

**INTERPRETACIÓN SOBRE PROCEDENCIA DE SOLUTOS Y VOLÁTILES A
PARTIR DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS INCLUSIONES FLUIDAS EN
VENAS HIDROTERMALES CON ESMERALDAS, CINTURÓN ESMERALDÍFERO
ORIENTAL Y OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL DE COLOMBIA.**

SERGIO HERRERA CASTELLANOS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2011

**INTERPRETACIÓN SOBRE PROCEDENCIA DE SOLUTOS Y VOLÁTILES A
PARTIR DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS INCLUSIONES FLUIDAS EN
VENAS HIDROTERMALES CON ESMERALDAS, CINTURÓN ESMERALDÍFERO
ORIENTAL Y OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL DE COLOMBIA.**

SERGIO HERRERA CASTELLANOS

Trabajo de Grado para optar al Título de Geólogo

Director

**LUIS CARLOS MANTILLA FIGUEROA
GEÓLOGO Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2011

DEDICATORIA

A Dios por ofrecerme su amistad en los momentos más difíciles de mi vida y una inmensa gratitud por escucharme.

A mis padres gracias, por siempre estar ahí, por apoyarme, confiar en mí en todo momento y por sus esfuerzos para darme solo lo mejor.

A mi hermano por haberme brindado todo su apoyo y paciencia.

Y con todo mi corazón a Silvia Johanna por brindarme su amor y solo basta decirte que contigo conocí lo que es la felicidad.

Mi plan es vivir eternamente contigo...hasta ahora lo estoy cumpliendo perfectamente.....

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Luis Carlos Mantilla Figueroa por su colaboración, respeto, ayuda y confianza brindada en mí para la elaboración de este proyecto.

Al profesor Enrique Mejía Ospino de la Universidad Industrial de Santander, por sus aportes y consejos que me ayudaron en la elaboración de este informe.

A los profesores Robert J. Bodnar y Daniel Moncada, del departamento de Geociencias de LA Universidad Estatal Virginia Tech, Estados Unidos por su colaboración.

Al profesor Jairo Conde por sus aportes y colaboración brindada en la mejora de este informe.

A mis amigos de colegio por los momentos chéveres que hemos pasado.

A mis compañeros y amigos de Universidad (Silvia Johanna, Yohani, Manuel, Carolina, Tatiana, Erika, Silvia Cristina, Gisela, Adriana, etc y etc..... por los buenos momentos vividos y por vivir.

A todos los docentes de la Escuela de Geología, gracias por su colaboración siempre que la he necesitado, por ayudarme a ser mejor persona y un mejor profesional.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS.....	14
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2. CONTEXTO GEOLÓGICO	15
3. ANTECEDENTES SOBRE EL ESTUDIO COMPOSICIONAL DE LAS INCLUSIONES FLUIDAS EN ESMERALDAS	17
4. METODOLOGÍA	19
5. LOCALIZACION GEOGRÁFICA.....	25
6. RESULTADOS.....	27
6.1 ANALISIS Y ESQUEMA GEOLOGICO DE LAS LÁMINAS ANALIZADAS.....	27
6.2 PETROGRAFÍA Y MICROTERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS, CINTURÓN ORIENTAL.	29
6.3 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE ANALISIS RAMAN, CINTURON ORIENTAL Y OCCIDENTAL.	32
6.4 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE ANALISIS POR ABLACION LASER, CINTURON ORIENTAL.....	34
6.5 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE ANALISIS POR ABLACION LASER, CINTURON OCCIDENTAL.....	40
7. INTERPRETACIÓN SOBRE PROCEDENCIA DE SOLUTOS Y VOLÁTILES.....	46

CONCLUSIONES49
RECOMENDACIONES51
BIBLIOGRAFÍA.....52

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Espectros Raman para volátiles de inclusiones primarias polifásicas en esmeralda de la muestra COR 008/007.....	20
FIGURA 2. Cálculo de los valores para determinar el área bajo la curva del CO ₂ y del N ₂	22
FIGURA 3. Localización de las muestras en los Cinturones Esmeraldíferos de Colombia. Tomado de Reyes <i>et al.</i> , 2006 y Terraza <i>et al.</i> , 2008.....	26
FIGURA 4. Esquema Geológico de las muestras en las formaciones del Cinturón Oriental.....	28
FIGURA 5. Esquema Geológico de las muestras en las formaciones del Cinturón Occidental.....	28
FIGURA 6. Porcentaje de Na presente en las formaciones del Cinturón Oriental.	35
FIGURA 7. Porcentaje de Ca presente en las formaciones del Cinturón Oriental.	36
FIGURA 8. Porcentaje de Mg presentes en las formaciones del Cinturón Oriental.	37
FIGURA 9. Porcentaje de K presente en las formaciones del Cinturón Oriental. ...	38
FIGURA 10. Porcentaje de Fe presente en las formaciones del Cinturón Oriental.	39
FIGURA 11. Porcentaje de Na presente en las formaciones del Cinturón Occidental.....	40
FIGURA 12. Porcentaje de Ca presente en las formaciones del Cinturón Occidental.....	41
FIGURA 13. Porcentaje de Mg presente en las formaciones del Cinturón Occidental.....	42
FIGURA 14. Porcentaje de K presente en las formaciones del Cinturón Occidental	43
FIGURA 15. Porcentaje de Fe presente en las formaciones del Cinturón Occidental.....	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores Δv en cm^{-1} , de las especies más comunes en las inclusiones fluidas según Burke (2001).	21
Tabla 2. Valores de la sección eficaz, definida por (Burke 2001).	21
Tabla 3. Área de los picos del CO_2 y del N_2	23
Tabla 4. Fracción Molar de los componentes de la muestra COR 008/007.	24
Tabla 5. Localización de las muestras escogidas para estudio.	27
Tabla 6. Resumen de la petrografía hecha a inclusiones fluidas en minerales de relleno de venas de los cinturones esmeraldíferos.	29
Tabla 7. Fracción molar de CO_2 y N_2 presentes en las muestras de Calcita.	32
Tabla 8. Fracción molar de CO_2 y N_2 presentes en las muestras de esmeraldas.	33
Tabla 9. Porcentaje en peso de los elementos principales analizados en las muestras.	34

RESUMEN

TITULO: INTERPRETACION SOBRE PROCEDENCIA DE SOLUTOS Y VOLATILES A PARTIR DE LA COMPOSICION QUIMICA DE LAS INCLUSIONES FLUIDAS EN VENAS HIDROTERMALES CON ESMERALDAS, CINTURON ESMERALDIFERO ORIENTAL Y OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL DE COLOMBIA.¹

AUTOR: HERRERA CASTELLANOS, Sergio²

PALABRAS CLAVES: Inclusiones fluidas, Esmeraldas, Cinturones Esmeraldíferos, Cordillera Oriental.

Los depósitos de esmeraldas en Colombia, se confinan principalmente a dos cinturones localizados hacia los bordes de la Cordillera Oriental: cinturones esmeraldíferos Occidental y Oriental. Las formaciones hospedadoras de ésta mineralización, son respectivamente las formaciones Cretácicas Rosablanca y Muzo y por otro lado las Formaciones Chivor, Santa Rosa y las Areniscas de las Juntas.

Un estudio de la composición de los solutos (obtenidos mediante la técnica Láser Ablation) presentes en las Inclusiones Fluidas de Esmeraldas y Calcitas (asociada a la mineralización) y de los volátiles presentes en la fase vapor de éstas mismas inclusiones (analizadas mediante espectroscopía Raman), permitió establecer que la composición química del fluido mineralizante es fundamentalmente H₂O + NaCl + CaCl₂ + KCl + FeCl₂ + LiCl + (± GaCl₃) + CO₂ + N₂.

La presencia de CO₂ y N₂, en una proporción aproximada de 9 a 1 (aunque puntualmente ésta relación llegó a ser de 8 a 2), permitió corroborar la importancia de la materia orgánica en el proceso de interacción fluido-roca, asociado a la mineralización esmeraldífera.

Diagramas binarios, construidos para intentar establecer diferencias composicionales de los fluidos mineralizantes; tanto en la vertical (comparando entre las formaciones hospedadoras de esmeraldas), como en la horizontal (a lo largo de cada cinturón esmeraldífero); permitieron establecer en términos generales, que el contenido en Na, Fe, Ca, Mg y K (asociados a complejos clorurados), son mayores hacia el sur del Cinturón Esmeraldífero Oriental y mayores hacia el norte del Cinturón Occidental. Por otro lado, éstos valores resultan ser más altos para las Formaciones Chivor y Muzo, en donde generalmente se han encontrado las esmeraldas de mejor calidad. Estas diferencias preliminares aquí reportadas, posiblemente estén indicando una evolución química del fluido mineralizante, tanto a nivel vertical como horizontal.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Ph.D. Luis Carlos Mantilla Figueroa.

ABSTRACT

TITLE: INTERPRETATION ON ORIGIN OF VOLATILE AND SOLUTE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF FLUID INCLUSIONS IN HYDROTHERMAL VEINS WITH EMERALDS, EMERALD BELT EASTERN AND WESTERN OF THE EASTERN CORDILLERA OF COLOMBIA.¹

AUTHOR: HERRERA CASTELLANOS, Sergio²

KEY WORDS: fluid inclusions, Emeralds, emerald Belt, eastern Cordillera, mineralizantes fluids.

The emerald deposits in Colombia, confined mainly to two belts located at the edges of the Eastern Cordillera: emeralds belts Western and Eastern. The formation hospedoras of this one mineralization, is respectively the formation Cretácicas Rosablanca and Muzo and on the other hand the Chivor Formation, Santa Rosa and the Areniscas of the Juntas.

A study of the composition of the solutes (obtained by means of the technical Ablation Laser) present in the Fluid Inclusions of Emeralds and Calcites (associate to the mineralization) and of the volatile presents in the phase steam of these same inclusions (analyzed by means of Raman spectroscopy), allowed to establish that the chemical composition of the mineralizante fluid is essentially $H_2O + NaCl + CaCl_2 + KCl + FeCl_2 + LiCl + (\pm GaCl_3) + CO_2 + N_2$.

The presence of CO_2 and N_2 , in an approximated proportion from 9 to 1 (although precise this one relation got to be from 8 to 2), allowed to corroborate the importance of the organic matter in the process of interaction fluid-rock, associated to the emerald mineralization.

Binary diagrams, constructed to try to establish composicionales differences of the mineralizantes fluids; as much in the vertical (comparing between the emerald formation hospedoras), like in the horizontal (throughout each esmeraldífero belt); they allowed to establish in general terms, that the content in Na, Fe, Ca, Mg and K (associates to clorurados complexes), are majors towards the south of Eastern the Esmeraldífero Belt and majors towards the north of the Western Belt. On the other hand, these values turn out to be higher for the Formation Chivor and Muzo, where have been generally the emeralds of better quality. These preliminary differences reported here, are possibly indicating a chemical evolution of the mineralizante fluid, as much at vertical level as horizontal.

¹ Grade Project.

² Faculty of Physical and chemical. Department of Geology. Director: Ph.D. Luis Carlos Mantilla Figueroa.

INTRODUCCIÓN

Este artículo pretende suministrar información sobre recopilaciones, conceptos, métodos e ideas con relación al análisis de las Inclusiones Fluidas que se le realizaron a unas muestras recolectadas en las diferentes formaciones hospedadoras en los cinturones esmeraldíferos oriental y occidental de la cordillera Oriental de Colombia y los cuales tienen como finalidad analizar y dar una hipótesis sobre la procedencia de los solutos y volátiles formadores de los yacimientos de esmeraldas y así proponer un modelo sobre la dirección de los paleofluidos formadores de las esmeraldas para que sirva en la exploración de este tipo de yacimiento.

Se realizan estudios sobre los resultados de la composición química de los análisis ya realizados de los volátiles y solutos de las inclusiones fluidas mediante análisis micro-raman y ablación laser respectivamente para conocer la presencia de los elementos y componentes químicos que se encuentran en ellas.

Así mismo permite definir áreas de interés considerándolo desde un punto de vista regional para la búsqueda de yacimientos de esmeraldas o esmeraldas de mejor calidad a partir de las concentraciones de elementos químicos o asociaciones de elementos a partir de la localización de anomalías positivas o negativas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar los datos composicionales de volátiles y solutos de las inclusiones fluidas e interpretar su procedencia en las venas hidrotermales en el cinturón esmeraldífero oriental y occidental de la cordillera Oriental de Colombia.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar e interpretar un esquema geológico con base en la cartografía geológica existente de los dos cinturones esmeraldíferos de la cordillera oriental.
- Interpretar la información de análisis existentes sobre la composición química de los paleofluidos presentes en venas hidrotermales con esmeraldas, determinados mediante análisis microtermométricos, ablación laser, micro-raman, entre otras técnicas de estudio de inclusiones fluidas.
- Analizar e interpretar en términos de procedencia los datos composicionales de volátiles, de las inclusiones fluidas de los cinturones esmeraldíferos oriental y occidental de la cordillera oriental, obtenidos mediante análisis micro-raman.
- Analizar e interpretar en términos de procedencia los datos composicionales de solutos, de las inclusiones fluidas de los cinturones esmeraldíferos objetos de estudio, obtenidos mediante análisis de ablación laser.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

La Esmeralda que se producen en Colombia se encuentra principalmente ubicada en los cinturones esmeraldíferos en la cordillera oriental de Colombia, las formaciones que se tuvieron en cuenta por ser productoras de esmeraldas en la cordillera Oriental y están presentes en el cinturón esmeraldífero oriental fueron: Formación las Juntas, formación Chivor, formación Santa Rosa; y en el cinturón esmeraldífero occidental fueron: Formación Rosablanca y formación Muzo.

El marco geológico de la zona andina está muy relacionado al desarrollo de una serie de lineamientos tectónicos de carácter regional aproximadamente paralelos y con dirección norte- sur, que marcan un cambio en el estilo estructural de las diferentes unidades litoestratigráficas que separan. Su potencial en recursos minerales está ligado, dentro del marco geológico complejo y variado, a los diferentes eventos magmáticos y épocas metalogénicas que tuvieron lugar en el Bloque Norandino (constituido por Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela), desde el Paleozoico al Cenozoico y que son las responsables de los numerosos tipos de depósitos minerales que se encuentran distribuidos en franjas a lo largo de las zonas montañosas que caracterizan al Sistema Andino (Maya *et al.*, 2004).

