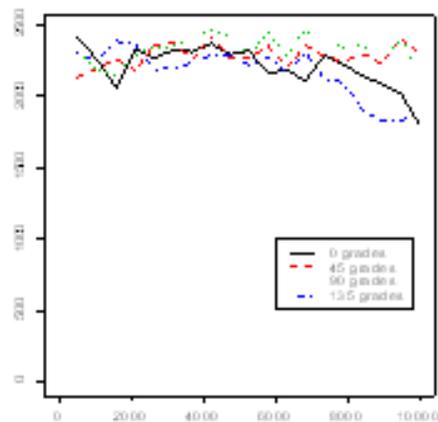
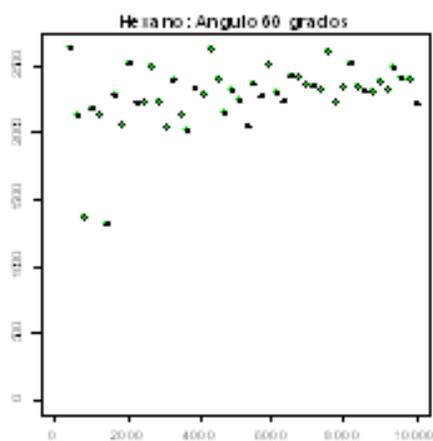
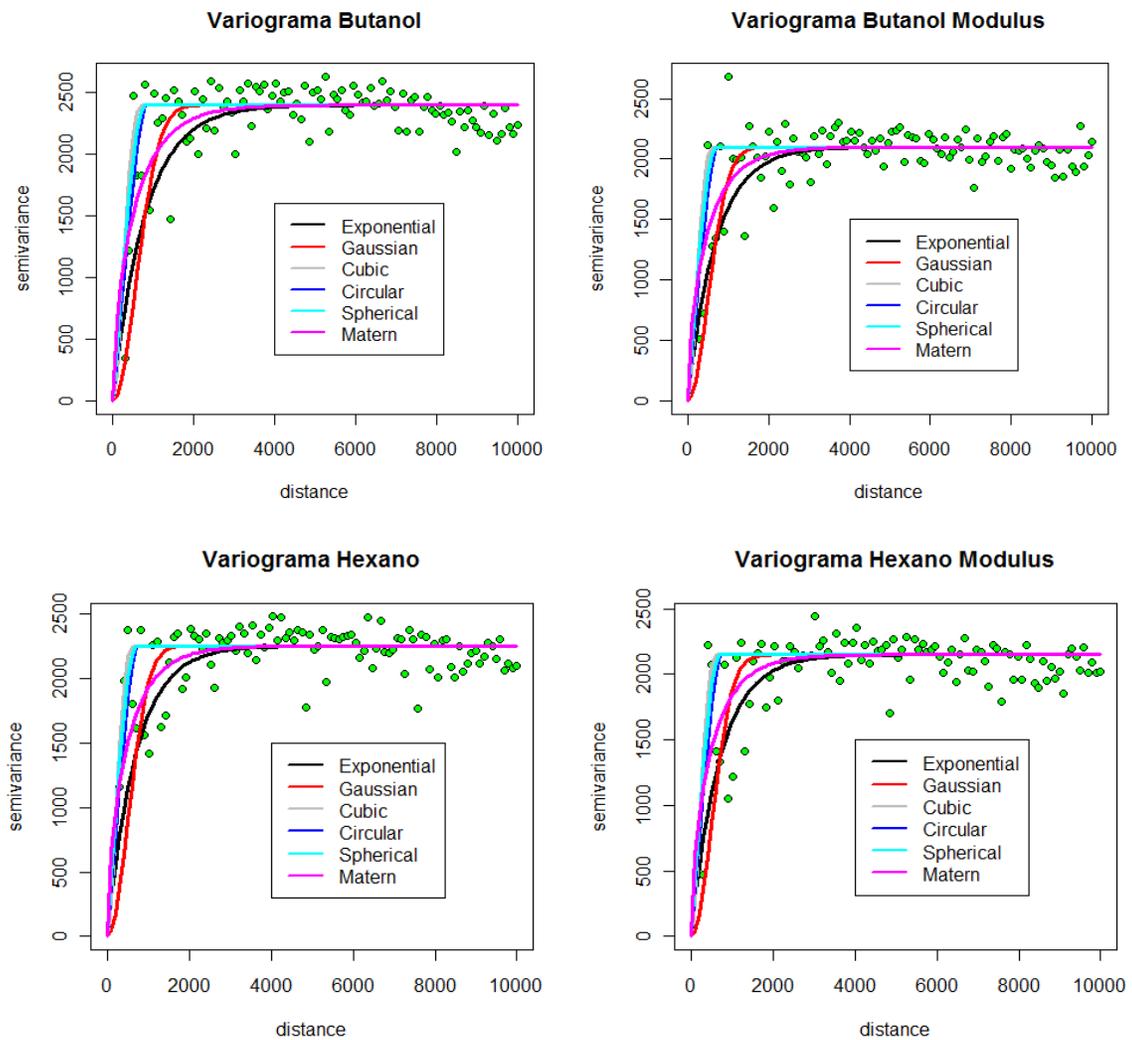


Figura 9 ESTIMACIÓN DEL MODELO POR EL MÉTODO "BY EYE", VARIABLES BUTANOL Y HEXANO



En las Figuras 9 y 10 se observa el ajuste de seis posibles modelos geoestadísticos a los variogramas empíricos por el método "by eye" (exponencial, gaussiano, cúbico, circular, esférico, matern). Los modelos exponencial y matern son los que mejor ajustan a la distribución de los datos, debido a que cuando se trazan sus líneas sobre los variogramas omnidireccionales, son las que abarcan la mayor cantidad de puntos ó son las que están más cercanas a la mayoría de ellos, especialmente en las distancias más cortas. Gráficamente se pueden establecer

los parámetros still (umbral) phi (rango) y nugget (Ver Tabla 3), sin embargo existen metodologías matemáticas *que lo hacen de forma más precisa*.

