

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“Estudio de la interacción clima, tectónica y procesos superficiales como agentes controladores del relieve actual en terrenos adyacentes a los ríos Nirgua, Boconó y Apure mediante caracterización mineralógica, análisis digital del terreno y estudio de minerales pesados”

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al Título de Ingeniero Geólogo
Por los Brs. Arcia, Surisaday
y Viana, Charles

Caracas, 01 de Noviembre de 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“Estudio de la interacción clima, tectónica y procesos superficiales como agentes controladores del relieve actual en terrenos adyacentes a los ríos Nirgua, Boconó y Apure mediante caracterización mineralógica, análisis digital del terreno y estudio de minerales pesados”

TUTOR: Prof. Mauricio Bermúdez

CO-TUTOR: Prof. Xavier Bustos

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al Título de Ingeniero Geólogo
Por los Brs. Arcia, Surisaday
y Viana, Charles

Caracas, 01 de Noviembre de 2013




UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE GEOLOGIA, MINAS Y GEOFISICA
Departamento de Geología

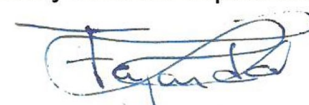
Caracas, 30 de Enero de 2014


VEREDICTO DEL EXAMEN PÚBLICO Y SOLEMNE DEL TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO GEÓLOGO DE LOS BACHILLERES SURISADAY ARCIA Y CHARLES VIANA

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, nos reunimos el 30 de Enero de 2014 para examinar el Trabajo Especial de Grado de los Bachilleres Surisaday Arcia y Charles Viana, titulares de la cédula de identidad V.-11.179.031 y V.-10.750.787, respectivamente, bajo el título "Estudio de la interacción clima, tectónica y procesos superficiales como agentes controladores del relieve actual en terrenos adyacentes a los ríos Nirgua, Boconó y Apure mediante caracterización mineralógica, análisis digital del terreno y estudio de minerales pesados", para optar al grado de Ingeniero Geólogo.

Hemos decidido otorgar la mención honorífica en vista del dominio adquirido y demostrado por los bachilleres, en el estudio de la interacción entre los procesos climáticos, tectónicos y superficiales. El trabajo muestra el empleo e integración de diversas técnicas: geomorfología cuantitativa, sedimentología, análisis granulométricos por vía láser, difracción de rayos X, separación de minerales pesados, análisis petrográficos y simulación numérica para el estudio de los procesos antes mencionados, los resultados serán presentados en eventos y revistas especializadas.


Prof. Jesús Delgado
C.I: V.-6.524.983


Prof. Luis Fajardo
C.I: V.-15.367.578


Prof. Xavier Bustos
C.I: V.-6.853.385
Co-Tutor




Prof. Mauricio Bermúdez
C.I: V.-12.378.742
Tutor

DEDICATORIA

Principalmente dedicamos este Trabajo Especial de Grado a nuestro Dios Padre Celestial, al Hijo Jesucristo y al Espíritu Santo de Dios, por habernos dado la vida y permitirnos haber llegado hasta este momento tan importante de nuestra formación profesional, por darnos la oportunidad de vivir y por estar con nosotros en cada paso que damos, por fortalecer nuestros corazones e iluminar nuestra mente y por haber puesto en nuestro camino a aquellas personas que han sido nuestro soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A nuestros Padres Luis Carlos Arcia Estrada, Esther Abdy Pérez D'Armas, Lucia Viana Castellanos y Juan Bautista Viana Leal.

A nuestras hijas Amisaday Eárleeng Leininsur y Sherlys Sarai.

A nuestros hermanos Aura Margarita, Siulibda Esther, Luis Elisur, Leninye Eliasib, Leivin Elioenai, Juan Carlos, Juan José, Mayra Alejandra, Rocío Rafaela.

A nuestra nieta Deiberleeng Alejandra Sarai y a nuestro yerno Deibys Josué Buyon Martínez.

Yo Surisaday Arcia dedico esta tesis a mi Esposo Charles Viana por todo su apoyo, por la ayuda para lograr esta meta, por su paciencia y su amor incondicional siempre !!!

Yo Charles Viana, Doy gracias a Dios por mi amada esposa (Niña), porque siempre ha estado allí cuando la he necesitado, y gracias por ayudarme a lograr esta meta, que apenas es el comienzo de todo lo que nos falta recorrer como esposos y profesionales. Te la dedico mi bella dama.

A nuestros tíos, primos, sobrinos y demás familiares...

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios Todopoderoso por la provisión que siempre nos has dado, por mantenernos fuertes, sanos, llenos de sabiduría e inteligencia, por nunca dejarnos y por mantenernos hasta lograr el título.

El presente Trabajo Especial de Grado es un esfuerzo en el cual, directa e indirectamente, participaron varias personas leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndonos paciencia, dándonos ánimo, acompañándonos en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad. Agradecemos al Dr. Mauricio Bermúdez, Msc. Xavier Bustos, Dr. Matthias Bernet por haber confiado en nosotros, por la paciencia y por la dirección de este trabajo.

También damos gracias a La Universidad Central de Venezuela, La Casa Que Vence Las Sombras, por darnos a través de los profesores, auxiliares de laboratorio y preparadores, tan abundante enseñanza y compartir con nosotros las experiencias de vida. Agradecemos a la Escuela de Geología, Minas y Geofísica en especial al Departamento de Geología. A cada uno de los profesores: Ricardo Alezones, Andre Singer, Angela Rojas, Omar Rojas, Olga Rey, Franklin Yoris, Marino Ostos, Rafael Falcón, Omar Márquez, Lenin Gonzales, Sebastián Grande, Víctor Padrón, Wolfgang Sherer, María Eugenia Sandoval, Armando Díaz, Jorge Mora, Paul Romero, Rutman Hurtado, Feliciano Di Santis, Henry Salas y todos aquellos profesores del departamento y de la escuela que contribuyeron en nuestra formación como Ingenieros. Al personal administrativo, Jefe de la Biblioteca Morela Mikaty, Eduardo Castillo, María Auxiliadora, María Teresa y nuestros amigos Marlene Flores, Gregorio López, Jesús Quintero. También agradecemos a Elio Castro y al personal obrero que labora en el cilindro de la Escuela de Metalurgia.

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) de la Universidad Central de Venezuela, por proveer los recursos financieros para la ejecución de este trabajo, mediante el proyecto de investigación de grupo No. PG 08-8273-2011, titulado: “*Determinación de la*

relación entre relieve, clima, tectónica y biodiversidad en orógenos circundantes a la cuenca del río Orinoco mediante métodos multiherramientas”.

Al Proyecto GIAME (Geodinámica Integral de Los Andes de Mérida) proporcionado a FUNVISIS, por proveer parte de los recursos financieros para la culminación de este trabajo.

Damos gracias a la Comisión Modernizadora y Transformadora y a mis compañeros de trabajo del Instituto Universitario de Tecnología “Dr. Federico Rivero Palacio”, a los trabajadores del Departamento de Reproducción, en especial a mi hermano Alex Uzcategui.

A los Profesores del Departamento de Tecnología de los Materiales del IUT RC: Esteban Barrios, Javier García, Anamaría Bracho, Gustavo Castro, Miguel Marín, Jesús Batista, Yorwain Tubiñez, Magaly Ramos, Enrique Rodríguez, Carlos Rebolledo, Rafael Uribe, Pablo Vásquez, Yelibet Loiza, Silvia Griman, Maximiliano Donat, Francesco Camillo, Leiry Centeno, Luis Betancourt, Angelina Villani, Orlando Paiva, Freddy Arenas, Irene de Arenas, Ailimee Marquez, Ronald Lobo, Jesús Crespo. Antonio Morillo, Luz Maire Calvete, Personal Administrativo Tania Contreras, Yenaida Fagundez.

Agradecemos también por el apoyo brindado durante mi gestión en La Caja de Ahorros de Profesores del IUT a cada uno de los trabajadores, la administradora Carmen Rondón, Juan Carlos Rondón, Flor Castro, Johan Sepulveda.

También agradecemos a nuestros Pastores; Moisés Piñero y Zuleima de Piñero, así como a cada uno de nuestros hermanos, Edgar Celis, Celide de Celis, Víctor Briceño, Xavier Ruiz, Narciso de Sousa, Hilda Ledezma, Dora Silva, Clara Guzmán, Luz Seijas, Yelitza Santaella, Maribel de Meza, por el apoyo y el ánimo que nos brindaron en todo momento.

Por último agradecemos a todos nuestros familiares, padres, hermanos, hijas y nieta. Y a toda aquella persona que de alguna manera u otra nos prestó ayuda en lograr este éxito. Gracias por el apoyo prestado de los Profesores del Cenamb. Gracias a todos.

Estudio de la interacción clima, tectónica y procesos superficiales como agentes controladores del relieve actual en terrenos adyacentes a los ríos Nirgua, Boconó y Apure mediante caracterización mineralógica, análisis digital del terreno y estudio de minerales pesados

Tutor Académico: Prof. Mauricio Bermúdez. **Co-tutor:** Prof. Xavier Bustos. Trabajo Especial de Grado, Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2013, 254 páginas más anexos.

Palabras claves: Geomorfología, tectónica, sismología, minerales pesados, difracción de rayos x, microscopía electrónica de barrido, granulometría y petrografía

RESUMEN

El paisaje actual que las montañas exhiben es el resultado de diversos procesos que han trabajado a lo largo del tiempo desde la formación del orógeno hasta su última fase o erosión. Entre esos procesos destacan, la tectónica, el clima, y los procesos superficiales. El estudio de la evolución del paisaje a lo largo del tiempo geológico, la descripción de su forma y la relación con los procesos antes mencionado es el principal objetivo de la geomorfología, la cual al ser combinada con otras áreas, tales como: geología, edafología, mecánica de suelos, geología aplicada, neotectónica, sísmica, termocronología, geofísica, glaciología, climatología, entre otras arrojan una mayor información acerca del área de estudio, facilitando el entendimiento acerca de la evolución geológica de la zona. En el presente Trabajo Especial de Grado, se utilizan los fundamentos de geomorfología cuantitativa, es decir, los mismos principios de la geomorfología pero ahora tomando en cuenta la cuantificación de las diferentes variables, a partir de cálculos estadísticos-matemáticos sobre modelos de elevación digital, junto con análisis visual y computarizado de minerales pesados, estudios granulométricos por difracción láser, microscopía electrónica de barrido, análisis petrográficos, difracción de rayos X a un conjunto de 7 muestras de sedimentos modernos pertenecientes a los ríos Nirgua o Buría, Boconó y Apure; y a 4 muestras in-situ seleccionadas en la zona de estudio.

Los resultados aquí obtenidos muestran lo siguiente: en cuanto al análisis granulométrico vía láser (Master Sizer 2000) se deduce que todas las muestras presentan fuerte asimetría (S_k) hacia los finos y la curtosis (K) para cada río fue una curva normal o mesocurtica. En cambio el escogimiento (S_o) para Apure, Nirgua y Tucuragua, son pobremente escogidos, mientras que los ríos Boconó, Peña y tributario Cojedes son muy mal escogidos. El análisis petrográfico de la muestras Las Palmas 1 y Las Palmas 5, ubicadas en la parte alta de la cuenca del río Cojedes, sugieren que éstas provienen de un metamorfismo de contacto, con una textura lepidoporfido-blástica, y una mineralogía fuertemente alterada. El análisis petrográfico sobre la muestra in-situ ubicada cerca de la falla de Boconó (MIBF) indica alteración de una roca metamórfica tipo mármol, con abundantes microfracturas y recristalización de minerales.

En cuanto al estudio comparativo entre los análisis automatizados de la forma de los minerales pesados no magnéticos mediante el software ImageJ y el análisis visual de los mismos a través del modelo de Krumbein se pudo constatar que el método automatizado reproduce con alta fidelidad los resultados de esfericidad obtenidos del análisis visual. La madurez textural de las muestras analizadas oscila entre inmaduro a maduro, esto señala que los sedimentos modernos estudiados provienen de diferentes fuentes, algunos de fuentes alejadas que han sido retrabajados por el transporte y dan como resultado minerales sub-redondeados y otros, que poseen poco transporte, son más angulosos. Pero también se observó que en algunas muestras cercanas a las zonas de fallas, los granos tienden a ser angulosos. Esto indica una actividad de cizalla sobre tales zonas.

El análisis geoquímico realizado a la fracción de minerales pesados para cada muestra, vía microscopía electrónica de barrido (MEB), indican que la muestra proveniente del río Apure, es la que posee un contenido mineralógico más diverso, resaltando los siguientes minerales: biotita, cuarzo, rutilo, ilmenita, apatito, heulandita, esfena, andalucita, anortita/anortoclasa y circón. En el río Boconó, se discriminaron rutilo, circón, monacita, apatito y cuarzo. En la Falla de Boconó muestra in-situ (MIBF) se observaron rutilo, cuarzo, fayalita, calcita y hematita. En el río Nirgua: rutilo, cuarzo, esfena, microclino, leucita, clinozoisita, estauroilita y albita. En la quebrada Peña 1: rutilo, cuarzo, ilmenita, circon, fayalita, microclino. En Peña 3: cuarzo, ilmenita, anortita/anortoclasa. En LP1: cuarzo, anortita/anortoclasa, fayalita, calcita, hematita y ortosa. En LP5: cuarzo, apatito, anortita/anortoclasa, fayalita, calcita y hematita. En el tributario de Cojedes: cuarzo, andalucita y circón. En Tucuragua-1: rutilo, cuarzo, anortita/anortoclasa y ortosa. Finalmente en Tucuragua3: rutilo, cuarzo, circon y microclino. Así los ríos de mayor variedad serían el río Apure que drena una gran área y comprende diferentes orógenos: Flanco Sur-Andino, Cordillera de la Costa y Serranía del Interior, seguido por el río Boconó. Estos resultados son consistentes con los análisis de difracción de rayos X.

Considerando la posición de cada una de las muestras y delineando el área de drenaje, fue posible calcular los índices de erosión en cada una de las cuencas. Así las mayores tasas de erosión se encuentran en el río Boconó con un valor de TSP (poder de flujo total) de 3.7×10^5 , seguido por el río Apure, 2.5×10^5 , una sub-cuenca formada por la muestra in-situ de la falla de Boconó (MIBF) con una tasa de 1.84×10^5 , el río Nirgua 1.25×10^5 y por último la cuenca del tributario la Peña con un índice de 2.42×10^4 . El hecho de que sean las cuencas cercanas a la Falla de Boconó las que posean mayor índice de erosión indicarían que en este sector hay dos efectos importantes, la tectónica, la cual indica que el terreno pudiera estar debilitado por el movimiento de las fallas, más la climática ya que en ese sector existe un importante efecto de barrera orográfica sobre el patrón de precipitaciones.

Globalmente, en cuanto a la forma como el clima y la tectónica interactúan, se tiene que en la cuenca de Boconó está trabajando de manera acoplada, permitiendo la generación de nuevo relieve y el transporte de sedimentos (erosión). En contraste, a lo largo de la cuenca de Apure existe un predominio del clima sobre la tectónica y están trabajando de manera desacoplada una con respecto a la otra. En la cuenca de Peña existe un predominio del clima sobre la tectónica (casi nula). En la sub-cuenca MIBF, existe un acoplamiento entre la tectónica y el clima. A diferencia de la cuenca de Nirgua, en donde la tectónica pareciera estar prevaleciendo sobre los efectos climáticos. Esto es posible determinarlo a largo término (Tiempo Geológico) y con las tasas de erosión a corto término (Bermúdez et al., 2012).

ÍNDICE

RESUMEN	7
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABLAS	21
INTRODUCCIÓN.....	23
I. PRELIMINARES.....	24
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	24
1.2. JUSTIFICACIÓN	24
1.3. OBJETIVOS	25
1.3.1 Objetivo General.....	25
1.3.2 Objetivos Específicos	26
1.4. ALCANCE.....	26
1.5. ANTECEDENTES	27
1.5.1 Estudios Geológicos Previos	27
1.5.2 Antecedentes Metodológicos.....	31
1.6. UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO.....	31
II. GEOLOGÍA	33
2.1. INTRODUCCIÓN.....	33
2.2. GEOLOGÍA REGIONAL.....	33
2.2.1 Formaciones geológicas	37
2.3 GEOLOGÍA LOCAL	44
2.4 Aspectos fisiográficos del área de Nirgua	56
2.4.1 Relieve.....	56
2.4.2 Hidrografía.....	57
2.4.3 Clima	65

2.4.4 Vegetación.....	68
2.5 BREVE SINTESIS GEOLÓGICA DE LAS OTRAS CUENCAS	68
2.5.1 Cuenca del río Cojedes y sistema tributario Quebrada Agua Blanca.....	68
2.5.2 Cuenca del río Boconó	70
2.5.3 Cuenca del río Apure.....	74
III. METODOLOGÍA Y MARCO TEÓRICO.....	78
3.1 INTRODUCCIÓN	78
3.2 MINERALES PESADOS	79
3.2.1.1 Estabilidad química	81
3.2.1.2 Resistencia a la abrasión y el transporte	81
3.2.2 Descripción de algunos minerales pesados en la fracción (>2.96 grs/cm ³).....	83
3.2.2.1 Ilmenita	83
3.2.2.2 Magnetita	83
3.2.2.3 Carbonatitas	84
3.2.2.3 Apatito.....	85
3.2.2.4 Circón.....	85
3.2.2.5 Rutilo.....	87
3.2.2.6 Esfena o Titanita.....	87
3.2.2.7 Andalucita.....	88
3.2.2.8 Monacita	88
3.2.2.9 Hematita	89
3.2.2.10 Estauroлита	90
3.2.3 Características Texturales Generales.....	91
3.2.3.1 La Forma De Los Granos (Esfericidad).....	91
3.2.3.2 Rasgos Superficiales	92
3.2.4 Fase de campo.....	93

3.2.4.1	Toma de muestras:	93
3.2.4	Descripción de la elaboración de secciones epóxicas	95
3.2.4.1	Muestras detritos (no consolidadas) y muestras consolidadas o in-situ	95
3.2.4.2	Trituración de las muestras.....	96
3.3	ANÁLISIS VISUAL DE MINERALES PESADOS	113
3.4	ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE IMÁGENES	115
3.6	METODOLOGÍA EMPLEADA PARA REALIZAR EL ANÁLISIS A LAS MUESTRAS CON EL PROGRAMA IMAGEJ	131
3.7	ANÁLISIS MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).	135
3.8	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR DIFRACCIÓN LÁSER.....	140
3.9	DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	145
3.10	GEOMORFOLOGÍA CUANTITATIVA	150
IV.	GEOMORFOLOGÍA CUANTITATIVA	152
4.1	ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO.....	152
4.2	DATOS DE ELEVACIÓN	154
4.3	UTILIDADES DE LOS MED	158
4.3	ATRIBUTOS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS DEL TERRENO	159
4.3.2	Índices de erosión	163
4.3.1.1	Poder de flujo total (TSP)	164
4.3.1.2	Poder de flujo unitario (USP)	164
4.3.1.3	Poder de flujo de cizalla (SSP).....	164
4.3.2	Cálculo del relieve	165
4.3.3	Índice de capacidad de transporte de sedimentos	166
4.3.6	Variación del índice de la potencia del flujo (CIT).....	167
4.3.6	Otros cálculos adicionales.....	167
V.	RESULTADOS, ANALÍISIS Y DISCUSIÓN.....	169

5.1 INTRODUCCIÓN	169
5.2 ANÁLISIS PETROGRÁFICO	169
5.2.1 Muestra in-situ falla de Boconó.....	170
5.2.2 Quebrada La Palma	171
5.2.2.1 Muestra LP1:	171
5.2.2.2 Muestra LP5:	172
5.3 ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE IMÁGENES	174
5.4 ANÁLISIS MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	176
5.5 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR DIFRACCIÓN LÁSER.....	199
5.6 ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X	202
5.7 ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO.....	212
5.8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	224
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	233
REFERENCIAS	236

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (A) Mapa de localización de muestras recolectadas en este trabajo. (B) Principales estructuras presentes en la zona de estudio (Tomado y modificado de http://pubs.usgs.gov/of/2000/ofr-00-0018/ofr-00-0018.pdf y Hackley et al., 2005)	32
Figura 2. Extensión del Complejo Yaritagua hacia el sur de Chivacoa (Tomado de PDVSA Lexico Estratigráfico (2010). http://www.pdv.com/lexico/image/y300-1.gif)	41
Figura 3. Detalle de la distribución de la Formación Yaritagua (Tomado de PDVSA Lexico Estratigráfico (2010). http://www.pdv.com/lexico/image/y300-2.gif).	42
Figura 4. Mapa de recursos minerales del estado Yaracuy (según Bellizia et al., 1986). Las zonas denotadas en elipses corresponden al estudio de evaluación de yacimientos no metálicos de Soubllette (2013).	43
Figura 5. Fase Nirgua (Tomado de PDVSA Lexico Estratigráfico (2010). http://www.pdv.com/lexico/image/n200-5.gif)	45
Figura 6. Fase Nirgua (Tomado de PDVSA Lexico Estratigráfico (2010) en el sector de las Serranías de Aroa y Nirgua http://www.pdv.com/lexico/image/n200-4.gif)	46
Figura 7. Fase Nirgua (Tomado de PDVSA Lexico Estratigráfico (2010) en el sector de Puerto Cruz-Tacagua (Tomado de http://www.pdv.com/lexico/image/n200-1.gif).....	48
Figura 8. Fase Nirgua en el Complejo La Costa (Tomado de http://www.pdv.com/lexico/image/n200-3.gif)	48
Figura 9. Geología simplificada del Complejo La Costa (Tomado de http://www.pdv.com/lexico/image/c1402-2.gif).....	49
Figura 10. Geología del Macizo de El Avila (Tomado de http://www.pdv.com/lexico/image/c1402-3.gif)	49
Figura 11. Extensión de la Formación Aroa (Tomado de http://www.pdv.com/lexico/image/1990-1.gif)...50	50
Figura 12. Extensión de la napa de la Cordillera de la Costa, Formación Aroa (Tomado de: http://www.pdv.com/lexico/image/aroa.jpg)	53
Figura 13. (a) Vista del afloramiento de Calizas, Sector Los Cogollos, Nirgua. (Imágenes tomadas de Soubllette, 2013). (b) Mapa de afloramiento de la Falla de Boconó (Tomado de http://es.getamap.net/busca_mapas_1_9+41+13+n+68+58+43+w.html) y capas de rocas deformadas por la Falla de Boconó señalando la orientación de los pliegues parásitos, budines y orientación de los esfuerzos respectivamente, en la autopista José Antonio Páez.	55
Figura 14. Mapa de relieve del Estado Yaracuy, sismicidad circundante (derivada de FUNVISIS) y red de drenaje (Mapa elaborado para este TEG).....	56

Figura 15. Principales rasgos topográficos cercanos a la población de Nirgua. (a) Vista del cerro El Picacho. (b) Topografía circundante y vista desde la carretera. (c) Mapa topográfico de la zona. (d) Relieve ESRI-TOPO.	57
Figura 16. Río Buría o Nirgua y principales tributarios (Tomado y modificado de https://sites.google.com/site/nirguaweb/mapa_himno_y_escudo_de_nirgua).....	58
Figura 17. (a) Ubicación del área de estudio, zona de Yaracuy. (Tomado de http://www.yaracuy.net/wp-content/uploads/2011/05/mapa-yaracuy.jpg). (b y c) Mapa satelital y relieve de afloramiento del Río Buria (Tomado de http://es.getamap.net/mapas/venezuela/venezuela_(general)/buria_rio/). (d, e, f) Afloramiento. (g y h) Recolección de muestras de sedimentos recientes.	60
Figura 18. (a) Mapa de relieve (Tomado de http://es.getamap.net/busca_mapas_1_n+10+2+57+w+68+38+22.html) (b) Afloramiento del río Tucuragua. (c, d, e, f) Toma de muestras de sedimentos recientes.....	62
Figura 19. (a, b y c) Familia de diaclasas (LP1). (d) Mapa de relieve y afloramiento de un tributario del río Cojedes (Tomado de http://es.getamap.net/busca_mapas_1_n+9+43+51+w+69+0+3.html). (e, f, g) Afloramiento y recolección de muestras en el tributario de Cojedes, Agua Blanca. (h,i) Recolección de muestras de LP ₅	64
Figura 20. Mapa de relieve (a) y satelital (b) del río La Peña. (Tomado http://es.getamap.net/busca_mapas_1_n+10+7+28+w+68+33+33.html). (c, d, e y f) Afloramiento y recolección de muestras in situ y sedimentos modernos del río.	65
Figura 21. Clasificación climática del área de estudio según Köppen (Tomado y modificado de www.venemia.com).....	66
Figura 22. Tasa de precipitación anual promedio para el área de estudio (Tomado y modificado de www.venemia.com).....	66
Figura 23. Tipos climáticos de Venezuela según Thornwaite, el área de estudio está delineada en rojo (Tomado y modificado de www.venemia.com).....	67
Figura 24. Ubicación de ríos y quebradas visitadas durante labores de campo: (a) Tributario del río Cojedes, (b) Quebrada Agua Blanca. (Tomado de http://es.getamap.net/busca_mapas_1_09+43+43+n+69+02+16+w.html). (c) Recolección de muestras de sedimentos recientes. (d) Muestras de los clastos.....	69
Figura 25. (A) Mapa de relieve y (B) Mapa de precipitaciones a lo largo de Los Andes de Venezuela.....	71
Figura 26. (a) Ubicación de la zona de estudio, Río Boconó, Portuguesa (Tomado de http://boletinambiental.files.wordpress.com/2008/08/portuguesa1.jpg). (b) Sistema de Embalses Boconó Tucupido. (Tomado de http://2.bp.blogspot.com/-FoXYRY5-zy0/TjYiZ8cKQiI/AAAAAAAAAQ4/XvcIWB2IS1c/s1600/sistema.jpg).	73

Figura 27. (a) Ubicación del río Apure (Tomado de Azocar Y. y Rodríguez R. (2007). (b, c) Ubicación del Río Apure. (Tomado de http://es.getamap.net/busca_mapas_1_7+54+8+n+67+28+21w.html). (d,e, f, g) Recolección de muestras de sedimentos recientes del río Apure. (h) Foto donde se observa el puente sobre el río y la extensión a lo ancho del mismo.	76
Figura 28. Diagrama de flujo que resume la metodología utilizada en la presente investigación.....	78
Figura 29. Forma de las partículas. (Tomado de http://cartografia.fi-a.unam.mx/temas/estratigrafia_sedimentologia/PEI05211_ES_PrPar.pdf).....	92
Figura 30. (a) Toma de muestra se tamiza y se lleva a la batea. (b) Separación hidrogravimétrica en la batea. (c) Después de separar los minerales pesados se introducen en una bolsa ziploc con identificación. (d) Muestra recolectada después del uso de la batea. (e) Toma de Muestra Bolsa de 20 Kg, para tratar en Laboratorios. (f) Toma de Muestra In-Situ. (g) Registro de Posición GPS.	95
Figura 31. Muestra In Situ	96
Figura 32. Máquinas trituradoras de mandíbula ubicadas en el Laboratorio de Geología y Minas. (a, b) Limpieza de la trituradora de bloques a tamaño canto. (c,d) Trituradora de mandíbula. (e) Muestra Triturada por las Mandíbula. (f,g) Trituradora de rodillo. (h) Muestra triturada por la trituradora de rodillo. (i) Limpieza de la trituradora de rodillo. (j,k) Trituradora de disco, para obtener la muestra tamaño arena, después de pasarla por los rodillos.	99
Figura 33. Pesado de la muestra después de la última trituradora.	99
Figura 34. (a,b) Tamizado de la muestra en húmedo. (c) Recolección de las Muestras Tamizadas. (d) Limpieza de los tamices e instrumentos.....	100
Figura 35. (a) Mesa Wilfley y sus recolectores de minerales pesados y livianos. (b,c) Realizando la separación de los minerales pesados.....	102
Figura 36. (a,b,c) Secado de muestras.	103
Figura 37. Separación de minerales magnéticos manual con el imán.....	103
Figura 38. (a,b) Equipo de separación magnética magnet-Lift. (c,d) Realizando el ensayo de separación.	105
Figura 39. (a) Líquido Pesado Bromoformo densidad 2,96. (b) Se agrega el Bromoformo al embudo separador. (c) Separación de los minerales pesados (se depositan en el fondo del embudo) de los livianos. (d,e,f) Recuperación de minerales pesados, minerales livianos y bromoformo. (g) Campana con extractor de gases tóxicos. (h) Implementos de seguridad.....	108
Figura 40. (a) Campana para recuperación del Bromoformo. (b) Balón de Separación para recuperación del Bromoformo.....	108

Figura 41. (a) <i>Minerales pesados recuperados después del bromoformo. (b,c) Separador Isodinámico Frantz y sus partes. (d) Realizando la separación magnética en el Frantz. (e) Colocando la muestra en el alimentador. (f) Contenedores de fracción magnética y no magnética.</i>	110
Figura 42. <i>Muestra pasada por el Diyodometano.</i>	111
Figura 43. (a) <i>Endurecedor y Resina Epóxica. (b) Jeringas para tomar las porciones de cada uno de los componentes. (c) Recipientes para agregar el epoxi mezclado para montaje de las muestras. (d) Añadiendo la muestra en el fondo del molde. (e) Secado de las muestras embutidas.</i>	113
Figura 44. <i>Granos evaluados visualmente y comparados con el modelo Krumbein y Sloss (1963), para determinar Redondez y Esfericidad pertenecen a la muestra del Rio Apure.</i>	114
Figura 45. <i>Carta de índice de esfericidad y redondez (Tomada y modificada de Krumbein y Loss, 1963)</i>	115
Figura 46. <i>Tomado de Guía de usuario de ImageJ IJ 1.46r Tiago Ferreira _ Wayne Rasband</i>	118
Figura 47. <i>Tomado de http://forofotografiasalva.blogspot.com/2012/03/profundidad-de-pixel-o-profundidad-de.html.</i>	119
Figura 48. <i>Tomado de http://forofotografiasalva.blogspot.com/2012/03/profundidad-de-pixel-o-profundidad-de.html</i>	120
Figura 49. <i>Tomado de http://forofotografiasalva.blogspot.com/2012/03/profundidad-de-pixel-o-profundidad-de.html</i>	121
Figura 50. <i>Diagrama de flujo mostrando el procedimiento con todo el sistema.</i>	122
Figura 51. <i>Microscopio Labophot Nikon con Cámara Digital Incorporada Celestron</i>	123
Figura 52. <i>Microscopio Electrónico Philips XL30 (EDAX)</i>	124
Figura 53. (a) <i>Imagen Obtenida por Microscopio Óptico 150 X (b) Imagen Obtenida por el Microscopio Electrónico de Barrido.</i>	125
Figura 54. <i>Tomado de http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/index.html.</i>	126
Figura 55. <i>Abriendo desde el menú file. (Tomado de http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/index.html).</i>	129
Figura 56. <i>Abrir desde el explorador (Tomado de http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/index.html).</i>	129
Figura 57. <i>Abriendo una imagen por el archivo File</i>	130
Figura 58. <i>Calculo de las variables del grano analizado por Image J</i>	130
Figura 59. <i>Resultado del análisis de grano realizado sobre la Carta de índice de esfericidad y redondez (Tomada y modificada de Krumbein y Loss, 1963)</i>	131

Figura 60. (a) Imagen Obtenida por Microscopio Óptico (b) Imagen tratada en Paint.....	132
Figura 61. Imagen abierta por el ImageJ, para ser analizada.....	132
Figura 62. Imagen invert.....	133
Figura 63. Imagen.....	133
Figura 64. (a) Analyze Particles (b) Analyze Particles Ok (c) Resultados de Esfericidad y redondez.	134
Figura 65. (a) Teipe utilizado como conductor y para mantener las muestras de Ilmenitas y Magnetitas. (b,c,d,e) Colocando las muestras de ilmenitas y magnetitas sobre el teipe. (f,g,h) Equipo de Microscopía Electrónica de Barrido existente en el Laboratorio de Microscopia Electrónica del I.U.T. R.C. "Dr. Federico Rivero Palacios". Profesor encargado Gustavo Castro. (i) Abriendo el equipo. (j,k) Colocando las muestras en el equipo para ser analizadas. (l) Posición de las muestras para el análisis.	138
Figura 66. (a) Colocando las muestras embutidas (pastillas) en el portamuestras y fijándolas con silicón. (c) Muestras embutidas, haciendola conductora con el teipe de aluminio. (d,e,f) Muestras embutidas, haciendola conductora a través de recubrimiento de níquel. (g) Equipo de MEB XL 30 Philips. (h) Analizando las muestras.	140
Figura 67. Equipo Mastersizer 2000 existente en el Laboratorio Físicoquímico del I.U.T. R.C. "Dr. Federico Rivero Palacios". Profesor encargado Jesús Batista.	142
Figura 68. (a) Equipo Master Size para realizar la Técnica de Granulometría Láser. (b,c) Configuración de la máquina. (d,e) Limpiando, purgando, desgasificando y bombeando el Master Size. (f,g) Agregando la muestra para comenzar el ensayo. (h,i) Analizando la muestra.....	144
Figura 69. Equipo para difracción de rayos X utilizado en este trabajo.....	145
Figura 70. Diagrama de Difractómetro de Rayos X (Tomado y modificado de Guía de trabajo práctico de Rayos X. IUT Región Capital, profesor Jesús Batista,.).....	146
Figura 71. (a,b,c) Trituración o pulverización de la muestra, porta muestras y mortero. (d,e,f,g,h) Preparación de las muestras. (i) Muestras preparadas (j) Equipo de Análisis de Rayos X.	148
Figura 72. (a) Botones del Difractómetro. (b) Abriendo el difractómetro. (c) Colocando la muestra para ser analizada. (d) Controles para comenzar el análisis. (e,f) Analizando las muestras y resultados.....	150
Figura 73. Escalas en la que varios procesos biofísicos dominan el cálculo primario de regímenes ambientales. (Tomado de Mackey (1996)).....	153
Figura 74. Estructura de las redes de datos: a) regular de la red, b) una red irregular triangular.....	156
Figura 75. Diferentes tipos de MED generados de acuerdo a la filosofía de muestreo de los datos de elevación digital.....	157

Figura 76. (a) Mapa de curvas de nivel (contornos), (b) MED derivado de las curvas de nivel, (c) Modelo TIN derivado de las curvas de nivel, (d) modelo derivado de las curvas de nivel, en perspectiva	158
Figura 77. Modelos de atributos de terrenos calculados a partir del MED. (Tomado y modificado de página web del Dr. Shunji Murai, http://cret.cnu.edu.cn/syix/content/giswb/vol2/contents.htm)	159
Figura 78. Índice de erosión TSP calculado para la región de Kurst, Rusia CA este fue calculado por Florinsky (2012) usando el método de Evans–Young . El MED consiste de 147.875 nodos, 455 columnas x 325 filas; la resolución del raster usado fue de 150 m.	165
Figura 79. Calculadora de ráster existente en ArcGIS 10.0, diversas funciones matemáticas son disponibles y fueron utilizadas a lo largo de este trabajo para derivar los índices primarios y secundarios del terreno, los cálculos hidrológicos y las operaciones algebraicas necesarias para derivar cada una de las expresiones matemáticas anteriormente mencionadas.	166
Figura 80. Secciones finas de la muestra in-situ de la Falla de Boconó.....	171
Figura 81. Secciones finas de la muestra in-situ de La Palma 1 (LP1).....	172
Figura 82. Secciones finas de la muestra in-situ de La Palma 5 (LP5).....	173
Figura 83. Comparación entre valores promedios de redondez y esfericidad obtenidas a partir del modelo Krumbein en ImageJ	175
Figura 84. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra del río Apure.	176
Figura 85. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra de sedimentos modernos del río Boconó.	178
Figura 86. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra in-situ cerca de la falla de Boconó.....	180
Figura 87. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra Las Palmas-1 (LP1)...	182
Figura 88. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra Las Palmas-5 (LP5)...	184
Figura 89. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra Peña-1.....	186
Figura 90. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra Peña-3.....	188
Figura 91. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra del río Nirgua.....	190
Figura 92. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra del tributario del río Cojedes.....	192
Figura 93. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra Tucuragua-1	194
Figura 94. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra Tucuragua-3	196

Figura 95. Comparación del contenido de minerales pesados para las diferentes muestras	199
Figura 96. Resultados del análisis de DRX para la muestra del río Apure.....	202
Figura 97. Resultados del análisis de DRX para la muestra del río Boconó	203
Figura 98. Resultados del análisis de DRX para la muestra Las Palmas-1 (LP ₁).....	204
Figura 99. Resultados del análisis de DRX para la muestra Las Palmas-5 (LP ₅).....	205
Figura 100. Resultados del análisis de DRX para la muestra del río Nirgua.	206
Figura 101. Resultados del análisis de DRX para la muestra perteneciente al tributario del río Cojedes.	207
Figura 102. Resultados del análisis de DRX para la muestra Tucuragua-1	208
Figura 103. Resultados del análisis de DRX para la muestra Tucuragua.....	209
Figura 104. Resultados del análisis de DRX para la muestra de la Falla de Boconó.....	210
Figura 105. Resultados del análisis de DRX para la muestra de Peña 3.	211
Figura 106. Mapa de índice de erosión TSP normalizado [0,1] con precipitación uniforme. Valores en naranja representan sitios de alta erosión, valores en verde lo contrario.....	215
Figura 107. Mapa de índice de erosión USP normalizado [0,1] con precipitación uniforme. Valores en naranja representan sitios de alta erosión, valores en verde lo contrario.....	216
Figura 108. Mapa de índice de erosión SSP normalizado [0,1] con precipitación uniforme. Valores en naranja representan sitios de alta erosión, valores en verde lo contrario.....	217
Figura 109. Mapa de relieve calculado en un radio de 1 kilómetro, los diferentes polígonos representan cada una de las cuencas estudiadas en este trabajo.	219
Figura 110. Mapa de relieve.	220
Figura 111. Comparación de precipitación promedio en cada una de las cuencas estudiadas en este trabajo para 1998 – 2009.	220
Figura 112. Mapa de precipitación promedio (m/año).....	221
Figura 113. Mapa de índice de precipitación promedio (mm/año) durante los años 2000-2012.....	221
Figura 114. Mapa de Log (Energía Sísmica) en Joules.	222
Figura 115. Diagrama de comparación entre la relación relieve-energía sísmica para cada cuenca.	223
Figura 116. Mapa de ln (TSP).	226

Figura 117. <i>Mapa de ln (TSPP)</i>	226
Figura 118. <i>Mapa de ln (USP)</i>	227
Figura 119. <i>Mapa de ln (USPP)</i>	227
Figura 120. <i>Mapa de ln (SSP)</i>	228
Figura 121. <i>Mapa de ln (SSPP)</i>	228
Figura 122. <i>Mapa de ln (WI)</i>	229
Figura 123. <i>Mapa de ln (WIP)</i>	229
Figura 124. <i>Comparación de índices de precipitación, relieve, energía sísmica, erosión promedios sin precipitación y con precipitación uniforme para cada cuenca, índices de humedad sin precipitación y con precipitación e índices de transporte de sedimentos sin precipitación y con precipitación</i>	231
Figura 125. <i>Mapa de sismicidad de la zona de estudio, de magnitud (Richter)</i>	232

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Formaciones que son interceptadas por cada río.</i>	34
Tabla 2. <i>Unidades metamórficas presentes en el área cercana a Nirgua.</i>	35
Tabla 3. <i>Unidades cuaternarias en la región de Nirgua modificado de Coplanarh (1974).</i>	35
Tabla 4. <i>Resumen de la Formación Nirgua.</i>	51
Tabla 5. <i>Resumen de la Formación Nirgua, Fase (Complejo la Costa).</i>	51
Tabla 6. <i>Resumen de la Formación Complejo Yaritagua.</i>	52
Tabla 7. <i>Resumen de la Formación Aroa.</i>	52
Tabla 8. <i>Resumen de la Formación Mamey.</i>	54
Tabla 9. <i>Resumen del Grupo Los Cristales.</i>	54
Tabla 10. <i>Resumen de la Formación Agua Blanca.</i>	70
Tabla 11. <i>Resumen Masparrito, Miembro (Formación Gobernador)</i>	74
Tabla 12. <i>Resumen de la Formación Cojedes.</i>	76
Tabla 13. <i>Resumen de la Formación Esquistos de Apure</i>	77
Tabla 14. <i>Orden de persistencia de los minerales pesados</i>	80
Tabla 15. <i>Asociaciones de minerales pesados y procedencia</i>	80
Tabla 16. <i>Resistencia a la alteración química de los minerales pesados.</i>	82
Tabla 17. <i>Capacidad de migración de los minerales pesados</i>	82
Tabla 18. <i>Minerales pesados separados por el equipo isodinámico Frantz de acuerdo al amperaje</i>	111
Tabla 19. <i>Atributos Topográficos Primarios que pueden ser calculados por El Análisis de Terreno de los Datos (Dem).</i>	160
Tabla 20. <i>Cálculos de variables y parámetros morfométricos de la microcuenca y la red de drenaje</i>	168
Tabla 21. <i>Comparación entre valores de redondez y esfericidad promedios para cada muestra mediante el software ImageJ.</i>	174
Tabla 22. <i>Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra del río Apure.</i>	177

Tabla 23. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra del río Boconó.....	179
Tabla 24. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra tomada sobre la traza de la Falla de Boconó.	181
Tabla 25. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra Las Palmas-1 (LP1).....	183
Tabla 26. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra Las Palmas-5 (LP5).....	185
Tabla 27. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra Peña-1.....	187
Tabla 28. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra Peña-3.....	189
Tabla 29. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra del río Nirgua.....	191
Tabla 30. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra tomada del tributario del río Cojedes.	193
Tabla 31. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra Tucuragua-1	195
Tabla 32. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra Tucuragua-3.....	197
Tabla 33. Minerales existentes en las secciones epóxicas discriminados mediante DRX y MEB	198
Tabla 34. Resultados de los análisis granulométricos por difracción láser (master sizer 2000).....	200
Tabla 35. Valores referenciales usados para interpretar los resultados de la tabla 2.....	200
Tabla 36. Resumen y comparación de las diferentes propiedades para cada muestra	201
Tabla 37. Atributos del terreno de primer orden calculados para cada cuenca.	213
Tabla 38. Valores estadísticos de índices de erosión para cada una de las cuencas.	213
Tabla 39. Valores de índices de erosión para cada cuenca, incluyendo la precipitaciones.	214
Tabla 40. Valores de la precipitación y relieve para cada una de las cuencas.	218
Tabla 41. Valores de atributos secundarios del terreno para cada cuenca	224
Tabla 42. Comparación de los diferentes parámetros normalizados entre cuencas.	225

INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo Especial de Grado forma parte del proyecto de grupo CDCH-UCV número PG-08-8273-2011 titulado “Determinación de la relación entre relieve, clima, tectónica y biodiversidad en orógenos circundantes a la cuenca del río Orinoco mediante métodos multiherramientas” y del proyecto GIAME (Geociencia Integral de Los Andes de Mérida) en ambos proyectos está participando el Laboratorio de Termocronología de la Universidad Central de Venezuela (UCV).

En síntesis el trabajo se centrará en la caracterización mineralógica – geoquímica (análisis de secciones finas, microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X, análisis granulométricos mediante el equipo *master size*) de muestras in – situ, sedimentos no consolidados y de minerales pesados pertenecientes a sedimentos modernos del sistema hidrológico (ríos Nirgua o Buria, Tucuragua, Peña, tributario de Cojedes, Apure, Boconó, y la Quebrada Las Palmas, los cuales drenan hacia el río Orinoco.) presente en terrenos adyacentes a los ríos principales de Nirgua, Boconó y Apure. La integración de esta caracterización en conjunto con el cálculo de índices de erosión a lo largo de cada subcuenca que tomen en cuenta el tipo de litología y el patrón de precipitaciones acumulado permitirá establecer las relaciones entre clima, relieve y tectónica a lo largo de la zona de estudio.

I. PRELIMINARES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Venezuela no existen suficientes estudios que traten de discriminar la erosión de montañas a través del estudio de los sedimentos modernos transportados por los ríos Nirgua, Tucuragua, Peña, tributario de Cojedes, Apure, Boconó, Quebrada Las Palmas y la Falla de Boconó. Esos estudios pudieran arrojar información acerca de diversos factores: litología, relieve, clima, reactivación de fallas por procesos geodinámicos, la orogénesis y las intervenciones antrópicas, entre otros aspectos. La combinación de la caracterización mineralógica-geoquímica de los sedimentos modernos de tales ríos junto con el cálculo de las tasas de erosión que incluyan el tipo de litología, el patrón de precipitaciones y la presencia de fallas activas permitiría relacionar la interacción entre clima, relieve y tectónica a lo largo del tiempo.

En consecuencia las preguntas de investigación a responder en el presente Trabajo Especial de Grado son:

- ¿Qué información sobre los orógenos circundantes podría arrojar la caracterización mineralógica y geoquímica de los sedimentos recientes de los ríos antes mencionados?
- ¿Están trabajando los procesos del clima, relieve y tectónica en la erosión en forma acoplada o no?
- ¿De alguna manera la forma de los minerales pesados correlacionará con los índices de erosión del área de estudio?

1.2. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación forma parte del proyecto de grupo CDCH – UCV número PG-08-8273-2011 titulado “Determinación de la relación entre relieve, clima, tectónica y biodiversidad en orógenos circundantes a la cuenca del río Orinoco mediante métodos

multiherramientas” y del proyecto GIAME (Geodinámica Integral de Los Andes de Mérida) el primero bajo la coordinación del Laboratorio de Termocronología de la Universidad Central de Venezuela (UCV), el segundo representa una colaboración del Laboratorio de Termocronología de la UCV con la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS). El área de estudio contemplada en la siguiente investigación comprende sectores de Los Andes de Venezuela, de la Cordillera de la Costa y de la Serranía del Interior, donde también yacen importantes sistemas de fallas como Boconó y La Victoria. Los resultados que aquí se deriven, serán integrados dentro de los proyectos de investigación anteriormente mencionados, en primer lugar, ya que todos los ríos (Nirgua, Tucuragua, Peña, tributario de Cojedes, Apure, Boconó, y Quebrada Las Palmas) drenan hacia la cuenca del río Orinoco, y en segundo lugar, porque se obtiene información acerca del rol de las fallas Boconó y La Victoria como estructuras controladoras del bloque tectónico definido en esta área de estudio.

Adicionalmente, este estudio brindará información esencial para un buen desarrollo de actividades primordiales como: obras civiles, agricultura, etc. Mediante la ejecución del mismo se integrará con otros estudios geológicos previos, para así corroborar o aportar información adicional a los ya existentes. Ya que los índices de erosión actual que estamos calculando pueden estar afectados por intervenciones antrópicas o la mano del hombre, a gran escala (a largo plazo) ellas no son tan importantes para garantizar el levantamiento de montañas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Estudiar las interacciones entre el relieve, clima, tectónica y erosión en terrenos circundantes a las cuencas hidrográficas de los ríos Boconó, Nirgua y Apure mediante el estudio integrado de caracterización mineralógica geoquímica de sedimentos recientes, muestras *in – situ* e índices de erosión a lo largo de las diferentes cuencas hidrográficas presentes en el área de estudio.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar los sedimentos detríticos de los ríos Nirgua, Tucuragua, Peña, tributario de Cojedes, Apure, Boconó, Quebrada Las Palmas, la Falla de Boconó y sus principales tributarios mediante un análisis físico y geoquímico.
- Calcular la tasa de erosión y acumulación de flujo de partículas mediante índices topográficos primarios y secundarios del terreno a lo largo de las cuencas.
- Generar un mapa geológico estructural con los principales atributos del terreno y un mapa de distribución de minerales pesados en las cuencas de los Ríos Nirgua, Tucuragua, Quebrada Las Palmas, la Falla de Boconó, Ríos Peña, tributario de Cojedes, Apure y Boconó.
- Determinar relaciones entre clima, relieve, erosión y tectónica mediante comparación de resultados entre las diferentes cuencas.

1.4. ALCANCE

Se espera realizar la caracterización mineralógica y geoquímica de 11 muestras: 06 pertenecientes a sedimentos modernos de ríos y 5 muestras *in – situ* a lo largo de la parte occidental definido por los terrenos adyacentes a los ríos Nirgua, Boconó y Apure. Adicionalmente se generarán mapas de índice de erosión, relieve, distribución de precipitaciones y sismicidad de esta área con la finalidad de comparar diferentes parámetros que permitan discriminar la relación existente entre esas variables. Las once muestras serán solo preparadas en este proyecto para su posterior fechado por el método de datación por huellas de fisión en apatitos, en un proyecto a futuro.

1.5. ANTECEDENTES

1.5.1 Estudios Geológicos Previos

Bushman (1965) realizó un estudio del área de Barquisimeto y describe a detalle la geología de la región, realizando su tectónica, su evolución y redefiniendo las unidades geológicas de El Pegón, Los Cristales, Rio Abajo y Barquisimeto, el Gneis de Yaritagua y el Esquisto de Las Brisas.

Denominó el complejo Yaritagua para designar a las rocas metamórficas expuestas al sur de la población de Yaritagua, estado Lara, que consideró equivalentes a la Formación Las Brisas. Consideró esta Unidad como la más antigua y la que se encuentra en la base de las secuencias metamórficas de las regiones de Barquisimeto, Bobare, Duaca y Yaritagua atribuyéndole una edad Pre – cretácico.

Bellizzia & Rodríguez (1967) realizaron una excursión a la región de Duaca, Barquisimeto y Bobare en la cual se buscó respuesta a los problemas geológicos que existía en esta zona para la época. A partir de este trabajo se definieron las formaciones Yaritagua y Nirgua como las unidades más antiguas que afloran en esta zona. Se subdivide la Formación los Cristales (Bushman, 1959) en las formaciones Aroa y Mamey, y propone conservar el mismo nombre en caso de que no se pueda separar en estas dos últimas unidades. También designan el nombre de Formación Matatere para definir una espesa secuencia de turbiditas asociadas a varios horizontes de capas de peñones.

Bellizzia et al. (1968) analizaron la estratigrafía de los estados Lara, Yaracuy, Cojedes y Carabobo. Proponen que las formaciones Nirgua y Aroa que tienen una descripción informal, deben ser revisadas para introducirlas en el Léxico Estratigráfico de Venezuela, por lo cual realizan una descripción más completa ajustadas a las normas estratigráficas del momento. Consideran todos los afloramientos incluidos en la Formación Carorita, como bloques exóticos, deslizados dentro de la Formación Bobare, proponen que estos olistolitos provendrían de un

conjunto in situ situado hacia el este de la Formación Los Cristales. También mantienen el nombre de Formación Matatere, propuesto en trabajos previos, para la espesa secuencia de sedimentos del Paleoceno – Eoceno en el surco de Barquisimeto. Finalmente cartografió el Mapa geológico de Barquisimeto – Urachiche – Río Tocuyo estado Lara y Yaracuy a escala 1:100.000,

Stainforth (1968) realizó una revisión de las unidades estratigráficas estudiadas en el estado Lara. Corroboró lo propuesto por BELLIZZIA & RODRÍGUEZ (1968) sobre las formaciones Nirgua, Aroa, Mamey y Matatere y apoya la definición propuesta por los antes mencionados para estas unidades.

Bellizzia et al. (1969) estudiaron las quebradas Las Minas, Cumeragua y Carampampa y el río Tupe del distrito Aroa, en los ríos Nirgua, Tirgua y Tucuragua y en la serranía de Nirgua-Tucuragua. Concluyó que Las rocas verdes del Distrito Aroa posiblemente representan rocas básicas metamorfozadas, especialmente tobas y lavas.

Bellizzia et al. (1976) publicaron un artículo que explica la geología del estado Yaracuy donde destacan como hecho resaltante de esa investigación el descubrimiento de un complejo de rocas de alto metamorfismo constituido por anortositas, granulitas, gneises y anfibolitas (Complejo de Yumare). También se planteó que la parte superior de la secuencia metamórfica está formada por las formaciones Nirgua y Aroa. A su vez se ubicó un afloramiento aislado de rocas paleocenas de la Formación Matatere al oeste del macizo de Yumare. También destacan la presencia de rocas ultrabásicas (peridotitas serpentinizadas) explicando el desarrollo del metamorfismo regional, la actividad sísmica poco profunda, el desarrollo de grandes fallas longitudinales y una tectónica gravitacional profunda. Entre otros puntos agregan más soporte a las teorías de la evolución de las formaciones que conforman el Grupo Lara. Finalmente cartografió el Mapa geológico del estado Yaracuy a escala 1:100.000

González de Juana et al. (1980) presentaron una síntesis de la evolución geológica del occidente del país, donde se definen rasgos estructurales, estratigráficos y litológicos, regionales y locales, para cada unidad sedimentaria en el surco de Barquisimeto y zonas aledañas.

Blanco (1980) estudió una zona ubicada al este de Chivacoa, distritos Sucre, Bruzual y Nirgua, edo. Yaracuy. Indica que la zona fue afectada por dos períodos de plegamiento superimpuestos. Los pliegues de la primera generación son isoclinales con plano axial paralelo o subparalelo a la foliación y contemporáneos con el metamorfismo regional. Los pliegues de la segunda generación deforman la superficie de foliación y la geometría del primer plegamiento.

Schubert (1980) estudió la morfología neotectónica de una falla rumbo – deslizante e hizo un informe preliminar sobre la Falla de Boconó, Andes merideños. Considera al Sector de Yaracuy como una cuenca de tracción (*pull-apart*) Plio – Cuaternario, desarrollado entre las fallas activas dextrales de Boconó y de Morón.

Stephan (1982) en su tesis doctoral en el estado Lara definió a las montañas del norte del país, como un “edificio tectónico polifásico”, formado por una superposición de napas que se extiende desde la transversal de Barquisimeto en su región occidental hasta la península de Araya- Paria en su extremo oriental. Propone la división de la Formación Matatere en cuatro subunidades: Matatere I, II, III y Agua negra.

Bellizzia & Rodríguez (1986) al estudiar las serranías de Portuguesa, Bobare y región de Barquisimeto, incluyeron a la formación Bobare junto con la Formación Mamey y la Formación Carorita en el Cretácico Temprano. Describen la litología de esta formación. Mencionan que la secuencia sedimentaria representada por las formaciones Mamey, Volcancito y Carorita "presenta características petrológicas semejantes y a su vez puede correlacionarse con las formaciones Araure, Agua Blanca, Cojedes y Mapuey de la región de Acarigua – San Carlos“

Macsotay et al. (1987) hicieron unos análisis exhaustivos de la litología, fósiles y paleoambiente de la Formación Bobare. Redefine el Grupo Lara, esclareciendo las relaciones estratigráficas, edad y paleoambiente de sedimentación. Concluye también que los afloramientos aislados de la Formación Carorita corresponden en la mayoría de los casos a núcleos de los anticlinales preservados en el seno de la Formación Bobare. Correlacionan a la Formación Carorita con las formaciones Mamey, Las Mercedes, Carúpano y posiblemente Nirgua.

Hackley et al. (2006) realizaron el Mapa Geológico de Venezuela a escala 1:750.000. Realizan revisiones significativas a la geología de la Cordillera de la Costa, las cuales fueron incorporadas a un nuevo y detallado mapa (escala 1:25.000).

Gomes et al. (2008) realizaron un estudio geofísico integrado en la zona de Yumare – Aroa, entre los estados Yaracuy y Falcón, con el objetivo de proponer un modelo geológico y estructural del subsuelo en la zona, que se ajustara a las condiciones allí presentes y que abarcara los cuerpos ígneo-metamórficos ubicados al norte de la Colonia Agrícola de Yumare, así como el Graben de Aroa; empleando métodos gravimétricos y magnéticos. Realizan un mapa geológico estructural.

Solórzano & Varguillas (2008) realizaron una caracterización química y radiométrica, por medio de las técnicas fluorescencia de rayos X, espectrometría de rayos gamma y color Munsel a los sedimentos aluviales de la cuenca de Barquisimeto – Cabudare. Mediante la comparación de las unidades geológicas interpretadas mediante las unidades químico – radiométricas generadas, se observó que existieron diversos periodos de actividad tectónica en la Cuenca de Tracción de Cabudare, siendo interpretado un período de gran subsidencia durante el Plioceno (depositación de la Formación Guamacire), uno de menor actividad hace 0,95 Ma (depositación de Q3), con una nueva reactivación hace 0,4 Ma (depositación de Q2), estando en la actualidad en una relativa “calma”. Realizan un Mapa de la Geología general del área en estudio.

Urbani (2008) realizó una revisión de la nomenclatura de las unidades de rocas ígneas y metamórficas del norte del país, adoptando las normas de unidades litodémicas. De esta manera presenta a las Formaciones Yaritagua, Nirgua, Aroa y Mamey, como Gneis de Yaritagua, Complejo Nirgua, Esquisto de Aroa y Esquisto de Mamey.

Hernández (2008) realizó una caracterización geofísica en la zona Tamaca – Duaca del estado Lara, mediante estudios gravimétricos y de ruido sísmico ambiental. Trazaron cuatro perfiles en Duaca y cinco perfiles en Tamaca que permitieron elaborar los modelos 2D geológicos del área de estudio. Por último, utilizando la información obtenida a través de los modelos 2D,

obtuvieron un mapa de espesor de sedimentos para cada localidad, generando así una imagen en planta de la posible distribución de espesores de los sedimentos.

Gómez (2012) realizó la Integración geológica de la región Carora Padre Diego, edo. Lara, cuya región limita al oeste con la estudiada en el presente trabajo.

Coello (2012) realizó la integración de la cartografía geológica de la región entre Bobare y Farriar, entre los estados Yaracuy y Lara, cuya región limita al norte con la estudiada en el presente trabajo.

1.5.2 Antecedentes Metodológicos

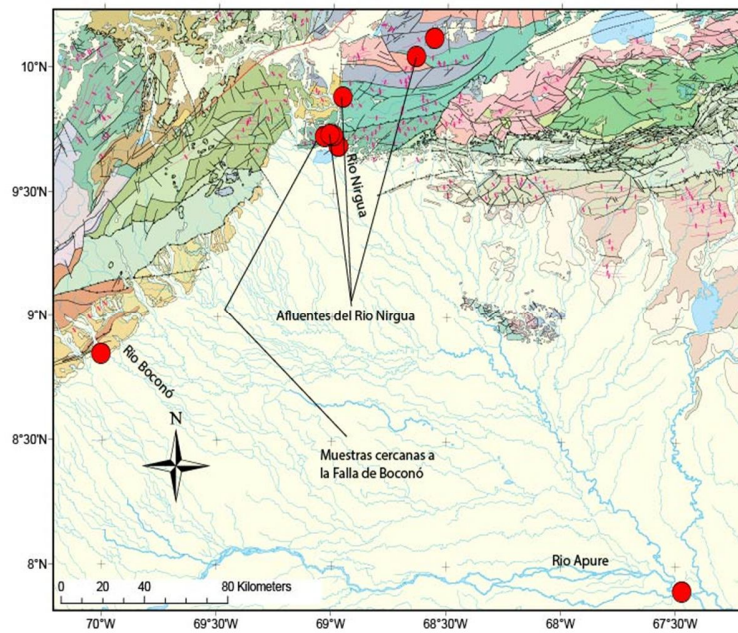
Bermúdez et al. (2009) Se enfocó en la exhumación de los Andes venezolanos a través de las trazas de fisión de apatito, cuantificando la historia de erosión durante la evolución del orógeno. Estableció la historia termal a baja temperatura en diversos marcos geológicos, a través de las trazas de apatito y determinó que la exhumación está siendo controlada por la tectónica y que el clima no ejerce un factor preponderante al menos durante el Mioceno – Plioceno.

Coello (2012) Realizó análisis petrográficos e identificación de minerales pesados, para generar un esquema de variación de las asociaciones de minerales índices a lo largo de la Formación Guárico, para establecer rocas fuentes del surco de Guárico, y depositación de dicha formación.

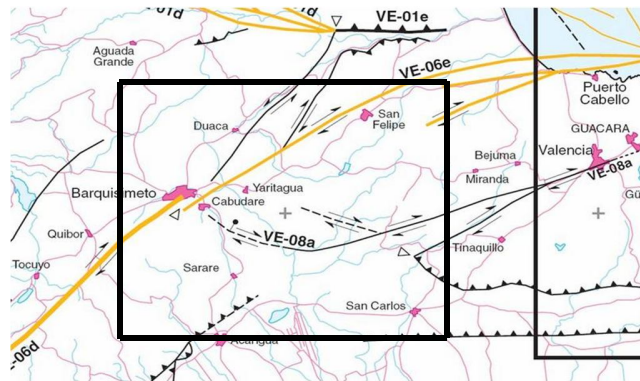
1.6. UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra ubicada en el occidente de Venezuela, específicamente comprende la zona de convergencia entre la Cordillera de la Costa y Los Andes de Venezuela. La Figura 1a ilustra los puntos de muestreos a lo largo de tres principales ríos: Boconó, Nirgua y Apure. La parte norte de esta zona corresponde al río Nirgua y se encuentra delimitada entre un ramal de la Falla de Boconó conocido como la sección que va desde Cabudare hasta Morón con un ramal de la falla de la Victoria conocido como Falla de Guacamaya (Figura 1b), esta zona

comprende gran parte de la cuenca del río Nirgua o Buría, y algunos tributarios como los ríos Tucuragua, Peña, y la Quebrada Las Palmas. Hacia el Suroeste se encuentra el páramo del Cendé y la cuenca del río Boconó con sus principales tributarios. La delimitación del área de estudio en términos de fallas puede ser observada en la Figura 1b.



(a)



(b)

Figura 1. (A) Mapa de localización de muestras recolectadas en este trabajo. (B) Principales estructuras presentes en la zona de estudio (Tomado y modificado de <http://pubs.usgs.gov/ofr/2000/ofr-00-0018/ofr-00-0018.pdf> y Hackley et al., 2005)

II. GEOLOGÍA

2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la geología regional, geología estructural, descripción de las formaciones geológicas existentes en la zona de estudio, así como aspectos fisiográficos de los diferentes sectores.

2.2. GEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio es bastante extensa (Figura 1) y estructuralmente complicada, ocupando una superficie de aproximadamente 130.000 km², se caracteriza por estar situada al sureste de la falla de Boconó y está conformada por dos cadenas montañosas La Serranía del Interior y La Cordillera de la Costa, esta área está limitada al norte por la Falla La Victoria y al sur por una falla normal y una falla rumbo lateral dextral conocida como Falla la Guacamaya (Audemard et al., 2000).