La Cuenca de Cundinamarca – Boyacá, que corresponde a la parte central de la Cordillera Oriental, está constituida principalmente por un basamento precámbrico, representado por rocas metamórficas y graníticas, cubiertas por metasedimentos y sedimentitas del Paleozoico (limolitas, lutitas e intercalaciones de calizas, conglomerados, areniscas cuarzosas, lodolitas calcáreas, calizas y limolitas), los cuales a su vez infrayacen capas rojas y vulcanitas del Triásico-Jurásico (secuencias de lavas y piroclastitas, además de areniscas de grano fino a conglomeráticas, limolitas rojas y margas). Las rocas de edad cretácica están ampliamente distribuidas en la cordillera y están constituidas por secuencias

marinas y transicionales (areniscas, conglomerados, calizas, lutitas, lodolitas limosas, horizontes de carbón e importantes niveles de fosforitas). La sedimentación del Paleógeno y el Neógeno se caracteriza por acumulaciones de clásticos gruesos, particularmente, conglomerados, areniscas y horizontes de lutitas. El Magmatismo del Jurásico al Cenozoico, de composición ácida a intermedia, ha afectado la mayor parte de las rocas mencionadas anteriormente, encontrándose estrechamente relacionado con muchas de las mineralizaciones metálicas hipogénicas que se conocen en la región (Maya *et al.*, 2004).

Los dos cinturones esmeraldíferos presentan una litología compuesta por lutitas negras del Cretáceo Inferior, rocas que afloran en zonas de doblamiento (zonas de bisagra) de amplios anticlinorios. Separados por 80 a 100 km, los dos cinturones esmeraldíferos muestran similitud muy marcadas en su geoquímica, estratigrafía y estructural. A escala regional, se distinguen las siguientes regiones morfoestructurales de occidente a oriente: Semifosa del Valle del Magdalena, Sinclinorio de Guaduas, Anticlinorio de Villeta, Sinclinorio de la Sabana de Bogotá, Anticlinorio de Los Farallones, Sinclinorio de Nazareth y la Planicie de los Llanos Orientales. Las estructuras principales son pliegues con direcciones NNE-SSW en general, la misma dirección de la cordillera (Maya *et al.*, 2004).

3. ANTECEDENTES SOBRE EL ESTUDIO COMPOSICIONAL DE LAS INCLUSIONES FLUIDAS EN ESMERALDAS

Beus y Mineev *et al.*, (1972) analizan la distribución geoquímica de los elementos en la zona tectónica e indican fuerte lixiviación de K, V, Th, U, Y, Mo, Sn, Pb, Zn, Cs, Cr, REE (Elementos de las Tierras Raras) y concentración por alteración metasomática de Na, Mn, Mg, CO₂ y S en lutitas negras y venas, comparados con zonas estériles, y la presencia de berilio proveniente de las soluciones profundas. Los autores proponen la relación K/Na en sedimentos activos de corriente como guía para futuras prospecciones de zonas esmeraldíferas en la Cordillera Oriental.

Ottaway *et al.*, (1991) menciona que las mineralizaciones de esmeraldas en la Cordillera Oriental están relacionadas a la tectónica de bloques, las cuales han sido alteradas metasomáticamente por Na y Ca. Elementos como el Cr, V y Be (elementos esenciales en la formación de esmeraldas), se encuentran concentrados en la materia orgánica de los black shales de la roca encajante y que por reacción al paso de las salmueras hidrotermales se liberan dentro de estos fluidos para posteriormente cristalizar en esmeraldas a presiones variables, que ocurrieron durante la reducción de los sulfatos. La temperatura de formación del cuarzo y de esmeraldas tomadas de estudios de IF sugieren que las soluciones mineralizantes fueron salmueras residuales posiblemente de evaporitas, así mismo la reducción termoquímica del sulfato evaporítico fue un factor principal en el desarrollo de los depósitos de esmeraldas.

Según Cheilletz *et al.*, (1994), los depósitos de esmeraldas en la Cordillera Oriental de Colombia, constituyen un caso singular en el mundo. Su origen estuvo determinado, entre otros factores por la participación de fluidos hidrotermales epigenéticos de procedencia cuencal, encargados de lixiviar en las rocas del Cretácico Inf. los elementos necesarios para formar algunas fases minerales, entre ellas las esmeraldas. Las consideraciones anteriores permiten afirmar en términos

muy generales que para la formación de los depósitos esmeraldíferos de la Cordillera Oriental se necesitó de las rocas del Cretácico Inf. de tipo black shale, del paso de unos fluidos hidrotermales con condiciones específicas (presión, temperatura y composición P, T, X) y de unos fenómenos mecánicos que hayan permitido el fracturamiento de las rocas para favorecer el escape de los fluidos. Con el propósito de presentar el estado del arte sobre los estudios geológicos realizados en el área seleccionada para esta investigación, a continuación se presenta un resumen de estos, especialmente de aquellos que guardan relación con el tema de los depósitos esmeraldíferos.

Nuevos análisis estructurales de los depósitos de esmeraldas y ocurrencias de la zona oriental (Branquet *et al.*, 1999a; Branquet *et al.*, 1999b) indican que la mineralización de esmeraldas ocurrió en el límite del Cretácico – Paleógeno durante un evento tectónico extensional tipo escama ligado a una disolución de evaporitas. Esto condujo a la formación de un nivel brechoso estratiforme mineralizado.

La Universidad Nacional, la Universidad Industrial de Santander y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia han desarrollado algunos proyectos de tesis de pregrado con el tema de la prospección de esmeraldas en los cuales se ha tenido en cuenta la estratigrafía, geología estructural, geoquímica y en los últimos años varios trabajos sobre geofísica.

4. METODOLOGÍA

Este documento es el resultado de la interpretación y análisis de resultados de los proyectos de investigación titulados: *“investigación petrográfica y geoquímica de las sedimentitas del cretácico inferior (K1) y sus manifestaciones hidrotermales asociadas; planchas 169, 170, 189, 190 (cordillera oriental): implicaciones en la búsqueda de esmeraldas”*, el cual se desarrolló en el marco del acuerdo específico nº 01 y *“estudio de los procesos de interacción fluido-roca en el cinturón esmeraldífero oriental (cordillera oriental, Colombia) y su importancia en la exploración de nuevos yacimientos hidrotermales”* según acuerdo específico nº 02/2006 complementario al convenio marco de cooperación 005/2001 existente entre el instituto colombiano de geología y minería (Ingeominas) y la universidad industrial de Santander (UIS).

Los análisis de MicroRaman en inclusiones fluidas se realizaron en el ‘Vibrational Spectroscopy Laboratory - RAMAN’, del Instituto Politécnico y Universidad Estatal de Virginia (Virginia Tech), en Blacksburg, Virginia, USA. El equipo utilizado es un Jobin Yvon Horiba LabRam HR 800 (high resolution 800mm focal length spectrometer). Se usaron dos fuentes de luz monocromática: una de tipo Ar (LaserPhysics Reliant 100S-514nm argón laser, set to 50nm) y otra de tipo He-Ne (25nW 633nm He-Ne Laser). El primer tipo de laser (región del verde, en el espectro electromagnético), se uso para analizar los volátiles en las Inclusiones Fluidas presentes en las esmeraldas; el segundo (región del verde, en el espectro electromagnético), se utilizó para calcitas. En análisis de los volátiles en la IF presentes en esmeraldas, es imposible medir con el laser de He-Ne (Rojo), dada la alta fluorescencia que se genera. Lo mismo sucede cuando se analizan IF en calcitas, cuando se utiliza el laser de tipo Ar (Verde). Igualmente se utilizó un sistema de detección CCD (Andor electronically cooled CCD detection system-1024x256).

Previa revisión y análisis de la información existente de los resultados de ablación laser se tomaron los datos composicionales de los análisis para determinar las anomalías de cada elemento encontrado que se analizaron en las muestras de los dos cinturones, después se procedió mediante métodos estadísticos a establecer unas direcciones de orientación Norte-Sur, Sur-Norte y direcciones en profundidad.

La presencia de volátiles, especialmente de CO₂ y N₂, nos indica que existe una condición geológica adicional favorable para la localización de esmeraldas.

Para la parte de la interpretación de los análisis Raman se realizó el ejemplo del procedimiento de análisis para la muestra COR 008/007.

Los análisis de espectroscopia Raman efectuados a las inclusiones primarias polifásicas en esmeralda en la muestra COR 008/007 son mostrados en la Figura 1.

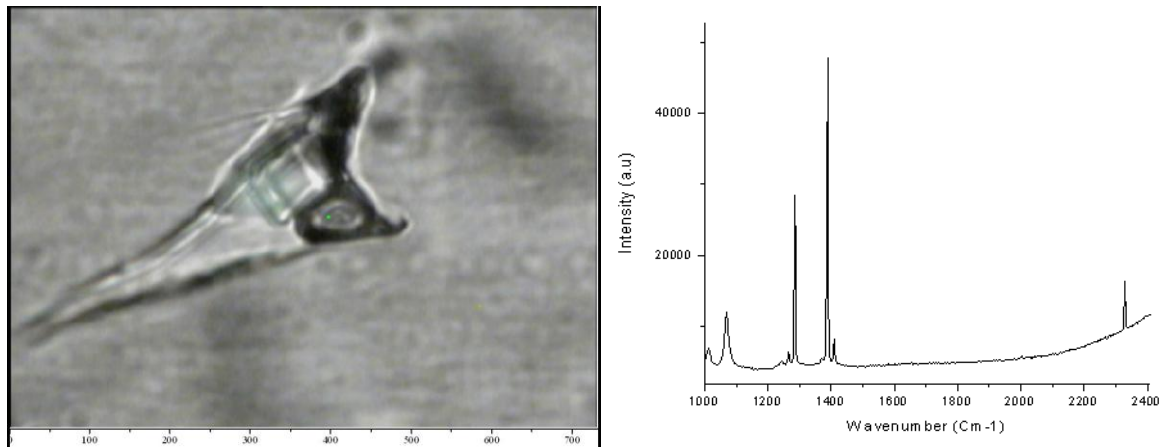


FIGURA 1. Espectros Raman para volátiles de inclusiones primarias polifásicas en esmeralda de la muestra COR 008/007.

Los resultados de Raman, muestran 3 picos los cuales se ubican en $\Delta v=1285$ y $\Delta v=1388$ correspondiendo a la especie CO₂; además otro pico se ubica en $\Delta v=2331$ correspondiendo a la especie N₂. Según Burke *et al.*, (2001).

Tabla 1. Valores $\Delta\nu$ en cm^{-1} , de las especies más comunes en las inclusiones fluidas según Burke *et al.*, (2001).

COMPONENTE	FRECUENCIA RÁMAN(cm^{-1})
N ₂	2331
CO ₂	1285
CO ₂	1388
CH ₄	2917

Tabla 2. Valores de la sección eficaz, definida por Burke *et al.*, (2001).

COMPONENTE	Frecuencia Raman, ν_j, cm^{-1}	σ_0 , Frecuencia independiente	σ_j , 488nm	σ_j , 514nm	σ_j , 633nm
N ₂	2331	1.00	1.0	1.0	1.0
CO ₂	1285	0.80	1.0	1.0	1.1
CO ₂	1388	1.23	1.5	1.5	1.6
CH ₄	2917	8.63	7.6	7.5	7.2

Se realiza el cálculo de la concentración molar del CO₂ y el N₂ en los espectros Raman de las inclusiones fluidas de la Esmeralda basándose en la teoría de polarización Placzek's de la dispersión Raman, la ecuación en Burke *et al.*, (2001) es la siguiente:

$$X_a = \frac{I_a}{\sigma_a * E_a} \frac{1}{\sum_i \frac{I_i}{\sigma_i * E_i}}$$

Donde:

X_a= Es la fracción molar del componente a.

I_a= Es la intensidad de la banda Raman del componente a, (Área del pico).

σ_a = es el valor de la sección eficaz de la banda j del componente a.

E_a = la eficiencia instrumental para el componente respectivamente.

El denominador indica la suma de las áreas de los picos de todas las bandas Raman de los componentes de la mezcla.

Los análisis efectuados se realizaron en base a la información recogida en estos informes, tomando la información de 10 muestras y se procedió a plantear una hipótesis de la dirección de los elementos principales pertenecientes a los solutos y volátiles en las Inclusiones Fluidas primarias de muestras de Esmeralda y de Calcita.

Hallamos el área bajo la curva del CO₂ con los valores mostrados en la FIGURA 2, procediendo a determinar el área de cada pico. El área bajo la curva de los picos se determino con el programa OriginPro 8.

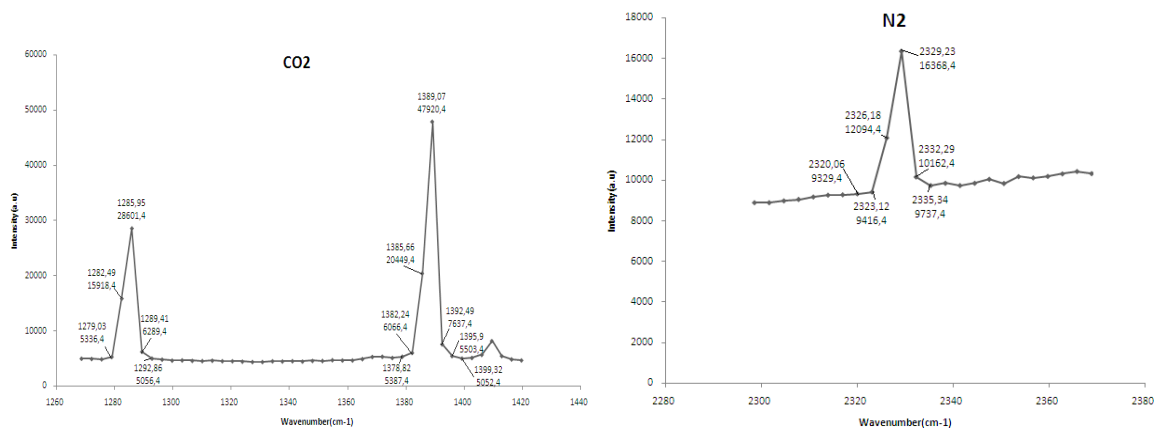


FIGURA 2. Cálculo de los valores para determinar el área bajo la curva del CO₂ y del N₂

Tabla 3. Área de los picos del CO₂ y del N₂

PICO	AREA
a)CO ₂	128886,975
b)CO ₂	209949,895
N ₂	30226,895

Para calcular la fracción molar del CO₂ primero tenemos que conocer los valores del factor instrumental y de la sección eficaz (tabla 2).

$$X_{CO_2} = \frac{\frac{I_{CO_2}}{\sigma_{CO_2} * E_{CO_2}}}{\sum_i \frac{I_i}{\sigma_i * E_i}}$$

Donde:

X_{CO_2} = Es la fracción molar del componente CO₂.