Figura 10. ESTIMACIÓN DEL MODELO POR EL MÉTODO “BY EYE”, VARIABLES METANOL Y METANO

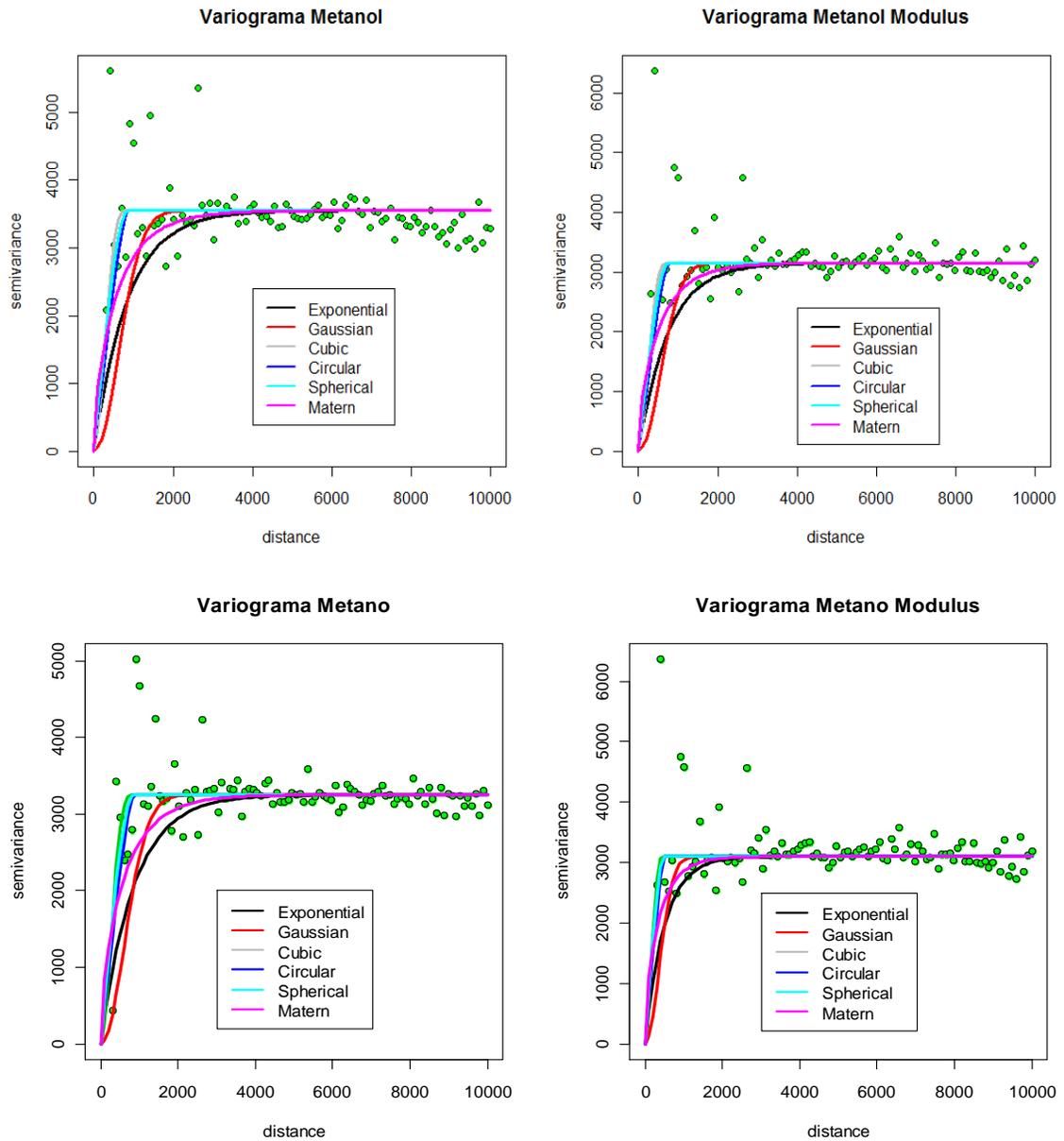
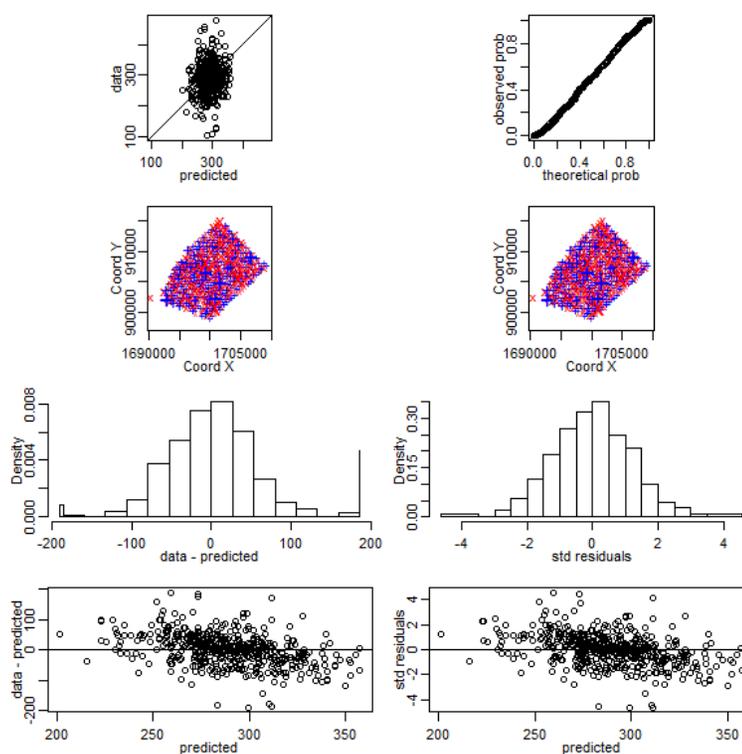


Tabla 3. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS POR EL MÉTODO "BY EYE"

VARIABLE	MÉTODO DE ESTIMACIÓN	MODELO	PARÁMETROS		
			Rango (phi)	Sill (sigmasq)	Nugget
HEXANO	BY EYE	Matern-Exponencial	700	2250	0
BUTANOL	BY EYE	Matern-Exponencial	800	2400	0
METANOL	BY EYE	Matern-Exponencial	850	3550	0
METANO	BY EYE	Matern-Exponencial	850	3250	0

Para la determinación del modelo más apropiado que explique el comportamiento estructural de los datos, se probaron las técnicas que reporta la literatura para tal fin (Ribeiro, 2006). En el caso de Mínimos Cuadrados y Métodos de Probabilidad se tuvo en cuenta la posibilidad de un nugget fijo a cero, un nugget fijo a 0.1 y un nugget estimado por el programa geoR (Ver Capítulo 2 Materiales y Métodos).