La Tabla 1 resume cada una de las formaciones geológicas que son interceptadas por los ríos y tributarios considerados en el presente trabajo.

Tabla 1. Formaciones que son interceptadas por cada río.

Río	Formaciones	Edad
Boconó	Pagüey	Terciario, Eoceno Medio (48.6-40.4)
	Masparrito, Miembro (Formación Gobernador)	Terciario, Eoceno Medio (48.6-40.4)
Tributario de Cojedes	Cojedes	Cretácico Inferior (Albiense 112-99.6 Ma)
	Agua Blanca	Cretácico Inferior (Aptiense 125-112 Ma)
Quebrada Las Palmas	Mamey	Cretácico Temprano (Aptiense-Albiense 125.5-99.6 Ma)
Peña	Mamey	Cretácico Temprano (Aptiense-Albiense 125-99.6 Ma)
	Grupo Los Cristales	Mesozoico (251-66.5 Ma)
Nirgua o Buría	Aroa	Cretácico Tardío (Cenomaniense-Campaniense 99.6-70.6 Ma)
	Nirgua	Mesozoico Medio (Jurásico 201.6-145.5 Ma)
	Complejo Yaritagua	Mesozoico Temprano (Triásico 251-201.6 Ma)
	Nirgua, Fase (Complejo la Costa)	Mesozoico (251-66.5 Ma)
	Grupo Los Cristales	Mesozoico (251-66.5 Ma)
Tucuragua	Aroa	Cretácico Tardío (Cenomaniense-Campaniense 99.6-70.6 Ma)
	Mamey	Cretácico Temprano (Aptiense-Albiense 125-99.6 Ma)
	Nirgua	Mesozoico Medio (Jurásico 201.6-145.5 Ma)
	Grupo Los Cristales	Mesozoico (251-66.5 Ma)
Apure	Esquistos de Apure	Paleozoico (Silúrico 444-416 Ma)

La zona de estudio comprende gran parte de la región de Yaracuy en donde afloran rocas de edades que van desde el pre – Cretácico a edades recientes y de diversa litología, en particular dos tipos de roca principales: metamórficas y sedimentarias. En la tabla 2, se resumen las unidades metamórficas en orden cronológico.

Tabla 2. Unidades metamórficas presentes en el área cercana a Nirgua.

Unidades Metamórficas			
Unidades	Edad	Nomenclatura	Litología
Esquistos de Aroa	Cretácico Tardío (Campaniense-Cenomaniense)	Ka	Esquisto carbonático-grafitoso, filita y mármol laminado grafitoso, esquisto cuarzo-micáceo-grafitoso, metarenisca y metaconglomerado, “Rocas Verdes”.
Esquisto de Mamey	Cretácico Temprano (Aptiense- Albiense)	Km	Esquisto carbonático cuarzo-sericítico, esquisto grafitoso, caliza cristalina maciza, mármol laminado grafitoso; metarenisca y metaconglomerado; filita carbonacea.
Serpentinita		Ksp	Peridotita y serpentinita
Complejo Nirgua	Mesozoico Medio	Kn	Esquisto cuarzo-micáceo, caliza cristalina; anfibolita; anfibolita granatífera, esquisto gnésico cuarzo-feldespático, esquisto clorítico-epidótico-anfibólico, metarenisca.
Gneis de Yaritagua	Mezozoico Temprano	Mety	Gneis, gneis porfiroblástico, augengneis, cuarcita esquistosa y esquisto no Carbonático.
Complejo San Julián	Paleozoico - Precámbrico	Psj	Esquisto y gneis cuarzo - plagioclásico - micáceo, mármol, cuarcita y diversos tipos de rocas metaígneas mayoritariamente máficas (como anfibolita, gabro, diorita, tonalita y granodiorita)

Para las unidades cuaternarias basándose en *Coplanarh* (1974) se generó la clasificación mostrada en la Tabla 3.

Tabla 3. Unidades cuaternarias en la región de Nirgua modificado de *Coplanarh* (1974).

Edad	Simbología	Unidades Geológicas
Holoceno	Q0A3	Abanicos de explayamiento / conos de deyección
	Q0A5	Rampa de explayamiento

	Q0A6	Rampa coluvial
	Q0A9	Complejo coluvio-aluvial de piedemonte
	Q0B10	Terraza aluvial
	Q0D	Planicie de explayamiento
	Q0B9	Valle coluvio-aluvial
	Q0B12	Valle encajado
Pleistoceno Superior	Q1A3	Abanico de explayamiento
	Q1A5	Rampa de explayamiento
	Q1B9	Valle coluvio - aluvial
	Q1B10	Terraza aluvial
	Q1B10	Terraza aluvial
	Q1B12	Lecho mayor
Pleistoceno Inferior	Q2A3	Abanico de explayamiento
	Q2A9	Complejo coluvio - aluvial de pie de monte
	Q2B10	Terraza aluvial

En virtud de que este Trabajo Especial de Grado se concentró en la cuenca del río Nirgua y sus orógenos circundantes se procederá a describir la geología regional del estado Yaracuy, el cual conforma una la parte occidental del Sistema Montañoso del Caribe. Se caracteriza por la presencia de peridotitas serpentinizadas, lo cual indica un sector amplio de metamorfismo regional. La actividad sísmica es somera (Figura 14) y se concentra básicamente en las regiones externas al estado Yaracuy, la mayoría de las fallas presentes son longitudinales y existe un “rasgo tectónico gravitacional acentuado” (Soubllette, 2013). Indicadores tectónicos indican una desarrollada esquistosidad la cual es paralela a la estratificación en la mayoría de los casos. Los esfuerzos tectónicos existentes en el área produjeron un plegamiento complejo a gran escala isoclinal, aunque existen diversas fases de microplegues. La estructura más importante de la zona la constituye la Falla de Boconó, la cual corta el valle del río Yaracuy uniéndose al sistema de fallas del Caribe (Figuras 1 y 2), existe una zona de fallas al norte de los macizos metamórficos que afloran al norte del río Aroa (Schubert, 1980).

2.2.1 Formaciones geológicas

- Formación Maporita (Mioceno-Plioceno)

Bellizzia et al., (1968) describen esta formación como una secuencia de sedimentos continentales expuesta en Yaracuy nororiental, con localidad tipo en la quebrada El Fraile y buenos afloramientos cerca del caserío Maporita, la cual forma una franja angosta desde El Palito, estado Carabobo, hasta cerca de Taria, estado Yaracuy. Litológicamente, consiste en conglomerados mal escogidos y friables con guijarros subredondeados de rocas metamórficas, cuarzo y caliza en una matriz arcillo-arenosa-ferruginosa; areniscas cuarzo-micáceas de grano medio a grueso, colores verde a marrón-crema, con estratificación cruzada y lenticularidad características; lutitas y limolitas generalmente arenáceas, y frecuentes capas lenticulares de margas.

- Formación Ojo de Agua (Mioceno superior)

Conformada por areniscas micáceas intercaladas con arcillas, conglomerados y calizas arenosas nodulares y macrofósilíferas. Al sur del río Aroa afloran lutitas, areniscas, calizas y algunas capas de lignito; en el flanco sur – este de la Serranía de Agua Fría hay frecuentes lutitas yesíferas y algunas capas macizas lenticulares de yeso, las cuales son explotadas en la quebrada del mismo nombre. Se estiman unos 250 m de espesor para la unidad, la cual es de aguas salobres a marinas, muy someras y cercanas a la costa. La formación suprayace concordante y transicionalmente a la Formación Capadare o discordantemente a la unidad metamórfica, e infrayace sedimentos del Cuaternario. En el flanco norte de las montañas de Aroa es discordante sobre las metamórficas del Complejo de Yumare y de la Formación Aroa. Se correlaciona con formaciones expuestas en Falcón central (El Veral, La Vela, etc).

- Formación Capadare (Mioceno superior)

Las Calizas de Capadare, expuesta en el cerro del mismo nombre en el municipio Acosta, estado Falcón, se considera que la unidad tiene amplia distribución en los valles de El Tocuyo, Aroa y Casupal y se extiende en afloramientos continuos desde la región de Chichiriviche hasta Maparíen Falcón central. La formación consiste en calizas margosas de color crema, muchas de ellas coquinoides, de espesor variable unos pocos y hasta 25 m; lutitas calcáreas de color crema, algunas arenáceas o limosas y ricas en contenido faunal, y escasos lentes de arenisca calcárea de grano fino. Algunas calizas son fosfáticas y otras dolomíticas. Los cambios litológicos laterales son frecuentes; en algunas localidades la unidad está constituida por un 90% de calizas y en otras puede contener hasta 50% de lutitas y margas.

La unidad suprayace a la Formación Agua Linda o a la Formación Casupal (Terciario, Estado Falcón) y a veces descansa directamente sobre rocas ígneas y metamórficas de la región; su contacto superior con la Formación Ojo de Agua es concordante y transicional. Contiene ricas faunas micro y macrofósilíferas que indican una edad Mioceno medio.

- Formación San Quintín (Cretáceo)

En el flanco sur del Macizo de San Quintín, afloran un conjunto de rocas volcánicas básicas, débilmente metamorfizadas, y una secuencia de rocas sedimentarias: metaareniscas, metalimolitas y lutitas filitas. En algunas localidades las rocas volcánicas aparentemente se intercalan a varios niveles con rocas de alto grado metamórfico del Complejo de Yumare; en otras zonas están incluidas en las rocas metasedimentarias. Esta aparente concordancia de las volcánicas con las rocas del Complejo de Yumare es de carácter tectónico.

- Formación Aroa (Pre-Cretáceo)

De acuerdo con Bellizzia y Rodríguez (1976) constituye una espesa secuencia metamórfica expuesta en la Serranía de Aroa, estado Yaracuy, especialmente en el Distrito Minero Cuprífero de Aroa, a la cual se asocian piritas cupríferas. La formación toma su nombre del distrito minero de la Serranía de Aroa. Las secciones tipo se encuentran en las quebradas Las Minas, Cumaragua y Carampampa y el río Tupe, en los ríos Tlacha, Las Palmas, Oro y Chivacure en el flanco norte de la serranía y en los ríos Nirgua, Tirgua y Tucuragua y en la Serranía de Nirgua-Tucuragua. Los depósitos de pirita cuprífera se asocian con la secuencia calcárea de la unidad.

La formación es una secuencia de esquistos calcáreo grafitosos, filitas grafitosas, calizas laminadas, calizas macizas, esquistos cuarzo-micáceo-grafitosos y varios horizontes de esquistos verdes. Estos últimos, constituidos por zoisita, clinozoisita, epidoto, feldespato, actinolita, clorita, calcita y cuarzo, se denominan localmente “roca verde” (“greenstone”) y se utilizan como capa guía tanto en superficie como en subsuelo (Soublatte, 2013). Su textura varía entre foliada y maciza granular y su color entre verde pálido y verde oliva, algunas son de color gris oscuro. A veces exhiben textura porfidoblástica con porfidoblastos de albita y las inclusiones lenticulares de caliza son frecuentes. Estas rocas verdes forman horizontes de espesor variable entre pocos y cerca de 50 metros a diversos niveles estratigráficos, pero especialmente en la parte media de la formación.

Los esquistos calcáreo-grafitosos, micáceo-grafitosos y filitas grafitosas constituyen alrededor del 60% de la unidad y consisten en calcita, grafito, sericita, cuarzo, feldespato, zoisita, pirita y clorita. En la parte inferior de la formación predominan esquistos micáceos; en la superior, zona de transición a la Formación Mamey suprayacente, aparecen meta-areniscas y metaconglomerados muy similares a los de esta última. Las calizas laminadas generalmente se interestratifican con los esquistos calcáreo-grafitosos. Las calizas macizas alcanzan hasta 20 m de espesor, generalmente son grafitosas, piríticas y lenticulares y consisten en calcita, grafito, sericita y pequeñas cantidades de

cuarzo, zoisita, clorita, albita y pirita; algunas son dolomíticas. Por su rápida meteorización los esquistos grafitosos y calcáreo-grafitosos restringen los afloramientos, aunque se encuentran bien expuestos en los ríos y quebradas principales de las Serranías de Aroa y Nirgua-Tucuragua.

- Formación Las Brisas (mesozoico)

En Yaracuy, los afloramientos se encuentran al norte de los valles intramontanos de Bejuma-Miranda-Nirgua, a lo largo de los cuales corre la falla de La Victoria que separa al Macizo de Nirgua de la Serranía de Santa María-Urama-Puerto Cabello. La Formación Las Brisas es más gnéisica, con esquistos mejor foliados, anfibolitas más abundantes, presencia más frecuente de granates en los esquistos cuarzo-micáceo-feldespáticos y mayor grado metamórfico. En la zona del estudio, la Formación Las Brisas consiste en esquistos cuarzo-micáceo-feldespáticos, cuarzo-micáceo-biotíticos y cuarzo-micáceo-feldespático-cloríticos, con la siguiente mineralogía: cuarzo, microclino, albita (más de 75%), muscovita, biotita, epidoto, clorita, granate y a veces grafito; localmente hay cantidades anormales de clorita y epidoto. Los esquistos gnéisicos y gneises cuarzo-moscovítico-feldespáticos también son frecuentes y localmente, como en el río Taria, desarrollan textura de “augen”. Toda la sección contiene cuarcitas y metaconglomerados, más abundantes hacia la base; las primeras consisten en cuarzo (más de 75%), microclino, albita, muscovita, biotita y proporciones menores de epidoto, granate, calcita, grafito y pirita, y los segundos en cuarzo (más del 75%), microclino, muscovita, biotita, epidoto y grafito. Ambos afloran en capas macizas con muy poca foliación.

- Complejo de Yaritagua (Pre-mesozoico)

Constituye una secuencia de gneises porfidoblásticos (Figura 2 y 3), esquistos cuarzo-micáceo-feldespáticos y cuarcitas expuestas en el Cerro La Cruz al sur de la población de Yaritagua, estado Lara (Bushman, 1959, 1965). La unidad constituye la base de la secuencia metamórfica en la mayor parte de los estados Yaracuy y Lara (Figura 2),

cubierta transicionalmente por la Formación Las Brisas. El Complejo de Yumare, representado por afloramientos aislados al norte del río Aroa, constituye el verdadero “basamento” de la secuencia metamórfica de la región. De acuerdo con Morgan (1969, 1970) este basamento es "... un terreno de secuencia litológica monótona, sin capas guías y fósiles, afloramientos limitados y metamorfismo regional de todas las rocas, la designación de cualquier unidad como basamento es dudosa, al disponerse únicamente de datos estratigráficos. El empleo del término “basamento” debe restringirse a aquellas rocas que han sufrido marcada retrogresión metamórfica, indicativa de una historia geológica más larga y compleja”...

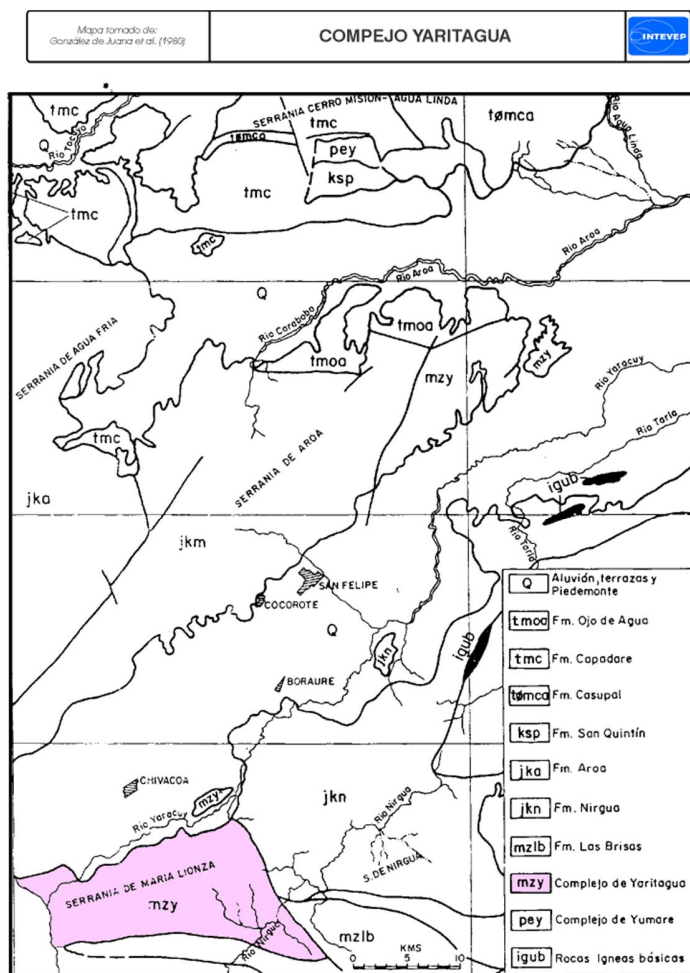


Figura 2. Extensión del Complejo Yaritagua hacia el sur de Chivacoa (Tomado de PDVSA Lexico Estratigráfico (2010). <http://www.pdv.com/lexico/image/y300-1.gif>)

Según este criterio, al sur de la cordillera de La Costa (fajas tectónicas de Caucagua, El Tinaco y Villa de Cura), donde el metamorfismo regional corresponde a las facies del esquistoso verde y esquistoso azul, la mineralogía del basamento retrogrado es notablemente diferente a aquella de las rocas suprayacentes. El mismo estaría representado por el Complejo de Tinaco, cuyas facies metamórficas corresponden a la anfibolita almandínica y cuarzo-epidoto-albita-biotita (Esquistoso de Tinapú); la ausencia de granate en los gneises es índice de baja presión durante el metamorfismo (Menéndez, 1965). En la parte central de la Cordillera de la Costa, pues, se reconocen dos tipos de basamento, hasta ahora no correlacionables: el Complejo de Sebastopol al norte de la Falla de La Victoria, y el Complejo de Tinaco al sur (Soubllette, 2013).

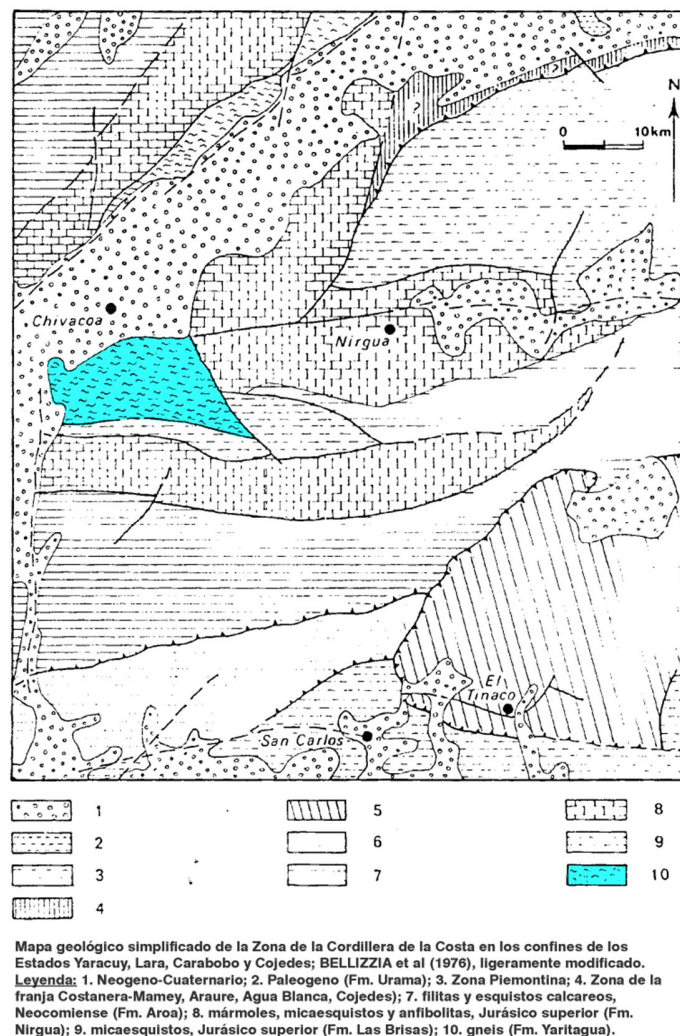


Figura 3. Detalle de la distribución de la Formación Yaritagua (Tomado de PDVSA Léxico Estratigráfico (2010). <http://www.pdv.com/lexico/image/y300-2.gif>).

- Complejo de Yumare (Precámbrico)

Al norte del río Aroa, en el flanco sur de la serranía El Chacal-Cerro Misión-Agua Linda, afloran cuatro macizos llamados: Yumarito, San Quintín, La Zurda y Salsipuedes; afloramientos septentrionales extremos de las rocas ígneo-metamórficas del Sistema Montañoso del Caribe, separados por los valles de los ríos Charal y Aroa de las Serranías de Agua Fría al este, y de Aroa al sur, respectivamente.

La Figura 2 muestra el mapa con recursos minerales del estado Yaracuy compuesto por seis (6) asociaciones litológicas, donde se destaca la unidad petrológica III, metamórficas I: Formación Aroa - Nirgua, constituida de esquistos calcáreo - grafitoso - micáceos, gneis cuarzo - feldespático - micáceo, calizas y mármoles. Adicionalmente, existen sulfuros metálicos de cobre, hierro, plomo y zinc; sulfuros complejos de oro y plata; minerales de titanio, de níquel, talco y esquistos cloríticos y anfibólicos, asbesto, yeso, caolín, feldespato perteneciente al resto de las unidades (Soubllette, 2013).

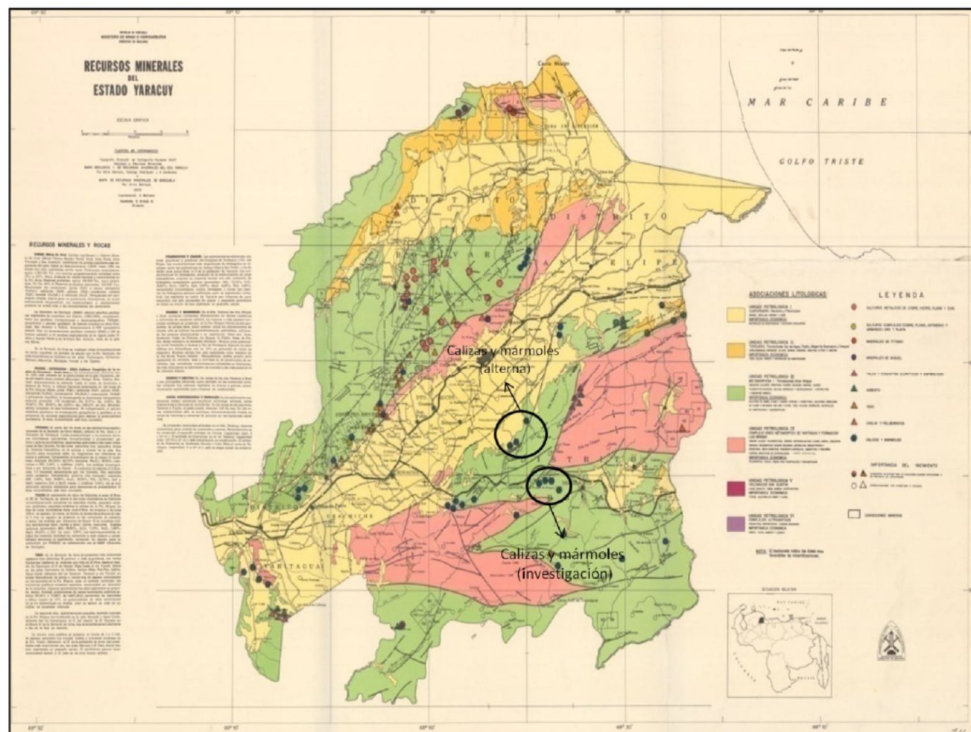
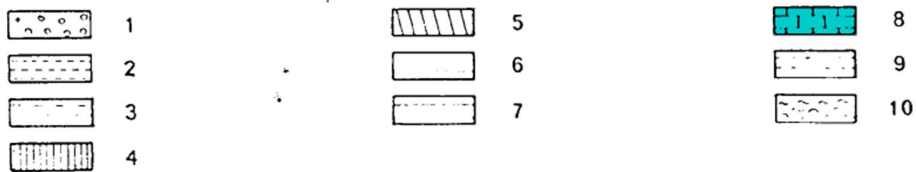
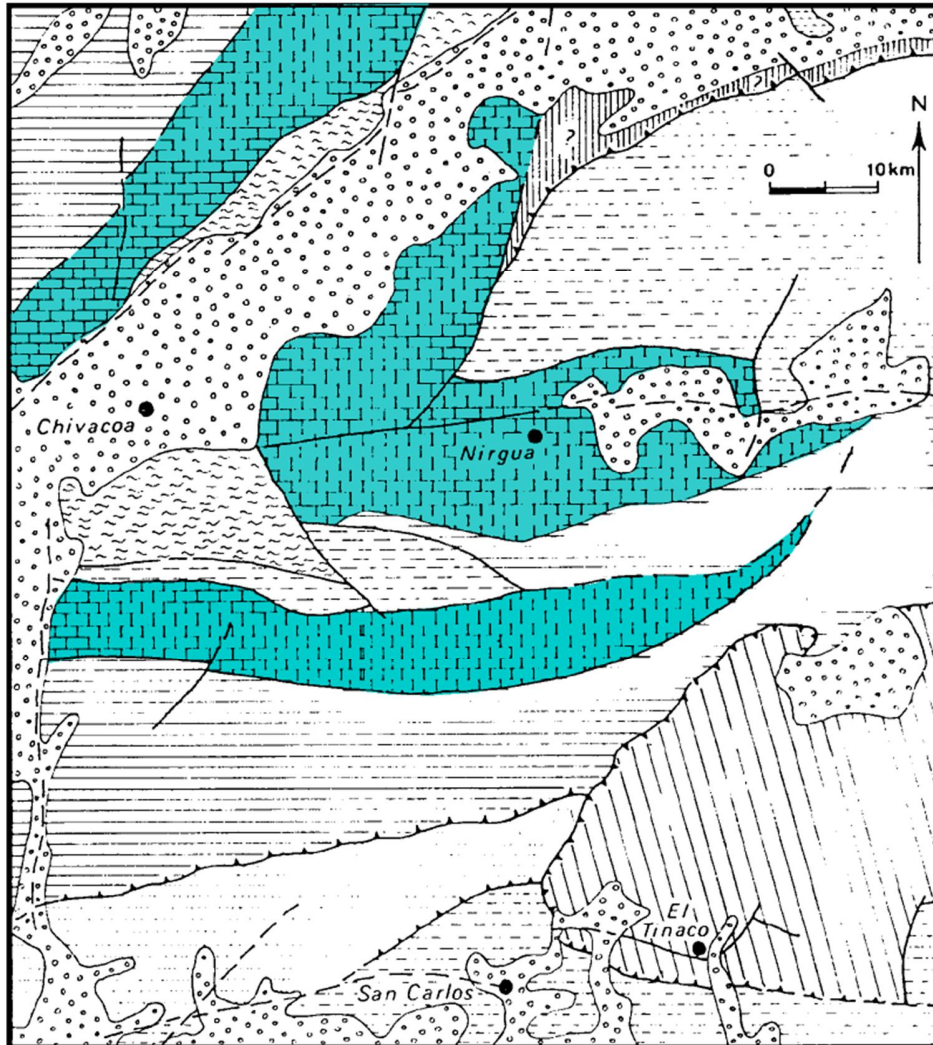


Figura 4. Mapa de recursos minerales del estado Yaracuy (según Bellizia et al., 1986). Las zonas denotadas en elipses corresponden al estudio de evaluación de yacimientos no metálicos de Soubllette (2013).

2.3 GEOLOGÍA LOCAL

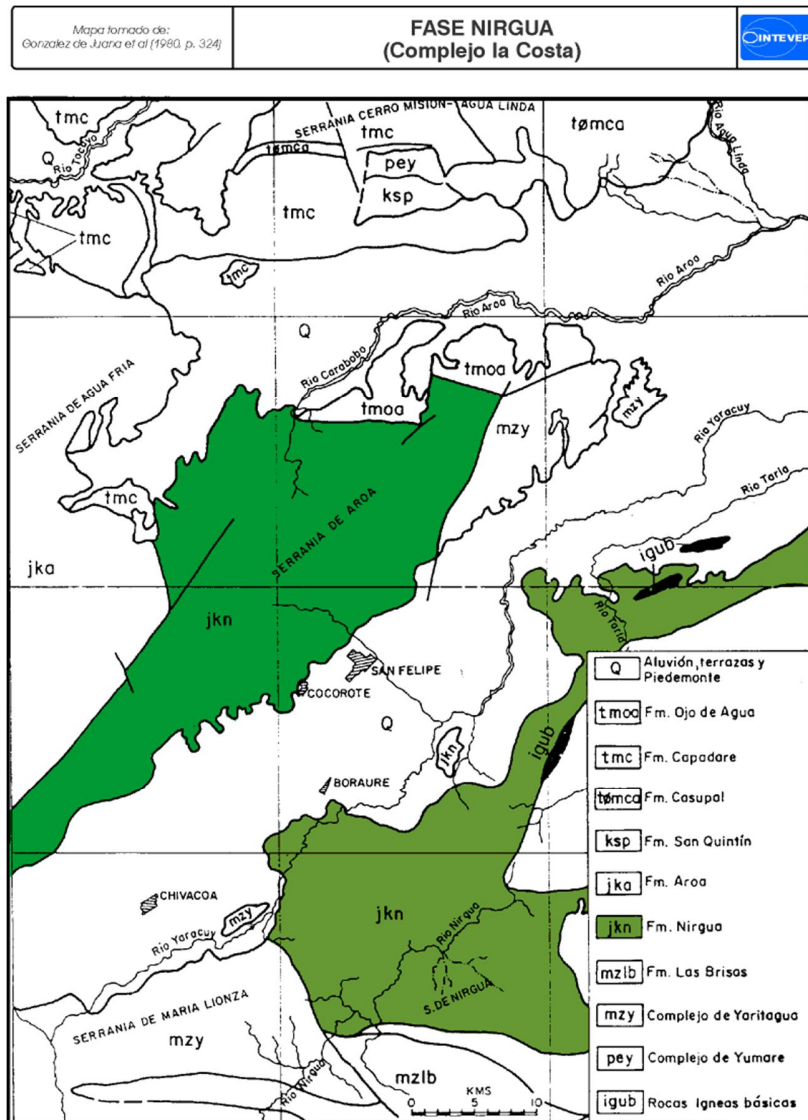
Para la fase Nirgua, ubicada en el Complejo La Costa (Figuras 3 y 4), Bellizzia y Rodríguez (1967) introducen este nombre a una secuencia de rocas metamórficas con predominio de rocas anfibólicas en la parte central al norte del estado Yaracuy, incluyéndola en el Grupo Los Cristales. En la zona del macizo de El Ávila definió la “Unidad de esquistos anfibólicos y anfibolitas” que es correlacionado con la Fase Nirgua, esta unidad se ubica en su Franja Costera – Margarita. Navarro et al. (1988) redefinen estas rocas como Fase Nirgua, formando parte de su unidad litodémica de corrimiento que denominan como Complejo La Costa, que reúne adicionalmente a las fases Antímamo y Tacagua. Este criterio fue aceptado por Urbani y Ostos (1989) y Urbani et al. (1989-a, b) quienes utilizan este nombre en los mapas geológicos de la zona de Puerto Cruz a Caraballeda y Oritapo a La Sabana, Distrito Federal, y El Palito-Morón-Valencia, estado Carabobo. Las rocas eclogíticas pertenecientes a esta unidad y que afloran en la zona de El Palito-Puerto Cabello, estado Carabobo, han sido objeto de particular interés petrológico, por su importancia en la interpretación de la evolución de la Cordillera de la Costa.



Mapa geológico simplificado de la Zona de la Cordillera de la Costa en los confines de los Estados Yaracuy, Lara, Carabobo y Cojedes; tomado BELLIZZIA et al (1976), ligeramente modificado.

Leyenda: 1. Neogeno-Cuaternario; 2. Paleogeno (Fm. Urama); 3. Zona de la Franja Costanera-Margarita; 5. Napas de Aragua; 6. filitas, cuarcitas, metaconglomerados y mármoles, Cretácico inferior (Fms. Mamey, Araure, Agua Blanca, Cojedes); 7. filitas, y esquistos calcareos, Neocomiense (Fm. Aroa); 8. mármoles, micaesquistos y anfibolitas, Jurásico superior (Fm. Nirgua); 9. micaesquistos, Jurásico superior (Fm. Las Brisas); 10. gneis (Fm. Yaritagua).

Figura 5. Fase Nirgua (Tomado de PDVSA Léxico Estratigráfico (2010). <http://www.pdv.com/lexico/image/n200-5.gif>)



Mapa de afloramientos de las unidades metamórficas en la región de Chivacoa-San Felipe. Simplificado de Bellizzi y Rodríguez (1976).

Figura 6. Fase Nirgua (Tomado de PDVSA Léxico Estratigráfico (2010) en el sector de las Serranías de Aroa y Nirgua <http://www.pdv.com/lexico/image/n200-4.gif>)

Las rocas carbonáticas se presentan en forma de lentes o capas bastante continuas, bien expuestas en la carretera Nirgua-Chivacoa, estado Yaracuy. El mármol masivo y recristalizado es de color gris oscuro, con calcita (85%), muscovita (4), grafito (3) y cantidades menores de clinozoisita, zoisita, albita, piritita, prehnita, clorita y cuarzo. Algunos pequeños cuerpos de mármol dolomítico se presentan asociados a bandas de esquistos cuarzo-tremolítico, cuarzo-

muscovítico-clorítico-granatífero y anfibolita. Rodríguez y Bellizzia (1968, 1976) describen cinco (5) tipos diferentes de rocas anfibólicas.

Morgan (1966, 1968, 1969, 1970, 1971) presenta una descripción detallada de las rocas eclogíticas en la zona de Taborda-Puerto Cabello, estado Carabobo. Bellizzia y Rodríguez (1976) incluye en esta unidad a dos (2) horizontes de yeso que se encuentran en la serranía de Aroa, si bien se desconocen las relaciones con las rocas circundantes.

Aflora como una extensa franja teniendo una extensión geográfica desde la zona de Chivacoa en el estado Yaracuy, continuando hacia la zona de Morón – Puerto Cabello, estado Carabobo, prolongándose como una estrecha franja casi paralela a la costa, por el estado Aragua y culminando cerca del poblado de La Sabana en el Distrito Federal. Los contactos que presentan son al sur de Chichiriviche, Distrito Federal, que se interpreta un contacto de falla de corrimiento con el Augengneis de Peña de Mora.

Bellizzia y Rodríguez (1968) señala la presencia de fósiles (Tintínidos o Calpionelas) de probable edad Neocomiense en las metapelitas de esta Fase en el estado Yaracuy. Todos los autores que han estudiado La fase Nirgua la ubican como de probable edad Mesozoica y se correlaciona con las fases Antímamo y Tacagua del mismo Complejo La Costa. Se cree que esta unidad, al igual que las fases Antímamo y Tacagua representan un “melange” tectónico, formado en un prisma de acreción, mientras y por medio de estudios geoquímicos de las anfibolitas se demuestra que existe una afinidad magmática toleítica, sugiriendo un ambiente tectónico de dorsal centro oceánica o de cuenca marginal.

La Fase Nirgua posee una gran importancia económica, en él se describen algunos depósitos de yeso de importancia comercial en la serranía de Aroa. Adicionalmente en la zona de Cocuaima-Urachiche, estado Yaracuy, existe un depósito de sulfuros de Sb-Zn-Pb-Ag que fue parcialmente explotado hasta 1969, donde se reporta minerales como pirita, arsenopirita, esfalerita, calcopirita, boulangerita, pirargirita, galena y tetraedrita, pero se desconocen las reservas minerales. En el mapa geológico de Bellizzia y Rodríguez (1976) aparecen nueve (9) localidades con manifestaciones de sulfuros diversos. En los cortes de la Autopista Valencia –

Puerto Cabello, en el sector del peaje de Taborda, se han localizado lentes decimétricos contentivos de cristales de cianita.

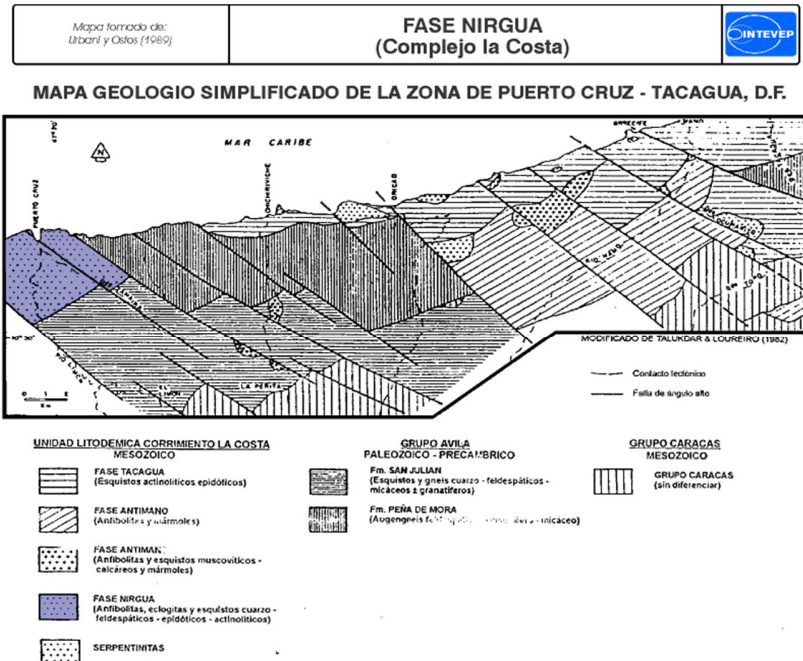


Figura 7. Fase Nirgua (Tomado de PDVSA Léxico Estratigráfico (2010) en el sector de Puerto Cruz-Tacagua (Tomado de <http://www.pdv.com/lexico/image/n200-1.gif>)

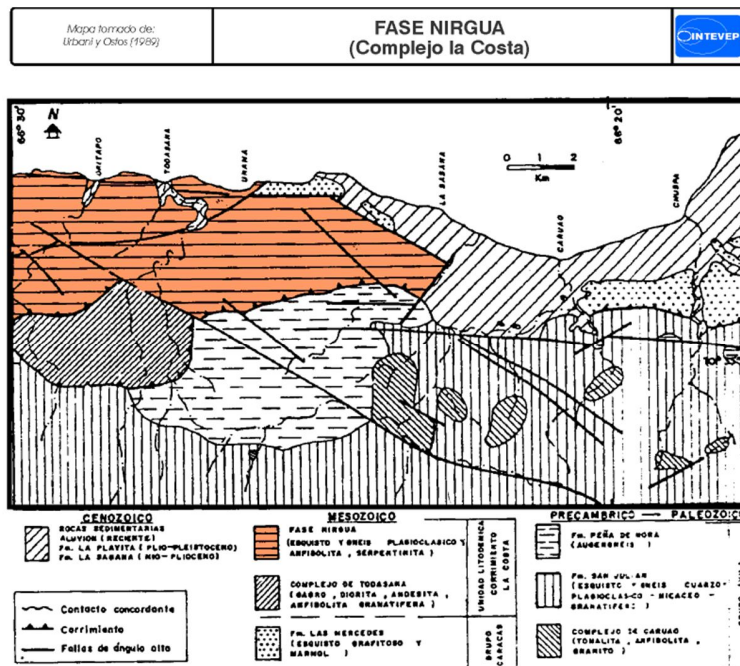


Figura 8. Fase Nirgua en el Complejo La Costa (Tomado de <http://www.pdv.com/lexico/image/n200-3.gif>)

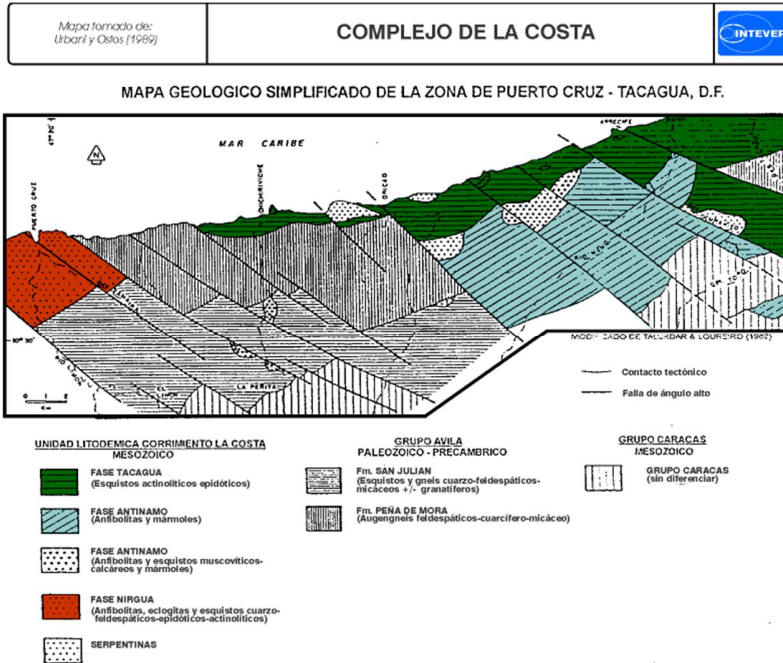


Figura 9. Geología simplificada del Complejo La Costa (Tomado de <http://www.pdv.com/lexico/image/c1402-2.gif>)

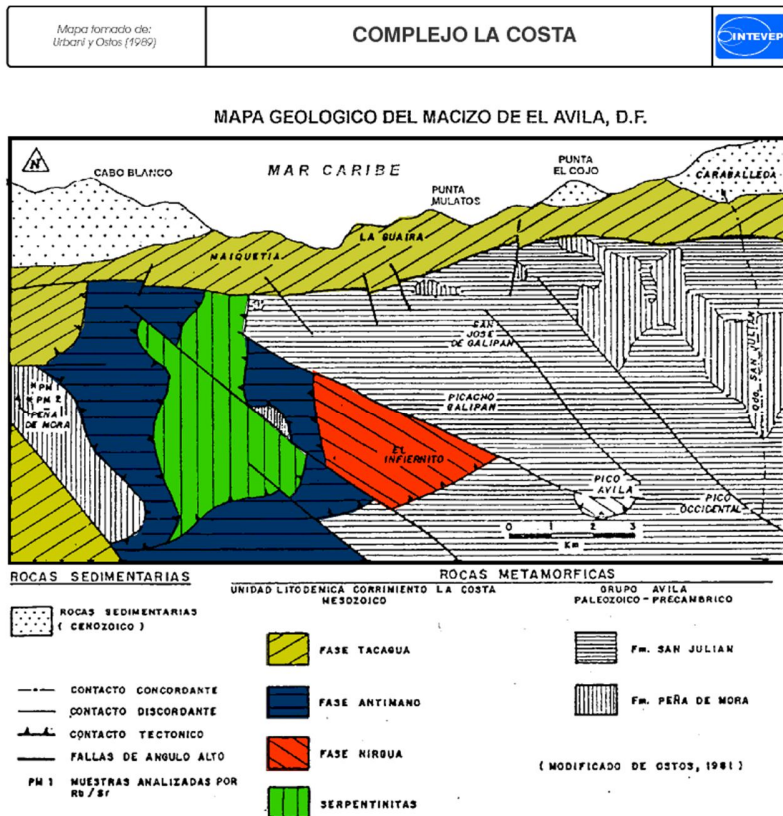
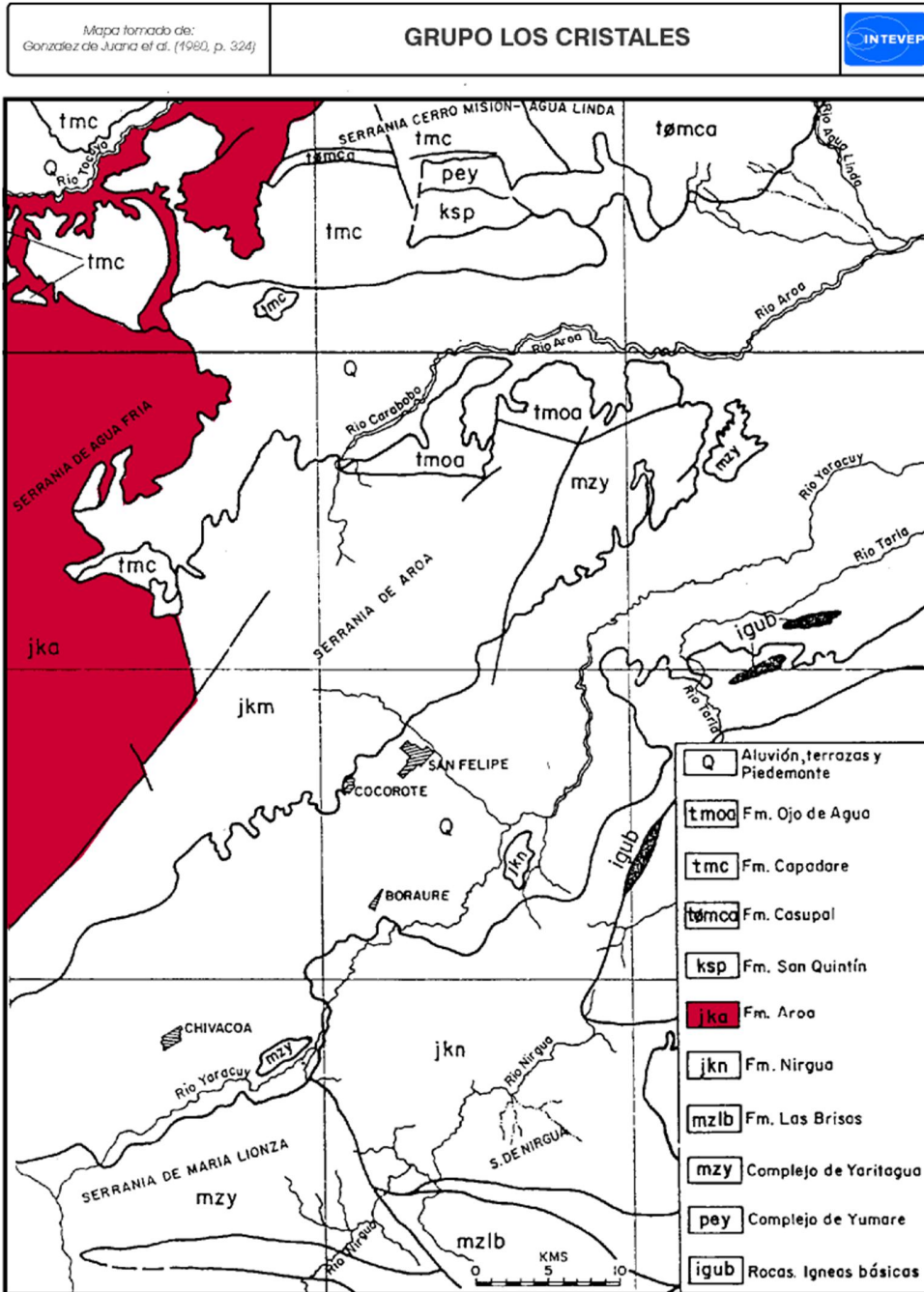


Figura 10. Geología del Macizo de El Avila (Tomado de <http://www.pdv.com/lexico/image/c1402-3.gif>)



Mapa de aloramientos de las unidades metamórficas en la región de Chivacoa-San Felipe. Simplificado de Bellizzia y Rodríguez (1976).

Figura 11. Extensión de la Formación Aroa (Tomado de <http://www.pdv.com/lexico/image/1990-1.gif>)

A continuación, en las tablas 4 a 13 se resumen los principales rasgos de las formaciones geológicas aflorantes en la zona de estudio:

Tabla 4. Resumen de la Formación Nirgua.

Edad	Mesozoico
Formación	Nirgua
Localidad tipo	Fue señalada como el río Nirgua sin mayores detalles de localización, igualmente señalan buenas secciones expuestas en los ríos y quebradas que disectan las serranías de Aroa, Santa María, Nirgua - Tucuragua, estado Yaracuy.
Descripción litológica	Esquisto cuarzo – micáceo, micáceo – grafitoso, mármol masivo, anfibolita eclogítica, anfibolita epidótica y granatífera, cuarcita, esquisto y gneis cuarzo - micáceo – feldespático. Las rocas carbonáticas se presentan en forma de lentes o capas bastante continuas. El mármol masivo y recristalizado es de color gris oscuro, con calcita (85%), muscovita (4), grafito (3) y cantidades menores de clinozoisita, zoisita, albita, pirita, prehnita, clorita y cuarzo. Algunos pequeños cuerpos de mármol dolomítico se presentan asociados a bandas de esquisto cuarzo – tremolítico, cuarzo – muscovítico – clorítico – granatífero y anfibolita. Las anfibolitas y los esquistos tienen porfidoblastos de granate de hasta 1 cm de diámetro.
Extensión geográfica	Aflora como una franja desde la zona de Chivacoa hasta Nirgua en el estado Yaracuy.
Contactos	Ostos (1990) interpreta un contacto de falla de corrimiento. Urbani <i>et al.</i> (1989-a, b) igualmente interpretan como tectónicos los contactos de esta unidad.
Fósiles	Bellizzia y Rodríguez (1968) señala la presencia de fósiles (Tintínidos o Calpionelas) de probable edad Neocomiense en las metapelitas de esta Fase en el estado Yaracuy.
Correlación	Se correlaciona con las fases Antímamo y Tacagua del mismo Complejo La Costa.
Paleoambiente	González de Juana <i>et al.</i> (1980, p. 328) postulan que esta unidad, al igual que las fases Antímamo y Tacagua representan un "melange" tectónico, idea que es aceptada y ampliada por Ostos (1990), quien igualmente sugiere que representa un melange tectónico formado en un prisma de acreción, mientras que por sus estudios geoquímicos de las anfibolitas demuestra una afinidad magmática toleítica, sugiriendo un ambiente tectónico de dorsal centro oceánica o de cuenca marginal.

Tabla 5. Resumen de la Formación Nirgua, Fase (Complejo la Costa).

Edad	Mesozoico
Formación	Nirgua, Fase (Complejo la Costa)
Localidad tipo	Fue señalada como el río Nirgua sin mayores detalles de localización, igualmente señalan buenas secciones expuestas en los ríos y quebradas que disectan las serranías de Aroa, Santa María, Nirgua – Tucuragua, estado Yaracuy.
Descripción litológica	Esquisto cuarzo – micáceo, micáceo – grafitoso, mármol masivo, anfibolita eclogítica, anfibolita epidótica y granatífera, cuarcita, esquisto y gneis cuarzo - micáceo - feldespático. Las rocas carbonáticas se presentan en forma de lentes o capas continuas. El mármol masivo y recristalizado es de color gris oscuro, con calcita (85%), muscovita (4), grafito (3) y cantidades menores de clinozoisita, zoisita, albita, pirita, prehnita, clorita y cuarzo. Algunos pequeños cuerpos de mármol dolomítico se presentan asociados a

	bandas de esquistos cuarzo – tremolítico, cuarzo – muscovítico – clorítico – granatífero y anfibolita.
Extensión geográfica	Aparece como una franja casi continua desde la zona de Nirgua, estado Yaracuy, hasta Cabo Codera, estado Miranda.
Contactos	En todos los casos se han interpretado como contactos tectónicos, donde en algunos sectores se desconoce su tipo, mientras que en otras zonas son fallas de corrimiento.
Fósiles	Presencia de fósiles (Tintínidos o Calpionelas) de probable edad Neocomiense en las metapelitas de esta Fase en el estado Yaracuy.
Correlación	Se correlaciona con las fases Antímamo y Tacagua del mismo Complejo La Costa.
Paleoambiente	Las rocas que lo constituyen representan multitud de ambientes geológicos de formación, mezclados tectónicamente como consecuencia de la colisión entre las placas del Caribe y Sur América.

Tabla 6. Resumen de la Formación Complejo Yaritagua.

Edad	Pre – Mesozoico
Formación	Complejo Yaritagua
Localidad tipo	La localidad tipo se ubica en la colina al sur de Yaritagua, estado Lara, denominada como cerro Yaritagua.
Descripción litológica	Gneis, gneis porfiroblástico, augengneis, cuarcita esquistosa y esquistos no calcáreo.
Espesor	Señalan un espesor (aparente) mínimo de 1.500 m.
Extensión geográfica	Esta unidad aflora en las montañas del sur de Yaritagua, e igualmente en la Serranía de María Lionza al sureste de Chivacoa, estado Yaracuy.
Contactos	Todos los contactos de este Complejo con las unidades adyacentes (sus formaciones Las Brisas y Nirgua), son de fallas de ángulo alto.
Correlación	Podrían ser correlacionables con el Augengneis de Peña de Mora, mientras que los esquistos circundantes que completan la descripción del Complejo de Yaritagua, lo serían con el Esquisto de San Julián del Complejo Avila.

Tabla 7. Resumen de la Formación Aroa.

Edad	Mesozoico
Formación	Aroa
Localidad tipo	La formación toma su nombre del distrito minero de Aroa situado en la falda norte de la serranía del mismo nombre, en el estado Yaracuy. Hay buenas secciones de referencia en las quebradas Las Minas, Cumeragua y Carampampa y el río Tupe del distrito minero, en los ríos Nirgua, Tirgua y Tucuragua y en la serranía de Nirgua – Tucuragua
Descripción litológica	Consiste de una secuencia de esquistos calcáreos grafitosos, filitas grafitosas, esquistos cuarzo – micáceo – grafitosos, calizas laminadas, calizas macizas y varios horizontes de esquistos verdes. Estos últimos exhiben una mineralogía de zoisita, clinozoisita, epidoto, feldespato, actinolita, clorita, calcita y cuarzo. Las rocas verdes posiblemente representan rocas básicas metamorfizadas, especialmente tobas y lavas. Los esquistos calcáreos –

	grafitosos, micáceo – grafitosos y filitas grafitosas consisten en calcita, grafito, sericita, cuarzo, feldespato, zoisita, pirita y clorita.
Extensión geográfica	Serranías de Aroa y de Nirgua – Tucuragua, estados Lara, Yaracuy y Cojedes.
Contactos	La unidad es concordante y transicional sobre la Formación Nirgua y por debajo de la Formación Mamey.
Correlación	La Formación Aroa presenta gran semejanza litológica con la Formación Las Mercedes del Grupo Caracas.
Paleoambiente	El origen de los yacimientos de sulfuros es hidrotermal; las rocas verdes indican actividad ígnea submarina y subcortical cuyo papel fue importante en la paragénesis de los yacimientos. La mena se formó como precipitado químico junto con sedimentos argiláceos y calcáreos de la unidad; la gran proporción de grafito y pirita indica ambiente sedimentario marino reductor, con condiciones óptimas para la precipitación de sulfuros. Posteriormente los sedimentos de esta cuenca fueron metamorfizados, desarrollándose una secuencia de esquistos calcáreo – grafitosos, filitas grafitosas y calizas cristalinas, y las menas se transformaron en lentes macizos de pirita cuprífera interstratificados en la secuencia de esquistos.

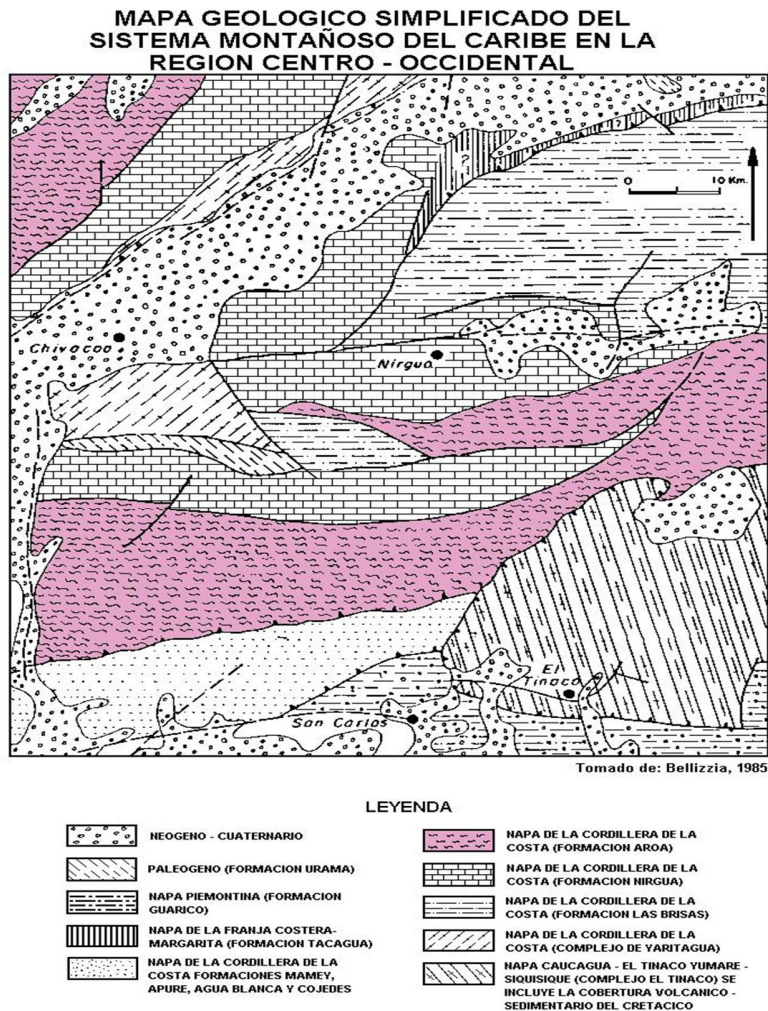


Figura 12. Extensión de la napa de la Cordillera de la Costa, Formación Aroa (Tomado de: <http://www.pdv.com/lexico/image/aroa.jpg>)

Tabla 8. Resumen de la Formación Mamey.

Edad	Cretácico Temprano
Formación	Mamey
Localidad tipo	Hay secciones representativas en el curso inferior del río Bobare y en las quebradas Las Palmas, Palmarito, La Peña, Cogollal y Pisaje en la serranía del Bobare.
Descripción litológica	Esquisto cuarzo – sericítico, en capas generalmente lenticulares, metaconglomerado, intercalados con los primeros, algunos son polimixtos intraformacionales, con fragmentos que alcanzan dimensiones de guijarros, peñas y peñones de mármol, filita y menos frecuentemente de arenisca; metaconglomerado calcáreo arcósico y mármol arenáceo conglomerático arcósico; metaarenisca generalmente calcárea y feldespática y filita negra grafitosa, localmente calcárea.
Fósiles	En algunas localidades se observan fragmentos de amonites; algunas calizas contienen pelecípodos, espinas de equinoideos y corales.
Correlación	Por su litología, posición estratigráfica y fauna, la unidad se ha correlacionado con la Formación Chuspita en el estado Miranda, y Formación Güinimita de la península de Paria.

Tabla 9. Resumen del Grupo Los Cristales.

Edad	Mesozoico
Formación	Grupo Los Cristales
Localidad tipo	Región de Agua Blanca – San Carlos, estado Cojedes. El intervalo de la Formación Los Cristales en la Serranía de Nirgua – Tucuragua en formaciones Nirgua, Aroa y Mamey.
Descripción litológica	Está compuesta esencialmente de esquisto y filita grafitosa y mármol, con varios horizontes de esquisto verde que contienen los yacimientos de pirita cuprífera de la zona de Aroa. Esta unidad aparentemente infrayace a la Formación Mamey, caracterizada por esquisto y filita negra, metaconglomerado, metaarenisca, y mármol masivo, con frecuentes macro y microbrechas locales.
Extensión geográfica	Se extiende por los estados Lara, Yaracuy y parte de Cojedes noroccidental.
Contactos	Se han descrito como concordantes y transicionales entre la fase Nirgua y la Formación Aroa, e igualmente entre las formaciones Aroa y Mamey.
Correlación	Las formaciones Aroa y Mamey, respectivamente, se han correlacionado con las formaciones Las Mercedes y Chuspita del Grupo Caracas.

La Figura 13 muestra algunas fotos de afloramientos de calizas, tomadas a 200 m del lado sur de la autopista José Antonio Páez. También se muestra en esta figura una serie de capas deformadas que indican la presencia de la Falla de Boconó, en esta zona se tomaron muestras para estudios petrográficos.



(a)



(b)

Figura 13. (a) Vista del afloramiento de Calizas, Sector Los Cogollos, Nirgua. (Imágenes tomadas de Soubllette, 2013). (b) Mapa de afloramiento de la Falla de Boconó (Tomado de http://es.getamap.net/busca_mapas_1_9+41+13+n+68+58+43+w.html) y capas de rocas deformadas por la Falla de Boconó señalando la orientación de los pliegues parásitos, budines y orientación de los esfuerzos respectivamente, en la autopista José Antonio Páez.

2.4 Aspectos fisiográficos del área de Nirgua

2.4.1 Relieve

Nirgua está situada a más de 1000 metros de altura sobre el nivel del mar en una zona montañosa de grandes atractivos naturales. A 5 kilómetros están las Ruinas de San Vicente una fortaleza donde llevaban el oro extraído de las Minas de Buría. La mayor parte de esta zona se encuentra formada por elevaciones que dan lugar a pequeños y fértiles valles. Esas elevaciones son: las de la Enjalma, las Lapas, Sta. María, Cerro o Campo Amor, Sabana, el Pan de Azúcar, las Palmeras, Quintana, el Coco, Guayabito, Cumbre Larga, el Aguacate, el Zapatero y el Pico de la Copa, la región Nirgüeña se encuentra ubicada dentro del complejo orográfico perteneciente a la costa. Comprende la parte del tramo central de la Cordillera de la Costa. La Figura 14 muestra el relieve de este estado, así como la sismicidad circundante en la región.

