

**ESTUDIO DE LOS PROCESOS TERMOGENICOS Y BACTERIOGENICOS EN  
LA GENERACION DE GAS ASOCIADO A MANTOS DE CARBON EN LA  
FORMACION GUADUAS**

**YULLY KATHERINE ARAQUE NUÑEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGIA  
BUCARAMANGA**

**2011**

**ESTUDIO DE LOS PROCESOS TERMOGENICOS Y BACTERIOGENICOS EN  
LA GENERACION DE GAS ASOCIADO A MANTOS DE CARBON EN LA  
FORMACION GUADUAS**

**YULLY KATHERINE ARAQUE NUÑEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el Título de  
Geólogo.**

**Director:  
MARIO GARCÍA GONZÁLEZ, Ph.D.  
Geólogo**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGIA  
BUCARAMANGA  
2011**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Grupo de Investigación de Hidrocarburos y Carbones de la Universidad Industrial de Santander, por el financiamiento de este proyecto de investigación dirigido por el Profe Mario García González.

Al Profe Mario por su apoyo y guía incondicional durante todo el desarrollo del proyecto y a todas las personas que aportaron su granito de arena en la realización de esta investigación: El Grupo de Investigación de Hidrocarburos y Carbones, el Centro Internacional de Física (CIF), el Grupo de investigación en Microbiología, el Laboratorio de Consultas Industriales, Yuri y Humberto Carvajal.

## **DEDICATORIA**

A mi Machonga con todo mi amor, a mis padres Gloria y Alvaro, mi hermano Camilo y mi hermoso sobrino Andrés.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION	17
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
2. MARCO GEOLOGICO	20
2.1 MARCO TECTÓNICO	20
2.2 MARCO ESTRATIGRÁFICO	21
2.3 ESTRATIGRAFÍA DE LA FORMACIÓN GUADUAS	23
3. GASES ASOCIADOS AL CARBON	25
4. ARCHAEAS METANOGÉNICAS EN MANTOS DE CARBON	31
4.1 ARQUEOBACTERIAS METANOGÉNICAS	31
5. GEOQUIMICA DE AGUAS ASOCIADAS A MANTOS DE CARBON PRODUCTORES DE GAS METANO	34
6. METODOLOGIA	37
6.1 MUESTREO DE CARBONES	39
6.2 MUESTREO DE CARBONES CON EQUIPOS DE DESGASIFICACIÓN- CANISTERS	39
6.3 MUESTREO DE GASES	43
6.4 MUESTREO DE AGUAS	43
6.5 ANÁLISIS A MUESTRAS DE CARBÓN:	44
6.5.1 Reflectancia de la vitrinita:	44

6.5.2 Medición de carbono orgánico total (TOC):	44
6.5.3 Desgasificación de carbones:	45
6.6 ANÁLISIS A MUESTRAS DE GAS:	45
6.6.1 Cromatografía de gases:	45
6.6.2 Análisis de isotopos de $\delta_{13}C$ y $\delta D_1$ en muestras de gas metano ( $CH_4$ ):	46
6.7 ANÁLISIS A MUESTRAS DE AGUA	46
7. RESULTADOS DE ANALISIS A MUESTRAS DE CARBON, GASES Y AGUAS	48
7.1 REFLECTANCIA DE LA VITRINITA	48
7.2 CARBONO ORGÁNICO TOTAL (TOC)	49
7.3 DESGASIFICACIÓN DE CARBONES	50
7.4 RESULTADOS DE ANÁLISIS A MUESTRAS DE GAS	52
7.4.1 Cromatografía de gases	52
7.4.2 Isotopos de $\delta_{13}C$ y $\delta D_1$ en metano	55
7.4.2.1 Resultados de los isotopos $\delta_{13}C$ y $\delta D_1$ en metano del primer muestreo de gases.	55
7.4.2.2 Resultados de los isotopos $\delta_{13}C$ y $\delta D_1$ en metano del segundo muestreo de gases.	57
7.5 RESULTADOS DE ANÁLISIS A MUESTRAS DE AGUA	58
7.5.1 Clasificación según el diagrama de Piper	61
7.5.2 Clasificación de aguas según Stiff	63
7.5.3 Clasificación según Sulin 1946 y Dieksey	63
7.6 RESULTADOS PRELIMINARES DE BACTERIAS ENCONTRADAS EN MUESTRAS DE AGUAS.	65
8. DISCUSION DE RESULTADOS	68
8.1 ANÁLISIS DE REFLECTANCIA DE LA VITRINITA	68
8.2 ANÁLISIS DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL	69
8.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE DESGASIFICACIÓN DE CARBONES	70
8.4 ANÁLISIS DE CROMATOGRFÍA DE GASES E ISOTOPOS	71

8.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ISOTOPOS DE $\delta_{13}\text{C}$ Y $\delta\text{D}_1$	75
8.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE AGUA	78
CONCLUSIONES	83
REFERENCIAS CITADAS	85

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Ubicación de los mantos de carbón.	38
Tabla 2. Ubicación de mantos con sus valores de reflectancia de la vitrinita.	48
Tabla 3. Ubicación de los mantos con sus valores de TOC.	49
Tabla 4. Ubicación de los mantos con volúmenes de gas en cm <sup>3</sup> /1000g de carbón	50
Tabla 5. Composición de los gases, índice de sequedad C <sub>1</sub> /C <sub>1-6</sub> y el Log <sub>10</sub> de la relación molecular de C <sub>1</sub> /C <sub>3+C6</sub>	52
Tabla 6. Datos de isotopos de δ <sub>13</sub> C y δ D <sub>1</sub> , de muestras de gas tomadas en Ubate.	55
Tabla 7. Datos de isotopos de δ <sub>13</sub> C y δ D <sub>1</sub> , de muestras de gas tomadas en el laboratorio.	57
Tabla 8. Resultados de los análisis de aguas realizados en campo.	59
Tabla 9. Resultados de análisis de aguas realizados en el Laboratorio de Consultas Industriales	59
Tabla 10. Clasificación de aguas según diagrama de Piper	62
Tabla 11. Clasificación de las aguas según Sulin (1946) y Dieksey (1986).	63
Tabla 12. Clasificación de las aguas del área de estudio Sutatausa -Cundinamarca según Sulin (1946) y Dieksey (1986).	64
Tabla 13. Composición de gases	72
Tabla 14. Isotopos de δ <sub>13</sub> C y δ D <sub>1</sub> de las muestras de gas y clasificación por origen.	75
Tabla 15. Clasificación de muestras de agua según diagrama de Piper, Sulin y Dieksey	78

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Mapa geológico del área Carbonífera Checua-Lenguazaque.	17
Figura 2. Principales Rasgos Tectónicos en Cundinamarca.	21
Figura 3. Columna Estratigráfica generalizada para la Sabana de Bogotá.	22
Figura 4. Columna generalizada de la Formación Guaduas, sección Sutatausa	24
Figura 5. Generación de gases biogénicos y termogénicos en carbón	25
Figura 6. Arqueas metanogénicas:	32
Figura 7.1. Consorcio de arqueas metanogénicas:	33
Figura 8. Localización del área de estudio en el Sinclinal Checua-Lenguazaque	37
Figura 9. Desacople de la tapa.	40
Figura 10. Canister con muestra de carbón.	41
Figura 11. Desalojar 100 ml de agua	42
Figura 12. Equipos canisters y dataloguer	42
Figura 13. Toma de muestra de gas en tubo vacutainers	43
Figura 14. Diferentes sitios de vertedero de las aguas que salen de los mantos de carbón.	44
Figura 15. Esquema del sistema CGMS 5.1 y curva de desgasificación del Manto once- la Ciscuda del sector la Esperanza.	45
Figura 16 . a) Estanque donde se recogió una muestra de agua, b) Equipo de medición de pH, c) Kit de medición de dureza total.	47
Figura 17. Cromatograma del Manto 1-Zona del Triunfo	54
Figura 18. Cromatograma del Manto 7-Zona la Esperanza	54
Figura 19. Cromatograma de isótopo de $\delta_{13}C$ para el manto 5 del Triunfo	56
Figura 20. Diagrama de Piper para las muestras de agua	62

Figura 21. Clasificación promedio de aguas según Stiff-Agua sulfatada cloro sódico magnésico	63
Figura 22. Imágenes de bacterias encontradas en la muestra de agua del manto 19.	66
Figura 23. Diagrama de Piper (triángulo) y Stiff donde muestra el promedio de la clasificación de las aguas del área de estudio (punto rojo)- Agua sulfatada cloro sódica magnésica.	82

## LISTA DE GRAFICAS

	<b>Pág.</b>
Grafica 1. Teoría de máximo potencial de gas termogénico en mantos de carbón de baja madurez (Meissner, 1984)	27
Grafica 2. Relación isotópica del $\delta_{13}C$ carbono con el $\delta D_1$ deuterio en el metano, para varios tipos de depósitos	28
Grafica 3. Diagrama de Bernard, presenta el $\text{Log}_{10}$ relación molecular $C_1/C_2+C_3$ y la composición isotópica del $\delta_{13}C$ en el metano.	30
Grafica 4. Estudios hechos en la cuenca de Powder River Basin, Wyoming and Montana	34
Grafica 5. Días de desgasificación de mantos Vs el volumen en $\text{cm}^3$ .	51
Grafica 6. Desgasificación del Manto 11(Ciscuda 2).	51
Grafica 7. Desgasificación del Manto 19 (7 Bancos).	52
Grafica 8. Concentración de aniones y cationes en el área de estudio – Cundinamarca.	61
Grafica 9. Reflectancia de la vitrinita Vs profundidad de los mantos analizados	68
Grafica 10. Carbono orgánico total Vs espesor acumulado	69
Grafica 11. Volumen en $\text{cm}^3$ de gas acumulado en 2000gr de carbon de cada muestra Vs espesor acumulado.	70
Gráfica 12. Muestra la relación molecular de $C_1/ C_3+ C_6$ Vs el isotopo de $\delta_{13}C$ en metano.	72
Grafica 13. Composición cuantitativa de gases metano, butano y hexano Vs espesor acumulado.	74
Grafica 14. Concentración isotópica de $\delta_{13}C$ y $\delta D_1$ en metano en los gases de los mantos del área de estudio	76
Grafica 15. Comparación de miliequivalentes por litro de Powder River Basin, Wyoming, cuencas productoras de CBM de Estados Unidos y Sutatausa Colombia.	79

Grafica 16. Clasificación en porcentaje de las aguas del área de estudio según la salinidad y el total de sólidos disueltos.

80

## RESUMEN

**TITULO: ESTUDIO DE LOS PROCESOS TERMOGENICOS Y BACTERIOGENICOS EN LA GENERACION DE GAS ASOCIADO A MANTOS DE CARBON EN LA FORMACION GUADUAS\***

**AUTOR:** Araque N.Yully Katherine\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Metano, carbón, termogénico biogénico reflectancia, arqueas, metanogénicas. Isótopos.

**CONTENIDO:** La Formación Guaduas en la Cordillera Oriental de Colombia, con rango de edades entre el Maastrichtiano y el Paleógeno, contiene carbones bituminosos altos en volátiles tipo A, con valores de reflectancia de vitrinita entre 0,69 y 0,97 %, indicando que la Formación Guaduas se encuentra en la ventana de generación de gas termogénico. Los gases asociados a los mantos de carbón se caracterizan por presentar una composición dominada por el contenido de metano, es cual es mayor al 98% correspondiente a índices de sequedad del 100%. Así mismo presenta cantidades menores al 2% de butano y hexano.

El origen de los gases encontrados se estableció mediante los análisis isotópicos de  $\delta_{13}C$  y  $\delta D_1$  en metano, así como también con la composición molecular de los gases de hidrocarburos. Los resultados obtenidos indican que en la Formación Guaduas los diferentes mantos de carbón presentan orígenes variados como son: gases termogénico, gases biogénicos y gases de mezcla entre los anteriores.

Los gases termogénicos se presentan en los mantos con mayor contenido en volumen de gas por unidad de masa, mientras que los gases biogénicos están presentes en los mantos con menor contenido de gas. Los gases mezclados presentan un contenido intermedio entre los dos anteriores.

La geoquímica de las aguas asociadas a los mantos de carbón indica que la mayoría de estas aguas son de tipo sulfato de sodio, las cuales impiden el crecimiento de las arqueas metanogénicas, indicando que los gases biogénico se formaron por reducción de  $CO_2$ . Las pruebas de cultivos microbianos realizados en muestras de las aguas asociadas a los mantos de carbón muestran consorcios microbianos de bacilos y cocos gran positivos y bacilos gran negativos o de bacterias fermentativas desarrolladas en medios anaeróbicos que reflejan la posible generación de gases biogénicos por fermentación del acetato.

---

\* Tesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, Mario García González, Ph D., Profesor titular de Geología

## ABSTRACT

**TITLE: STUDY OF THE PROCESSES TERMOGENIC AND BACTERIOGENIC IN THE GENERATION OF COAL METHANE BED IN THE GUADUAS FORMATION\***

**AUTHOR:** Araque N. Yully Katherine\*\*

**Key words:** Methane, coal, thermogenic, biogenic, vitrinite reflectance, archaeas, methanogenic. isotopes.

**CONTENT:** The Guaduas Formation In the Eastern Cordillera of Colombia with an age span between Maastrichtian to Paleogene contains high volatile bituminous coals with vitrinite reflectance values between 0.69 to 0.97%. These characteristics indicate that the Guaduas Formation is in the thermogenic gas window. The coal gases are characterized by a methane dominated composition with minor quantities of butane and hexane the (<2%).

The coal gas origin was determined by isotopic analysis of  $\delta_{13}C$  and  $\delta D_1$  in methane, and also by their molecular gas composition of the hydrocarbon gases. Results indicate that the Guaduas Formation coal-seams present different origins ranging from thermogenic, biogenic and mixed gases from the previous two gases.

The thermogenic gases show a exhibit a higher gas content, in volume per coal mass unit, than the biogenic gases. The mixed gases show an intermediates gas content between the previous thermogenic and biogenic.

The coal associated waters in the Guaduas Formation present sodium sulphate type waters that impede growing of archaeas microorganism; therefore the biogenic gases were formed by  $CO_2$  reduction.

Microbial cultures obtained from coal waters under anaerobic conditions showed the presence of bacillus and coccus gram positive and gram negative that could correspond to acetate fermentative bacteria.

---

\* Thesis

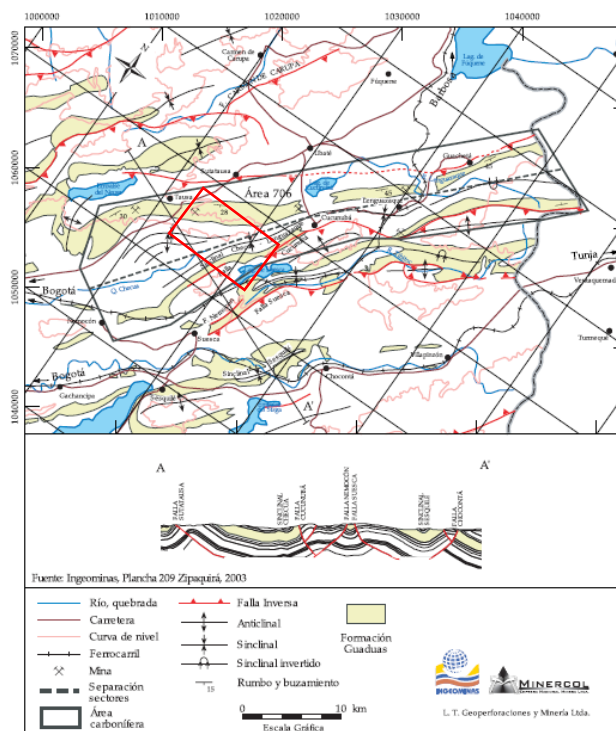
\*\* Faculty of engineering Physicochemistrys, Escuela de Geología, Mario García González, Ph. D., Geology's Titular profesor.

## INTRODUCCION

En la cuenca de Bogotá se presentan manifestaciones de gas metano en la mayoría de minas que explotan carbón en Cundinamarca, una de ellas es el área Carbonífera Checua- Lenguazaque la cual se ubica en jurisdicción de las localidades de Ubaté, Guachetá, Lenguazaque, Cucunubá, Suesca, Nemocón, Sutatausa y Tausa.

El área de estudio se ubica en la localidad de Sutatausa, se encuentra en parte de la plancha 209-I-D-2 y 209-II-A-3, entre las coordenadas X=1024072 a X=1030698 y entre las coordenadas Y=1067053 a Y=1070461.

**Figura 1. Mapa geológico del área Carbonífera Checua-Lenguazaque.**  
(Modificado de Acosta y Ulloa, 1997), área de estudio cuadro rojo.



Las manifestaciones de metano en el área son el motivo principal a tratar en este trabajo el cual establecerá el origen de los gases, la composición de los mismos, la cantidad en que se presentan y la relación con la calidad del agua en cada manto de carbón a analizar.

El objetivo de este trabajo consistió en explicar la presencia de gases asociados a carbón de diferentes orígenes en diferentes mantos. Para sustentar la aparición de gases de origen biogénicos y termogénicos en los tres segmentos se recurrió a los análisis de reflectancia de vitrinita ( $R_o$ ), TOC, volumen de desgasificación en muestras de carbón, análisis de cromatografía de gases, isotopos de  $\delta_{13} C$  y  $\delta D_1$  en metano y análisis composicional de las aguas contenidas en los mantos de carbón.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El grupo de Investigación en Hidrocarburos y carbones ha realizado un seguimiento exhaustivo a la Formación Guaduas con respecto a la estratigrafía, clasificación de carbones mediante varias técnicas, calidad química del agua, volumen de gas y composiciones de los gases encontrados en el Sinclinal Checua-Lenguazaque a lo largo de varios años.

Es importante conocer el origen de los gases que se encuentran en este sinclinal ya que es una de las áreas más representativas en cuanto al potencial de gas metano en minas de carbón, esto conlleva a evaluar varios parámetros entre los cuales se estudiaron los isotopos de  $\delta_{13}\text{C}$  y  $\delta \text{D}_1$  en el gas metano, los cuales según los rangos estandarizados permiten identificar el origen del gas, sea de tipo biogénico generado por Archaea metanogénicas, gas termogénico producto de la madurez termal del carbón o mezclas de gases.

La tarea para lograr este objetivo fue tomar muestras de carbón, de gases y de aguas de base a techo de la Formación Guaduas, implementando una serie de análisis tales como análisis de reflectancia de la vitrinita, carbono orgánico total (TOC), desgasificación de carbones, cromatografía de gases, análisis de isotopos  $\delta_{13}\text{C}$  y  $\delta \text{D}_1$  en el metano y estudio de la química del agua asociada a los mantos de carbón. Con la recopilación de la anterior información se puede identificar el origen de los gases asociados a mantos de carbón de la Formación Guaduas en el Sinclinal de Checua - Lenguazaque.