Figura 11. VALIDACIÓN DEL MODELO PARA LA VARIABLE BUTANOL, MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS ORDINARIOS, MODELO MATERN, NUGGET FIJO A CERO



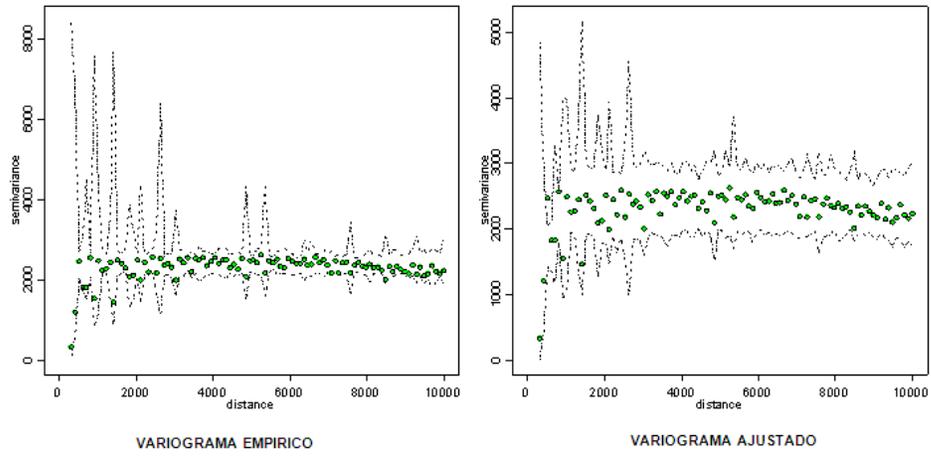
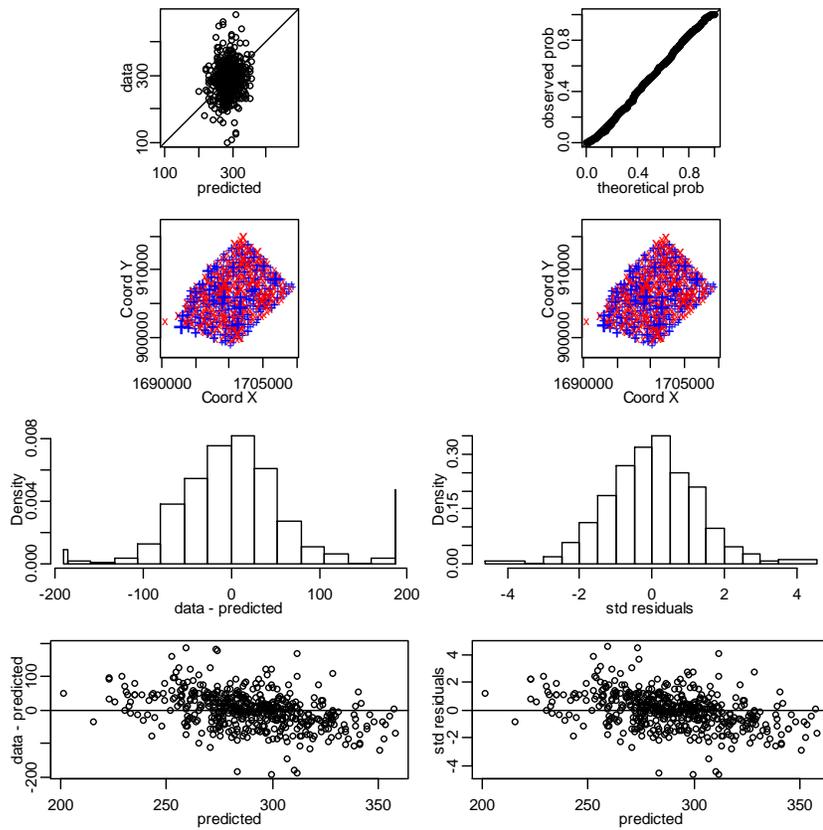
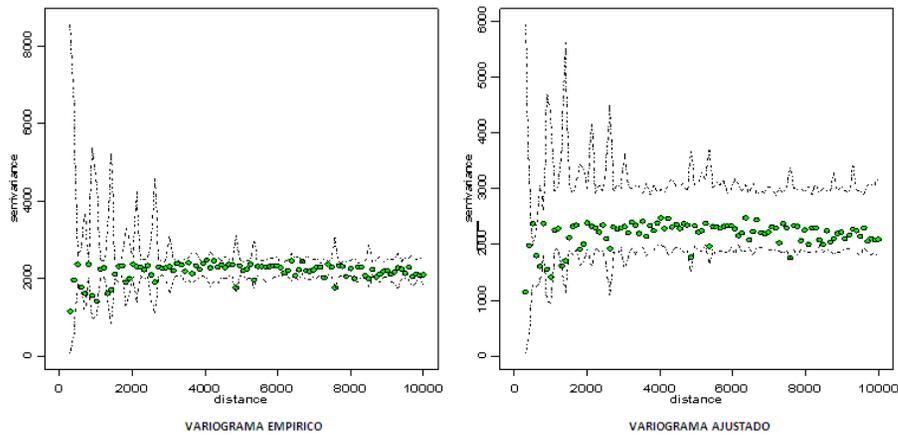