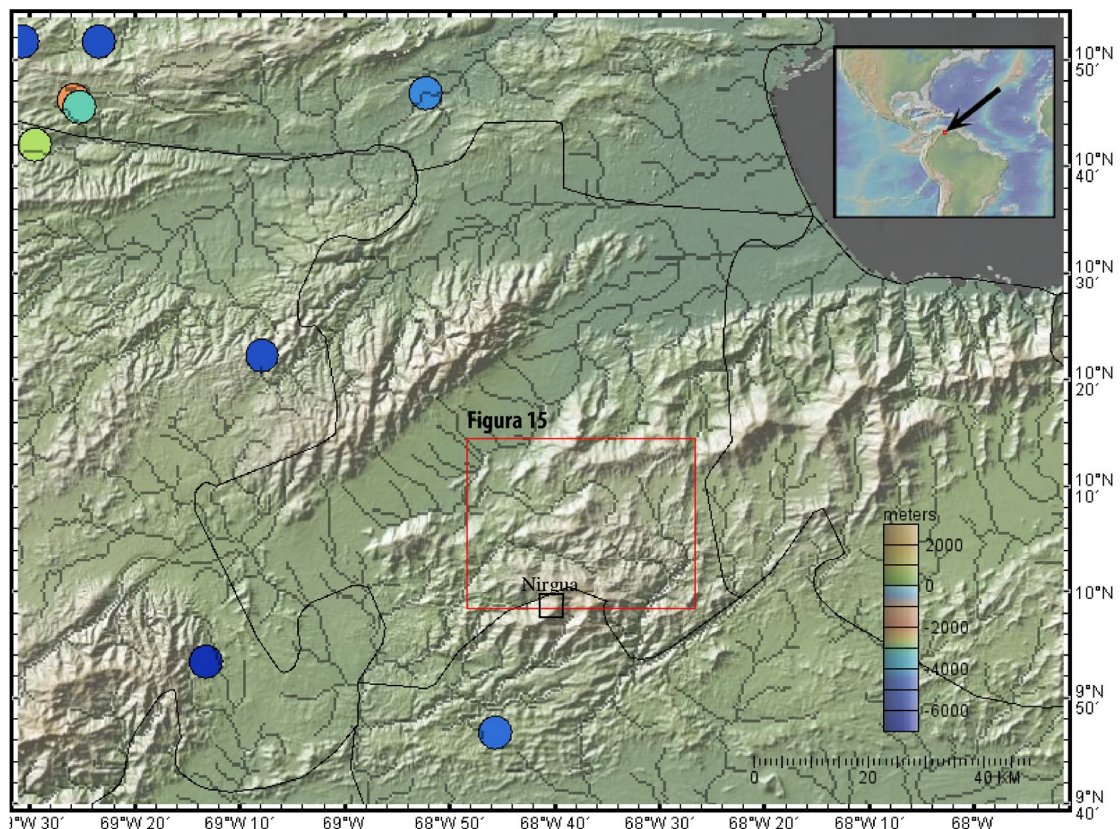


Figura 14. Mapa de relieve del Estado Yaracuy, sismicidad circundante (derivada de FUNVISIS) y red de drenaje (Mapa elaborado para este TEG)



(a)

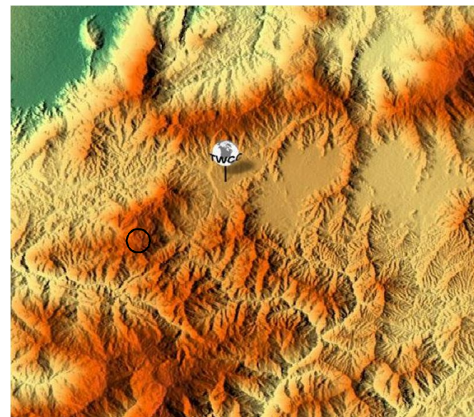


(b)



Cerro El Picacho

(c)



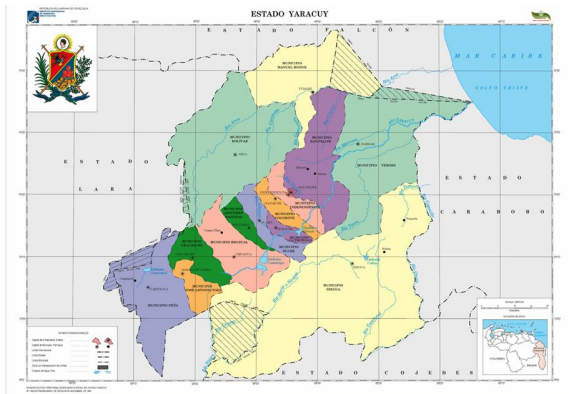
(d)

Figura 15. Principales rasgos topográficos cercanos a la población de Nirgua. (a) Vista del cerro El Picacho. (b) Topografía circundante y vista desde la carretera. (c) Mapa topográfico de la zona. (d) Relieve ESRI-TOPO.

2.4.2 Hidrografía

El principal curso de agua que drena al área es el río Nirgua o Buría, que nace al oeste de la ciudad de Nirgua (Figura 16) y discurre a favor de la pendiente en sentido sur - norte, hasta unirse al río Cojedes. Tiene aproximadamente 40 km de longitud, y se puede localizar en el territorio mediante las coordenadas $9^{\circ}50'46''$ N y $68^{\circ}58'25''$ E. Su caudal es permanente aunque tiene un volumen de agua. El drenaje está totalmente adaptado. En los períodos lluviosos el río no se desborda, debido a que corta los sedimentos donde está emplazado la ciudad y forma un fuerte talud que impide los problemas de inundación. En sus comienzos es un río de altura o de

Los ríos Buría o Nirgua, el Yaracuy y el Farriar se forman en las zonas montañosas de Nirgua y están comprendidas dentro de las cuencas del río Orinoco. Nirgua tiene como afluentes unos cuantos ríos pequeños como el Oruje, Río Grande, y Cajones estos provenientes del Estado Carabobo, los ríos Nirgua y Oruje y la quebrada El Verano y Orujito ofrecen en varios puntos a sus márgenes, considerables depósitos de arcilla fina de arena, en los sitios denominados El Cantil, La Cañada, Cabo Blanco, Buría, Orujito y El Pantano.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 17. (a) Ubicación del área de estudio, zona de Yaracuy. (Tomado de <http://www.yaracuy.net/wp-content/uploads/2011/05/mapa-yaracuy.jpg>). (b y c) Mapa satelital y relieve de afloramiento del Río Buria (Tomado de [http://es.getamap.net/mapas/venezuela/venezuela_\(general\)/_buria_rio/](http://es.getamap.net/mapas/venezuela/venezuela_(general)/_buria_rio/)). (d, e, f) Afloramiento. (g y h) Recolección de muestras de sedimentos recientes.

El río Tucuragua es una corriente entre el Estado Cojedes y Yaracuy. Se encuentra a una altitud de 275 metros sobre el nivel del mar. Sus coordenadas son $10^{\circ}2'257.5''$ N y $68^{\circ}38'22.1''$ W cerca de la carretera Panamericana Nirgua-Chivacoa. A 500 metros sobre el nivel del mar, a través del serpenteo de las faldas de las montañas, las extraordinarias Filas de Nirgua plenas de pinos, el pueblo de Nirgua y a sólo ocho kilómetros de esta localidad se pudo apreciar el río Tucuragua (Figura 18). Forma parte del Sistema Montañoso de la Cordillera de la Costa en su tramo Occidental, abarcando parte del Macizo de Nirgua. Es una unidad hidrológica de segundo

orden división administrativa del Municipio Nirgua, con característica fisiográfica de piedemonte y relieve accidentado.

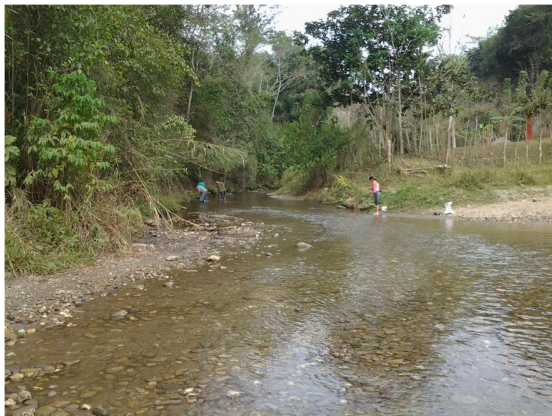
Las características climáticas y altitudinales dan origen al bosque seco tropical, bosque húmedo premontano, bosque premontano siempre verde. Predomina el bosque bajo; lo ha sustituido los herbazales y la vegetación secundaria, hacía las fuentes de aguas existen bosques de galería. Entre las localidades cercanas están La Candelaria , Bucaral , Santo Domingo , El Rodeo , Santa Lucia , San Jerónimo , Mejico , El Guarataro. Las montañas Fila El Cedro , Fila Botalón , Fila Palmichal



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 18. (a) Mapa de relieve (Tomado de http://es.getamap.net/busca_mapas_1_n+10+2+57+w+68+38+22.html)
(b) Afloramiento del río Tucuragua. (c, d, e, f) Toma de muestras de sedimentos recientes.

En la zona “LP₁” de coordenada N 9° 43’ 50.7” W 69° 00’ 3” existen dos familias de diaclasas, siendo la primera R: N 70 W; B: 40 N y la segunda R: S 81 W; B: 74 S. con una altitud de 198 metros sobre el nivel del mar. (Figura 19a, b y c). Dos tributarios del río Cojedes confluyen en 9°43'43"N y 69°2'17"W. Se encuentran a una altitud de 258 y 274 metros sobre el nivel del mar. (Figura 19g), zona de “LP₅” está en N 9° 44’ 4.1” W 69° 00’ 51.3” y posee una altura de 219 metros sobre el nivel del mar. (Figura 19h, i).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 19. (a, b y c) Familia de diaclasas (LP1). (d) Mapa de relieve y afloramiento de un tributario del río Cojedes (Tomado de http://es.getamap.net/busca_mapas_1_n+9+43+51+w+69+0+3.html). (e, f, g) Afloramiento y recolección de muestras en el tributario de Cojedes, Agua Blanca. (h,i) Recolección de muestras de LP₅.

El río La Peña nace en las montañas al sur del poblado de Nirgua, corre en sentido nortesur, se encuentra a una altitud de 914 metros sobre el nivel del mar. Sus coordenadas en la toma de muestra es $10^{\circ}7'0''$ N y $68^{\circ}34'0''$ E (Figuras 20), con una altitud de 867 metros sobre el nivel del mar. Se aprecian areniscas con intercalaciones de lutitas de 15 cm a 10 cm de espesor respectivamente en cada capa.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

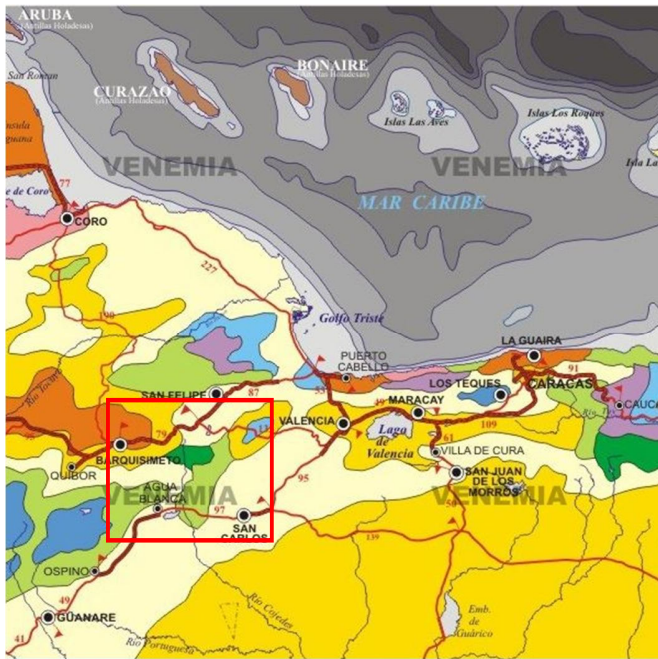


(f)

Figura 20. Mapa de relieve (a) y satelital (b) del río La Peña. (Tomado http://es.getamap.net/busca_mapas_1_n+10+7+28+w+68+33+33.html). (c, d, e y f) Afloramiento y recolección de muestras in situ y sedimentos modernos del río.

2.4.3 Clima

Según la clasificación climática de Köppen (Figura 21), el área de estudio posee un clima húmedo debido a la presencia de lluvias que oscilan entre 1.000 y 1.400 mm anuales (ver Figura 22) cuyo régimen permite acentuar el desarrollo agrológico en la región; la temporada de lluvia comienza en el mes de marzo y finaliza en Noviembre con un promedio mensual comprendido entre las 100 y 150 mm. Sobre el área en general actúan los vientos alisios del noreste, que penetran por la depresión con una velocidad media anual de 2,3 m/seg.; por su clasificación es de sabana (aw) y de estepa (Bs) con una temperatura media anual de 26,1 °C y precipitación media de 1.900 mm anuales.



CLASIFICACION DE LOS CLIMAS DE VENEZUELA SEGUN KÖPPEN

Tipo A. Lluviosos Cálidos

- Amf De selva tipo amazónico. Lluvioso todo el año.
- Amh De bosque muy húmedo perennifolio transicional. Típico de influencia marítima. 10 a 9 meses lluviosos, los cuales son uniformemente repartidos a lo largo del año.
- Ami De bosque super húmedo perennifolio transicional. Típico monzónico de carácter continental. 10 a 11 meses lluviosos, los cuales son uniformemente repartidos a lo largo del año.
- Aw'i De bosque húmedo tropófito y sabanas (herbazales). Con dos máximas de precipitación

* Los máximos de precipitación corresponden a los equinoccios, (marzo y septiembre) se presentan astronómicamente en estas épocas. Pero en las regiones de influencia continental estos máximos se manifiestan uno o dos meses después., es decir, abril mayo y octubre noviembre- Fenómeno que se debe a que el máximo calentamiento terrestre en los trópicos se alcanza uno o dos meses después del periodo solar equinoccial.

- Aw'i De sabanas (herbazales) y bosque tropófito sub-húmedos. Con un solo máximo de precipitación al año. La estación lluviosa se prolonga hasta fines de noviembre. 8 a 7 meses lluviosos.
- Awii De sabanas (herbazales) y bosque tropófito, semi-secos. Con un solo máximo de precipitación al año. 7 a 6 meses lluviosos.
- Aw'(s)j De sabanas (herbazales) y bosque tropófito húmedos. Con dos máximas de precipitación al año en las posiciones solsticiales del Sol (junio y diciembre) como consecuencia de la inversión de vientos dominantes. Representativo en las regiones de influencia marítima o en aquellas donde predominan vientos del hemisferio sur. (Las áreas rayadas son similares pero de un piso superior).

Tipo B. Secos Cálidos

- Bshh Semi-árido con vegetación xerófila o montes espinosos. La evaporación es mayor que la precipitación.
- Bwh De desiertos áridos. Ausencia de vegetación. La evaporación es mayor que la precipitación.

Figura 21. Clasificación climática del área de estudio según Köppen (Tomado y modificado de www.venemia.com)

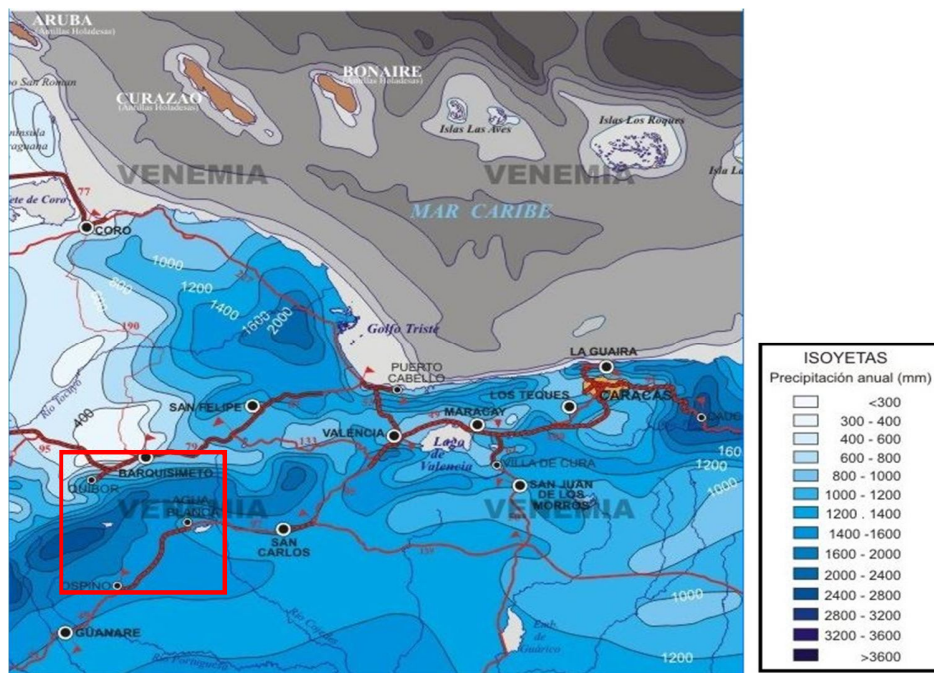


Figura 22. Tasa de precipitación anual promedio para el área de estudio (Tomado y modificado de www.venemia.com)

En síntesis se puede afirmar que desde el punto de vista geográfico es una región privilegiada por poseer suelos fértiles. Al norte se localiza suelos con predominio limoso. En otros sectores presentan un carácter franco - arcilloso - limoso. Sus suelos ricos en nutrientes han sido usados para la siembra de cítricos que se producen en gran abundancia, debido a esta mixta feracidad los árboles frutales tienen buen desarrollo. Los suelos de los Valles de Nirgua poseen un 65% de capa humifera lo que los hace aptos para la agricultura (de acuerdo con la clasificación de Thornwaite, Figura 23), el otro 25% de su composición está repartido entre una combinación de suelo montañoso y de riqueza mineral. En Nirgua, no existe suelo infértil, es decir, el suelo arenoso no conforma su geografía, en ciertas partes del suelo arcilloso predomina especialmente en la zona poblada. Todo esto significa que Nirgua posee una determinación de suelo eminentemente apto para la agricultura.

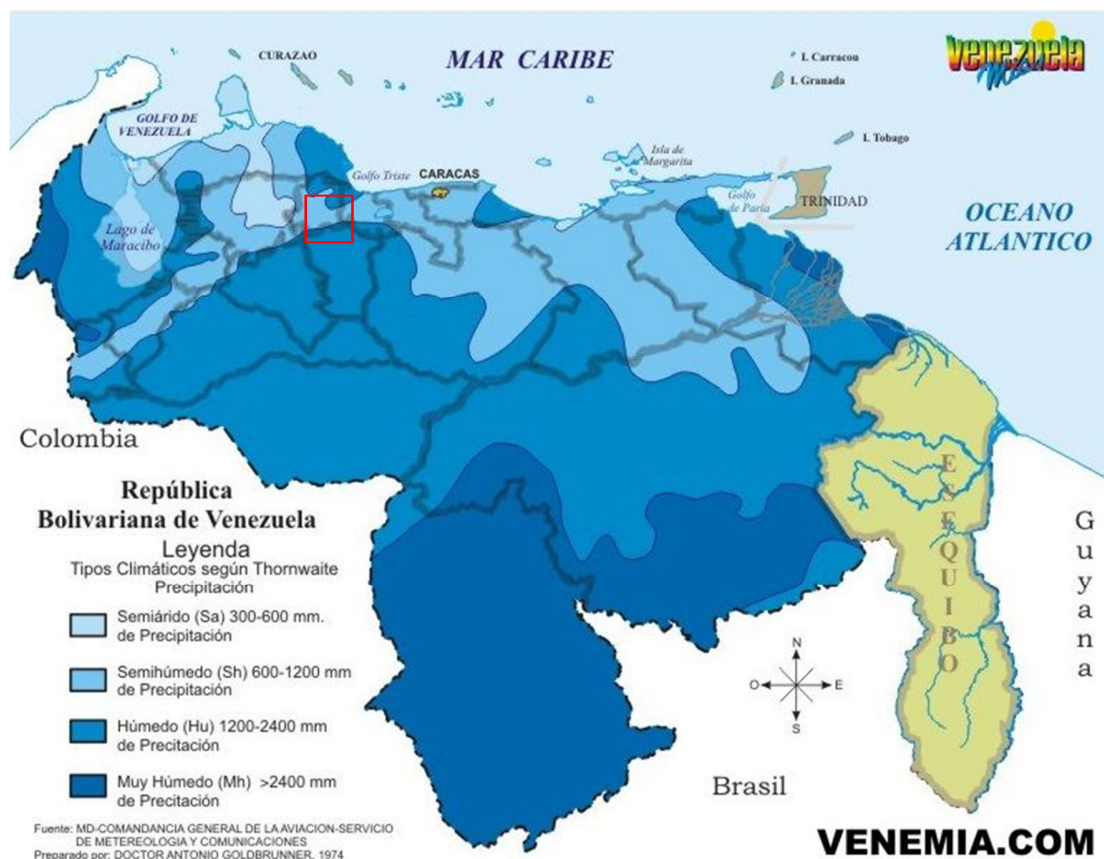


Figura 23. Tipos climáticos de Venezuela según Thornwaite, el área de estudio está delineada en rojo (Tomado y modificado de www.venemia.com)

2.4.4 Vegetación

Actualmente parte del área presenta una vegetación arbórea alta hacia el sureste y oeste de la ciudad derivada de las características de clima y suelo, particularmente hacia el sur, la vegetación se ha incrementado con la siembra de pinos por parte de la Compañía Nacional de Reforestación (Conare). El potencial forestal de Nirgua, está ubicado en la Sierra de Aroa y en el Macizo de Nirgua, aunque la superficie bajo bosque ha venido disminuyendo en los últimos años debido a la invasión de las fronteras agrícolas, alcanzando en la actualidad el 2% del territorio estatal; el distrito Nirgua ofrece una gran variedad en las producciones del reino vegetal riquísimo en su flora: Plantas útiles para el hombre en su alimento, industrias, enfermedades y comodidades.

2.5 BREVE SINTESIS GEOLÓGICA DE LAS OTRAS CUENCAS

2.5.1 Cuenca del río Cojedes y sistema tributario Quebrada Agua Blanca

El río Cojedes, es un afluente del río Orinoco en Venezuela que nace en el estado Lara de la unión de los ríos Turbio y Buría o Nirgua. Sin embargo Vila (1976) señala que la parte superior del río Cojedes es el río Turbio, que al unirse con el río Claro, en las cercanías de Barquisimeto toma el nombre de río Barquisimeto y a partir de la afluencia, por el este del río Tucuragua cambia el nombre por el de río Cojedes. Los flujos de sureste van a través de una brecha entre la Cordillera de Mérida y la cordillera de la Costa y en todo el pastizal de los llanos de la cuenca del Orinoco, para desembocar en el río Portuguesa, que fluye hacia el sureste para unirse a la del Apure. El río drena parte de los estados Lara, Yaracuy, Portuguesa, Cojedes, Barinas y Guárico. Este río mantiene la gran mayoría de población de Caimanes del Orinoco (*Crocodylus intermedius*) en Venezuela, y por consiguiente de todo el mundo. En el futuro cercano, las secciones de este río serán declaradas como reserva de vida silvestre para proteger los sitios de anidación de esta especie clasificada en peligro crítico. En la parte alta de la cuenca del río existe una importante combinación de su material litológico (exquistos-cuarzo-micáceos y calcáreo) y de su estructura geológica (anticlinales, sinclinales, fallas y fracturas).

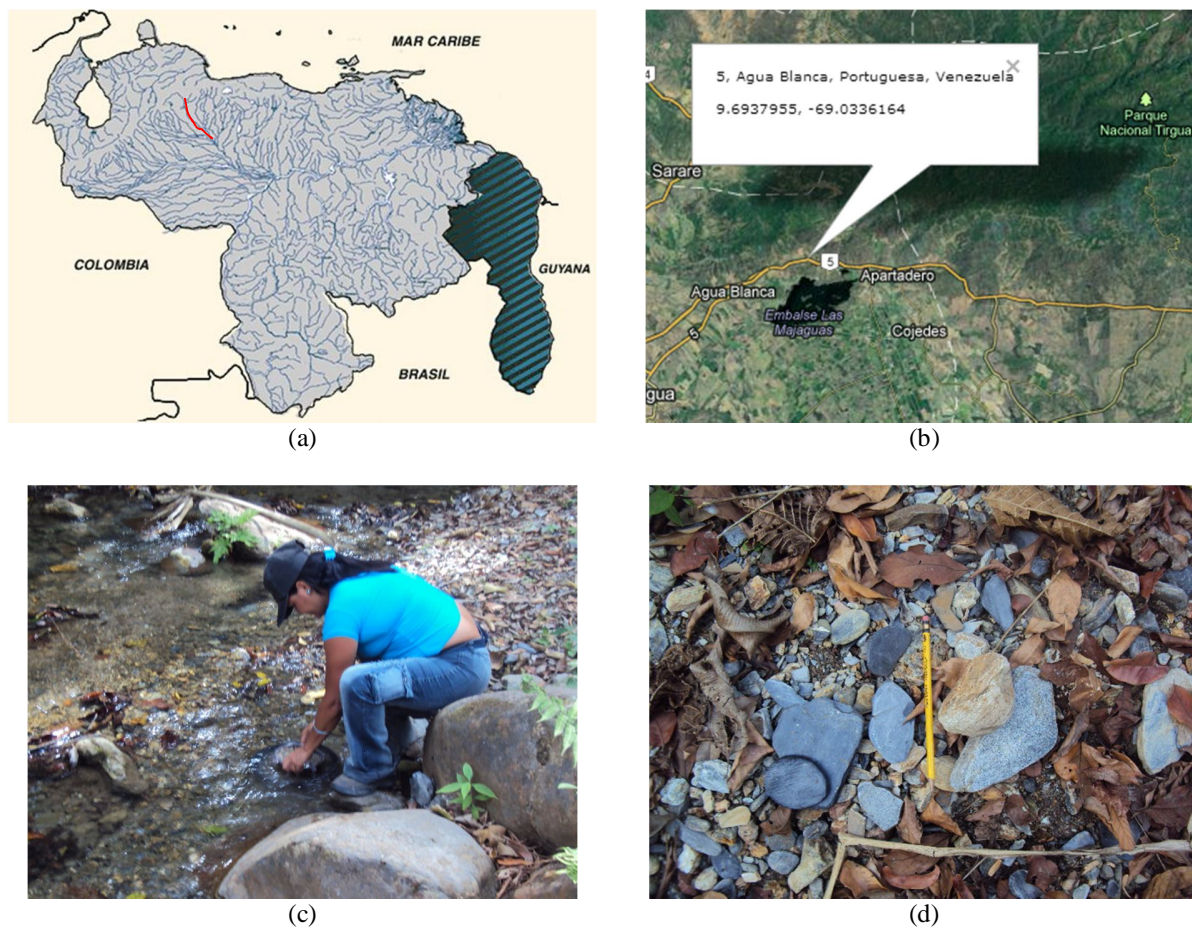


Figura 24. Ubicación de ríos y quebradas visitadas durante labores de campo: (a) Tributario del río Cojedes, (b) Quebrada Agua Blanca. (Tomado de http://es.getamap.net/busca_mapas_1_09+43+43+n+69+02+16+w.html). (c) Recolección de muestras de sedimentos recientes. (d) Muestras de los clastos.

La Quebrada Agua Blanca es un tributario del río Cojedes, constituye una corriente que desciende del estado Yaracuy hasta el estado Cojedes y se encuentra a una altitud de 27 metros sobre el nivel del mar. Sus coordenadas son $8^{\circ}46'14''$ N y $68^{\circ}12'2''$ E. Los clastos que se hayan en esa zona van de subangulos a subredondeados y redondeados, y sus tamaños son muy variados, de menos de 1 cm a más de 20 cm. La principal formación geológica interceptada por esta quebrada es la Formación del mismo nombre, cuyas características son resumidas en la Tabla 10.

Tabla 10. Resumen de la Formación Agua Blanca.

Edad	Cretácico Aptiense
Formación	Agua Blanca
Localidad tipo	Ladera septentrional del cerro Guacamaya, 2,5 km al norte del pueblo de Agua Blanca, distrito Araure, estado Portuguesa.
Descripción litológica	Las rocas predominantes son calizas laminadas, de color gris oscuro que meteoriza a gris claro, arcillosas y arenosas, las cuales se presentan en capas de gran espesor. Junto con las calizas, se encuentran filitas retorcidas, de color gris oscuro, que meteorizan en tonos gris, rosado, pardo rojizo y gris amarillento, areniscas calcáreas y feldespáticas, gris claro, y asperones con granos de cuarzo oscuro y conglomerados, especialmente hacia la base de la sección.
Extensión geográfica	La unidad aflora a lo largo del flanco sur de la Serranía del Interior, entre Agua Blanca y San Rafael de Onoto, Portuguesa.
Contactos	La Formación Agua Blanca yace discordantemente sobre la Formación Araure. En el tope, la unidad pasa concordantemente a la Formación Cojedes, situándose el contacto en la base de los primeros conglomerados de dicha formación.
Fósiles	La Formación Agua Blanca contiene restos de pelecípodos, ostras, espinas de equinoides y corales, pero su recristalización y fragmentación han impedido su identificación.
Correlación	Posible correlación con el Conglomerado de Charallave. También equivalente a la Formación Los Cristales, con Formación Río Abajo, actualmente miembro informal de la Formación Nirgua.
Paleoambiente	Representa probablemente un ambiente de plataforma de aguas poco profundas, con ocasionales influencias de sedimentos más terrestres.

2.5.2 Cuenca del río Boconó

El río Boconó, cuya naciente se localiza en el pueblo del mismo nombre (Figura 25), desemboca en el río Guanare y es el principal afluente de la vertiente que desemboca en el río Apure que a su vez lo hace en el Orinoco, nace en la vertiente SO del páramo de Cendé al sur del Estado Trujillo, a una altura cercana a los 3.000 m. con 182 km, recibe desde el Norte su afluente más importante el río Burate, el cual tiene una longitud de 56 km y desemboca en el río Boconó, a 4 km al SO de la localidad Boconó, Municipio Boconó. Las coordenadas del río Boconó son 8°34'0" N 72°4'60" E en formato DMS (grados, minutos, segundos) o 8.56667 y -72.0833 (en grados decimales) y se encuentra entre el límite de los estados Portuguesa – Barinas. Está

interrumpido por una falla sin nombre de dirección norte – sur. Se encuentra a una altitud de 79 metros sobre el nivel del mar.

En la parte alta de la cuenca del río Boconó (Figura 25), este es controlado por la falla del mismo nombre, la cual constituye uno de los rasgos geotectónicos más importantes de la parte noroccidental de América del Sur, se caracteriza morfológicamente por una alineación de valles y depresiones lineales (cuencas de tracción), orientados aproximadamente en dirección N45°E. Se extiende por más de 500 km entre la depresión del Táchira (al sur de Cordero) y el Mar Caribe (área de Morón, Edo.Carabobo), cruzando en forma oblicua a los Andes merideños y cortando el extremo occidental de las Montañas del Caribe (Cordillera de la Costa y Serranía del Interior). A lo largo de toda su extensión, se observan una o varias trazas activas, la cual se caracteriza por escarpes de falla, canales fluviales desplazados, lagunas de falla, lomos de falla y otros rasgos geomorfológicos típicos de fallas rumbo – deslizantes.

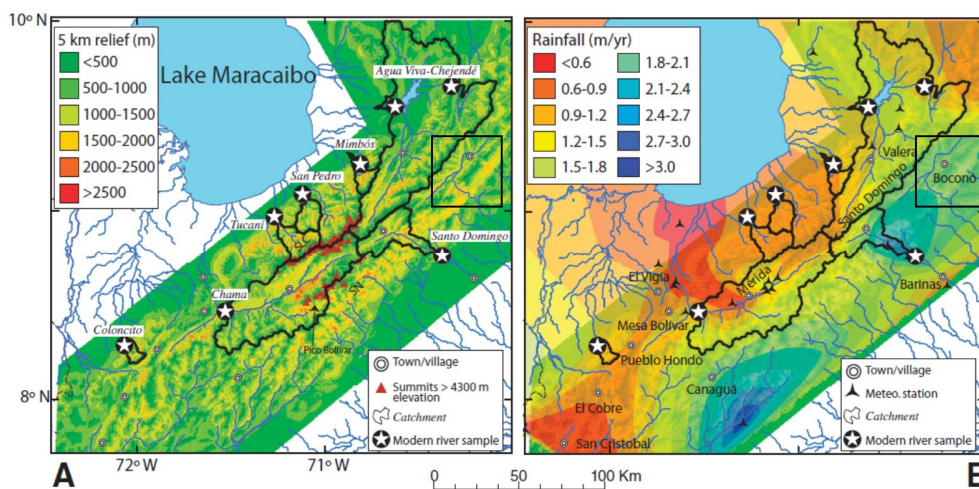
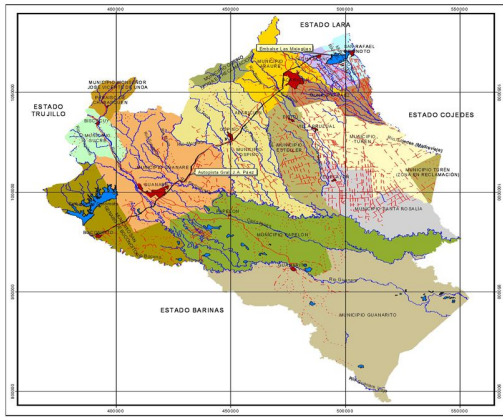


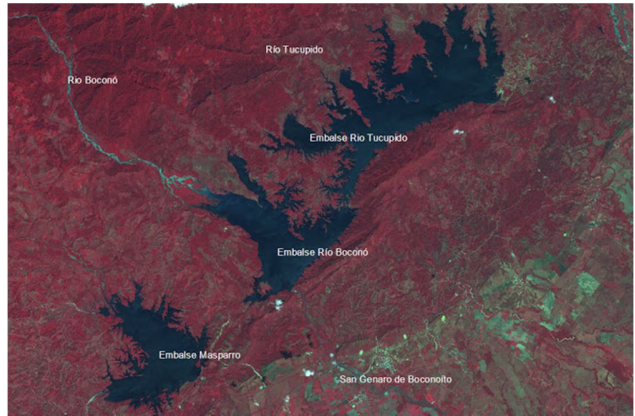
Figura 25. (A) Mapa de relieve y (B) Mapa de precipitaciones a lo largo de Los Andes de Venezuela (Tomado de Bermúdez et al., 2012)

La cuenca del río Boconó posee una tasa de precipitaciones entre 1.8-2.1 m/año (Bermúdez et al., 2012), este río corta importantes depósitos molásicos como la Formación Pagüey, también corta las formaciones Gobernador y Masparro (Tabla 11). El tipo de litología, la alta tasa de precipitaciones y la presencia de estructuras (fallas tipo corrimiento) incrementen la

tasa de sedimentación y erosión en esa área (Bermúdez et al., 2012). La Figura 26c muestra que esas tasas de sedimentación y erosión originan desniveles de más de 1000 metros.



(a)



(b)



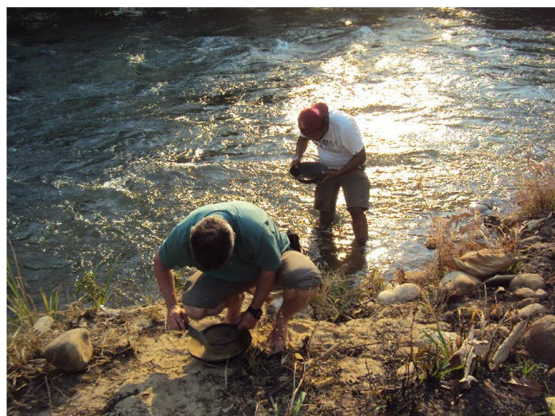
(c)



(d)



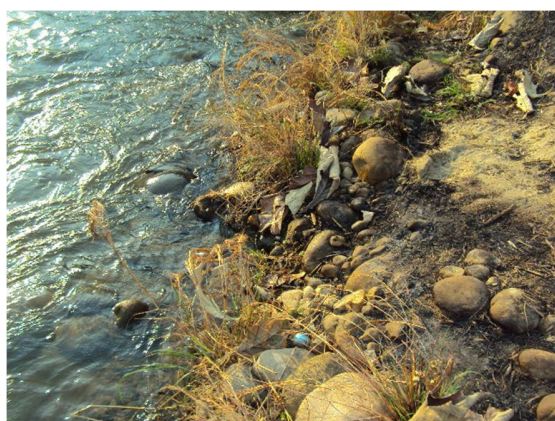
(e)



(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 26. (a) Ubicación de la zona de estudio, Río Boconó, Portuguesa (Tomado de <http://boletinambiental.files.wordpress.com/2008/08/portuguesa1.jpg>). (b) Sistema de Embalses Boconó Tucupido. (Tomado de <http://2.bp.blogspot.com/-FoXYRY5-zy0/TjYiZ8cKQI/AAAAAAAAAQ4/XvcIWb2IS1c/s1600/sistema.jpg>). (c) Sedimentación en el Río Boconó (Tomado de <http://photos1.blogger.com/blogger/2860/2039/1600/riobocono.jpg>). (d) Ubicación del río Boconó (Tomado de http://es.getamap.net/busca_mapas_1_8+50+46+n+70+00+33+w.html). (e) Páramo el Cendé (Tomado de http://1.bp.blogspot.com/_LT0bNpO8cHA/S73-F7YGVfI/AAAAAAAAACY4/-wAa850dAc8/s1600/cende1.jpg). (f,g) Recolección de muestras de río Boconó. (h,i) Clastos del río Boconó.

El río Boconó está situado en entre los límites del estado Barinas y Portuguesa, es un río muy caudaloso y de corriente muy fuerte, los clastos presentes varían en tamaño de 2 cm a más de 30 cm generalmente y van de subredondeados a redondeados.

Tabla 11. Resumen Masparrito, Miembro (Formación Gobernador)

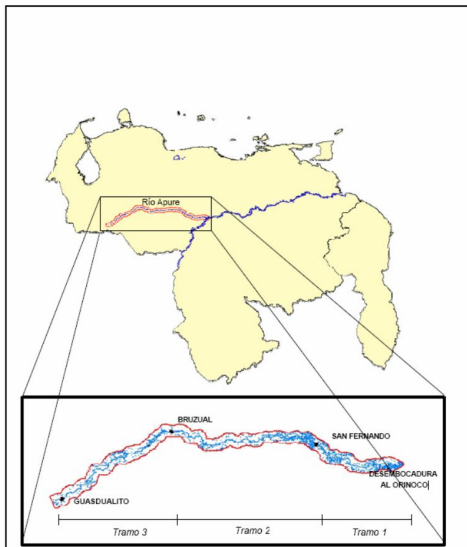
Edad	Terciario Eoceno Medio
Formación	Masparrito, Miembro (Formación Gobernador)
Localidad tipo	"Proviene del caserío Masparrito a lo largo de la sección del río Masparro".
Descripción litológica	Se refieren a la caliza como "arrecifal", su lenticularidad y desarrollo errático sugieren más bien biostromos.
Extensión geográfica	Se reconoce el litotipo Masparrito desde el Campo Sinco hasta el área entre Barinitas y el río Boconó.
Contactos	Ambos contactos, con Gobernador y con Pagüey, son normales y transicionales.
Fósiles	Además de las abundantes foraminíferos, reportan a los siguientes: <i>Discorbis mirandensis</i> , <i>Operculinoides aff. trinitatensis</i> , <i>O. kugleri</i> , <i>Lepidocyclina (Pliolepidina) pustulosa</i> , <i>Globorotalia crassata</i> , y <i>Gümbelina venezolana</i> .
Correlación	Con la Formación Caús de la cuenca de Maracaibo, con la Caliza El Cumbe (Formación Valle Hondo) de la cuenca de Maracaibo y con las calizas de la Formación Punto Mosquito en Margarita
Paleoambiente	"Un ambiente nerítico poco profundo, probablemente inferior a los 50 m"; así que el ambiente aparenta ser de aguas marinas llanas y bien oxigenadas, propicio al desarrollo de calizas biostromales y transicional entre el ambiente marino somero de Gobernador y el ambiente más profundo de Pagüey. La lenticularidad y poco espesor de las calizas dentro del miembro indican un desarrollo biostrómico y no arrecifal.

2.5.3 Cuenca del río Apure

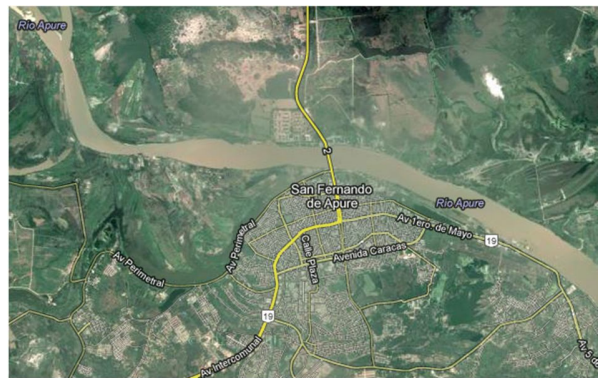
El río Apure es el mayor afluente venezolano del río Orinoco por su margen izquierda. Tiene una longitud de 820 km (Figura 27), aunque con una de sus fuentes, el sistema Apure – Uribante llega a los 1.095 km. Está conformado por la confluencia del río Sarare y el río Uribante. Sus coordenadas son 7°37'14" N y 66°23'50" W en los Andes colombianos. Entra a Venezuela cerca de San Cristóbal, estado Táchira y fluye hacia el este a través de los llanos venezolanos hasta el Orinoco. Su área de drenado por lo tanto incluye la caída de los Andes colombianos y venezolanos. Se encuentra a una altitud de 10 metros sobre el nivel del mar. En esta zona hay ausencia de clastos, la mayoría son sedimentos.

La geología de la amplia cuenca del río Apure y de otros ríos de los Llanos Bajos se ha estudiado con bastante detalle por el hecho de ser una cuenca sedimentaria con yacimientos

petrolíferos en diversos campos de los estados Barinas y otros de los Llanos. Una cuenca sedimentaria es una zona de subsidencia de la corteza terrestre cuyo hundimiento compensa el levantamiento de los relieves vecinos, en este caso, de los Andes venezolanos. A su vez, la zona de contacto entre los Andes y los Llanos, forma una línea de falla que puede observarse nítidamente en el piedemonte andino - llanero. Las imágenes de satélite nos muestran este brusco cambio de pendiente de los ríos al salir de la cordillera andina hacia los Llanos, marcados por amplios conos de deyección, completamente unidos en una superficie continuada durante centenares de km (conos de deyección coalescentes), con un desnivel muy escaso, pero con ríos anastomosados que cambian frecuentemente su curso, desde luego, refiriéndonos a esta zona de contacto del piedemonte, ubicada en torno a la curva de nivel de los 200 msnm.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 27. (a) Ubicación del río Apure (Tomado de Azocar Y. y Rodríguez R. (2007)). (b, c) Ubicación del Río Apure. (Tomado de http://es.getamap.net/busca_mapas_1_7+54+8+n+67+28+21w.html). (d, e, f, g) Recolección de muestras de sedimentos recientes del río Apure. (h) Foto donde se observa el puente sobre el río y la extensión a lo ancho del mismo.

Tabla 12. Resumen de la Formación Cojedes.

Edad	Cretáceo inferior (Albiense).
Formación	Cojedes
Localidad tipo	Colina al sur del cerro La Vieja, 9 kilómetros al noroeste de Agua Blanca, Estado Cojedes. Una sección de referencia que expone la parte superior de la unidad y su contacto con la formación Mapuey suprayacente, aflora al sur de boquerón (kilómetro 112 de la carretera Guanare-San Carlos), unos 7 kilómetros al este-noreste de Agua Blanca.
Descripción litológica	Areniscas feldespáticas y horizontes delgados en su mayoría calcáreos; el tamaño de grano varía considerablemente alcanzando hasta 20 cm en peñas y peñones de cuarzo, cuarcita, filita, caliza y gneis. Las calizas forman capas espesas a macizas, frecuentemente

	interestratificadas con areniscas y asperones, lentes y capas de conglomerados compuestos principalmente por fragmentos de caliza.
Extensión geográfica	Parte norte del estado Cojedes, localidad de Boquerón; bloque de falla de Pilancones, unos 10 kilómetros al norte de El Pao, y al este de él; cerro Morrocayos; cerro Araguaita y al norte del cerro La Vigía.
Contactos	El contacto inferior en la primera aparición de conglomerados de caliza. El tope aflora con menos claridad al sur de Boquerón y se sitúa donde desaparecen las capas de conglomerados y arcosa. En la ladera oeste del cerro Pilancones la Formación Cojedes recubre discordantemente la zona de inyección del Complejo de El Tinaco e infrayace con aparente concordancia a la Formación Pilancones, volcánica.
Fósiles	<i>Orbitolina</i> en el cerro Pilancones, <i>Orbitolina</i> , <i>Cuneolina</i> , <i>Coskinolina</i> y <i>Miliolidae</i> al norte y oeste del cerro La Vigía.
Correlación	Con la Formación Tucutunemo, con la Formación El Cantil de Venezuela oriental, con la parte superior del grupo Cogollo de Venezuela occidental, y con la Formación Los Cristales.
Paleoambiente	La presencia de rudistidos sugiere ambientes marinos someros y las características sedimentarias sugieren transporte por corriente de turbiedad.

Tabla 13. Resumen de la Formación Esquistos de Apure

Edad	Paleozoico (Silúrico)
Formación	Esquistos de Apure
Localidad tipo	La sección tipo (Escalona, <i>op. cit.</i>) se encuentra localizada en el pozo Apure-3, entre las profundidades de 2070 m (6273 pies) y 2120 m (6243 pies, profundidad final).
Descripción litológica	Roca metasedimentaria, de textura esquistosa, localmente filítica, de marcado aspecto sedimentario que aún conserve el bandeamiento (bandeamiento por color), laminación ondulada, estructuras sedimentarias y bioturbación de la roca original. Es una roca dura, densa, compacta, de color gris verdoso a verde oliva oscuro, que muestra textura del metamorfismo en la facies de los esquistos verdes.
Extensión geográfica	Se propone cierta extensión regional dentro de la cuenca de Barinas – Apure.
Contactos	Se desconoce su contacto inferior, el contacto superior es siempre discordante por debajo de la Formación Río Negro.
Fósiles	Se menciona y muestra la presencia de madrigueras, reliquias de gusanos.

III. METODOLOGÍA Y MARCO TEÓRICO

3.1 INTRODUCCIÓN

La metodología utilizada en este Trabajo Especial de Grado es resumida en forma de diagrama de flujo en la Figura 28. El primer paso, fue realizar la recopilación bibliográfica de la zona de trabajo, así como material necesario para la planificación de las labores de campo. La segunda fase, descrita en el punto 2, consistió en la fase de campo en la cual se recolectaron las muestras de sedimentos modernos de ríos y muestras in-situ de interés. Posteriormente en la tercera etapa, se procesaron todas las muestras con la finalidad de concentrar los minerales pesados y realizar las secciones petrográficas y epóxicas. Finalmente, se realizaron cada uno de los análisis mostrados en el cuarto paso.

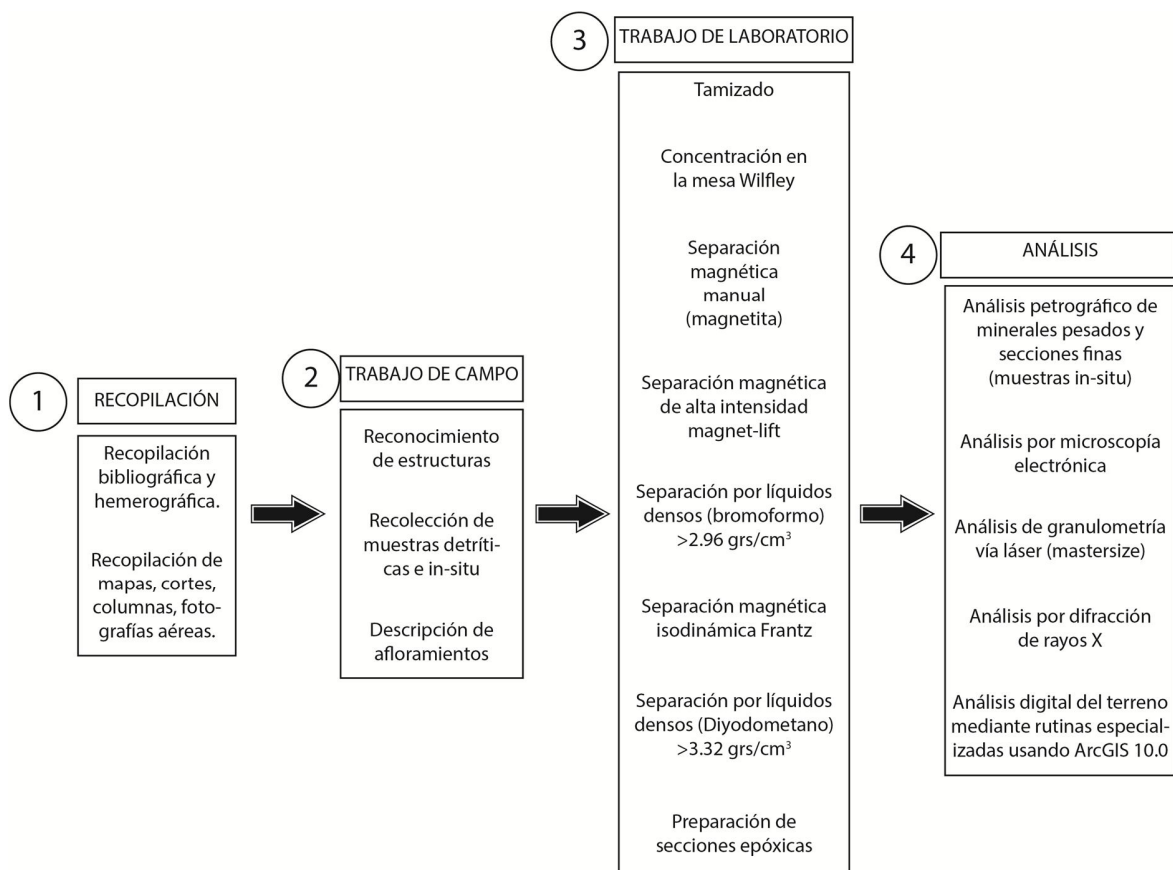


Figura 28. Diagrama de flujo que resume la metodología utilizada en la presente investigación.

A continuación se presenta brevemente el marco teórico de cada una de las técnicas utilizadas en las últimas etapas del diagrama de flujo mostrado anteriormente.

3.2 MINERALES PESADOS

Los minerales pesados se definen como aquellos minerales accesorios de las rocas que tienen ordinariamente una gravedad específica mayor a 2.96 gr/cm^3 que es el peso específico del bromoformo (el líquido pesado más utilizado en la separación de minerales), como los minerales pesados se presentan comúnmente diseminados en un sedimento en cantidades muy pequeñas, generalmente menos del 1%, su separación y concentración de los minerales livianos se logra a través de los diferentes análisis y procesos establecidos en el laboratorio de termocronología y geomatemáticas de la escuela de Geología en la UCV. El grupo de los minerales pesados constituye solo el 0.1% a 0.5% de las fracciones terrígenas de los sedimentos. Estos minerales son característicos en rocas ígneas y metamórficas, disminuyendo en cantidad al pasar a sedimentos químicamente inestables. El análisis de minerales pesados es una de las técnicas más ampliamente usadas para determinar la fuente de procedencia de los sedimentos que constituyen las rocas.

La mayoría de las areniscas contienen pequeñas cantidades de minerales accesorios tamaño arena y estos son componentes que aparecen en proporciones menores del 1%. Debido a su poca abundancia en las areniscas y sedimentos siliciclásticos, los minerales pesados se concentran generalmente para su estudio mediante la disgregación de las areniscas y luego se separan mediante el uso de líquidos pesados o métodos hidrogravimétricos. Suelen ser silicatos y óxidos resistentes a la meteorización química y abrasión mecánica. Los minerales pesados pueden dividirse convencionalmente en tres grupos: ligeros hasta 3.0 gr/cm^3 , medios de 3.0 a 4.0 gr/cm^3 y pesados más de 4.0 gr/cm^3 (Milosvski et al., 1982). Estos minerales pesados pueden ser opacos (ilmenita, magnetita, hematita, leucóxeno, limolita y pirita) o no opacos (apatito, zircón, olivino, clinopiroxeno, ortopiroxeno, granate, epidoto, anfíboles, zoisita, clinozoisita, cianita, sillimanita, andalucita, estauroлита, monacita, rutilo, esfena (titanita), rutilo, turmalina, entre los más comunes (Boggs, 2009).

Su peso específico suele ser superior a 2.9 gr/cm³, más alto que la densidad del cuarzo y de los feldespatos (2.6 gr/cm³) por eso para separarlos del resto del sedimento y analizarlos se utilizan líquidos densos. También proporcionan algunos indicios sobre el área fuente. Otro aspecto importante es que debido a su mayor densidad, suelen acumularse junto con granos de cuarzo de mayor tamaño. Es lo que se denomina tamaño hidráulico equivalente.

Tabla 14. Orden de persistencia de los minerales pesados (Tomado y modificado de Pettijohn, 1963)

NÚMERO	MINERAL	NÚMERO	MINERAL
-3	Anatasa	11	Epidoto
-2	Muscovita	12	Hornblenda
-1	Rutilo	13	Andalucita
1	Circón	12	Topacio
2	Turmalina	14	Titanita
3	Monacita	15	Zoicita
4	Granate	16	Augita
5	Biotita	17	Sillimanita
6	Apatito	18	Hiperstena
7	Ilmenita	19	Diópsido
8	Magnetita	20	Actinolita
9	Estaurolita	21	Olivino
10	Cianita	22	

El signo (-) indica que el mineral es más abundante en sedimentos antiguos que en modernos.

Tabla 15. Asociaciones de minerales pesados y procedencia (Tomado y modificado FEO – CODECIDO, 1960)

Asociaciones Minerales	Fuentes
Apatito, biotita, circon, hornblenda, muscovita, rutilo, turmalina (variedad rosada).	Rocas ígneas ácidas
Casiterita, fluorita, granate, monacita, muscovita, topacio, turmalina (variedad azul), wolframita.	Rocas graníticas
Augita, cromita, diópsido, hipersteno, ilmenita, magnetita, olivino, pirrotita.	Rocas ígneas básicas
Barita, circon, (fragmentos redondeados), leucóxenos minerales de hierro, rutilo, turmalina.	Rocas sedimentarias
Andalucita, cianita, cloritoide, epidoto, estaurolita, glaucofano, granate, sillimanita, titanita, zoisita, clinozoisita.	Rocas metamórficas hidrotermales
Andalucita, condradita, corindón, estaurolita, flogopita, granate, topacio, vesubiana, wollastonita, zoisita.	Rocas metamórficas de contacto

3.2.1 Ventaja del análisis de minerales pesados

3.2.1.1 Estabilidad química

El uso de minerales pesados petrográficamente es muy común encontrarlos, casi siempre en proporciones inferiores al 3% y es por ello que para su estudio se hace necesario concentrarlos.

En cuanto a su estabilidad química, los minerales pesados pueden clasificarse en ultraestables, estables e inestables y mediante esta separación se puede tener idea del transporte y la madurez composicional de las rocas fuentes.

Estudios sobre la estabilidad química de los minerales pesados se han realizado en perfiles de suelo y varias areniscas y estas investigaciones demostraron que el apatito puede ser disuelto (Aubert et al., 2001; Kuo et al., 2009). El efecto para remover estos minerales y concentrar las especies químicamente estables, como el zircón. La disolución de los minerales que han sobrevivido a la meteorización química y se han depositados en cuerpos de arenas es designada disolución intrastatal (Aubert et al., 2001; Kuo et al., 2009).

3.2.1.2 Resistencia a la abrasión y el transporte

La estabilidad de los minerales en el medio de transporte viene determinada por su resistencia a la abrasión que es directamente proporcional a la dureza y tenacidad del mineral e inversamente proporcional al número y grado de perfección de los planos de clivaje.

También las características superficiales de los granos afectan el desgaste de los minerales pesados, de tal forma que cuando la adherencia es menos que la fuerza de cohesión del líquido, éste no moja el mineral, estando protegidos por una lámina de agua. Estos minerales son los que tienen enlaces covalentes y metálicos (monacita, casiterita, óxidos metálicos, diamante, oro, platino, etc.). Esto provoca que su resistencia a la abrasión sea más elevada, impidiendo su desgaste y aumentando su persistencia en el medio de transporte y además produce una disminución de su densidad en el medio acuoso, variando el inicio de transporte y la velocidad de sedimentación de estos minerales.

Teniendo en cuenta todos estos factores, se puede definir el concepto de capacidad de migración de los minerales pesados. Este concepto determina la distancia relativa a la cual puede llegar un mineral pesado desde la roca fuente. La capacidad de migración de un mineral es función directa a su resistencia a la abrasión, su estabilidad química e inversamente proporcional a la densidad del mineral. También incide, como indicamos anteriormente, de forma directa el coeficiente de mojabilidad y el de anisotropías del mineral. (García, J. y Martínez, J., 1992).

Tabla 16. Resistencia a la alteración química de los minerales pesados

Escasa	Baja	Alta	Muy alta
Pirrotina	Wolframita	Almandino	Hematites
Blenda	Scheelita	Magnetita	Limonita
Calcopirita	Apatito	Columbita	Topacio
Cinabrio	Grossularia	Esfena	Turmalina
Pirita	Ortita	Sillimanita	Brookita
Olivino	Diópsido	Distena	Anatasa
Aegerina	Actinolita	Baritina	Leucoxeno
Augita	Zoisita	Perovskita	Rutilo
Biotita	Epidota	Ilmenita	Espinela
Hornblenda	Cloritoide	Xenotima	Platino
	Estaurolita	Monacita	Oro
		Casiterita	Circón
		Andalucita	Corindón
			Diamante

Tabla 17. Capacidad de migración de los minerales pesados

Baja	Media	Alta
Cinabrio	Magnetita	Espinela
Wolframita	Apatito	Ilmenita
Pirita	Esfena	Hematites
Scheelita	Almandino	Leucoxeno
Olivino	Estaurolita	Topacio
Augita	Anatasa	Rutilo
Hiperstena	Monacita	Turmalina
Baritina	Distena	Platino
Grossularia	Casiterita	Zircón
Fluorita	Andalucita	Corindón
Hornblenda	Oro	Diamante
Diópsido	Limonita	
Columbita		
Actinolita		
Epidota		

3.2.2 Descripción de algunos minerales pesados en la fracción (>2.96 grs/cm³)

3.2.2.1 Ilmenita

Es un óxido de hierro y titanio que cristaliza en el sistema hexagonal – trigonal, los cristales son normalmente tabulares, gruesos, con planos basales bien desarrollados y pequeñas truncaduras romboédricas. Normalmente los cristales son macizos y compactos; también se dan en forma de granos o en arenas. Básicamente la composición de la ilmenita (FeTiO₃) es Fe = 36,8%, Ti = 31,6%, O = 31,6%. La ilmenita puede contener cantidades limitadas de Fe₂O₃ (menos del 6% en peso) a temperaturas ordinarias. Sin embargo existe una solución sólida completa entre Fe₂O₃ y FeTiO₃ por encima de 950°. La estructura de la ilmenita es muy semejante a la del corindón con Fe y Ti ordenados en capas y se distingue de la magnetita por carecer de fuerte magnetismo (Klein y Hurlbut, 1997).

Yacimiento

La ilmenita es un material accesorio común en rocas ígneas. Puede presentarse en grandes masas en grabos, dioritas y anortositas, como un producto de segregación magmática, íntimamente asociado a la magnetita. También se encuentra en algunas pegmatitas y filones. Como constituyentes de arenas negras está asociado a la magnetita, zircón, rutilo y monacita. La producción mundial de ilmenita es de unos 4 Mt (Klein y Hurlbut, 1997).

3.2.2.2 Magnetita

La magnetita (Fe₃O₄) es un óxido de hierro que cristaliza en el sistema isométrico, generalmente se halla en forma de cristales de hábito octaédrico, en algunos casos maclados, es más raro en dodecaedros. Normalmente es maciza, granular o de grano fino. Es de dureza 6 y de peso específico 5,18; de brillo metálico, color negro de hierro y deja huella negra, a menudo es fuertemente magnética, puede actuar como un imán natural. Su composición general es Fe = 72,4%, O = 27,6%.

Yacimiento

La magnetita es una mena corriente de hierro. Se halla diseminada como mineral accesorio en muchas rocas ígneas, en ciertos tipos de segregación magmática es uno de los

principales constituyentes de la roca y forma así grandes masas de mineral. Dichas masas son generalmente muy titaníferas. Corrientemente aparece asociada a rocas metamórficas y también a inmensas capas y lentejones en rocas metamórficas antiguas. Es común de las formaciones bandeadas de hierro del precámbrico de origen sedimentario – químico. Se encuentra en las arenas negras del mar, en hojas finas y crecimientos detríticos entre hojas de mica (Klein y Hurlbut, 1997).

3.2.2.3 Carbonatitas

Son rocas de carbonatos – silicatos, calcita o con menos frecuencia dolomita, raras veces anquerita, siderita y menores cantidades de una variedad de silicatos, óxidos y otros minerales, originalmente depositados a partir de un magma rico en carbonato.

Se presentan y están genéticamente relacionadas con complejos de rocas ígneas intrusivas feldespatoideas o libres de cuarzo, rocas subsaturadas en sílice ricas en sodio. Suelen formar la parte inferior de las chimeneas de algunos volcanes de tipo explosivo y se presentan también en estructuras cónicas, vetas y zonas de brecha. Las masas de carbonatitas no exceden de 8 km² y como señaló Pecora (1956), el área expuesta no muestra ninguna relación en tamaño con el del complejo total.

Muchos yacimientos de carbonatitas con sus rocas alcalinas asociadas están rodeados por una aureola metasomática de contacto con la roca caja, normalmente gnies, esquisto y granito, alteradas a sienitas por la acción de soluciones alcalinas.

Geoquímicamente las carbonatitas están caracterizadas por concentraciones relativamente elevadas de los elementos P, Cl, F, Ti, Zr, Nb, grupo del Ce, S, Ba y concentraciones apreciables de Th y menores de U.

Pecora (1956) ha señalado que las carbonatitas son de dos tipos mineralógicos entre los que hay pasos graduales: el tipo más corriente, de apatito – magnetita, asociado con rocas feldespatoideas y el tipo fosfatos – carbonatos de tierras raras, asociado con otras rocas silico – alcalinas (Heinrich, 1966).

3.2.2.3 *Apatito*

El apatito es un mineral con cristales hexagonales y dureza 5 en la escala de Mohs. Su composición química aproximada es $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl},\text{OH})$. El color es variable aunque predominan los cristales incoloros, parduzcos o verdosos.

El apatito se encuentra en vetas hidrotermales, pegmatitas y caliza metamórfica además de sedimentos donde se produce a partir de depósitos orgánicos.