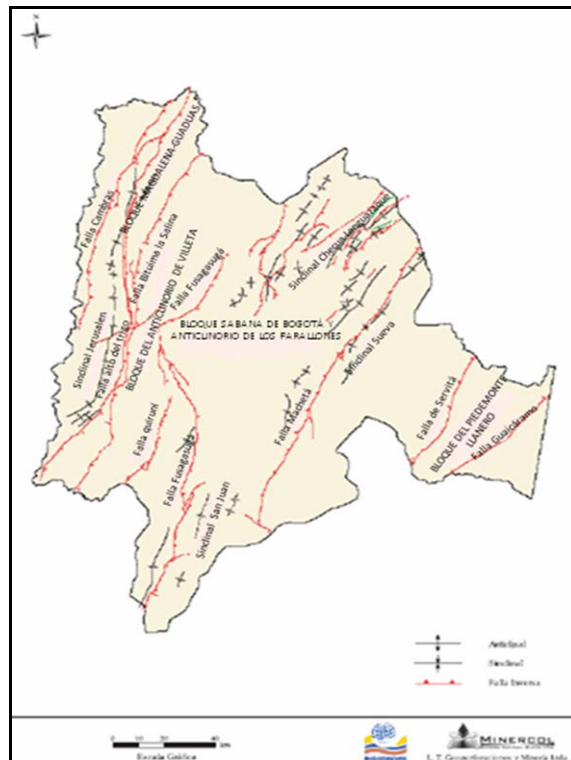
## **2. MARCO GEOLOGICO**

### **2.1 MARCO TECTÓNICO**

Dentro del área de la Sabana de Bogotá se puede establecer dos estilos estructurales: el primero, localizado en el flanco oriental de la Cordillera Oriental, al oriente del sinclinal de Checua, con fallas de cabalgamiento con vergencia al Oriente y las otras de menor importancia se comportan como retrocabalgamiento con vergencia hacia el Occidente. El segundo estilo estructural se presenta al occidente, está caracterizado por fallas de cabalgamiento con vergencias al occidente como sistemas imbricados que nacen y son controlados por fallas de dirección noroeste que sirven como rampas laterales.

En la cuenca de la Sabana de Bogotá se presentan amplios anticlinales de tectónica sencilla y áreas cretácicas apretadas como los sinclinales Rio Frio, Neusa, Carupa, Teusa-suesca y el sinclinal Checua-Lenguazaque en donde se desarrolla el estudio del presente trabajo.

**Figura 2. Principales Rasgos Tectónicos en Cundinamarca.**  
Tomado de Ingeominas (2004).



La Formación Guaduas se presenta en el Sinclinal Checua-Lenguazaque, estructura asimétrica de rumbo SW-NE que se extiende por más de 60 kilómetros, con su flanco oriental más inclinado de que el occidental he invertido en casi su totalidad. En el flanco oriental los estratos buzan hasta 85° con inversión y truncamientos en los mantos de carbón, colapso de estructuras por presión de capas dificultando así la explotación del mismo.

## 2.2 MARCO ESTRATIGRÁFICO

La Sabana de Bogotá se ubica en la parte central de la Cordillera Oriental y en ella afloran rocas desde el Cretácico Superior al Cuaternario. Las formaciones más

antiguas que corresponden a ambientes marinos están representadas en las formaciones Chipaque (Cretáceo superior-Cenomaniano?), La Frontera, Simijaca y Conejo (Turoniano-Santoniano), en el Campaniano las condiciones de sedimentación varían y se depositan en zonas distales la Formación Lidita Superior y la Formación Areniscas Dura (Cretácico superior. Coniaciano superior. A Campaniano) en zonas proximales y continua la sedimentación en el Campaniano Superior con la Formación Plaeners (Cretácico superior. Maastrichtiano); la regresión se completa y deja como último registro marino la Formación Labor-Tierna y la parte inferior de la formación Guaduas (Maastrichtiano. Paleógeno) y empieza una sedimentación continental de tipo fluvial.

**Figura 3. Columna Estratigráfica generalizada para la Sabana de Bogotá.**

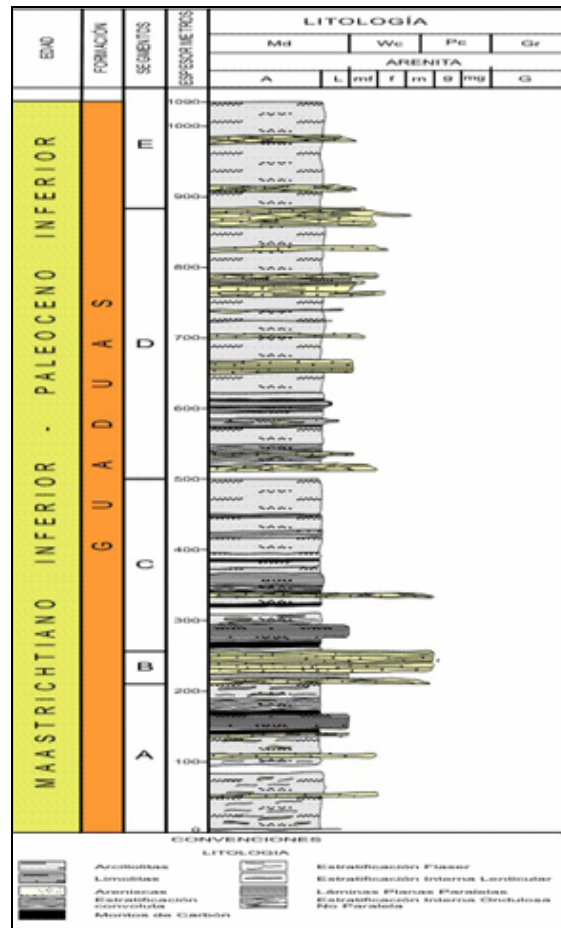
Modificada de Ulloa y Rodríguez, 1991.

EDAD		EPOCA	FORMACION
ERA	PERIODO		
CENOZOICO	CUATERNARIO		TITALA
	NEOGENO	PLIOCENO	
		MIOCENO	
	PALEOGENO	OLIGOCENO	USME
		EOCENO	REGADERA BOGOTA
		PALEOGENO	CACHO
	MESOZOICO	CRETACEO	Maastrichtiano
Campaniano			GUADALUPE
Santoniano			
Coniaciano			CHIPAQUE
Turoniano			
Cenomaniano			UNE
TEMPRANO		Albiano	
		Barremiano	FOMEQUE
		Hauteriviano	
		Valanginiano	
	Berriasiano	GRUPO CAQUEZA	
PRE-CRETACICO			

### **2.3 ESTRATIGRAFÍA DE LA FORMACIÓN GUADUAS**

La Formación Guaduas fue descrita inicialmente por Hettner (1892, en De Porta, 1974), quien denominó Guaduas a todos los materiales que en la región de Bogotá se encuentran por encima de la Formación Guadalupe. Posteriormente Hubach (1931 y Alvarado, 1932) denominan la Formación Guaduas limitada en su parte inferior por la Formación Guadalupe, y en la parte superior por la Arenisca Cacho. Sarmiento (1992) asigna una edad Maastrichtiano Superior -Paleoceno temprano (70-62.4 Ma) de acuerdo a estudios de palinología. Sarmiento (1994) divide la Formación Guaduas en nueve segmentos, posteriormente Montoya, D y Reyes, G Ingeominas (2005) hacen una división en 5 segmentos. El segmento inferior (A), incluye los segmentos S1 y S2 de Sarmiento (1994), el segmento (B) reconocido como arenisca la Guía y equivale al segmento S3 de Sarmiento (1994). El segmento (C), equivale a los segmentos S4 y S5 de Sarmiento (1994). El segmento (D), equivale a los segmentos S6, S7 y S8 de Sarmiento (1994) y el segmento (E) corresponde al segmento S9.

**Figura 4. Columna generalizada de la Formación Guaduas, sección Sutatausa (Modificado de Sarmiento, 1994).**



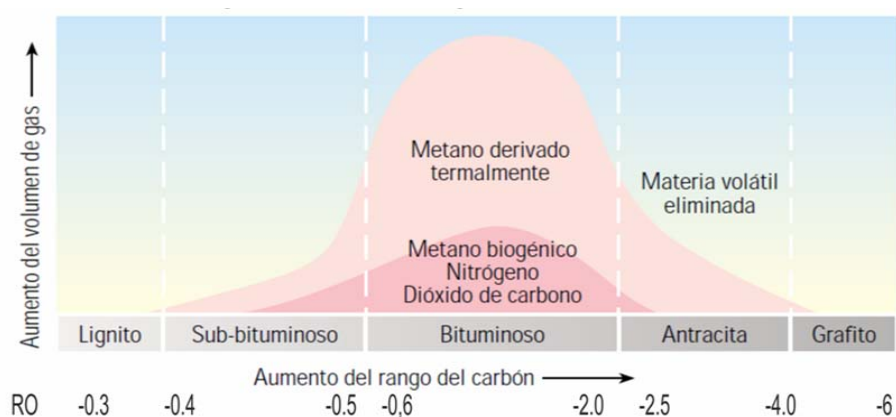
Posteriormente Rincón y Rocha (2007) estudian la formación y proponen con base en análisis de la estratigrafía de secuencias quince segmentos con veicieseis mantos de carbón para la Formación Guaduas en los sectores comprendidos entre la Sección del Triunfo, Montecristo y Lenguaque en el Sinclinal de Checua-Lenguaque. De los cuales el segmento uno contiene los mantos inferiores (uno, dos, tres, cuatro), el segmento cinco contiene los mantos medios (cinco, siete, once, doce) y el segmento ocho contiene los mantos de carbón superiores (diecisiete, dieciocho, diecinueve), los demás segmentos contienen mantos y cintas no tan importantes como las antes mencionadas.

### 3. GASES ASOCIADOS AL CARBÓN

La generación de gas en mantos de carbón es resultado de distintos procesos de acumulación preservación y transformación de la materia orgánica de origen vegetal que da como resultado la formación de depósitos de turba los cuales son transformados a carbones por procesos que se denominan carbonificación llevados a cabo desde la diagénesis hasta el metamorfismo. Durante estos procesos se generan importantes cantidades de gas bacteriano en las etapas iniciales y posteriormente de gases termales por descomposición de la molécula de kerogeno en carbones. La Figura 5 ilustra la cantidad relativa de generación de gas termal durante el proceso de maduración térmica o carbonificación. El gas generado es de composición predominante de metano con cantidades menores de  $C_2-C_6$ ,  $CO_2$  y  $CO$ . Los gases generados se encuentran en tres formas: gas libre presente en poros, y fracturas del carbón, gas adsorbido que corresponde al gas adheridos a superficies de fracturas o diaclasas del carbón y gas absorbido que se encuentra en espacios intra-moleculares dentro del kerogeno.

**Figura 5. Generación de gases biogénicos y termogénicos en carbón.**

Al aumentar la temperatura y la presión, aumenta el rango del carbón junto con su capacidad de generar y almacenar metano.



En la diagénesis la materia orgánica es convertida en turba y posteriormente a lignito y carbones subbituminosos. Durante este proceso se lleva a cabo la generación de gas biogénico en condiciones de anoxia por las bacterias metanogénicas de dominio Archaea (Woese and others,1990) a profundidades menores de 600 metros, temperaturas menores de 50°C, madurez termal aproximada a 0,5 Ro, en sedimentos ricos en materia orgánica con valores mayores de 0,5 en TOC(Claytonn,1992) que presenten un espacio poroso considerable para que prosperen las bacterias, con suficientes aportes de agua con valores de pH mayores de 4.

Los gases biogénicos se clasifican en gases biogénicos de generación temprana y gases biogénicos de generación tardía, los gases de generación temprana son producto de la reducción del CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> y se generan poco después de la depositación de la roca fuente(Rice y Shurr,1980;Rice y Claypool, 1981) y el gas de generación tardía es producto de la reducción del acetato por parte de las bacterias metanogénicas las cuales actúan después de un amplio tiempo de haberse depositado la roca fuente y asociadas a grandes aportes de agua(Unconventional shallow biogenic gas systems. Boletín de AAPG, 2002)

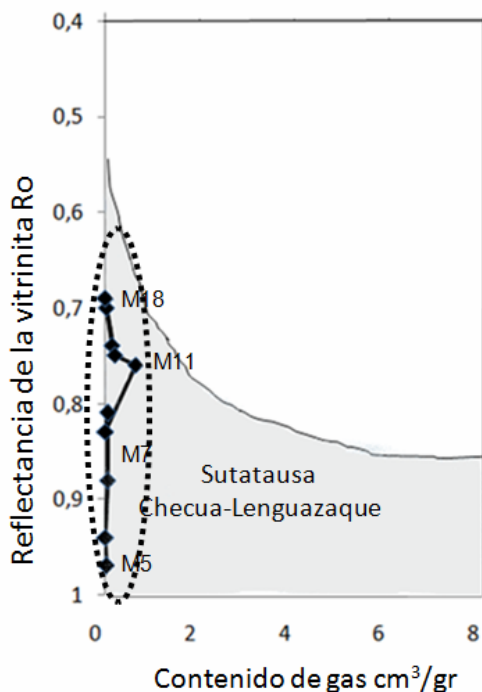
Estos gases presentan cambios composicionales durante la carbonificación y se pueden clasificar según el índice de sequedad C<sub>1</sub>/C<sub>1-6</sub>, valores mayores a 0,99 para gases muy secos y entre 0,94 y 0,99 para gases secos, los cuales se desprenden de material húmico rico en oxígeno, asociados a pocas cantidades de gases como etano, propano, butano o hexano. El gas biogénico se distingue generalmente por la composición molecular de 99% en metano.

La otra etapa de la carbonificación donde se obtiene metano de tipo termogénico es a partir de la catagénesis, donde la profundidad supera los 600m, la temperatura es mayor de los 100°C, la madurez termal es mayor de 0,5 Ro y el porcentaje de agua es casi nulo. A partir de la catagénesis los carbones

subbituminosos son convertidos en bituminosos altos, medios y bajos en volátiles, los ácidos fulvicos y húmicos son convertidos en kerogeno y estos a su vez se degradan en bitumen y por ultimo en petróleo mas gas y residuo; en la transición de catagénesis a metagénesis es generado en mayor cantidad el gas metano termogénico (Tissot & Welte, 1984).

La generación de gas termogénicos en capas de carbón se divide en dos etapas la inicial y la secundaria, los primeros gases termogénicos se generan a partir del carbón bituminoso alto en volátiles con un rango entre 0,5 y 0,8 Ro y los secundarios a partir de 0,8 Ro hasta su declive en rangos entre 1,8 a 3 Ro.

**Grafica 1. Teoría de máximo potencial de gas termogénico en mantos de carbón de baja madurez (Meissner, 1984)**, donde los puntos representan los mantos de carbón analizados según el volumen obtenido en  $\text{cm}^3/\text{gr}$  de carbón Vs la madurez termal.

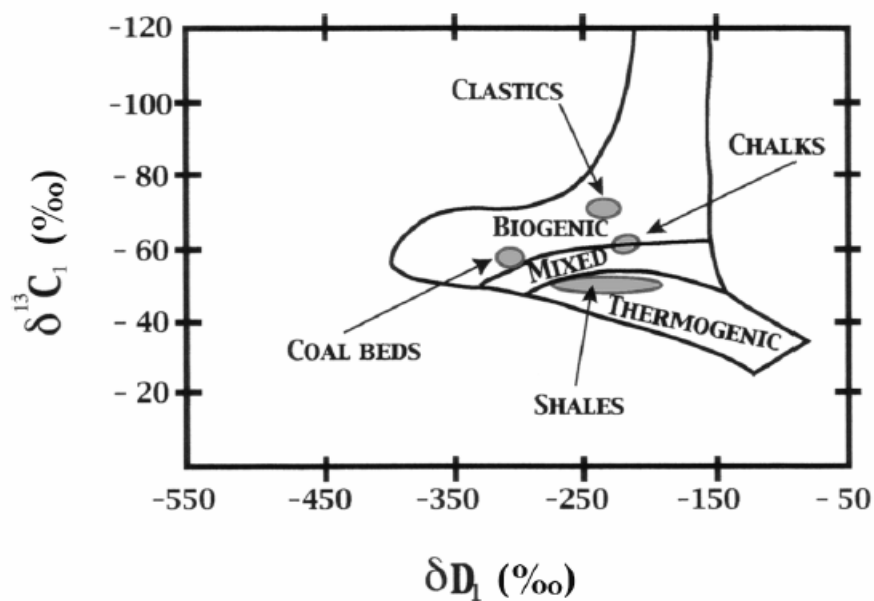


Los gases termogénicos de generación temprana se caracterizan por contener grandes cantidades de etano, propano, y otros componentes de gas húmedo derivados de carbones ricos en hidrogeno .Los gases generados a partir de carbón pobre en hidrogeno o que estuvo sometido a degradación bacteriana secundaria no contienen cantidades importantes de componentes de gas húmedo. (Rice et al., 1992).

Estos gases son clasificados como húmedos con valores de índice de sequedad ( $C_1/C_{1-6}$ ) entre 86 a 0,94 y muy húmedos con valores inferiores a 0,86 (Scott et al., 1991<sup>a</sup>) y pueden contener etano hasta de un 11%.

Para conocer el origen del gas encontrado se recurre a los análisis isotópicos de  $\delta^{13}C$  y  $\delta D_1$  en metano expresados como índices analíticos, los rangos de estos valores se utilizan para distinguir los campos de composición que suelen caracterizar los gases biogénicos y los termogénicos (ver grafica 2).

**Grafica 2. Relación isotópica del  $\delta^{13}C$  carbono con el  $\delta D_1$  deuterio en el metano, para varios tipos de depósitos (Modificado de Rice, 1993a).**



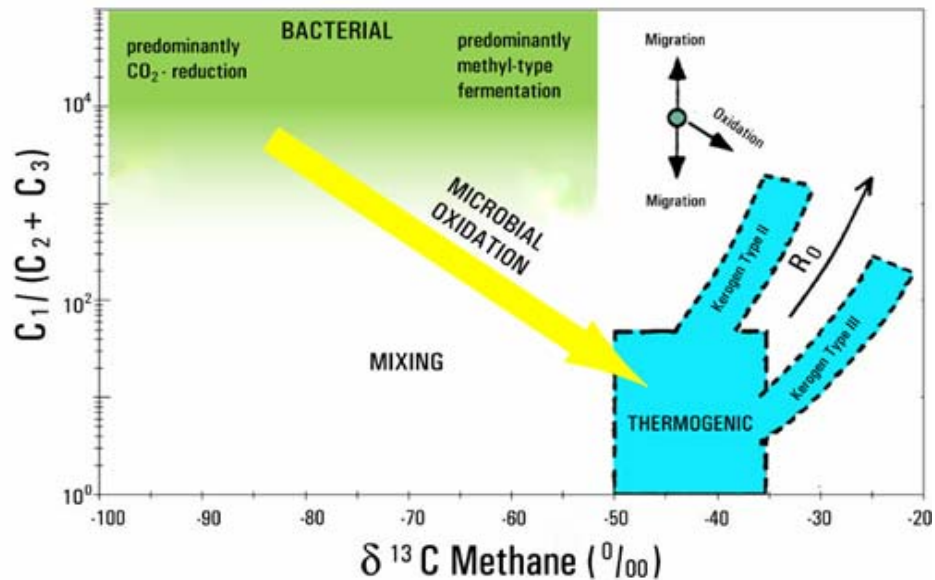
El gas metano biogénico resultado de reducción de  $\text{CO}_2$  presenta isotopos livianos en carbono, el rango de valores de  $\delta_{13}\text{C}$  en el metano están entre -55 a -110 por mil y enriquecidos en deuterio, el rango de valores de  $\delta \text{D}_1$  son -150 a -250 por mil ;en contraste con el metano derivado de la fermentación del acetato es isotópicamente más pesados en carbono, el rango de valores de  $\delta_{13}\text{C}$  son de -40 a -70 por mil y agotados en deuterio, el rango de valores  $\delta \text{D}_1$  son de -250 a -400 por mil.(Dudley D.Rice).