I_{CO_2} = Es la intensidad de la banda Raman del componente CO₂, (Área del pico). = 338836,9

σ_{CO_2} = es el valor de la sección eficaz de la banda j del componente CO₂. = 1,5. Se tomo porque las esmeraldas se analizaron con fuente de luz monocromática de tipo Ar (laserphysics Reliant 100S-514nm argón laser, set to 50nm), se escoge la casilla del (σ_j , 514nm), en la tabla 2.

E_{CO_2} = la eficiencia instrumental para el componente respectivamente. = 0,9 para el CO₂ y 1,1 para el N₂

El denominador indica la suma de las áreas de los picos de los dos componentes del CO₂ y del componente N₂ de las bandas Raman presentes en la mezcla.

Reemplazando los valores en la ecuación quedaría así:

$$X_{CO_2} = \frac{\frac{338836,9}{1,5 * 0,9}}{\frac{128.886,975}{1,5 * 0,9} + \frac{209.949,895}{1,5 * 0,9} + \frac{30.226,895}{1 * 1,1}}$$

$X_{CO_2}=0,90$

$$X_{N_2} = \frac{\frac{30.226,895}{1,5 * 1,1}}{\frac{128.886,975}{1,5 * 0,9} + \frac{209.949,895}{1,5 * 0,9} + \frac{30.226,895}{1 * 1,1}}$$

$X_{N_2}= 0.10$

$$X_{CO_2}+X_{N_2}=1$$

Tabla 4. Fracción Molar de los componentes de la muestra COR 008/007.

Componente	Áreas	X- sección	Inst. Factor	Numerador	Denominador	FRACCION MOLAR	%
CO2	338836,9	1,5	0,9	250990,27	278469,27	0,90	90
N2	30226,9	1	1,1	27478,995	278469,27	0,10	10

5. LOCALIZACION GEOGRÁFICA

El área correspondiente al CEOCC de la Cordillera Oriental se localiza al occidente de los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Santander. Las poblaciones más importantes son Muzo, Quípama, Otanche, La Palma, San Pablo de Borbur, Maripí y Yacopí. El área de trabajo hace parte de las planchas 169, 170, 189 y 190, según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

El área correspondiente al Cinturón Esmeraldífero Oriental (CEORI) de la Cordillera Oriental se localiza al Oriente y Sur de los departamentos de Cundinamarca y Boyacá respectivamente. Las poblaciones más importantes del Dpto. de Cundinamarca son Gachetá, Junín, Gama y Ubalá; mientras que las poblaciones más importantes en el Dpto. de Boyacá son Guayatá, Guateque, Sutatenza, Somondoco, Almeida, Chivor y Macanal. El área de trabajo esta limitada por las coordenadas planas X: 1'000.000 - 1'050.000 mN y Y: 1'045.000 - 1'105.000 mE y que hacen parte de las planchas 210, 228 y 229, según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Los cinturones esmeraldíferos se encuentran localizados en la cordillera Oriental de Colombia la localización de las muestras en cada cinturón se muestra en la FIGURA 3, se escogieron 10 muestras de las cuales ya se tenían los análisis realizados por ablación laser y Raman de materiales de relleno (Esmeralda) de venas hidrotermales (Calcita) tomadas de túneles de explotación y exploración de esmeraldas, procedentes de diferentes localidades del Cinturón Esmeraldífero Oriental y Occidental. Las coordenadas señaladas en la TABLA 5, se establecieron según la proyección Gauss con Origen X= 1000000 e Y= 1000000, ubicado en Santa Fe de Bogotá D.C.

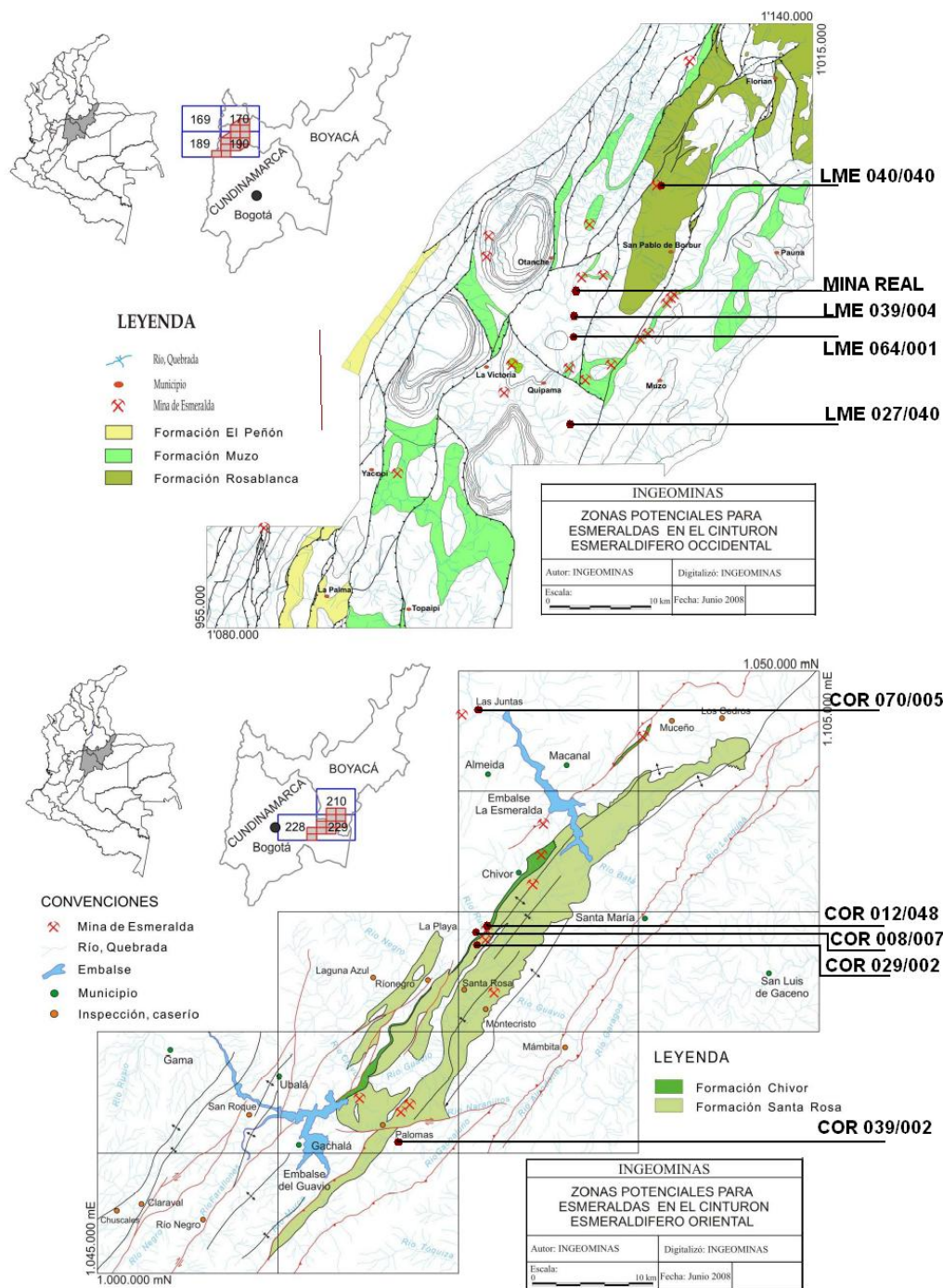


FIGURA 3. Localización de las muestras en los Cinturones Esmeraldíferos de Colombia. Tomado de Reyes *et al.*, 2006 y Terraza *et al.*, 2008

6. RESULTADOS

6.1 ANALISIS Y ESQUEMA GEOLOGICO DE LAS LÁMINAS ANALIZADAS.

Tabla 5. Localización de las muestras escogidas para estudio.

Cinturón Esmeraldífero	Formación Estratigráfica	Muestra	MINERAL HOSPEADOR	MINA/SECTOR	X	Y
ORIENTAL	LAS JUNTAS	COR 070/005	ESMERALDA	Mina Machote/Mpio Somondoco	1045371	1076089
	CHIVOR	COR 039/002	ESMERALDA	Mina el Diamante/Mpio de Ubalá	1013369	1069805
		COR 008/007	ESMERALDA	Minas de San Pedro/Sector Chivor	1028432	1077117
		COR 012/048	ESMERALDA	Minas de Oriente/Sector Chivor	1028861	1077894
	SANTA ROSA	COR 029/002	ESMERALDA/CALCITA	Sector minero de Buenavista/Mpio de Ubalá	1027305	1076365
OCCIDENTAL	MUZO	LME 064/001	ESMERALDA	Mina el Repollal	1112739	992207
		MINA REAL	CALCITA/ESMERALDA	Mina Real	Mina Real	
		LME 027/040	ESMERALDA	Las Pavas/Mpio de Quípama	1105528	990647
		LME 039/004	ESMERALDA	Mina la paz/Sector Coscuéz	ESMERACOR	
	ROSABLANCA	LME 040/040	ESMERALDA	Mina El Trapiche/Sector Rosablanca	1123596	999326

Se analizaron los datos de muestras localizadas en la Fm. Santa Rosa, en la Fm. Chivor y en la Fm. Las Juntas. En la FIGURA 4. Se observan los espesores de las formaciones a escala. El Grupo Farallones tiene un espesor en la zona de 2.500 Mt, la Formación Santa Rosa tiene un espesor de 480 Mt, la formación Chivor la cual es la más importante en este muestreo solamente tiene un espesor de 170 Mt, la formación Lutitas de Macanal presenta un espesor de 1.250 Mt y la formación Las Juntas, la cual es la más joven presenta un espesor de 700 Mt.

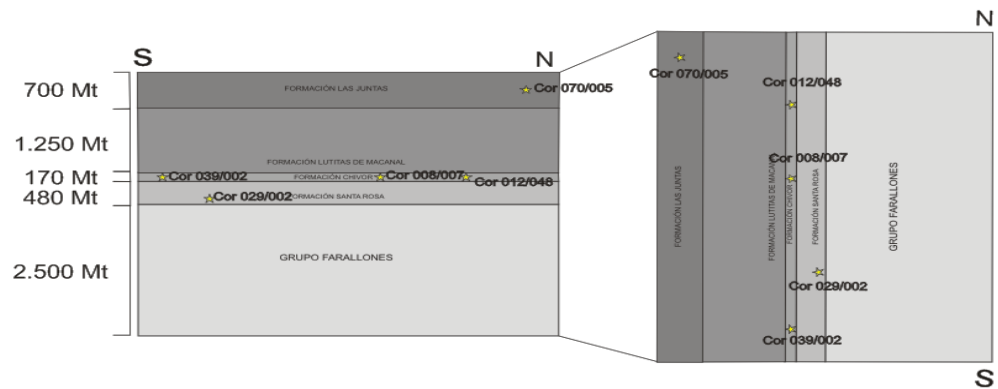


FIGURA 4. Esquema Geológico de las muestras en las formaciones del Cinturón Oriental.

Se analizaron los datos de muestras localizadas en la Fm. Muzo y en la Fm. Rosablanca. En la FIGURA 5. Se observan los espesores de las formaciones a escala, la más antigua es la Formación Rosablanca con un espesor en la zona de 1.000 Mt. La formación Furatena presenta un espesor de 1.050 Mt y la más joven es la Formación Muzo con un espesor de 200 Mt.



FIGURA 5. Esquema Geológico de las muestras en las formaciones del Cinturón Occidental.

6.2 PETROGRAFÍA Y MICROTERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS, CINTURÓN ORIENTAL.

Esta información se tomo del informe enunciado anteriormente, para la descripción petrográfica de las inclusiones fluidas contenidas en minerales de relleno de venas, se empleó un microscopio petrográfico de luz transmitida Carl Zeiss Axiolab con objetivos de 10X y aumentos de 5X, 10X, 20X y 50X respectivamente; un resumen de esta descripción puede verse en la TABLA 6. Los resultados son los siguientes:

Tabla 6. Resumen de la petrografía hecha a inclusiones fluidas en minerales de relleno de venas de los cinturones esmeraldíferos.

CINTURON ESMERALDIFERO	UNIDAD	MUESTRA	MINERAL HOSPEADOR	TIPO GENETICO	FASES (%)				TAMAÑO (µm)	GRADO DE RELLENO SOLO PARA IF L + V
					L	V	S	S1		
ORIENTAL	FORMACION LAS JUNTAS	COR 070/005	ESMERALDA	PRIMARIAS	75	10	15		20 A 90	-
				SECUNDARIAS	80	20			20 A 60	0.80
	FORMACION CHIVOR	COR 039/002	ESMERALDA	PRIMARIAS	65	15	20		10 A 25	-
				SECUNDARIAS	80	20			<10	0.80
	FORMACION CHIVOR	COR 008/007	ESMERALDA	PRIMARIAS	75	10	15		20 A 70	-
				SECUNDARIAS	70	10	20		<30	-
	FORMACION SANTA ROSA	COR 029/002	ESMERALDA	PRIMARIAS	70	20	10		10 A 90	-
				SECUNDARIAS	70	10	20		5 A 30	-
			CALCITA	PRIMARIAS	60	20	20		20 A 30	-
				SECUNDARIAS	60	20	20		<7	-

MICROTERMOMETRÍA DE INCLUSIONES FLUIDAS. CINTURON ORIENTAL.