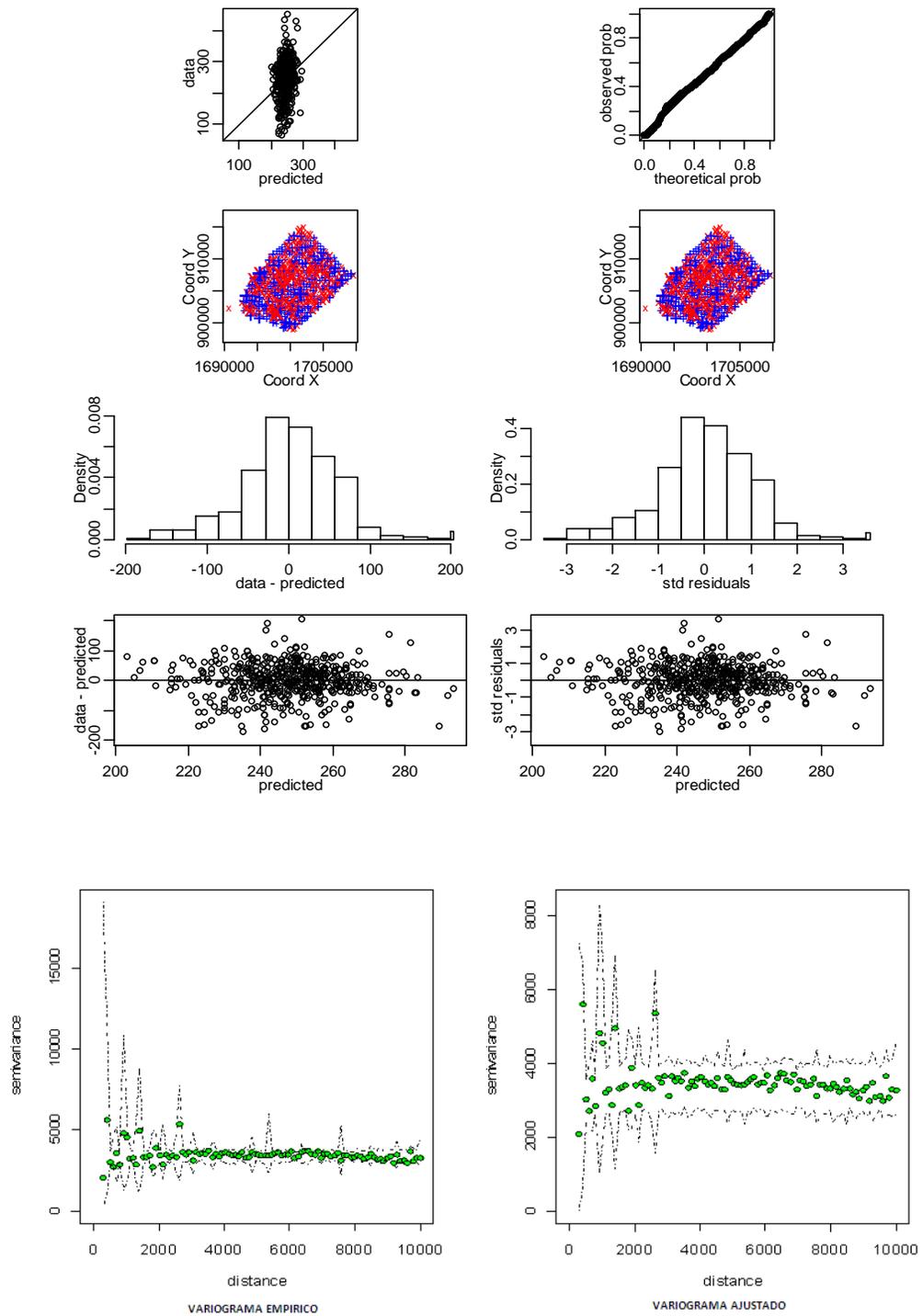
Figura 12. VALIDACIÓN DEL MODELO PARA LA VARIABLE HEXANO, MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS ORDINARIOS, MODELO MATERN, NUGGET FIJO A CERO





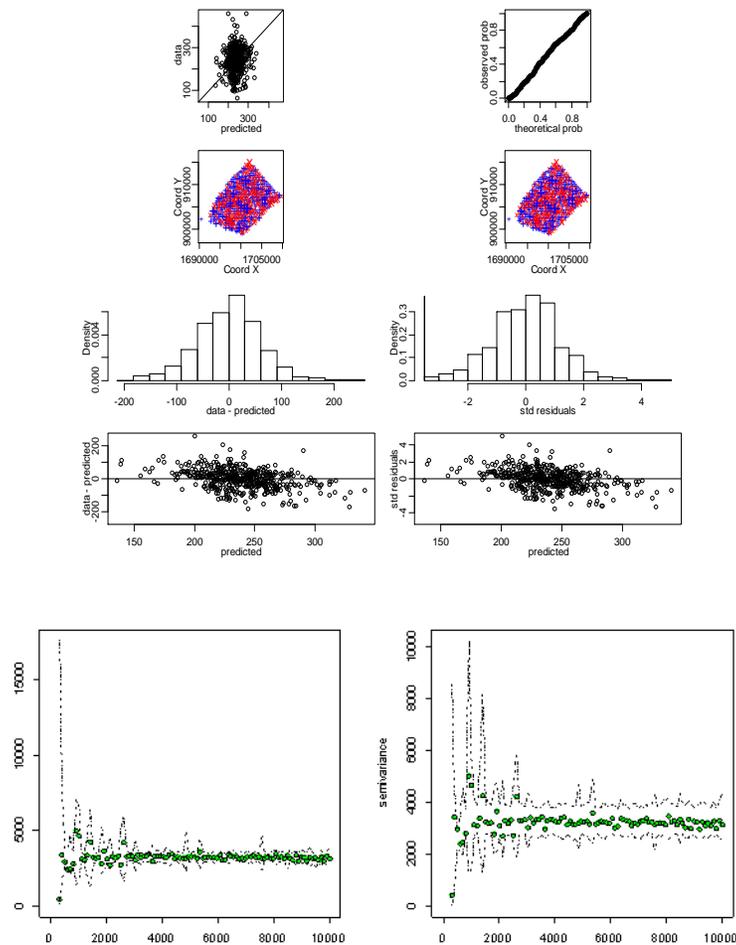
Los modelos seleccionados para cada variable, luego de su validación estadística (“cross validation”) y cálculo de bandas de confianza, son presentados en las Figuras 11, 12, 13 y 14, en éstas se observa que los histogramas de los residuales son bastante simétricos con una clara tendencia a la normalidad, la distribución de los errores y los residuales estandarizados respecto a los datos predichos es homogénea y la probabilidad observada ajusta perfectamente con la probabilidad teórica del modelo. En los mapas, el error positivo está representado en color azul y el error negativo en rojo. En general, se encuentra que la distribución de errores positivos y negativos es similar para cada una de las variables, no es posible afirmar con total certeza cuál tipo de error es más común, sobrestimar o subestimar las poblaciones bacterianas.