Debido a que la mayoría de los gases biogénicos están formados por reducción de dióxido de carbono hace que las composiciones isotópicas iniciales y posteriores sean controladas por el carbono en el dióxido de carbono reflejado en los isótopos de carbono del metano. Esto puede variar lo largo del tiempo geológico.

El rango del isotopo  $\delta_{13}\text{C}$  para gases termogénicos están entre -26 a -50 los cuales tienden a ser los más positivos y el rango del isotopo  $\delta \text{D}_1$  está entre -110 a -250(drift gas).

El diagrama de Bernard permite determinar el origen de los gases asociados a carbón, sean biogénicos por reducción de  $\text{CO}_2$ , por fermentación del acetato o si son termogénicos, conociendo la relación molecular  $\text{C}_1\text{-C}_6$  y la composición isotópica del carbono en el metano (ver grafica 3).

**Grafica 3. Diagrama de Bernard, presenta el  $\text{Log}_{10}$  relación molecular  $\text{C}_1/\text{C}_2+\text{C}_3$  y la composición isotópica del  $\delta_{13}\text{C}$  en el metano. Diagrama modificado de Bernard y otros (1978); Faber y Stahl (1984); y Whiticar (1994).**



La composición isotópica de los gases biogénicos y termogénicos se puede modificar a través de la oxidación bacteriana del metano, la cual se puede hacer en vía aeróbica o anaeróbica reduciendo el  $\text{C}_{12}$ , y cambiando los valores de  $\delta_{13}\text{C}$  en el metano haciéndolos más positivos (Barker and Fritz, 1981; Whiticar et al., 1986a). La oxidación bacteriana del metano puede variar los valores isotópicos para que parezcan metano termogénicos.

La oxidación del metano ( $\text{CH}_4 + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{O}$ ), se desarrolla por un consorcio microbiano de Arqueas y bacterias reductoras de sulfatos; las bacterias encargadas de oxidar el metano son las ANME (anaeróbico methanotroph) y está íntimamente relacionadas con las bacterias arqueas metanogénicas.

## 4. ARCHAEEAS METANOGÉNICAS EN MANTOS DE CARBON

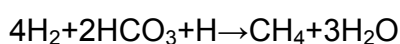
La generación de gas metano biogénico se lleva a cabo en estado de anoxia en el cual el proceso de acidogenesis o fermentación de los monómeros por parte de las bacteria acidogenicas que producen los ácidos volátiles (acetato, propionato, ácido butirato, ácido fórmico), alcoholes, dióxido de carbono e hidrogeno, materia prima para que las bacteria acetanogenicas degraden el propionato a acetato, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y las Archaeas metanogénicas en la metanogénesis generen metano y dióxido de carbono con trazas de otros gases (sulfuro de hidrogeno, amoniaco, nitrógeno, mercaptanos y aminas) (Ghaly, 1996).

### 4.1 ARQUEOBACTERIAS METANOGÉNICAS

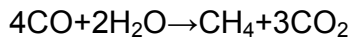
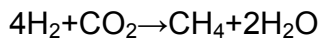
Los metanogenos pertenecen al dominio Archaea (Le Mer y Roger, 2001). Se clasifican en siete grupos principales que comprenden un total de 17 generos. Hay bacilos cortos y largos, cocos en variada ordenación, células en forma de placas y metanogenos filamentosos. Unos pueden ser Gram positivos, otros a Gram negativos, es decir es el color con el que se visualiza la bacteria en microbiología, el color de las gran positivas de color morado y gran negativas de color rosa o rojo.

Las Archaeas metanogénicas se puede establecer tres clases en función del substrato principal, dividiéndose en los hidrogenotróficos, que consumen H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y fórmico, metilotróficos que consumen metil y los acetoclasticos, que consumen acetato.

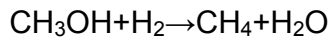
- Metanogénesis hidrogenotrofica a partir de H<sub>2</sub>



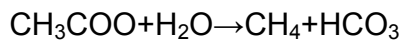
Metanogénesis a partir de sustrato de tipo CO<sub>2</sub>



- Metanogénesis a partir de sustrato con grupo metil



- Metanogénesis a partir de sustrato de acetato



En el grupo de bacterias que usan el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> y lo convierten en metano se encuentran las bacterias: *Methanobacterium thermoautrophicum* las, *methanobrevibacter* y las *methanospirillum* que solo utiliza H<sub>2</sub>.

Este grupo viven en condiciones óptimas de crecimiento a temperaturas entre 35-70°C y pH entre 6-8,5 y en bajas concentraciones de NaCl.

### Figura 6. Arqueas metanogénicas:

- a) *Methanobacterium thermoautrophicum*, con identificación de características 0.2 - 1.0 μm x 1.2 - 120 μm de tamaño b) *Methanospirillum hungatei*; phase contrast (×2000). c) *Methanobrevibacter smithii*. Microbiology, 5th ed., McGraw-Hill, 2001.



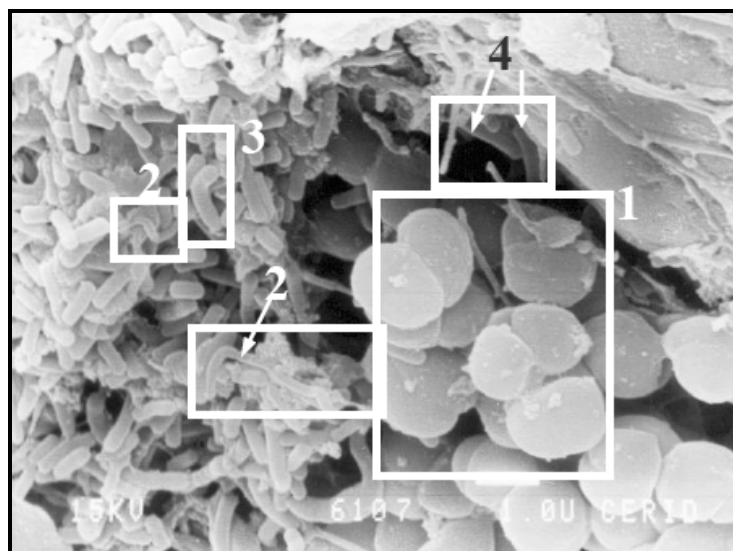
Entre el grupo de las metanogénicas que utilizan el acetato se encuentran dos diferentes microorganismos que pueden convertir el ácido acético en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> que son la *Methanosarcina* sp. y la *Methanosaeta* sp bacterias que pueden existir no más de 37°C y en pH entre 5 a 8. La bacteria *Methanosarcina* sp crece en

acetato y en otros sustratos como el hidrogeno, formato y metanol y se mantiene en concentraciones altas de acetato, Según Brummerler et al. (1985) produce metano en un rango de pH entre 5 - 8. La bacteria *Methanosaeta* sp. Crece únicamente en acetato y predomina a bajas concentraciones de acetato (Seece, 1996; Janssen, 2003; Batstone et al, 2004.), Según Brummerler et al. (1985) se presenta con un pH optimo de 7,8 y no se encuentra en pH por debajo de 6,8.

En la siguiente imagen se muestra la coexistencia de las bacterias acetogénicas que producen acetato (*Syntrophobacter wolinii*), sulfato reductoras (*Syntrophovibrio* sp), las metanogénicas: hidrogenotróficas que toman hidrogeno (*Methanospirillum* sp) y acetoclasticas que toman acetato (*Methanosarcina* sp).

**Figura 7.1. Consorcio de arqueas metanogénicas:**

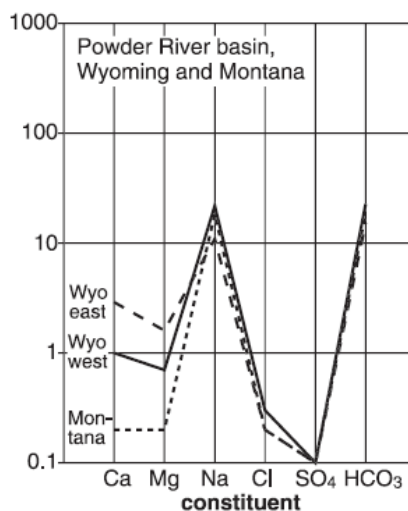
*Methanosarcina* sp; (2). Microorganismos filamentosos morfológicamente similares a sp *Methanospirillum* (3) los microorganismos en forma de coma se asemeja sp *Desulphovibrio*; (4). bacilo morfológicamente similares a *Syntrophobacter wolinii*.



## 5. GEOQUIMICA DE AGUAS ASOCIADAS A MANTOS DE CARBON PRODUCTORES DE GAS METANO

Las aguas de formación relacionadas con el gas metano biogénico que se encuentra en capas de carbón tienen un carácter químico común independiente de la formación litológica o de su edad. Estas aguas carecen de sulfato, calcio y magnesio; las aguas contienen principalmente sodio, bicarbonato y si están influenciadas por aguas marinas también contienen cloro como se observa en la Grafica 4, (Wayne A.Van Voast.).

**Grafica 4. Estudios hechos en la cuenca de Powder River Basin, Wyoming and Montana (Wayne A., Van, V.2003.)**



A continuación se mencionan los parámetros para la generación de gas biogénico en aguas asociadas a mantos de carbón:

El pH para el crecimiento de bacterias anaeróbicas causantes del origen del metano biogénico debe estar alrededor de 7, La conductividad en estas aguas

puede presentar valores altos debido a la presencia de una mayor cantidad de sales disueltas en el agua, el rango de salinidad debe estar en concentraciones bajas aproximadamente entre 7,3‰- 17,3‰ clasificando las aguas como salobres, La concentración del total de sólidos disueltos también es muy importante ya que un aumento en su concentración puede ser resultado de una mayor interacción agua-roca a lo largo de la trayectoria de flujo, el aumento de los TSD es generalmente resultado de un aumento en el contenido de sodio y bicarbonato en el agua.

Las aguas deben ser enriquecidas en el ion bicarbonato el cual se encuentra en mayor concentración fundamentalmente en aguas con pH menores a 8,3 empobrecidas de calcio y magnesio o en las que se produce liberación de CO<sub>2</sub> por ejemplo en la reducción de sulfatos. Su enriquecimiento representa la vía preferida para la metanogénesis. La concentración del Na debe ser mayor que la de Ca y la Mg en aguas asociadas con CMB a menos que su contenido pueda variar en función del ambiente deposicional, postdeposicional o por mezcla.

Estas aguas deben ser empobrecidas en sulfatos, calcio y magnesio; El sulfato se encuentra en gran cantidad a lo largo del flujo de agua debido a disoluciones de yeso o de la oxidación de la pirita y marcasita, pero en presencia de aguas pobres en oxígeno se inicia la reducción del sulfato por parte de las bacterias sulfato reductoras las cuales utilizan el sulfato como agente oxidante, reduciéndolo a sulfuro. El empobrecimiento del catión calcio es probable por la precipitación de calcita y dolomita ya que se vuelven menos solubles en presencia del bicarbonato.

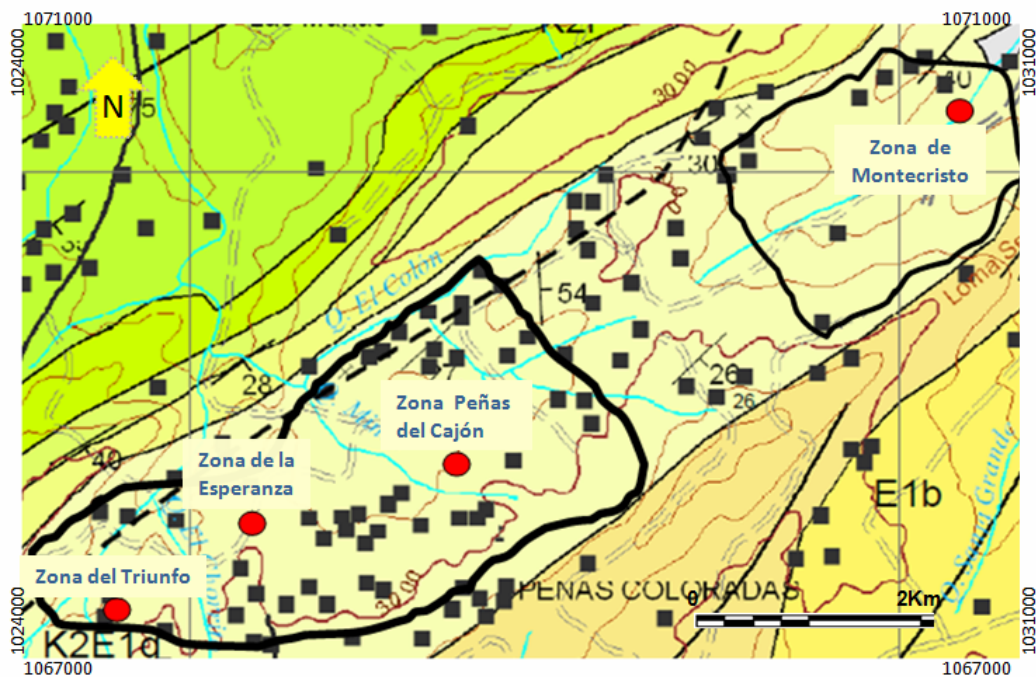
Al igual que el Ca, el Mg tienden a precipitar como calcita y dolomita. En aguas asociadas a CMB ya que estas están enriquecidas en bicarbonatos o por intercambio de cationes con las arcillas; causando bajas concentraciones de los cationes Ca y Mg. El catión potasio procede de la meteorización de los

feldspatos, este ion tiende a tener menor concentración en aguas subterráneas que el ion Na.

## 6. METODOLOGIA

El área de estudio se encuentra en el sector de Sutatausa en el flanco occidental del Sinclinal del Sinclinal Checua-Lenguazaque. Se seleccionaron la sección estratigráfica del Triunfo y de Montecristo con el objeto de muestrear mantos de carbón de toda la formación Guaduas.

**Figura 8. Localización del area de estudio en el Sinclinal Checua-Lenguazaque**



El primer muestreo pertenece a la sección del triunfo con adquisición de cuatro muestras de carbón (mantos uno, tres, cinco y siete) y seis muestras de agua (mantos uno, dos, tres, cinco, siete y la quebrada Chugas); el segundo muestreo pertenece a la sección del triunfo en la zona de la Esperanza, con tres muestras de carbón (mantos siete, once, doce) y tres muestras de agua (mantos siete, once

y doce). El tercer muestreo corresponde a la sección de Montecristo con dos muestras de carbón (mantos diecisiete y dieciocho) y el cuarto muestreo corresponde a la zona del Triunfo en Peñas del Cajón con una muestra de carbón(manto diecinueve) y una muestra de agua(manto diecinueve).

A continuación se presenta la tabla con la ubicación de los mantos, la zona a donde pertenecen, el espesor acumulado y la profundidad de extracción.

**Tabla 1.Ubicación de los mantos de carbón.**

Mantos por segmento	Mantos	COORDENADAS			Zonas por Sección	Esp acum(m)	Prof. de ext. (m)
		X	Y	Z			
Segmento ocho (mantos superiores)	Manto 19-7 Bancos	1027409	1068046	2947	Zona Peñas del Cajón	372,20	500
	Manto 18-Deposito	1030698	1070461	2702	Zona Montecristo	350,00	250
	Manto 17-Vidriosa	1030663	1070421	2711		337,03	88
Segmento cinco (mantos medios)	Manto 12- Vetachica	1025270	1067623	2876	Zona de la Esperanza	162,96	460
	Manto 11-La Ciscuda	1026281	1068006	2889		153,70	507
	Manto 7-la Quinta2	1026134	1067976	2873		116,66	230
	Manto 7-La Quinta	1025253	1067642	2872	Zona del Triunfo	116,66	200
	Manto 5-VetaGrande	1024072	1067053	2968		98,14	450
Segmento uno(mantos inferiores)	Manto 3	1024829	1067655	2882	Zona del Triunfo	44,44	500
	Manto 2	1024847	1067782	2846		38,88	0
	Manto1	1024657	1067531	2863		22,44	400
	Quebrada Chugas	1024825	1067796	1852		0,00	0

## **6.1 MUESTREO DE CARBONES**

Se implemento el método de canal, el cual consiste en tomar la muestra en el frente de explotación, eliminando una delgada capa de carbón de aproximadamente 10 cm.

Una vez se tiene expuesta una parte fresca del manto, se procede a limpiar el piso, para evitar contaminación de la muestra con restos de estéril o de carbón. Se recolecta una muestra de aproximadamente 20 Kg obtenida a partir de un canal perpendicular a la estratificación con dimensiones de alrededor de 25 cm de profundidad, 40 cm de ancho y la altura depende del espesor de cada uno de los mantos a muestrear, se procede a realizar una serie de cuarteos hasta obtener la cantidad de muestra requerida (aproximadamente 2Kg).

Las muestras obtenidas son empacadas en bolsas de polietileno, selladas en el mismo frente para evitar que sufra posteriores alteraciones, estas muestras son referenciadas inmediatamente teniendo en cuenta el nombre de la mina, el nombre del manto (según las compañías mineras), las coordenadas X, Y y Z obtenidas mediante GPS en la boca de la mina y el área minera definida inicialmente en este trabajo.

## **6.2 MUESTREO DE CARBONES CON EQUIPOS DE DESGASIFICACIÓN-CANISTERS**

Se lleva a cabo gracias al Sistema de Medición de Gas Contenido en una Muestra de Carbón (CGMS) proyecto realizado por el grupo de Física Aplicada y Desarrollo Tecnológico del Centro Internacional de Física (CIF). Este es un sistema que permite obtener el proceso de eliminación de gas de una muestra confinada.

Utilizando un sistema conformado por un Canister o cilindro metálico con tapa de seguridad al cual se le acopla un Datalogger o sistema que mide la salida del gas.