La tenacidad del apatito es frágil. Se presenta en filones de fluorita y expulsiones volcánicas. Se asocia a fluorita, hematites, sanidina y topacio. Un mineral semejante es la barita, bastante más pesada y de exfoliación excelente. El apatito es soluble en ácido nítrico. El apatito es la fuente principal de fósforo y fosfato y por lo tanto imprescindible en la fabricación de los abonos minerales.

Variedades:

- Fluoro-apatito ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$); es el principal mineral del esmalte de los dientes. Resiste mejor los ataques de los ácidos que la apatita normal. Por esto se añaden fluoruros a las pastas de dientes que pueden intercambiar los grupos hidroxilo por flúor.
- Hidroxi-apatito ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$); el principal mineral de los huesos. Se puede fabricar artificialmente según a partir de cloruro de calcio (CaCl_2 y fosfato de sodio (Na_2HPO_4) y se utiliza en la separación cromatográfica de las proteínas.

3.2.2.4 *Circón*

El Circón es un mineral que pertenece al grupo de los silicatos, de la clase (nesosilicatos), según la clasificación de Strunz; es un silicato de zirconio de fórmula química ZrSiO_4 , de color variable.

Es el mineral conocido más antiguo de la Tierra. Su origen es secundario como resultado de la oxidación de la galena, junto con cerusita, vanadinita y otros minerales.

La estructura de cristal de circón es sistema cristalino tetragonal. El color natural del circon varía entre incoloro y amarillo-dorado, rojo, marrón, azul y verde. Se presenta en rocas ígneas, en rocas metamórficas y rocas sedimentarias. Cristales de circón grandes son raros. Su tamaño medio en rocas de granito es de aproximadamente 0,1-0,3 mm, pero también puede crecer a tamaños de varios centímetros, especialmente en pegmatitas.

Debido a su contenido de uranio y torio, algunos circones podrían experimentar metamictization. Conectado con el daño de la radiación interna, estos procesos interrumpen parcialmente la estructura del cristal y en parte explican las propiedades altamente variables de circón. Como circón se vuelve más y más modificado por daño de la radiación interna, la densidad disminuye, la estructura cristalina se ve comprometida, y los cambios de color.

Circón se consume principalmente como opacificante en la industria de la cerámica decorativa. También es el principal precursor no sólo a metálico de circonio, aunque esta aplicación es pequeña, sino también a todos los compuestos de circonio, incluyendo óxido de circonio, uno de los materiales más refractarios conocidos.

Yacimiento

El circón es un accesorio común para trazar constituyente mineral de la mayor parte de granito y rocas ígneas félsicas. Debido a su dureza, durabilidad y químicos inertes, circón persiste en depósitos sedimentarios y es un componente común de la mayoría de las arenas. El circón es rara dentro de las rocas máficas y muy rara dentro de las rocas ultramáficas, aparte de un grupo de rocas intrusivas ultrapotásicas como kimberlitas, carbonatitas y lamprophyre, donde circón en ocasiones se puede encontrar como un rastro mineral debido a la génesis magma inusual de estas rocas.

El circón forma concentraciones económicas dentro de arenas yacimientos minerales pesados, dentro de ciertas pegmatitas, y dentro de algunas rocas volcánicas alcalinas.

3.2.2.5 Rutilo

El rutilo tiene dureza 6, con una intensidad de 4.2 y 4.3. La raya es de color marrón clara y su color es pardo rojizo, rojo, marrón, amarillento y negro. Su brillo es transparente a translúcido y tiene una exfoliación – fractura de buena – concoidea a irregular, con un sistema de cristalización tetragonal.

El Rutilo es un mineral compuesto por óxido de titanio. Su Tenacidad es frágil. Su origen es magmático y metamórfico, también en placeres, en combinación con monacita-(Ce), topacio, berilo, cuarzo y otros minerales. Es común como inclusiones en cristales de citrino ahumado (cuarzo).

Sus cristales son prismáticos a maclas acodadas, auténticas mallas. Se presenta en pegmatitas, grietas alpinas, rocas sedimentarias, metamórficas y saponitas. Se le encuentra en los yacimientos de Zafiro. Se asocia a anatasa, brookita, titanita, hematites. Minerales semejantes son la magnetita, de raya diferente; turmalina, más dura y de brillo distinto

3.2.2.6 Esfena o Titanita

La titanita o esfena es un mineral del grupo de los Silicatos, subgrupo Nesosilicatos. Químicamente es un silicato de titanio y calcio. Con frecuencia presenta impurezas de hierro y aluminio, entre otras.

Su composición es $\text{CaTiO}(\text{SiO}_4)$. Sistema cristalino Monoclínico. Su color es verdoso o pardo, en ocasiones con otras coloraciones. Su brillo es diamantino a resinoso, de raya blanca, dureza de 5 a 5.5 y con una exfoliación clara. Su peso específico es de 3.45 a 3.56. Se presenta en cristales monoclínicos, implantados o incluidos en forma de cuña o tabulares. En algunas ocasiones se presenta como amorfa y granuda, en raras ocasiones laminar.

La titanita es una fuente industrial de óxido de titanio, usado para fabricar pigmentos. También es admirado como gema cuando se encuentra convenientemente libre de defectos. Convenientemente tallada, la esfena tiene un poder para reflejar destellos superior al del diamante, pero lamentablemente su escasa dureza hace que sea inapropiada en joyería para

montar en anillos y sólo se puede usar en colgantes o como piedra para coleccionismo de elevado precio.

3.2.2.7 Andalucita

La andalucita se presenta en cristales prismáticos de sección cuadrangular o en agregados radiales con colores que oscilan desde el rosa pardo, siendo posibles las tonalidades grises, verdes y rojas. Puede ser opaca, translúcida o incluso transparente, en cuyo caso posee brillo vítreo y muestra un fuerte pleocroísmo (cambio de color en función del ángulo en que se mire), entre rosa y verde. Andalucita, silimanita y cianita son tres minerales polimorfos que se utilizan como indicadores de las condiciones de presión y temperatura en que tiene lugar el metamorfismo. Silicatos (Nesosilicatos). Hábito prismático, granular, anhédrico; inclusiones común sistema ortorrómbico, dureza 6.5-7.5, fractura geométrica, exfoliación buena y raya blanca. Inclusiones grafito en cruz (quiasolita) y alteración a sericita; inversión a distena o sillimanita.

Este mineral se utiliza para la fabricación de aislantes térmicos y eléctricos, así como en la producción de utensilios cerámicos con elevada resistencia a los ácidos. Forma parte, además, de muchas rocas para la construcción.

3.2.2.8 Monacita

Monacita es un mineral de fosfato de color marrón rojizo que contiene metales de tierras raras. Se produce por lo general en cristales aislados pequeños. Raya de color blanco grisáceo. Brillo diamantino a resinoso. Transparente a semitranslúcida. Color pardo, incoloro, verduzco, blanco gris, amarillo. Masiva, granular.

En realidad, hay al menos cuatro tipos diferentes de monacita, dependiendo de la composición elemental relativa de los minerales: monacita-Ce PO₄, monacita-La PO₄, monacita-Nd PO₄, monacita-Sm PO₄.

Los elementos se enumeran en el orden en el que están en proporción relativa en el mineral, por lo que el lantano es el más común de tierras raras en monacita-La, y así

sucesivamente. Sílice, SiO_2 , estará presente en cantidades traza, así como pequeñas cantidades de uranio y torio. Debido a la desintegración alfa de torio y uranio, monacita contiene una cantidad significativa de helio, que puede ser extraído por calentamiento.

Yacimiento

Monacita es un mineral importante para el torio, lantano y cerio. Se encuentra a menudo en depósitos de placer. Los depósitos en la India son particularmente ricos en monacita. Tiene una dureza de 5,0 a 5,5 y es relativamente densa, acerca de 4.6 a 5.7 gr/cm^3 .

Debido a la presencia de torio dentro de monacita, que puede ser radiactivo. Debido a su naturaleza radiactiva, la monacita dentro de las rocas es una herramienta útil para fechar acontecimientos geológicos, tales como la calefacción o la deformación de la roca.

Debido a su alta densidad de minerales monacita se concentrará en las arenas aluviales cuando se libera por la erosión de las pegmatitas. Los llamados depósitos de placer a menudo playa o arenas de la playa fósil y contienen otros minerales pesados de interés comercial como el circón e ilmenita. Monacita se puede aislar como un concentrado casi puro por el uso de la gravedad, la separación magnética, y electrostática.

Existen diversos métodos para la datación de rocas empleados comúnmente en geocronología. Los cronómetros U-Th-Pb son probablemente los más precisos que pueden utilizarse para materiales geológicos con edades superiores a los 30 M.a.

3.2.2.9 Hematita

La hematita es un mineral accesorio de numerosas rocas eruptivas, en especial en lavas, ya que, respecto a la magnetita, requiere un ambiente oxidante. Es raro en las plutónicas, y en cambio se hace común en las pegmatitas y en los filones hidrotermales. Muchas se forman en ambientes sedimentarios por diagénesis de la limonita, manteniéndose la forma concrecional y oolítica. Permanece estable en ambiente metamórfico de bajo grado, donde incluso llega a sustituir pseudomórficamente a la magnetita. Se encuentra también en los productos de sublimación de las exhalaciones volcánicas.

Forma trigonal (generalmente le ocurre a cristales tabulares). Raya de color pardo rojizo, rojo oscuro. Brillo metálico. Opaca a translúcida. Color negro, gris rojizo, rojo negruzco. Hábito cristales >3mm, romboédricos negros bastante aplastados, a veces laminares y dispuestos como los pétalos de una rosa, más comunes son las masas granulares compactas oolítico, botroidal o concrecional, a veces con la superficie iridiscente, terrígenas, a menudo de aspecto tabular delgada y gruesa, piramidal, rosetas, masiva, fibrosa, botroidal, columnar, usualmente bandas diagonales. Dureza 5.5 a 6.5. Densidad 5,30 gr/cm³ y de fractura concoidal.

Yacimientos

Entre las regiones con mayor contenido de hematitas del mundo están las orillas del Lago Superior de Michigan, Estados Unidos y yacimientos extensos en Brasil, España, Rusia, Ucrania y Canadá. La hematita se encuentra en cristales romboédricos. Las formaciones macizas se llaman specularitas, las terrosas ocre rojo. Los cristales son translúcidos, la hematita es un constituyente de numerosos abrasivos y pigmentos.

Se conoce la existencia en Venezuela, de yacimientos sedimentarios en Lara suroccidental, depósitos metasomáticos en el Estado Miranda, yacimientos laminados en los estados: Apure, Bolívar y Delta Amacuro, yacimientos de grano grueso ubicados al norte de la Falla de El Pao en el Estado Bolívar (Cerro El Pao, Cerro Gutiérrez, Cerro La Imperial, Cerro Las Grullas, Cerro Piacoa, pequeños yacimientos ubicados al norte de la Falla de El Pao), yacimientos de grano medio en el Cerro María Luisa (Estado Bolívar), pequeños yacimientos localizados en el área de El Guri, pequeños yacimientos localizados al sur de la Falla Guri - Río Carapo Estado Bolívar, Cerro Bolívar, menas tipo Cerro Bolívar, otros yacimientos tipo Cerro Bolívar, menas de bajo tenor.

3.2.2.10 Estaurolita

La estaurolita es un mineral del grupo VIII (silicatos), de color negro parduzco, pardo oscuro, pardo rojizo, pardo amarillo, amarillo parduzco, rojo oscuro tirando a blanco, mayormente opaco, con raya de color blanco a grisáceo. Hábito prismático corto, sección basal rómbica, poikiloblástico, anhédrico. Brillo vítreo a mate. Opaca a translúcida. Cristaliza en

forma de cristales monoclinicos. Su dureza en la escala de Mohs oscila entre 7 y 7.5. Densidad $3,71 \text{ gr/cm}^3$ y su fórmula química completa es $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Zn})_2\text{Al}_9(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{22}\text{OH}_2$. Alteración a sericita, clorita

Su nombre deriva del griego *stauros*", que significa "cruz" unido con el sufijo *litos* que significa "piedra". Este nombre hace referencia a la simetría que presenta la estaurolita, que es su rasgo más característico.

Yacimiento

La génesis típica de la estaurolita está ligada a un metamorfismo que se forma por metamorfismo regional de temperatura media. Este mineral se forma por la fusión de granates, micas y cianita, además de otros minerales metamórficos. Al ser muy dura y resistente a los agentes atmosféricos, se encuentra con frecuencia en las arenas aluviales, es decir, en los depósitos formados por disgregación de las rocas que la contienen.

Los cristales límpidos se emplean con frecuencia en joyería como piedra de talla. Esta especie es importante desde el punto de vista científico dado que permite definir el tipo de metamorfismo sufrido por las rocas que lo contienen. El polvo de este mineral se emplea como abrasivo suave para el pulido y el tratamiento de superficies.

3.2.3 Características Texturales Generales

3.2.3.1 La Forma De Los Granos (Esfericidad)

La *Esfericidad* se define como el grado en que un clasto se aproxima en su forma a una esfera. Wadell (1932) propone que la esfericidad puede definirse como la razón entre la superficie del clasto y la de una esfera de igual volumen que aquel. Tiene más que ver con sus propiedades físicas que con el transporte que hayan sufrido. Los clastos procedentes de rocas metamórficas suelen ser alargados, mientras que granitos y mármoles suelen dar clastos más esféricos.

La **Redondez** se refiere al grado de angularidad que presentan aristas y vértices de un clasto, esto es la suavidad o lisura de los granos. La redondez no corresponde a un concepto de forma como la esfericidad, sino de configuración del grano que tiende a la forma superficial esférica como estado final. La redondez de los clastos depende también del tipo de roca y de la intensidad con que haya sufrido los procesos de abrasión, aunque los clastos gruesos suelen adquirir la redondez más fácilmente que los finos.

3.2.3.2 Rasgos Superficiales

Su origen físico son productos de los procesos de meteorización mecánica y erosión, y su forma nos demuestran los procesos que han sufrido (Figura 29). Los clastos de origen glacial suelen tener estrías, aunque también las pueden tener algunos clastos fluviales. Los de formas curvas se deben al impacto a alta velocidad de clastos transportados por ríos de gradientes altos. Algunos clastos presentan su superficie pulida, pues son capaces de difundir la luz dando la apariencia de un clasto helado. El transporte eólico es el principal causante de este rasgo generado por el impactos grano a grano a alta velocidad, durante las tormentas de arena, esto genera numerosas microfracturas en la superficie.

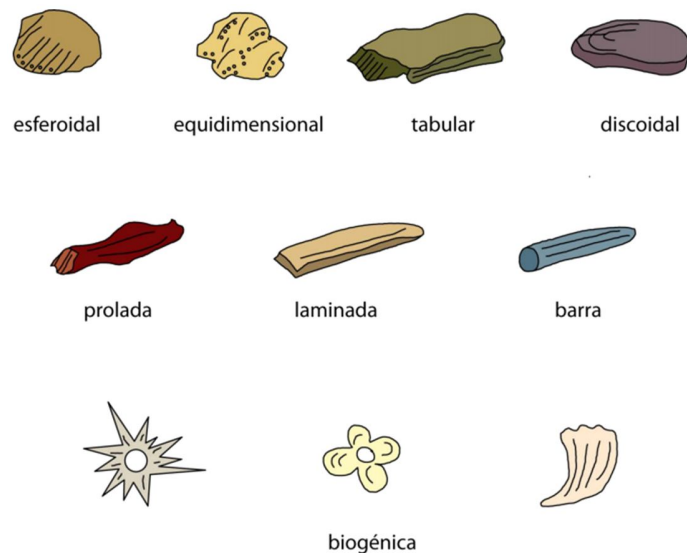


Figura 29. Forma de las partículas. (Tomado de http://cartografia.fi-a.unam.mx/temas/estratigrafia_sedimentologia/PE105211_ES_PrPar.pdf)

Dependiendo de las formas de las partículas (Figura 29) se tiene que los clastos procedentes de los esquistos y pizarras tienen formas tabulares o de espada. Las rocas isotrópicas como la cuarcita, tienen forma equidimensionales, subesféricas y conforme una partícula es transportada alejándola desde la fuente, disminuye su tamaño y tiende a adquirir una forma equivalente.

En cuanto al significado de la forma de la partícula, la esfericidad es función principalmente de su forma original y esta puede modificarse por ruptura y abrasión durante el transporte. La esfericidad afecta la velocidad de sedimentación de la partícula. La redondez depende de su tamaño, tipo de proceso de transporte, distancia de transporte. Las partículas más duras como el cuarzo y el circón se redondean menos fácilmente durante el transporte que los que son menos duraderos como el feldespato y los ferromagnesianos. La redondez en granos de tamaño mayores se adquiere antes que en los tamaños menores. Las gravas son más fáciles de redondear durante el transporte que las arenas. Las partículas < 0.1 mm no parecen redondearse por procesos de transporte.

3.2.4 Fase de campo

3.2.4.1 Toma de muestras:

Con el uso de la batea se selecciona los detritos oscuros y se separan con leves movimientos y agua, además se va lavando hasta obtener la muestra en una bolsa. Se toma una muestra de cada río con la pala aproximadamente 15 kg, se introduce en bolsas de 20 kg, se identifican con el nombre del río y el número 1, el número 2 dado a las muestras que se llevaría directamente el profesor *Matthias Bernett*, para análisis posteriores, y el número 3 y/o 5 corresponde a las muestras in-situ. Estas muestras se recolectan con la finalidad de tratarlas en el laboratorio. En cada parada se registran los datos con el GPS y se chequean los mapas, previamente revisados y analizados en Caracas para la logística del campo (Figura 30).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 30. (a) Toma de muestra se tamiza y se lleva a la batea. (b) Separación hidrogravimétrica en la batea. (c) Después de separar los minerales pesados se introducen en una bolsa ziploc con identificación. (d) Muestra recolectada después del uso de la batea. (e) Toma de Muestra Bolsa de 20 Kg, para tratar en Laboratorios. (f) Toma de Muestra In-Situ. (g) Registro de Posición GPS.

3.2.4 Descripción de la elaboración de secciones epóxicas

3.2.4.1 Muestras detritos (no consolidadas) y muestras consolidadas o in-situ

Se toman las diferentes muestras, las muestras de sedimentos (no consolidadas) y las muestras in situ (consolidadas), se llevan al cilindro (escuela de metalurgia), a las muestras consolidadas se pesan inicialmente luego se rompen con un martillo se deja un testigo de estas muestras tamaño de un puño para elaborar secciones finas con la finalidad de caracterizar petrológicamente la roca. El resto que queda se pasan por una trituradora de mandíbula, pasando luego por la trituradora de cilindros y por último la trituradora de disco (molienda tamaño arena) para posteriormente pesar el contenido total de cada muestra, luego se llevan a los tamices tamaño de 60 y 200, se utiliza vibración y agua para la separación de las muestras, se toman las muestras del retenido 60 en una bolsa con identificación del río y el tamaño del tamiz, se almacenan también lo retenido en el tamiz 200, de igual manera se llevan a una bolsa y se identifican. Y si hay pasantes 200, también se almacenan en bolsas e identifican.



Figura 31. *Muestra In Situ*

3.2.4.2 Trituración de las muestras.

- La muestra de roca seleccionada es sometida a un tratamiento mecánico, el cual consiste de varias etapas y en la que se utilizan herramientas manuales o automáticas. La trituración de las muestras es una fase de cuidado, ya que se debe evitar cualquier riesgo de contaminación de la muestra tratada con otras muestras o con los materiales utilizados en la trituración. Enseguida se menciona de manera breve los pasos a seguir en la trituración de muestras.
- Limpieza total de las moliendas o trituradoras para evitar la contaminación de muestras. Se lavan y limpian paredes, maquinas trituradoras y herramientas manuales como martillos o cinceles antes de tratar cada una de las muestras (Figura 32a,b). Para una optimización del trabajo de limpieza se utilizó un compresor de aire para soplar residuos y secar la humedad de las maquinas, dando muy buenos resultados en cuanto a rapidez (Figura 32i).
- Las muestras colectadas deberán fragmentarse a tamaños menores a 5 cm lo que permitirá su introducción en las máquinas trituradoras (mandíbula, rodillo o disco). La fragmentación se puede realizar utilizando martillos pesados y maquinaria específica.
- El tipo de trituración dependerá de los objetivos de la investigación. Si se requiere obtener únicamente con la finalidad de concentrar los minerales pesados y preparar las secciones epóxicas.
- Se introduce con cuidado las muestras de rocas previamente lavadas, en las máquinas trituradoras tipo mandíbula o quijada, dependiendo del tamaño de la muestra y se debe

pasar por una o por ambas para obtener el tamaño guijarro (Figura 32e). En este trabajo se utilizaron varias máquinas trituradoras (Figura 32).

- Los guijarros obtenidos son luego pasados a través de la trituradora de rodillos de acero para llevarlos a tamaño gránulo y arena gruesa (Figura 32f,g,h). En esta parte es muy importante la limpieza de los rodillos. En esta máquina la muestra se rompe por presión entre ambos rodillos, y se tiene buen control del tamaño de partícula deseada, dando resultados de trituración rápidos.
- Las muestras son luego pasadas a través de la trituradora de discos (discos de acero), (Figura 32j,k). La muestra triturada de esta máquina es arena media a fina, sin embargo, se deben ajustar los discos para obtener el tamaño de grano deseado. La limpieza de esta máquina es muy importante, ya que los residuos de muestras anteriores es muy fina quedando atrapada entre los discos y boca de salida; esta limpieza se logra de manera efectiva con agua, esponjas y sopladora.



(a)



(b)



(c)



(d)



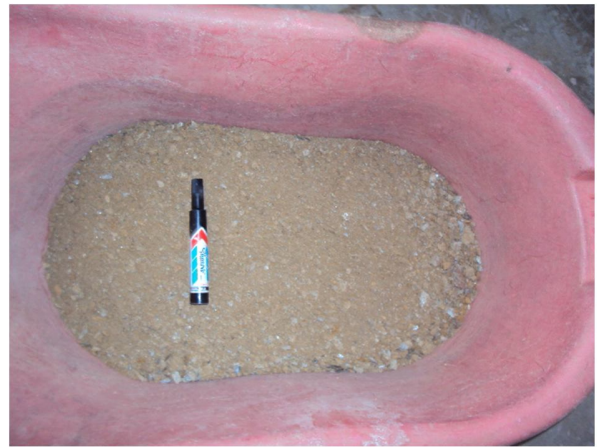
(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)



(k)

Figura 32. Máquinas trituradoras de mandíbula ubicadas en el Laboratorio de Geología y Minas. (a, b) Limpieza de la trituradora de bloques a tamaño canto. (c,d) Trituradora de mandíbula. (e) Muestra Triturada por las Mandíbula. (f,g) Trituradora de rodillo. (h) Muestra triturada por la trituradora de rodillo. (i) Limpieza de la trituradora de rodillo. (j,k) Trituradora de disco, para obtener la muestra tamaño arena, después de pasarla por los rodillos.

- Luego las muestras después de haber sido pasadas por las diferentes trituradoras se pesaron (Figura 33).



Figura 33. Pesado de la muestra después de la última trituradora.

- El siguiente paso es el tamizado de las muestras, para obtener concentrados de minerales. Para este paso se utilizan los tamices de mallas 60 y 200. Es importante resaltar que la limpieza de las mallas fue un proceso delicado ya que pueden ser fuente de

contaminación. Se utiliza la tamizadora (Figura 34). El concentrado resultante del pasante de malla 60 y retenido en malla 200, es guardado en bolsas de cierre hermético y rotulado con su identificación. El retenido en la malla 60 se vuelve a pasar por la máquina trituradora de discos del paso anterior en el caso de necesitar llegar a una mayor cantidad de muestra tamizada.



(a)



(b)



(c)



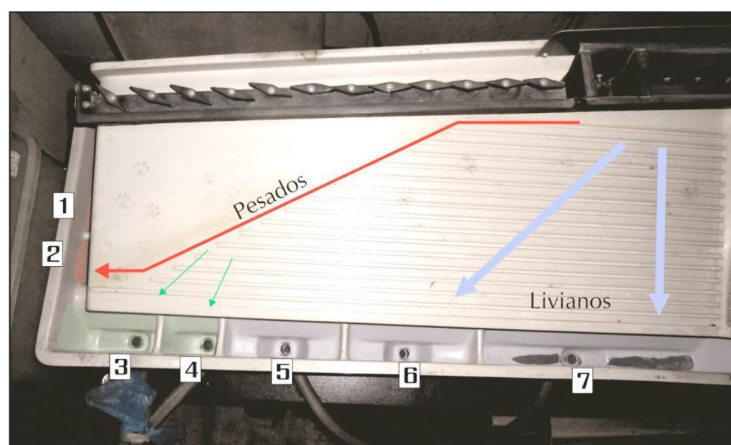
(d)

Figura 34. (a,b) Tamizado de la muestra en húmedo. (c) Recolección de las Muestras Tamizadas. (d) Limpieza de los tamices e instrumentos.

- Mesa de Wilfley: (separación hidrogravimétrica), se llevan las muestras pesadas previamente en el retenido 200, y se agregan para una primera etapa de concentración o separación de minerales pesados por vía húmeda en la Mesa Wilfley (Figura 35a). Dicha

La mesa es un equipo que separa relativamente fácil minerales pesados de minerales ligeros. Esto permite descartar hasta un 85% del material original en el que no se encontrarán minerales pesados. Esta mesa aprovecha la densidad de los minerales mediante un flujo de agua con un comportamiento laminar.

- La mesa Wilfley presenta un movimiento cíclico horizontal paralelo al flujo de agua y un movimiento brusco contrario al flujo del agua, lo que provoca que los minerales más pesados se separen del resto. La muestra se vierte en la mesa por medio de un alimentador de vibración variable que la dosifica. Esta, al caer en el flujo de agua, separa los minerales más ligeros, los cuales describen una trayectoria perpendicular al eje mayor de la mesa. Los minerales con densidades intermedias, al golpear la mesa, flotan siguiendo una trayectoria oblicua y muy cercana a los rizados longitudinales de la mesa. Los minerales pesados no flotan y solo se arrastran con el movimiento de la mesa en dirección del flujo de agua, siguiendo una trayectoria casi paralela al eje mayor de la mesa. Al final se obtiene un concentrado de minerales pesados (Figura 35).
- Se recolectan en bandejas en orden de concentración de minerales pesados desde la número 1 a la 7, donde las bandejas 1 y 2 son las de mayor concentración de pesados, las bandejas 3, 4 son de mediana concentración y en las bandejas 5, 6 y 7 se recolectan los minerales livianos. Distribución de las bandejas recolectoras (Figura 35c). Se recolecta en bolsas de cierre hermético rotuladas con la identificación de la muestra, para continuar a la siguiente etapa de separación de minerales pesados.



(a)



(b)



(c)

Figura 35. (a) Mesa Wilfley y sus recolectores de minerales pesados y livianos. (b,c) Realizando la separación de los minerales pesados.

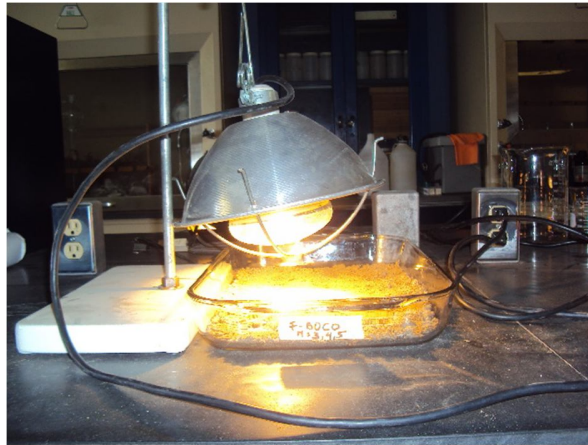
- Secado de las muestras: se toman las muestras 1 y 2, se llevan a secar en el horno entre 50°C y 60°C aproximadamente (Figura 36a) y bajo lámparas (Figura 36b,c) o se utilizan las lámparas de secado, hasta que estén completamente secas las muestras.



(a)



(b)



(c)

Figura 36. (a,b,c) *Secado de muestras.*

- Con un imán se separaron los minerales magnéticos del resto de los minerales (generalmente magnetita y pirrotita). El proceso consiste en pasar un imán común por encima de la muestra esparcida en una hoja de papel, luego de pasar repetidas veces el imán, hasta que no se adhieran minerales pesados, se repite el proceso hasta que se haya realizado en toda la muestra, los minerales pesados obtenidos se colocan aparte almacenados en bolsas con su respectiva identificación, para su posterior uso. En la Figura 37 se observa la separación de los minerales magnéticos aplicando el imán manual.



Figura 37. *Separación de minerales magnéticos manual con el imán.*

- Separación magnética por el MAGNET-LIFT, Specialists in High Tension and High Intensity Magnetic Separators: Después de separar los minerales magnéticos con el imán manual, estos minerales pesados obtenidos son guardados para estudios posteriores y las muestras no magnéticas son utilizadas en este separador magnético de alta intensidad (Bermúdez y Anaya, 2007) (Figura 38).
- Procedimiento:
 - Las muestras recolectadas de la Mesa Wilfley en las bandejas 1 y 2 de la Falla de Boconó, Tucuragua 1, Tucuragua 3, Peña 1, Peña 3, Tributario de Cojedes, LP1, Buría, Boconó 1, Apure 1 y LP₅ pero esta última muestra fue recolectada en la bandeja 3,4,5 de la Mesa Wilfley, se llevan al equipo electromagnético Magnet-lift, con el fin de ir separando los minerales desde los 0,2 amperios hasta 0,8 amperios.
 - Se enciende la máquina (Start) y todas las perillas deben estar en cero (0), el Roll Speed control se coloca en 30.
 - Vibrator control se coloca en 20 ó 30.
 - El Magnet Coil Current primero se coloca en 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y en cada paso por el equipo se van separando los magnéticos y se guardan en diferentes bolsas identificados con el nombre de la muestra y el amperaje utilizado, separando los magnéticos de los no magnéticos.
 - Para apagar se realiza de atrás hacia adelante se lleva a cero (0) con la perilla de Magnet Coil Current y se apaga (Off).
 - Luego se lleva a cero el Vibrator Control y se apaga (Off).
 - Después se lleva a cero el Roll Speed Control y se paga (Off).
 - Y por último se apaga todo el equipo (Stop). Luego la muestra de no magnéticos obtenida es usada en la separación por líquidos pesados (Bromoformo).



(a)



(b)



(c)

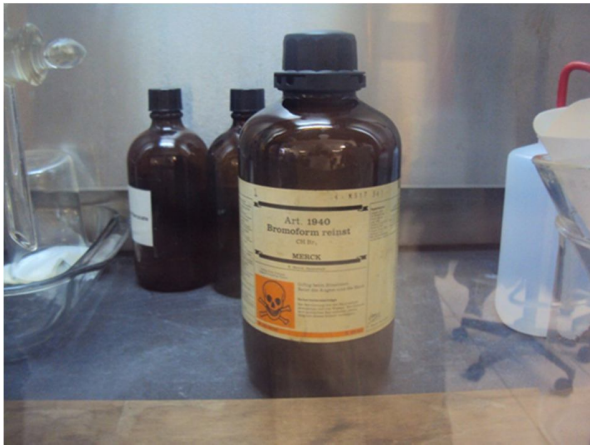


(d)

Figura 38. (a,b) Equipo de separación magnética magnet-Lift. (c,d) Realizando el ensayo de separación.

- El tratamiento de separación de minerales pesados por líquidos pesados se realiza posterior al tratamiento físico, considerando parte de lo propuesto en las técnicas de identificación de RUBIO (1952), FEO-CODECIDO (1960), para la separación de minerales pesados en muestras de areniscas, con el uso del líquido pesado Bromoformo (CHBr_3) (Figura 39a). Metodología de trabajo:
 - En un embudo especial de separación de 250ml, se vacía el líquido pesado (Bromoformo) hasta la línea blanca (250 ml) (Figura 39b). El embudo se coloca en un soporte universal, luego se coloca la muestra y se agita con un agitador de vidrio, se espera unos minutos la muestra dentro del embudo hasta que comience su separación, los minerales más pesados (densidad $> 2,9$) descienden dejando una separación marcada con los minerales $\leq 2,9$ de densidad (Figura 39c).

- Debajo se coloca otro embudo sencillo de vidrio y un papel filtro de pase rápido y porosidad gruesa, y un de 500 ml. Después que se separan los pesados de los livianos, se abre la llave del embudo especial, se dejan pasar los minerales pesados al papel filtro y se recuperan ahí, se cierra nuevamente la llave una vez que no hay pesados y se deja escurrir hasta poder recuperar el bromoformo concentrado. Luego en otro beakers con otro embudo sencillo de vidrio y otro filtro se deja salir los minerales livianos.
- Una vez hecho todo esto se deja escurrir un poco y se devuelve el bromoformo a otro embudo de separación para seguir trabajando con otras muestras, sino se regresa a su botella original. (El bromoformo no debe sacarse de la campana, de hacerlo se debe sacar tapado).
- Luego ahí mismo en la campana se coloca etanol para lavar la muestra en el embudo, se deja escurrir y se dejan en la campana secándose (Figura 39d,e,f).
- Se saca tapado de la campana el bromoformo que se destilo con el etanol al lavar las muestras para otra campana, donde se recuperará el bromoformo.
- Se coloca etanol en unas pinzas para lavar todo lo que haya tocado el bromoformo (embudo de separación, embudos sencillos, agitadores, beakers, etc.) y se deja todo dentro de la campana hasta el día siguiente.
- Medidas de seguridad (Figura 39g,h)
 - Protección respiratoria: Se utiliza máscara o mascarilla.
 - Protección de manos: Se utilizan guantes protectores.
 - Cubrimiento del cuerpo: Se utiliza bata de laboratorio para proteger la ropa.
 - Instalaciones de seguridad: Campana con extractor de gases tóxicos.



(a)



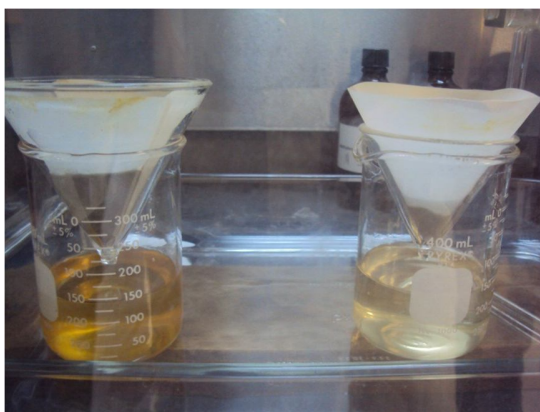
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 39. (a) Líquido Pesado Bromoformo densidad 2,96. (b) Se agrega el Bromoformo al embudo separador. (c) Separación de los minerales pesados (se depositan en el fondo del embudo) de los livianos. (d,e,f) Recuperación de minerales pesados, minerales livianos y bromoformo. (g) Campana con extractor de gases tóxicos. (h) Implementos de seguridad.

- Todo el bromoformo lavado con alcohol se lleva a otra campana en otro embudo de separación de 1 litro, lleno agua destilada y se le agrega el bromoformo con el alcohol. Estos reaccionan y la mezcla se torna blanca, luego que el agua y el alcohol se pongan transparentes y el bromoformo se deposita en el fondo del embudo, posteriormente se recupera el bromoformo dejándolo salir en un beakers y se regresa tapado a la campana donde está su envase para volver a utilizarlo, esto se hace con cada muestra (Figura 40).



(a)



(b)

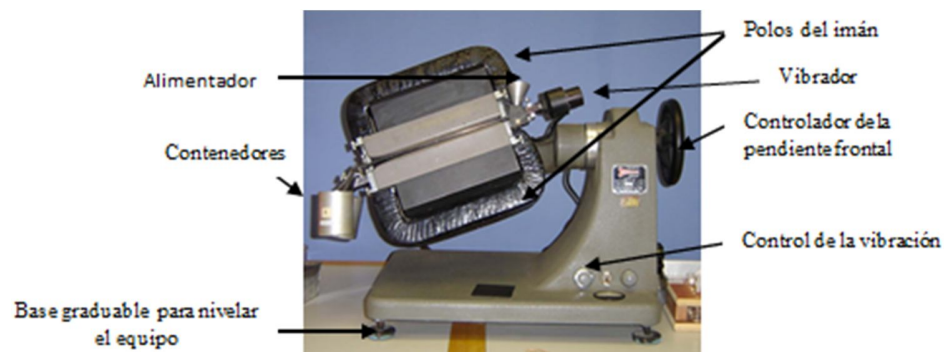
Figura 40. (a) Campana para recuperación del Bromoformo. (b) Balón de Separación para recuperación del Bromoformo.

- Separación magnética de minerales pesados usando el Separador Isodinámico Frantz: Después que las muestras están totalmente secas (Figura 41a), se almacenan en unos recipientes especiales, donde se agregan los minerales ligeros y pesados respectivamente. Se utilizan los pesados y se llevan al separador magnético Frantz (Figura 41b,c).
Procedimiento:

- Antes de encender el equipo se realiza la limpieza de todo el sistema con un cepillo y alcohol, se lleva el inclinómetro del equipo a 5° de pendiente.
- Se enciende la vibración y los interruptores de la corriente.
- Luego se va agregando la muestra de pesados, después de la separación con el líquido pesado Bromoformo, en una gama de corriente desde 0,2 amperios hasta llegar a 1,0 amperio (Figura 41d,e,f). Se almacenan en bolsas separadas todos los magnéticos de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 y de último también se almacenan los no magnéticos de 1.0.



(a)



(b)



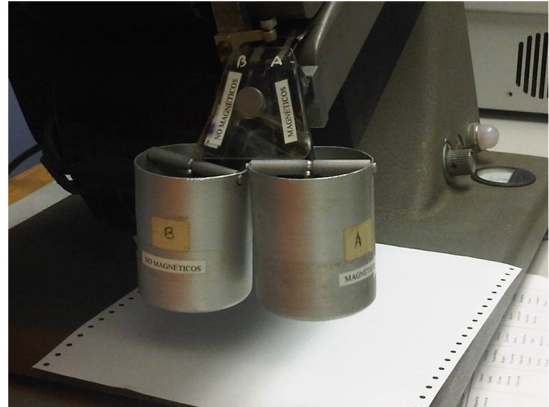
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 41. (a) *Minerales pesados recuperados después del bromoformo.* (b,c) *Separador Isodinámico Frantz y sus partes.* (d) *Realizando la separación magnética en el Frantz.* (e) *Colocando la muestra en el alimentador.* (f) *Contenedores de fracción magnética y no magnética.*

- En la Tabla 18 se muestran los diferentes minerales pesados, separados conforme al amperaje utilizado en el equipo de Separador Isodinámico Frantz.

Tabla 18. *Minerales pesados separados por el equipo isodinámico Frantz de acuerdo al amperaje y ángulos de inclinación (Tomado de Hess, 1959)*

Ángulo de Inclinación 20°			Ángulo de Inclinación 5°		
Imán de mano	Magnéticos 0.4 Amp.	Magnéticos 0.8 Amp.	Magnéticos 1.2 Amp.	Magnéticos 1.2 Amp.	No Magnéticos 1.2 Amp.
Magnetita Pirrotita	Ilmenita Granate Olivino Cromita Cloritoides	Hornblenda Hipersteno Augita Actinolita Estaurolita Epidoto Biotita Clorita Turmalina	Diopsido Tremolita Estantita Espinela Estaurolita Moscovita Zeosita Clinozoecita Turmalina	Leucoxeno Apatito Andalucita Monzonita Xenocita	Circón Rutilo Pirita Corindón Topacio Fluorita Silimanita Anidrita

- Luego se hacen pasar por Diyodometano (CH_2I_2) con una densidad de 3,3, de igual manera aquí son separados los minerales pesados $>3,3$ y los livianos $<3,3$. Luego se lavan las muestras con acetona, se dejan en la campana hasta que se secan totalmente y se llevan nuevamente al separador magnético a una intensidad de 1,2 amperios (Figura 42).

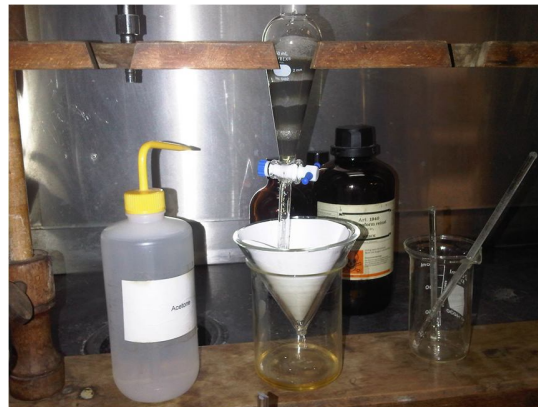


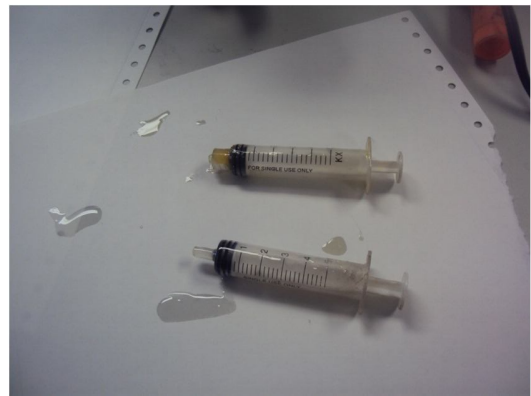
Figura 42. *Muestra pasada por el Diyodometano.*

- Secciones epóxicas. Metodología (Figura 43).
 - Del último paso de separación descrito anteriormente se toman los magnéticos a 1.2 amperios, se llevan al embutido en frío, resinas preparadas por 5 partes de resina y 1 parte de endurecedor (Figura 43a,b).

- Se procede a limpiar los moldes y se le agrega una capa muy fina de vaselina para unir la base con el resto del molde y ayuda a desmoldar (Figura 43c).
- Después se colocan las muestras uniformemente en el fondo del molde con un poco de epoxi para que los minerales no se muevan y por último se le agrega la resina caliente encima, procurando que no le quede burbujas de aire (Figura 43d).
- Se dejan secar y se introducen en la estufa previamente calentada a 60°C y luego se apaga y se deja dentro de la misma por 5 ó 6 horas.
- Luego para el desmontaje de las muestras se vuelven a llevar a 60°C por un tiempo aproximado de 5 minutos y se procede a desmoldear (Figura 43e).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 43. (a) Endurecedor y Resina Epóxica. (b) Jeringas para tomar las porciones de cada uno de los componentes. (c) Recipientes para agregar el epoxi mezclado para montaje de las muestras. (d) Añadiendo la muestra en el fondo del molde. (e) Secado de las muestras embutidas.

- Luego de desmoldear cada una de las muestras se rebajan los moldes con una lija de grados 40 ó 80. Después con una lija de carburo de silicio de grado 400 y agua se dan movimientos circulares, hasta descubrir todos los minerales. Con la ayuda de un estereoscopio de 20 a 40 aumentos se observa el lado desbastado hasta que parezca un mosaico.
- Se llevan al ultrasonido por 5 minutos para limpieza y después se procede a desbastar por la lija 600 y agua.
- Se lleva nuevamente al ultrasonido, se agrega agua hasta la mitad del equipo de ultrasonido y luego se colocan las muestras en un beakers con agua destilada por 5 minutos.
- Se sacan del beakers y se pasan por la lija 2000/4000, después se pasa nuevamente 5 minutos por el ultrasonido y por último se secan.

3.3 ANÁLISIS VISUAL DE MINERALES PESADOS

Se utilizó un microscopio óptico petrográfico con luz polarizada, modelo LABOPHOT-POL NIKON y además se emplearon imágenes obtenidas por el Microscopio Electrónico de

Barrido Philips XL 30. Se empleó el siguiente cuadro con un número de 20 granos por cada muestra analizada, se realizó la comparación grano a grano con la carta Modelo Krumbein y Sloss (1963), para obtener los registros de Redondez y Esfericidad para cada una de los granos de la muestra, por ejemplo el Rio Apure. Se realizó este mismo procedimiento para las 11 muestras, un total de 220 granos (Figura 44).

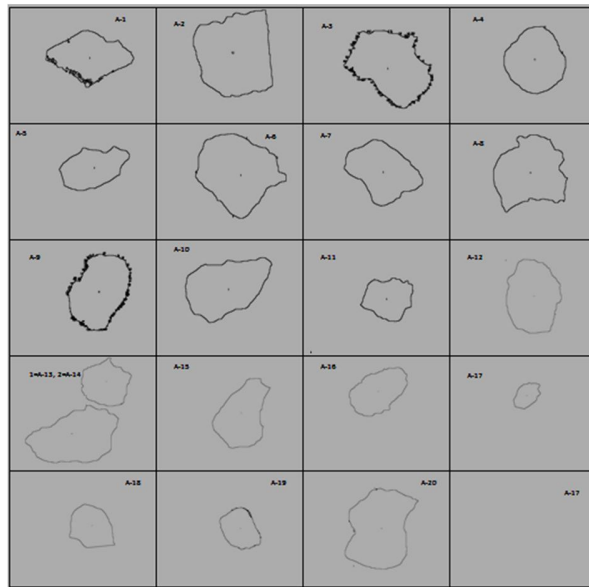


Figura 44. Granos evaluados visualmente y comparados con el modelo Krumbein y Sloss (1963), para determinar Redondez y Esfericidad pertenecen a la muestra del Rio Apure.

La Redondez y la esfericidad han demostrado ser propiedades útiles de las partículas tamaño mayor arena, al investigar el transporte y la deposición de las partículas sedimentarias y la relación entre estas dos propiedades de las partículas (Figura 45).

La redondez se refiere a la agudeza de las esquinas y los bordes de un grano. Redondez se definió por Wadell (1932) “Como la relación entre el radio medio de curvatura de las esquinas para el radio del mayor círculo inscrito”. Ya que por mucho tiempo para medir la redondez, se ha utilizado el método común de estimación de redondez; que es comparar visualmente granos de redondez desconocidos con imágenes estándar de granos de redondez conocido.

Esfericidad mide el grado en el que una partícula se aproxima a una forma esférica. Se define por Wadell (1932) “Como la relación entre el diámetro de una esfera con el mismo volumen que la partícula y el diámetro de la esfera circunscrita”. La esfericidad de una partícula se determina usualmente mediante la medición de las tres dimensiones lineales de la partícula (el más largo (L), intermedio (I) y diámetros más corta (S)).

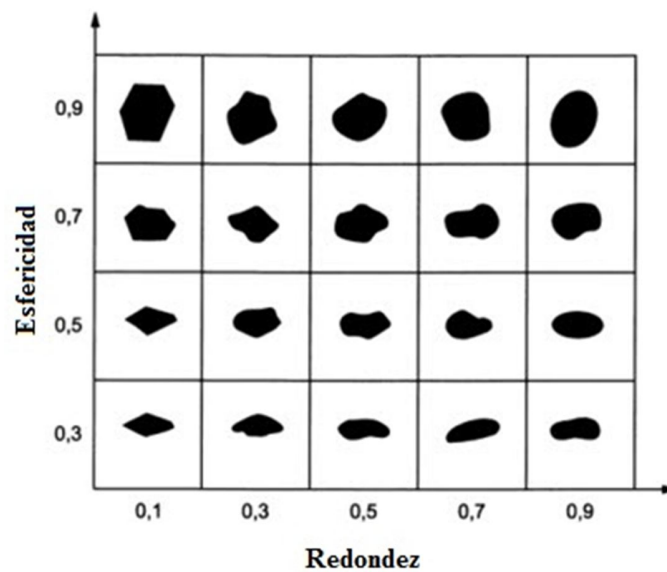


Figura 45. Carta de índice de esfericidad y redondez (Tomada y modificada de Krumbein y Loss, 1963)

3.4 ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE IMÁGENES

Este método se aplicó adicionalmente a 220 fotografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido y microscopía óptica. Así un total de 250 imágenes correspondientes a 20 granos que fueron analizados para cada muestra por medio del Software ImageJ.

El análisis digital de imágenes se ha convertido en una práctica común en los últimos años, junto a la aparición de computadoras más rápidas y modernas. Los programas para adquisición y análisis de imagen son ahora usados por geo científicos en una amplia variedad de

aplicaciones petrográficas que incluyen análisis de fábrica, textura, mineralogía y sobre todo porosidad.

3.4.1.- Análisis de imágenes petrográficas

Es una herramienta que permite procesar imágenes obtenidas a partir de escáner o microscopio mediante una cámara con la finalidad de cuantificar, caracterizar y describir rasgos petrográficos particulares (textura, mineralogía, fábrica, porosidad, permeabilidad, entre otros). El análisis de imágenes consiste simplemente en la captura de imágenes digitales y posteriormente el análisis de las propiedades de las mismas (Layman.J, 2002).

3.4.1.1.- *Procesamiento y digitalización de imágenes*

Una imagen es la representación visual de uno o varios objetos. Procesar imágenes significa manipular información dentro de la misma para hacerla más útil. El procesamiento digital de imágenes es un tipo específico de procesamiento realizado con un computador, donde la imagen debe ser convertida en forma numérica. Este proceso se conoce como digitalización de imágenes.

Según los creadores de la guía de usuarios del software Image J, IJ46r. El programa ImageJ, es de dominio público es un procesamiento de imágenes Java público, inspirado en NIH Image para Macintosh. Funciona bien como una applet en línea o como distribuciones descargables que están disponibles para Windows, Mac OS X y Linux. Puede mostrar, editar, analizar, procesar, guardar e imprimir imágenes en 8 - bit, 16 - bit, 32-bit. Puede leer los formatos de imagen incluso TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS. Sus fuentes de apoyo (e hiper-fuentes), son una serie de imágenes que comparten una misma ventana. Es multihilo, por lo que las operaciones que requieren mucho tiempo, como la lectura de archivos de imagen se pueden realizar en paralelo con otras operaciones. Puede calcular el área y las estadísticas de valor de píxel de selecciones definidas por el usuario. Puede medir distancias y ángulos. Puede crear histogramas de densidad y parcelas perfil de línea. Se soporta en funciones de procesamiento de imagen estándar, como la manipulación de contraste, nitidez, suavizado, detección de bordes y el filtrado de mediana. Realiza transformaciones geométricas como el

escalado, rotación y voltea. La imagen puede ser ampliada hasta una escala de 32:1 y abajo 1:32. Todas las funciones de análisis y de procesamiento están disponibles en cualquier factor de ampliación. El programa soporta cualquier número de ventanas (imágenes) al mismo tiempo, limitado sólo por la memoria disponible. Posee una calibración espacial disponible para proporcionar mediciones dimensionales del mundo real en unidades como milímetros. Densidad o calibración de escala de grises también está disponible.

El ImageJ fue diseñado con una arquitectura abierta que proporciona extensibilidad a través de plugins de Java. Plugins adquisición personalizada, análisis y procesamiento se pueden desarrollar utilizando ImageJ construido en el editor Java compilador. Escrito por el usuario, los plugins permiten resolver casi cualquier problema de análisis de procesamiento de imágenes.

Al ser software libre dominio público, un usuario ImageJ tiene las cuatro libertades esenciales definidos por Richard Stallman en 1986. (Tomado de <http://www.gnu.org/philosophy/stallman-kth.html>):

- La libertad de usar el programa, con cualquier propósito.
- La libertad de estudiar cómo funciona el programa, y cambiarlo para que haga lo que quieras.
- La libertad de redistribuir copias para que pueda ayudar al prójimo.
- La libertad de mejorar el programa, y poner sus mejoras a disposición del público, de modo que toda la comunidad se beneficie.

ImageJ fue desarrollado utilizando Mac OS X, su editor y compilador de Java, además del editor de BBEdit y la herramienta de construcción Ant. El código fuente está disponible gratuitamente. El autor, Wayne Rasband, es un voluntario especial en el ámbito nacional de la salud mental, Bethesda, Maryland, EE.UU. El proceso de digitalización divide la imagen en una red, cuadrícula o arreglo horizontal de regiones muy pequeñas llamadas píxeles. En la computadora es representada por esta red o bitmap, donde cada píxel ubicado en él es representado por su posición en la cuadrícula, referenciado por su número de fila (X) y columna

(Y). Por convención los pixeles son referenciados a partir de la posición izquierda más alta del bitmap, la cual es considerada la posición (0,0); es decir fila y columna cero (Figura 46).

Cuando una imagen es procesada por el analizador de imagen, la misma es examinada como una retícula pixelada, su brillo es medido y cuantificado. Estas mediciones resultan en un valor para el pixel, usualmente un entero, el cual representa el brillo u oscuridad de la imagen. Este valor es almacenado en el pixel correspondiente al bitmap de la imagen del computador.

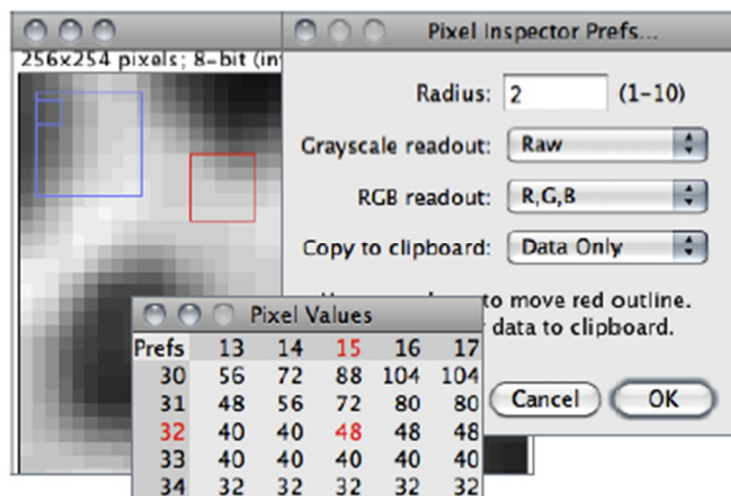


Figura 46. Tomado de Guía de usuario de ImageJ IJ 1.46r Tiago Ferreira _ Wayne Rasband (2012)

3.4.1.2-. Profundidad de Pixel

Dependiendo de la capacidad de medición del hardware y la complejidad de la imagen, cualquiera a partir de 1 a 32 bits, puede ser usado para almacenar cada valor de un pixel. Estos valores para imágenes artísticas de líneas (Figura 47), las cuales solo contienen información en blanco y negro, pueden ser representados por un solo bit: 0= negro, 1= blanco. Sin embargo, una imagen fotográfica contiene mucho más información, tomando 24 bits para representar todos los posibles colores que pueden ocurrir en una verdadera imagen a color. Dados 24 bits, más de 16 millones de colores pueden ser representados, mucho más de lo que el ojo humano puede diferenciar. El número de bits usado para representar el valor del pixel en una imagen es referido

como su profundidad, o bits-por-pixel (BPP: bits-per-pixel), el número de bits por pixel usado para representar el valor de cada pixel determina la clase de imagen.

Imagen bicolor (1 bit)

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	0	0	1
1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
1	0	0	0	1	1	0	0	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 47. Tomado de <http://forofotografiasalva.blogspot.com/2012/03/profundidad-de-pixel-o-profundidad-de.html>.

3.4.1.3-. Clases de Imágenes

Mientras la profundidad del “bit” nos dice cuántos colores únicos puede poseer una imagen no expresa realmente que colores están contenidos dentro de la imagen, esta puede ser: Bilevel, en Escala de Grises o Gray Scale, RGB, “Binarias y Palette”, entre otras.

Las imágenes Bilevel almacenan datos con 1 “bit-por-pixel” (1 BPP). Cada pixel es interpretado como completamente negro (0) o completamente blanco (1). Estas imágenes están comúnmente referidas a imágenes “Blanco y Negro”, “Line Art” o “Halftones” (medio tono). Los valores de un pixel en escala de Grises (Figura 48) representan el nivel de gris o brillo, los cuales van desde completamente negro a completamente blanco. Esta clase de imágenes es también referida algunas veces como monocromáticas. En una imagen de Escala de Grises de 8 “bits”, un “pixel” con un valor 0 es completamente negro y un pixel con un valor de 255 es completamente blanco. Un valor de 127 representa un color de gris exactamente en la mitad entre blanco y negro (gris medio), y un pixel con un valor de 64 posee un color gris entre gris medio y negro. Aunque las escalas de Grises con profundidades de “bits” de 2, 4, 6, 12 y 32 existen, las imágenes de este tipo más comunes son las de 8 BPP.

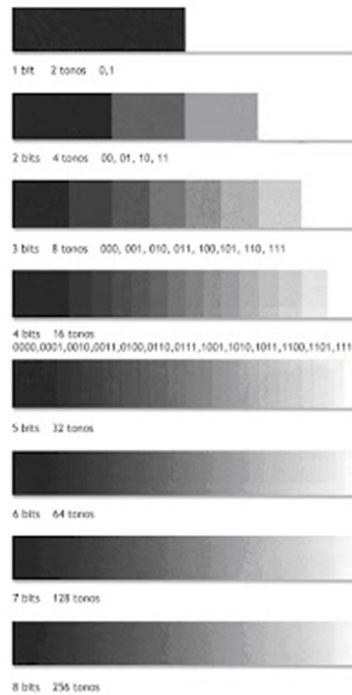


Figura 48. Tomado de <http://forofotografiasalva.blogspot.com/2012/03/profundidad-de-pixel-o-profundidad-de.html>

La imagen RGB (Figura 49) utiliza la forma más sencilla de representar imágenes a color. RGB es sinónimo de “Red, Green, Blue” (Rojo, Verde y Azul), los colores primarios de la luz. Debido al desarrollo de la fotografía a color y a la televisión de este tipo se conoce que cualquier color puede ser representado por una mezcla de niveles variantes de luz roja, negra y azul. RGB 24 es conocido como el verdadero color o “True Color”. Las imágenes binarias contienen solamente dos valores de intensidad, convencionalmente en el software de procesamiento de imágenes los pixeles “iluminados” (blancos u otro color) representan los objetos de interés, mientras que los pixeles off (negro) representan la parte inferior. Estas imágenes son a menudo el resultado de una segmentación, donde los pixeles se dividieron en dos categorías: los objetos de interés y el fondo. También poseen propiedades que permiten realizar operaciones tales como: rellenar agujeros y la reconstrucción a partir de dos imágenes. Los otros tratamientos principales aplicados a las imágenes binarias son las operaciones booleanas y las operaciones de morfología matemática.

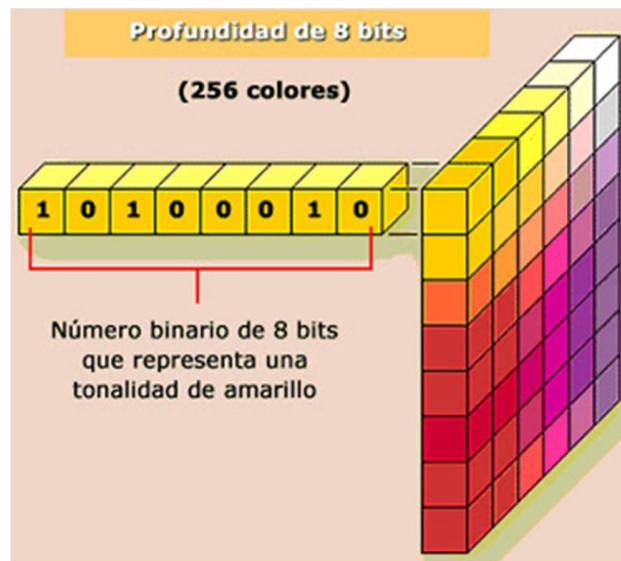


Figura 49. Tomado de <http://forofotografiasalva.blogspot.com/2012/03/profundidad-de-pixel-o-profundidad-de.html>

3.4.2.- Procedimientos y equipos para el Análisis de Imágenes Petrográficas

Los principios generales y procedimientos para el análisis de imágenes petrográficas, han sido bien establecidos por algunos autores como: Ehrlich, et al. (1984,1991 a, 1991 b), Ruyzla (1987), Anselmeti, et al (1993), entre otros.

3.4.2.1. Equipos

El sistema para el análisis de imágenes petrográficas, puede requerir de diversos dispositivos (Figura 50) dependiendo de la elección del analista y el propósito del estudio, como por ejemplo, equipo de Microscopia electrónica de barrido marca Philips, modelo XL30 EDAX y microscopio óptico modelo LABOPHOT-POL marca NIKON con cámara digital incorporada marca Celestron, modelo 44421. Además de estos dispositivos es necesario un computador equipado con el software para realizar el análisis de las imágenes.

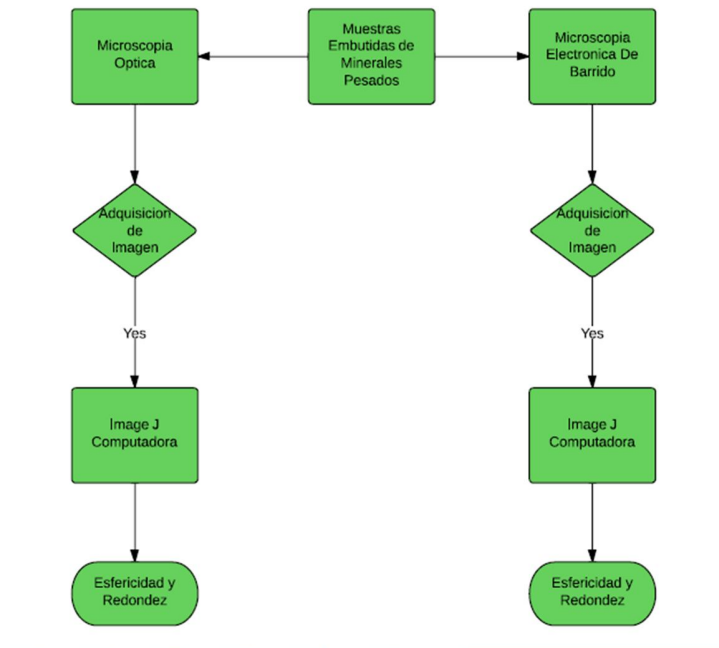


Figura 50. Diagrama de flujo mostrando el procedimiento con todo el sistema.

En términos generales, las imágenes son capturadas por el dispositivo y luego son transmitidas al computador, el cual debe estar equipado con el programa seleccionado para el sistema de análisis de imágenes. Si las imágenes son capturadas por la cámara conectada al microscopio, el aumento, la intensidad y polaridad de la luz deben ser estandarizadas, de modo que todas las muestras sean comparables entre sí. Las imágenes deberán ser guardadas en cualquier extensión JPEG, TIFF, etc.

3.4.2.1.1- Microscopio Óptico

La adquisición de imágenes en estos dispositivos tienen en común la ventaja de analizar diferentes campos de visión de manera más detallada, resaltando las propiedades ópticas de las muestras, la cámara Celestron colocada en uno de los oculares del microscopio Labophot Nikon, con un aumento de 10X. Con la finalidad de realizar la observación a las muestras embutidas que contienen los minerales pesados (Figura 51).