Esta información se tomo del informe enunciado anteriormente, el análisis microtermométrico se realizó a 30 láminas utilizando una consola LINKAM TP-94 con límites de temperatura programables entre los -200° C y 600° C y una platina calentadora - enfriadora LINKAM THMS 600. El estudio realizado es de carácter preliminar y consistió en la toma los datos de temperatura de los cambios de fases de las inclusiones fluidas, durante su enfriamiento y posterior calentamiento. Las temperaturas tomadas se denominan:

T_{pf_v} = primera fusión detectable del vapor
 T_{pf_L} = primera fusión detectable del líquido
 T_{ffhh} = temperatura de la fusión final de la hidrohalita
 T_{ffi} = temperatura de fusión final del hielo
 T_{fc} = temperatura de fusión del clatrato (para IF con CO₂)
 T_{fh} = temperatura de fusión de la halita
 T_h = temperatura de homogenización total del fluido
 T_d = temperatura de decrepitación

Estas temperaturas permitieron identificar en algunos casos un sistema composicional preliminar pero dominante para cada una de las muestras, además de su densidad y temperatura de atrapamiento (T_h).

El análisis microtermométrico presentó diversas dificultades las cuales limitaron la cantidad de datos obtenidos, la mayor de ellas la alta densidad de la mayoría de las inclusiones (inclusiones polifásicas con cristales de halita) que provocan la decrepitación de las inclusiones antes de su homogenización o de la fusión de la halita y la dificultad para congelarse. Teniendo presente esta dificultad a continuación se presenta los resultados de las mediciones obtenidos en las inclusiones fluidas.

En la formación las Juntas las inclusiones primarias polifásicas de la esmeralda presentan datos de primera fusión detectable a los -51 °C y a los -30.6 °C indicando la presencia de iones Ca^{++} y Mg^{++} en la salmuera, la temperatura de fusión final de la hidrohalita a los -31 °C y a los -21.6 °C, no se detectó la fusión final del hielo. Durante el calentamiento se obtuvieron datos de homogenización de la burbuja a los 144 °C, seguido por la homogenización de la halita 346 °C. Sin embargo es común que estas decrepiten entre los 183 °C y los 259 °C.

En la formación Chivor muestran temperaturas eutécticas alrededor de los $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ indicador de la presencia de iones Ca, los otros cambios no fueron detectados, durante el calentamiento las inclusiones presentan una gran tendencia a la decrepitación entre los 189 y los $334\text{ }^{\circ}\text{C}$, antes de la homogenización de las mismas.

En esta misma formación presentan también valores en las inclusiones primarias durante el enfriamiento de temperaturas eutécticas alrededor de los $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ lo que indica la presencia de iones Ca en la salmuera. En el calentamiento la homogenización de estas inclusiones está marcada por la fusión de la halita entre los 303 y los $341\text{ }^{\circ}\text{C}$, que corresponden a rangos de salinidades entre los 35 y los 39% peso de NaCl.

En la formación Santa Rosa las inclusiones fluidas primarias en cristales de calcita al ser sometidas a enfriamiento y posterior calentamiento exhibieron dos comportamientos distintos:

Las inclusiones primarias polifásicas de la calcita en el enfriamiento muestran temperaturas eutécticas entre los $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ sugiriendo la presencia de iones Ca^{++} en la salmuera, con fusiones finales de la hidrohalita alrededor de los $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$, en el calentamiento las inclusiones alcanzan primero la homogenización de la halita a los 215°C pero posteriormente decrepitó antes de la homogenización de la burbuja a los $221\text{ }^{\circ}\text{C}$; sin embargo al realizar ensayos de Microtermometría a otras inclusiones primarias se observa que estas decrepitaron entre $329\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $346\text{ }^{\circ}\text{C}$ sugiriendo la existencia de otra familia de inclusiones primarias.

En inclusiones fluidas que corresponden a una vena de esmeralda y calcita durante el calentamiento las inclusiones primarias polifásicas presentaron homogenización primero de la burbuja entre los 168 y los $201\text{ }^{\circ}\text{C}$, la halita se disolvió entre los $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los $336.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ que corresponde a salinidades entre los 35.4 y los 37.9% en peso de NaCl.

6.3 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE ANALISIS RAMAN, CINTURON ORIENTAL Y OCCIDENTAL.

Según los valores calculados hay una alta concentración de CO₂ en comparación con el N₂, se procede a calcular las concentraciones molares de las demás muestras en los 2 cinturones esmeraldíferos. (Tabla 8).

Se observan mayores porcentajes de N₂ en las muestras de las formaciones Muzo y Chivor, las cuales presentan las esmeraldas de mejor calidad, nos sirve como valores de referencia, en la búsqueda de las zonas con mejor prospección esmeraldífera, como criterio de exploración, entre más alto sea el contenido de N₂ en una zona esmeraldífera mayor es la probabilidad de encontrar esmeraldas de mejor calidad.

Tabla 7. Fracción molar de CO₂ y N₂ presentes en las muestras de Calcita.

CINTURON	FORMACION	MUESTRA	Componente	Áreas	X-section	Inst. Factor	Numerador	Denominador	FRACCION MOLAR	%
ORIENTAL	SANTAROSA	COR 029/002	CO ₂	86000,8	1,6	0,9	59722,743	61500,9521	0,97	97
			N ₂	1956,03	1	1,1	1778,2091	61500,9521	0,03	3
OCCIDENTAL	MUZO	MINA REAL	CO ₂	14884,4	1,6	0,9	10336,375	10721,4205	0,96	96
			N ₂	423,55	1	1,1	385,04545	10721,4205	0,04	4

Tabla 8. Fracción molar de CO₂ y N₂ presentes en las muestras de esmeraldas.

CINTURON	FORMACION	MUESTRA	Componente	Áreas	X-sección	Inst. Factor	Numerador	Denominador	FRACCION MOLAR	%	
ORIENTAL	LAS JUNTAS	COR 070/005	CO ₂	96887,454	1,5	0,9	71768,484	78805,09354	0,91	91	
			N ₂	7740,27	1	1,1	7036,6091	78805,09354	0,09	9	
	CHIVOR	COR 039/002	CO ₂	559941,915	1,5	0,9	414771,79	435299,1025	0,95	95	
			N ₂	22580,045	1	1,1	20527,314	435299,1025	0,05	5	
		COR 008/007	CO ₂	338836,87	1,5	0,9	250990,27	278469,2695	0,90	90	
			N ₂	30226,895	1	1,1	27478,995	278469,2695	0,10	10	
		COR 012/048	CO ₂	179987,04	1,5	0,9	133323,73	140461,1021	0,95	95	
			N ₂	7851,1056	1	1,1	7137,3687	140461,1021	0,05	5	
	SANTAROSA	COR 029/002	CO ₂	109346,379	1,5	0,9	80997,318	88779,94952	0,91	91	
			N ₂	8560,895	1	1,1	7782,6318	88779,94952	0,09	9	
OCCIDENTAL	MUZO	LME 064/001	CO ₂	331042,39	1,5	0,9	245216,59	253442,867	0,97	97	
			N ₂	9048,91	1	1,1	8226,2818	253442,867	0,03	3	
		MINA REAL	CO ₂	376805,78	1,5	0,9	279115,39	284236,6835	0,98	98	
			N ₂	5633,42	1	1,1	5121,2909	284236,6835	0,02	2	
		LME 027/040	CO ₂	116317,984	1,5	0,9	86161,47	110105,5105	0,78	78	
			N ₂	26338,445	1	1,1	23944,041	110105,5105	0,22	22	
		LME 039/004	CO ₂	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	
			N ₂	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	
		ROSABLANCA	LME 040/040	CO ₂	97734,486	1,5	0,9	72395,916	89103,79737	0,81	81
				N ₂	18378,67	1	1,1	16707,882	89103,79737	0,19	19

6.4 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE ANALISIS POR ABLACION LASER, CINTURON ORIENTAL.

Para realizar las graficas siguientes se tomaron en cuenta los valores más altos de cada elemento para graficar él %W de cada muestra en su respectiva formación, se pueden observar claramente las direcciones en las que disminuye o aumentan estos elementos, solo se tomaron estos elementos los cuales eran los más representativos, los elementos que se observan como trazas son los siguientes: Li, Sc, Mn, Ni, Zn, Rb, Cs, Ba, Ti, Ga, Pb, La, Ce, y Pb.

Para la elaboración de las graficas que me indican un aumento o disminución de estos elementos la realicé con valores estadísticos ya que la poca densidad del muestreo me dificulta asegurar la dirección en la que aumenta o disminuyen estos elementos.

Tabla 9. Porcentaje en peso de los elementos principales analizados en las muestras.

CINTURON	FORMACION	MUESTRA	Na	Mg	Ca	K	Fe
ORIENTAL	LAS JUNTAS	COR 070/005	8,38-12,89	5,5-11,24	0,53-2,52	0,28-0,98	1,88-2,81
	CHIVOR	COR 039/002	32,58-43,42	12,7-44,12	3,79-19,41	3,04-13,26	9,16-15,13
		COR 008/007	5,64-7,87	2,44-4,48	7,27-10,19	1,58-2,23	1,76-3,6
		COR 012/048	6,27-12,1	4,93-11,25	2,55-8,55	0,59-1,95	0,87-1,99
		TOTAL	5,64-43,42	2,44-44,12	2,55-19,41	0,59-13,26	0,87-15,13
	SANTAROSA	COR 029/002	9,2-10,79	3,75-8,99	2,08-5,09	0,72-1,7	2,08-3,52
OCCIDENTAL	MUZO	LME 064/001	9,51-12,77	5,29-15,22	0,16-3,68	0,07-3,78	0,96-3,69
		MINA REAL	2,18-15,07	1,41-10,95	1,51-13,23	0,06-2,57	1,98-5,19
		LME 027/040	6,51-10,31	7,11-13,54	2,22-6,72	1,34-2,82	1,8-3,03
		LME 039/004	0,84-16,48	0,74-11,62	0,5-25,96	0,04-1,5	0,42-4,95
		TOTAL	0,84-16,48	0,74-15,22	0,16-25,96	0,04-3,78	0,42-5,19
	ROSABLANCA	LME 040/040	16,13-18,95	3,82-6,02	2,34-5,36	1,03-2,18	0,8-2,02

Se elaboran graficas de Porcentaje en peso Vs formaciones de los elementos principales pertenecientes a las muestras de esmeraldas ubicadas en el Cinturón Oriental ubicadas por formaciones y en sentido Sur-Norte.

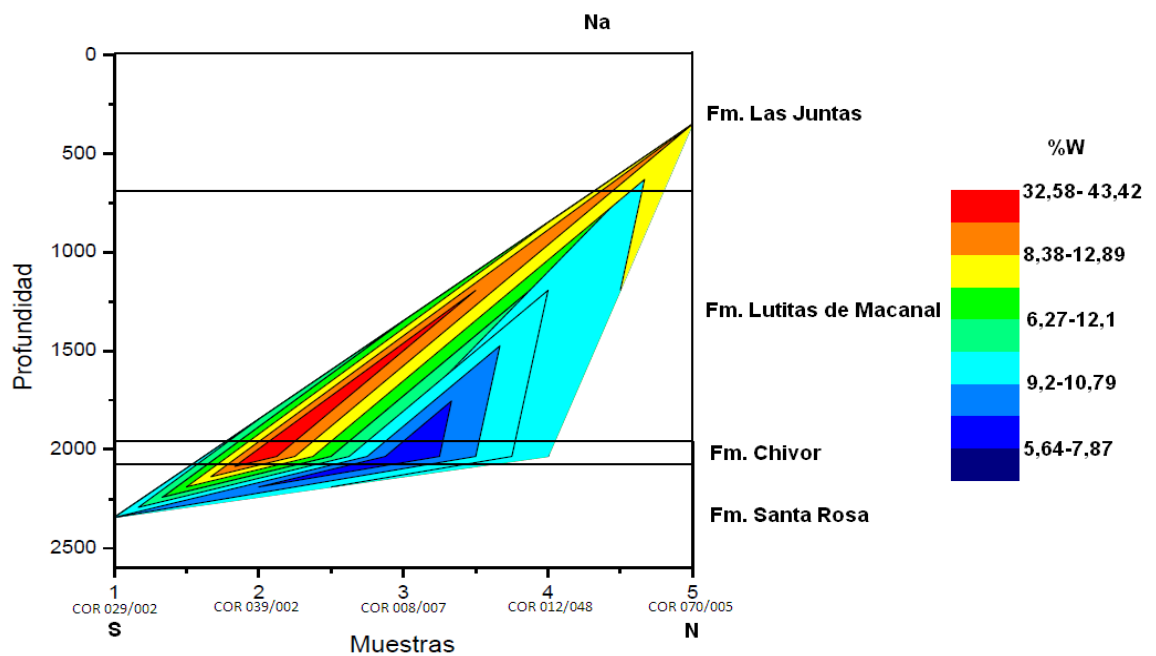
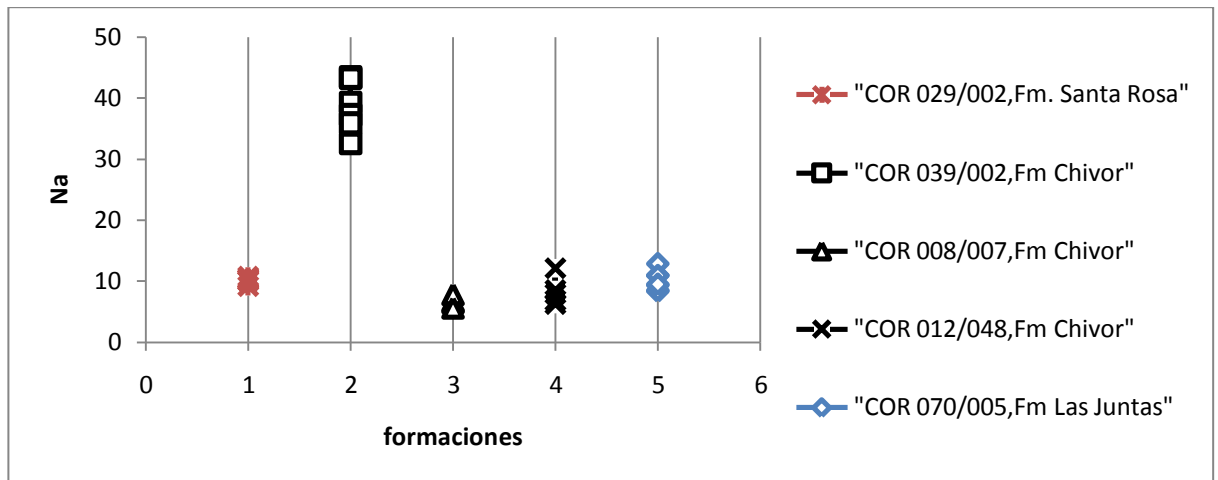


FIGURA 6. Porcentaje de Na presente en las formaciones del Cinturón Oriental.