Una vez el Canister ha sido transportado a la mina se procede a realizar los siguientes pasos:

1. Se realiza el procedimiento de desacople de la tapa.

**Figura 9. Desacople de la tapa.**



2. Se coloca dentro del cilindro canister la muestra de carbón de dos kilogramos y se procede a llenar con agua limpia hasta el borde del cilindro del canister.

**Figura 10. Canister con muestra de carbón.**



3. A continuación se tapa el canister herméticamente teniendo la precaución de ubicar la tapa en la posición indicada con los espárragos del canister y presionar las manijas hasta asegurar completamente la tapa, se debe realizar el procedimiento inverso de desacople de la tapa.
4. Adicionalmente se debe verificar que la llave de paso de gas este cerrada, esto es transversalmente a la dirección del gas. en ningún momento se debe abrir la llave de paso del gas ya que se podría perder el gas generado hasta este momento.
5. Llevar el equipo Canister hasta el laboratorio.
6. Una vez tomada la muestra en campo se realizar el procedimiento para desalojar 100ml de agua del cilindro canister.

**Figura 11. Desalojar 100 ml de agua**



1. Canister armado con la muestra en su interior, en la parte inferior del cilindro se encuentra el sistema para desalojo de agua, para ello se ubica un recipiente aforado con la medida de 100ml.



2. Se debe desenroscar el tornillo hasta que el agua salga para llenar el recipiente, cuando se aproxime a la medida final de 100ml de agua se debe ir enroscando el tornillo para tener la medida exacta.

7. Acoplar el módulo de sensores sobre la tapa.

**Figura 12. Equipos canisters y dataloguer**



Acoplar los sensores sobre la tapa, ubicar la termocupla en el dataloguer y la manguera de salida de gas ajustada al Canister.

8. Una vez se verifique que todos los acoples estén bien se abre la válvula del gas para dar paso de gas hacia el modulo de sensores.

### 6.3 MUESTREO DE GASES

Cada Canister tiene un sistema de salida de gas por el cual se toma la muestra ,este está obstruido por un tapón de polietileno resistente a la presión que ejerce el gas dentro del Canister, se utiliza una jeringa de intravenosa, la cual es el medio de paso del gas del Canister a un tubo de vacutainers Serum con sello al vacío de 7ml, se introduce la jeringa primero en la salida de gas del canister y luego en el tubo de muestra ,se cuenta aproximadamente diez segundos y se extrae la jeringa rápidamente del tubo de muestra y luego del Canister.

**Figura 13.Toma de muestra de gas en tubo vacutainers**



### 6.4 MUESTREO DE AGUAS

Después de tomar la muestra de carbón y la muestra de carbón en los equipos canisters se ubica el vertedero de agua proveniente del manto en muestreo, se toma la muestra tal cual sale del manto, si es necesario se debe filtrar si es que sale con mucha turbidez, esta muestra se debe tomar en botellas plásticas preferiblemente que hayan sido usadas como empaque de agua potable para que no tenga restos de materia orgánica, el volumen a recoger depende de los análisis requeridos, aconsejablemente mas de 500ml.

**Figura 14. Diferentes sitios de vertedero de las aguas que salen de los mantos de carbón.**



## **6.5 ANÁLISIS A MUESTRAS DE CARBÓN:**

### **6.5.1 Reflectancia de la vitrinita:**

Se preparo la muestra de acuerdo a la normas ASTM D 2013 y ASTM D 2797, se realizo la medición de la reflectancia de la vitrinita de acuerdo a la norma ASTM D 2798 utilizando el microscopio Axiotron Zeiss modelo MOM400 de luz reflejada, con el objetivo Neofluar de 50x de inmersión en aceite, en el Laboratorio de Hidrocarburos y Carbones de la Universidad Industrial de Santander.

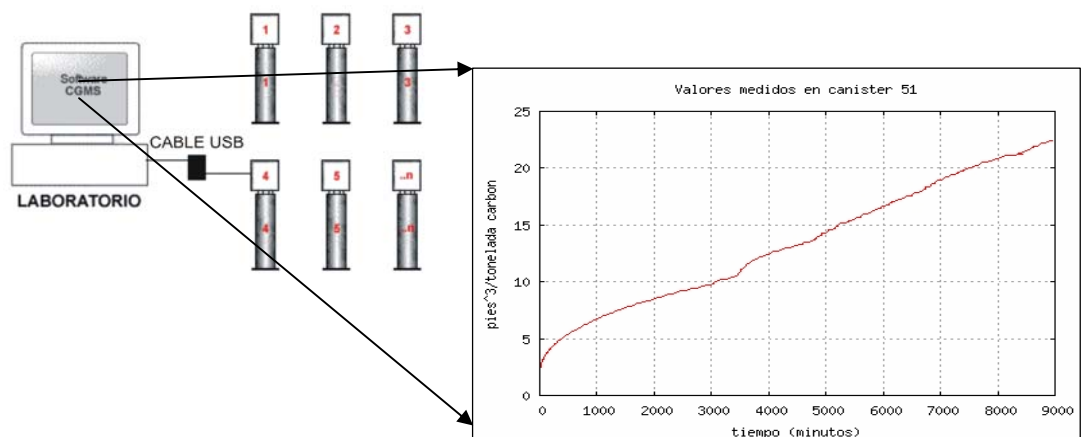
### **6.5.2 Medición de carbono orgánico total (TOC):**

Se preparo la muestra en base a norma Ust-158-p-027, se realizo la medición de TOC utilizando el equipo SC-144 Leco, a una temperatura de 1450°C en presencia de oxígeno, con el programa SC-144 el cual calcula el total de materia orgánica. Análisis realizado en el Laboratorio de Hidrocarburos y Carbones de la Universidad Industrial de Santander.

### 6.5.3 Desgasificación de carbones:

Se carga el Canister de la muestra y se adecuan los parámetros del experimento en el datalogger de a cuerdo a procedimiento dado por el CIF (Centro de investigaciones en física, inventores del equipo) y se esperan 15 días para la obtención del volumen producto de la desgasificación del carbón, mediante el programa CGMS 5.1 (El software encargado de realizar las tareas de captura, almacenamiento y visualización de la información es CGMS 5.1.)

**Figura 15. Esquema del sistema CGMS 5.1 y curva de desgasificación del Manto once- la Ciscuda del sector la Esperanza.**



## 6.6 ANÁLISIS A MUESTRAS DE GAS:

### 6.6.1 Cromatografía de gases:

Se implementa la técnica de a cuerdo a la norma ASTM D 1945-96 método estándar para análisis de gas natural por cromatografía de gases, para la determinación y cuantificación en muestras de GAC, la cuantificación de estos gases ( $C_1$ - $C_6$ ) se realizo calculando el factor de respuesta ( $R_f$ ) utilizando el patrón de referencia certificado de Agafano. Análisis realizado en el cromatografo de

gases Agilent, modelo HP6890.serie GC System PLUS utilizando la columna HP-1 methylsiloxane.

#### **6.6.2 Análisis de isotopos de $\delta_{13}C$ y $\delta D_1$ en muestras de gas metano ( $CH_4$ ):**

Se toma la muestra de gas del canisters en un vacutainers Serum con sello al vacio de 7ml por medio de una aguja de uso intravenoso, la medición de isotopo se realiza con el equipo Espectrómetro de masas GC-C-IRMS, los valores se reportan en comparación con la escala isotópica V-PDB, cada muestra es analizada en triplicados, el estándar usado es un gas metano para referencia interna del laboratorio(GAS D),previamente calibrado contra V-PDB; estos análisis fueron realizados en el laboratorio de Biogeoquímica en la Universidad de Bloomington-Indiana Estados Unidos, estos análisis fueron realizados por H. Carvajal.

#### **6.7 ANÁLISIS A MUESTRAS DE AGUA**

Las muestras de agua fueron sometidas a los siguientes análisis químicos in situ, temperatura, pH, Eh conductividad y salinidad. Estos análisis se realizaron con el equipo Multiparametro WTW 240, adicionalmente a las muestras se les determino alcalinidad, dureza total , nitratos, carbonatos, potasio y sulfatos con los test portátiles de Aquamerk y posteriormente fueron llevadas las diez muestras de agua al Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander en donde se les determino calcio, magnesio, sodio por el método de absorción atómica, cloruros por método argentometrico, bicarbonatos por el método trimétrico y sulfatos por el método turbidimetrico.

Luego que son obtenidos los resultados de los análisis en laboratorio se llevan los datos al programa Qualigraf (programa para análisis de calidad de agua-por

Funceme), el cual brinda la clasificación de las muestras por medio de los diagramas de Pípper, Stiff y clasificación de salinidad en base de total de sólidos disueltos.

**Figura 16 . a) Estanque donde se recogió una muestra de agua, b) Equipo de medición de pH, c) Kit de medición de dureza total.**



## 7. RESULTADOS DE ANALISIS A MUESTRAS DE CARBON, GASES Y AGUAS

### 7.1 REFLECTANCIA DE LA VITRINITA

**Tabla 2. Ubicación de mantos con sus valores de reflectancia de la vitrinita.**

Mantos por segmento	Mantos	Zonas por Sección	Esp acum(m)	Ro
Segmento ocho (mantos superiores)	Manto 19-7 Bancos	Zona Peñas del Cajón	372,20	0,74
	Manto 18-Deposito	Zona Montecristo	350,00	0,70
	Manto 17-Vidriosa		337,03	0,69
Segmento cinco (mantos Medios)	Manto 12-Vetachica	Zona de la Esperanza	162,96	0,75
	Manto 11-La Ciscuda		153,70	0,76
	Manto 7-La Quinta2		116,66	0,83
	Manto 7-La Quinta	Zona del Triunfo	116,66	0,81
	Manto 5-Veta Grande		98,14	0,88
Segmento uno(mantos Inferiores)	Manto 3	Zona del Triunfo	44,44	0,94
	Manto1		22,44	0,97

El promedio de la reflectancia de la vitrinita en el área de estudio es de 0,8; en los mantos inferiores es de 0,95 Ro en los medios de 0,8 Ro y en los mantos superiores es de 0,7.

## 7.2 CARBONO ORGÁNICO TOTAL (TOC)

**Tabla 3. Ubicación de los mantos con sus valores de TOC.**

Mantos por segmento	Mantos	Zonas por Sección	Esp acum(m)	TOC
Segmento ocho (mantos superiores)	Manto 19-7 Bancos	Zona Peñas del Cajón	372,20	76,80
	Manto 18-Deposito	Zona Montecristo	350,00	78,30
	Manto 17-Vidriosa		337,03	78,00
Segmento cinco (mantos medios)	Manto 12-Vetachica	Zona de la Esperanza	162,96	86,00
	Manto 11-La Ciscuda		153,70	70,70
	Manto 7-La Quinta2		116,66	82,50
	Manto 7-La Quinta	Zona del Triunfo	116,66	82,50
	Manto 5-Veta Grande		98,14	77,70
Segmento uno(mantos inferiores)	Manto 3	Zona del Triunfo	44,44	87,80
	Manto1		22,44	83,80

El promedio de carbono orgánico total (TOC) en el área de estudio es de 80,41; en los mantos inferiores es de 85,8 en los medios de 79,8 y en los mantos superiores es de 77,7 de TOC.

### 7.3 DESGASIFICACIÓN DE CARBONES

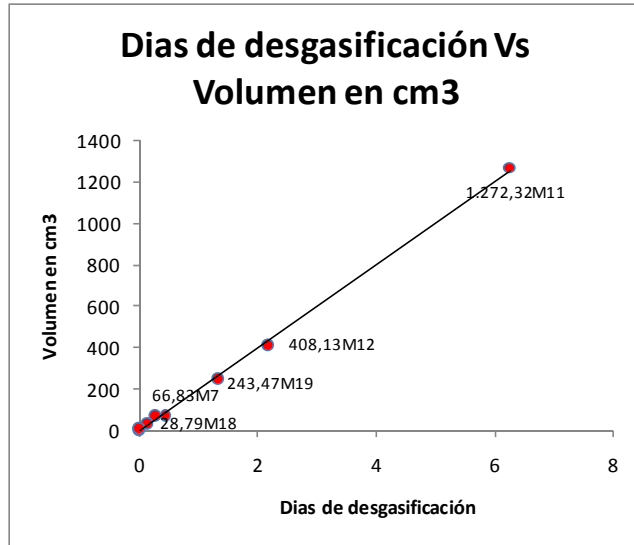
**Tabla 4. Ubicación de los mantos con volúmenes de gas en cm<sup>3</sup>/1000g de carbón**

Mantos por segmento	Mantos	Zonas por Sección	Esp acum(m)	Volumen cm <sup>3</sup>
Segmento ocho (mantos superiores)	Manto 19-7 Bancos	Zona Peñas del Cajón	372,20	121,74
	Manto 18-Deposito	Zona Montecristo	350,00	14,40
	Manto 17-Vidriosa		337,03	2,05
Segmento cinco (mantos medios)	Manto 12-Vetachica	Zona de la Esperanza	162,96	204,06
	Manto 11-La Ciscuda		153,70	636,15
	Manto 7- La Quinta2		116,66	2,05
	Manto 7-La Quinta	Zona del Triunfo	116,66	33,41
	Manto 5-Veta Grande		98,14	34,65
Segmento uno(mantos inferiores)	Manto 3	Zona del Triunfo	44,44	-
	Manto1		22,44	4,11

El promedio de gas producido en el segmento inferior es de 8,22cm<sup>3</sup> ya que el manto 3 no dio datos, el promedio de gas en el segmento medio es de 364,14 cm<sup>3</sup> y el del segmento superior es de 92,12 cm<sup>3</sup> para un total de 2105,30 cm<sup>3</sup> en 18000 gramos de carbón o 0,12cm<sup>3</sup>/gr obtenido en el muestreo.

A continuación se presenta una grafica que muestra en días el volumen que registro cada manto, se puede observar que la gran mayoría esta en menos de dos días de desgasificación en su tiempo total durante los dos meses y cuatro días.

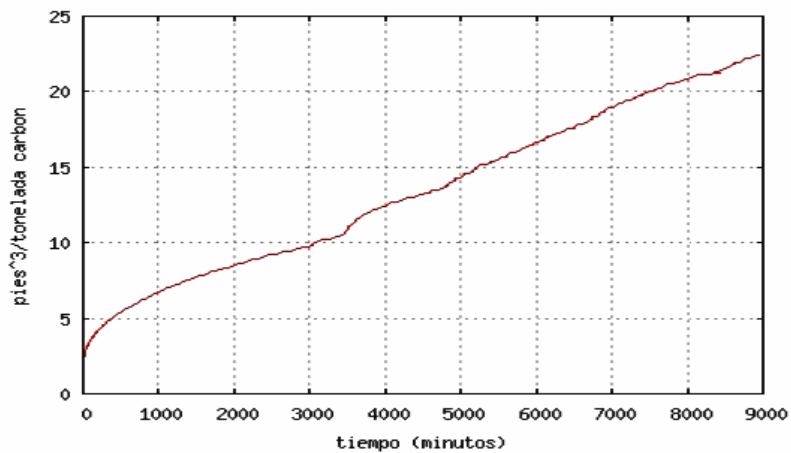
**Grafica 5. Días de desgasificación de mantos Vs el volumen en cm<sup>3</sup>.**



Se acostumbra a dar los datos de volumen en pies cúbicos es así que a continuación se presentan dos graficas pertenecientes a los mantos 11 (Ciscuda) y 19 (7Bancos) los que arrojaron mayor volumen de gas.

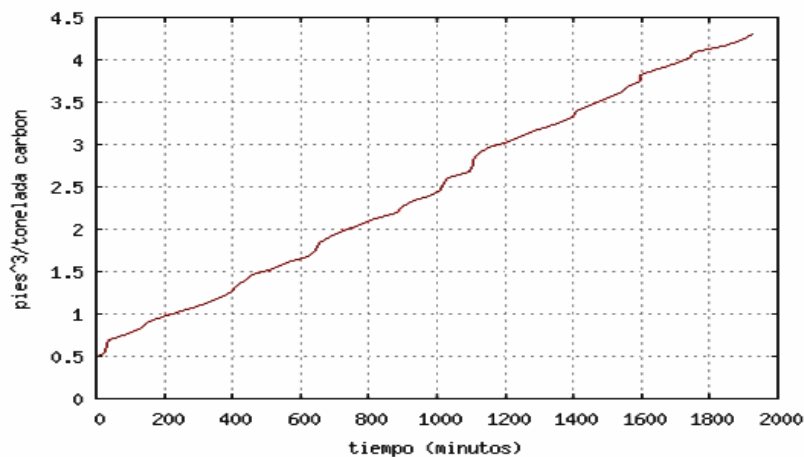
**Grafica 6. Desgasificación del Manto 11(Ciscuda 2).**

Volumen de casi los 25 pies<sup>3</sup> por tonelada de carbón obtenido en casi 7 días



### Grafica 7. Desgasificación del Manto 19 (7 Bancos).

Volumen de casi 4,5 pies<sup>3</sup> por tonelada de carbón obtenido en casi 2 días.



## 7.4 RESULTADOS DE ANÁLISIS A MUESTRAS DE GAS

### 7.4.1 Cromatografía de gases

**Tabla 5. Composición de los gases, índice de sequedad C<sub>1</sub>/C<sub>1-6</sub> y el Log<sub>10</sub> de la relación molecular de C<sub>1</sub>/C<sub>3</sub>+C<sub>6</sub>**

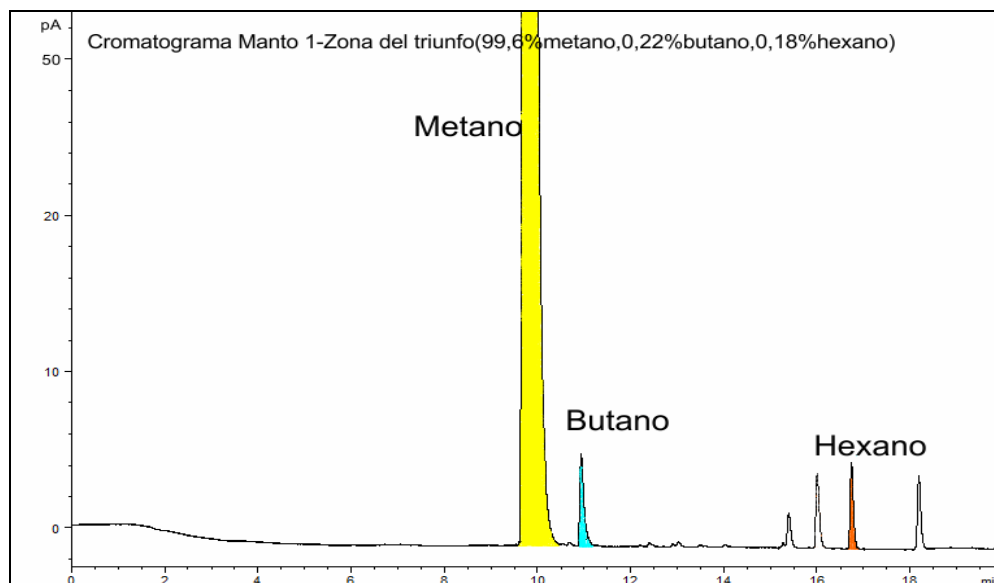
Mantos	Zonas por Sección	Esp acum(m)	%Metano	%Butano	%Hexano	C1/C <sub>1-6</sub>	Log <sub>10</sub> C <sub>1</sub> /C <sub>3</sub> +C <sub>6</sub>
Manto 19	Zona Peñas del Cajón	372,20	99,25	0,37	0,38	100	2,42
Manto 18	Zona Montecristo	350,00	99,71	0,19	0,10	100	2,72
Manto 17		337,03	97,12	1,59	1,29	100	1,79
Manto 12	Zona de la Esperanza	162,96	99,93	0,04	0,03	100	3,39
Manto 11		153,70	99,92	0,04	0,04	100	3,39
Manto 7		116,66	97,09	1,83	1,08	100	1,73
Manto 7	Zona del Triunfo	116,66	99,80	0,12	0,08	100	2,92
Manto 5		98,14	98,35	1,65	0,00	100	1,78
Manto 3		44,44	99,88	0,07	0,05	100	3,15
Manto 1		22,44	99,60	0,22	0,18	100	2,66

En los análisis hechos se presentan los gases metano, butano y hexano principalmente, además se cree que el metano y el etano coeluyen en el mismo pico por los registros en los tiempos de retención.