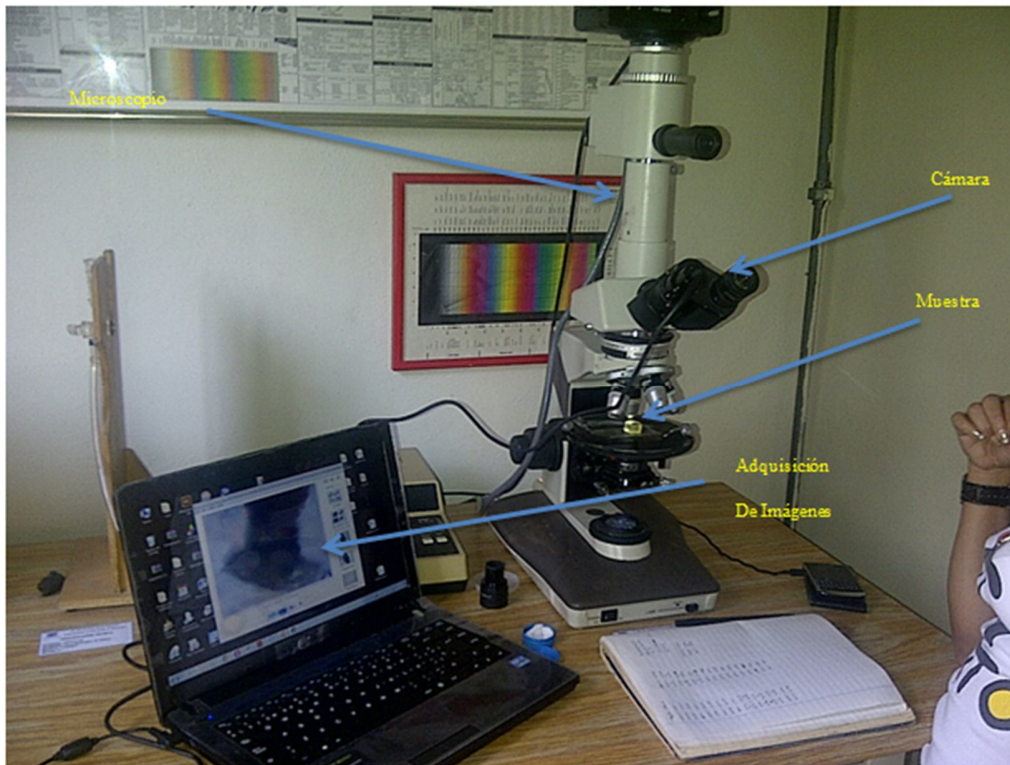


Figura 51. *Microscopio Labophot Nikon con Cámara Digital Incorporada Celestron*

3.4.2.1.2-. Microscopio Electrónico de Barrido

El principio del sistema SEM consiste en que si se hace incidir sobre la muestra un haz de electrones finamente enfocado, emite una señal que puede registrarse en pantalla mediante un tubo de rayos catódicos (Figura 52). Los componentes principales del microscopio de barrido SEM son los siguientes:

- **Fuente de energía** del microscopio electrónico de barrido depende de varios factores, siendo los más importantes el voltaje de aceleración, la intensidad de la corriente y el diámetro de haz. En unos de los puntos el haz de electrones es desviado 1,2,3...n veces por los campos magnéticos controlados por el generador de barrido. Como consecuencia el haz es movido sobre la superficie de la muestra y la señal es detectada por el colector de electrones.
- **Portamuestras.** La muestra montada sobre un soporte puede moverse en tres direcciones, ser calentada, enfriada, estirada, etc. dentro del instrumento. Para el estudio de ciertos tipos de muestras como metales, minerales, semiconductores, etc., se requiere

calefacción de la muestra. La calefacción puede conseguirse por medio de un hilo incandescente o calentando la muestra en un crisol aplicando directamente a la muestra corriente eléctrica.

- **Sistema de amplificación** Este sistema recoge las señales y procesa la información procedente de la muestra, al mismo tiempo que el haz de electrones barre la muestra. El generador de barrido está conectado al tubo de Rayos catódicos (TRC) para que el haz de electrones en este tubo sea barrido en la misma forma que, el haz principal. Las muestras fueron evaluadas en Microscopio Electrónico de Barrido, empleando un voltaje de aceleración de 20 Kv, en los modos de observación de electrones retro dispersados (BSE) y/o secundarios, además de realizarse análisis químico puntual de partículas mediante espectroscopia de rayos x por dispersión de energía (EDS).



Figura 52. Microscopio Electrónico Philips XL30 (EDAX)

3.4.2.1.3-. Preparación de la Muestra

La preparación de las muestras embutidas es un proceso muy importante. Es esencial que estas muestras contengan el mismo nivel de desbaste para así evitar que las imágenes capturadas sean borrosas, además no deben contener materiales extraños o contaminantes y burbujas atrapadas en el epoxico, debido a que estos agentes reducen el nivel de contraste entre granos y epoxico presentes en la petrografía.

3.4.2.1.4-. Adquisición de imágenes

Obtener imágenes desde un microscopio óptico y un microscopio electrónico de barrido, es una tarea sencilla, ya que las imágenes obtenidas nos permiten una visión general o parcial de las muestras embutidas con sus características más resaltantes, para posteriormente ser analizadas por el procesador de imágenes ImageJ (Figura 53a,b).

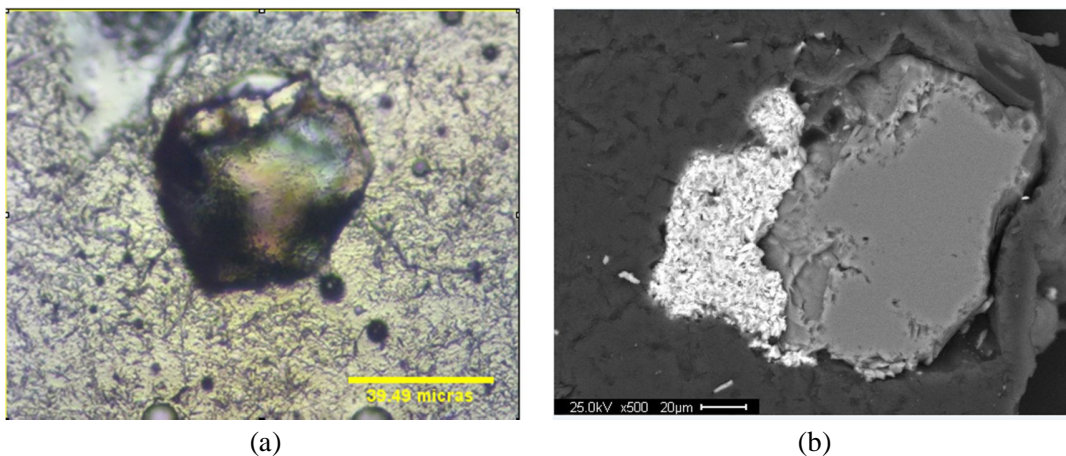


Figura 53. (a) Imagen Obtenida por Microscopio Óptico 150 X (b) Imagen Obtenida por el Microscopio Electrónico de Barrido

3.4.2.1.5-. Detección y análisis de las características de la imagen

Dependiendo de los rasgos petrográficos particulares que deseemos analizar (textura, mineralogía, fábrica, porosidad, permeabilidad, etc.), variara el proceso de detección y análisis de las mismas. En este caso particular analizaremos las morfologías de los granos, de 20 granos seleccionados de minerales pesados por cada muestra evaluada. Previamente capturada la imagen

de los granos analizados en Microscopía electrónica de barrido y los obtenidos en microscopía óptica.

3.5 PROGRAMA PARA ANÁLISIS DE IMÁGENES “IMAGEJ”

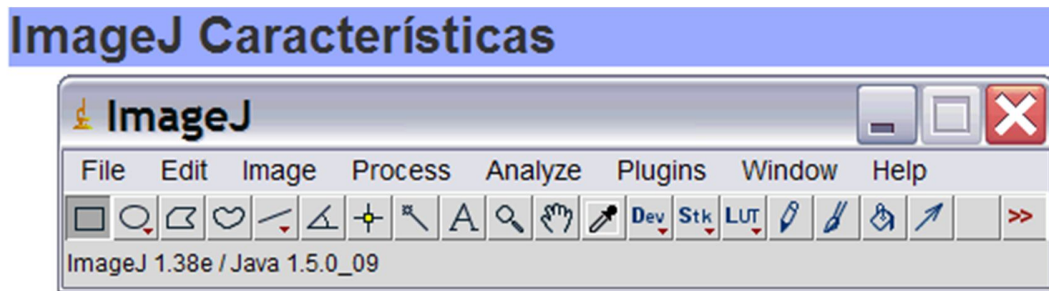


Figura 54. Tomado de <http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/index.html>.

ImageJ (Figura 54), es un programa que se ejecuta en todas partes, está escrito en Java, lo que permite que se ejecute en Linux, Mac OS X y Windows, tanto en el modo de 32 bits y 64 bits. Image J y su código fuente son de libre acceso y en el dominio público. No se requiere licencia. Macros automatizar tareas y crear herramientas personalizadas mediante macros, generar código macro utilizando la grabadora de comandos y depurar utilizando el depurador macro. Más de 300 macros están dispuestos en el sitio Web ImageJ.

Plugins, extiende ImageJ desarrollando plugins utilizando ImageJ de construido en un editor de texto y el compilador Java. Más de 500 plugins están disponibles.

Las herramientas de procesamiento, son un conjunto de herramientas de procesamiento de imágenes (Class Library) para desarrollar applets, servlets o aplicaciones.

Velocidad, es un programa de procesamiento más rápido del mundo puro Java Imagen. Puede filtrar una imagen de 2048*2048 en 0,1 segundos. Eso es 40 millones de píxeles por segundo.

Tipos de datos, 8 bits en escala de grises o indexada color de 16 bits entero sin signo de 32 bits en como flotante y color RGB.

Formatos de archivos, Abrir y cerrar todos los tipos de datos soportados como TIFF (sin comprimir) o como datos en bruto. Abrir y guardar GIF, JPEG, BMP, PNG, FITS y ASCII. Abra DICOM, Abrir archivos TIFF, GIF, JPEG, DICOMs y los datos brutos, utilizando una URL, abrir y cerrar muchos otros formatos utilizando plugins.

Visualizador de imágenes, herramientas se proporcionan para zoom (01:32 a 32:1) e imágenes de desplazamiento. Todos los análisis y las funciones de procesamiento funcionan en cualquier factor de aumento.

Selecciones, crear selecciones de área rectangular, elíptica o irregular. Crear selecciones en línea y el punto. Selecciones de edición crear de forma automática utilizando la herramienta varita. Dibujar, rellenar, limpiar, filtrar o medida selecciones. Guardar selecciones y transferirlos a otras imágenes.

Mejora de la imagen, soporta suavizado, nitidez, detección de bordes, filtrar la mediana y umbralización tanto en 8 bits en escala de grises y las imágenes de color RGB. Interactiva ajustar el brillo y el contraste de imágenes 8, 16 y de 32 bits.

Operaciones geométricas: Escala, cambiar el tamaño y rotar. Voltar verticalmente u horizontalmente.

Análisis, medir el área, media, desviación estándar, mínimo y máximo de la selección o la imagen completa. Medir longitudes y ángulos, usar unidades de medida del mundo real, tales como milímetros. Calibrar el uso de normas de densidad, genera histogramas y gráficos de perfil. Edición, Cortar, copiar o pegar imágenes o selecciones. Pegue con AND, OR, modos de mezcla o XOR añadir texto, flechas, rectángulos, elipses o polígonos a las imágenes.

Procesamiento de color, Dividir una imagen en color de 32 bits en componentes RGB o HSV. Combinar componentes de 8 bits en una imagen en color. Convertir una imagen RGB a color indexado de 8 bits. Aplicar paletas de pseudo-color para imágenes en escala de grises.

Pilas, Mostrar una pila de imágenes relacionadas en una sola ventana. Procesar toda una pila con un solo comando. Abra una carpeta de imágenes como una pila. Guarde las pilas como archivos TIFF multi-imagen.

Área, Número de píxeles en el objeto (menos los agujeros).

Perímetro, Longitud del contorno del objeto (no se considera contornos de los agujeros).

Orientación, Ángulo entre el eje horizontal y el mayor eje de la elipse equivalente al objeto (0-180 grados, contrario a las agujas del reloj).

Compacidad, Relación entre la superficie del objeto y el área de un círculo con el mismo perímetro, el valor de 1 corresponde a una esfera.

Diámetro Circular Equivalente, diámetro de un círculo con la misma área que la del objeto

Elongación, Relación entre el largo y el ancho del objeto, valores entre 0 y 1.

Elipticidad, Relación entre la superficie de una elipse (formada con el largo y ancho como ejes) y el área del objeto.

Rectangularidad, Relación entre el área de un rectángulo (formado como ancho y largo como lados) y el área del objeto.

Como abrir imágenes

Para abrir las imágenes en ImageJ hay al menos 2 caminos:

- Desde el menú File como en la mayoría de los programas seleccionamos Open y en el cuadro de dialogo elegimos la imagen que deseamos abrir (Figura 55).

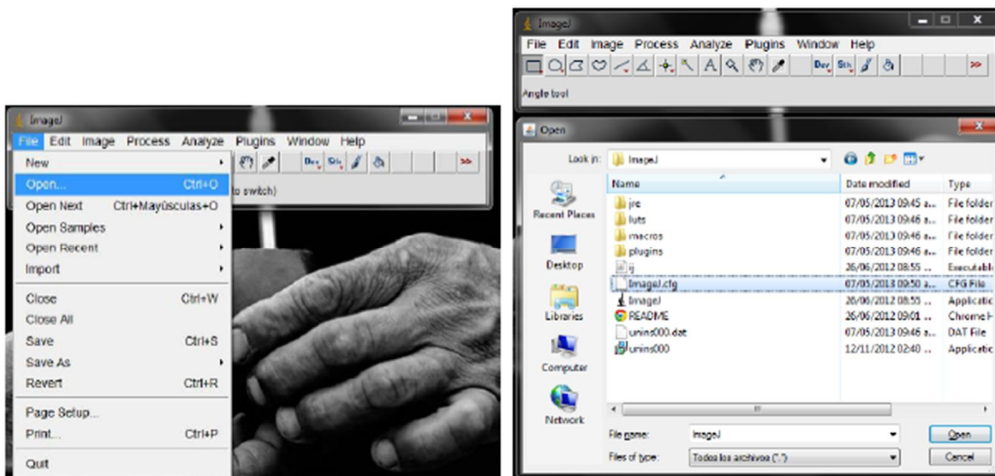


Figura 55. Abriendo desde el menú file. (Tomado de <http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/index.html>).

- Si tenemos abierto un explorador de archivos (Explorador de Windows) podemos hacer click con el botón izquierdo del mouse sobre el archivo y, mientras mantenemos apretado dicho botón, arrastrar la imagen y soltarla sobre la barra del Image J (donde dice Drag and Drop) (Figura 56,57).

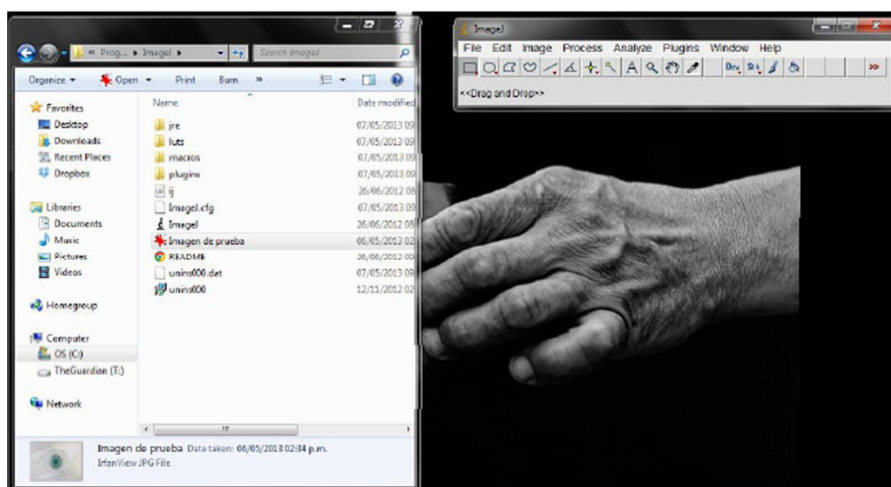


Figura 56. Abrir desde el explorador (Tomado de <http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/index.html>).

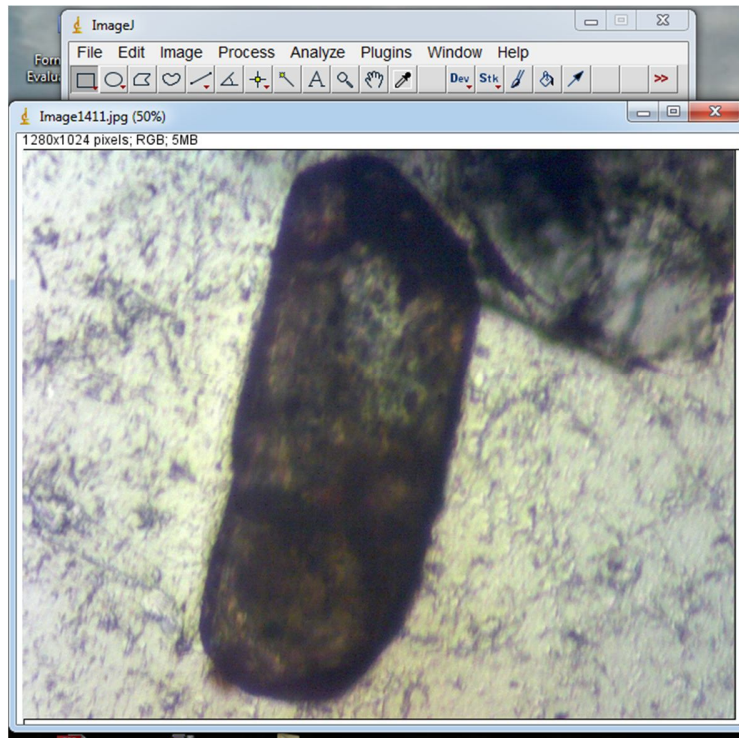


Figura 57. Abriendo una imagen por el archivo File.

Results																		
File	Edit	Font	Results															
Label	Area	Mean	StdDev	Mode	Min	Max	X	Y	Perim.	BX	BY	Width	Height	Major	Minor	Angle		
1	Image1236modif.jpg	2.309E5	2.550E2	0.000E0	2.550E2	2.550E2	2.550E2	6.495E2	3.790E2	2.381E3	2.980E2	6.850E2	6.770E2	6.140E2	7.790E2	3.774E2	3.481E1	
2	Image1236modif.jpg	7.000E0	2.550E2	0.000E0	2.550E2	2.550E2	2.550E2	4.704E2	4.493E1	1.107E1	4.680E2	4.600E1	5.000E0	2.000E0	4.934E0	1.806E0	1.653E2	

Results																		
r	Minor	Angle	Circ.	Feret	IntDen	Median	Skew	Kurt	%Area	RawIntDen	Slice	FeretX	FeretY	FeretAngle	MinFerret	AR	Round	Solidity
JE2	3.774E2	3.481E1	5.117E-1	8.487E2	5.887E7	2.550E2	NaN	NaN	1.000E2	5.887E7	1.000E0	3.270E2	9.390E2	4.237E1	4.004E2	2.064E0	4.844E-1	8.896E-1
4E0	1.806E0	1.653E2	7.177E-1	5.385E0	1.785E3	2.550E2	NaN	NaN	1.000E2	1.785E3	1.000E0	4.680E2	9.770E2	1.582E2	2.000E0	2.731E0	3.661E-1	8.235E-1

Figura 58. Calculo de las variables del grano analizado por Image J.

3.6 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA REALIZAR EL ANÁLISIS A LAS MUESTRAS CON EL PROGRAMA IMAGEJ.

3.6.1 Calibración de la técnica de análisis de imágenes

Previamente antes de utilizar la imagen digitalizada, se procedió a eliminar los elementos que no fueran importantes en el estudio, ya que se requería evaluar solo los granos del modelo, con el fin de calcular la esfericidad y la redondez. Se utilizó el programa paint, para eliminar todos los marcos, nombre de los ejes una vez limpio todo el modelo, se guardó o almacenó como imagen TIFF o JPEG. La Figura 45 fue analizada mediante el programa ImageJ, esto arrojó la Figura 59, y permitió distinguir si efectivamente el programa tiene la sensibilidad para discriminar la redondez y esfericidad. Este proceso es análogo al método visual sólo que en este caso se comparan datos de forma cuantitativa y no por percepción. Adicionalmente el análisis computarizado permite extraer información sobre la textura de los granos.

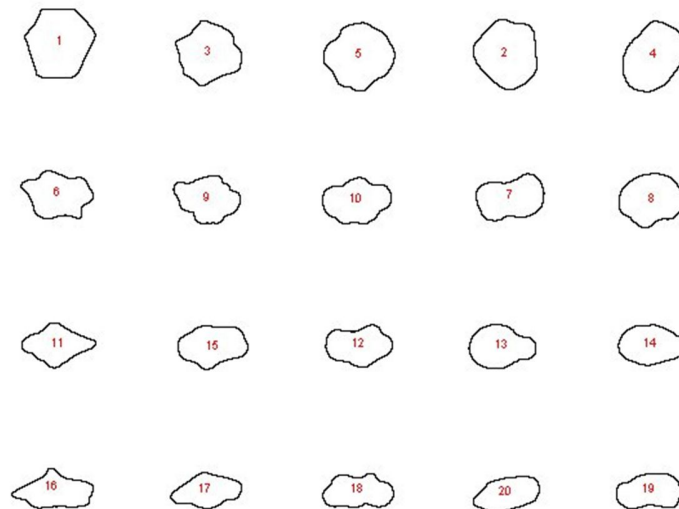


Figura 59. Resultado del análisis de grano realizado sobre la Carta de índice de esfericidad y redondez (Tomada y modificada de Krumbein y Loss, 1963)

3.6.1.1- Procedimiento para el análisis por el programa ImageJ.

- Para cada una de las muestras evaluadas se toma la imagen que fue capturada o adquirida previamente por los equipos; microscopio óptico Labophot Nikon o microscopio electrónico Philips XL30. Se lleva al programa Paint, para aislar al grano o granos a analizar por ImageJ (Figura 60).

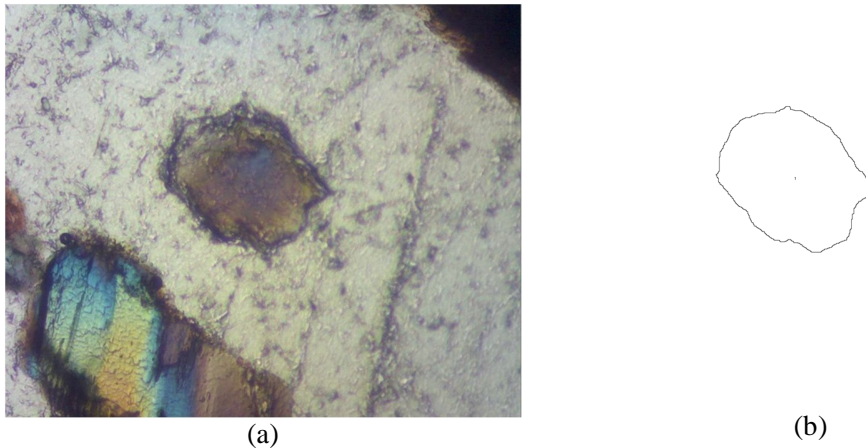


Figura 60. (a) Imagen Obtenida por Microscopio Óptico (b) Imagen tratada en Paint

- Como se muestra en la Figura 61, se ubica el mouse sobre Open y se despliega las ventanas donde está ubicado el archivo a tratar, se abre.

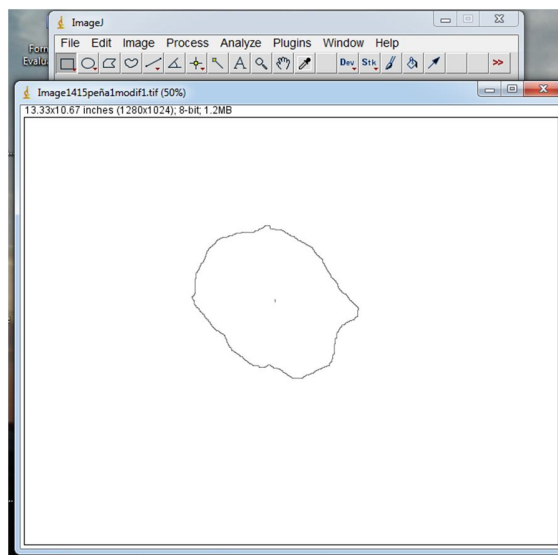


Figura 61. Imagen abierta por el ImageJ, para ser analizada.

- Una vez abierta la imagen se le da click sobre Edit y luego Invert (invertir imagen) (Figura 62).

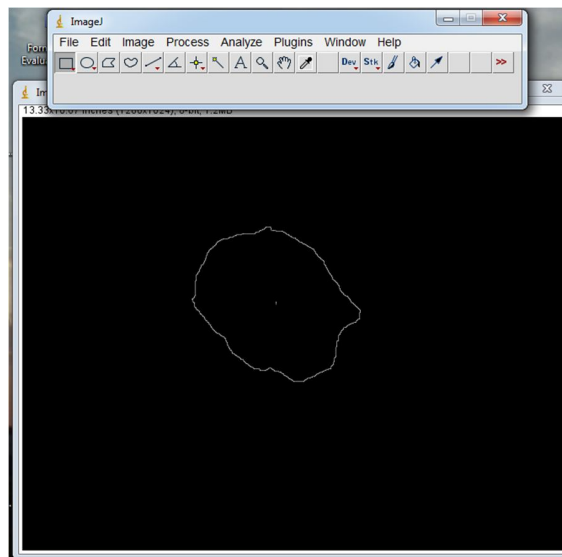


Figura 62. Imagen invert.

- Das click sobre Image y Type 8 bits, luego a Adjust Thershold y Apply (Figura 63).

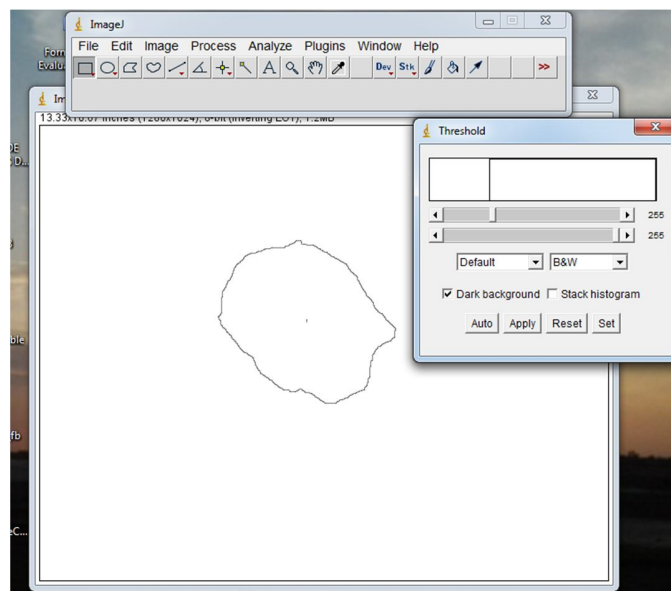
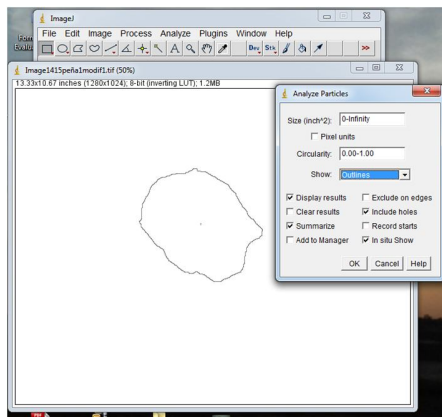
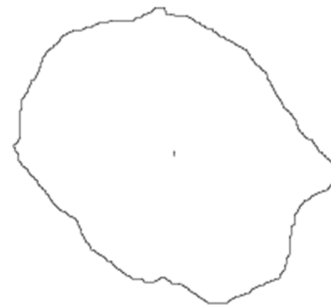


Figura 63. Imagen.

- Posteriormente le das click sobre Analyze y Analyze Particles, se despliega la ventana Analyze Particles, se selecciona outlines, para que considere el perímetro del grano y etiquete los granos (Figura 64a).
- Luego se le da clic a OK y se realiza el análisis del grano o los granos (Figura 64b,c).



(a)



(b)

Label	Area	Mean	StdDev	Mode	Min	Max	X	Y	Perim	BX	BY	Width	Height	Major	Minor	Ang	
1	Image1415pefa1modif1.tif	1.048E1	4.101E0	3.208E1	0.000E0	0.000E0	2.550E2	6.205E2	6.076E0	1.317E1	4.177E0	7.968E0	4.177E0	3.833E0	4.139E0	3.224E0	1.41

Inor	Angle	Circ.	Feret	IntDen	Median	Skew	Kurt	%Area	RawIndDen	Slice	FeretX	FeretY	FeretAngle	MinFeret	AR	Round	Solidity
224E0	1.408E2	7.599E-1	4.221E0	4.299E1	0.000E0	7.694E0	5.720E1	1.606E0	3.963E5	1.000E0	4.822E0	3.041E0	1.314E2	3.216E0	1.284E0	7.790E-1	9.515E-1

(c)

Figura 64. (a) Analyze Particles (b) Analyze Particles Ok (c) Resultados de Esfericidad y redondez.

3.7 ANÁLISIS MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).

El Microscopio Electrónico de Barrido (MEB o SEM) es un instrumento para obtener fotografías tridimensionales, ya que tiene una alta resolución y una gran profundidad de campo. En las fotografías se puede observar la ultraestructura de muestras microscópicas, detallando en gran manera sus características topográficas y morfológicas. También pueden ser observados cualquier organismo o material orgánico (crustáceos, parásitos, bacterias, hongos, tejidos, músculos, plantas, células, etc.) y materiales inorgánicos pinturas, papel, enlatados, plásticos, vidrios, aleaciones, metales, materiales electrónicos, geológicos, etc.).

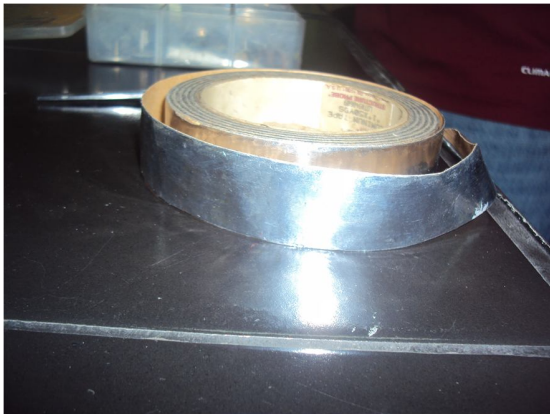
El analizador EDS (Espectrómetro de Dispersión de Energía) analiza las muestras a través del microscopio electrónico de barrido de rayos X, el cual identifica la distribución cuantitativa y cualitativa de elementos químicos que se encuentran presentes en la muestra, con gráficas e imágenes, también identifica y evalúa el contenido de elementos químicos, desde el carbono al uranio en secciones finas. Existen dos formas gráficas de obtener información de la señal de rayos X:

- Los perfiles de línea que permiten identificar gráficamente la variación de la concentración de uno o varios elementos entre dos puntos.
- Los mapas de RX sirven para ver gráficamente la distribución de los elementos en la zona seleccionada, asignando un color diferente a cada uno y ofrecen imágenes semicuantitativas de la concentración de los elementos mediante la densidad de puntos de un determinado color en la zona.

En general la preparación de la muestra se debe a la fijación, deshidratación y secado, donde la superficie debe ser conductora de corriente eléctrica. Esto se cumple en los metales y no en las muestras biológicas, por lo que estas se recubren con una capa de grafito o de oro, según las condiciones en las que se trabaje la muestra. Antes de tratar las muestras se debe tomar en cuenta el material a ser observado y guiarse por los parámetros específicos para cada muestra.

Montaje de las Ilmenitas y Magnetitas en los portaprobetas:

- Dicho montaje se realiza con la ayuda de teipe aluminizado para onducción eléctrica (Figura 65a), se agregan las ilmenitas y magnetitas sobre el teipe para ver la morfología (Figura 65b,c,d,e).
- Luego se llevan a la cámara de vacío del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), marca Phillips, modelo XL 30 PHILIPS (EDAX) (Figura 65f,g,h,i,j,k,l).



(a)



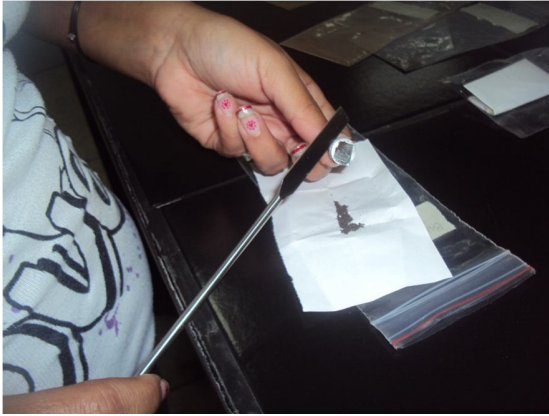
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



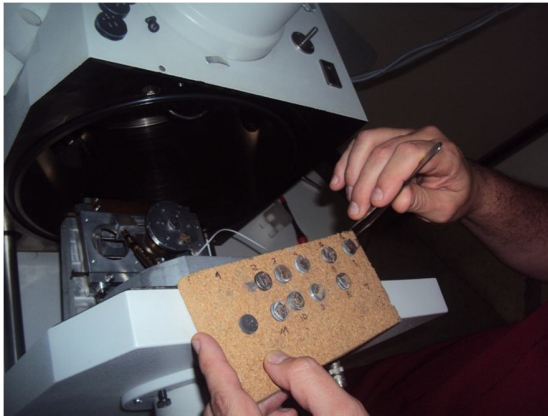
(h)



(i)



(j)



(k)



(l)



(m)

Figura 65. (a) Teipe utilizado como conductor y para mantener las muestras de Ilmenitas y Magnetitas. (b,c,d,e) Colocando las muestras de ilmenitas y magnetitas sobre el teipe. (f,g,h) Equipo de Microscopía Electrónica de Barrido existente en el Laboratorio de Microscopía Electrónica del I.U.T. R.C. "Dr. Federico Rivero Palacios". Profesor encargado Gustavo Castro. (i) Abriendo el equipo. (j,k) Colocando las muestras en el equipo para ser analizadas. (l) Posición de las muestras para el análisis.

- Las muestras embutidas se colocan con una gota de silicón para que no se muevan las pastillas (Figura 66a).
- Se les colocó teipe aluminizado a los lados de las pastillas (Figura 66b,c) para la conducción eléctrica y luego se llevó al portaprobetas para realizar el ensayo, pero como no fue efectivo, se tuvo que aplicar un recubrimiento conductor con una capa de Níquel de 5 nanómetros y a 80 ó 100 segundos, en el Equipo para Evaporización y Metalización BAL-TEC, SCD 050 SPUTTER COATER (Figura 66d,e,f).

- Luego se colocan las muestras en el equipo de Microscopía Electrónica de Barrido (Figura 66g).
- Por último se realiza el ensayo (Figura 66h).



(a)



(b)



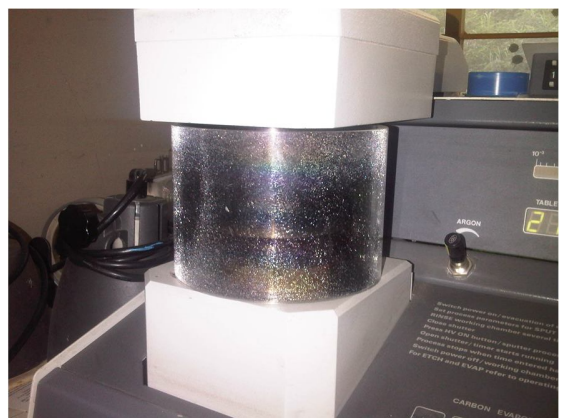
(c)



(d)



(e)



(f)

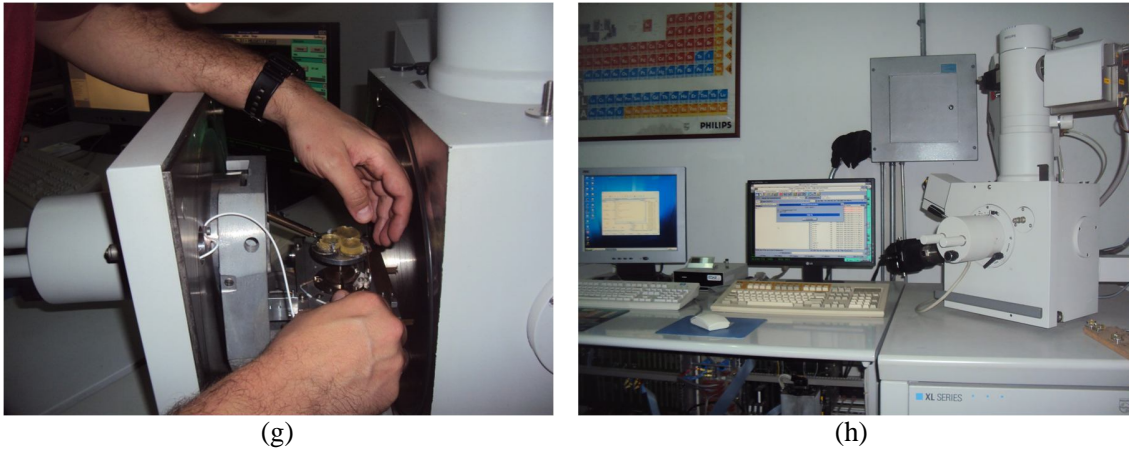


Figura 66. (a) Colocando las muestras embutidas (pastillas) en el portamuestras y fijándolas con silicón. (c) Muestras embutidas, haciéndola conductora con el teipe de aluminio. (d,e,f) Muestras embutidas, haciéndola conductora a través de recubrimiento de níquel. (g) Equipo de MEB XL 30 Philips. (h) Analizando las muestras.

3.8 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR DIFRACCIÓN LÁSER

El análisis granulométrico es la medición y graduación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios, así como de los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica (Lambe y Whitman, 1997).

Existen diversos métodos para la medición de partículas, entre los cuales destacan:

- Tamizado
- Sedimentación
- Electrozone Sensing (Coulter Counter)
- Difracción láser
- Microscopía

En este trabajo se emplea el análisis granulométrico vía difracción láser. Este sistema también se denomina “Low Angle Laser Light Scattering” (LALLS), se desarrolló hace unos 20 años (Rawle, 2006) y su método se basa en el factor de que el ángulo de difracción es inversamente proporcional al tamaño de la partícula. Un instrumento de estas características consiste en un láser como fuente de luz coherente con una longitud de onda fija. Los láseres de He-Ne son los más comunes, ya que proporcionan mayor estabilidad, especialmente con respecto a la temperatura, y una mejor relación señal – ruido, que los láseres de diodo que disponen de altas longitudes de onda. También cuenta con un detector apropiado, normalmente suele ser una estructura muy fina tipo diapositiva de sílice fotosensible, que dispone de un número de detectores discretos. En algunas técnicas, donde la intensidad de luz dispersada es muy baja, es necesaria la incorporación de un tubo foto multiplicador, junto con un correlador de señal para que tenga sentido la información descrita sobre el número de detectores. Se necesitan algunos medios de paso de la muestra a través del haz del láser, en la práctica es posible medir aerosoles de forma directa, únicamente haciéndolos pasar por dicho haz. Un polvo seco puede ser soplado a través del haz por medio de un compresor de presión y ser recogido con la ayuda de una aspiradora para evitar la contaminación ambiental. Las partículas en suspensión pueden ser medidas con la ayuda de un sistema de recirculación, que haga pasarlas al interior de la célula de medida, por donde pasa el haz del láser.

Los instrumentos antiguos y algunos actuales, sólo aplican la teoría de Fraunhofer que asume que una partícula es mucho más grande que la longitud de onda empleada, normalmente 5 veces; por lo tanto un equipo que disponga de un láser de He-Ne tendrá un límite inferior de medida de 3 micras aproximadamente. También asume que todos los tamaños de partícula dispersan luz con la misma eficiencia y que la partícula es opaca y no transmite luz. Estas suposiciones no son correctas para muchos materiales y además, para muestras con tamaños pequeños, pueden llegar a dar errores de hasta el 30%, especialmente cuando el índice de refracción relativo de la partícula y el medio está cercano a la unidad.

Cuando el tamaño de partícula se aproxima a la longitud de onda de la luz del láser, la dispersión provoca una compleja función con un máximo y un mínimo presentes. Los últimos instrumentos desarrollados incluyen el uso de la teoría “Mie”, que resuelve completamente las

ecuaciones por interacción de la luz con la materia. Esto permite una total seguridad y precisión de la medida en todo el intervalo de tamaño entre 0.02 y 3500 μm típicamente. La teoría "Mie", asume el volumen de la partícula en contraposición de la teoría de Fraunhofer, que implica una predicción del área proyectada. Algunos inconvenientes de esta técnica son:

- Se necesita conocer el índice de refracción, tanto de la partícula como del medio, y la parte de absorción del índice de refracción (absorbancia), o por lo menos suponerla.
- Es un método muy costoso y sofisticado.

Específicamente en este trabajo se empleó el equipo MASTERSIZER 2000 (MARVEL INSTRUMENT), este equipo ha sido diseñado para medir el tamaño de partículas, o más específicamente la distribución de tamaños de partículas de una muestra.

Varias teorías se han desarrollado dando como conclusión que si se conoce el tamaño de partícula y otros detalles acerca de su estructura, se puede predecir exactamente la forma en que este dispersa la luz. Cada tamaño de partícula tendrá su propio modelo de dispersión característico, el cual es diferente de cualquier otro tamaño de partícula (Figura 67).



Figura 67. Equipo Mastersizer 2000 existente en el Laboratorio Fisicoquímico del I.U.T. R.C. "Dr. Federico Rivero Palacios". Profesor encargado Jesús Batista.

Aplicación de la Técnica de Granulometría Láser (Master Sizer) (Figura 68a):

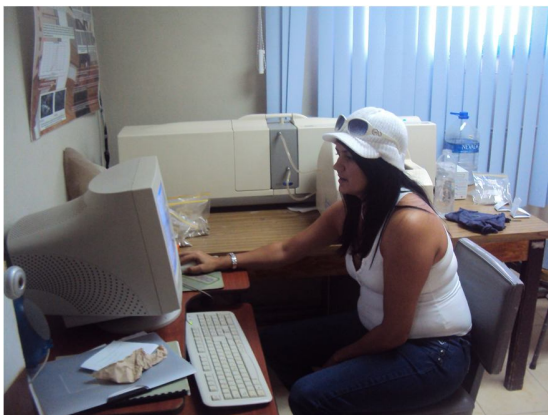
- Se configura la computadora con el usuario → SOP → arena con sílice para la preparación de las muestras, se toma el índice de refracción de las muestras, que es la mayor cantidad en cada muestra (Figura 68b,c).
- Se limpia el tanque con agua desmineralizada vía ultrasonido, se purga y luego se desgasifica y se bombea (Figura 68d,e).
- Se mide de 2000 a 20 μm con láser y luego con una luz blanca para los más finos.
- Luego de calibrar e identificar en la computadora se toma directamente la muestra con una espátula y se coloca en el agua hasta tener un porcentaje mayor a 10 y menor a 20 de oscuración (paso de luz con las partículas) (Figura 68f,g,h,i).
- Luego se pulsa "START", se realiza el ensayo y al terminar se limpia nuevamente el mastersize, esto se hace con cada muestra.



(a)



(b)



(c)



(d)



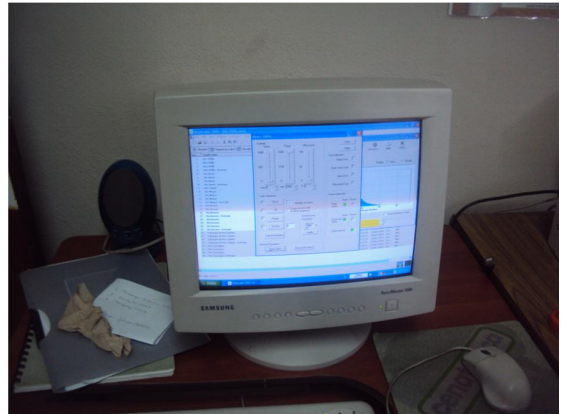
(e)



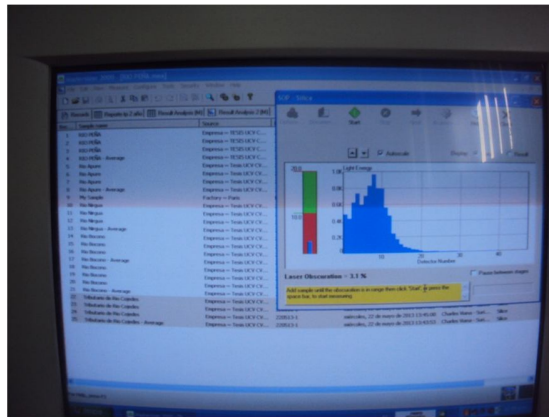
(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 68. (a) Equipo Master Size para realizar la Técnica de Granulometría Láser. (b,c) Configuración de la máquina. (d,e) Limpiando, purgando, desgasificando y bombeando el Master Size. (f,g) Agregando la muestra para comenzar el ensayo. (h,i) Analizando la muestra.

3.9 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Los Rayos X, son radiaciones electromagnéticas transversales, como la luz, pero de una longitud de onda mucho más corta. Es difícil fijarles con precisión un dominio. Sin embargo, los Rayos X utilizados en Radiocristalografía tienen longitudes de ondas ubicados en el intervalo de 0,5 Å a 2,5 Å (1 Å (Angstrom)= 10^{-8} cm, o 10^{-4} micrones).

La energía radiante se manifiesta bajo uno de sus dos aspectos complementario: aspecto ondulatorio y aspecto corpuscular. Es ventajoso considerar esa energía como onda, caracterizada por una longitud de onda (Figura 69).



Figura 69. *Equipo para difracción de rayos X utilizado en este trabajo*

La única fuente de intensidad suficiente para ser utilizada en la práctica es el impacto de rayos catódicos, es decir, electrones a gran velocidad contra un sólido. Ello se logra dentro de un tubo al vacío denominado Tubo de Rayos X; el cual está formado básicamente por una fuente de electrones llamado CÁTODO, y un rejilla denominada ANTICÁTODO; entre los dos se genera una enorme diferencia de potencial, con el fin de imprimirle a los electrones la velocidad necesaria para chocar con el anti-cátodo y generar así los Rayos X, eso significa que el anti –

cátodo al recibir esa cantidad de energía se calentará, por lo que es necesario que ellos sean conformado por metales refractarios o de elevada conductividad térmica (Figura 70).

El anti – cátodo más común es el de Cobre (Cu), cuya longitud de onda de sus electrones (λ) es igual a 1,54178 Å.

Cuando un haz de Rayos X incide según un ángulo θ sobre una sustancia cristalina (Figura 70), se produce, entre muchos fenómenos de difracción, es decir rayos reflejados que interfieren entre ellos de manera constructiva.

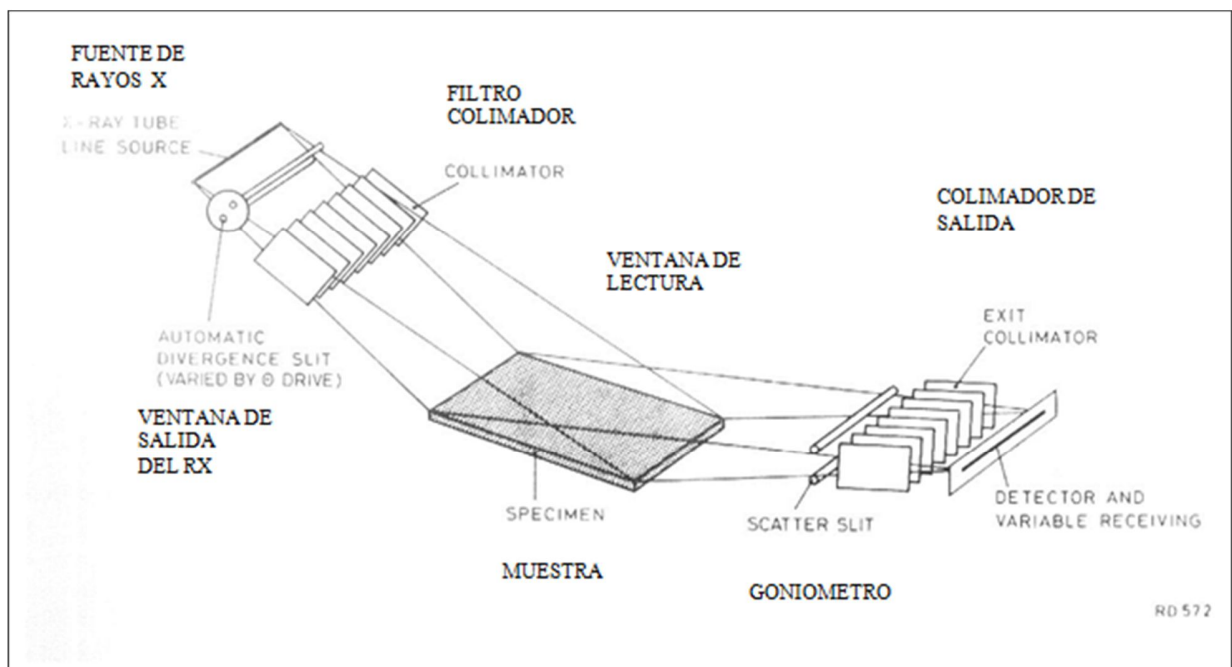


Figura 70. Diagrama de Difractor de Rayos X (Tomado y modificado de Guía de trabajo práctico de Rayos X. IUT Región Capital, profesor Jesús Batista,)

Metodología:

- La preparación de las muestras se realiza con una trituración a través de un mortero de ágata, hasta pulverizarlas (Figura 71a,b,c).

- Después se colocan las muestras en los porta muestras de aluminio del equipo (Figura 71d,e), se ponen al ras del mismo con un vidrio (Figura 71f,g,h), quedando como se muestra en la Figura 71i.
 - Luego se llevan al equipo Difractómetro de RX, (PW 1729 X-RAY GENERATOR) (Figura 71j).



(a)



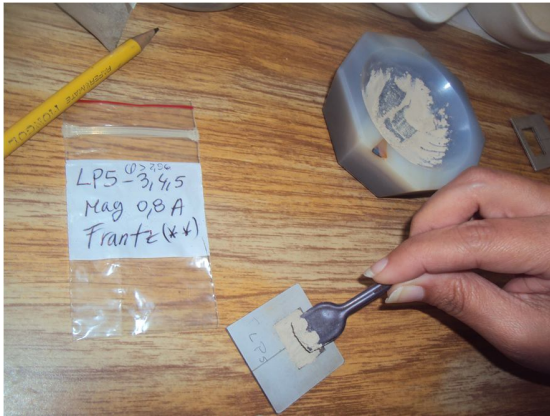
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 71. (a,b,c) Trituración o pulverización de la muestra, porta muestras y mortero. (d,e,f,g,h) Preparación de las muestras. (i) Muestras preparadas (j) Equipo de Análisis de Rayos X.

- Una vez colocadas las muestras en el Difractómetro de RX se pulsan los botones “SHUTTERS” y “O” para abrir el difractómetro (botones en el lado inferior izquierdo) y colocar las muestras (Figura 72a,b,c).
- Luego se cierra y se pulsa de nuevo el botón “SHUTTERS” pero esta vez juntamente con el botón “T” para encender el equipo y comenzar (Figura 72a).
- En el Graficador-Difracción de Rayos X, se llena el nombre del operador y el nombre de la muestra (Figura 72d).
- En el PW 1840 DIFRACTOMETER CONTROL se pulsa el botón “START” (Figura 72d). Se espera como 25 minutos aproximadamente que se haga el análisis en el difractómetro (Figura 72e).
- Una vez que se obtengan los análisis se comienza a hacer las comparaciones con las fichas PDF de International Center for Diffraction Data (ICDD) (2007), dependiendo de los tipos de minerales obtenidos en el análisis.



(a)



(b)



(c)



(d)

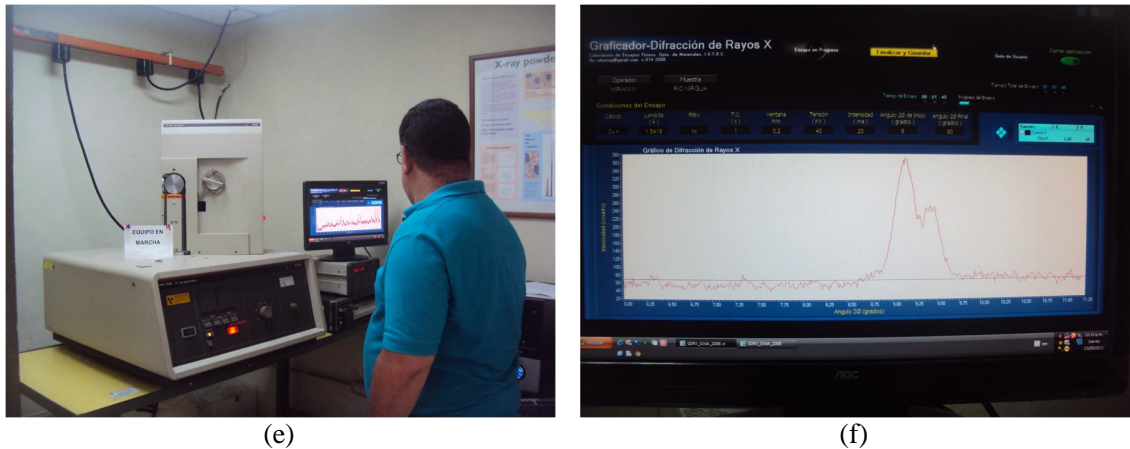


Figura 72. (a) Botones del Difractómetro. (b) Abriendo el difractómetro. (c) Colocando la muestra para ser analizada. (d) Controles para comenzar el análisis. (e,f) Analizando las muestras y resultados.

3.10 GEOMORFOLOGÍA CUANTITATIVA

La geomorfología, en sus inicios, era una ciencia que se basaba principalmente de la observación directa de los efectos y procesos que ocurren en la superficie terrestre. En la actualidad esta ciencia ha desarrollado métodos y técnicas computacionales que permiten extraer aún una mayor cantidad de información que la derivada de simples observaciones, lo cual se resume en la llamada *geomorfología cuantitativa* (Wood, 1996).

Hoy en día, el campo de la geomorfología abarca una gama muy amplia de diferentes enfoques e intereses. Los investigadores modernos pretenden sacar "leyes" cuantitativas que rigen los procesos de la superficie terrestre, pero igualmente, reconocen la singularidad de cada paisaje y el entorno en el que operan estos procesos. Algunos hechos particularmente importantes fueron tomados de la geomorfología contemporánea, los cuales son:

- Que no todos los paisajes pueden ser considerados "estable" o "perturbado", donde este estado perturbado es un desplazamiento temporal fuera de alguna forma ideal. En su lugar, los cambios dinámicos del paisaje se ven ahora como una parte esencial de su naturaleza (Whipple, 2004; Allen, 2008).

- Que muchos sistemas geomórficos se entienden mejor en términos de la aleatoriedad de los procesos que tienen lugar en ellos, es decir, las distribuciones de probabilidad de las magnitudes de eventos y los períodos de retorno (Benda y Dunne, 1997). Esto, a su vez, ha señalado la importancia del determinismo caótico de los paisajes, y que las propiedades del paisaje sean mejor representadas estadísticamente (Dietrich et al., 2003). Así, los mismos procesos en los mismos paisajes no siempre conducen a los mismos resultados finales.

Así, uno de los objetivos de la geomorfología cuantitativa es encontrar las expresiones matemáticas que faciliten entender los procesos naturales que dan origen a las diferentes geoformas presentes en el paisaje (Mayer, 1990). Cuando estos cálculos se realizan a partir de modelos digitales de elevación (MED) o modelos numéricos del terreno (MNT), el procedimiento es llamado *análisis digital del terreno* (Wilson y Gallant, 2000). En el presente Trabajo Especial de Grado se han realizado una serie de cálculos matemáticos comprendidos por la técnica de geomorfología cuantitativa y las técnicas de análisis digital del terreno usando el programa *ArcGis 10.0*. Dichos cálculos y las expresiones matemáticas utilizadas serán descritos en el próximo capítulo.

IV. GEOMORFOLOGÍA CUANTITATIVA

4.1 ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO

El análisis digital del terreno (Wilson y Gallant, 2000) consiste en la aplicación de una serie de fórmulas o expresiones matemáticas que son aplicadas a un modelo de elevación digital (MED) o modelo numérico del terreno tomando en cuenta datos recolectados en campo o datos existentes para el área de estudio. Estas fórmulas permiten el análisis y la predicción de diferentes procesos que afectan el paisaje.

La técnica es muy útil ya que permite además de trabajar a diversas escalas (Figura 73), integrar procesos que han ocurrido a diferentes intervalos de tiempo. Muchos de los procesos bio-geo-físicos importantes que operan sobre o cerca de la superficie de la tierra están influenciados tanto por procesos anteriores, como por los actuales, las interacciones entre ellos y los cambios en las condiciones iniciales (Dietrich et al. 1992, Grayson et al. 1993, Montgomery y Dietrich 1995). Estas interrelaciones son complicadas y se puede entender mejor gracias al modelado numérico (Kirkby et al. 1996). Los límites que separan diferentes escalas espaciales y temporales no son muy claros y pueden variar con los procesos y/o paisajes involucrados de forma individual (Sivapalan y Wood 1986, Mackey 1996, Malanson y Armstrong, 1997).

Todo esto hace necesario que se identifique las escalas espaciales y temporales y los factores que influyen o controlan los procesos y patrones que operan a diferentes escalas. Los beneficios potenciales pueden ser sustanciales. Dos estudios independientes y desde ámbitos científicos diferentes, el de Schaffer (1981), el cual trabajó con sistemas interactivos de la población en la comunidad ecológica y el de Phillips (1986), basado sobre ejemplos en geomorfología fluvial, demostraron que ambos procesos son claves para entender la evolución de un mismo paisaje, ya que operan en escalas de tiempo diferentes y pueden ser considerados independientemente uno de otro.

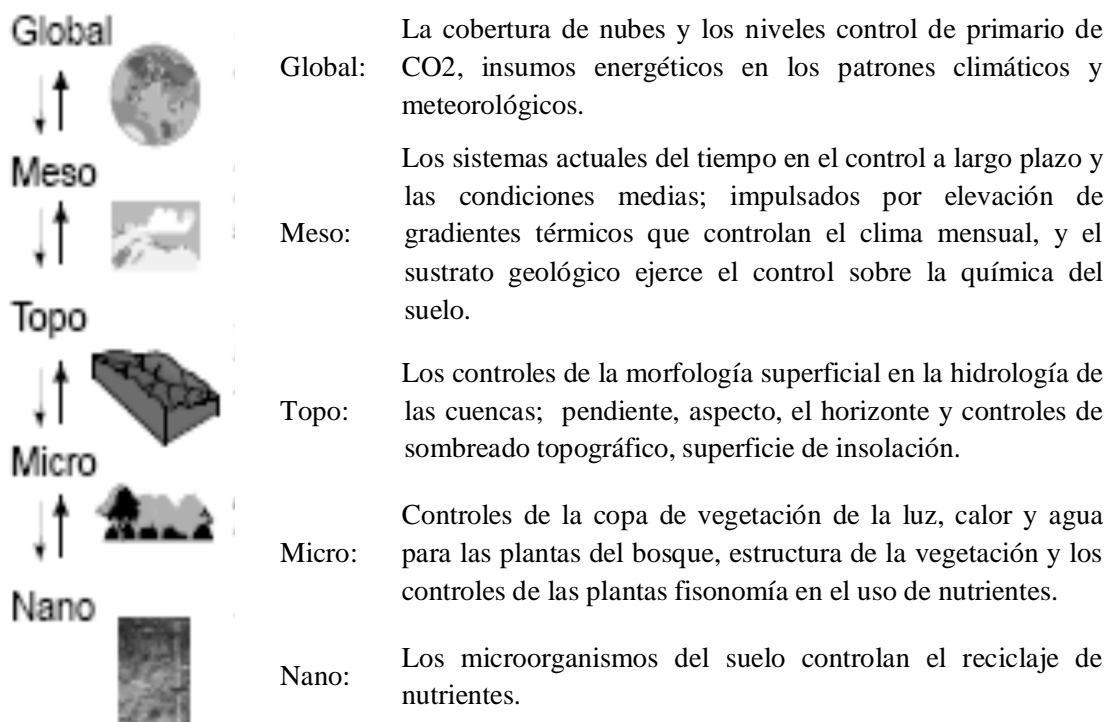


Figura 73. Escalas en la que varios procesos biofísicos dominan el cálculo primario de regímenes ambientales. (Tomado de Mackey (1996))

La mayoría de las investigaciones hidrológicas, geomorfológicas y ecológicas del siglo se han llevado a cabo en escalas globales, micro y nano (Figura 73). Las escalas meso y topo han recibido mucho menos atención, y sin embargo, estas escalas son importantes debido a que muchas de las soluciones a problemas para el medio ambiente, tales como la erosión acelerada del suelo y la contaminación no puntual, requieren cambios en las estrategias de gestión en estas escalas del paisaje (Moore y Grayson 1991). La influencia del sustrato geológico en la química del suelo (por ejemplo, Likens et al. 1977) y el impacto de los sistemas meteorológicos predominantes sobre altas elevaciones la cual deja sin efecto los estimados climáticos promedios mensuales (Daly et al. 1994, Hutchinson 1995) ejemplifican algunos de los controles que operan a nivel de escala meso. La influencia de los morfología de la superficie sobre hidrología de cuencas y el impacto de pendiente, aspecto y sombreado del horizonte de insolación representan probablemente la operación más importante de los controles en la escala topo. Numerosos estudios han demostrado que la forma de la superficie de la tierra, puede

afectar a la migración lateral y la acumulación de agua, sedimentos y otros constituyentes (por ejemplo, Moore et al. 1988a). Estas variables, a su vez, influyen en el desarrollo del suelo (por ejemplo, Kreznor et al. 1989) y ejercer una fuerte influencia sobre la distribución espacial y distribuciones temporales de la luz, el calor, el agua y los nutrientes minerales requeridos por la fotosíntesis de las plantas (Mackey 1996). La creciente popularidad de los trabajos en estas dos escalas intermedias durante la última década ha aprovechado la creciente disponibilidad de modelos de alta resolución, en este caso los datos continuos de elevación digital y el desarrollo de nuevas herramientas en análisis computarizados de terrenos (Wilson 1996, Burrough y McDonnell, 1998, Wilson y Burrough, 1999).