En la figura 6, se puede observar que en la formación Chivor presenta un fuerte descenso y luego un leve aumento en la cantidad de Na en sentido Sur y un leve aumento hacia la Formación Las Juntas. Se observaron las mayores

concentraciones en la Formación Chivor. En el contexto de profundidad se observa que el flujo de elementos se desplaza en el mismo sentido de la Formación Chivor.

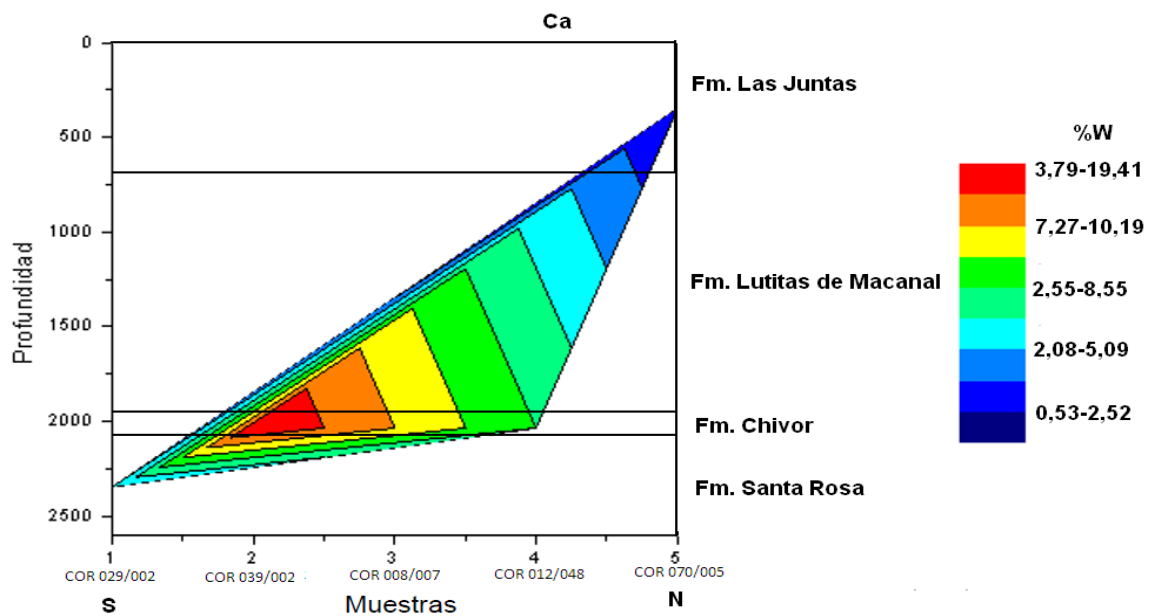
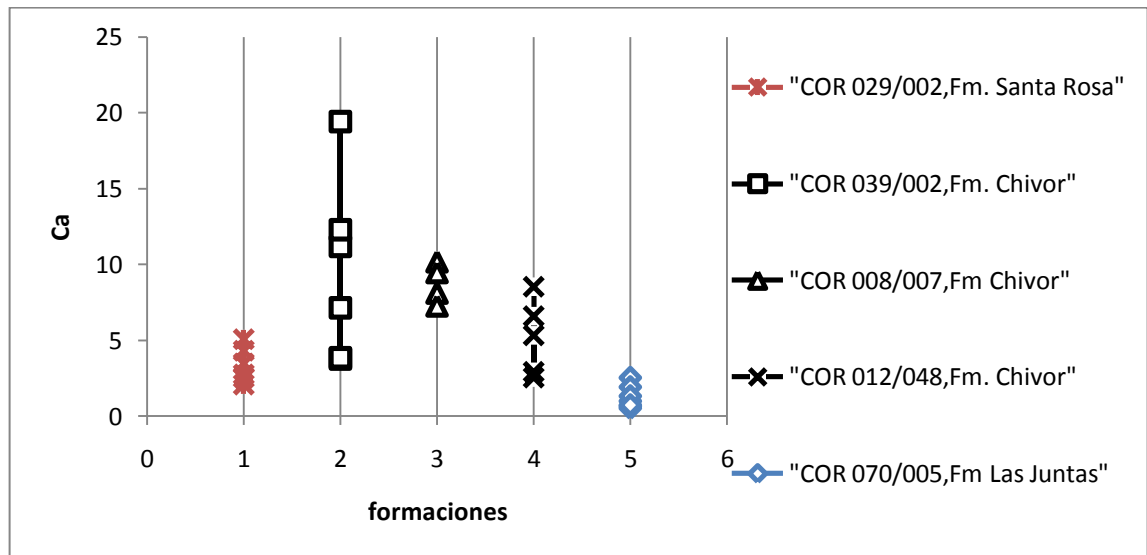


FIGURA 7. Porcentaje de Ca presente en las formaciones del Cinturón Oriental.

En la figura 7, se puede observar que en la Formación Chivor se presenta un aumento en la cantidad de Ca en sentido Sur y una leve disminución hacia la

Formación Las Juntas, también hacia la Formación Santa Rosa se puede observar un leve aumento en comparación con la Formación Las Juntas. Se observaron las mayores concentraciones en la Formación Chivor.

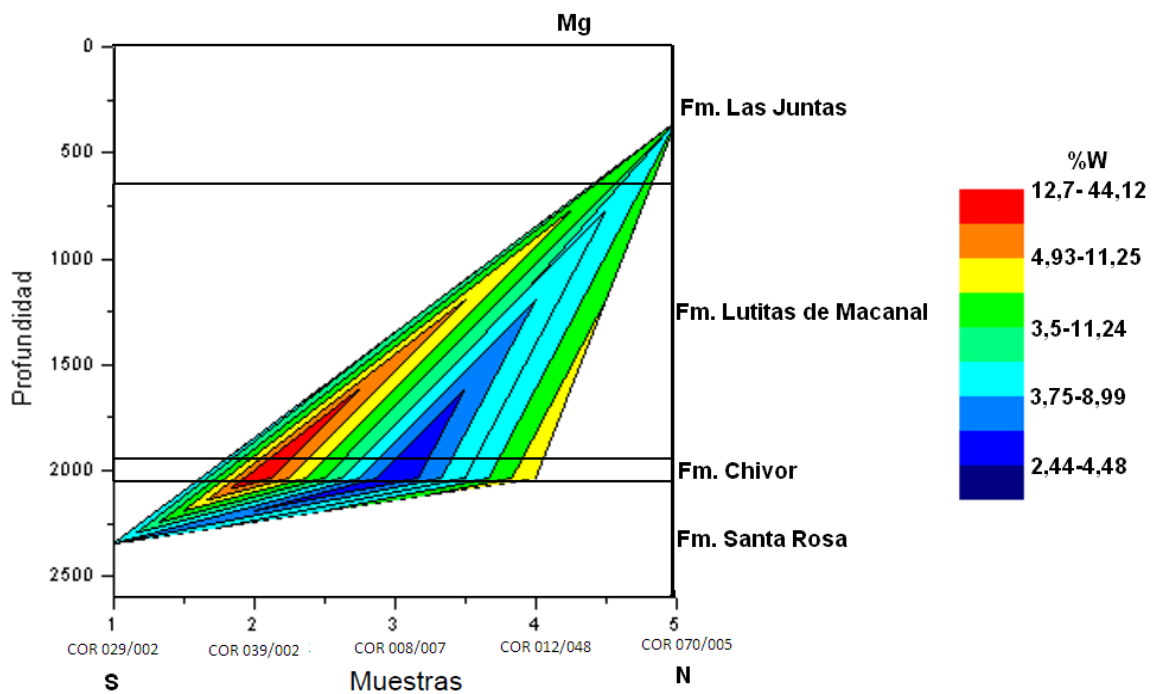
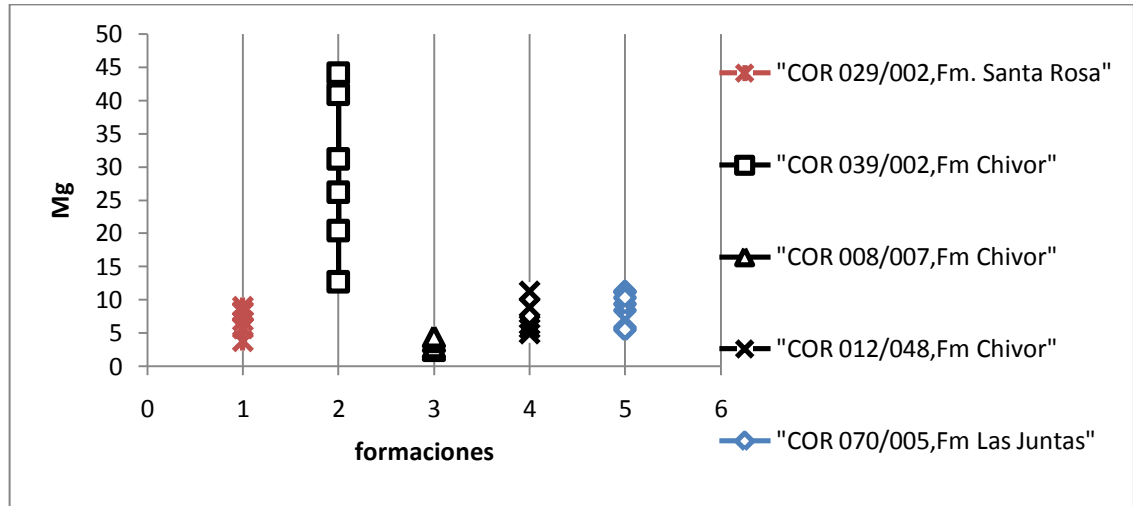


FIGURA 8. Porcentaje de Mg presentes en las formaciones del Cinturón Oriental.

En la figura 8, se puede observar que en la Formación Chivor se presenta un fuerte descenso y después un leve aumento en la cantidad de Mg en sentido Sur-

Norte y una leve aumento hacia la Formación Las Juntas y la Formación Santa Rosa. Se observaron las mayores concentraciones en la Formación Chivor.

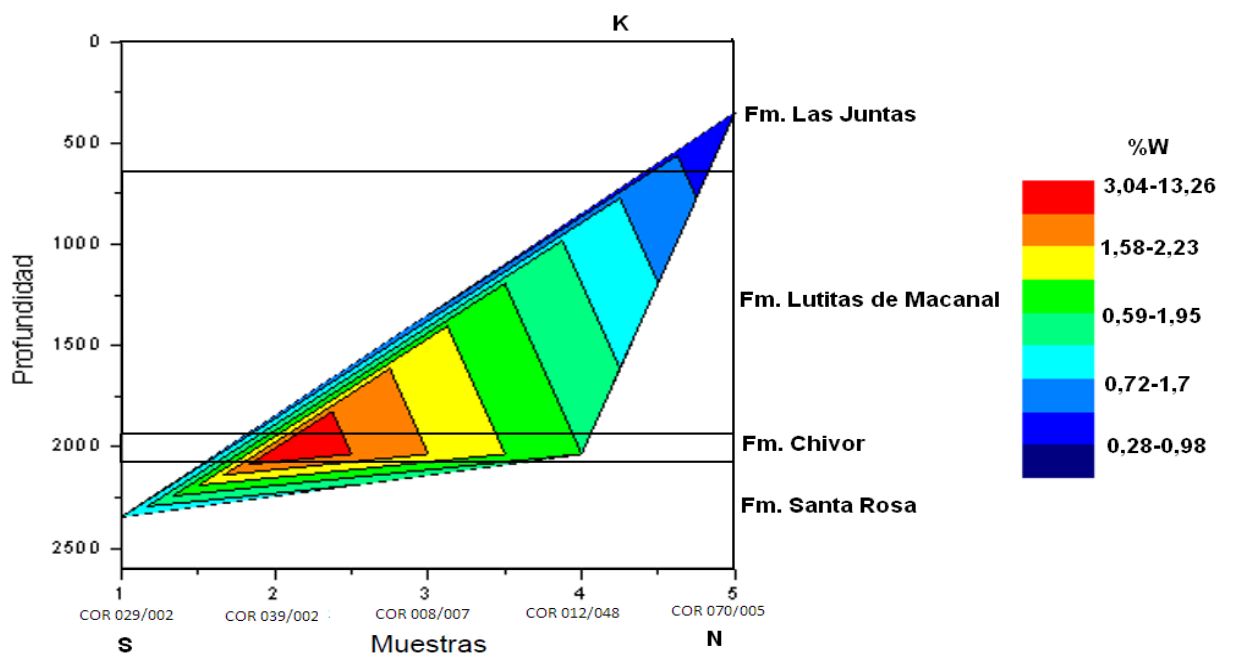
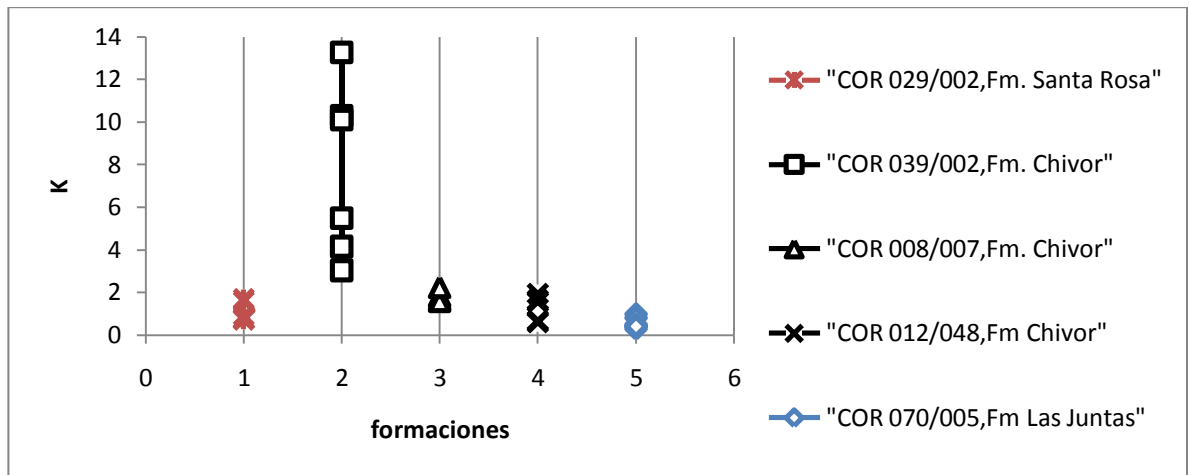


FIGURA 9. Porcentaje de K presente en las formaciones del Cinturón Oriental.