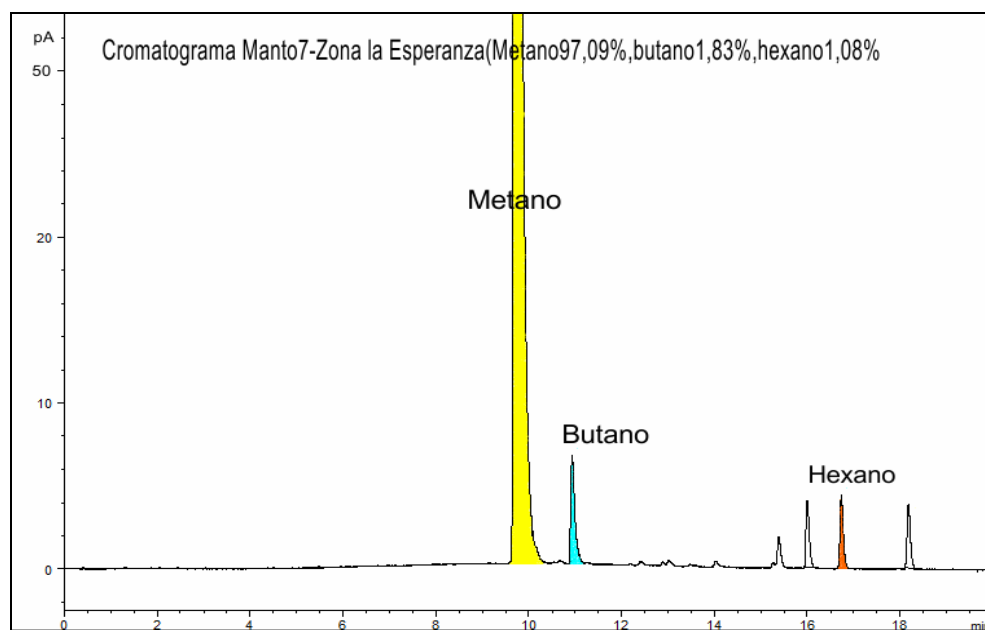
El promedio del metano en el segmento inferior es de 99,74%, en el segmento medio es de 99,02% y en el segmento superior es de 98,69%; el promedio de butano en el segmento inferior es de 0,15% en el segmento medio de 0,74% y en el segmento superior es de 0,72%; el promedio de hexano en el segmento inferior es de 0,12% en el medio de 0,25% y el segmento superior es de 0,59%.

El índice de sequedad ( $C_1/C_{1-6}$ ) es igual en todos los mantos de 100%, el promedio del  $\text{Log}_{10}$  de la relación molecular ( $C_1/C_3+C_6$ ) en toda la secuencia de mantos es de 2,60 ,el promedio de los mantos inferiores 1 y 3 del Triunfo es de 2,9 ,el promedio en los mantos medios 5,7 del Triunfo y 7,11,12 de la Esperanza es de 2,64 ,el promedio en de los mantos superiores 17,18 de Montecristo y 19 de Peñas del Cajón es de 2,31 .El valor máximo del logaritmo pertenece a los mantos 11 y 12 de la Esperanza, el valor mínimo del logaritmo pertenece al manto 7 de la Esperanza.

**Figura17.Cromatograma del Manto1-Zona del Triunfo**



**Figura18.Cromatograma del Manto 7-Zona la Esperanza**



#### 7.4.2 Isotopos de $\delta_{13}\text{C}$ y $\delta \text{D}_1$ en metano

El muestreo de gases se realizó el mismo día de recolección de las muestra de carbón en los Canister en el municipio de Ubate

##### 7.4.2.1 Resultados de los isotopos $\delta_{13}\text{C}$ y $\delta \text{D}_1$ en metano del primer muestreo de gases.

**Tabla 6. Datos de isotopos de  $\delta_{13}\text{C}$  y  $\delta \text{D}_1$ , de muestras de gas tomadas en Ubate.**

Mantos por segmento	Mantos	Zonas por Sección	Esp acum(m)	ISOTOPOS	
				$\delta \text{D}_1$	$\delta_{13} \text{C}$
Segmento ocho (mantos superiores)	Manto 19 7 Bancos	Zona Peñas del Cajón	372,20	-267,23	-59,19
	Manto 18- Deposito	Zona Montecristo	350,00	-265,41	-66,23
	Manto 17- Vidriosa		337,03	-122,83	-34,73
Segmento cinco (mantos medios)	Manto 12- Vetachica	Zona de la Esperanza	162,96	-247,11	-61,11
	Manto 11-La Ciscuda		153,70	-262,14	-49,39
	Manto 7-La quinta2		116,66	-107,01	-33,96
	Manto 7La Quinta	Zona del Triunfo	116,66	-223,40	-64,28
	Manto 5Veta Grande		98,14	-83,08	-43,89
Segmento uno(mantos inferiores)	Manto 3	Zona del Triunfo	44,44	-268,38	-54,64
	Manto1		22,44	-244,46	-77,81

#### Isotopos de $\delta_{13} \text{C}$ (Datos tomados por triplicados con precisión de 0,09%)

Los mantos 1 y 3 que corresponden a la zona del triunfo tiene un promedio de isotopos de  $\delta_{13}\text{C}$  de -66,15, los mantos del segmento medio al que corresponden

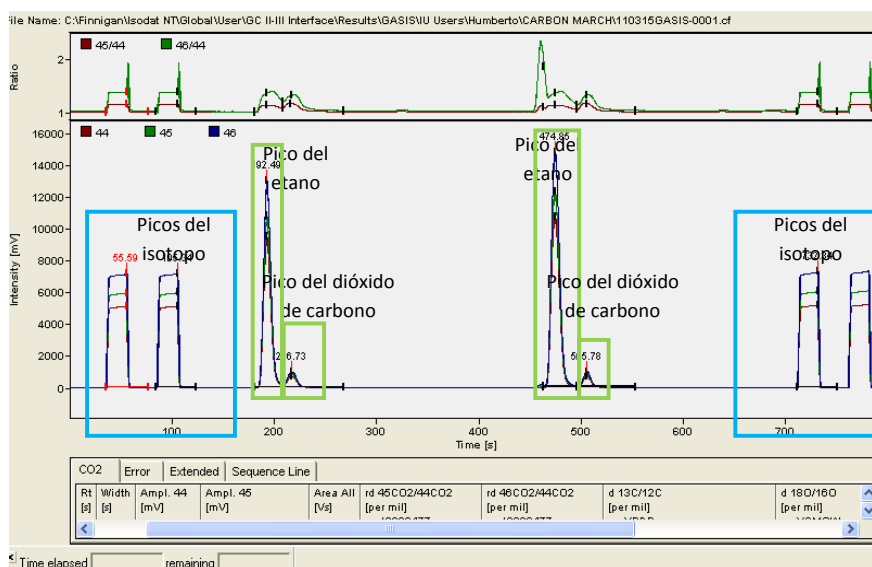
los mantos 5,7 que pertenecen al Triunfo y 7,11 y 12 a la zona de la Esperanza tienen un promedio de  $-50,52$ , se debe tener en cuenta que el manto 7 en el triunfo presenta un valor enriquecido en  $\delta_{13}C$  con  $-33,95$  y los mantos del segmento superior que al que corresponden los mantos 17,18 y 19 tienen un promedio del isotopos de  $\delta_{13}C$  de  $-53,38$ , además se presentan al igual que en el segmento medio un manto con enriquecimiento de  $\delta_{13}C$  de  $-34,73$  que corresponde al manto 17 – la vidriosa. Ver tabla 6.

### Isotopos de $\delta D_1$ (tomados por triplicados con precisión de 2,83%)

Toda la secuencia de mantos presentan un promedio de  $-209,11$  de  $\delta D_1$ , los mantos inferiores 1 y 3 del Triunfo presenta un promedio de  $-256,42$ , los mantos medios 5 y 7 del Triunfo y 7,11,12 de la Esperanza de  $-184,55$ , los mantos superiores 17,18 de Montecristo y 19 de Peñas del cajón, presentan un promedio de  $-218,49$  de  $\delta D_1$ , el manto que presenta el valor máximo es el manto 5 y el manto que presenta el valor mínimo es el manto 3.

**Figura 19. Cromatograma de isotopo de  $\delta_{13}C$  para el manto 5 del Triunfo**

Se observa los picos por triplicados del gas y los picos de metano y  $CO_2$ .



**7.4.2.2 Resultados de los isotopos  $\delta_{13}C$  y  $\delta D_1$  en metano del segundo muestreo de gases.** Las muestras de gas para estos análisis fueron tomadas en el laboratorio 64 días después de haber tomado las muestras de carbón en las minas de carbón. El objeto de este muestreo fue investigar la actividad bacteriana con relación a la generación de gases.

**Tabla 7. Datos de isotopos de  $\delta_{13}C$  y  $\delta D_1$ , de muestras de gas tomadas en el laboratorio.**

Mantos por segmento	Mantos	Zonas por Sección	Esp acum(m)	ISOTOPOS 2	
				$\delta D_1$	$\delta_{13}C$
Segmento ocho (mantos superiores)	Manto 19-7 Bancos	Zona Peñas del Cajón	372,20	-232,09	-57,58
	Manto 18- Deposito	Zona Montecristo	350,00	-237,93	-59,42
	Manto 17 -Vidriosa		337,03	-197,17	-40,36
Segmento cinco (mantos medios)	Manto 12 -Vetachica	Zona de la Esperanza	162,96	-241,79	-58,02
	Manto 11-La Ciscuda		153,70	-228,77	-48,78
	Manto 7-la quinta2		116,66	-228,63	-32,73
	Manto 7-La Quinta	Zona del Triunfo	116,66	-234,78	-62,90
	Manto 5-Veta Grande		98,14	-228,63	-50,77
Segmento uno(mantos inferiores)	Manto 3	Zona del Triunfo	44,44	-218,73	-40,31
	Manto1		22,44	-229,19	-55,34

**Isotopos de  $\delta_{13}C$  (Datos tomados por triplicados con precisión de 0.09%)**

El promedio del isotopo  $\delta_{13}C$  para toda la sección es de -50,62, el promedio en el segmento de mantos inferior 1 y 3 del Triunfo es de -47.82, el promedio para el segmentos de los mantos medios 5,7 del Triunfo, 7 de la Esperanza, 11,12 de la Esperanza es de -50,64, el promedio para el segmento de los mantos superiores 17,18 de Montecristo y 19 de Peñas del Cajón es de -52.45 en el isotopo de  $\delta_{13}C$ . El valor máximo lo presenta el manto 7 de la Esperanza con -32.73 y el valor mínimo lo presenta el mismo manto pero en la zona del Triunfo con -62,9, manto con el dato empobrecido en este isotopo.

### **Isotopos de $\delta D_1$ (Datos tomados por triplicados con precisión de 2,021%)**

Toda la secuencia de mantos presentan un promedio de  $-227.76$  de  $\delta D_1$ , los mantos inferiores 1 y 3 del Triunfo presenta un promedio de  $-223.95$ , los mantos medios 5,7 del Triunfo, 7, 11,12 de la Esperanza de  $-232.52$ , los mantos superiores 17,18 de Montecristo y 19 de Peñas del cajón, presentan un promedio de  $-222.39$  de  $\delta D_1$ .El valor mayor pertenece al manto 17 de Montecristo, el valor mínimo pertenece al manto 12 en la Esperanza con  $-241.79$ .

### **7.5 RESULTADOS DE ANÁLISIS A MUESTRAS DE AGUA**

El área de estudio presenta un promedio de pH de 7,23, valor que cambian desde 8,35 hasta 3,79, correspondientes a la Mina el Triunfo-Manto 2 y Mina la Esperanza - Manto 7-LaQuinta 2. Ver tabla 8

El promedio de temperatura medida en campo es de  $16,13$  °C medidas que corresponden a aguas recién salidas de las minas y medidas tomadas en vertederos de agua.

El promedio de conductividad  $1874,6$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valores que cambian desde 3650 hasta 384, correspondientes a la Mina la Esperanza Pro 5-Manto 11(Ciscuda 1 y 2) y a Quebrada Chugas.

**Tabla 8.Resultados de los análisis de aguas realizados en campo.**

MTA	MANTOS	ZONA	UBICACION	ESPEJOR ACUMU	TSD mg/L	pH	SAL ppl	CONDUCTI (µS/cm)	ALCALI (mmol/L)	DUREZA (meq/L) CaCO3	CO3 meq/L	K meq/L	N03 meq/L
10	Mantos superiores	Peñas del Cajón	Manto 19-7 Bancos. Mina El Alizo	372,20	1358,50	7,20	0,90	2090	4,90	0,76	0,00	0,21	0,38
9	Mantos medios	Zona de la Esperanza	Manto 12-Vetachica Mina Esperanza	162,96	1203,80	7,23	0,80	1852	6,70	15,60	0,00	0,45	0,31
8			Manto 11-La Ciscuda .Mina Esperanza	153,70	2372,50	7,08	1,80	3650	5,00	4,68	0,00	0,02	0,28
7			Manto 7-la quinta-2.Mina Esperanza	116,66	1898,00	3,79	1,40	2920	—	16,47	0,00	0,70	0,38
6		Zona del Triunfo	Manto 7-La Quinta. Mina la Quinta	116,66	1090,10	7,25	0,70	1677	3,90	4,21	0,00	0,10	0,38
5	Manto 5-Veta Grande. Mina La Grande		98,14	737,80	8,25	0,30	1135	4,90	1,15	0,81	0,25	0,28	
4	Manto 3.Mina Huerta Vieja		44,44	874,90	7,93	0,50	1346	6,80	1,82	2,41	0,17	0,38	
3	Mantos inferiores		Manto 2.Mina El Triunfo	38,88	1086,80	8,35	0,70	1672	—	6,25	0,00	0,07	0,38
2		Manto1.Mina El Rumbón	22,44	1313,00	7,88	0,90	2020	7,50	0,36	1,61	0,23	0,38	
1		Quebrada Chuguas.	0,00	249,60	7,07	0,00	384	6,00	2,18	0,00	0,03	0,38	

**Tabla 9.Resultados de análisis de aguas realizados en el Laboratorio de Consultas Industriales**

MTA	MANTOS	ZONA	UBICACION	ESPEJOR ACUMU	Ca meq/L	Mg meq/L	Na meq/L	Cl meq/L	SO4 meq/L	HCO3 meq/L
10	Mantos superiores	Peñas del Cajón	Manto 19-7 Bancos. Mina El Alizo	372,20	0,76	0,37	14,65	0,41	22,70	5,23
9	Mantos medios	Zona de la Esperanza	Manto 12-Vetachica.Mina Esperanza	162,96	15,57	9,52	6,36	0,50	47,89	6,44
8			Manto 11-La Ciscuda. Mina Esperanza	153,70	4,67	3,00	22,66	2,03	31,23	5,23
7			Manto 7-la quinta-2.Mina Esperanza	116,66	16,44	10,12	6,38	2,44	46,91	0,40
6		Zona del Triunfo	Manto 7-La Quinta. Mina la Quinta	116,66	4,20	2,62	7,79	0,36	33,94	3,62
5	Manto 5-Veta Grande. Mina La Grande		98,14	1,14	0,56	10,18	0,41	6,49	4,43	
4	Manto 3.Mina Huerta Vieja		44,44	1,82	1,21	8,40	0,32	7,28	4,83	
3	Mantos inferiores		Manto 2.Mina El Triunfo	38,88	6,24	11,58	2,96	0,23	20,97	2,42
2		Manto1.Mina El Rumbón	22,44	0,36	0,28	12,52	0,68	11,40	6,85	
1		Quebrada Chuguas.	0,00	2,18	1,07	1,33	0,54	6,66	0,80	

El promedio de Dureza de 284,95 mg/L CaCO<sub>3</sub>, valores que cambian desde 823,5 mg/L CaCO<sub>3</sub> en la Mina la Esperanza Pro5- Manto 7- La Quinta 2 hasta 18 mg/L CaCO<sub>3</sub> en la Mina el Rumbón – Manto 1.

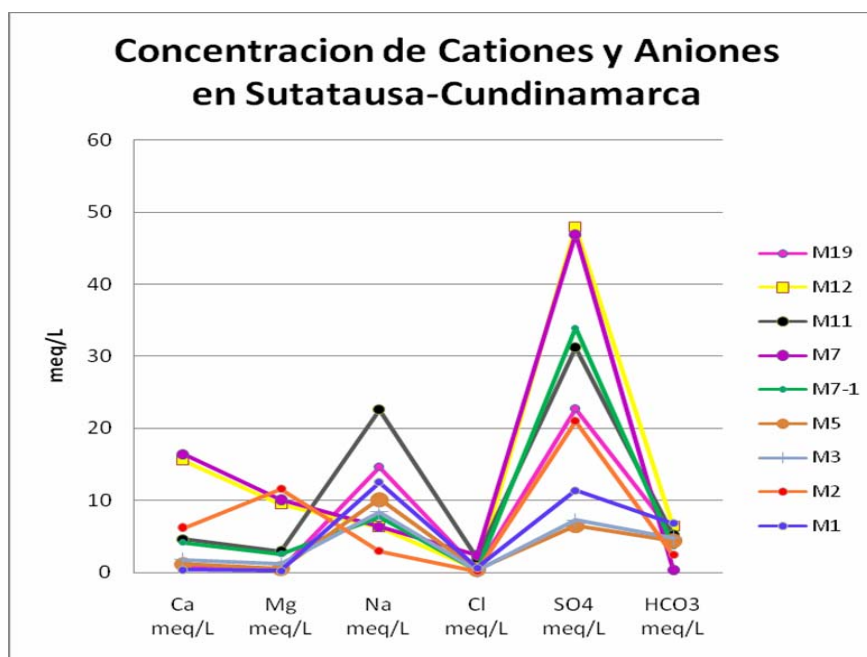
El promedio de alcalinidad es de 282,66 mg/L CaCO<sub>3</sub> valor que cambia de 194,37 mg/L CaCO<sub>3</sub> en el Manto la Quinta en el Triunfo hasta 373,8 mg/L CaCO<sub>3</sub> en el Manto 1 en el Triunfo. Clasificando las aguas de esta zona como muy amortiguadoras.