Figura 13. VALIDACIÓN DEL MODELO PARA LA VARIABLE METANOL, MÉTODO DE MÁXIMA VEROSIMILITUD, MODELO EXPONENCIAL, NUGGET FIJO A CERO



Respecto a las bandas de confianza, las calculadas teniendo en cuenta el variograma empírico, están construidas a partir de permutaciones de los datos a través de las locaciones, sobre el supuesto de no correlación espacial. Las bandas sobre el modelo ajustado fueron calculadas a partir de simulaciones a partir de los parámetros del modelo establecido. Las bandas muestran la variabilidad del variograma empírico (Ribeiro, 2006). Como era de esperarse las distancias entre las bandas del modelo ajustado son mucho menores a las obtenidas a partir de los variogramas empíricos, se conoce que entre menores sean éstas distancias mejores propiedades de estimación y predicción tienen los modelos.

Figura 14. VALIDACIÓN DEL MODELO PARA LA VARIABLE METANO, MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS ORDINARIOS, MODELO CIRCULAR, NUGGET FIJO A CERO



Los valores de los parámetros obtenidos para cada modelo, se encuentran en la Tabla 4. Luego de establecer la validez de los modelos, el siguiente paso en el análisis geoestadístico es la interpolación por la técnica de kriging con el objetivo de llevar a cabo predicciones y construir una superficie que permita visualizar la distribución de anomalías microbiológicas en la región.

Tabla 4. PARÁMETROS ESTIMADOS POR LOS MODELOS SELECCIONADOS

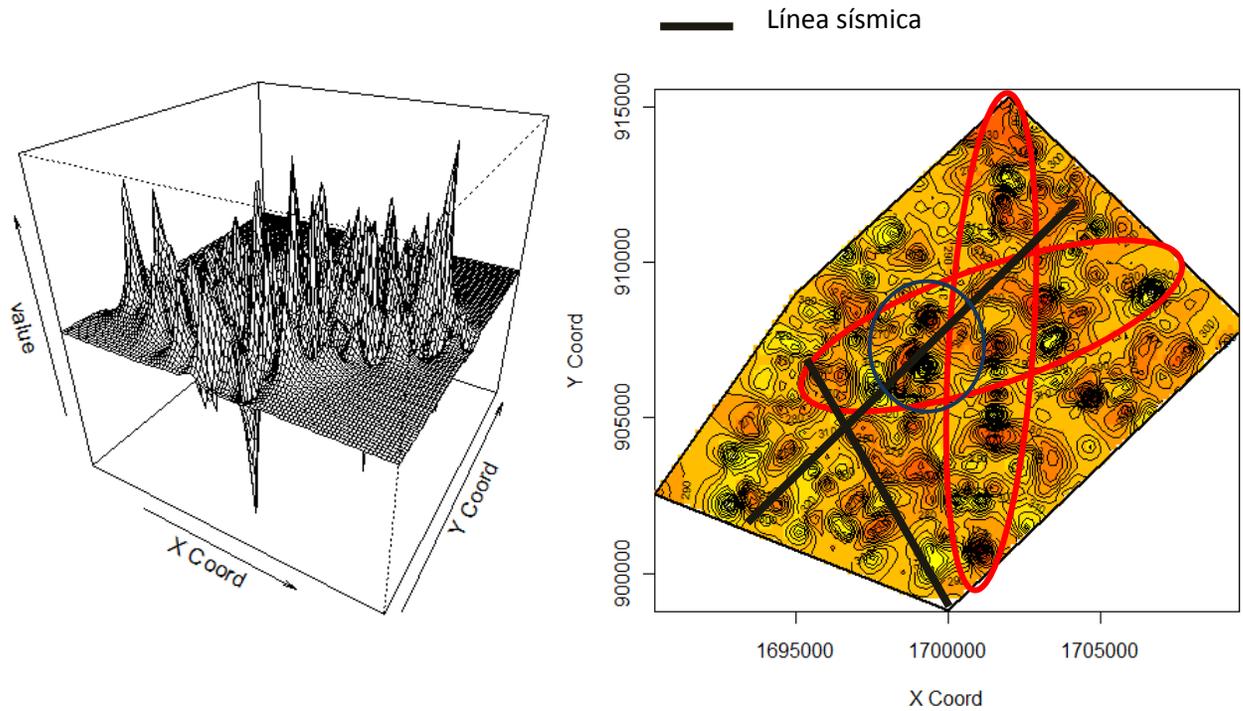
VARIABLE	MÉTODO DE ESTIMACIÓN	MODELO	PARÁMETROS			INDICES		Media de los Errores	Media de los Errores estandarizados
			Rango	Sill	Nugget	BIC	AIC		
HEXANO	OLS	Esférico	1027.550	2354.423	0	N.A	N.A	0.0855100	0.0007539
BUTANOL	OLS	Matern	435.5005	2370.7699	0	N.A	N.A	0.0600500	0.0005682
METANO	OLS	Circular	796.7611	3268.2404	0	N.A	N.A	0.0571100	-0.0006261
METANOL	ML	Exponencial	258.2	3370	0	5364	5351	0.0593800	0.0005724

3.3 PREDICCIÓN

A continuación se presentan las superficies construidas por la técnica de interpolación de Kriging ordinario, donde se observan las zonas anómalas para cada variable de estudio. Las superficies fueron construidas teniendo en cuenta los valores que adoptan las variables en los puntos muestreados e interpolando los valores de aquellos puntos no medidos, a través de combinaciones lineales de las variables aleatorias conocidas y la ponderación de los mismos en función de la distancia entre los puntos muestreados.