En la figura 9, se puede observar que en la Formación Chivor se presenta un descenso en la cantidad de K en sentido Norte y un fuerte descenso hacia la

Formación Santa Rosa y la Formación Las Juntas. Se observaron las mayores concentraciones en la Formación Chivor.

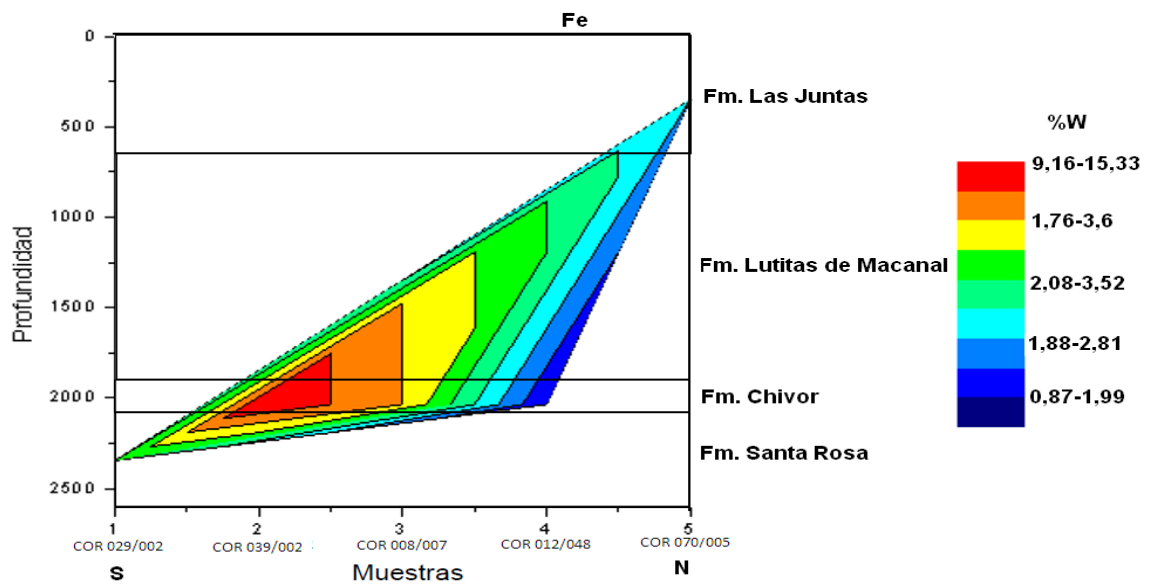
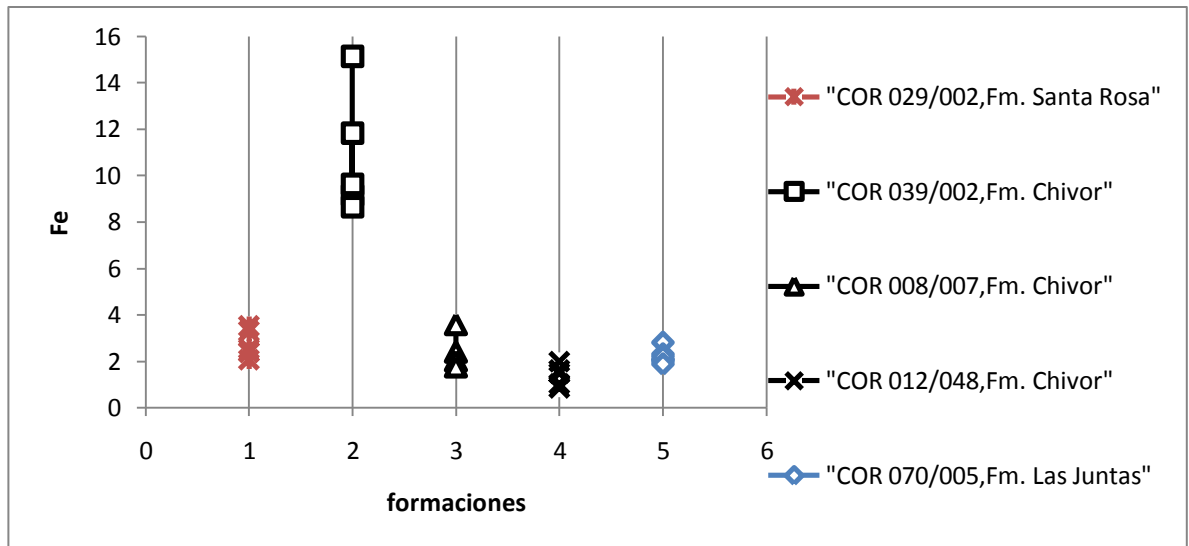


FIGURA 10. Porcentaje de Fe presente en las formaciones del Cinturón Oriental.

En la figura 10, se observa que en la Formación Chivor se presenta un fuerte descenso en la cantidad de Fe en sentido Sur-Norte y un leve ascenso hacia la Formación Santa Rosa y la Formación Las Juntas. Se observaron las mayores concentraciones en la Formación Chivor.

6.5 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE ANALISIS POR ABLACION LASER, CINTURON OCCIDENTAL.

Se elaboran graficas de Porcentaje en peso Vs formaciones de los elementos principales pertenecientes a las muestras de esmeraldas ubicadas en el Cinturón Occidental ubicadas por formaciones y en sentido Sur-Norte.

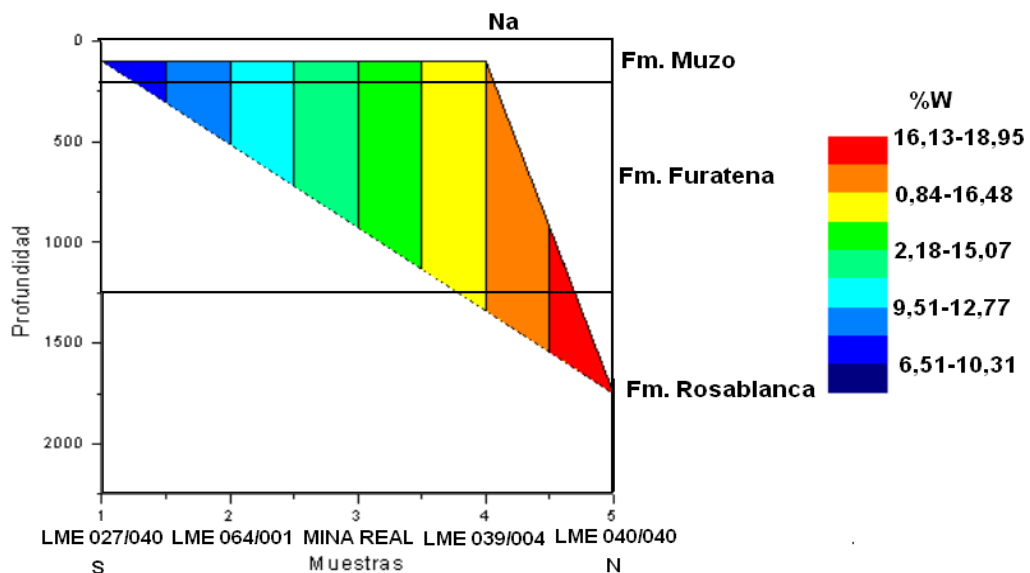
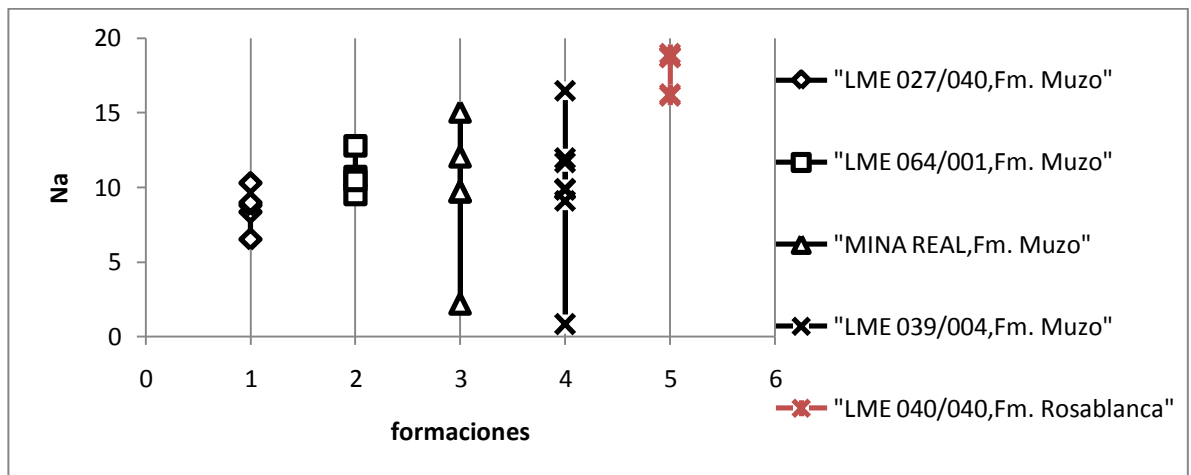


FIGURA 11. Porcentaje de Na presente en las formaciones del Cinturón Occidental.

En la figura 11, Se observa una disminución homogénea en sentido Norte-Sur del Na, encontrándose el valor más alto hacia la Formación Rosablanca y disminuyendo hacia la Formación Muzo, Se observaron las mayores concentraciones en la Formación Rosablanca.

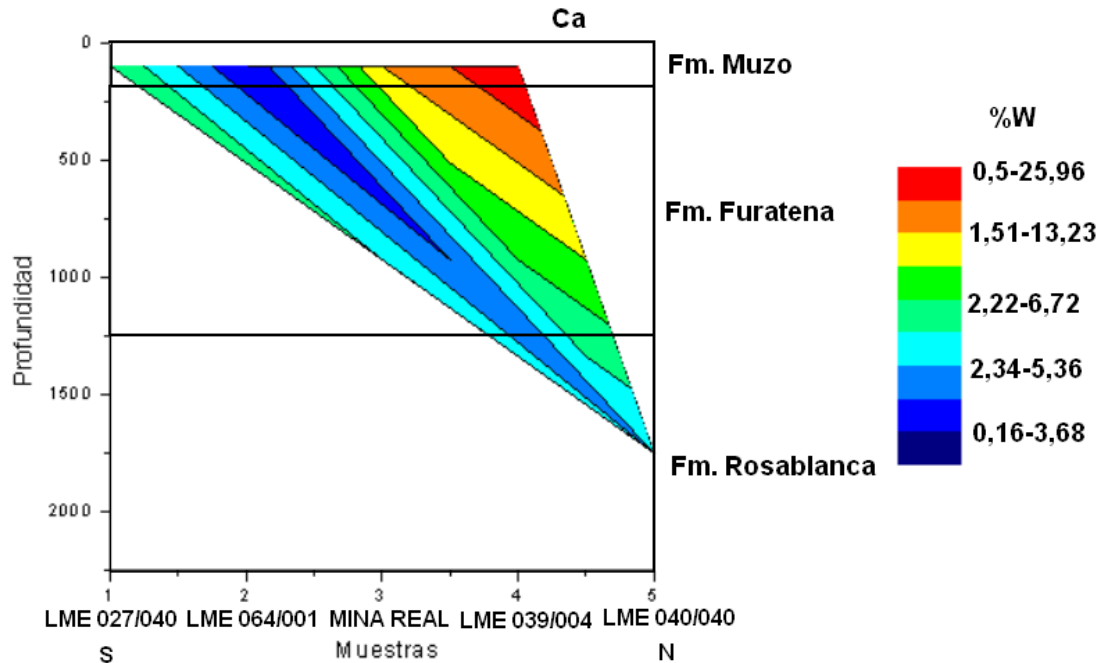
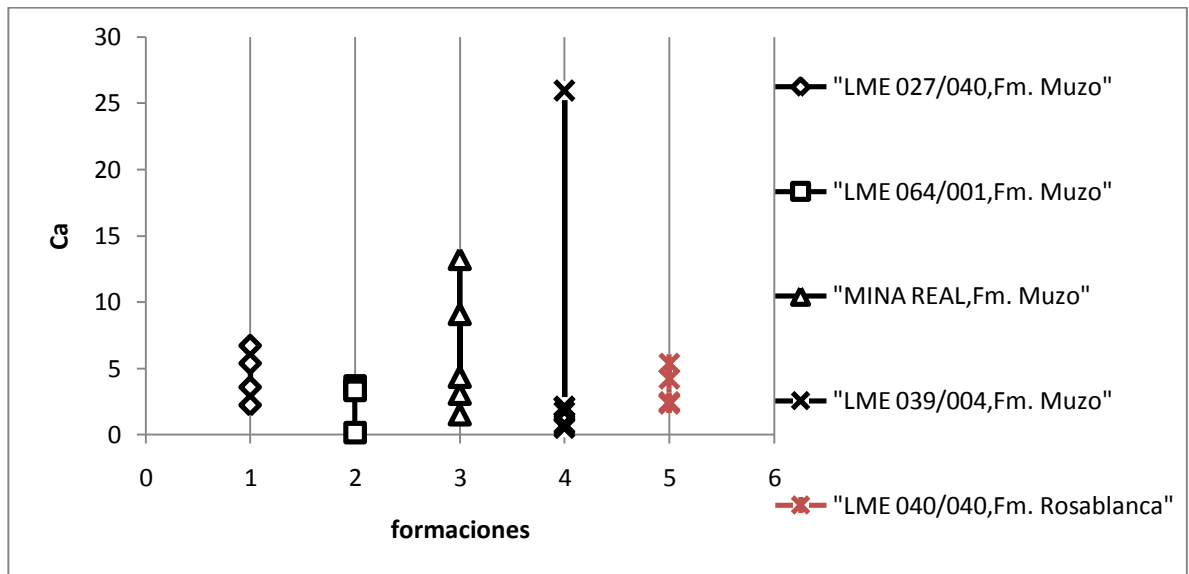


FIGURA 12. Porcentaje de Ca presente en las formaciones del Cinturón Occidental.