El promedio de salinidad de 0,88‰, con valor que cambian de 1,8 ‰ hasta 0‰, correspondiente a la Mina la Esperanza Pro 5- Manto 11(Ciscuda 1y 2) y la Quebrada Chuguas.

El promedio de TSD es de 1326,15mg/L y clasifica el agua como salobre, este dato varía de 2372,5 mg/L en El Manto 11- La Ciscuda en la zona de la Esperanza hasta 249,9mg/L en la Quebrada Chuguas en la Zona del Triunfo; lo anterior indica que la concentración de TSD es mayor en la Zona de la Esperanza que en la Zona del Triunfo.

El promedio de NO<sub>3</sub> es de 0,35 meq/L estando los valores más altos en la Zona del Triunfo y la tendencia más baja en la Zona de la Esperanza con valores de 0,28 meq/L.

**Grafica 8. Concentración de aniones y cationes en el área de estudio – Cundinamarca.**



Las concentraciones de los aniones y cationes se llevaron al Programa Qualigraf versión 2009 y se obtuvo el Diagrama de Piper y el de Stiff.

### 7.5.1 Clasificación según el diagrama de Piper

El diagrama de Piper muestra la clasificación de las aguas según las cuatro familias hidrogeoquímicas: Aguas sulfatadas o cloradas-cálcicas o magnesianas, aguas bicarbonatadas- cálcicas o magnésicas, aguas sulfatadas o cloro-sódicas, aguas bicarbonatadas- sódicas.

Donde se observa que la mayoría de las aguas cae en la clasificación de Aguas sulfatadas o cloro sódicas sector 12 con tendencias a aguas sulfatadas o cloro cálcicas o magnésicas, sector 9.

Figura 20. Diagrama de Piper para las muestras de agua

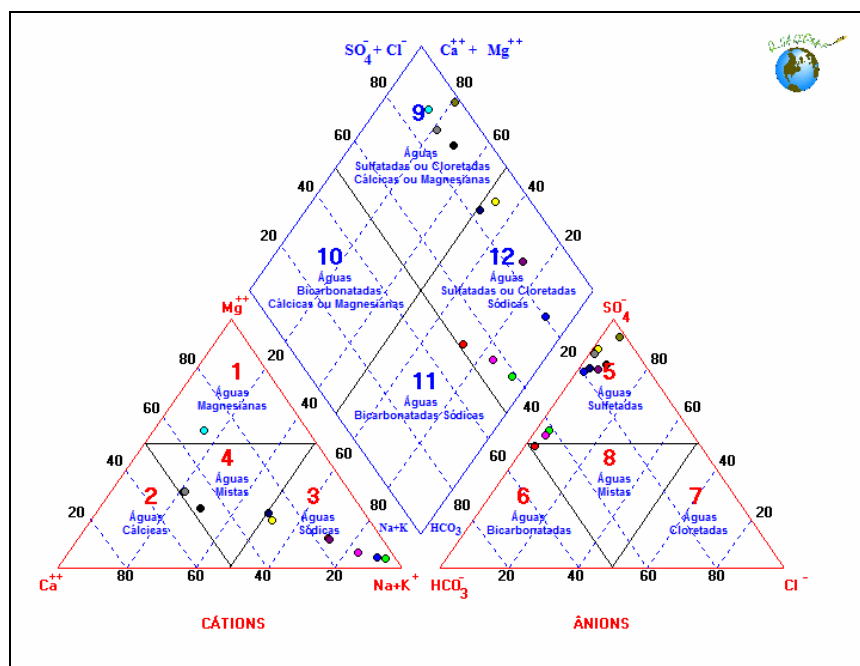


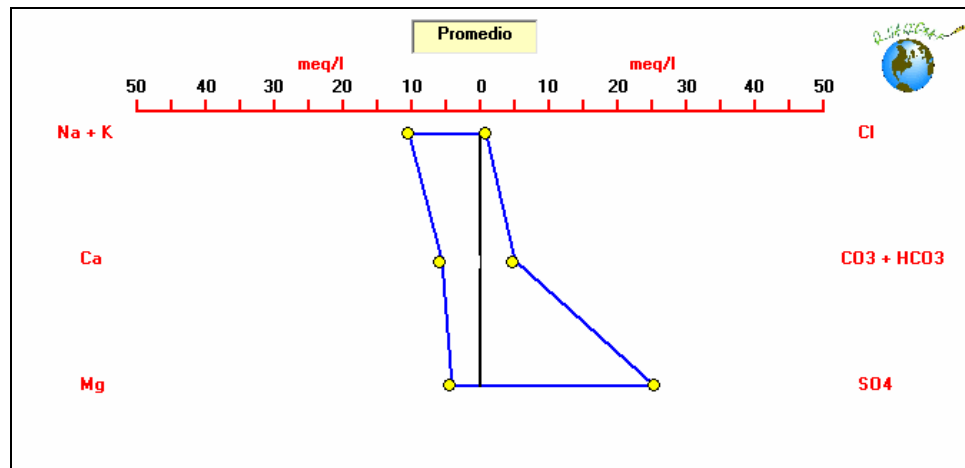
Tabla 10. Clasificación de aguas según diagrama de Piper

Mantos por segmento	Mantos	Zonas por Sección	Esp acum(m)	Clasificación de aguas según diagrama de Piper	Color
Segmento ocho (mantos Superiores)	Manto 19-7 Bancos	ZONA PEÑAS DEL CAJON	372,20	Sulfatada cloro sódica	●
	Manto 18-Deposito	ZONA MONTECRISTO	350,00	Sin muestra	-
	Manto 17-Vidriosa		337,03	Sin muestra	-
Segmento cinco (mantos Medios)	Manto 12-Vetachica	ZONA DELA ESPERANZA	162,96	Sulfatada cloro cálcica magnésica	●
	Manto 11-La Ciscuda		153,70	Sulfatada cloro sódica	●
	Manto 7-la quinta-2r		116,66	Sulfatada cloro cálcica magnésica	●
	Manto 7-La Quinta-	ZONA DEL TRIUNFO	116,66	Sulfatada cloro sódica	●
	Manto 5-Veta Grande		98,14	Sulfatada cloro sódica	●
Segmento uno(mantos Inferiores)	Manto 3	ZONA DEL TRIUNFO	44,44	Sulfatada cloro sódica	●
	Manto 2		38,88	Sulfatada cloro cálcica magnésica	●
	Manto1		22,44	Sulfatada cloro sódica	●
	Q.Chguas		-	Sulfatada cloro cálcica magnésica	●
-	Promedio	-	-	Sulfatada cloro sódica magnésica	●

### 7.5.2 Clasificación de aguas según Stiff

El diagrama de Stiff clasifica las aguas según la comparación del contenido de cationes (Na+K, Ca, Mg) y aniones (Cl, HCO<sub>3</sub>+CO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>) en meq/L con el fin de establecer el posible origen del agua. En el diagrama de Stiff, el promedio de aguas en Sutatausa-Cundinamarca son de tipo sulfato cloro sódica magnésica.

**Figura 21. Clasificación promedio de aguas según Stiff-Agua sulfatada cloro sódica magnésica**



### 7.5.3 Clasificación según Sulin 1946 y Dieksey

Sulin 1946 y Dieksey (1986) clasifican las aguas según el significado genético .

**Tabla 11. Clasificación de las aguas según Sulin (1946) y Dieksey (1986).**

ORIGEN DEL AGUA	TIPO DE AGUA	Na/Cl	Na-Cl/SO <sub>4</sub>	Cl-Na/Mg
METEORICA	Sulfato de Sodio	> 1	< 1	< 0
	Bicarbonato de Sodio	> 1	> 1	< 0
CONNATA	Cloruro de Magnesio	< 1	< 0	< 1
	Cloruro de Calcio	< 1	< 0	> 1

**Tabla 12. Clasificación de las aguas del área de estudio Sutatausa-Cundinamarca según Sulin (1946) y Dieksey (1986).**

MANTOS	UBICACIÓN	Na/Cl	Na-Cl/SO4	Cl-Na/Mg	ORIGEN DEL AGUA	TIPO DE AGUA
Mantos superiores	Manto 19	36,08	0,63	- 38,48	Meteórica	Sulfato de sodio
Mantos medios	Manto 12	12,81	0,12	- 0,62	Meteórica	
	Manto 11	11,16	0,66	- 6,87	Meteórica	
	Manto 7	2,62	0,08	- 0,39	Meteórica	
	Manto 7	21,57	0,22	- 2,83	Meteórica	
Mantos inferiores	Manto 5	25,06	1,50	- 17,47	Meteórica	Bicarbonato de sodio
	Manto 3	26,60	1,11	- 6,69	Meteórica	
	Manto 2	13,11	0,13	- 0,24	Meteórica	Sulfato de sodio
	Manto 1	18,50	1,04	- 42,35	Meteórica	Bicarbonato de sodio
	Q. Chugas	2,46	0,12	- 0,74	Meteórica	Sulfato de sodio
PROMEDIO		12,75	0,37	- 2,19	Meteórica	Sulfato de sodio

El promedio del catión Ca es de 5,69 meq/L valor que cambian del Manto 1 con 0,36 meq/L de Ca hasta el Manto 7 en la Esperanza con 16,44 meq/L de Ca, catión con cambios de concentración desde la Zona del Triunfo a la zona de la Esperanza.

El promedio del catión Mg es de 4,36 meq/L valor que cambian del Manto 1 con 0,28 meq/L de Mg hasta el manto 2 con 11,58 meq/L de Mg; catión con cambios drásticos de concentración en la misma Zona del Triunfo.

El promedio del catión Na es de 10,21 meq/L valor que cambian del Manto 2 con 2,96 meq/L de Na hasta el Manto 11 con 22,66 meq/L de Na ;catión con cambios de concentración a lo largo de la Zona del Triunfo hasta la Zona de la Esperanza.

El promedio del catión K es de 0,24meq/L valor que cambian del Manto 11 con 0,02meq/L de K hasta el Manto 7 en la Esperanza con 0,7meq/L de K; catión con cambios significativos de concentración en la Zona de la Esperanza donde el

manto 7 se sale del promedio tal vez por posible interacción con aguas residuales o suelos mas salinos.

El promedio de anión Cl es de 0,82meq/L de Cl valor que cambia de Manto 2 con 0,23 meq/L de Cl hasta el Manto 7 en la Esperanza con 2,44 meq/L de Cl; anión con cambios de concentración desde la zona del Triunfo hasta la Zona del la Esperanza.

El promedio del anión  $SO_4$  es de 25,42meq/L de  $SO_4$  valor que cambia del Manto 5 con 6,49 meq/L de  $SO_4$  hasta el Manto 12 con 47,89meq/L de  $SO_4$ ; anión con cambios de concentración desde la Zona del Triunfo hasta la Zona de La Esperanza. Teniendo los valores más favorables para ser relacionados con aguas asociadas a CMB en los mantos 1, 3,5 en la zona del Triunfo.

El promedio del anión  $HCO_3$  es de 4,38 meq/L de  $HCO_3$  valor que cambia del Manto 7 en la Esperanza con 0,40 meq/L de  $HCO_3$  hasta el Manto 1 con 6,85 meq/L de  $HCO_3$ ; anión con valores estables en cada una de las zonas teniendo en cuenta que de la una a la otra varían en concentraciones.

El promedio de anión  $CO_3$  es de 0,54 meq/L de  $CO_3$  valor que cambia de 0 mg/L correspondiente a los mantos 7 al 19 y el Manto 3 con 2,41meq/L de  $CO_3$ ; con concentración del anión únicamente en la Zona del Triunfo.


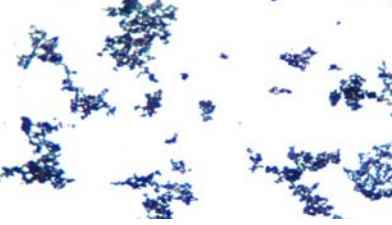
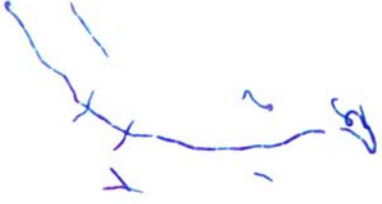
## **7.6 RESULTADOS PRELIMINARES DE BACTERIAS ENCONTRADAS EN MUESTRAS DE AGUAS.**



En el laboratorio de microbiología de la universidad industrial de Santander se adelantan estudios sobre los consorcios microbianos asociados a la Formación Guaduas los cuales presentan un informe referente al aislamiento de bacterias

encontradas en la muestra de agua perteneciente al manto 19(7 Bancos) del segmento superior.

Se ha encontrado, un número limitado de microorganismos en los mantos de la Formación Guaduas. Los aislados microbianos obtenidos hasta la fecha corresponden a los grupos de Bacilos Gram positivos (5), Bacilos Gram negativos (1) y Cocos Gram positivos (1). Todas las bacterias muestran crecimiento bajo condiciones de anaerobiosis (Jarra anaeróbica) lo que sugiere que estas son mayormente bacterias fermentativas.

**Figura 22. Imágenes de bacterias encontradas en la muestra de agua del manto 19.**

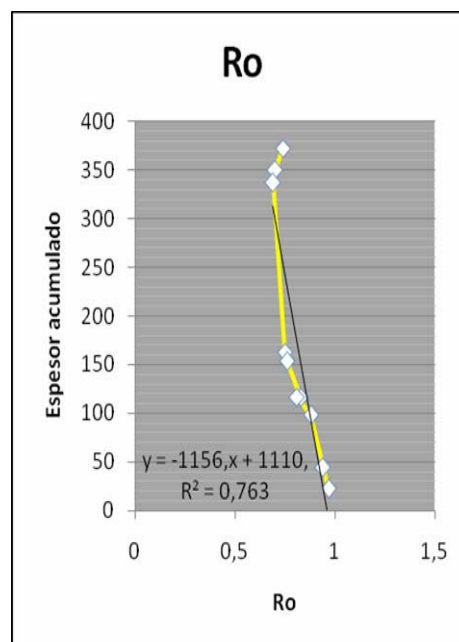
MEDIO DE CULTIVO / FORMA MICROBIANA	MICROFOTOGRAFÍA
Medio mínimo + levadura $10^{-3}$ (29/11/10): Bacilos Gram +	
Medio mínimo + levadura $10^{-5}$ (29/11/10): Cocos Gram +	
Medio mínimo + levadura + Acetato $10^{-4}$ (29/11/10): Bacilos Gram +	

MEDIO DE CULTIVO / FORMA MICROBIANA	MICROFOTOGRAFÍA
<p>Medio mínimo + levadura + Glucosa <math>10^{-2}</math> (12/11/10): Bacilos Gram -</p>	
<p>Medio mínimo + levadura + Acetato <math>10^{-4}</math> 2 (29/11/10): Bacilos Gram +</p>	

## 8. DISCUSION DE RESULTADOS

### 8.1 ANÁLISIS DE REFLECTANCIA DE LA VITRINITA

**Grafica 9. Reflectancia de la vitrinita Vs profundidad de los mantos analizados**

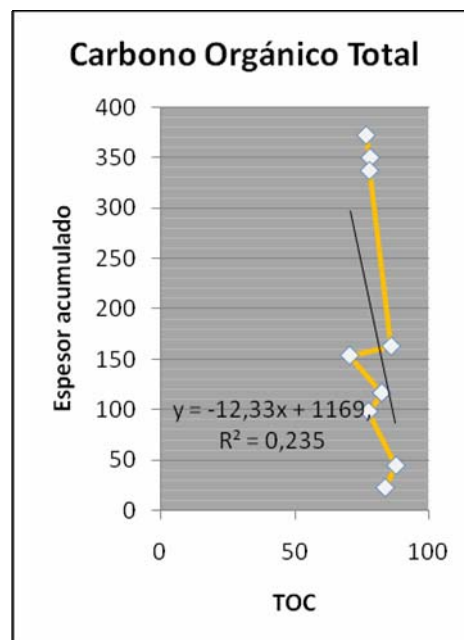


Según el cuadro 1 los promedios de Ro de los segmentos inferior y medio se encuentran en el inicio de la intensa generación de gas metano termogénico y el segmento superior se encuentra en la máxima generación de gas húmedo. Además se tiene en cuenta que entre 0,30 y 1,50 de Ro se ha podido estar generando metano biogénico secundario asociado a recargas de agua meteórica en carbones subbituminosos o en bituminosos bajos en volátiles (Rice, 1993; Scott, 1993).

Se observa el comportamiento en la grafica 9 de la reflectancia de la vitrinita que tienen una tendencia a disminuir hacia los segmentos superiores de la columna estratigráfica, comportamiento normal ya que a medida que se disminuye en profundidad se tiene menos madurez termal.

## 8.2 ANÁLISIS DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL

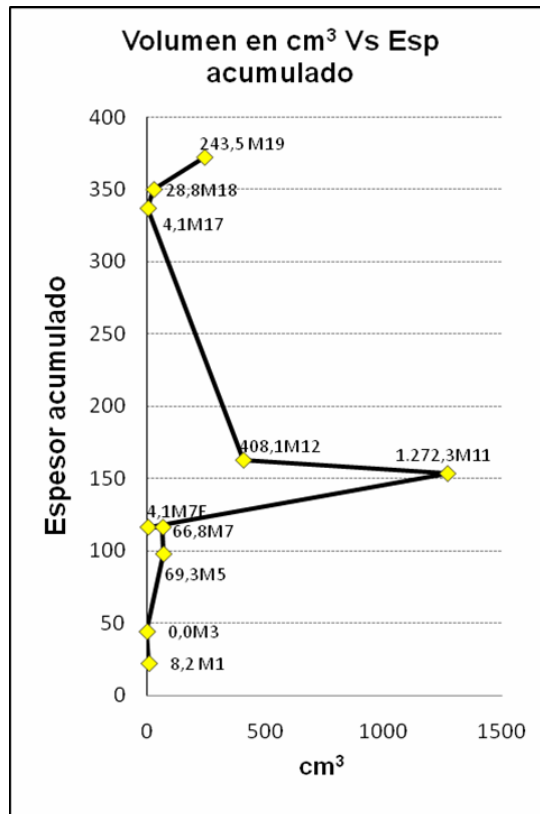
**Grafica 10. Carbono orgánico total Vs espesor acumulado**



El carbono orgánico total tiende a disminuir hacia los mantos superiores ya que estos fueron depositados en un rápido ascenso del nivel del mar en el cual se dieron las condiciones favorables para el desarrollo de ambientes parálisis pero con menor preservación de la materia orgánica. (Bueno, L., Moreno, M., 2005), a pesar de estas condiciones se tiene un excelente potencial de roca generadora.