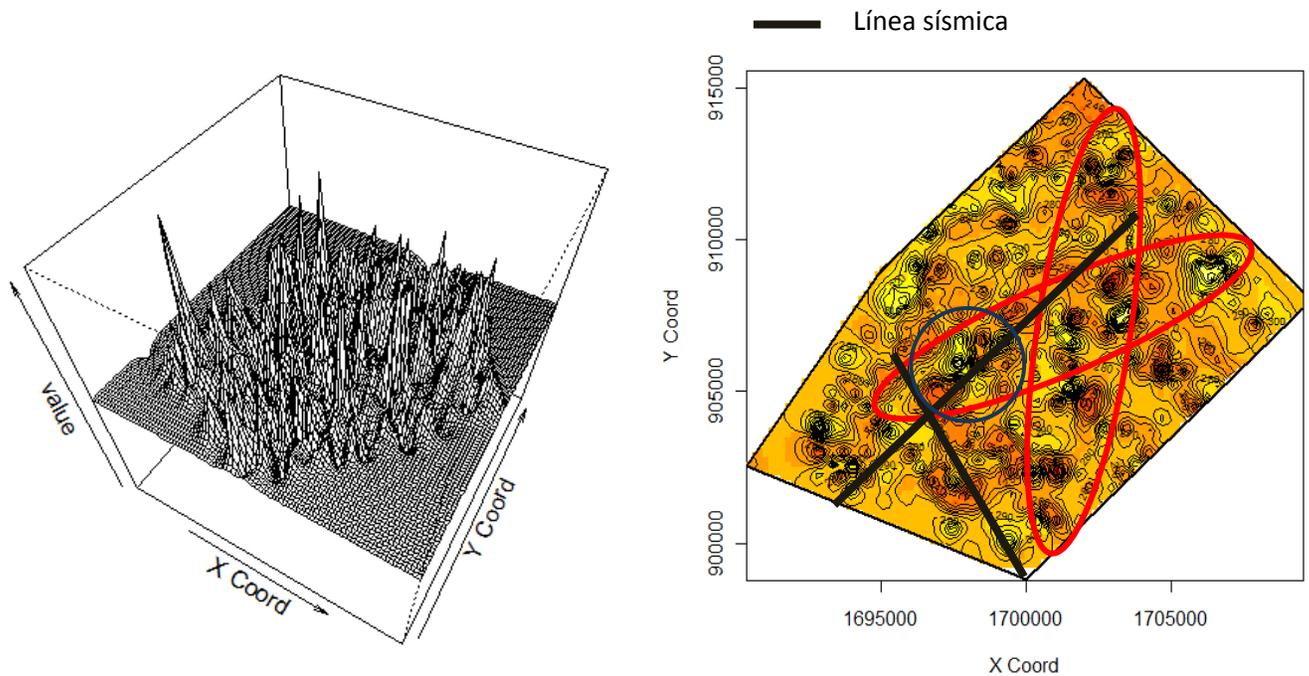
Las zonas anómalas corresponden a altas concentraciones de bacterias oxidadoras de compuestos hidrocarbonados específicos identificados a través de las técnicas microbiológicas antes expuestas. Si se comparan las gráficas de contornos obtenidas para cada variable (Figuras 14, 15, 16, 17) puede evidenciarse correspondencia entre las zonas anómalas características de las variables butanol y hexano y las de las variables metanol y metano, confirmando de esta forma que las técnicas microbiológicas son equiparables en un alto grado. En la Figura 15 se observan claramente las zonas anómalas para la variable butanol sobre el área de estudio, alineadas principalmente sobre dos "ejes". Se conoce que algunas de las anomalías ubicadas colindan o pasan sobre una de las líneas sísmicas presentes en la zona.

Figura 15. RESULTADOS KRIGING ORDINARIO VARIABLE BUTANOL



En la Figura 16 se encuentran las zonas anómalas para la variable hexano. Aunque la intensidad de los contornos de las anomalías no es tan fuerte como en el gráfico anterior, se consigue observar una tendencia similar a la ya descrita, la línea sísmica logra pasar exactamente sobre la misma anomalía registrada en la superficie de la variable butanol. Se observa nuevamente la presencia de un eje vertical de anomalías que atraviesan toda una región del mapa.

Figura 16. RESULTADOS KRIGING ORDINARIO VARIABLE HEXANO



En los graficos 3D de las Figuras 15 y 16 se encuentran las anomalías microbianas representadas por picos, los picos mas altos corresponden a anomalías de primer orden y se encuentran ubicados exactamente en los sitios donde se pueden observar las acumulaciones de contornos del grafico 2D.

En las Figuras 17 y 18, correspondientes a las variables metano y metanol, se observa una amplia zona ubicada hacia el sur del mapa donde se registran gran cantidad de pequeñas anomalías distribuidas por toda el área. Nuevamente las superficies son comparables graficamente entre si, aunque la apariencia del mapa de contornos de la variable metano es ligeramente diferente, probablemente por el tipo de modelo seleccionado (circular).