En la figura 12, se puede observar un leve aumento del Ca hacia la Formación Muzo y una fuerte disminución hacia el sur en la misma formación. Presenta un leve aumento en la misma Formación Muzo hacia el Sur. Se observaron las mayores concentraciones en la Formación Muzo.

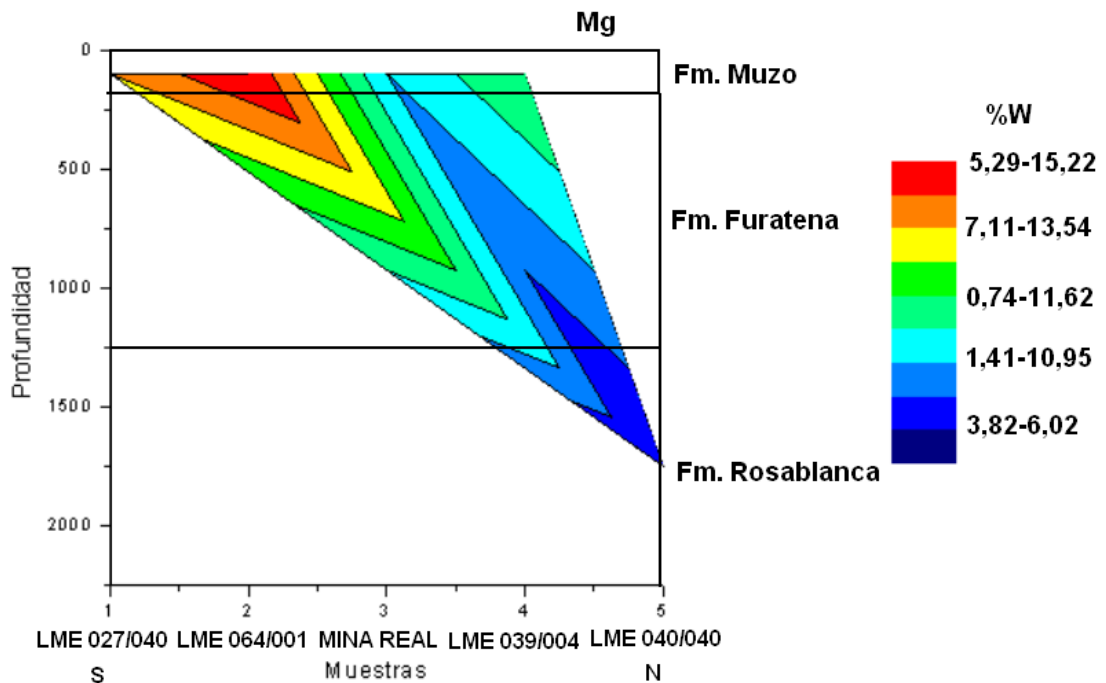
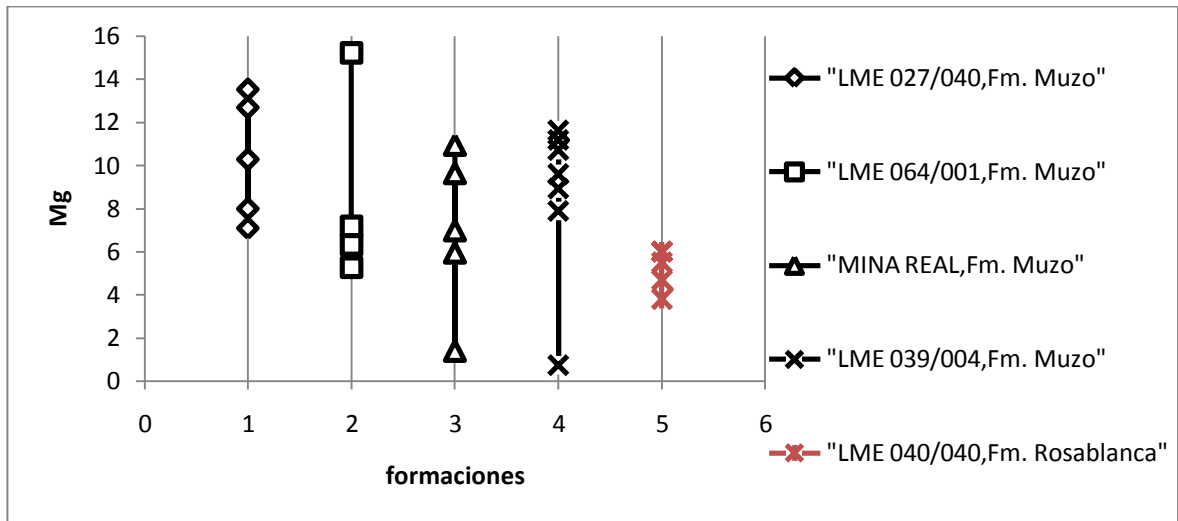


FIGURA 13. Porcentaje de Mg presente en las formaciones del Cinturón Occidental.

En la figura 13, se observa que en la Formación. Muzo presenta una disminución de Mg en sentido Sur-Norte y un fuerte descenso hacia la Formación Rosablanca. Se observaron las mayores concentraciones en la Formación Muzo.

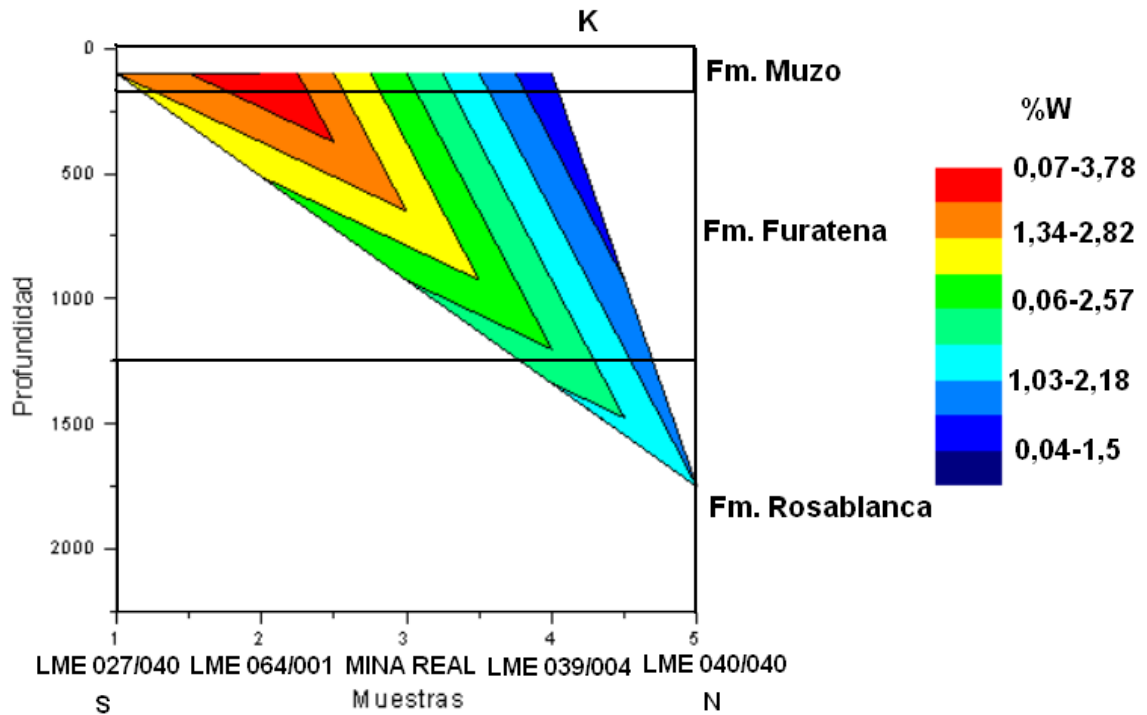
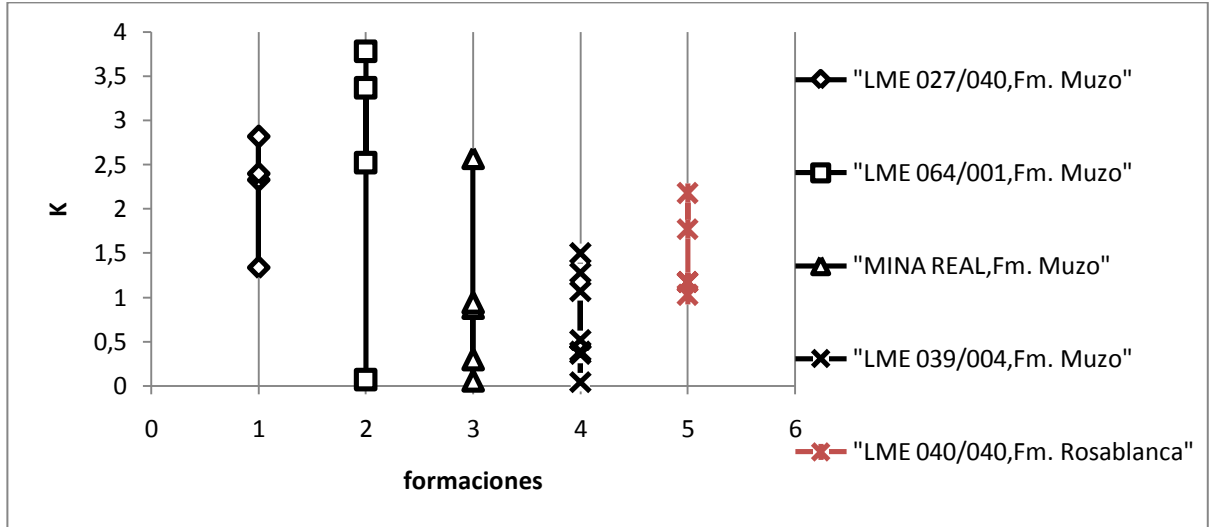


FIGURA 14. Porcentaje de K presente en las formaciones del Cinturón Occidental

En la figura 14, se observa que en la Formación Muzo presenta un aumento y luego una fuerte disminución en sentido Sur-Norte y más hacia el Norte un leve

aumento en la cantidad de K en la Formación Rosablanca. Se observaron las mayores concentraciones en la Formación Muzo.

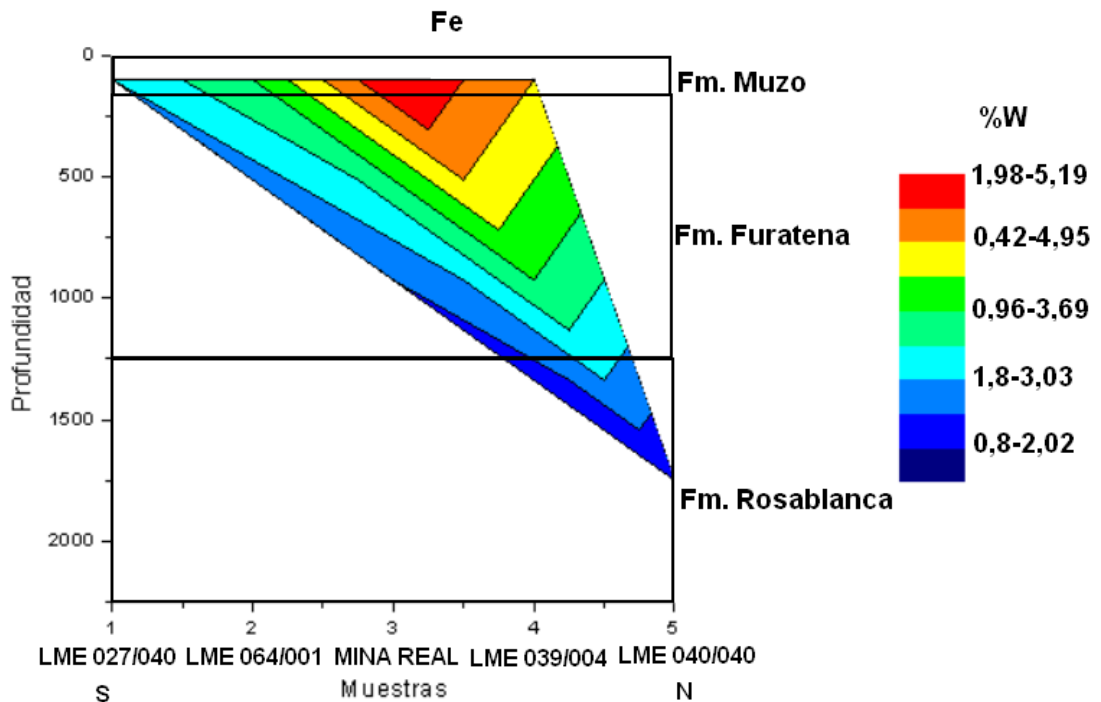
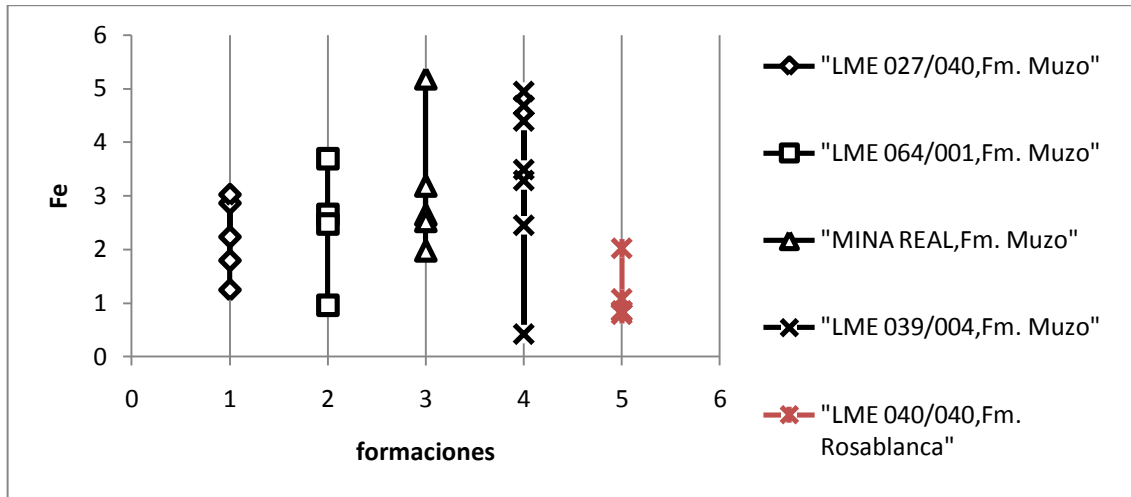


FIGURA 15. Porcentaje de Fe presente en las formaciones del Cinturón Occidental.