### 8.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE DESGASIFICACIÓN DE CARBONES

Grafica 11. Volumen en  $\text{cm}^3$  de gas acumulado en 2000gr de carbon de cada muestra Vs espesor acumulado.



La grafica 11, muestra el comportamiento del manto 11 y 12 pertenecientes a la Zona de la Esperanza los cuales contienen mayor volumen de gas o mayor absorción, posiblemente porque a esa profundidad las fracturas o diaclasas representan el mecanismos de permeabilidad primario; además son los que tardan más tiempo en días en desgasificarsen indicando que estos carbones presentan mayor adsorción o retención del gas sobre la superficie del carbón.

Como se puede observar en la figura 11, los mantos de mayor rango (uno, tres, cinco, siete) de la sección del Triunfo no son los mejores almacenando gases, una

posible causa puede ser la abundancia de agua en ellos, la cual ha ocupado mucho espacio desplazando ya desde hace mucho tiempo el gas almacenado en el carbón ó el sistema de diaclasas y fracturas se encuentran selladas por la roca de sobrecarga.

Los segmentos inferior y medio se encuentran en la zona de gas termogénico generado ya que el carbón de estos mantos son de tipo bituminosos altos en volátiles A, de los cuales se ha comprobado que el manto 5 en la zona del Triunfo y el manto 7 en la zona de la Esperanza son termogénicos siendo así estos se clasifican en el rango máximo de potencial de gas termogénico generado en relación a la madurez del carbón (después de Meissner,1984);y el manto 17 de la Zona de Montecristo se clasifican en la generación más temprana de gas termogénico según el rango del carbón (Schimmelman et al.,2006)

Es así que se puede decir que los mantos que presentan gases de origen biogénico poseen menor absorción que los mantos que tienen gases termogénicos y que a mayor rango estos carbones no presentan considerables volúmenes de gas como se esperaba.

#### **8.4 ANÁLISIS DE CROMATOGRAFÍA DE GASES E ISOTOPOS**

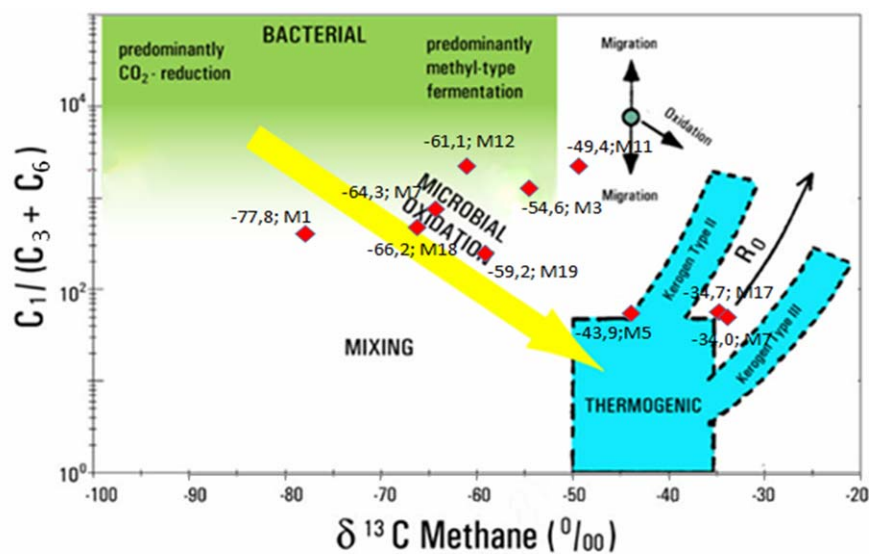
Según la cromatografía de gases que se le realizo a las muestras de gas, se ha encontrado la aparición de gases muy secos en los tres segmentos, con participaciones menores de butano y hexano los cuales no representan contaminación en las muestras de posibles gases húmedos.

**Tabla 13. Composición de gases**

Mantos por segmento	Mantos	Zonas por Sección	Esp acum(m)	%Metano	%Butano	%Hexano	C <sub>1</sub> /C <sub>1-6</sub>	Log C <sub>1</sub> /C <sub>3</sub> +C <sub>6</sub>	Clasificación de gases
Segmento ocho (mantos Superiores)	Manto 19	Zona Peñas del Cajón	372,2	99,25	0,37	0,38	100	2,43	Muy seco
	Manto 18	Zona Montecristo	350	99,71	0,19	0,10	100	2,72	Muy seco
	Manto 17		337,03	97,12	1,59	1,29	100	1,79	Muy seco
Segmento cinco (mantos Medios)	Manto 12	Zona de la Esperanza	162,96	99,93	0,04	0,03	100	3,40	Muy seco
	Manto 11		153,7	99,92	0,04	0,04	100	3,40	Muy seco
	Manto 7		116,66	97,09	1,83	1,08	100	1,73	Muy seco
	Manto 7	Zona del Triunfo	116,66	99,80	0,12	0,08	100	2,92	Muy seco
	Manto 5		98,14	98,35	1,65	0,00	100	1,78	Muy seco
Segmento uno (mantos Inferiores)	Manto 3	Zona del Triunfo	44,44	99,88	0,07	0,05	100	3,15	Muy seco
	Manto 1		22,44	99,60	0,22	0,18	100	2,66	Muy seco

A continuación se presenta el diagrama de Bernard donde se observa que la gran mayoría de muestras de gas caen en la zona de gases de origen bacterial y mezcla con solo tres muestras en la zona de gases de origen termogénico,

**Gráfica 12. Muestra la relación molecular de C<sub>1</sub>/ C<sub>3</sub>+ C<sub>6</sub> Vs el isotopo de δ<sub>13</sub>C en metano.**

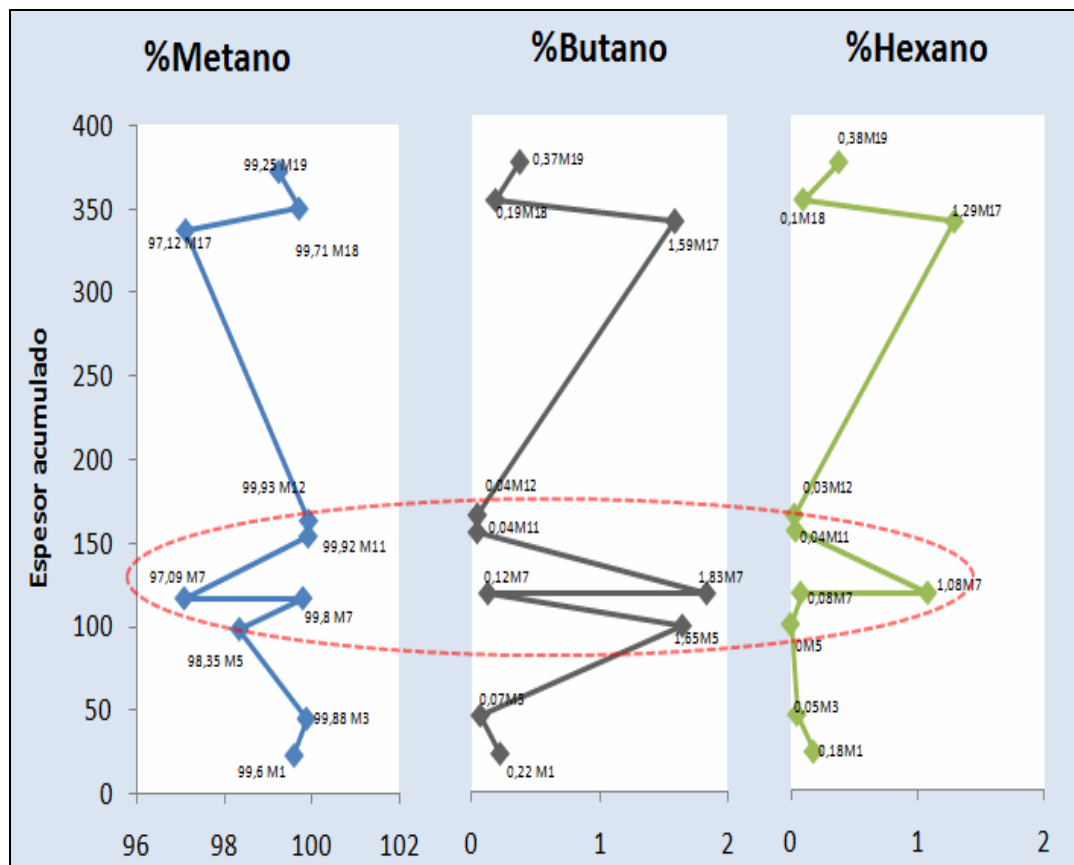


La explicación para que estos gases termogénicos sean muy secos y no contengan cantidades considerables de gases húmedos es que hubieran sido generados a partir de carbón pobre en hidrogeno o que hubieran estado sometidos a degradación bacteriana secundaria (Scott, 1993); ya que los gases muy secos por lo general son generados a partir de material húmico rico en oxígeno ( $C_1/C_{1-5} > 0,98$ ), comparado con el material rico en hidrogeno que produce gases húmedos ( $C_1/C_{1-5} < 0,90$ ), (Rice et al., 1992).

Se puede observar que los mantos: 1,3 y 7 de la zona del Triunfo, los mantos, 12 de la zona la Esperanza, manto 18 de la zona de Montecristo y el manto 19 del sector la Conejera, pueden ser gases biogénicos y de mezcla los cuales pueden estar relacionados con oxidación microbial, lo que explicaría la tendencia de los gases a adquirir valores más positivos o a enriquecerse en el isotopo de  $\delta_{13}C$ .

A continuación se presentan tres graficas que muestran la composición de los gases según el espesor acumulado, donde se puede ver que los gases butano y hexano, aumenta en los mantos que presentan gas termogénico, pero su comportamiento en cantidad no es significativo en aportes de gases húmedos, además el ovalo punteado de color rojo muestra el cambio cuantitativo de los gases en los mantos medios y posiblemente una zona de mezcla de gases ya que en este segmento se presentan los dos tipos de gases biogénicos y termogénicos.

**Grafica 13. Composición cuantitativa de gases metano, butano y hexano Vs espesor acumulado.**



En general el gas predominante en los tres segmentos es el metano (CH<sub>4</sub>) con un 99%, además de la presencia de otros gases como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) que se presenta en considerables cantidades fácilmente de identificar por su olor a huevos podridos tanto en el agua como en las minas de carbón.

## 8.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ISOTOPOS DE $\delta_{13}\text{C}$ Y $\delta\text{D}_1$

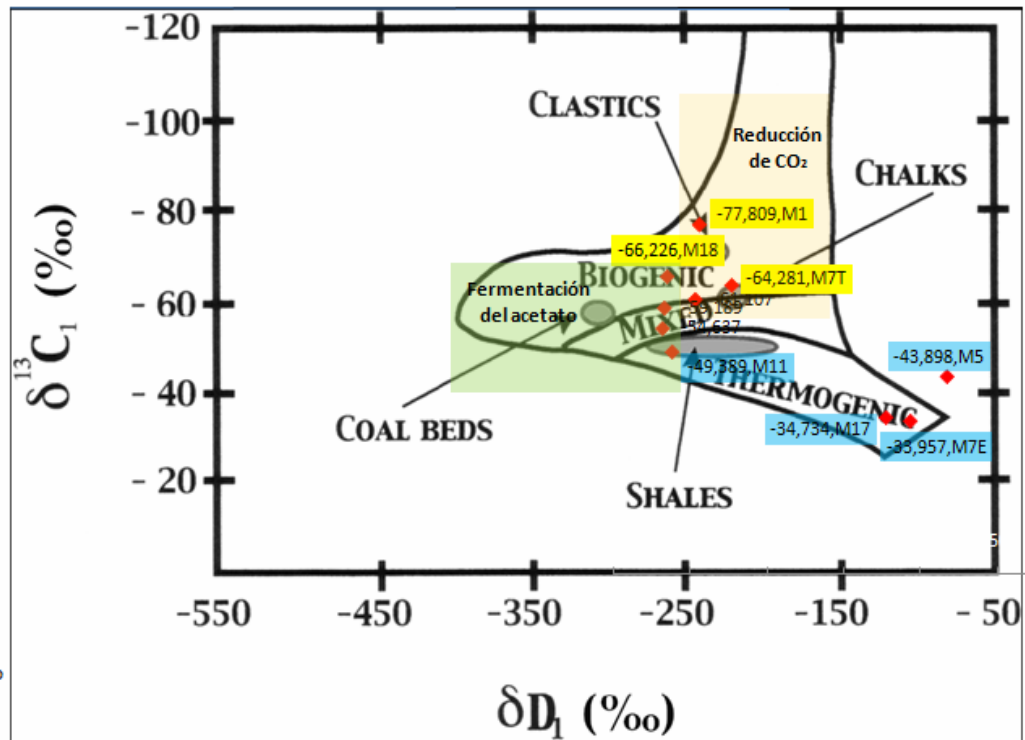
En el área de estudio se encuentran gases de origen biogénico, termogénico y de mezcla, presentándose en mayores cantidades los gases de origen termogénico.

**Tabla 14. Isotopos de  $\delta_{13}\text{C}$  y  $\delta\text{D}_1$  de las muestras de gas y clasificación por origen.**

Mantos por segmento	Mantos	Zonas por Sección	Esp acum(m)	ISOTOPOS		ORIGEN
				$\delta\text{D}_1$	$\delta\text{C}_{13}$	
Segmento ocho (mantos superiores)	Manto 19-7 Bancos	Zona Peñas del Cajón	372,20	-267,20	-59,19	Mezcla
	Manto 18-Deposito	Zona Montecristo	350,00	-265,41	-66,23	Biogénico
	Manto 17 -Vidriosa		337,03	-122,83	-34,73	Termogénico
Segmento cinco (mantos medios)	Manto 12- Vetachica	Zona de la Esperanza	162,96	-247,11	-61,11	Mezcla
	Manto 11-La Ciscuda		153,70	-262,14	-49,39	Termogénico
	Manto 7-La quinta2		116,66	-107,01	-33,96	Termogénico
	Manto 7-La Quinta	Zona del Triunfo	116,66	-223,40	-64,28	Biogénico
	Manto 5-Veta Grande		98,14	-83,08	-43,89	Termogénico
Segmento uno(mantos inferiores)	Manto 3	Zona del Triunfo	44,44	-268,38	-54,64	Mezcla
	Manto 1		22,44	-244,46	-77,81	Biogénico

Según los rangos de los isotopos de  $\delta_{13}\text{C}$  y  $\delta\text{D}_1$  en metano ,los mantos 1 y 7 de la zona del Triunfo caen en los gases de origen biogénico por reducción de  $\text{CO}_2$  y el manto 18 de la Zona de Montecristo cae en la zona de gases de origen biogénico por fermentación del acetato, cabe resaltar que este dato no es verificable por el estudio de aguas ya que el manto en campo no presenta extracción de agua, muy posiblemente se deba a que el agua que por el circula es infiltrada a mantos inferiores como sucede en algunos mantos de la Zona de la Esperanza.

**Grafica 14. Concentración isotópica de  $\delta_{13}C$  y  $\delta D_1$  en metano en los gases de los mantos del área de estudio**



Además se puede decir que estratigráficamente es llevado a cabo una mezcla de gases, presentándose en unas zonas más concentración de gases biogénicos o termogénicos que en otras pero siempre en presencia los dos como se pudo observar en las tres Zonas por sección.

El análisis antes mencionado corresponde a las muestras de gas tomados el día de recolección de carbón en los Canister en Ubate, el cual presenta diferencias con los datos de los isotopos tanto de Carbono como de Deuterio que pertenecen a las muestras de gas tomadas el día de la apertura del Canister en el laboratorio pasados sesenta y cuatro días.

Los datos de los isotopos de  $\delta_{13}C$  y  $\delta D_1$  que corresponden al segundo muestreo realizado en el laboratorio muestra enriquecimiento de los mismos posiblemente

por oxidación del metano por parte de bacterias aeróbicas y anaeróbicas”  
Oxidación anaeróbica del metano (OMA)”  $\text{CH}_4 + \text{SO}_4^{-2} \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{O}$ , proceso que ocurre en consorcio con bacterias Archaeas y bacterias sulfato reductoras. Son las bacterias ANME” anaeróbico methanotroph” las responsables de este proceso que están ligadas a las Archaeas metanogénicas.

Este proceso de reversión del metano u oxidación del mismo está acompañado de producción de sulfuro de hidrogeno producto de las bacterias sulfato reductoras es por eso que cuando se destapan los Canister en laboratorio sale este olor parecido a los huevos podridos, olor peculiar del sulfuro de hidrogeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

Esto se fundamenta en lo dicho por Scott que la composición isotópica de los gases biogénicos y termogénicos que pueden ser modificados a través de la oxidación del metano por bacterias aeróbicas y anaeróbicas las cuales selectivamente eliminan  $^{12}\text{C}$ , cambiando los valores del isotopo  $\delta_{13}\text{C}$  a valores más positivos o enriquecidos (Barker y Fritz, 1981; Whiticar et al, 1986). La oxidación bacteriana del metano puede producir valores isotópicos que asemejan a metano termogénico.