4.2 DATOS DE ELEVACIÓN

La mayoría de los datos digitales disponibles, en la actualidad, conjuntos de modelos de elevación son el producto captura de datos de la fotogrametría (Moore et al. 1991). Estas fuentes se basan en la interpretación estereoscópica de fotografías aéreas o imágenes de satélite las cuales son solapadas manualmente utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) o estereo-trazadores automáticos (Carter 1988, Weibel y Heller 1991). La elevación puede ser adquirida por la digitalización de las líneas de contorno en los mapas topográficos y la realización de estudios sobre el terreno. La aparición y el uso generalizado de Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en la cartografía, geodesia y otras áreas, ofrece muchos ajustes nuevos y asequibles oportunidades para la obtención de un gran número de usos específicos (Fix y Burt 1995, Twigg 1998, Wilson 1999a).

Estos datos digitales de elevación se organizan generalmente en una de tres estructuras de datos: (1) mallas regulares, (2) redes irregulares trianguladas y (3) contornos o curvas de nivel, dependiendo de la fuente y/o método preferido de análisis (Figura 74). Los modelos de mayas regulares o de red son llamados modelos de elevación digital (MED), y se han convertido en la estructura de datos más usada en la última

década debido a su simplicidad (es decir, las matrices sencillas de elevación que registran las relaciones topológicas entre los puntos de datos implícitamente) y facilidad de implementación en la computadora (Moore et al. 1991, 1993, Wise, 1998). Estas ventajas numéricas, a su vez se convierten en tres desventajas, en cuanto a capacidades de cómputo científico y de almacenamiento de datos. En primer lugar, el tamaño de la malla de rejilla a menudo afecta los requisitos de almacenamiento, la eficiencia computacional, y la calidad de los resultados (Collins y Moon 1981, Moore et al. 1991). En segundo lugar, las rejillas cuadradas no pueden fácilmente adaptarse a cambios bruscos en la elevación y con frecuencia, se saltan importantes detalles de la superficie de la tierra en zonas planas (Carter, 1988). Sin embargo, vale la pena destacar que muchos de los problemas en las zonas planas, se producen porque los servicios geológicos o personas que se encargan del levantamiento de los persisten en registrar las elevaciones en datos de tipo enteros. Adicionalmente, las trayectorias calculadas pendiente arriba de canales de flujo tienden a zigzaguear a través del paisaje y aumentar la dificultad de calcular con precisión áreas específicas de captación (Zevenbergen y Thorne, 1987; Moore et al., 1991). Varios de estos obstáculos se han superado en años recientes. Por ejemplo, no hay ninguna razón genérica por la cual los MED regulares no puedan representarse bien en áreas planas, siempre y cuando los atributos del terreno sean calculados mediante métodos que respeten el drenaje superficial (Hutchinson 1988, 1989b). De manera similar, el advenimiento de varias nuevas técnicas de compresión de datos ha reducido los requisitos de almacenamiento y mejorado la eficiencia computacional en los últimos años (por ejemplo, Kidner y Smith, 1992; Lewis y Smith 1994). Los MED con tamaños de malla de 500, 100, 30, 10, y hasta 1 m son cada vez más disponible para diferentes partes del mundo (USGS, 1993; y Hutchinson, 1996). Las redes trianguladas irregulares (TIN) también han encontrado un uso extendido (por ejemplo, Tajchman 1981; Jones et al., 1990; Yu, 1997). Los TIN se basan en elementos triangulares (Facetas) con vértices en los puntos de muestra (Moore et al., 1991). Estas facetas consisten en planos que unen los tres puntos adyacentes en la red y son generalmente construidos utilizando el método de triangulación Delaunay (Weibel y Heller, 1991). Lee (1991) Compara diversos métodos para la construcción de TIN a partir de MED reticulados. Sin embargo, el mejor TIN son las muestras de puntos superficiales específicos, tales como picos, crestas y

saltos en la pendiente, y formar una red irregular de puntos almacenados como un conjunto de los valores X, Y, y Z junto con punteros a sus vecinos en la red (Moore et al. 1991). Los TIN pueden incorporar fácilmente discontinuidades y puede constituir estructuras de datos eficientes debido a que la densidad de los triángulos se puede variar para que coincida con la rugosidad del terreno (Moore et al., 1991). Esta disposición puede anular el almacenamiento adicional que se incurre cuando las relaciones topológicas se calculan y se registran de forma explícita (Kumler, 1994). La tercera estructura incorpora el concepto de redes basadas en analogías de trayectorias de corrientes o "*Stream-Path Analogy*" por primera vez por Onstad y Brakensiek (1968) el cual divide los paisajes en polígonos pequeños, de forma irregular (Elementos) en base a las curvas de nivel y sus ortogonales. Esta estructura se utiliza con más frecuencia en aplicaciones hidrológicas porque puede reducir la complejidad de ecuaciones de flujo en tres dimensiones, ya que incorpora una serie acoplada de ecuaciones en una dimensión para el caso de zonas topográficamente complejas (Moore y Foster 1990; Moore y Grayson 1991; Grayson et al., 1993).



Figura 74. Estructura de las redes de datos: a) regular de la red, b) una red irregular triangular c) Red basada en el contorno (Tomado de Moore, Grayson y Ladson, 1991).

La proliferación de las fuentes digitales de elevación y las herramientas de pre-procesamiento significa que la elección inicial de la estructura de datos no es tan importante como lo era antes (Kemp 1997a, b). Numerosos métodos se han propuesto para convertir los datos digitales de la elevación de una estructura a otra, aunque se debe tener cuidado con cada uno de estos métodos para minimizar los efectos no deseados (Krajewski y Gibbs, 1994). Además, mientras más grande sea la cantidad de datos incorporados no necesariamente se producen mejores resultados.

Carrara et al. (1997). Compararon varios métodos para la generación de MED a partir de líneas de contorno, sin embargo, la gama de tipos de terreno, las estructuras de la muestra, y el modelado de las rutinas es tan grande que los intentos de hacer generalizaciones acerca de las "mejores" modelos resultó muy difícil (Burrough y McDonnell 1998; Dixon et al. 1998; Wilson 1999b). Además, algunos de los métodos de interpolación que se han propuesto son difíciles de usar. Así, Eklundh y Martensson (1995) recomendó que usuarios con menos experiencia se centraran en la calidad de los datos de entrada, en lugar de aprender sofisticado métodos de interpolación. Aunque con la simplificación de los métodos de interpolación se obtendrán resultados satisfactorios siempre y cuando los datos de entrada estén bien muestreados. La Figura 75, muestra diferentes tipos de muestreo de los datos de elevación y los modelos de elevación digital producidos para cada uno de ellos.

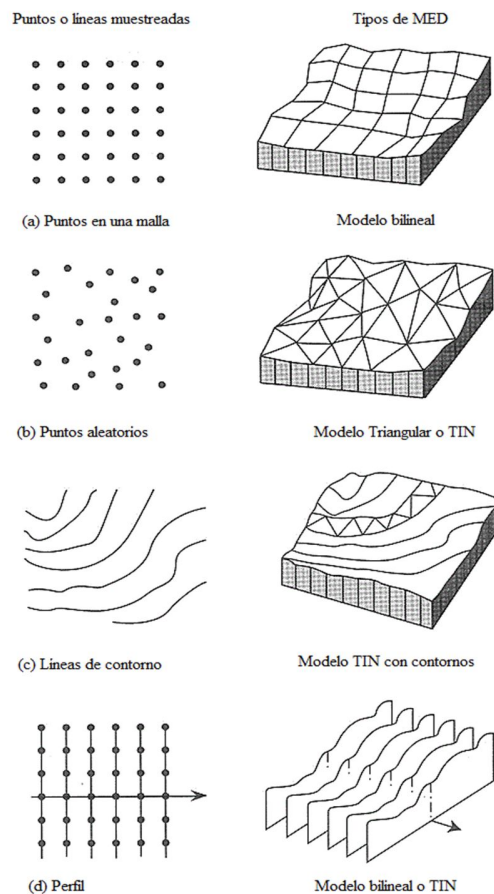


Figura 75. *Diferentes tipos de MED generados de acuerdo a la filosofía de muestreo de los datos de elevación digital*

La Figura 76a muestra los contornos como una serie de líneas que conectan puntos de igual altitud, la Figura 76b representa un MED derivado de las curvas de nivel para la Figura 76a, la Figura 76c es el Modelo TIN derivado de las curvas de nivel para el mismo modelo y la Figura 76d representa el modelo derivado de las curvas de nivel, en perspectiva.

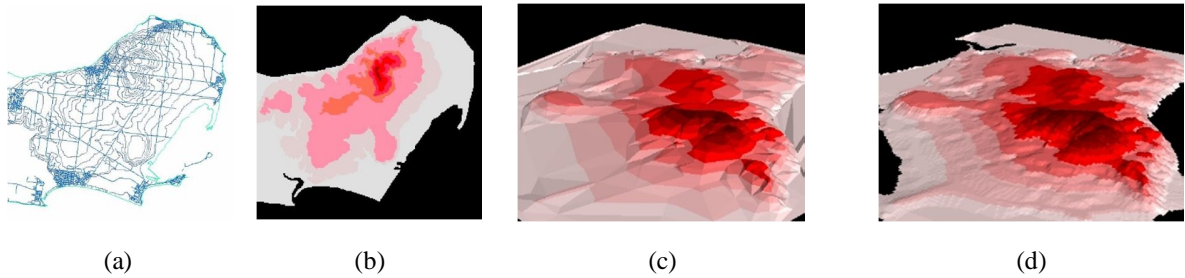


Figura 76. (a) Mapa de curvas de nivel (contornos), (b) MED derivado de las curvas de nivel, (c) Modelo TIN derivado de las curvas de nivel, (d) modelo derivado de las curvas de nivel, en perspectiva (Tomado y modificado de página web del Dr. Shunji Murai, <http://cret.cnu.edu.cn/syxx/content/giswb/vol2/contents.htm>)

4.3 UTILIDADES DE LOS MED

Los MEDs se pueden utilizar para:

1. Determinar atributos del terreno, como es el caso de la altitud en cualquier punto, la pendiente o la orientación.
2. Encontrar elementos del terreno tales como cuencas de drenaje, divisorias de agua, redes de drenaje y canales, cumbres y depresiones, y otros accidentes del terreno.
3. Modelar funciones hidrológicas, flujos de energía o fuegos forestales.

La Figura 77 muestra algunos tipos de cálculos que se puede hacer a partir de los MED.

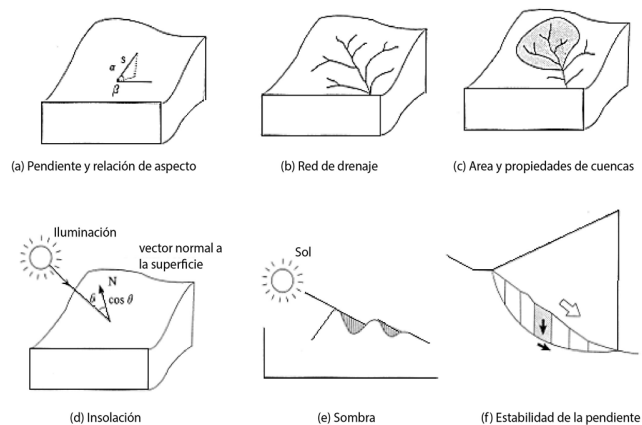


Figura 77. Modelos de atributos de terrenos calculados a partir del MED. (Tomado y modificado de página web del Dr. Shunji Murai, <http://cret.cnu.edu.cn/syix/content/giswb/vol2/contents.htm>)

4.3 ATRIBUTOS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS DEL TERRENO

Muchos de los atributos topográficos más comunes (Figura 77), tales como: la pendiente, área de captación específica, aspecto, plan y perfil de curvatura, se pueden derivar de cualquiera de los tres tipos de MED (Moore et al., 1991, 1993). Los análisis individuales de terreno son herramientas que se han clasificado en diferentes formas, y se basa en las características de los atributos calculados y / o su extensión espacial.

Los atributos principales o primarios del terreno (Wilson y Gallant, 2000) son aquellos que se calculan directamente desde el MED. Los atributos secundarios o compuestos son aquellos que implican combinaciones de los atributos primarios y constituyen una base física o conjuntos de derivados empíricamente. Los índices que se pueden caracterizar incluye la variabilidad espacial de los procesos específicos que ocurren en el paisaje (Moore et al., 1991; 1993). La Tabla 19 resume los principales atributos primarios que pueden ser calculados a partir de un MED. La mayoría de estos atributos topográficos se calculan a partir de las derivadas direccionales de una superficie topográfica. Se pueden calcular directamente, a través de métodos de diferencia finita, o mediante el ajuste de una función de interpolación bivariada $z = f(x, y)$ (Moore et al.,

1993; Mitsova et al., 1996; Florinsky 1998). Es posible calcular las primeras depresiones o cuencas dentro de los MED y se debe especificar una o varias reglas para determinar las direcciones de drenaje y la conectividad de los elementos individuales con el fin de calcular el camino de flujo y las longitudes de los riachuelos que contribuyen a las áreas de drenaje (por ejemplo, Jenson y Domingue, 1988; Martz y De Jong, 1988). El objetivo general es ser capaz de utilizar los atributos calculados para describir la morfometría del área de captación de los drenajes y la posición de los atributos, la superficie de las laderas y canales de corriente que comprende los drenajes de las cuencas. Diferentes autores (Speight, 1974, 1980; Jenson y Domingue, 1988; Giles et al., 1998, y Burrough et al., 2000, entre otros) han utilizado los cálculos de los atributos topográficos para generar clasificaciones formales de la superficie terrestre.

Tabla 19. *Atributos Topográficos Primarios que pueden ser calculados por El Análisis de Terreno de los Datos (Dem). Tomado de Moore, Grayson y Ladson (1991).*

ATRIBUTO	DEFINICIÓN	SIGNIFICADO
Altitud.	Elevación.	Clima, Vegetación y Energía Potencial.
Aspecto de altura cuesta arriba	La altura promedio del área cuesta arriba.	Energía Potencial.
Aspecto.	Pendiente azimutal.	Insolación Solar, Evapotranspiración distribución y abundancia, de flora y la fauna.
Pendiente.	Gradiente.	Velocidad de flujo superficial y sub-superficial, tasa de escurrimiento, precipitación, vegetación, geomorfología, contenido de agua en el suelo (% de humedad), tipo de suelo competente.
Pendiente cuesta arriba.	Pendiente media del área cuesta arriba.	Velocidad de Escurrimiento.
Pendiente de dispersión.	Pendiente media del área dispersa	Tasa de drenaje del suelo.
Pendiente de captación.	Pendiente promedio de la cuenca.	Tiempo de concentración.

Área cuesta arriba.	Área de captación encima de un tramo corto de contorno.	Volumen de escorrentía, estado estacionario de la tasa de escorrentía.
Área dispersa.	Área pendiente abajo de una longitud corta de contorno.	Tasa de drenaje del suelo.
Área de captación (Cuenca).	Área de drenaje a la salida de la cuenca.	Volumen de escorrentía.
Área específica de la cuenca.	Área cuesta arriba por unidad de ancho de contorno.	Volumen de escorrentía, estado estacionario de la tasa de escorrentía, características del suelo, contenido de agua en el suelo (% de humedad) y geomorfología.
Longitud de la Trayectoria de flujo.	Máxima distancia del flujo de agua a un punto en la cuenca.	Las tasas de erosión, tiempo de concentración, y acumulación de sedimentos.
Longitud de la cuesta arriba.	Longitud promedio de los modelos de flujos hasta un punto en la cuenca.	Tasas de erosión, aceleración de flujos.
Longitud dispersa.	Distancia a un punto a las afueras de la cuenca.	Impedancia (resistencia) del drenaje del suelo.
Longitud de la cuenca.	Distancia del punto más alto de las afueras de la cuenca.	Atenuación del flujo superficial.
Perfil de curvatura.	Pendiente del perfil de curvatura.	Aceleración de flujo, tasa de erosión/depositación y geomorfología.
Plano de curvatura.	Contorno de curvatura.	Convergencia/Divergencia de flujo, contenido de agua del suelo (% de humedad), características del suelo.
Curvatura Tangencial.	Plan de curvatura múltiple para pendientes.	Proporciona la medida alternativa de convergencia y divergencia de flujo local.
Proporción de elevación.	Proporción de las celdas definidas por el usuario, el círculo más bajo del centro de la celda	Posición relativa del paisaje distribución y abundancia de flora y fauna

Los atributos secundarios se calculan a partir de dos o más atributos primarios, resultan muy importantes, debido a que ofrecen la oportunidad de describir el patrón como una función de proceso. Esos atributos que cuantifican el papel desempeñado por la topografía en la redistribución de agua a través del paisaje y en la modificación de la cantidad de radiación solar recibida en la superficie, tienen importancia de tipo: hidrológica, geomorfológica y ecológica, e importantes consecuencias en la evolución de muchos paisajes. Estos atributos pueden afectar a las características del suelo (Porque la pedogénesis de la catenaria del suelo está afectado por la forma en que el agua se mueve a través del entorno en muchos paisajes), la distribución y la abundancia de agua en el suelo, la susceptibilidad a la erosión por el agua de los paisajes, y la distribución y abundancia de flora y fauna. A continuación se presentarán las expresiones matemáticas de los atributos secundarios utilizados en este trabajo:

4.3.1 Índices de Humedad

Dos índices de humedad topográficos han sido utilizados ampliamente utilizados para describir los efectos de este factor sobre la topografía, el primer índice actúa sobre la ubicación y el segundo depende del tamaño de las zonas o áreas fuentes de la generación de escorrentía. Así se tienen las siguientes expresiones:

$$W_T = \ln\left(\frac{A_s}{T \cdot \tan(\beta)}\right) \quad (4.1)$$

$$W = \ln\left(\frac{A_s}{\tan(\beta)}\right) \quad (4.2)$$

Donde A_s es área de captación específica de la cuenca, T es la transmisividad del suelo cuando el suelo está saturado, y β es el gradiente de la pendiente (en grados) (Moore et al., 1991). La segunda ecuación contiene un término menos, debido a que

asume que las propiedades del suelo son uniformes, es decir, que la T transmisividad del suelo es constante a través o a lo largo de todo el paisaje. Ambos índices predicen que los puntos más bajos en la cuenca, y particularmente estos puntos a las afueras de los canales principales, son los puntos más lluviosos de la cuenca, y el agua contenida en el suelo disminuye, mientras que las líneas de flujos se retrasan cuesta arriba en las divisorias de la cuenca (Wilson y Gallant, 2000).

4.3.2 Índices de erosión

De acuerdo con Bermúdez et al., (2012) los índices de erosión pueden ser calculados de diversas formas como una función del poder erosivo del afluente o tributario, el cual se define como la tasa de gasto de energía potencial por corrientes de agua y se ha utilizado ampliamente en los estudios de erosión, transporte de sedimentos, y en geomorfología como una medida de la fuerza erosiva de los ríos y arroyos (Wilson y Gallant, 2000). El análisis se basa en una predicción de la tasa de incisión en el lecho de roca como una función de la potencia de la corriente (Finlayson et al, 2002; Tucker y Whipple, 2002.):

$$\dot{e} = k A_s^m S^n$$

Donde \dot{e} es la tasas de incisión local, A_s es el área de drenaje aguas arriba (usada como una aproximación para la descarga), S es la pendiente local, m , n y k son constantes. El parámetro k está relacionado a la litología.

Con el propósito de incorporar las variaciones espaciales en la tasa de precipitación P y estudiar su influencia sobre el índice de erosión se realiza la siguiente modificación a la fórmula anterior, así quedaría:

$$\dot{e}_p = \sum (A_p P)^m S^n \quad (4.3)$$

Donde A_p es el área de cada píxel y el símbolo de sumatoria implica que se ha tomado la suma de las precipitaciones sobre cada píxel dentro de la cuenca. Bermúdez et al., (2012) denomina \dot{e}_p al índice de erosión con precipitación.

Diferentes valores de m y n pueden ser usados en las ecuaciones anteriores dependiendo de la forma como son controladas las tasas de incisión de los ríos. Así se derivan las siguientes expresiones:

4.3.1.1 Poder de flujo total (TSP)

Es el caso en el cual la tasa de incisión está controlada por el poder de flujo total o "*Total Stream Power (TSP)*", $m=1, n=1$.

$$TSP = A_s S \quad (4.4)$$

4.3.1.2 Poder de flujo unitario (USP)

La tasa de incisión está controlada por el ancho del canal, también se conoce como "*Stream Power Per Unit Channel Width (USP)*", $m = \frac{1}{2}, n=1$. Así:

$$USP = \sqrt{A_s} S \quad (4.5)$$

4.3.1.3 Poder de flujo de cizalla (SSP)

Si la incisión es controlada por el esfuerzo de cizalla fluvial o "*Fluvial Shear Stress (SSP)*", $m = \frac{1}{3}, n = \frac{2}{3}$. Así se obtiene:

$$SSP = \sqrt[3]{A_s S^2} \quad (4.6)$$

Las ecuaciones anteriores miden la potencia erosiva de la corriente de agua basado en el supuesto que la descarga (caudal) (q) es proporcional al área de la cuenca específica A_s . También predicen la erosión total en el área del perfil de convexidad y la concavidad tangencial. (Las zonas de convergencia y aceleración de flujo) y la depositación neta en áreas de perfil cóncavo (zonas de disminución de la velocidad de flujo). La Figura 78 ilustra un ejemplo del índice de erosión TSP derivado para un área.

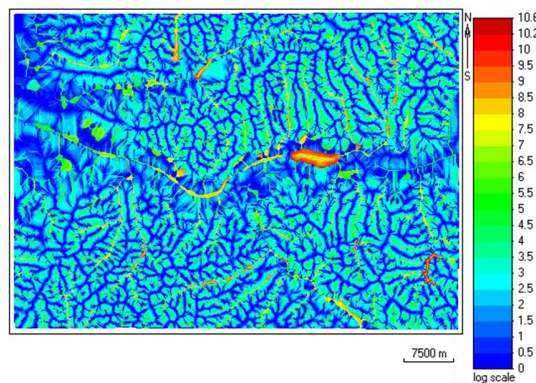


Figura 78. Índice de erosión TSP calculado para la región de Kurst, Rusia CA este fue calculado por Florinsky (2012) usando el método de Evans–Young . El MED consiste de 147.875 nodos, 455 columnas x 325 filas; la resolución del raster usado fue de 150 m.

4.3.2 Cálculo del relieve

El relieve es calculado según Bermúdez et al. (2012) como la diferencia entre dos rásters, el proporcionado por la máxima elevación dentro de un radio variable (1, 3 y 5 km) y el ráster proporcionado por el modelo de elevación digital del área de estudio. Así:

$$R = H_r - h \quad (4.7)$$

Donde H_r es el ráster obtenido de considerar la máxima elevación en un radio r , y h es el ráster de elevaciones dato por el MED.

Para realizar cada una de las diferentes expresiones matemáticas mostradas anteriormente se utiliza la herramienta calculadora de raster o "*raster-calculator*" en las herramientas (toolbox) de análisis espacial de ArcGIS 10. La Figura 79 muestra esta herramienta.

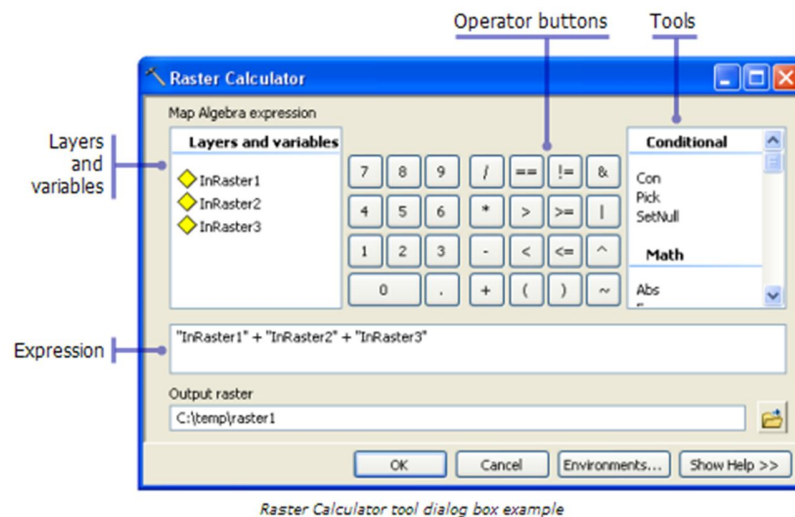


Figura 79. Calculadora de ráster existente en ArcGIS 10.0, diversas funciones matemáticas son disponibles y fueron utilizadas a lo largo de este trabajo para derivar los índices primarios y secundarios del terreno, los cálculos hidrológicos y las operaciones algebraicas necesarias para derivar cada una de las expresiones matemáticas anteriormente mencionadas.

4.3.3 Índice de capacidad de transporte de sedimentos

Índice de capacidad de transporte de sedimentos, se deriva de la teoría de la unidad de potencia de drenaje y es equivalente al factor de longitud de pendiente. En ciertas circunstancias, es equivalente a la ecuación universal revisada de pérdida de suelos (RUSLE). Otra forma a veces de utilizar esta ecuación es para predecir los lugares de erosión neta y las áreas netas de depositación.

$$LS = (m + 1) \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m \left(\frac{\text{sen}(\beta)}{0.0896} \right)^n \quad (4.8)$$

Donde m y n son constantes análogas a los valores para los índices de erosión TSP , USP y SSP . El resto de las variables ya fueron descritas anteriormente.

4.3.6 Variación del índice de la potencia del flujo (CIT)

Se utiliza para predecir la ubicación de las cabeceras de los arroyos de primer orden (es decir, canal de iniciación).

$$CIT = A_s [\tan(\beta)]^2 \quad (4.9)$$

4.3.6 Otros cálculos adicionales

La Tabla 20 resume otros cálculos realizados para las cuencas y microcuencas analizadas en este trabajo:

Tabla 20. Cálculos de variables y parámetros morfométricos de la microcuenca y la red de drenaje. (Tomado de Gardiner, 1981; Gregory y Walling, 1973; Guevara y Cartaya, 1991; Henao, 1998; Horton, 1945; Leopold et al., 1964; Monsalve, 2000; Pastrana, 2003; Pérez, 1977; Senciales, 1998; Smith y Stopp, 1978; Strahler, 1968; Strahler, 1985)

Variable	Parámetro	Símbolo	Ecuación	Dimensión
Escala de la cuenca	Área	A	-	L ²
	Perímetro	P	-	L
	Longitud	L	-	L
	Ancho	W	-	L
	Diámetro	D	$D = (4A/\pi)^{1/2}$	L
Gradiente y forma del relieve de la cuenca	Altura máxima	H	-	L
	Altura mínima	h	-	L
	Relieve máximo	H _b	$H_b = H - h$	L
	Radio del relieve	R	$R = H_b/L$	-
	Pendiente mediana	S _{md}	Construcción gráfica	%
	Pendiente media del perfil longitudinal de la corriente principal	S _m	$S_m = (\sum \sqrt{S_{mi}/m})^2$ $S_{mi}^{(1)}$ $m^{(2)}$	%
Forma de la cuenca	Elongación	S _e	$S_e = A^{0.5}/L$	-
	Factor forma	F _f	$F_f = A/L^2$	-
	Coefficiente de compacidad	K _c	$K_c = P/A^{1/2} \cdot 0,28$	-
Extensión de la red de drenaje	Longitud de la corriente principal	L _{cp}	-	L
	Longitud total de las corrientes	C _t	$C_t = \sum$ longitud de las corrientes	L
	Densidad de drenaje	D _d	$D_d = C_t/A$	L/L ²
Orden y magnitud de la red de drenaje	Orden de la corriente	u	-	-
	Número de segmentos de la corriente de un orden dado	N _u	-	-
	Relación de bifurcación	R _b	$R_b = N_u/N_{u+1}$	-
	Longitud de la corriente de un orden dado	L _u	-	L
	Longitud total de las corrientes de un orden dado	L _{tu}	$L_{tu} = \sum L_u$	L
	Longitud media de las corrientes de un orden dado	L _{mu}	$L_{mu} = L_{tu}/N_u$	L
	Longitud media acumulada de las corrientes de un orden dado	L _{mau}	$L_{mau} = L_{mu} + L_{mu+1}$	L
	Relación de longitud	R _l	$R_l = L_{mu}/L_{mu+1}$	-
Coefficiente de torrencialidad	CT	$CT = N_l/A$ $N_l^{(3)}$	-	

Donde S_{mi} = pendiente media de cada intervalo del perfil longitudinal de la corriente principal; m = número de intervalos en que se divide el perfil longitudinal de la corriente principal y N_L = número de corrientes de orden 1.

Para realizar todos estos cálculos de todos los atributos tanto primarios como secundarios del terreno y también los cálculos hidrológicos se usará un programa de Sistema de Información Geográfico (SIG), llamado SIG ArcGIS 10.

V. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años las Ciencias de La Tierra no han quedado exentas de la evolución de software de aplicación matemática, es por ello que el estudio de la Geología se ha visto fortalecido. Ya que le da un valor agregado a la investigación que anteriormente era solo de tipo cualitativo, ahora también es cuantitativa a través de modelos de elevación digital de terrenos (DEM) con la bondad de la precisión otorgada por el programa.

En este capítulo se muestran los resultados e integración de los análisis mediante estudios de las secciones epóxicas de minerales pesados, secciones finas, microscopía electrónica de barrido (MEB), difracción de rayos x (DRX), análisis de imágenes con ImageJ y Análisis Digital del Terreno, (DEM) Modelos de Elevación Digital (Geomorfología cuantitativa).

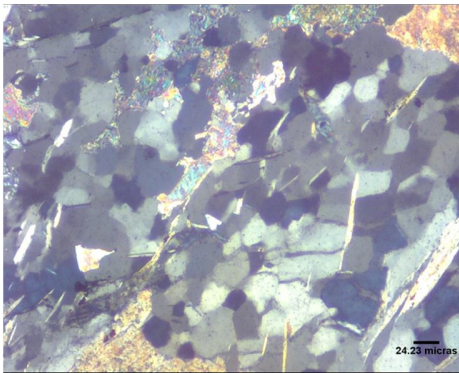
A continuación se presentarán detalladamente cada uno de los resultados obtenidos mediante las metodologías descritas en el capítulo anterior, y se establecerá una discusión sobre los resultados aquí obtenidos y la información geológica o los diversos trabajos existentes en la región de estudio.

5.2 ANÁLISIS PETROGRÁFICO

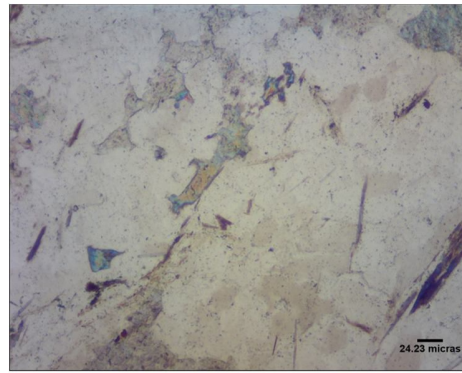
En este análisis las siguientes figuras se muestran algunas imágenes de las secciones finas en nicoles cruzados y paralelos de las muestras in-situ obtenidas en campo.

5.2.1 Muestra in-situ falla de Boconó

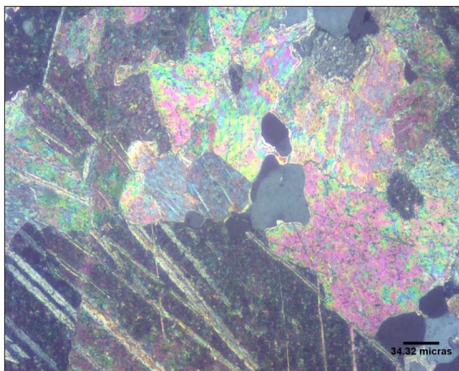
La Figura 80 (a,b) tiene cuarzo policristalino, clasificado de origen metamórfico por sus característicos numerosos cristales en un grano con extinción ondulatorio, se muestran con variados tamaños desde finos a medios, con bordes entre subredondeado a angulares. (c,d) Hay diopsidos como agregados o anhidritas, cristales de calcita en un mármol (lamelas de ortopiroxenos), un cristal maclado muestra algunas lamelas extinguidas y casi negras. (e,f) tiene ortoclasa, cuarzos un poco deformados al igual que la muscovita, la cual está relleno una microfractura.



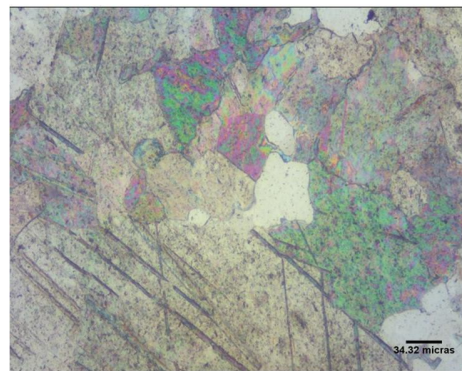
(a)



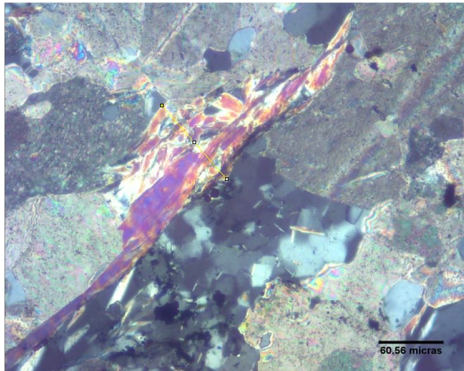
(b)



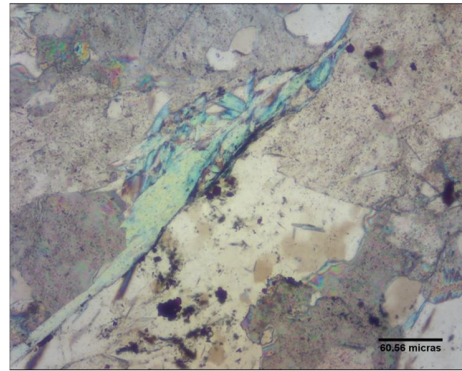
(c)



(d)



(e)



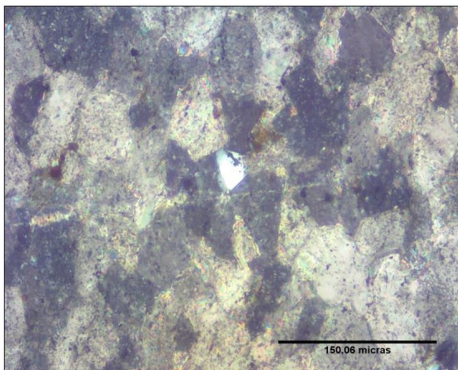
(f)

Figura 80. Secciones finas de la muestra in-situ de la Falla de Boconó.

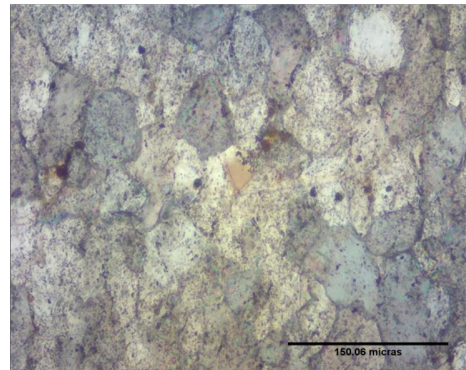
5.2.2 Quebrada La Palma

5.2.2.1 Muestra LPI:

La Figura 81 (a,b) presenta feldespatoideos alterándose a minerales de arcillas, posiblemente arcillas ílticas. (c,d) muestra sanidina alterándose a arcillas y dolomita. (e,f) tiene feldespatoideos alterándose a minerales de arcillas, probablemente a íltica. Proviene de un metamorfismo de contacto, con una textura lepidoporfidoblástica.



(a)



(b)

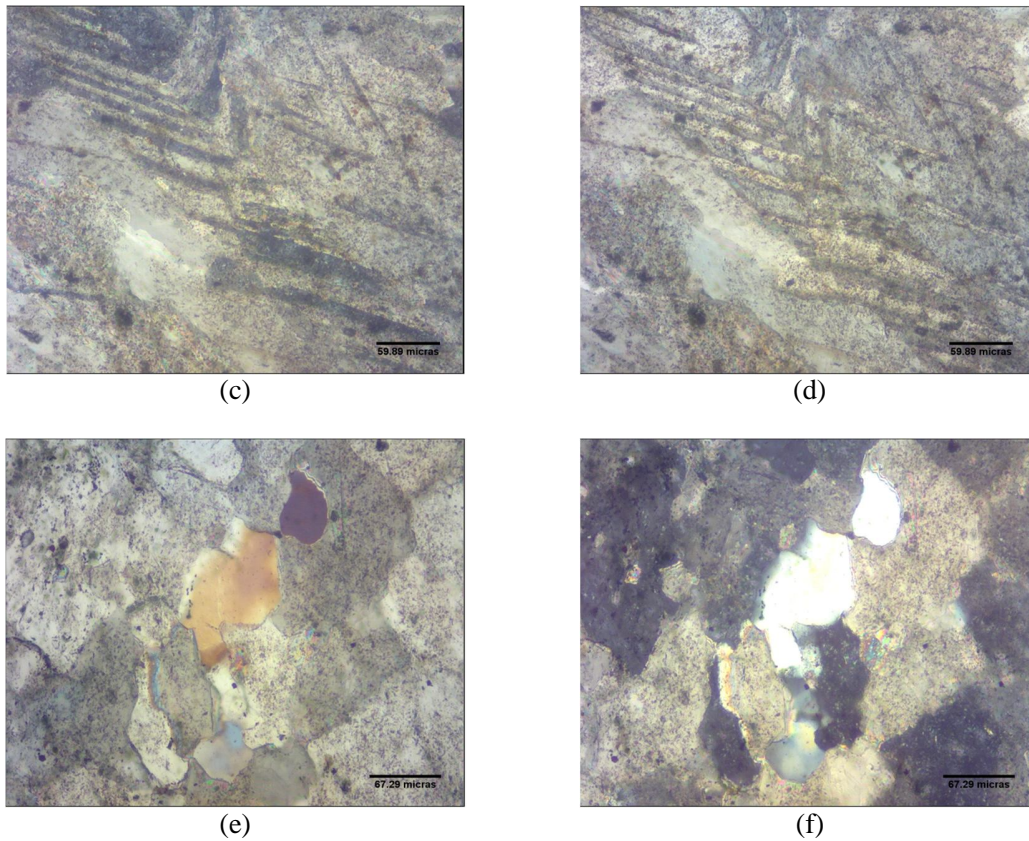
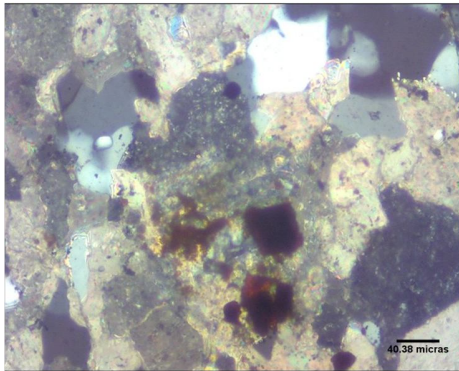


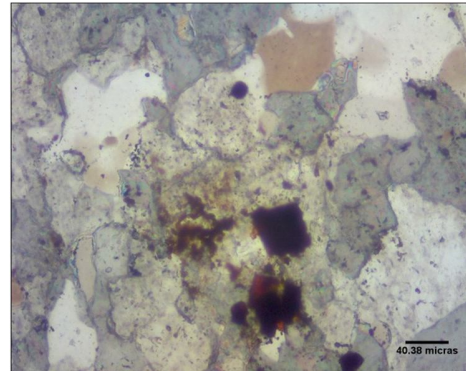
Figura 81. Secciones finas de la muestra in-situ de La Palma 1 (LP1).

5.2.2.2 Muestra LP5:

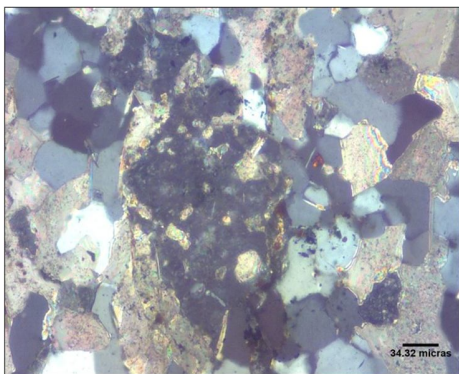
La Figura 82 (a,b) tiene cuarzo, calcita y probablemente rutilo. (c,d) muestra calcita asociado y a veces se encuentra formando una especie de corona alrededor de los cristales. (e,f) presenta cuarzo policristalino, clasificado de origen metamórfico, con numerosos cristales y extinción ondulatoria, de tamaños finos a medios, con bordes subangulares, tiene también calcita alrededor de algunos cristales y un grano de rutilo posiblemente.



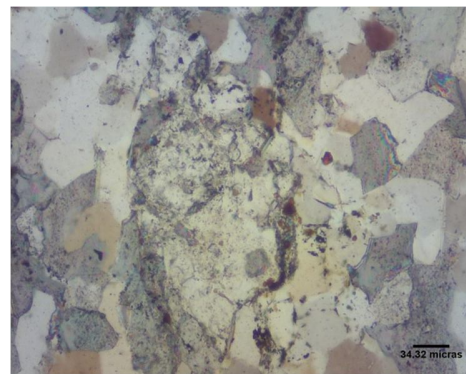
(a)



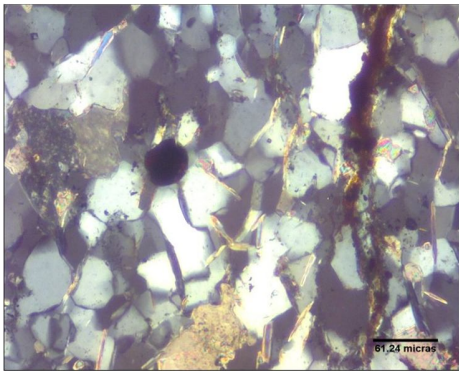
(b)



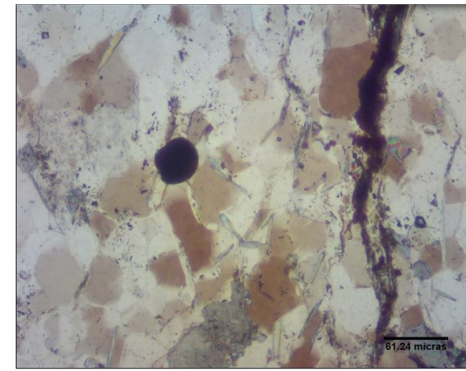
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 82. Secciones finas de la muestra in-situ de La Palma 5 (LP5).

5.3 ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE IMÁGENES

La Tabla 21 resume los resultados obtenidos de la aplicación del software ImageJ a las fotografías de cada uno de los granos (20 en total) tomada de los microscopios: óptico y electrónico. Lo primero que se hizo fue validar el grado de incertidumbre entre los resultados obtenidos de la digitalización de la imagen de Krumbein (1951, Figura 45 capítulo III).

Tabla 21. Comparación entre valores de redondez y esfericidad promedios para cada muestra mediante el software ImageJ

Muestras	Esf. Ij (Ej)	Circ. Ij (Rj)	ESFERICIDAD Krumbein IMAGEJ (Ekj)(Round)	ESFERICIDAD Krumbein MODELO (Ekm)	REDONDEZ Krumbein MODELO (Rkm)	Dif. Ij y modelo Ij	Dif. entre esfericidad y modelo Krumbein Ij	Redondez Cualitativa
APURE	0.69	0.67	0.73	0.75	0.40	0.04	0.02	Angulosos
FALLA DE BOCONO	0.58	0.55	0.69	0.63	0.33	0.11	-0.06	Angulosos
LAS PALMAS 1 (LP1)	0.57	0.55	0.65	0.60	0.29	0.09	-0.05	Angulosos
LAS PALMAS 1 (LP5)	0.60	0.59	0.64	0.57	0.39	0.04	-0.07	Angulosos
NIRGUA	0.56	0.61	0.66	0.60	0.41	0.10	-0.06	Sub Angulosos_Sub redondeados
PEÑA 1	0.57	0.60	0.69	0.63	0.45	0.12	-0.06	Sub Angulosos_Sub redondeados
PEÑA 3	0.61	0.59	0.70	0.64	0.31	0.09	-0.06	Angulosos
RIO BOCONO	0.67	0.66	0.74	0.70	0.34	0.07	-0.04	Angulosos
TRIBUTARIO DE COJEDES	0.61	0.63	0.69	0.64	0.36	0.08	-0.05	Angulosos
TUCURAGUA 1	0.58	0.59	0.61	0.53	0.35	0.03	-0.08	Angulosos
TUCURAGUA 3	0.64	0.62	0.67	0.62	0.38	0.03	-0.05	Angulosos

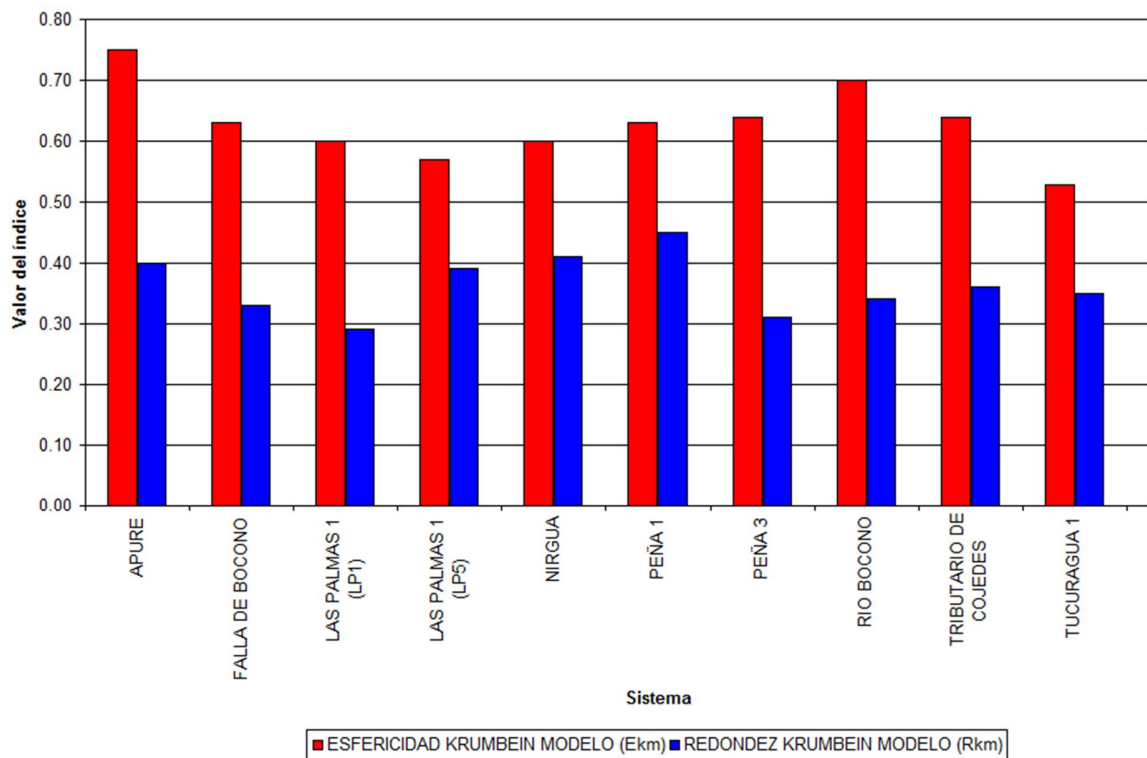


Figura 83. Comparación entre valores promedios de redondez y esfericidad obtenidas a partir del modelo Krumbein en ImageJ

La caracterización física consistió en el análisis granulométrico vía laser (Master Sizer 2000) de cada una las muestras de ríos en estado natural; Las muestras de los ríos; Apure, Boconó, Nirgua, Peña, Tucuragua y Tributario Cojedes. Todas las muestras presentan fuerte asimetría (S_k) hacia los finos y la curtosis (K) para cada rio fue una curva normal o mesocurtica. En cambio el escogimiento (S_o) para Apure, Nirgua y Tucuragua, son pobremente escogidos y los ríos Boconó, Peña y tributario Cojedes son muy mal escogidos.

5.4 ANÁLISIS MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

5.4.1 Río Apure

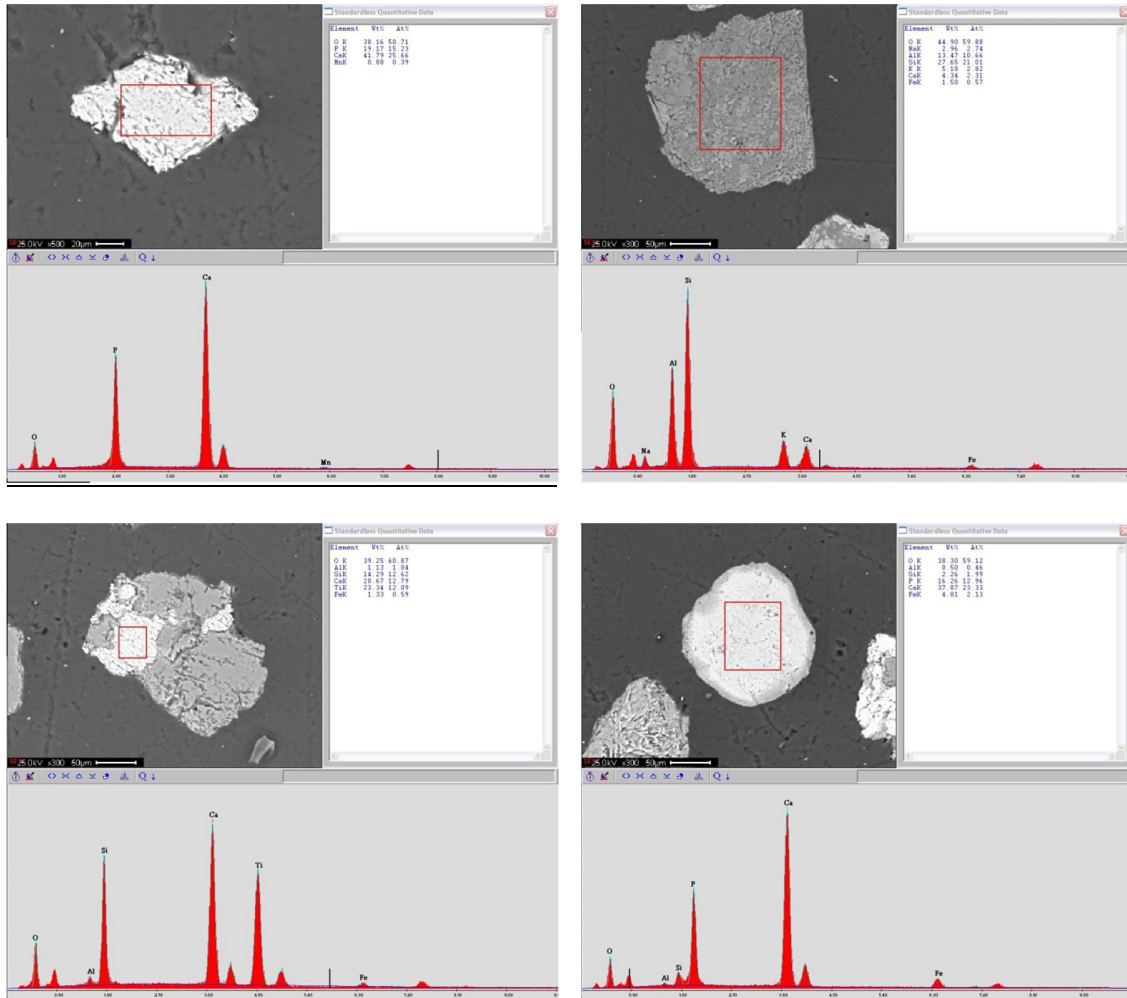


Figura 84. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra del río Apure.

Tabla 22. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra del río Apure.

Grano	O	Mg	Al	Si	K	Fe	Nb	Ti	P	Mn	Ca	Y	U	Ag	Ta	Zr	Na	Cr	La	Comp Oxido	Nombre del Mineral
1	46.4	2.4	15.8	25.4	8.1	2.0														(Si ₂ O ₇)KCaF ₂ ·8H ₂ O	BIOTITA
2	39.3			0.9			1.2	58.6												TiO ₂	RUTILO
3	48.7			49.8		1.5														SiO ₂	CUARZO
4	48.8			50.5		0.7														SiO ₂	CUARZO
5	41.9		0.8	1.6	0.4	1.3		53.5	0.5											TiO ₂	RUTILO
6	42.2		0.9	1.0				55.9												TiO ₂	RUTILO
7	33.1			2.3		30.3		30.9		3.4										TiO ₂ Fe	ILMENTITA
8	38.2								19.2	0.9	41.8									(PO ₄) ₃ Ca ₂ (F,Cl,OH)	APATITO
9	44.9		13.5	27.7	5.2	1.5					4.3						3.0			(Al,Si)Si ₂₇ O ₇₀ (Ca,Na,K) ₆ Al ₁₈ 25H ₂ O	HEULANDITA
10	39.3		1.1	14.3		1.3		23.3			20.7									SiO ₂ CaTi	ESFENA
11	46.0		10.7	35.6							0.8									SiO ₂ Al ₂	ANDALUCITA
12	38.3	0.5	2.3			4.8			16.3		37.9									(PO ₄) ₃ Ca ₂ (F,Cl,OH)	APATITO
13	39.9		0.9	2.3		4.6			16.6		35.9									(PO ₄) ₃ Ca ₂ (F,Cl,OH)	APATITO
14	48.7		0.4	50.3				0.5												SiO ₂	CUARZO
15	33.9			0.9		4.4	25.5	14.0			2.4	11.0	2.7	1.3	3.9						
16	48.8			51.2																SiO ₂	CUARZO
17	49.8		7.3	15.2		1.6		25.5	0.5												
18	40.6		0.9	0.4		2.0		55.1										1.0		TiO ₂	RUTILO
19	44.4		15.1	28.3	4.6	1.1					3.0									CaAl ₂ Si ₂ O ₇ /Si ₂ O ₇ KAl-Si ₂ O ₇ NaAl	ANORTITA/ANORTOCLASA
20	34.1			16.3												48.8				SiO ₂ Zr	CIRCON
21	45.8		1.6	15.5	0.8			36.4												SiO ₂ CaTi	ESFENA
22	33.1		0.7	12.9					0.7							52.5				SiO ₂ Zr	CIRCON

5.4.2 Boconó

5.4.2.1 Muestra sedimento moderno (Río Boconó)

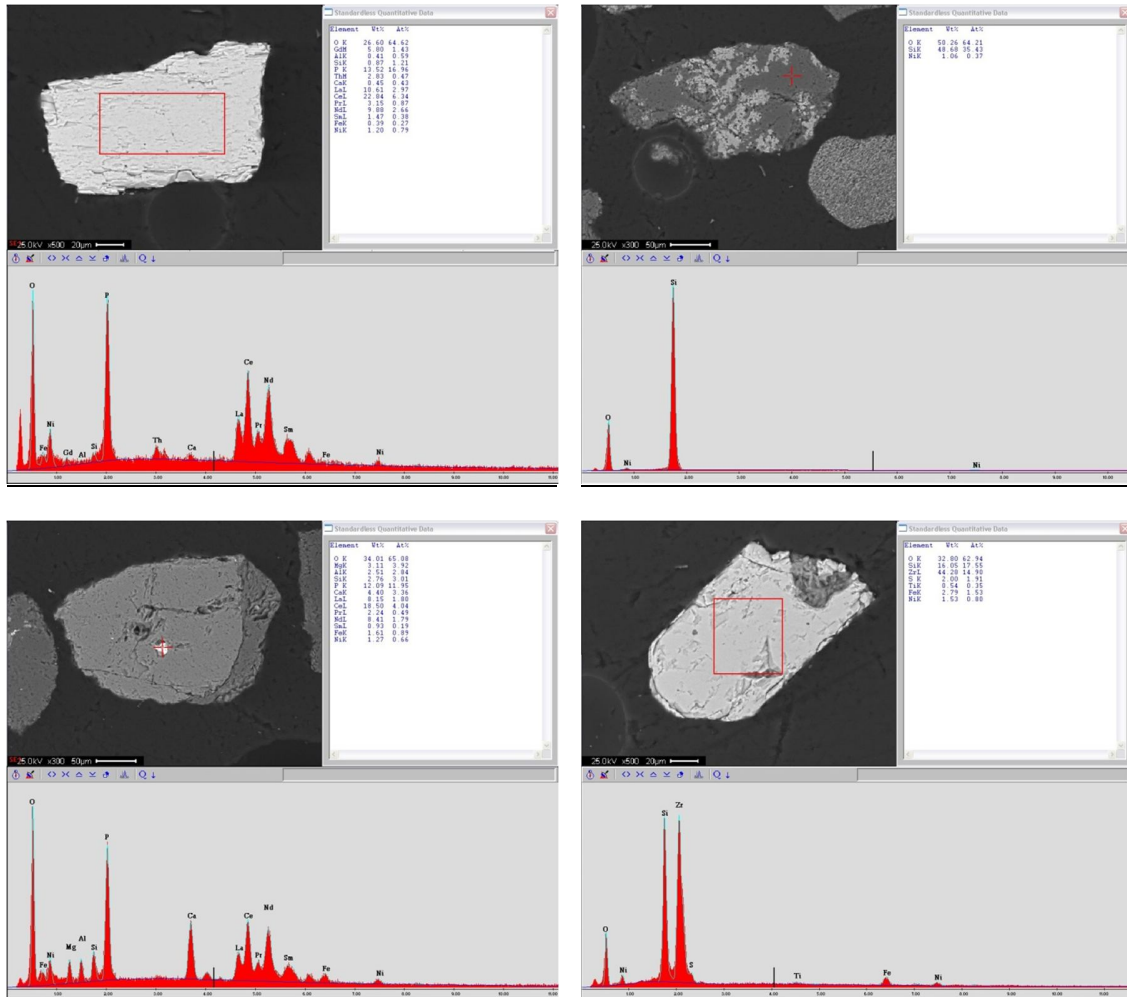


Figura 85. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra de sedimentos modernos del río Boconó.

Tabla 23. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra del río Boconó.

Grano	O	Mg	Al	Si	K	Fe	Nb	Ti	P	Ca	Zr	Na	Cl	S	La	Nd	Ce	F	Sn	Th	Gd	Pr	Comp Oxido	Mineral			
1	42.6		1.6			0.6		54.2																TiO ₂	RUTILO		
2	41.3		1.1	2.5		1.6		52.4																	TiO ₂	RUTILO	
3	49.2			49.7																					SiO ₂	CUARZO	
4	40.3			0.3				58.3																	TiO ₂	RUTILO	
5	32.8			16.1		2.8					44.3			2.0											SiO ₄ Zr	CIRCON	
6	49.0		6.5	12.7		1.5		29.3																			
7	50.3			48.7																					SiO ₂	CUARZO	
8	50.3			48.7																					SiO ₂	CUARZO	
9	50.9		4.2	20.8		0.9		2.7	7.2	7.7			0.6				3.2								(PO ₄) ₃ Ca ₅ (F,Cl,OH)	APATITO	
10	37.2								18.7	38.7								4.1								(PO ₄) ₃ Ca ₅ (F,Cl,OH)	APATITO
11	34.0	3.1	2.5	2.8		1.6			12.1	4.4					8.2	8.4	18.5		0.9			2.2			PO ₄ (Ce,La,Y,Th)	MONACITA	
12	26.6		0.4	0.9		0.4			13.5	0.5					10.6	9.9	22.8		1.5	2.8	5.8	3.2			PO ₄ (Ce,La,Y,Th)	MONACITA	

5.4.2.2 Muestra in-situ falla de Boconó

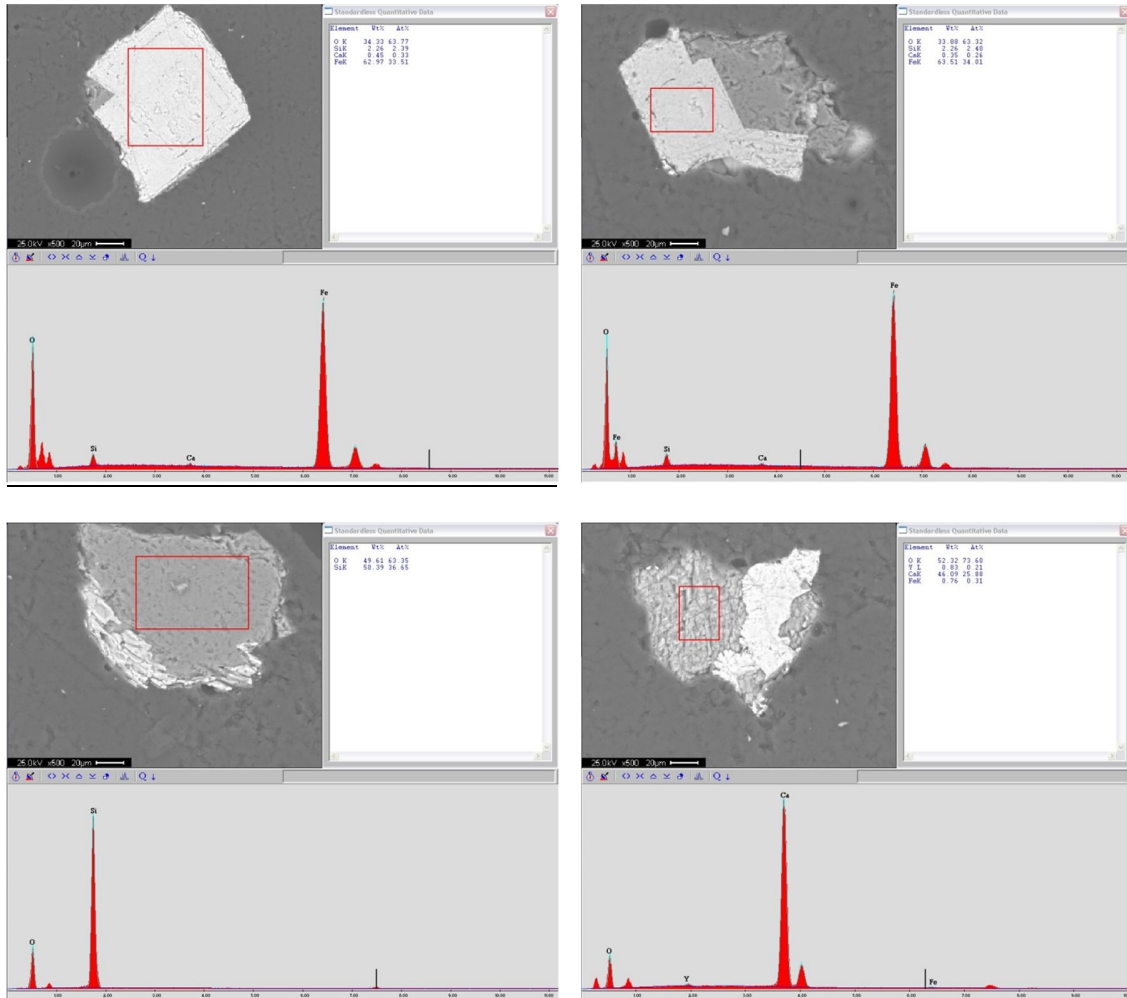


Figura 86. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra in-situ cerca de la falla de Boconó.