En la figura 15, Se puede observar una disminución de Fe hacia la Formación Rosablanca desde la Formación Muzo y una disminución en esta misma formación, en sentido Norte-Sur. Se observaron las mayores concentraciones en la Formación Muzo, se observan valores homogéneos.

7. INTERPRETACIÓN SOBRE PROCEDENCIA DE SOLUTOS Y VOLÁTILES.

En el Cinturón Oriental se puede observar unas características especiales, la mayor concentración de los elementos se encuentra en la formación con el menor espesor estratigráfico el cual sería un factor para que en esta formación se presente esta anomalía característica, hacia el Sur en la Fm. Chivor se puede indicar una posible dirección del flujo en el sentido Norte-Sur en este cinturón, en profundidad se puede interpretar un flujo alto en la Fm. Chivor ya que las formaciones adyacentes presentan menor contenido de estos elementos obteniéndose como resultado que en la Fm. Chivor en la parte Sur se encuentran las Esmeraldas de mejor calidad.

En el Cinturón Occidental se observa que el Na se comporta de manera diferente que el resto de elementos analizados, su concentración es más alta en la Fm. Rosablanca pero estos valores no son demasiados altos como para indicar una variación importante, el resto de elementos en mayor concentración se encuentran en su mayoría depositados en la Fm Muzo. Se puede observar un aumento del Na y Ca en sentido Sur-Norte y un aumento de Mg y K en sentido Norte-Sur y una depositación mayor del Fe hacia el centro del Cinturón. En profundidad todo indica que el flujo estaría subiendo pasando por las Fm. Rosablanca y Furatena depositándose mayormente en la Fm. Muzo. Obteniéndose como resultado la Esmeralda de mejor calidad hacia el Norte de la Fm. Muzo.

Los análisis de geoquímica de isótopos estables y radiogénicos permiten establecer la procedencia de los paleofluidos que han afectado las sedimentitas del Cretácico Inferior, y para datación geocronológica de eventos tectonotermales e hidrotermales de interés.

La presencia de los solutos (Na, Ca, Mg, K y Fe) provienen de las salmueras hipersalinas calientes los cuales fueron los fluidos formadores de las Esmeraldas.

Elementos como el Cr, V y Be (elementos esenciales en la formación de esmeraldas), se encuentran concentrados en la materia orgánica, en este informe no se procedió a su análisis pero los análisis hechos por Raman nos indica la presencia de N₂ confirmando la existencia de esta materia orgánica debido a la interacción con estratos ricos en materia orgánica que por reacción al paso de las salmueras hidrotermales se liberan dentro de estos fluidos para posteriormente cristalizar en esmeraldas.

Los sitios productivos se localizan en las zonas de mineralización de las brechas y venas, características que se pueden extender en toda la zona, desarrollan al parecer la siguientes zonas de piso a techo: Brechas sin evidencias a nivel macroscópico de estar cementadas por precipitados hidrotermales (localmente muy blandas debido al paso descendente de aguas supergénicas actuales); bolsas aisladas dentro de la zona brechificada con precipitados hidrotermales (calcita, albita, sulfuros, mayoritariamente); bandeamientos albitíticos (hacia el techo del nivel incompetente triturado), albitización por reemplazamiento en la roca encajante, y venillas y venas (calcita y albita), fundamentalmente en la roca competente suprayacente.

Este rasgo mineralógico, evidentemente tiene su reflejo en la distribución de los elementos químicos o presencia de anomalías geoquímicas, ya que se espera un aumento en el contenido de Sodio (Na) al ir avanzando el fluido.

Los cálculos de la fracción Molar del CO₂ y del N₂ en las muestras de los cinturones esmeraldíferos me indican un alto contenido de CO₂ en comparación con el N₂. En las Fm. Chivor y en la Fm. Muzo se presentan los valores más altos de N₂ indicándome la existencia de esmeraldas de mejor calidad en estas

formaciones, se presentan los valores más altos hacia el Sur de la Fm. Muzo con un 22% en comparación con valores de 2% encontrados en otras zonas.

CONCLUSIONES

Mediante el análisis de los resultados efectuados por LA ICP–MS y espectroscopia Raman, de los diversos iones en solución encontrados e interpretados tales como: Sodio (Na), Magnesio (Mg), Potasio (K), Calcio (Ca), Hierro (Fe) y la existencia de CO₂ y del N₂ encontrados en las inclusiones fluidas contenidas en cristales de esmeralda de muestras pertenecientes a los reservorios de los cinturones Oriental y Occidental de la Cordillera Oriental de Colombia nos permiten sugerir la mayor concentración de estos elementos en la Formación Chivor en el Cinturón Oriental y en la Formación Muzo del Cinturón Occidental.

Los cálculos realizados para determinar la fracción Molar del CO₂ y del N₂ en las muestras de los cinturones esmeraldíferos me indican un alto contenido de N₂ en la Fm. Chivor y en la Fm. Muzo indicándome la existencia de esmeraldas de mejor calidad en estas formaciones, se presentan los valores más altos hacia el Sur de la Fm. Muzo en la Cordillera Occidental con un 22% en comparación con valores de 2% encontrados en otras zonas, en la cordillera Oriental se encuentran unos valores muy homogéneos a lo largo de la formación Chivor, incrementándose estos valores hacia el centro de esta formación, estos parámetros se pueden interpretar como criterios en la búsqueda de un yacimiento de Esmeralda de mejor calidad.

Por otro lado, la presencia de CO₂ y N₂ en los volátiles analizados en los materiales de rellenos de las distintas venas mineralizadas, apunta a que estos productos de las reacciones hidrotermales se derivan de la alteración hidrotermal de los componentes orgánicos presentes en la roca.

En términos de su procedencia se presento la hipótesis que los fluidos mineralizantes que participaron en la formación de las esmeraldas fueron los que

aportaron los diversos iones presentes en los solutos de las inclusiones fluidas y también los compuestos presentes en los volátiles como el CO₂ y el N₂. Cabe anotar que las formaciones más productoras de cada Cinturón son las de menor espesor en comparación con sus otras formaciones y que las formaciones adyacentes que eran espesas secuencias impermeables pudieron haber actuado como formaciones sellantes para los fluidos hidrotermales.

Analizando los resultados obtenidos se observó que en cada cinturón se presentó un comportamiento diferente pudiendo ser interpretado estos resultados como la existencia de diferentes eventos hidrotermales para cada cinturón.

RECOMENDACIONES

Se sugiere para futuros estudios aumentar la densidad de muestreo para corroborar estos resultados, principalmente en las formaciones Muzo y Chivor en toda su extensión.

En los análisis efectuados por ablación laser identificar en los análisis más elementos representativos que me puedan indicar valores de referencia que pueda utilizar para determinar la localización de esmeraldas de mejor calidad.

Se recomienda profundizar en el estudio de las inclusiones fluidas en muestras recolectadas en minas de esmeraldas para tener suficiente información para proceder a realizar un buen criterio de exploración referente a las direcciones de los fluidos hidrotermales.

BIBLIOGRAFÍA

BANKS, D.A., YARDLEY, B.W.D., GIULIANI, G., CHEILLETZ, A., RUEDA, F.(1995). Chemistry and source of the high temperature brines in the Colombian emerald deposits. In: Pasava, Kribek Zak (eds.) Mineral deposits, Balkema, Rotterdam. Pp. 557 – 560.

BEUS, A. A. y MINIEEV, D. A., (1972). Some geological and geochemical features of Muzo – Coscuez Emerald zone, Cordillera Oriental, Colombia. Inf. 1689. INGEOMINAS, Pp. 1 – 50. Bogotá

BODNAR, R. J., REYNOLDS, T. J., KUEHN, C. A., (1985). Fluid Inclusions systematics in epithermal system. In: Petrography to Petrogenesis (Hibbard, M. J. Ed)., Prentice Hall, pp. 396-423.

BRANQUET, Y.; CHEILLETZ, A., GIULIANI, G., LAUMONIER, B. y BLANCO, O. (1999b) Fluidized hydrothermal breccia in dilatant faults during thrusting: Colombia emerald deposits. Pp. 183 – 196. In: Fractures, Fluid Flow and Mineralization. MCCAFFREY, K. The Geological Society eds. London.

BRANQUET, Y., CHEILLETZ, A., COBBOLD, R., BABY, P., LAUMONIER, B. y GIULIANI, G. (1999a). Andean transpressive tectonics at the eastern edge of the Cordillera Oriental, Colombia (Chivor-Guavio area). Fourth ISAG. Goettingen (Germany). 04-06/10. Pp. 103 – 105.

BRANQUET, Y., CHEILLETZ, A., COBBOLD, P., BABY, P., LAUMONIER, B. y GIULIANI, G. (2002). Andean deformation and rift inversion, eastern edge of Cordillera Oriental (Guateque-Medina area), Colombia. Journal of South America Earth Sciences 15. Pp. 391 – 407.

BURKE, E. A. J., (1994). Raman microspectrometry of fluid inclusions: the daily practice. In: De Vito, B. y Frezzotti, M. ed. Fluid inclusions in minerals: Methods and applications. Short course of the working group (IMA) "inclusions in minerals" (Pontignano-Siena). Pp. 377.

BURKE, E. A. J., (2001). Raman microspectrometry of fluid inclusions. In: Fluid Inclusions Analysis and interpretation (Samsom, I., Anderson, A., Marshall, D. Ed)., Volume 32. Mineralogical Association Of Canada, pp. 279-289.

CHEILLETZ, A., FÉRAUD, G., GIULIANI, G., RODRIGUEZ, C. T., (1994). Time-Pressure and Temperature Constraints on the Formation of Colombian Emeralds: An $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Laser microprobe and Fluid Inclusion Study. Economic Geology. Vol. 89. Pp. 361 – 380.

CHEILLETZ, A. y GIULIANI, G. (1996). The genesis of Colombian emeralds: a restatement. Mineralium Deposita, 31, Pp. 349 – 364.

CHEILLETZ, A. y GIULIANI, G. (1996). The genesis of Colombian emeralds: a restatement. Mineralium Deposita, 31, Pp. 349 – 364.

DELHAYE, M., DHAMELINCOURT, P., (1975). Raman microprobe and microscope with laser excitation. J. Raman Spectrosc. 3. Pp. 33 – 43.

GIULIANI, G., CHEILLETZ, A., RUEDA, F., FÉRAUD, G. y FRANCE-LANORD, Ch. (1995). The genesis of Colombian emerald deposits: An unique example of beryllium mineralization developed in a black shale environment. Mineral Deposits, Pasava, Kribek and Zak eds.

HALL, D.L., STERNER, S.M., BODNAR, R.J., (1988), Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions. In: CHEILLETZ, A., FÉRAUD, G., GIULIANI, G., RODRIGUEZ, C. T., (1994). Time-Pressure and Temperature Constraints on the Formation of Colombian Emeralds: An 40 Ar/39 Ar Laser microprobe and Fluid Inclusion Study. *Economic Geology*. Vol. 89. Pp. 361 – 380.

HALL, M. L., (1973). The mineralogy and geochemistry of Muzo emerald veins. Facultad de Geología, Minas y Petróleos, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

HALL, M. L., (1978). The common origin of the emerald veins of Colombia. Segundo Congreso Colombiano de Geología. Separata, Pp. 213 – 228. Bogotá.

KAZMI, A.H. y SNEE, L.W., (1989). Emeralds of Pakistan. Geology, Gemology and genesis. In: KAZMI, A.H. y SNEE, L.W. (eds). Geological Survey of Pakistan: New York, Van Nostrand Reinhold Co., 269 Pag.

KOSLOWSKI, A., METZ, P., JARAMILLO, H.A.E. (1988). Emeralds from Somondoco, Colombia: chemical composition, fluid inclusion and origin, Neues Jahrb. Mineral. Abh., 159. Pp. 23 – 49.

MANGAS, J. y SIERRA, J., (1991). Las inclusiones fluidas: método de análisis e interpretación. En: Lunar , R y Oyarsun, R. Yacimientos Minerales. Ramón Areces, S. A. (ed.). Pag.79-146.

MAYA, M., BUENAVENTURA, J., SALINAS, R., (2004). Estado del conocimiento de la exploración de esmeraldas en Colombia. Nombre de la publicación. INGEOMINAS.

MCMILLAN, P. F. y HOFMEISTER, A. M., (1988). Infrared and Raman Spectroscopy. In: Hawthorne, F. C. Ed. Spectroscopic methods in mineralogy and Geology. Reviews in Mineralogy. Vol.18. Pp. 99 – 159. Mineralogical Society of America.

NASH, J. T y THEODORE, T. (1971). Ore fluids in the porphyry copper deposits at Cooper Canyon. Nevada. Econ. Geology No. 66.

OTTAWAY, T.L., WICKS, F.J., BRYNDZIA, L.T., KYSER, T.K., SPOONER, E.T.C. (1994). Formation of the Muzo hydrothermal emerald deposit in Colombia. Nature 369. Pp. 552 – 554.

ROEDDER, E.(1963). Studies of fluid inclusions. – U. S. Geol. Surv. Professional Paper 440.

ROEDDER, E. (1984). Fluid inclusions, reviews in mineralogy. Vol.12. Mineralogical Society of America.

ROMERO, F.H. y HERNÁNDEZ, O., (1999). Características mineralógicas e inclusiones fluidas de las esmeraldas del Municipio de San Antonio de Yacopí, Cundinamarca, Colombia. Geología Colombiana, 24. Pp. 149 – 158.

RONCHI, L. H. y BÉNY, C., (1997). Espectroscopia raman: aplicações em geologia e limitações. Acta Geologica Leopoldensia. N. 44. Vol. XX. Pp. 5 – 25.

TERRAZA, R., MONTOYA, D., REYES, G., MORENO, G. y FUQUEN, J. (2008). Informe: Geología del Cinturón Esmeraldífero Oriental. Planchas 210, 228 y 229. INGEOMINAS, 125p.

TOURAY, J. C., BENY-BASSEZ, C., DUBESSY, J., GUILHAUMOU, N., (1985).
Microcharacterization of fluid inclusions in minerals by Raman microprobe.
Scanning electron microscopy. I. Pp. 103 – 118.

VAN DEN KERKHOF, A. y HEIN, U.F. (2001). Fluid inclusion petrography. Lithos
55, Pp. 27 – 47.