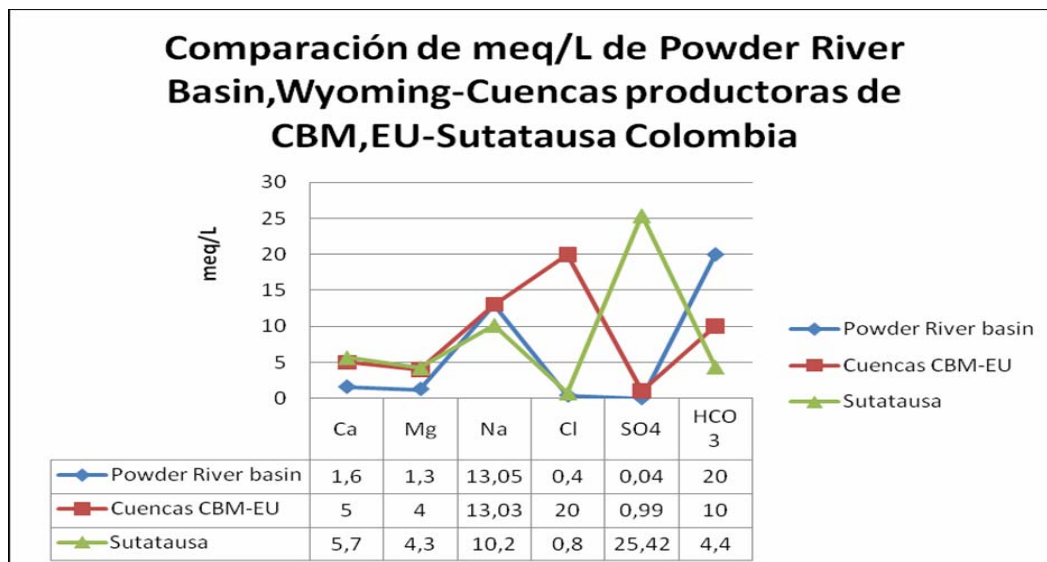
## 8.6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE AGUA

**Tabla 15. Clasificación de muestras de agua según diagrama de Piper, Sulin y Dieksey**

Mantos por segmento	Mantos	Zonas por Sección	Clasificación de aguas según diagrama de Piper	Tipo de agua según Sulin 1946 y Dieksey	Origen del gas
Segmento ocho (mantos Superiores)	Manto 19	Zona Peñas del Cajón	Sulfatada cloro sódica	Sulfato de sodio	Mezcla
	Manto 18	Zona Montecristo	sin muestra de agua	-	Biogénico
	Manto 17		sin muestra de agua	-	Termogénico
Segmento cinco (mantos Medios)	Manto 12	Zona de la Esperanza	Sulfatada cloro cálcica magnésica	Sulfato de sodio	Mezcla
	Manto 11		Sulfatada cloro sódica		Termogénico
	Manto 7		Sulfatada cloro cálcica magnésica		Termogénico
	Manto 7	Zona del Triunfo	Sulfatada cloro sódica	Bicarbonato de sodio	Biogénico
	Manto 5		Sulfatada cloro sódica		Termogénico
Segmento uno (mantos Inferiores)	Manto 3	Zona del Triunfo	Sulfatada cloro sódica	Sulfato de sodio	Mezcla
	Manto 2		Sulfatada cloro cálcica magnésica		-
	Manto 1		Sulfatada cloro sódica	Bicarbonato de sodio	Biogénico
	Q.Chugas		Sulfatada cloro cálcica magnésica	Sulfato de sodio	-

Los análisis realizados a las aguas de Sutatausa son comparados con los hechos a aguas del Powder River Basin, Wyoming y con los hechos en diferentes cuencas productoras de gas biogénico asociado a carbón en Estados Unidos.

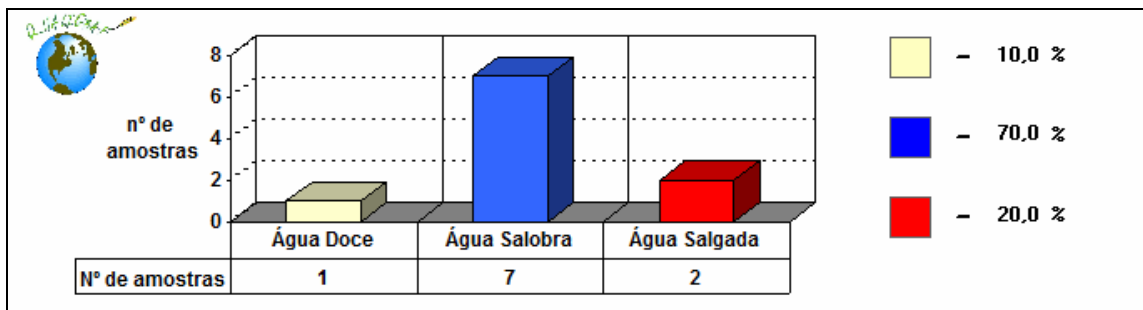
**Grafica 15. Comparación de miliequivalentes por litro de Powder River Basin, Wyoming, cuencas productoras de CBM de Estados Unidos y Sutatausa Colombia.**



Según los análisis hechos en las tres zonas de estudio se puede concluir que el promedio de las aguas entran en el rango de pH aptos para el desarrollo de bacterias metanogénicas. El pH de la zona del triunfo presenta aguas más básicas o alcalinas debido a la pobreza de nutrientes disueltos y la abundancia de oxígeno en el agua y la zona de la Esperanza presenta aguas más ácidas debido al enriquecimiento de hidrógeno y nutrientes disueltos.

Las aguas de las tres zonas son clasificadas como salobres con un 70% y aguas saladas en la Zona de la Esperanza con un 20% indicando que las aguas de los mantos 7 y 11 de esta misma zona tienen menos probabilidad de ser asociadas con el desarrollo de bacterias metanogénicas; y agua dulce en la Zona del Triunfo con la Quebrada Chuguas que representa un 10%. La conductividad difiere de los valores estimados en los estudios de Powder River Basin, Wyoming pero no interfiere específicamente en el desarrollo de las bacterias metanogénicas.

**Grafica 16. Clasificación en porcentaje de las aguas del área de estudio según la salinidad y el total de sólidos disueltos.**



El promedio del TSD es elevado en comparación con los estudios de Power River Basin, Wyoming pero cabe resaltar que hay valores alrededor de los 1940mg/l registrados en estos estudios, a pesar de ser una de las cuencas productoras más importantes de CBM.

La presencia de nitratos en las aguas es un indicio de contaminación de las mismas su aparición puede ser por el proceso de oxidación bacteriana de la materia orgánica.

La concentración del ion Ca y Mg en los mantos 7 y 12 en la Zona de la Esperanza y el manto 2 en la zona del Triunfo no se pueden relacionar con CBM ya que los valores son muy elevados y se pasan de los rangos permitidos químicamente para esas aguas.

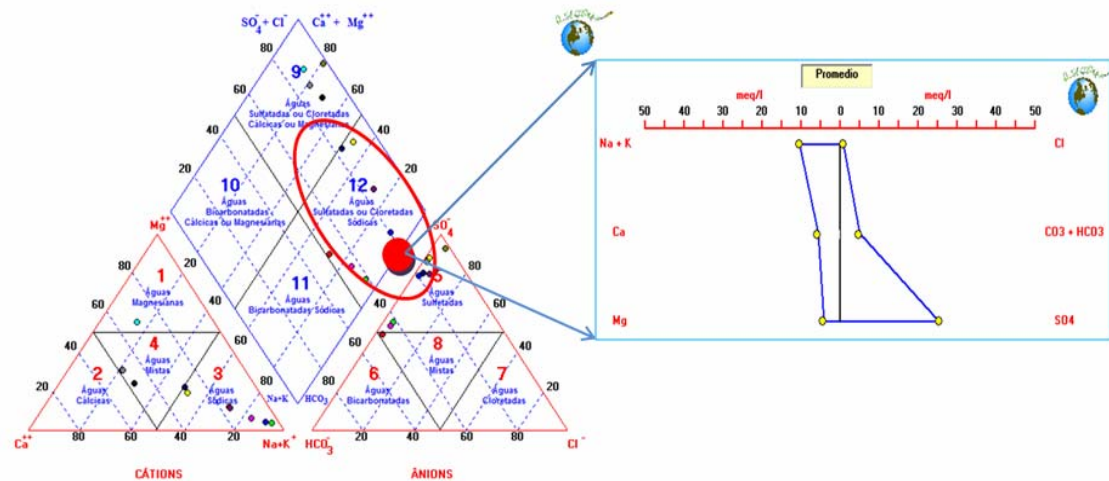
El ion sodio y potasio presenta concentraciones considerables según la comparación con los estudios hechos en Power River Basin Wyoming, es así que el manto 1 puede estar relacionado con CMB. La concentración del cloro no es tan marcada en estas aguas ya que su interacción con medios salinos no se hacen presentes.

La concentración de ion sulfato por ser una de las mas importante que se tienen encuentra en el estudio de estas aguas se llega a concluir que es imposible asociar la producción de gas metano en los mantos de carbón en la parte media y superior de la formación debido a la gran concentración del ion, contrariamente se tiene concentraciones menores en los mantos 1,3,5 en la zona del Triunfo que posiblemente se podían descartar de la conclusión.

Los iones Bicarbonato y Carbonatos al contrario de los sulfatos su concentración tiene que ser elevada, se destaca su concentración en los mantos inferiores en el sector del Triunfo confirmando así que estos son los más relacionados con la CBM. La dureza de las aguas en la Zona de la Esperanza son aguas más duras que las de la zona del Triunfo, clasificándolas todas como Moderadamente duras.

Según el diagrama de Piper las aguas que se presentan en el área de estudio ,son clasificadas como sulfatadas cloro cálcicas magnesianas , sulfatadas cloro sódicas, sulfatadas cloro sódicas magnesianas ,las cuales no son aptas para el desarrollo de las Archaeas metanogénicas, ya que son enriquecidas en sulfatos y empobrecidas en bicarbonatos. Según la clasificación de Sulin 1946 y Dieksey las aguas meteóricas de los mantos uno, tres y cinco de la zona del Triunfo son tipo bicarbonato de sodio, las cuales indican que pueden ser aptas para el desarrollo de Archaeas metanogénicas sin descartar que el contenido en sulfatos tiende a ser alto, y las aguas meteóricas de los demás mantos tipo sulfato de calcio no son aptas para el desarrollo de las Archaeas.

**Figura 23. Diagrama de Piper (triangulo) y Stiff donde muestra el promedio de la clasificación de las aguas del área de estudio (punto rojo)- Agua sulfatada cloro sódica magnésica.**



A pesar que las aguas de los mantos uno, tres y cinco de la zona del triunfo se inclinan a ser un poco tipo agua bicarbonato de sodio, no se confirma que recientemente halla actividad de generación de gas metano biogénico en estos mantos, ya que los análisis de los isotopos muestran que el gas biogénico en el manto uno es por reducción de  $CO_2$ , caso que en la actualidad es difícil de darse, el gas contenido en el manto tres es tipo mezcla y el gas contenido en el manto cinco es de origen termogénico.

## CONCLUSIONES

La interpretación de los análisis de reflectancia de la vitrinita hechos a las muestras de carbón de la Formación Guaduas, ( $R_o$  entre 0.69 a 0.97) indican que los mantos de carbón de esta formación se encuentran en ventana de generación de gas termogénico.

Los análisis isotópicos y cromatográficos de las muestras de gas asociados a mantos de carbón muestran la presencia de gases de origen biogénico, mezclas y gases de origen termogénico en las secciones del Triunfo y en Montecristo.

La interpretación de la cromatografía de gases indica que los gases que se presentan en el área de estudio son gases muy secos de composiciones mayores a 98% de metano, incluso en los gases de origen termogénico.

El proceso de desgasificación llevado a cabo en las muestras de carbón, indican que los mantos que contienen gas de origen termogénico son los que presentan más contenido de gas metano, en volumen de gas por unidad de masa de carbón, seguido por los mantos que presentan mezcla de gases y los mantos que contienen gases de origen biogénico son los que contienen menor volumen de gas.

Las aguas asociadas a mantos de carbón son sulfatadas según la clasificación de Piper, aunque las aguas de los mantos inferiores sean clasificadas como aguas meteóricas tipo bicarbonato de sodio según la clasificación de Sulin y Dieksey no se evidencia generación de gas metano por parte de las Archaeas metanogénicas, demostrado en el estudio de los isotopos de  $\delta_{13}C$  y  $\delta D_1$  los cuales indican que el gas biogénico fue generado por reducción de  $CO_2$ .

El gas encontrado en el manto dieciocho es de origen biogénico y se clasifica en la generación por fermentación del acetato, posiblemente generación de gas tardío, esto no es posible confirmarse por medio de las aguas ya que este manto no presenta extracción de agua, posiblemente porque el agua que pase por manto sea infiltrada a mantos inferiores.

Los análisis preliminares realizados por el Grupo de Microbiología de la Universidad Industrial de Santander a la muestra de agua perteneciente al manto diecinueve de la zona de Montecristo indican la aparición de microorganismos que corresponden a los grupos de Bacilos Gram positivos (5), Bacilos Gram negativos (1) y Cocos Gram positivos (1). Los cuales muestran crecimiento bajo condiciones de anaerobiosis (Jarra anaeróbica) sugiriendo que son bacterias fermentativas, estudio que confirma la posible presencia de metanogenos en los mantos del segmento superior.

## REFERENCIAS CITADAS

ARIAS, A. 2007. Geoquímica de las aguas asociadas a mantos de carbón de la Formación Guaduas en la Cuenca de Bogotá. Tesis de grado de la Universidad Industrial de Santander.

ASTM, International. 2011. Standard The Method for Determination of Hydrocarbons in Liquefied Petroleum (LP) Gases and Propane/ Propene mixture by Gas Chromatography, 2011.D2163-07. February ,p.1-9.

BALDASSARE, F. Stray Gas Migration and Applications in the use of Isotope Geochemistry, Pennsylvania, Department of Environmental Protection.

BALL, P. 2005. Investigation of microbial ecology, structure, and function in coalbed aquifers: Powder River Basin, Montana. Montana Bureau of Mines and Geology, Report.

CARRILLO, L. Rumen y biogas. Microbiología Agrícola. Cap. 5.

CIF, Centro Internacional de Física. 2011. Sistema de medición de gas contenido en una muestra de carbón (CGMS 5.1), Bogotá, p.8-49.

CORTES, Y., JIMENEZ, M. 2007. Geoquímica de los yacimientos de gas asociados a carbón en la Cuenca de Bogotá. Tesis de grado de la Universidad Industrial de Santander.

Funceme. 2009. Programa para análisis de calidad de agua (QualiGraf).

GREEN, M., FLANEGAN, K., GILCREASE, P. 2008.Characterization of a methanogenic consortium enriched from a coalbed methane well in the Powder River Basin, USA. ELSEVIER, International Journal of Coal Geology 76, p.34-45.

GUIZA, S., ESPINOSA, A .C, 2006.Cartografía Geoquímica de la plancha 209 Zipaquirá, Atlas geoquímico de Colombia. Ingeominas, Bogotá.

HENNING, M., Strapoc, D., Lis, P., Sauer, P., Fong, J., Schimmelman, A., Pratt, L., 2007. Versatile inlet system for on-line compound-specific  $\delta D$  and  $\delta^{13}C$  gas chromatography-oxidation/ reduction -isotope ratio mass spectrometry analysis of gaseous mixtures. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 21, p .2269-2272

INGEOMINAS, 2004. El carbón Colombiano. Recursos, Reservas y Calidad. Publicaciones especiales de Ingeominas. Bogotá.

JIMENEZ, L., MORENO, M.2005.Estratigrafía, petrografía y geoquímica de la ocurrencia de carbones coquizables de la formación Guaduas en la cuenca de Bogota.Tesis de grado de la Universidad Industrial de Santander.

JULIVERT, M. 1968. Léxico Estratigráfico M. JULIVERT. Primera parte Vol. cinco, Fascículo 4<sup>a</sup> Colombia. Centro nacional de investigación científica Quai Anatole-Francia, Paris

LIN,Y.,ERTEFAI,F.,SCHBOTZ,F.,NINRICHS,K.,MASTALERZ,M.,SCHIMMELMAN N,A. 2008.Methanogenic microbial degradation of organic matter in Indiana Coal Beds. Presentation at AAPG Annual Convention, San Antonio, Texas.

MARTÍNEZ, Y.2009.Determinación de la composición de los gases asociados a mantos de carbón en las áreas de Ubate y el Cerrejón por medio de cromatografía de gases. Tesis de grado Universidad Industrial de Santander.

MIDGLEY,D.,HENDRY,P.,PINETOWN,K.,FUENTE,D.,GONG,S.,MITCHELL.D.,FAIZ,M. , 2010.Characterization of a microbial community associated a deep, coal seam methane reservoir in the Gippsland Basin, Australia. EL SEVIER, International Journal of Coal Geology, 32, Australia. p.232-239.

MIKE,J.,BASINSKI,P.,BEATON,A.,BOYER,C.,BULAT,D.,COLSON,L.,JOHN,Z.,KHAN,R.,LOW,N.,RYAN.,B.,SCHODERBEK,D.2004.Producción de gas natural a partir del carbón. Oilfield Review.

MONTOYA, D., REYES, G.2005. Geología de la Sabana de Bogotá. Informe, Ingeominas, Bogotá.

PENNER, T., FOGHT,J., BUDWILL,K. 2010. Microbial diversity of western Canadian Subsurface coal beds and methanogenic coal enrichment cultures. International Journal of Coal Geology, Alberta, Canada, Vol 82, p.81-93.

RICE, D. Biogenic Gas: Controls, Habitats, and Resource Potential. The future of Energy Gases ,U.S. Geological Survey, Box 25046,Denver ,Colorado, paper 2770,p.583-602.

RICE, C., NUCCIO,V. , 2000.Water produced with coal-bed methane. U.S. Geological Survey, Denver Federal Center, Fact Sheet Fs-156-00.

RICE,C., ELLIS,M., BULLOCK,J. Water co-produced with coalbed in methane in the Powder River Basin,Wyoming preliminary compositional data. U.S. Geological Survey, Denver, Repot 00,372.2000.

RINCON, L, ROCHA, A. 2007. Estratigrafía de secuencias de la Formación Guaduas en la Cuenca de Bogotá, Colombia. Tesis de Grado Universidad Industrial de Santander.

SANZ, J., AMIL, R. 1988. Archaeobacteria: Their phylogenetic relationship with the eubacterial and eukaryotic kingdoms. Microbiología SEM. Publication de la Sociedad Española de Microbiología, Vol. 4, p.5-28.

SCOTT, A., KAISER, W., WALTER, B., AYERS, J. 1994, Termogenic and secondary biogenic gases, San Juan and Mexico- Implications for Coalbed gas Producibility. AAPG Bulletin, Vol, 78, No.8, p.1186-12009.

SESSIONS, A. Isotope-radio detection for gas chromatography California Institute of Technology, 2006. California Blvd, Pasadena, CA 91125, USA. , 29p. 1946-1961.

SHURR, G., RIDGLEY, J. 2002. Unconventional shallow biogénico gas systems. AAPG, Bulletin, Vol, 86, No.1, p, 1939-1969.

STRAPOC, D., PICARDAL, F., TURICH, C., SCHPERDOTH, I., MACALADY, J., LIPPS, J., SHIHSTRPOC, D., MASTALERZ, M., EBLE, C., SCHIMMELMANN, A , 2006. Characterization of the origin of coalbed gases in southeastern Illinois Basin by compound-specific carbon and hydrogen stable isotope ratios. Science Direct, on-line Organic Geochemistry 38, p. 267-287.

UBEDA, J. 2008. Coalbed methane (CBM)=Gas metano del carbón (GMC). MFG OIL Y Gas S.A, Buenos Aires.

WARWICK, P., CLAYTON, B., CLARK, A., WILLETT, J. 2004. Preliminary results from coal-bed methane drilling in Ouachita Parish, Louisiana. USGS Reston, VA 20192, Report -1239.

WAYNE, A., VAN, V. 2003. Geochemical signature of formation water associated with coalbed methane. Montana Bureau of Mines and Geology, AAPG BULLETIN, V.87, NO 4, p.667-676.

WHITICAR, M., FABER, E., SCHOELL, M. 2006. Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO<sub>2</sub> reduction vs. acetate fermentation – isotope evidence. Chevron Oil Field Research Co., P.O. Box 446. USA.