Tabla 24. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra tomada sobre la traza de la Falla de Boconó.

Grano	O	Mg	Al	Si	K	Fe	Ti	P	Ca	Y	La	Zn	V	Comp Oxido	Mineral
1	34.33			2.26		62.97			0.45					SiO ₄ Fe	FAYALITA
2	49.61			50.39										SiO ₂	CUARZO
3	46.07		0.45	1.03		1.93	50.49							TiO ₂	RUTILO
4	52.32					0.76			46.09	0.83				CO ₃ Ca	CALCITA
5	36.02		0.71	1.55		59.56			0.58		0.81	0.78		Fe ₂ O ₃	HEMATITA
6	41.96	1.71	4.94	8.99	0.83	33.12	1.05	2.44	4.1				0.16		
7	33.88			2.26		63.51			0.35					SiO ₄ Fe	FAYALITA
8	48.4			47.39		4.21								SiO ₄ Fe	FAYALITA

5.4.3 Quebrada Las Palmas

5.4.3.1 Las Palmas-1 (in-situ) (LP1)

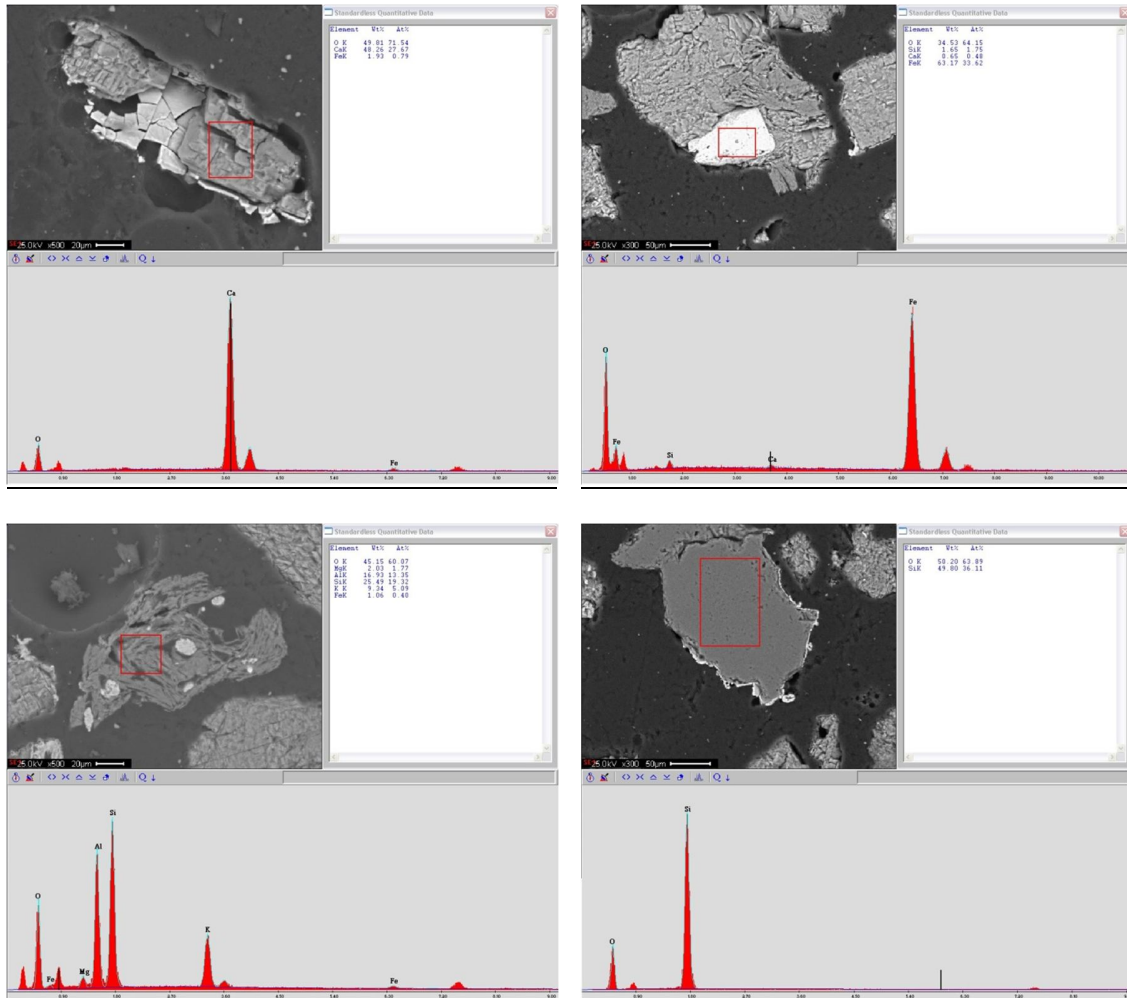


Figura 87. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra Las Palmas-1 (LP1).

Tabla 25. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra Las Palmas-1 (LP1)

Grano	O	Mg	Al	Si	K	Fe	Ca	Y	Na	Comp Oxido	Mineral
1	34.5			1.7		63.2	0.7			FeO ₃	HEMATITA
2	53.3		2.8	2.6	1.0		39.7	1.0		CaAl ₂ SiO ₈	ANORTITA
3	50.2			49.8						SiO ₂	CUARZO
4	40.2			4.5		54.2	1.1			SiO ₄ Fe	FAYALITA
5	33.0		1.4	2.0		63.0	0.7			SiO ₄ Fe	FAYALITA
6	52.1		1.8	1.9	0.8		42.4	0.9		CO ₃ Ca	CALCITA
7	48.4	5.6	19.0	20.0		5.9			2.1		
8	45.2	2.0	16.9	25.5	9.3	1.1				Si ₃ O ₈ KAl	ORTOSA
9	33.7		1.3	3.4		60.8	0.8			SiO ₄ Fe	FAYALITA
10	49.8					1.9	48.3			CO ₃ Ca	CALCITA
11	36.1			2.6		59.3	2.0			SiO ₄ Fe	FAYALITA

5.4.3.2 Las Palmas 5 (in-situ) (LP5)

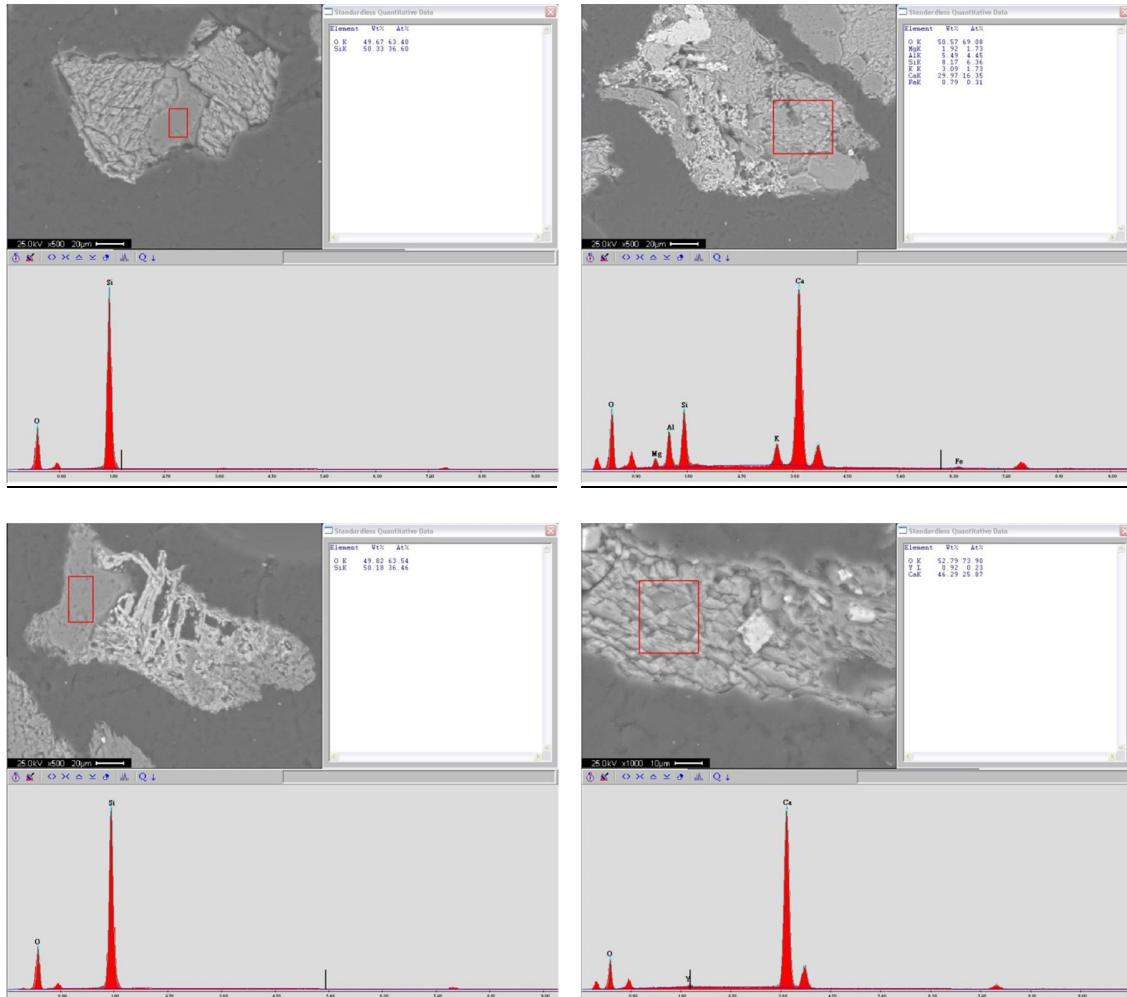


Figura 88. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra Las Palmas-5 (LP5).

Tabla 26. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra Las Palmas-5 (LP5)

Grano	O	Mg	Al	Si	K	Fe	Ti	P	Ca	Y	Comp Oxido	Nombre del Mineral
1	50.6	1.9	5.5	8.2	3.1	0.8			30.0		Ab10An90/CaAl2Si2O8	ANORTITA
2	33.2			2.6		63.3			1.0		SiO4Fe	FAYALITA
3	41.7	0.6	2.3	3.5	1.2	1.7		16.4	32.6		(PO4)3Ca5(F,Cl,OH)	APATITO
4	49.8			50.2							SiO2	CUARZO
5	44.4	0.5	13.8	21.7	4.7	14.9						
6	37.1			1.7		59.1		0.5	1.7		Fe2O3	HEMATITA
7	52.8								46.3	0.9	CO3Ca	CALCITA
8	54.6	0.8		1.7					42.8		CO3Ca	CALCITA
9	49.7			50.3							SiO2	CUARZO
10	53.9		2.1	14.2	1.0	0.8	27.5		0.5			

5.4.4 Quebrada Peña

5.4.4.1 Peña-1 (in-situ)

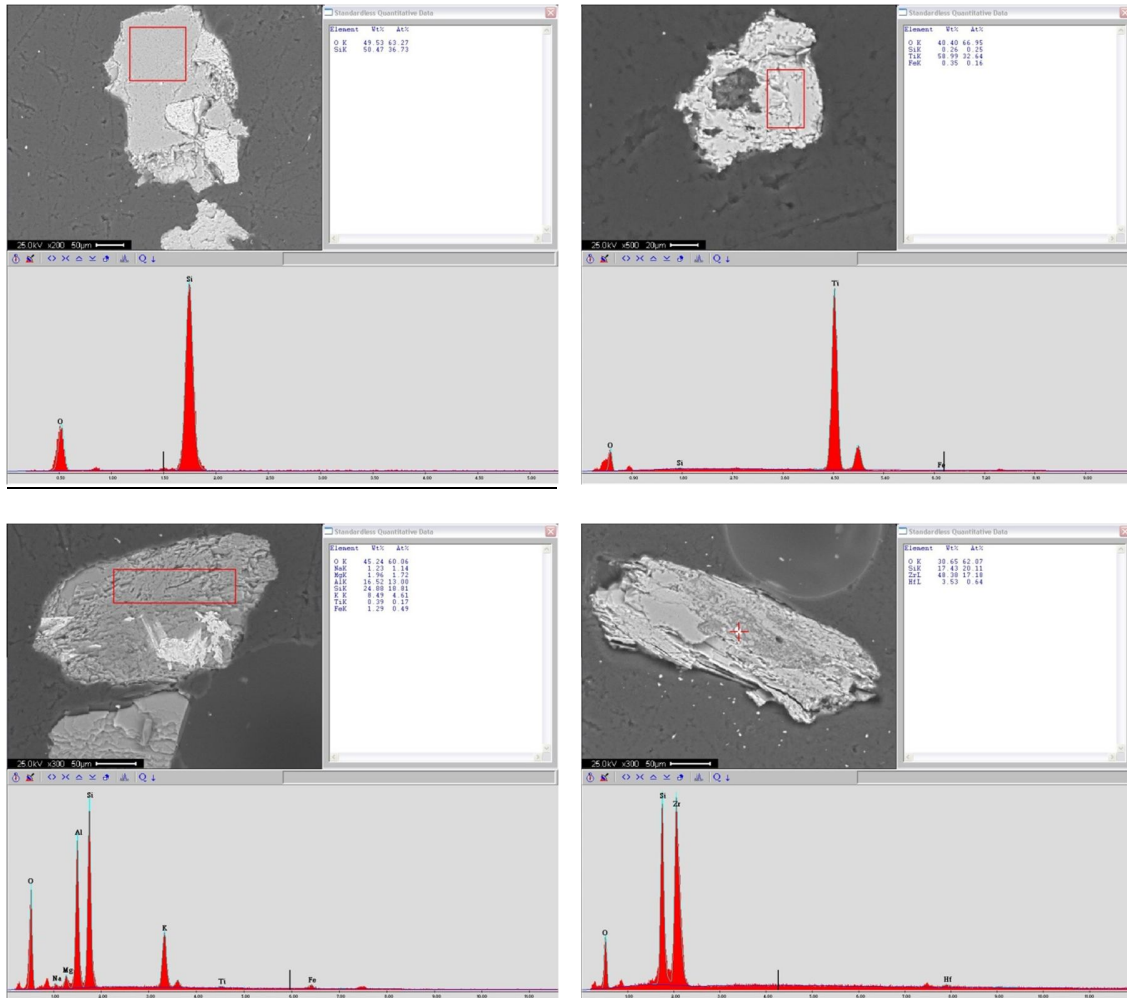


Figura 89. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra Peña-1.

Tabla 27. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra Peña-1

Grano	O	Mg	Al	Si	K	Fe	Ti	Ca	Zr	Na	Cl	F	Hf	Comp Oxido	Mineral
1	49.5			50.5										SiO ₂	CUARZO
2	44.5		16.8	19.3		1.6		17.8						Si ₃ O ₁₀ Ca ₂ Al ₂ (OH) ₂	PREHNITA
3	40.4			0.3		0.4	59.0							TiO ₂	RUTILO
4	40.1	1.4	16.1	20.2	2.9	9.0	7.8			1.6	1.0				
5	45.2	2.0	16.5	24.9	8.5	1.3	0.4			1.2				Si ₂ O ₈ KAl	MICROCLINO
6	42.7	0.3	2.0	1.6	0.4	35.5	14.5			0.3		2.9		TiO ₃ Fe	ILMENITA
7	30.7			17.4					48.4				3.5	SiO ₄ Zr	CIRCON
8	45.8	1.2	8.0	39.5	4.8	0.8								Si ₂ O ₈ KAl	MICROCLINO
9	38.8						61.2							TiO ₂	RUTILO
10	43.3		1.1	31.2	0.7		23.7								

5.4.4.2 Peña-3

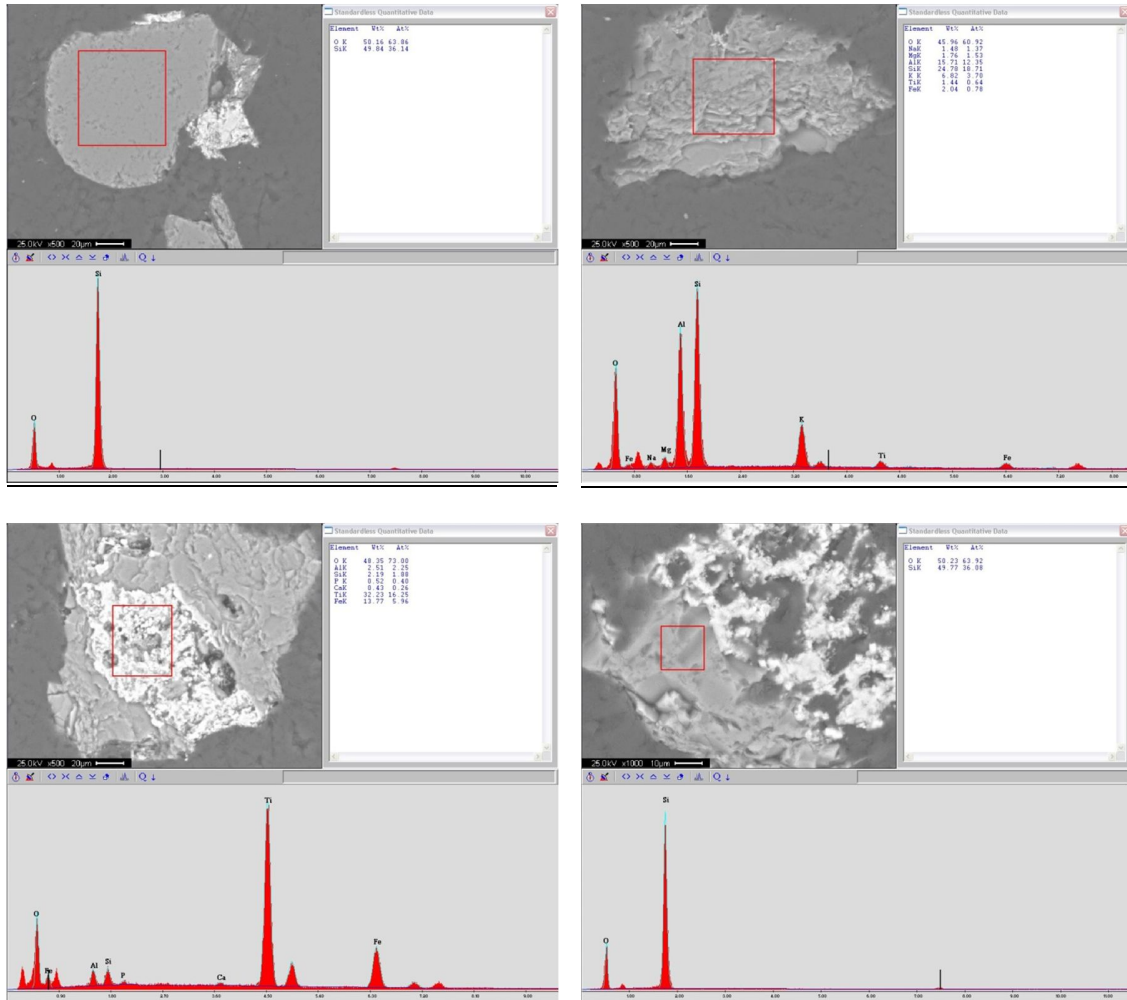


Figura 90. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra Peña-3

Tabla 28. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra Peña-3

Grano	O	Mg	Al	Si	K	Fe	Nb	Ti	P	Ca	Na	Cl	Sr	Pb	Ba	S	Comp Oxido	Nombre del Mineral
1	50.2			49.8													SiO ₂	CUARZO
2	36.6		2.2	3.3		57.6			0.3									
3	46.0	1.8	25.7	24.8	6.8	2.0		1.4			1.5							
4	50.2			49.8													SiO ₂	CUARZO
5	44.6		1.9	0.9		3.5		47.9	0.7	0.5							TiO ₃ Fe	ILMENITA
6	48.4		2.5	2.2		13.8		32.2	0.5	0.4								
7	47.6	0.8	19.3	21.7	0.7	3.0		1.7		0.3	5.0							
8	49.0		17.3	25.0	4.1	1.7					2.3	0.7					Si ₃ O ₈ KAl-Si ₃ O ₈ NaAl	ANORTOCLASA
9	49.4		17.0		0.3	2.0			9.9	4.9	0.5		6.1	5.9	1.6	2.7		

5.4.5 Río Nirgua

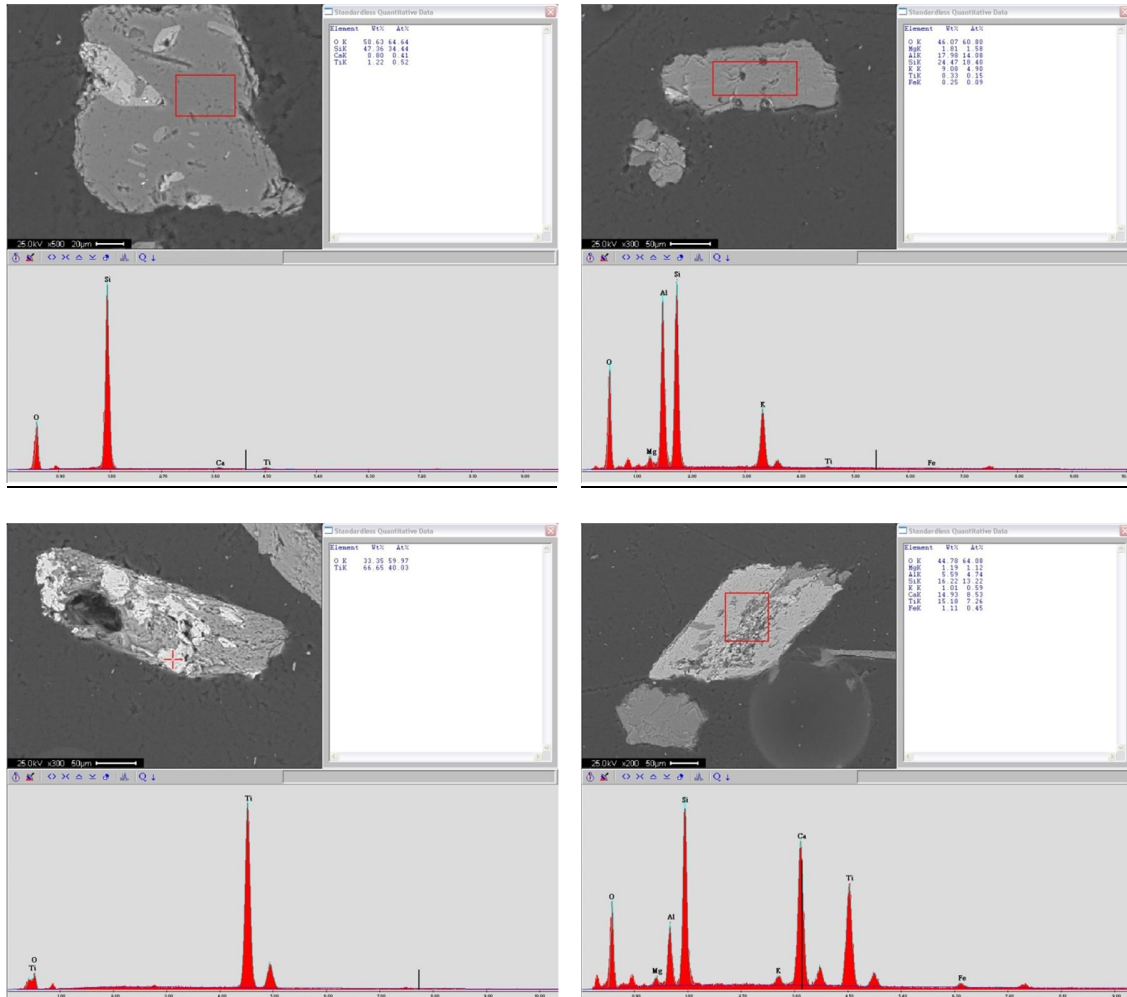


Figura 91. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra del río Nirgua.

Tabla 29. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra del río Nirgua

Grano	O	Mg	Al	Si	K	Fe	Ti	Ca	Na	Comp Oxido	Mineral
1	33.6						66.7			TiO ₂	RUTILO
2	46.8	1.2	17.6	22.5	8.3	1.1	2.6			Si ₂ O ₈ KAl	MICROCLINO
3	44.8	1.2	5.6	16.2	1.0	1.1	15.2	14.9		SiO ₅ CaTi	ESFENA
4	46.1	1.8	18.0	24.5	9.1	0.3	0.3			Si ₂ O ₆ KAl	LEUCITA
5	41.1			0.6			58.3			TiO ₂	RUTILO
6	44.1		17.4	19.7		1.0		17.8		(SiO ₄) ₃ Ca ₂ Al ₃ (OH)	CLINOZOISITA
7	42.5			0.5			57.1			TiO ₂	RUTILO
8	48.2		2.3	45.2	0.8	3.5				Si ₂ O ₁₀ Fe"Al ₁₄ (OH) ₂	ESTAUROLITA
9	50.6			47.4			1.2	0.8		SiO ₂	CUARZO
10	39.5		1.6	11.9		1.0	30.1	15.9		SiO ₅ CaTi	ESFENA
11	51.0		1.2	12.3		0.3	17.9	17.4		SiO ₅ CaTi	ESFENA
12	50.9			47.7			0.8	0.6		SiO ₂	CUARZO
13	44.2		0.8	15.7			20.8	18.5		SiO ₅ CaTi	ESFENA
14	47.3		10.8	32.6		0.9		1.2	8.0	Si ₃ O ₈ NaAl-Ab ₉₀ An ₁₀	ALBITA

5.4.6 Tributario Río Cojedes

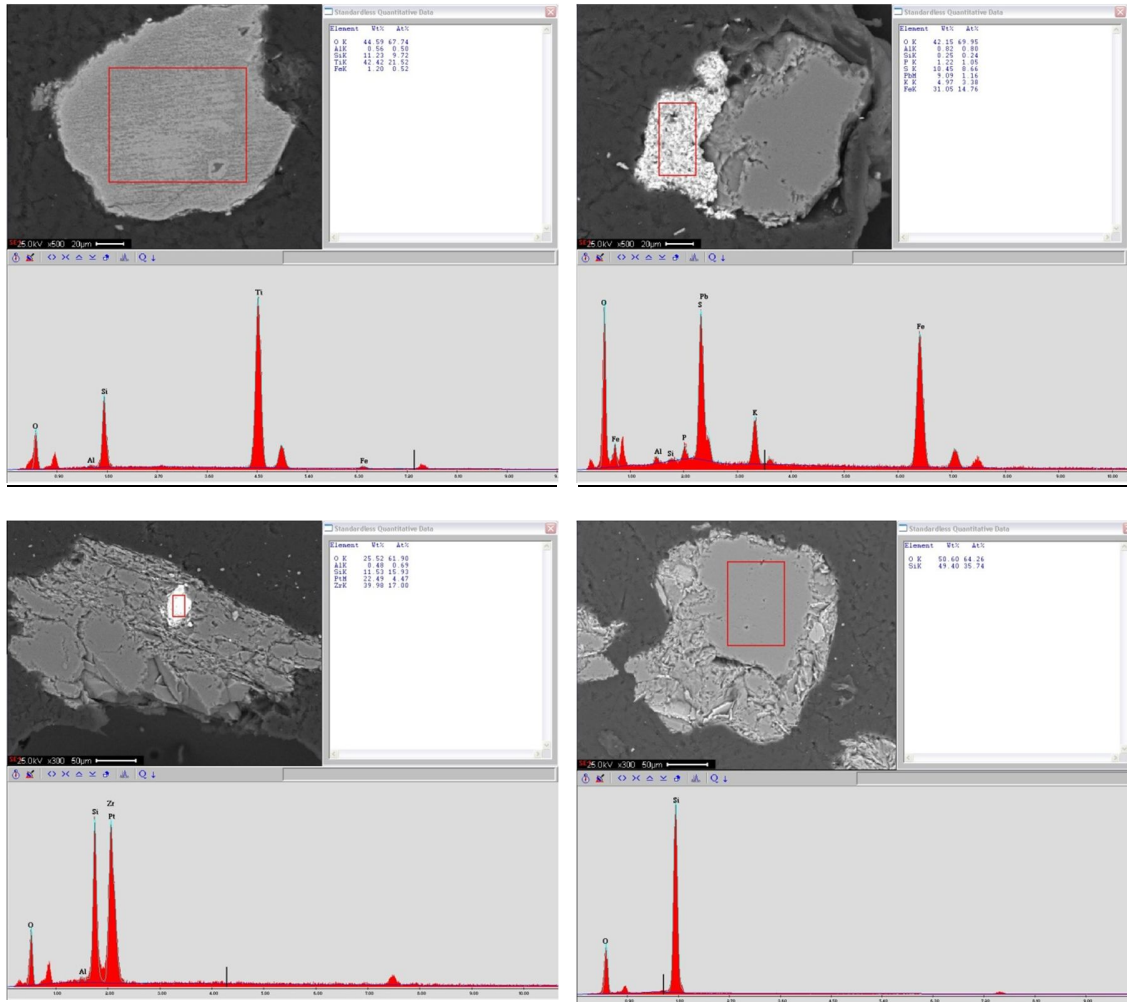


Figura 92. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra del tributario del río Cojedes.

Tabla 30. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra tomada del tributario del río Cojedes.

Grano	O	Al	Si	K	Fe	Ti	P	Ca	Y	U	Ta	Zr	Pb	S	Yb	Co	Ni	La	Nd	Ce	Dy	Pt	Comp Oxido	Mineral	
1	50.3	18.9	22.2	3.5	2.2	0.6																			
2	50.6		49.4																					SiO ₂	CUARZO
3	48.2	8.0	38.9	2.0	2.9																				
4	43.4	2.5	3.4		7.7	42.3	0.4	0.3																	
5	50.4		49.6																					SiO ₂	CUARZO
6	30.6		0.9				14.8		31.8	2.3					7.3	2.1	4.9					5.3			
7	50.3		49.7																					SiO ₂	CUARZO
8	30.6		6.0				12.2											15.3	11.5	24.5					
9	52.9	1.3	45.8																					SiO ₂	CUARZO
10	44.6	0.6	11.2		1.2	42.4																			
11	42.2	0.8	0.3	4.3	31.1		1.2						9.1	10.5											
12	50.5		49.5																					SiO ₂	CUARZO
13	25.5	0.5	11.5									40.0											22.5	SiO ₄ Zr	CIRCON
14	50.5	2.3	46.5	0.7																				SiO ₃ Al ₂	ANDALUCITA

5.4.7 Río Tukuragua

5.4.7.1 Tukuragua-1

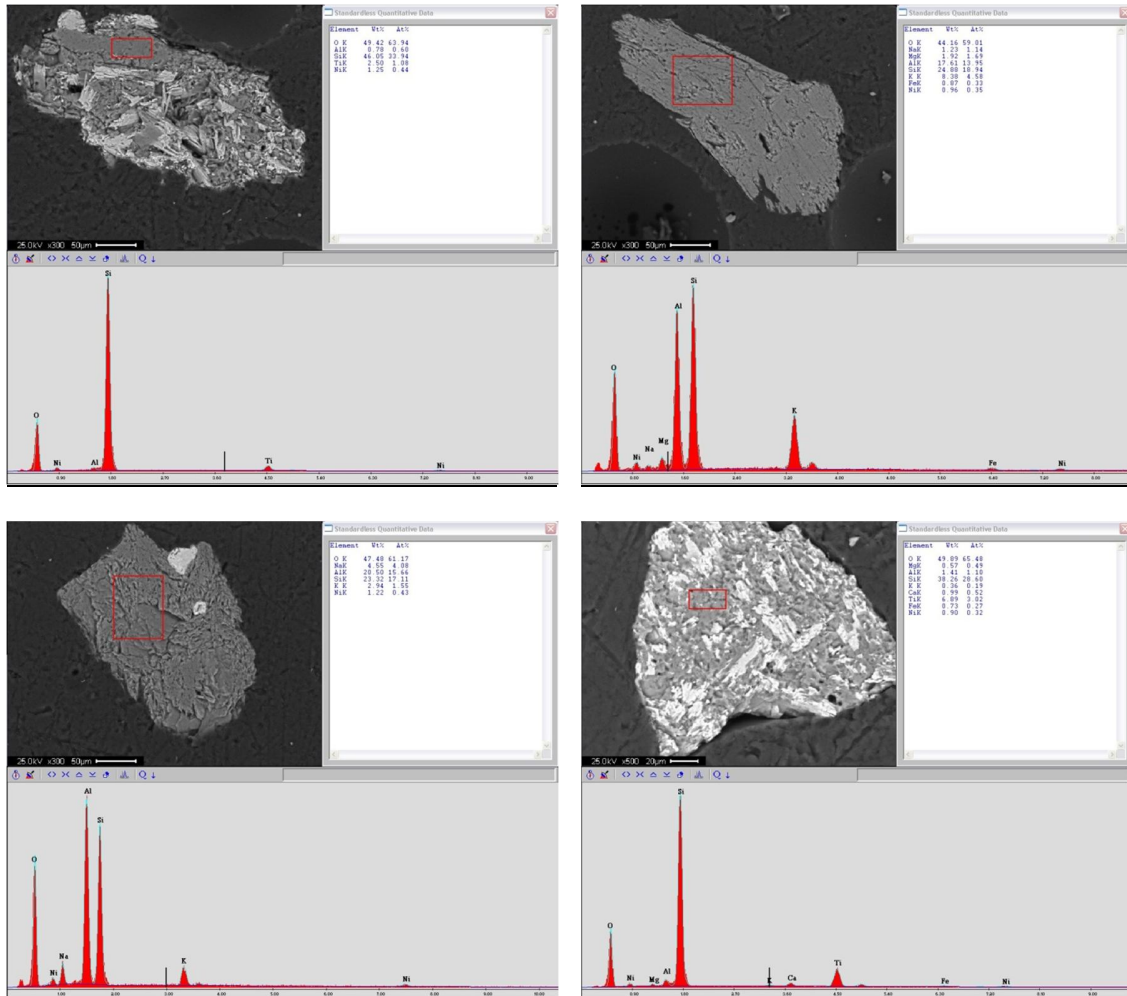


Figura 93. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra Tukuragua-1

Tabla 31. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra Tukuragua-1

Grano	O	Mg	Al	Si	K	Fe	Ti	P	Ca	Zr	Na	Sr	Pb	S	Cu	Comp Oxido	Mineral
1	49.4		0.8	46.1			2.5										
2	32.3			0.5			65.9									TiO ₂	RUTILO
3	44.2	1.9	17.6	24.9	8.4	0.9					1.2					Si ₃ O ₈ KAl	ORTOSA
4																	
5	45.1		3.4	8.0		6.9	33.9	0.5	0.6								
6	49.1		1.9	46.8	1.1											SiO ₂	CUARZO
7	47.5		23.3	23.3	2.9						4.6					SiO ₈ KAl-Si ₃ O ₈ NaAl	ANORTOCLASA
8	38.1		1.2	2.4		56.6			0.3								
9	46.3		15.3		0.9	0.9		3.4	0.9	0.9	1.7	3.0	15.2	9.6	0.7		
10	49.8	0.6	0.4	38.3	0.4	0.7	6.9		1.0								
11	38.4			1.2		0.6	58.6		0.3							TiO ₂	RUTILO

5.4.7.2 Tucuragua-3:

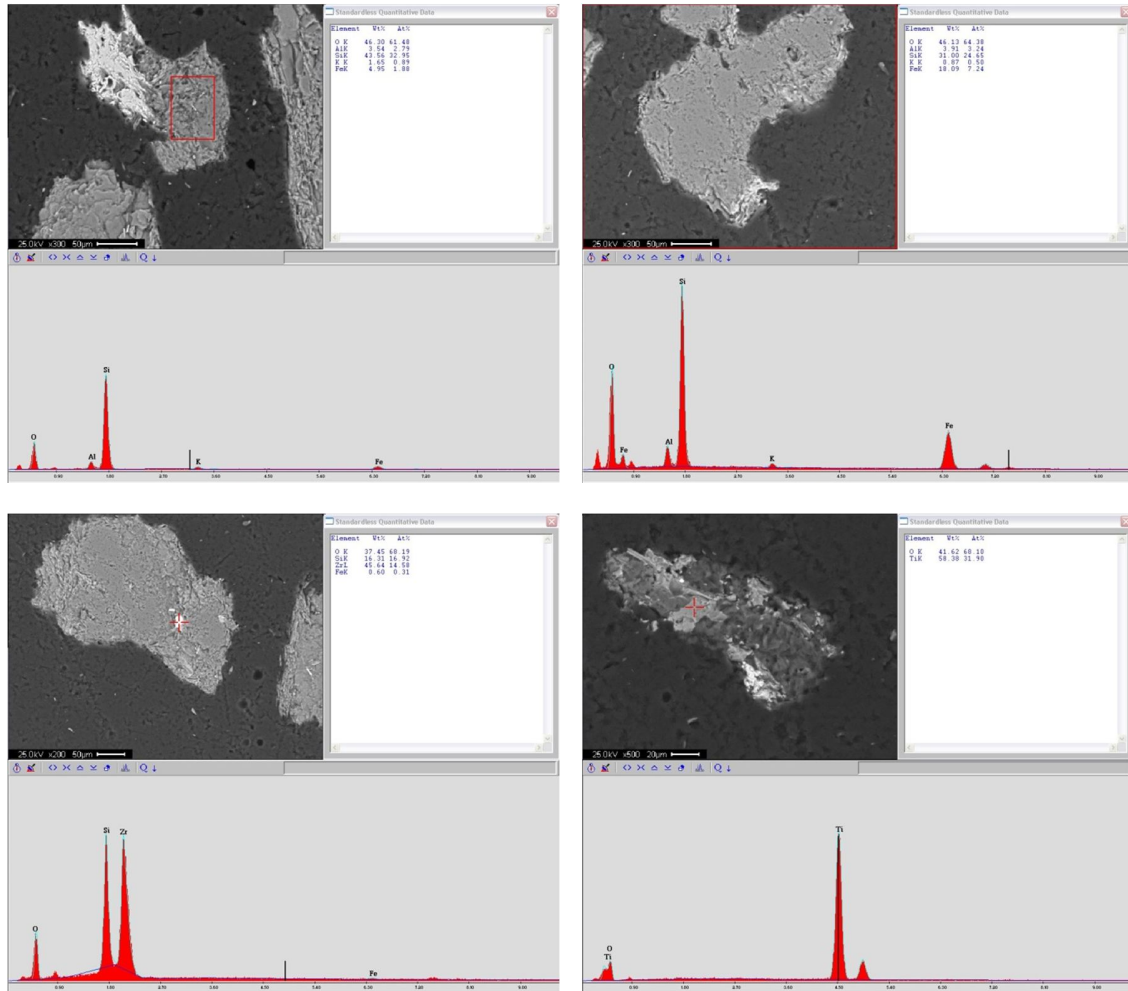


Figura 94. Resultados del análisis por MEB para algunos granos de la muestra Tucuragua-3

Tabla 32. Valor porcentual de elementos químicos discriminados a partir de la concentración de elementos químicos derivadas del MEB para la muestra Tukuragua-3

Grano	O	Al	Si	K	Fe	Ti	Zr	Comp Oxido	Mineral
1	46.3	3.5	43.6	1.7				SiO ₂	CUARZO
2	40.7		1.2			58.1		TiO ₂	RUTILO
3	46.1	3.9	31.0	0.9				Si ₂ O ₈ KAl	MICROCLINO
4	37.5		16.3		0.6		45.6	SiO ₄ Zr	CIRCON
5	41.6					58.4		TiO ₂	RUTILO
6	48.8	22.6	27.5			1.1		Si ₂ O ₈ KAl	MICROCLINO
7	42.5					57.6		TiO ₂	RUTILO

La tabla 33 resume los diferentes minerales pesados discriminados en las secciones epóxicas a partir de la combinación de estudios de DRX y MEB. Los resultados de esta tabla son mostrados en forma gráfica en la Figura 95.

Tabla 33. Minerales existentes en las secciones epóxicas discriminados mediante DRX y MEB

Mineral	Apure	Río Boconó	Falla de Boconó	Nirgua	Peña-1	Peña-3	LP1	LP5	Trib. Cojedes	Tucuragua-1	Tucuragua-3
Biotita	1										
Rutilo	4	3	1	3	2					2	3
Cuarzo	4	3	1	2	1	2	1	2	5	1	1
Ilmenita	1				1	1					
Apaíto	3	2						1			
Heulandita	1										
Esfena	2			4							
Andalucida	1								1		
Anortita/anortoclasa	1					1	1	1		1	
circón	2	1			1				1		1
Fayalita			3		1		4	1			
calcita			1				2	2			
Hematita			1				1	1			
Ortosa							1			1	
microclino				1	2						2
leucita				1							
clinozoisita				1							
estauroлита				1							
Albita				1							
Prehnita											
Monacita		2									
TOTAL	20	11	7	14	8	4	10	8	7	5	7

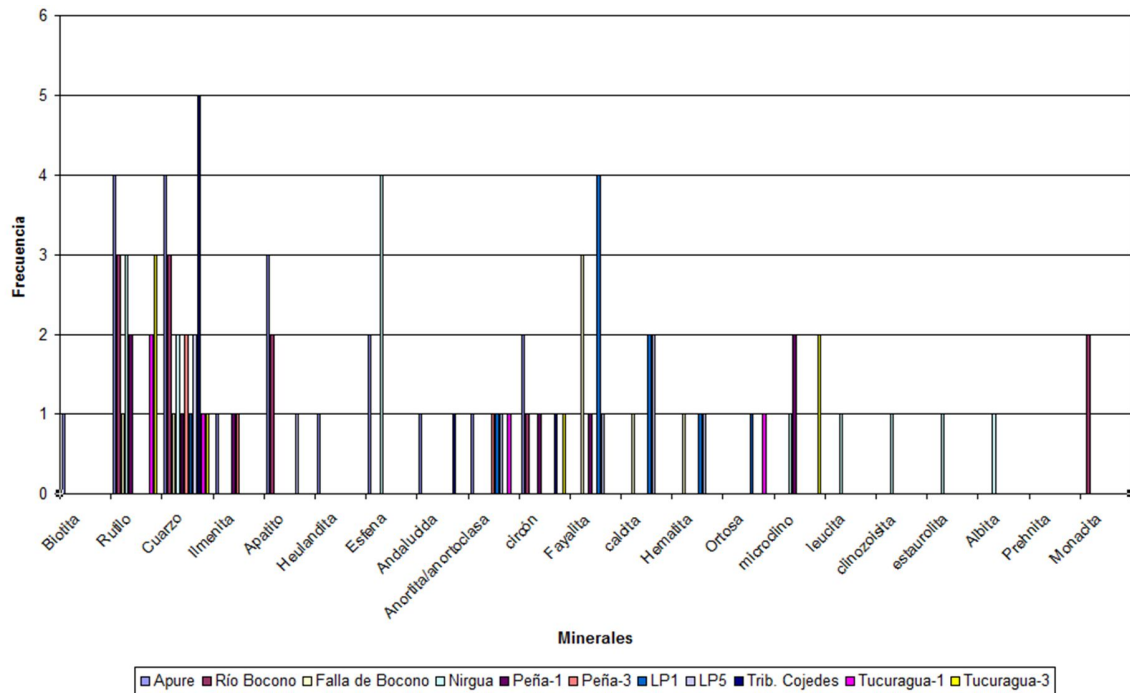


Figura 95. Comparación del contenido de minerales pesados para las diferentes muestras

5.5 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR DIFRACCIÓN LÁSER

La tabla 34 muestra los resultados del análisis granulométrico vía Mastersize, se presentan los percentiles para cada una de las diferentes muestras detríticas analizadas. Las muestras del río Peña exhiben los mayores percentiles, seguido de las muestras del río Boconó. Los ríos Tucuragua, Cojedes y Nirgua tienen similares valores de percentiles. La muestra del río Apure es la que posee menor valor en casi todas las fracciones.

En cuanto a los resultados de escogimiento, asimetría y curtosis, se empleó la tabla 35 con la finalidad de facilitar la descripción de los datos. La comparación final de los análisis granulométricos de las diferentes muestras es presentada en la Tabla 36. Todas las muestras presentan una Curva Normal o Mesocúrtica, y presentan una importante asimetría. En cuanto al escogimiento, este varía entre muy mal escogidas a pobremente escogidas. Así las muestras: Boconó, Peña y el tributario de Cojedes tienen muy mal escogimiento, mientras que Apure, Nirgua y Tucuragua están pobremente escogidos.

Tabla 34. Resultados de los análisis granulométricos por difracción láser (master sizer 2000)

RIOS	P10	P25	P50	P75	P90	MEDIANA (M)	ESCOGIMIENTO (So)	ASIMETRIA (Sk)	CURTOSIS (K)
APURE	117.46	160	182.849	250	283.852	205	1.56	1.19	0.27
BOCONO	140.776	180	259.086	375	463.372	277.5	2.08	1	0.3
NIRGUA	90.572	125	182.836	250	343.815	187.5	2	0.93	0.246
PEÑA	175.459	250	375.731	575	787.686	412.5	2.3	1.018	0.26
TUCURAGUA	119.468	175	213.069	275	337.937	225	1.57	1.06	0.22
TRIBUTARIO COJEDES	67.339	130	193.885	275	359.664	202.5	2.11	0.95	0.248

Tabla 35. Valores referenciales usados para interpretar los resultados de la tabla 2.

CURTOSIS (K)	Interpretación	Nomenclatura
0,20-0,30	Curva Normal o Mesocúrtica	KCNOM
0,31-0,65	Curva Aguda o Leptocúrtica	KCAOL
0,00-0,19	Curva Planada o Platicúrtica	KCPOPL
ESCOGIMIENTO (So)	Interpretación	Nomenclatura
0,0-0,35	Muy Bien Escogido	SoMBE
0,35-0,50	Bien Escogido	SoBE
0,5-0,71	Moderadamente Bien Escogido	SoMOBE
0,71-1,00	Moderamente Escogido	SoME
1,00-2,00	Pobremente Escogido	SoPE
> 2,00	Muy Mal Escogido	SoMME
ASIMETRIA (Sk)	Interpretación	Nomenclatura
Sk > + 0,30	Fuerte Asimetría Hacia Los Finos	SkFAHLF
(+ 0,30 a - 0,10)	Asimetría A Los Finos	SkAALF

(+ 0,10 a - 0,10)	Cercano A La Simetría o Simétrica	SkCS
(- 0,10 a - 0,30)	Asimetría A Los Gruesos	SkALG
> de - 0,30	Fuerte Asimetría Hacia Los Gruesos	SkFAHLG

Tabla 36. Resumen y comparación de las diferentes propiedades para cada muestra

RIOS	ESCOGIMIENTO (So)	ASIMETRIA (Sk)	CURTOSIS (K)
APURE	SoPE	SkFAHLF	KCNOM
BOCONO	SoMME	SkFAHLF	KCNOM
NIRGUA	SoPE	SkFAHLF	KCNOM
PEÑA	SoMME	SkFAHLF	KCNOM
TUCURAGUA	SoPE	SkFAHLF	KCNOM
TRIBUTARIO COJEDES	SoMME	SkFAHLF	KCNOM

5.6 ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

El análisis realizado a cada una de las muestras se hizo a través de las fichas PDF del Instituto de Difracción de Rayos X (IDCC, 2007). Se calculó las distancia interplanar de cada una de las señales reportadas en counts, a través de la ecuación $n \lambda = 2 d \text{ Sen } \theta$, dichos datos están ubicados en el anexo A6.1. La distancia interplanar se calcula y es llevada a cada uno de los picos del difractograma, son los números verticales. Y sobre dichos números aparecen unos números del 1 al 5, correspondientes a la leyenda de los minerales encontrados.

5.6.1 Río Apure

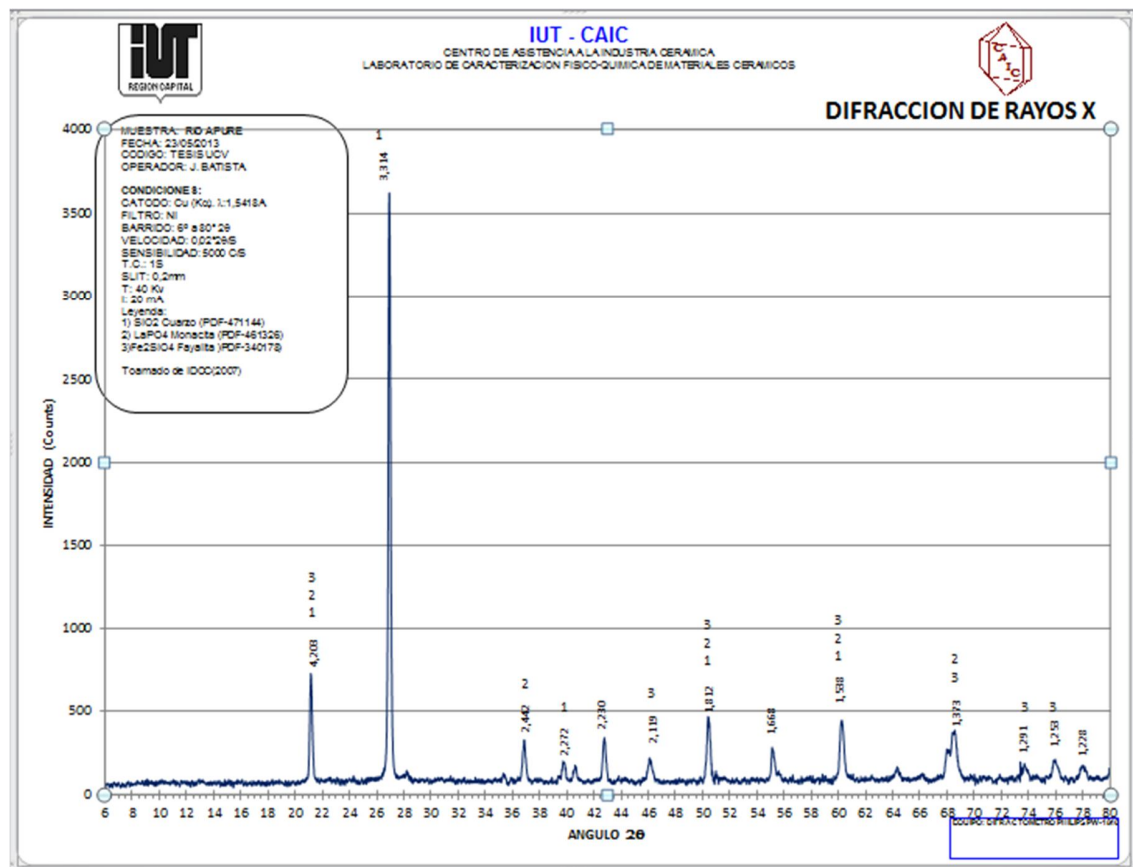


Figura 96. Resultados del análisis de DRX para la muestra del río Apure.

Composición Química	Leyenda	Nº PDF (IDCC)	Nombre del Mineral
SiO ₂	1	471144	Cuarzo
LaPO ₄	2	461326	Monacita
Fe ₂ SiO ₄	3	340178	Fayalita

5.6.2 Río Boconó

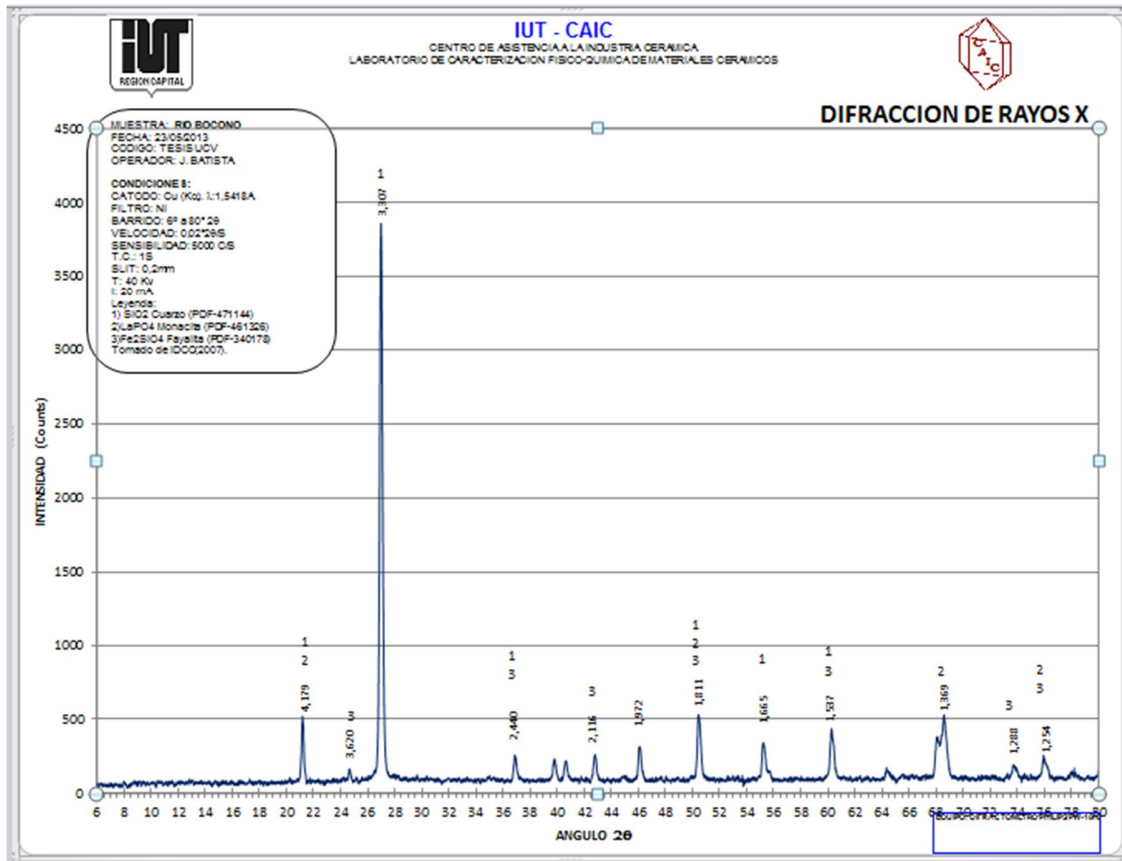


Figura 97. Resultados del análisis de DRX para la muestra del río Boconó

Composición Química	Leyenda	Nº PDF (IDCC)	Nombre del Mineral
SiO ₂	1	471144	Cuarzo
LaPO ₄	2	461326	Monacita
Fe ₂ SiO ₄	3	340178	Fayalita

5.6.3 Quebrada Las Palmas

5.6.3.1 Las Palmas-1 (LP₁)

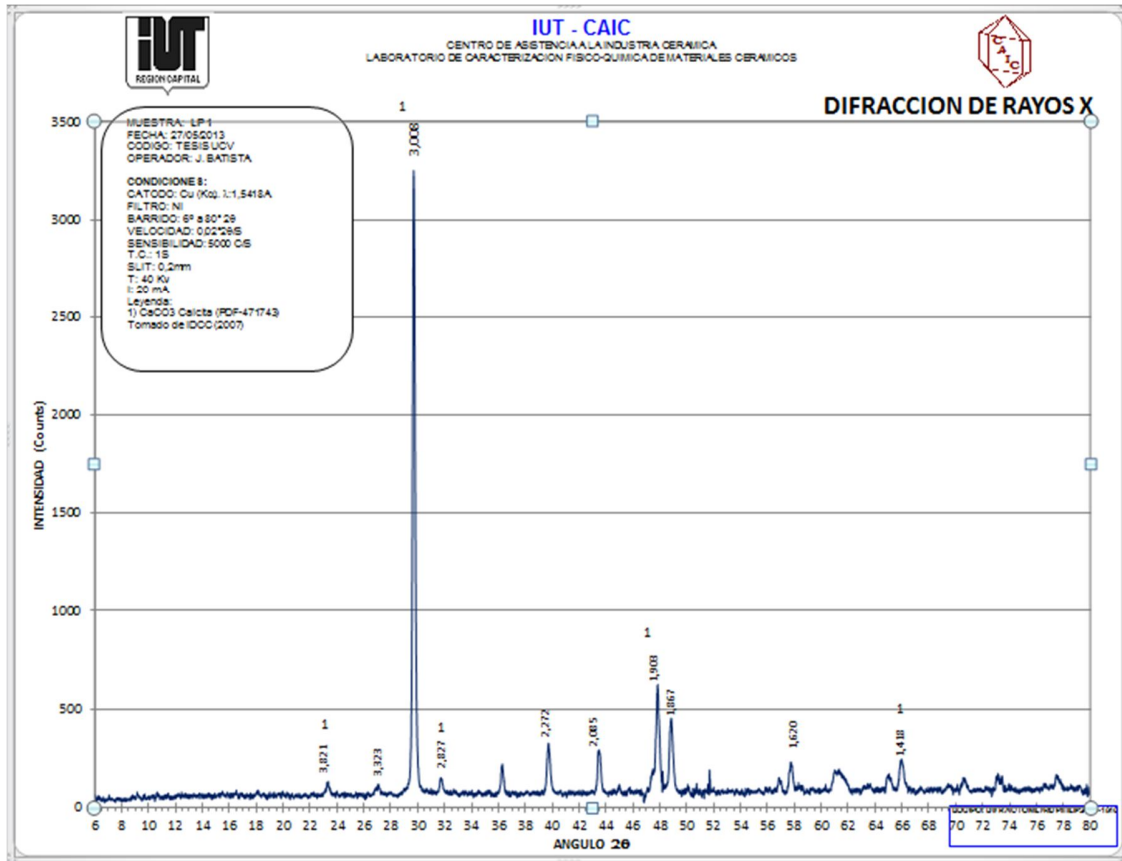


Figura 98. Resultados del análisis de DRX para la muestra Las Palmas-1 (LP₁)

Composición Química	Leyenda	Nº PDF (IDCC)	Nombre del Mineral
CaCO ₃	1	471743	Calcita

5.6.3.2 Las Palmas 5 (LP₅)

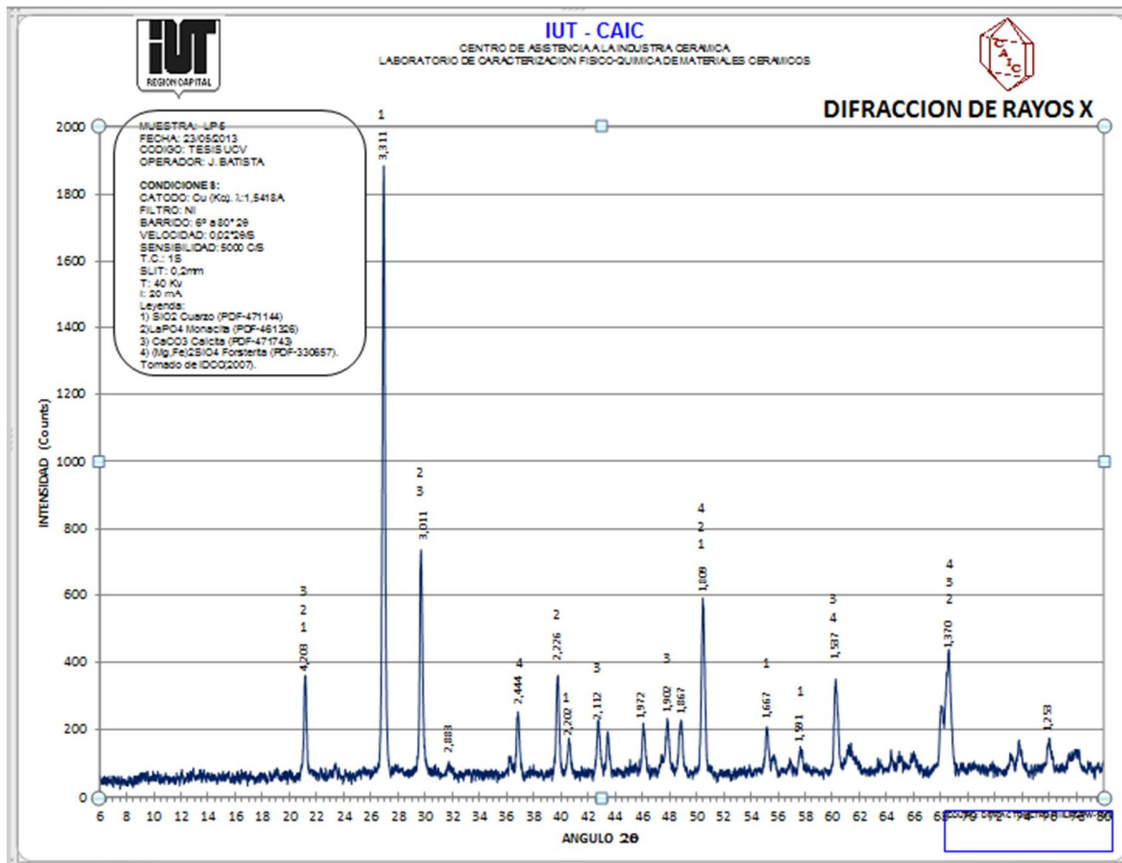


Figura 99. Resultados del análisis de DRX para la muestra Las Palmas-5 (LP₅)

Composición Química	Leyenda	Nº PDF (IDCC)	Nombre del Mineral
SiO ₂	1	471144	Cuarzo
LaPO ₄	2	461326	Monacita
CaCO ₃	3	471743	Calcita
(Mg,Fe) ₂ SiO ₄	4	330657	Forsterita

5.6.5 Río Nirgua

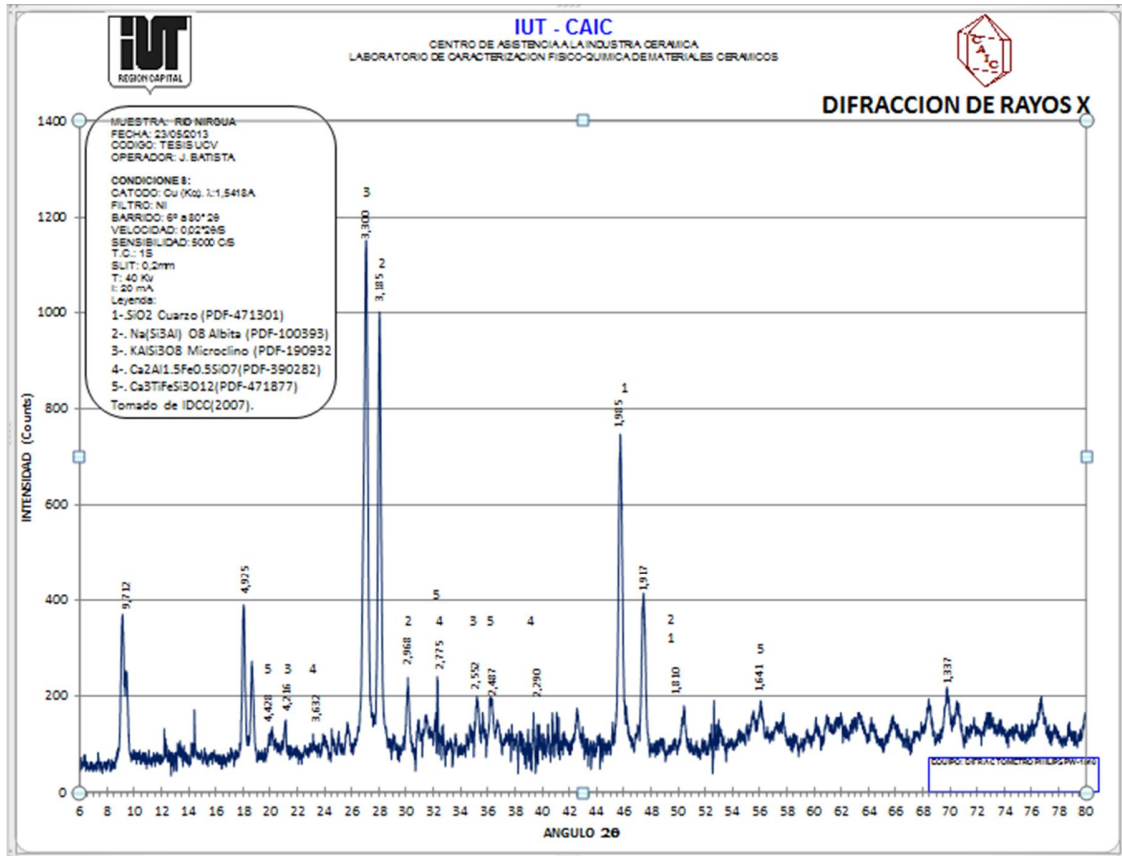


Figura 100. Resultados del análisis de DRX para la muestra del río Nirgua.