Figura 17. RESULTADOS KRIGING ORDINARIO VARIABLE METANOL

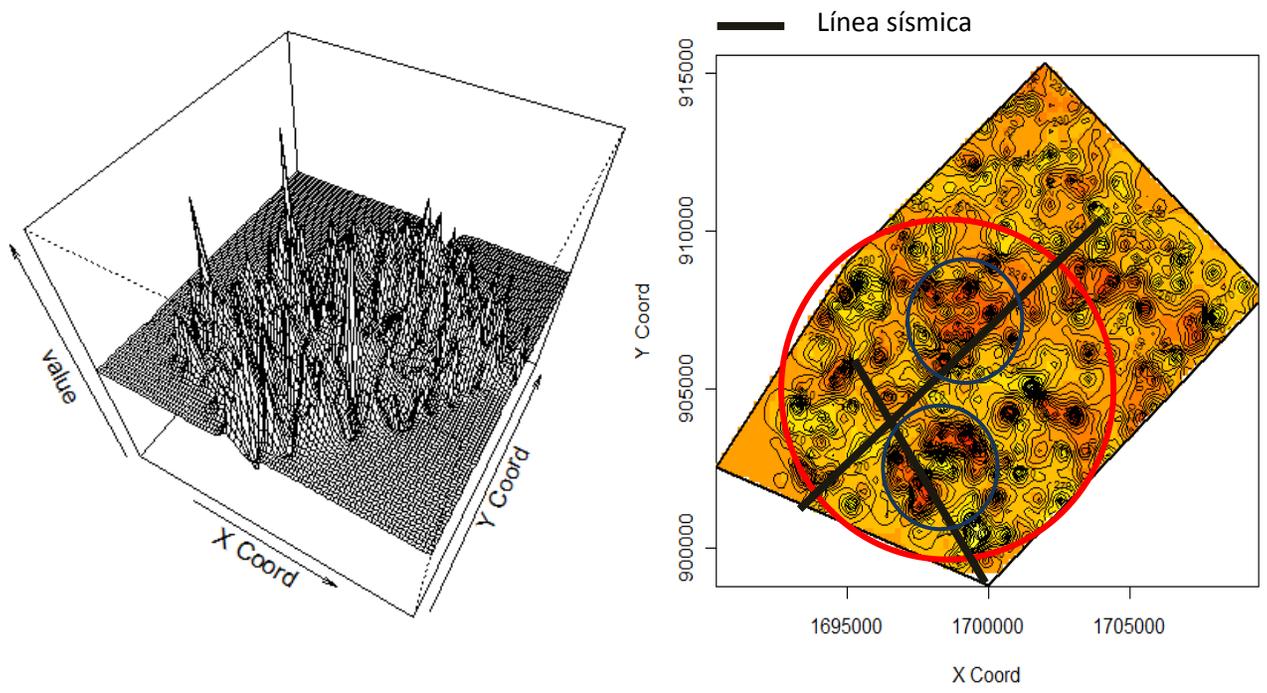
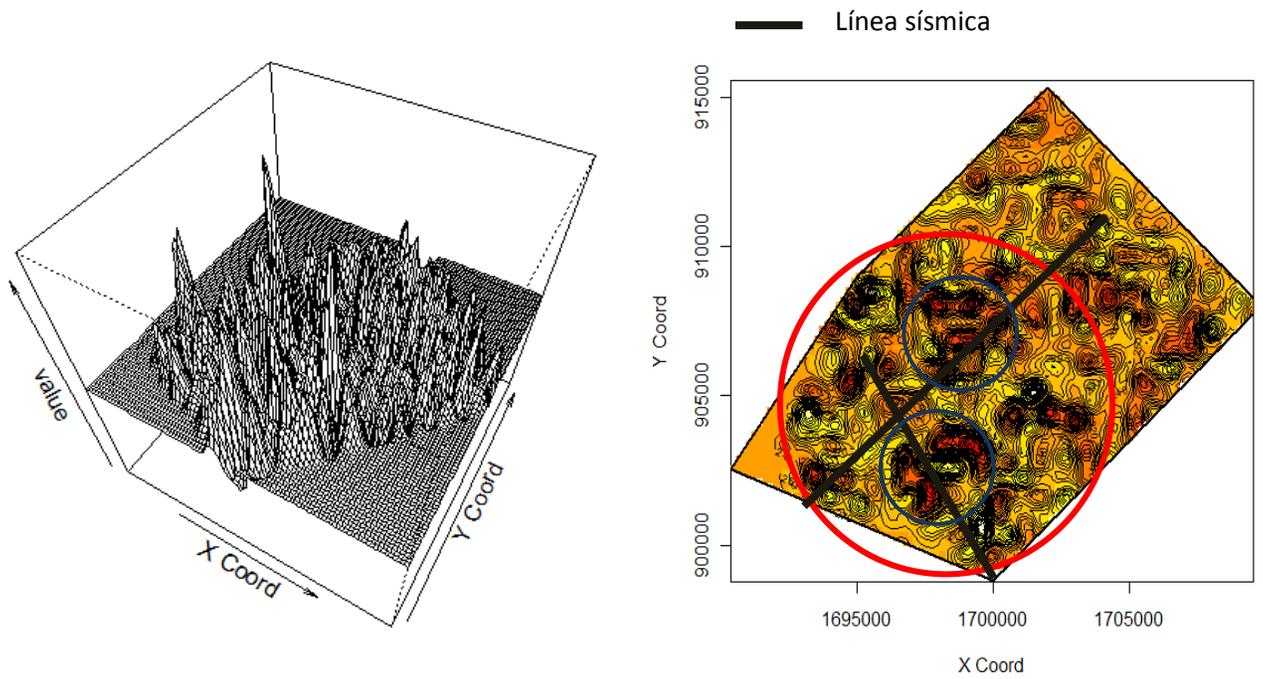


Figura 18. RESULTADOS KRIGING ORDINARIO VARIABLE METANO



La anomalía que se encuentra sobre la línea sísmica en las superficies de las variables butanol y hexano (Figuras 15 y 16), se mantiene en las superficies de las variables metanol y metano (Figuras 17 y 18) y además se presenta otra adicional asociada a la línea sísmica que se encuentra perpendicular a la principal. Esta característica puede hacer a esta zona un prospecto interesante de estudios más detallados.

Como en el caso de las variables butanol y hexano, el grafico 3D representa la información ya descrita en una perspectiva adicional, donde los picos más altos corresponden a los valores más extremos en el área, ó lo que se consideraría anomalías de primer orden.

Las bacterias metanotróficas son indicadoras de presencia de gas, por lo que podría presumirse que existe una gran extensión en el área de estudio en la que éste compuesto está presente. De otra parte las bacterias oxidadoras de C2-C6 son indicadoras de depósitos de crudo, sus anomalías son más escasas y están circunscritas a una región claramente definida.

4. CONCLUSIONES

La microbiología de superficies es una técnica indirecta de prospección geoquímica del petróleo que hace parte de un conjunto de metodologías rápidas y económicas, diseñadas para la disminución del riesgo exploratorio. Sin embargo, al ser una metodología indirecta sus predicciones siempre deben estar asociadas a un método de relevación directa, como la gasometría, que permite detectar en los suelos y sedimentos, los hidrocarburos que éstos puedan haber adsorbido en caso de presencia de crudo y gas asociado a un reservorio en el subsuelo del área de estudio.

Por lo anterior, y pese a que se ha determinado a través de técnicas geoestadísticas la presencia de anomalías microbiológicas en la zona, no es posible afirmar de forma inequívoca que estén asociadas a reservorios petrolíferos, por lo menos hasta que no se registre el comportamiento de otras variables importantes relacionadas a parámetros fisicoquímicos, presencia de nutrientes, características de los suelos muestreados, y especialmente, la gasometría. De forma general es posible afirmar que las anomalías asociadas a bacterias metanotróficas corresponden a acumulaciones de gas y que las anomalías asociadas a bacterias oxidadoras de C2-C6 a acumulaciones de crudo. En los casos donde se registran anomalías de los dos grupos bacterianos es posible hablar de un reservorio de hidrocarburos con una tapa de gas (reservorio mixto) (Wagner, et al, 2002).

Las superficies construidas por interpolación a través del método de kriging permitieron caracterizar microbiológicamente el área y ubicar geográficamente las acumulaciones anómalas de los microorganismos de interés, así como definir claramente las zonas background. Como era de esperarse, debido a que tanto las técnicas por alcoholes como por hidrocarburos, cuantifican la mismas poblaciones, se encuentran notables similitudes entre los mapas construidos a partir de las

variables que representan poblaciones oxidadoras de hidrocarburos de C2-C6, como entre los que representan poblaciones de bacterias oxidadoras de metano, lo cual indica que las técnicas microbiológicas son comparables entre sí en una importante medida. Estos hallazgos están respaldados por las correlaciones registradas (Tabla 3) y los mapas por cuantiles (Figura 6) que permitieron la clasificación preliminar de las zonas background y las anomalías de tercer, segundo y primer orden.

A través del análisis descriptivo de los datos se corroboraron los supuestos básicos de la teoría geoestadística: tendencia a la normalidad y estacionariedad (Figura 5), igualmente se determinó que los datos se caracterizan por su poca heterogeneidad (Tabla 1). En el análisis estructural se estableció la ausencia de anisotropía en los variogramas direccionales lo cual indica que los valores de las variables solo dependen de la distancia, mas no de la dirección espacial ni de la posición geográfica, otra presunción geoestadísticamente necesaria, especialmente para llevar a cabo predicciones por técnica de kriging.

Luego de probar todas las posibles combinaciones de modelos especificadas en el Capítulo 2, y de realizar su respectiva validación estadística (“cross validation”), se establecieron los únicos modelos válidos para explicar la distribución de las variables de estudio en la región. Se determinó tanto para la variable butanol como para la variable hexano que el modelo que mejor representa el comportamiento de estas variables es el Matern, por el método de mínimos cuadrados ordinarios asumiendo un nugget fijo a cero. El modelo que describe la distribución de la variable metanol en la región muestreada es el exponencial por el método de máxima verosimilitud asumiendo un nugget fijo a cero. De igual forma, el modelo que mejor representa el comportamiento de la variable metano en el área de trabajo es el circular, por el método de mínimos cuadrados ordinarios asumiendo nugget fijo a cero.

Se considera importante el hallazgo de varias anomalías asociadas a las líneas sísmicas de la región y se sugiere a futuro el estudio más detallado de estas zonas, así como de todas aquellas que demostraron ser anómalas por las cuatro metodologías evaluadas, dicho estudio debe incluir además la determinación a nivel químico de si los gases presuntamente detectados en la región son de origen biogénico o termogénico y en qué porcentajes, para así poder determinar el origen del fenómeno y su real importancia para la industria.

5. BIBLIOGRAFIA

DIAZ VIERA, Martin. Geoestadística Aplicada: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, 2002.

HANSON, Richard; HANSON, Thomas. Methanotrophic bacteria. En: Microbiological Reviews. Vol. 60, No. 2, Junio, 1996. p. 439- 471.

GIRALDO HENAO, Ramón. Introducción a la geoestadística. Teoría y Aplicación. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Estadística, 2004.

Kappa Resources Colombia Ltda; Geo-Microbial Technologies. Hydrocarbon Microseepage Survey. Cucuana, Velazquez, Baul, and Veracruz Areas Middle and Upper Magdalena Valley, Colombia. Final Report. 1997.

MALIZIA, Daniel; PRESTIA, Graciela; CACCAGLIO, Osvaldo. Respuestas de la Microbiología de Superficie para la identificación de acumulaciones de hidrocarburos asociadas a trampas estratigráficas y estructurales: Ejemplos de Sudamérica. Bogotá, Julio, 2009. Trabajo presentado en el Simposio Bolivariano de Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas, Cartagena, Colombia.

RASHEED, M.; VEENS PRASANNA, M.; SATISH KUMAR, T.; PATIL, J.; DAYAL, A. M.; Geo-microbial prospecting method for hydrocarbon exploration in Vengannapally Village, Cuddapah Basin, India. En: Current Science. Vol. 95, No. 3, Agosto, 2008. p. 361-366.

RIBEIRO, Paulo; DIGGLE, Peter. geoR Package for geostatistical data analysis an illustrative session. 21, Noviembre, 2006, Disponible en internet: <http://www.r-project.org/>

SHUMACHER, Dietmar; MALIZIA, Daniel; PRESTIA, Graciela. *Exploración geoquímica de superficie para petróleo y gas. En: Petrotecnia. Junio, 2003. p.48-59.*

UNITED STATES PATENT OFFICE. *Prospecting for petroleum deposits. Inventor: D. HITZMAN. Fecha de solicitud: 10, Diciembre, 1956. 2.880.142. Fecha de aprobación: 31, Marzo, 1959.*

WAGNER, Manfred; WAGNER, Martin; PISKE, Joachim; SMIT, Robert. *Case histories of microbial prospection for oil and gas, onshore and offshore in northwest Europe. En: Surface exploration case histories: Applications of geochemistry, magnetics, and remote sensing. D. Schumacher and L. A. LeSchack, eds., AAPG Studies in Geology No. 48 and SEG Geophysical References Series No. 11, 2002. p. 453–479.*

WHITTENBURY, R.; PHILLIPS, K.; WILKINSON, G.; *Enrichment, isolation and some properties of methane utilizing bacteria. En: J. Gen. Microbiol. Vol. 61, 1970. p. 205-218.*