Composición Química	Leyenda	Nº PDF (IDCC)	Nombre del Mineral
SiO ₂	1	471301	Cuarzo
Na(Si ₃ Al)O ₈	2	100393	Albita
KAlSi ₃ O ₈	3	190932	Microclino
Ca ₂ Al _{1.5} Fe _{0.5} SiO ₇	4	390282	
Ca ₃ TiFeSi ₃ O ₁₂	5	471877	Morimotoite (Granate)

5.6.6 Tributario del Río Cojedes

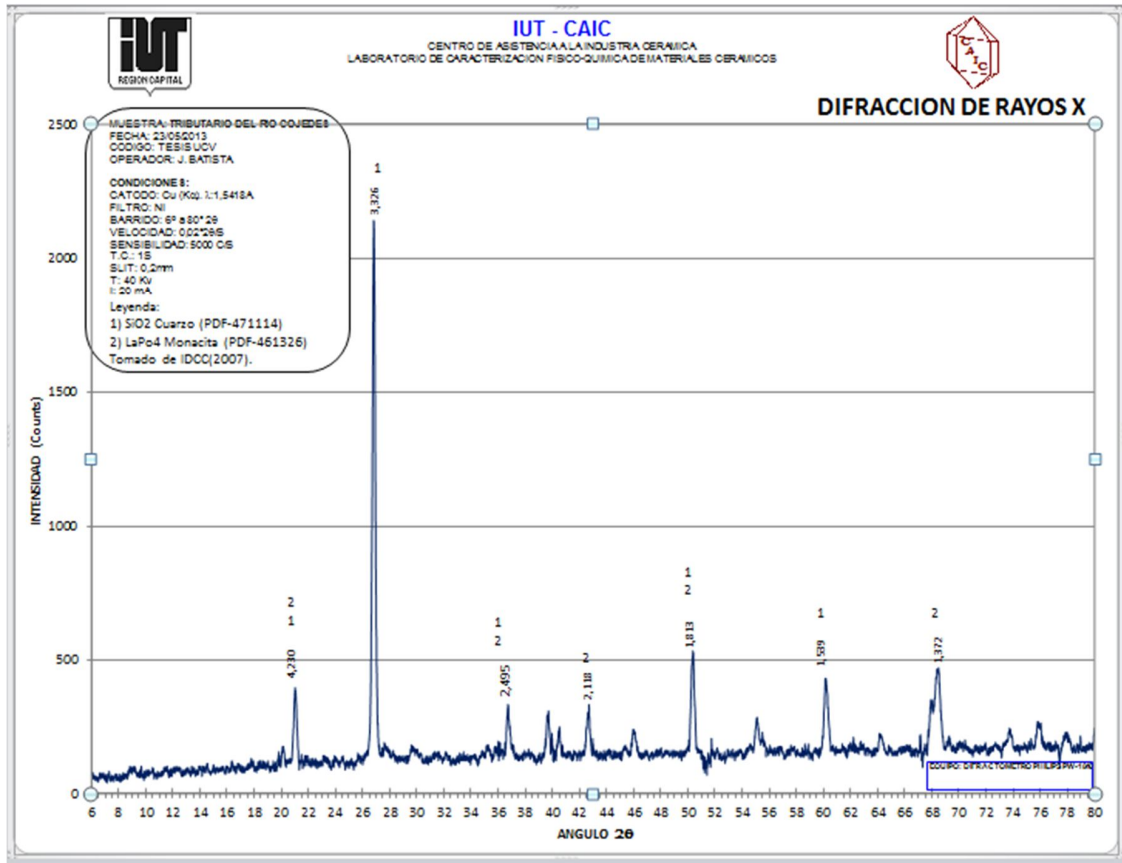


Figura 101. Resultados del análisis de DRX para la muestra perteneciente al tributario del río Cojedes.

Composición Química	Leyenda	Nº PDF (IDCC)	Nombre del Mineral
SiO ₂	1	471144	Cuarzo
LaPO ₄	2	461326	Monacita

5.6.7 Río Tucuragua

5.6.7.1 Tucuragua-1 (Tucu 1)

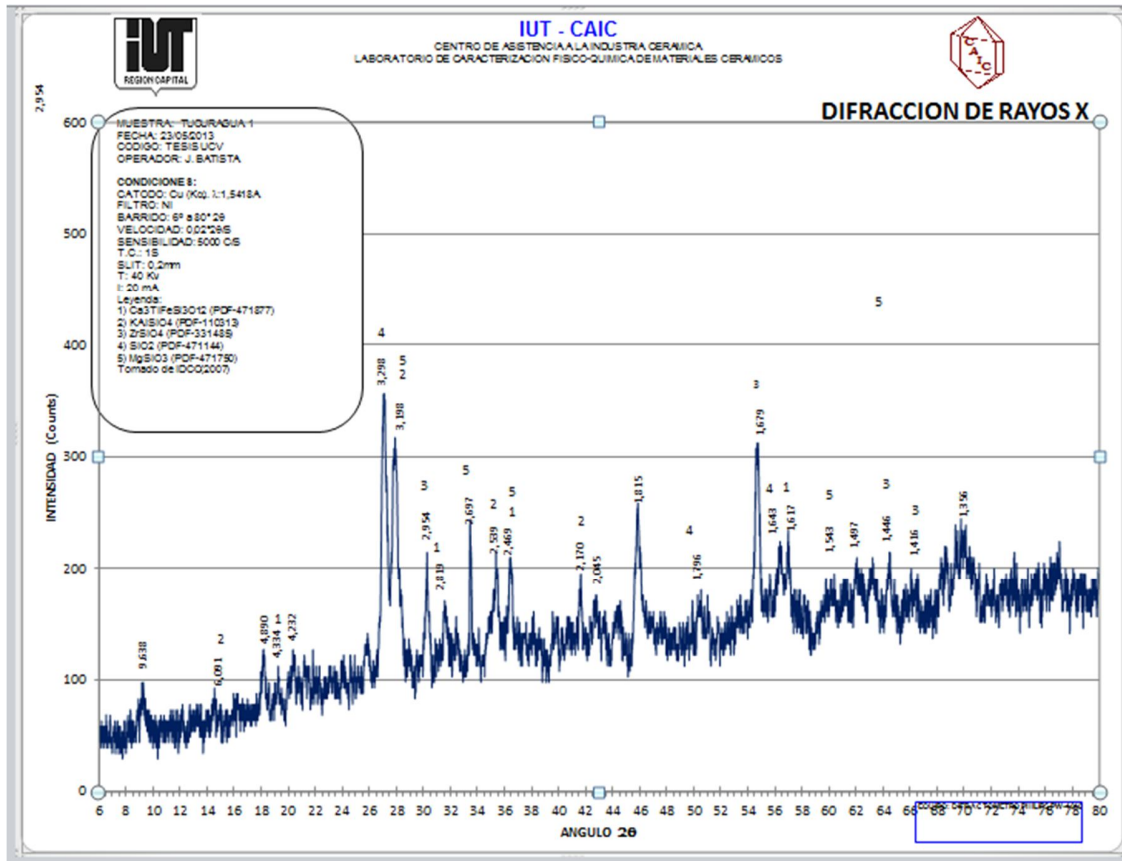


Figura 102. Resultados del análisis de DRX para la muestra Tucuragua-1

Composición Química	Leyenda	N° PDF (IDCC)	Nombre del Mineral
$\text{CaTiO}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}$	1	471877	
KAlSiO_4	2	110313	Microclino
ZrSiO_4	3	331485	Zircón
SiO_2	4	471144	Cuarzo
MgSiO_3	5	471750	Climoenstatita

5.6.7.2 Tucuragua-3 (Tucu 3)

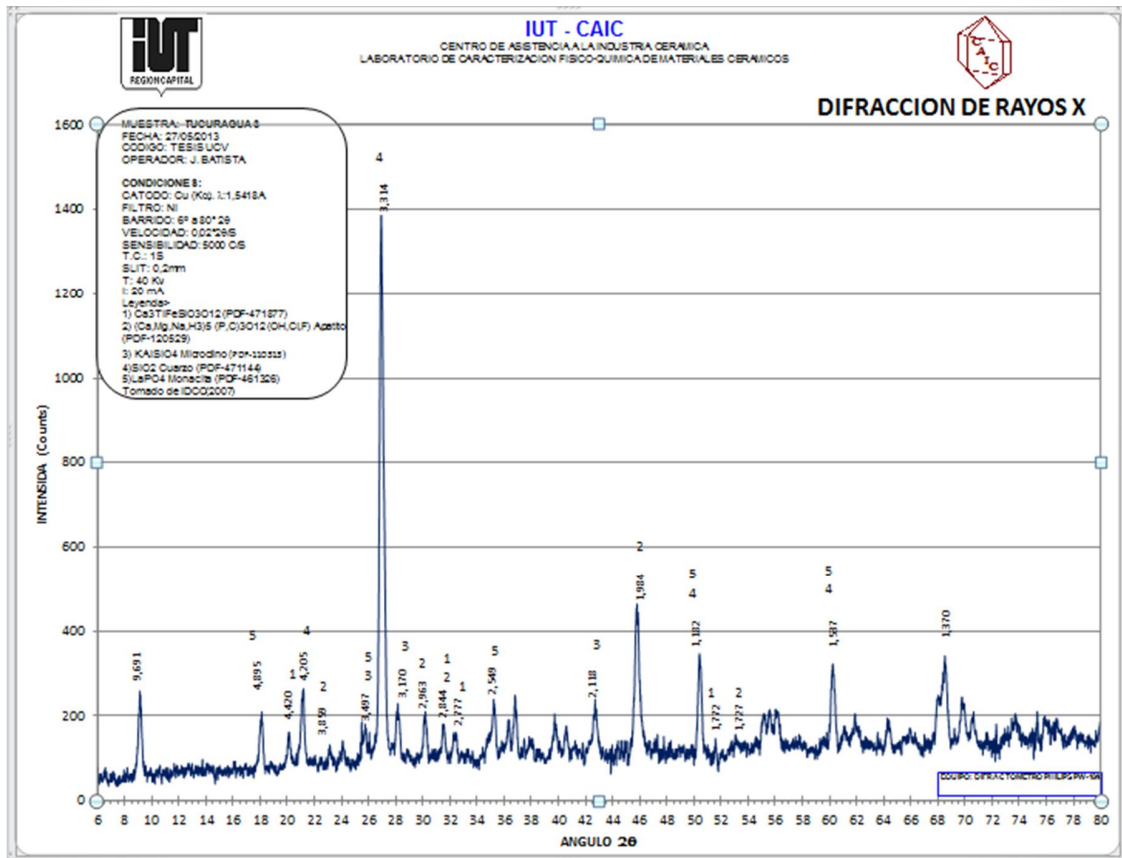


Figura 103. Resultados del análisis de DRX para la muestra Tucuragua

Composición Química	Leyenda	Nº PDF(IDCC)	Nombre del Mineral
$\text{Ca}_3\text{TiFeSi}_3\text{O}_{12}$	1	471877	Morimotoite
$(\text{Ca,Mg,Na,H}_3)_5 (\text{P,C})_3 \text{O}_{12} (\text{OH,Cl,F})$	2	120529	Apatito
KAlSiO_4	3	110313	Microclino
SiO_2	4	471144	Cuarzo
LaPO_4	5	461326	Monacita

5.6.8 Falla de Boconó

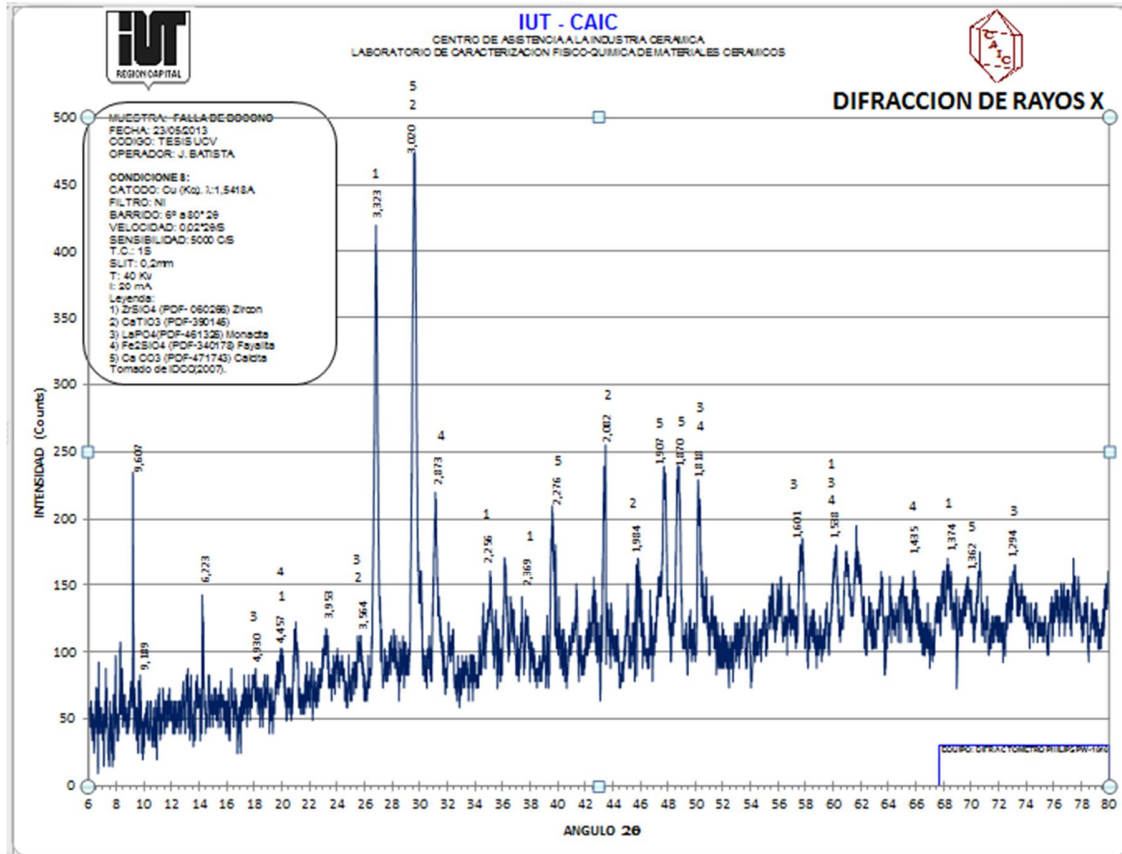


Figura 104. Resultados del análisis de DRX para la muestra de la Falla de Boconó.

Composición Química	Leyenda	Nº PDF (IDCC)	Nombre del Mineral
ZrSiO ₄	1	060266	Zircón
CaTiO ₃	2	390145	Perovskita
LaPO ₄	3	461326	Monacita
Fe ₂ SiO ₄	4	340178	Fayalita
CaCO ₃	5	471743	Calcita

5.6.9 Río Peña

5.6.9.1 Peña 3

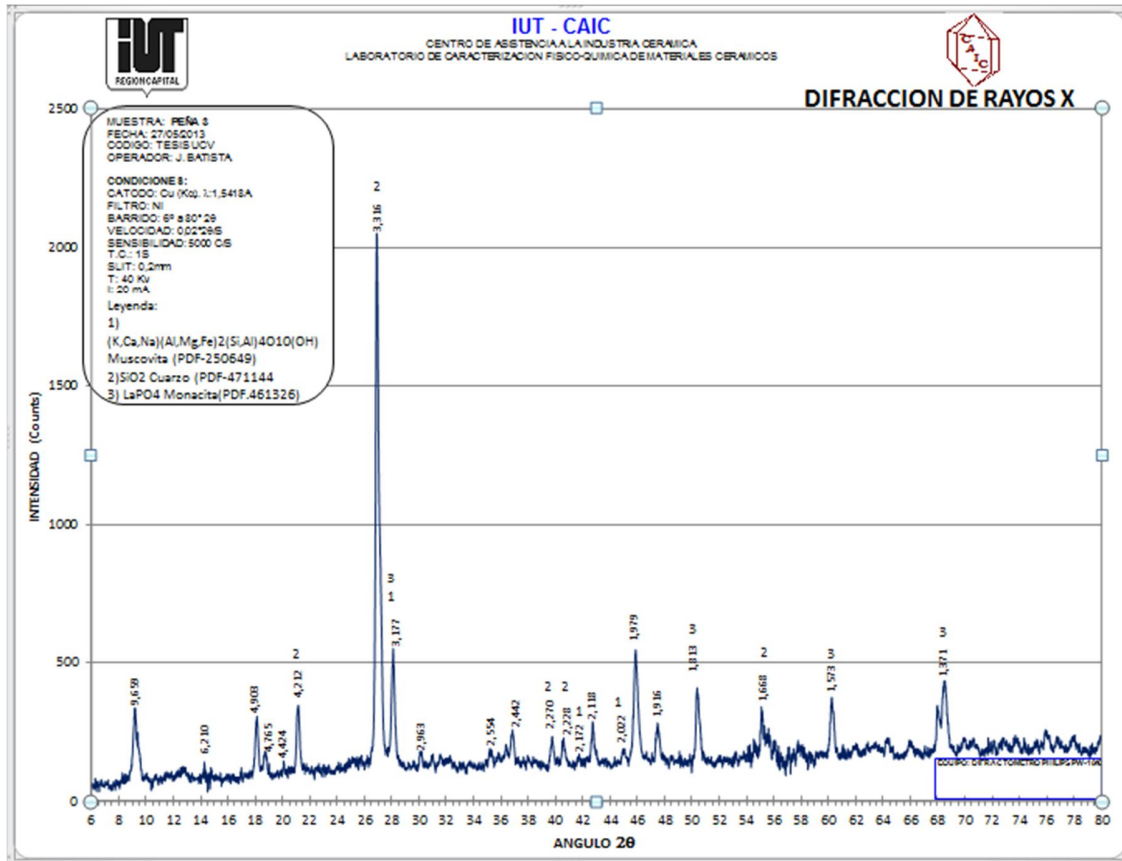


Figura 105. Resultados del análisis de DRX para la muestra de Peña 3.

Composición Química	Leyenda	Nº PDF (IDCC)	Nombre del Mineral
$(K,Ca,Na)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)$	1	250649	Muscovita
SiO_2	2	471144	Cuarzo
$LaPO_4$	3	461326	Monacita

5.7 ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO

La Tabla 37 resume los valores de los atributos del terreno de primer orden para cada una de las cuencas estudiadas.

La mayor área la ocupa la cuenca del río Apure ($122931,5 \text{ km}^2$), la cual engloba el resto de las otras cuencas. Análogamente esta cuenca posee mayor perímetro (3195 km), menor pendiente ($4.79 \pm 8.15^\circ$) y menor elevación promedio ($380.52 \pm 577.60 \text{ m}$).

La sub-cuenca MIBF ocupa el segundo lugar en cuanto a área (4165.8 km^2) y perímetro (449.3 km) se refiere, pero posee pendientes ($8.92 \pm 7.25^\circ$) similares a las cuencas del río Nirgua y Peña, pero con una elevación de $651.62 \pm 337.49 \text{ m}$.

La cuenca con mayor valor promedio de pendiente ($17.92 \pm 9.31^\circ$) y elevación ($1738.91 \pm 903.06 \text{ m}$) es la del río Boconó, posee un área de 1639 km^2 y un perímetro de 295 km.

La cuenca del río Nirgua tiene un área de 975 km^2 , con 221 km de perímetro. Posee una pendiente ($8.94 \pm 7.45^\circ$) similar a la sub-cuenca in-situ de MIFB y Peña, mientras que su elevación es de $535.67 \pm 284.55 \text{ m}$.

Por último se tiene la cuenca de la Quebrada Peña, esta es un tributario del río Nirgua, siendo esta la de menor área (66.6 km^2) y menor perímetro (43.7 km), mientras que su pendiente es de $8.59 \pm 5.88^\circ$ y presenta una elevación promedia de $909.52 \pm 136.53 \text{ m}$.

Tabla 37. Atributos del terreno de primer orden calculados para cada cuenca.

Cuenca	Area (km2)	Perímetro (km)	Pendiente (°)				Elevación (m)			
			min	max	mean	sd	min	max	mean	sd
Peña	66.60	43.70	0.00	30.04	8.59	5.88	756.00	1315.00	909.52	136.53
MIBF	4165.80	449.30	0.00	46.25	8.92	7.25	166.00	2246.00	651.62	337.49
Nirgua	975.00	221.00	0.00	42.73	8.94	7.45	247.00	1761.00	535.67	284.55
Boconó	1639.00	295.00	0.00	61.66	17.92	9.31	173.00	3930.00	1738.91	903.06
Apure	122931.50	3195.00	0.00	73.88	4.79	8.15	45.00	4799.00	380.52	577.60

La Tabla 38 nos da los valores respecto a los índices de erosión, y muestra que la cuenca del río Boconó posee los mayores valores de índices de erosión para el Poder de Flujo Total (TSP), Poder de Flujo Unitario (USP) y Poder de Flujo de Cizalla (SSP). Seguido por la sub-cuenca formada por la muestra in-situ de la falla de Boconó (MIBF) y la del río Nirgua, éstas dos poseen valores muy similares, en cuanto a las tasas de erosión. Mientras que la cuenca del río Peña y la cuenca del río Apure poseen los menores valores de erosión.

Tabla 38. Valores estadísticos de índices de erosión para cada una de las cuencas.

Cuenca	TSP				USP				SSP			
	min	max	media	desv.est	min	max	media	desv.est	min	max	media	desv.est
Peña	0	4.67E+06	2.42E+04	1.53E+05	0	667.50	25.04	41.99	0	76.38	6.57	7.84
MIBF	0	5.59E+08	1.84E+05	4.23E+06	0	9555.42	32.95	122.14	0	450.30	7.20	11.95
Nirgua	0	9.32E+07	1.25E+05	1.82E+06	0	5271.30	32.78	117.53	0	302.89	7.12	11.94
Boconó	0	5.55E+08	3.71E+05	6.82E+06	0	18044.98	79.52	252.77	0	687.97	14.23	19.00
Apure	0	3.00E+09	2.51E+05	1.00E+07	0	25882.88	19.48	111.73	0	875.00	4.16	10.34

En cuanto a los valores de índices de erosión mostrados en la Tabla 39, la cuenca del río Boconó presenta la mayor tasa de erosión para cualquiera de los índices (TSP, USP y

SSP) y la de menor tasa de erosión es la cuenca de Apure. Y asumiendo una precipitación uniforme (TSP, USPP, SSPP) en el tiempo, los mayores valores de índices de erosión con precipitación están en MIBF, seguido de Nirgua, Apure, Boconó y la de menor es Peña. Las Figuras 106, 107 y 108, ilustran las comparaciones en términos de índices de erosión para cada una de las cuencas estudiadas. .

Tabla 39. Valores de índices de erosión para cada cuenca, incluyendo la precipitaciones.

Cuenca	TSP		USP		SSP		TSPP		USPP		SSPP	
	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	Sd	mean	sd
Peña	24161. 65	155. 44	25.04	5.00	6.57	2.56	1863561. 10	1365.1 2	24.04	4.90	4.99	2. 23
MIBF	183748 .19	428. 66	32.95	5.74	7.20	2.68	1526467. 30	1235.5 0	123.3 8	11.1 1	17.28	4. 16
Nirgua	124599 .44	352. 99	32.78	5.73	7.12	2.67	4325993. 50	2079.9 0	111.7 3	10.5 7	13.31	3. 65
Boconó	370743 .53	608. 89	79.52	8.92	14.2 3	3.77	3550892. 80	1884.3 8	55.04	7.42	9.76	3. 12
Apure	250782 .38	500. 78	19.48	4.41	4.16	2.04	1060654. 50	1029.8 8	67.22	8.20	12.89	3. 59

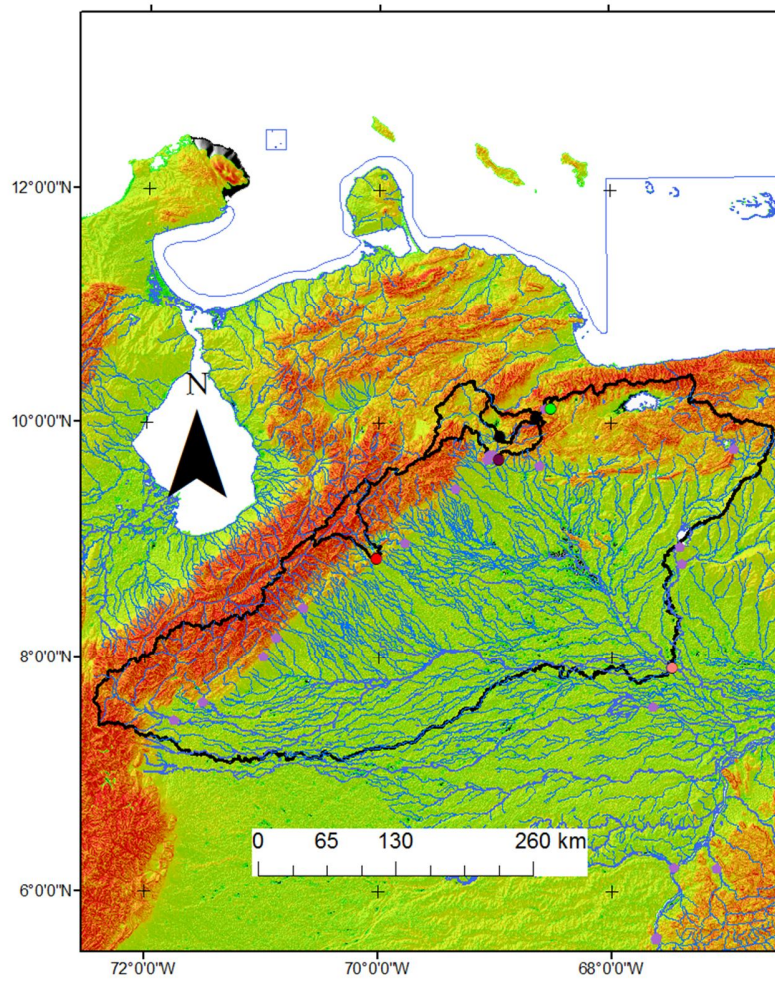


Figura 106. *Mapa de índice de erosión TSP normalizado [0,1] con precipitación uniforme. Valores en naranja representan sitios de alta erosión, valores en verde lo contrario.*

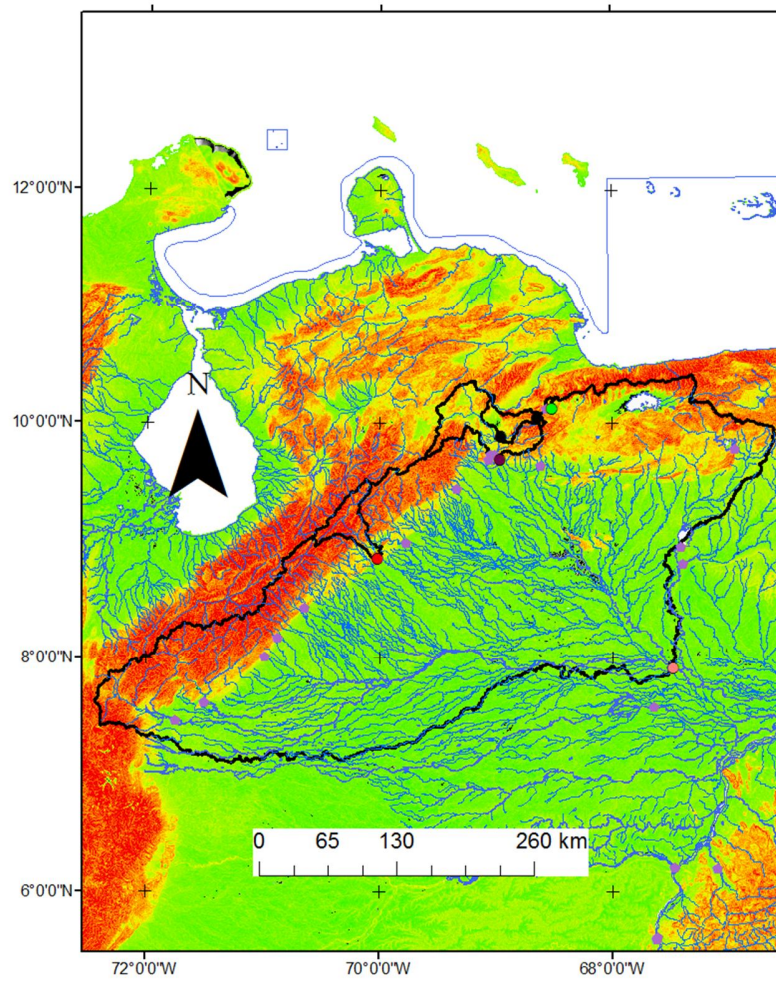


Figura 107. Mapa de índice de erosión USP normalizado [0,1] con precipitación uniforme. Valores en naranja representan sitios de alta erosión, valores en verde lo contrario.

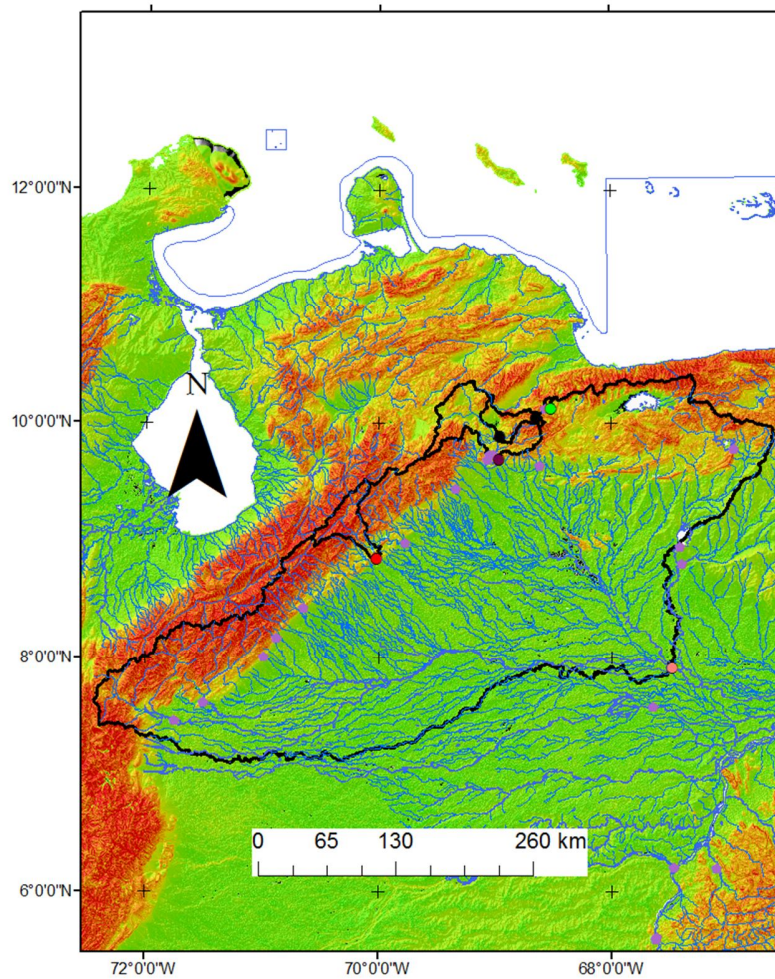


Figura 108. *Mapa de índice de erosión SSP normalizado [0,1] con precipitación uniforme. Valores en naranja representan sitios de alta erosión, valores en verde lo contrario.*

En la Figuras 109 y 110 se muestra la comparación del relieve calculado en un radio de 1-km para cada una de las diferentes cuencas. Nótese en estas Figuras que el relieve se encuentra siempre en la parte superior de cada una de las cuencas, y el relieve pertenece a las principales cadenas montañosas. La cuenca del río Apure incluye la parte sur de Los Andes de Venezuela, La Serranía del Interior, La Cordillera de la Costa y el arco del Baúl. A nivel global, la cuenca de apure es la que engloba el mayor relieve, pero este se ve disminuido a medida que se desciende aguas abajo hacia la cuenca del río Orinoco, por esta razón el relieve promedio es de apenas 72.9 metros. El relieve promedio de la cuenca de apure es de 72.93 m.

(Tabla 40), mientras que la cuenca que exhibe el mayor relieve es la que corresponde al río Boconó con un relieve promedio de 280.31 m. La cuenca formada por la muestra in-situ de la falla de Boconó (MIBF), el río Peña y Nirgua exhiben similares valores de relieves promedio entre 118 a 135 m.

También se indica en la Tabla 40 que la cuenca de Boconó posee la mayor tasa de precipitación según los datos satelitales TRMM de la NASA, estableciendo un promedio durante los años (1998-2009) y es de 1.56 ± 0.70 m/año, seguida por la cuenca de Apure, que es de 1.44 ± 0.58 m/año. La cuenca de Peña presenta una precipitación de 1.04 ± 0.10 m/año, muy similar a la cuenca de Nirgua 1.01 ± 0.32 m/año. Y por último la que posee la menor tasa de precipitación es la sub-cuenca formada por la muestra MIBF de 0.93 ± 0.37 m/año. En la Figura 111 se observa el diagrama de precipitación promedio desde 1998 al 2009 de cada cuenca, la Figura 112 muestra el mapa de la precipitación promedio (m/año) desde 1998 al 2009, la Figura 113 muestra el mapa de precipitación promedio (mm/año) durante los años 2000-2012 del área de estudio y en la Figura 114 se representan los Log (SE).

Tabla 40. Valores de la precipitación y relieve para cada una de las cuencas.

Cuenca	Precipitación promedio (1998-2009)				Relieve-1km		Log(SE)	
	(m/año)						Joules	
	min	max	mean	sd	mean	sd	Mean	sd
Peña	0.89	1.11	1.04	0.10	135.01	71.14	14.70	4.03
MIBF	0.17	1.76	0.93	0.37	118.69	90.34	151.51	94.14
Nirgua	0.53	1.50	1.01	0.23	124.20	97.60	74.21	41.65
Boconó	0.36	3.65	1.56	0.70	280.31	157.30	427.18	94.42
Apure	0.17	4.50	1.44	0.58	72.93	125.82	142.89	156.93

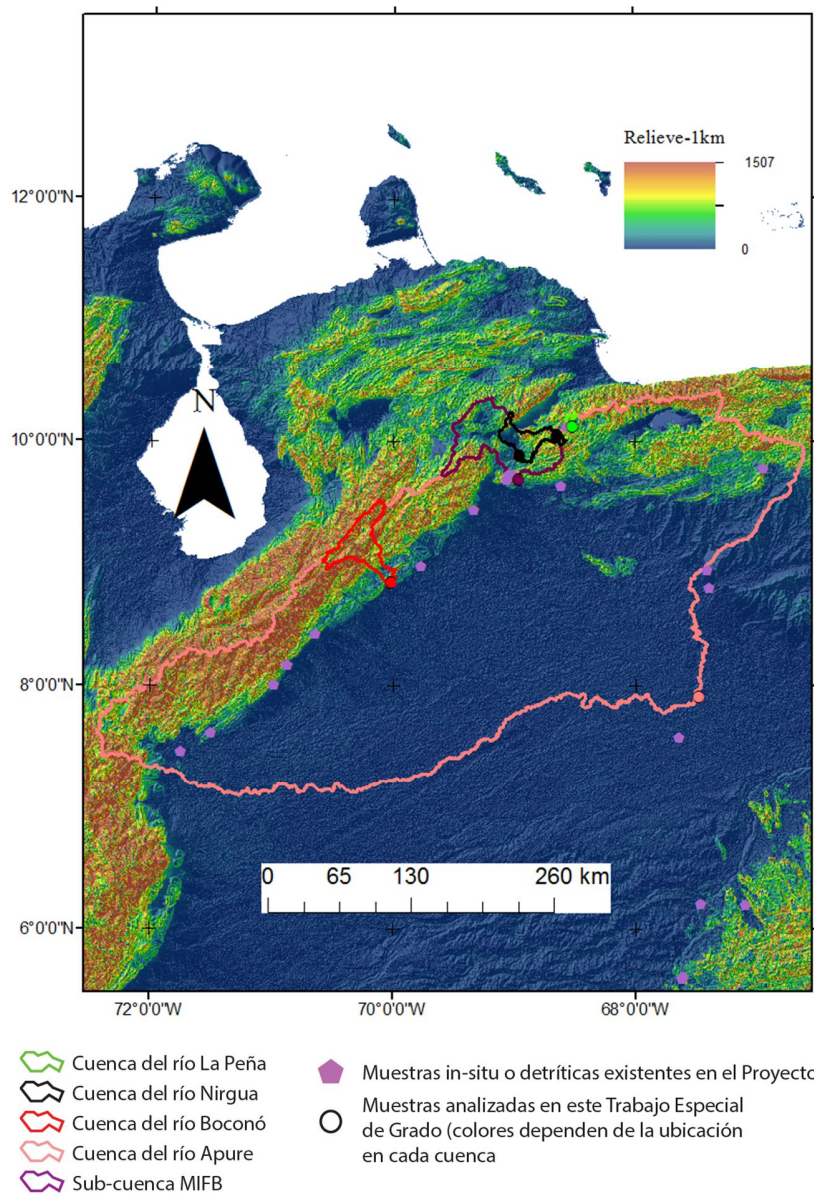


Figura 109. Mapa de relieve calculado en un radio de 1 kilómetro, los diferentes polígonos representan cada una de las cuencas estudiadas en este trabajo.

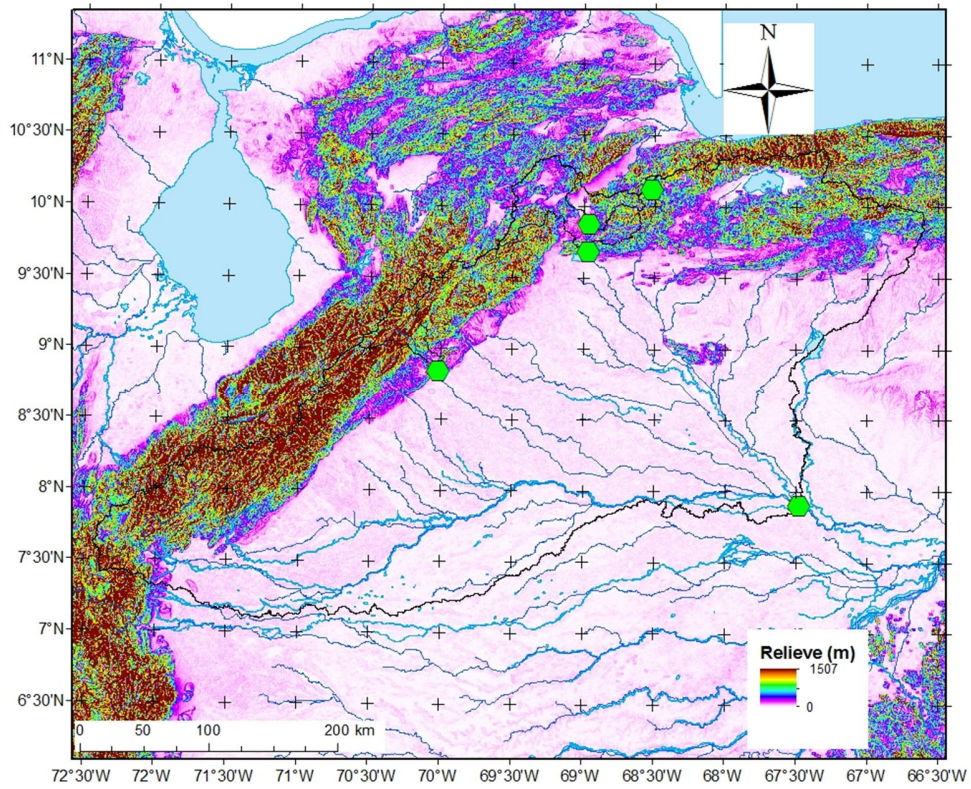


Figura 110. Mapa de relieve.

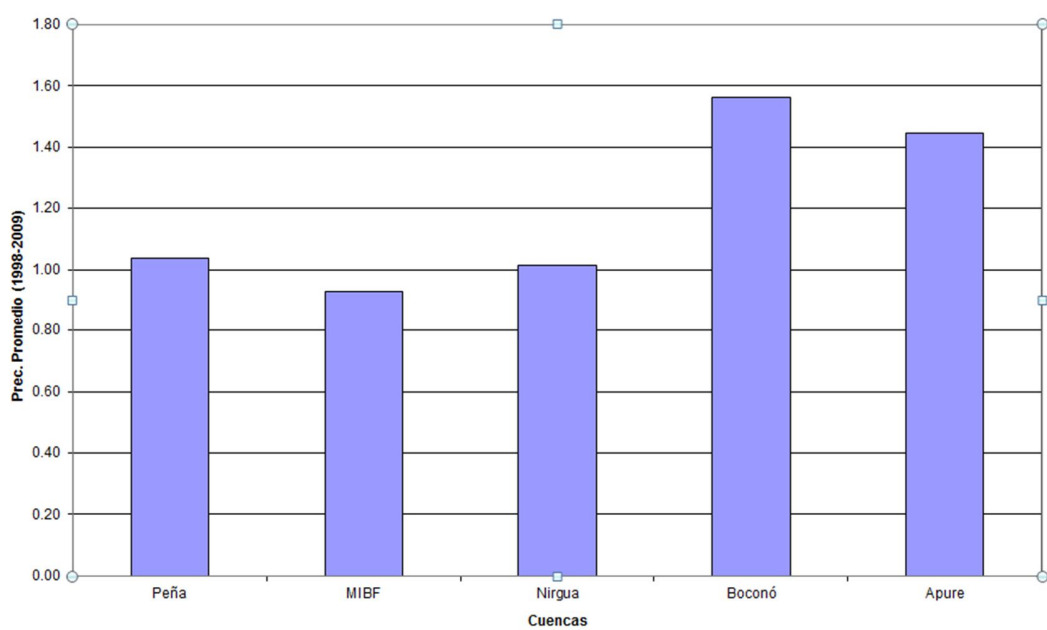


Figura 111. Comparación de precipitación promedio en cada una de las cuencas estudiadas en este trabajo para 1998 – 2009.

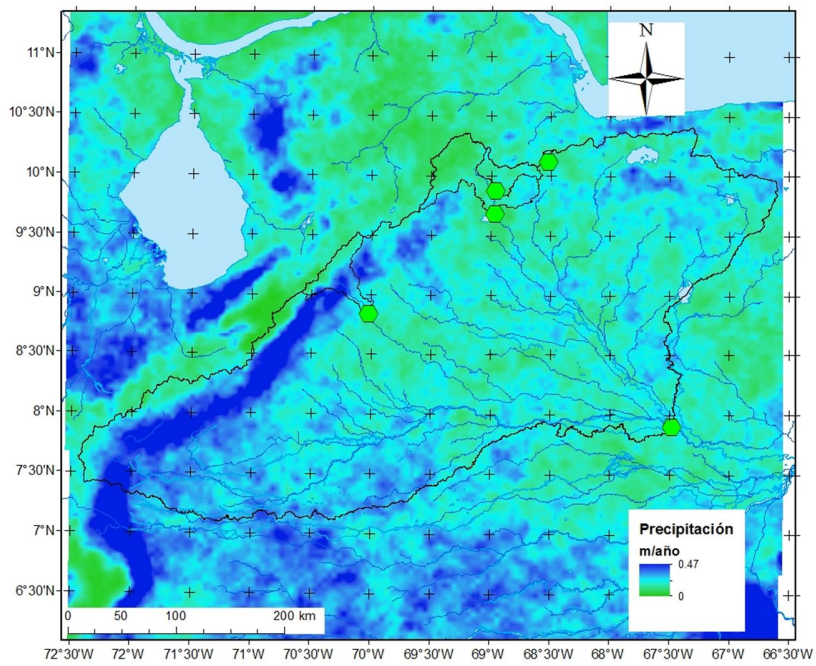


Figura 112. Mapa de precipitación promedio (m/año).

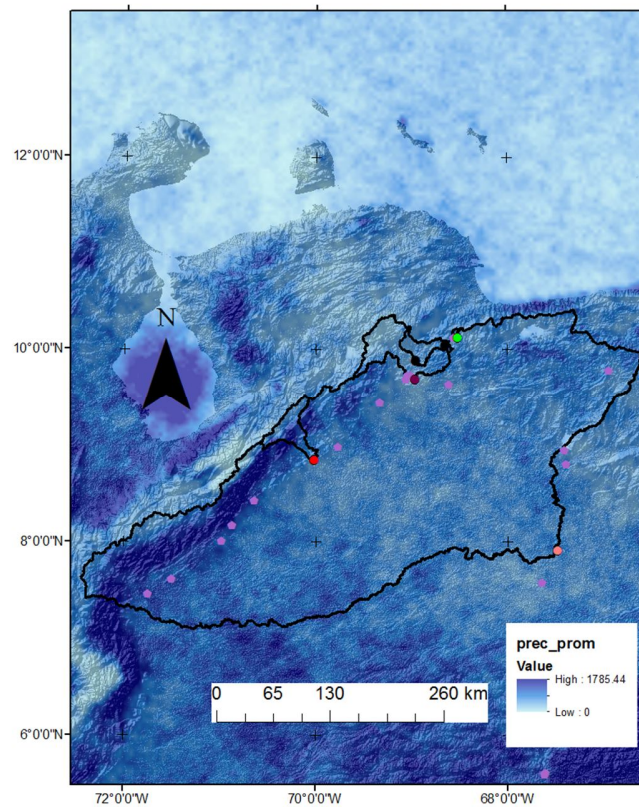


Figura 113. Mapa de índice de precipitación promedio (mm/año) durante los años 2000-2012.

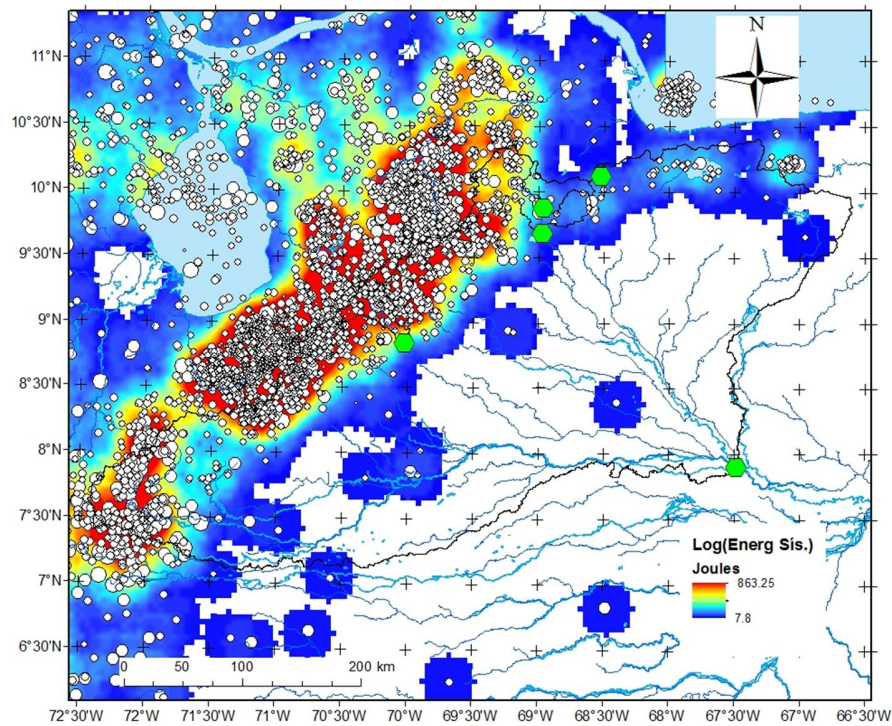


Figura 114. Mapa de Log (Energía Sísmica) en Joules.

En la Figura 115 se muestra la relación entre el relieve y la energía sísmica para cada cuenca estudiada, siendo la de mayor relieve y a su vez la de mayor energía sísmica la cuenca de Boconó, seguida por la MIBF con una relación similar entre los dos parámetros, luego sigue la cuenca de Apure con una proporción de energía sísmica mayor al relieve y por último se hayan las cuencas de Nirgua y Peña con un relieve mayor a la energía sísmica, presentándose en esta última una diferencia marcada entre ambos parámetros.

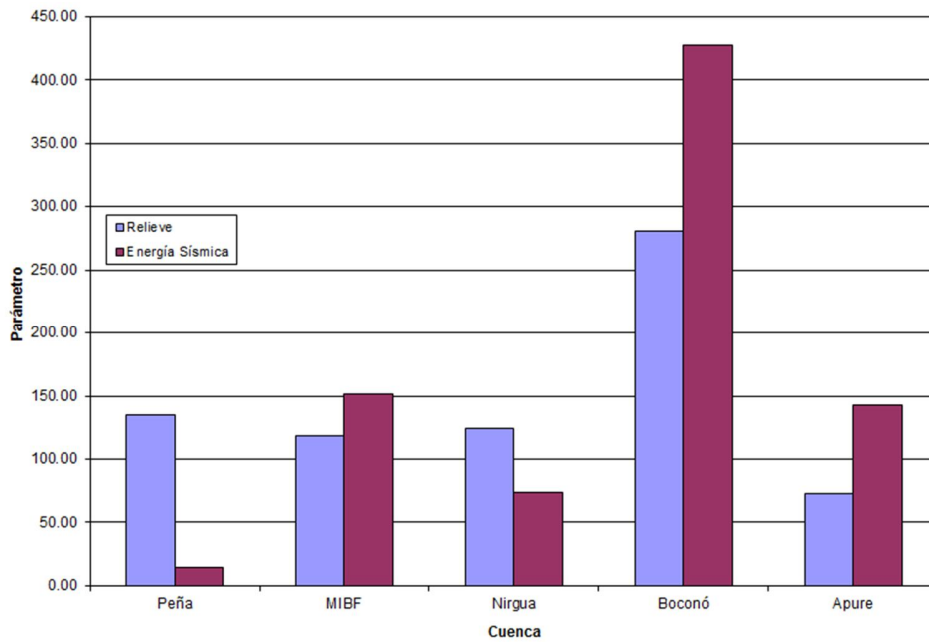


Figura 115. Diagrama de comparación entre la relación relieve-energía sísmica para cada cuenca.

La Tabla 41 muestra los índices de humedad uniforme (WI) con resultados similares, variando desde 14.29 hasta 16.92, comenzando con Nirgua, MIBF, Boconó, Peña y Apure, respectivamente. Los índices de humedad con precipitaciones (WIP), asumiendo la misma tasa, tienden a ser similares las cinco cuencas, aumentando de 19.63 a 21.82, comenzando por MIBF, seguido de Nirgua, Boconó, Peña y terminando con Apure. La cuenca que posee menor transporte de sedimentos (STI) es la cuenca de Peña (18736.73), luego la cuenca de Nirgua (89319.22), después MIBF con 148044.45. La cuenca de Boconó con 170650.02 y por último la cuenca que posee mayor índice de transporte de sedimentos es la de Apure con un índice de 223247.17.

Tabla 41. Valores de atributos secundarios del terreno para cada cuenca

Cuenca	WI		WIP		STI		STIP	
	mean	sd	mean	sd	mean	sd	Mean	sd
Peña	16.36	4.05	21.63	4.65	18736.73	22937.33	-174003.81	2006588.30
MIBF	14.99	3.87	19.63	4.43	148044.45	647669.25	-674309.19	2327769.50
Nirgua	14.29	3.78	20.61	4.54	89319.22	228486.59	-681631.56	2331795.30
Boconó	15.90	3.99	21.43	4.63	170650.02	476319.28	-1945957.60	2950557.30
Apure	16.92	4.11	21.82	4.67	223247.17	1753832.10	-428647.78	1768256.40

5.8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para facilitar la discusión se normalizan cada uno de los parámetros obtenidos anteriormente y se presentan en la tabla 42.

De acuerdo con los resultados arrojados por el modelo de elevación digital en las diferentes cuencas en la Tabla 42, la cuenca con mayor precipitación es la de Boconó y viene enmarcada por el Río Boconó con un valor normalizado de precipitación igual a 1.00, la misma cuenca también posee el mayor índice de relieve de la roca fuente de los sedimentos (1.00), con una energía sísmica acumulada de 1.00, por consiguiente los índices de erosión de esta cuenca oscilan entre 0.45-1.00, teniendo el índice de erosión sin precipitación mayor al resto de las demás cuencas estudiadas (1.00). El índice de humedad va desde 0.94 a 0.98 y tiene índices de transporte de sedimentos de 0.33 a 0.55. Le sigue la cuenca de Apure en cuanto al valor normalizado de precipitación (0,92), mientras que el índice de relieve es de 0.26, el más bajo de todas las cuencas, la energía sísmica es de 0.33, sus índices de erosión varían de 0.25 a 0.75, los índices de humedad son de 1.00 y los índices de transporte de sedimentos están entre 0.73 y 1.00.

En la cuenca de Peña se tiene un índice de precipitación de 0.66 con un valor de relieve de 0.48 y con una energía sísmica casi que nula (0.03), con índices de erosión que oscilan entre 0.07-0.46, los índices de humedad no varían mucho (0.97-0.99) y con índices de transporte de sedimentos de 0.02 a 1.00. Le sigue la cuenca de Nirgua en cuanto al índice de precipitación de 0,65 y con valor de relieve de 0.44, con una energía sísmica acumulada de 0.17, cuyos índices de erosión se encuentran entre 0.34-1.00, la humedad de 0.84 a 0.94 y el transporte de sedimentos entre 0.16-0.90. Por último se tiene la sub-cuenca de la muestra in-situ de la Falla de Boconó (MIBF), con un índice de precipitación igual a 0.59, un índice de relieve de 0.42 y una energía sísmica acumulada de 0.35, tiene un índice de erosión que oscila en el rango de 0.35-1.00, que arroja un mayor rango de erosión al resto de las cuencas estudiadas, siendo el índice de erosión con precipitación más alto (1.00) y por esto se asume que puede caracterizarse por ser una falla activa.

Tabla 42. Comparación de los diferentes parámetros normalizados entre cuencas.

Cuenca	Prec.	Rel.	Ener. Sísm.	TSP	USP	SSP	TSPP	USPP	SSPP	WI	WIP	STI *	STIP *
Peña	0.66	0.48	0.03	0.07	0.31	0.46	0.43	0.19	0.29	0.97	0.99	0.02	1.00
MIBF	0.59	0.42	0.35	0.50	0.41	0.51	0.35	1.00	1.00	0.89	0.90	0.40	0.90
Nirgua	0.65	0.44	0.17	0.34	0.41	0.50	1.00	0.91	0.77	0.84	0.94	0.16	0.90
Boconó	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.82	0.45	0.56	0.94	0.98	0.33	0.55
Apure	0.92	0.26	0.33	0.68	0.25	0.29	0.25	0.54	0.75	1.00	1.00	1.00	0.73

* Se normalizó después de haber sumado la desv. estándar a la media.

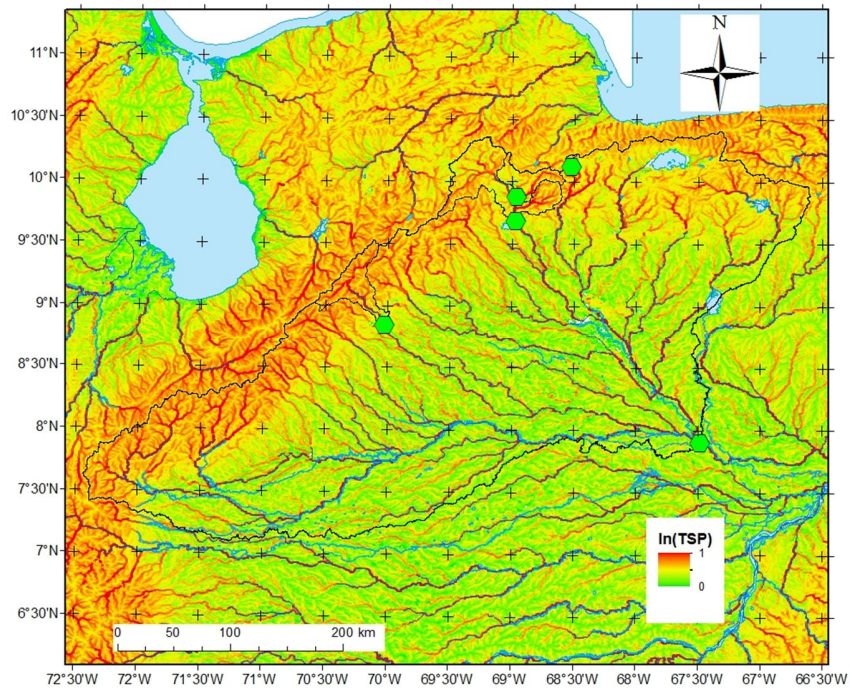


Figura 116. Mapa de $\ln(TSP)$.

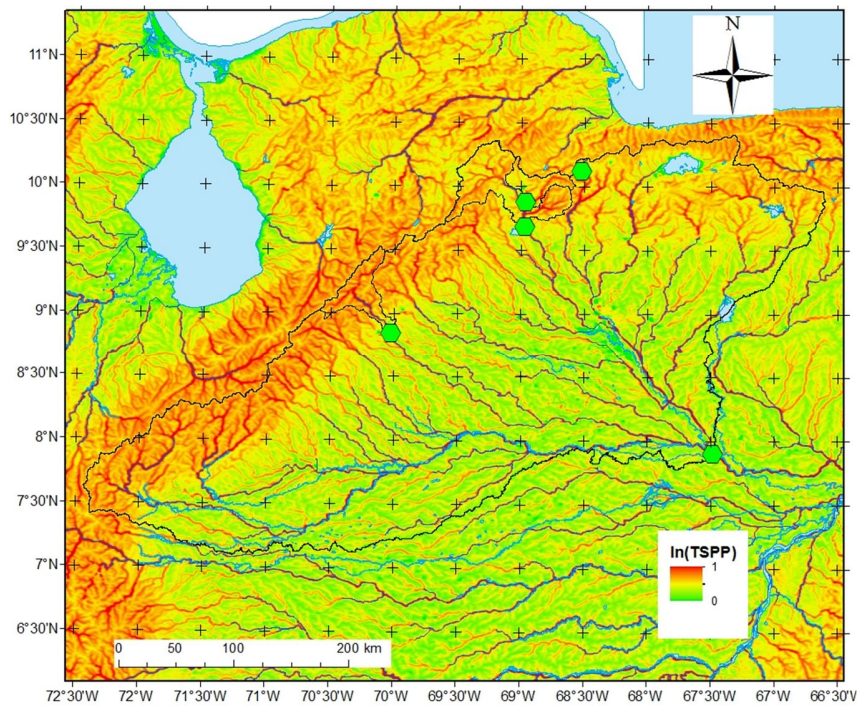


Figura 117. Mapa de $\ln(TSPP)$.

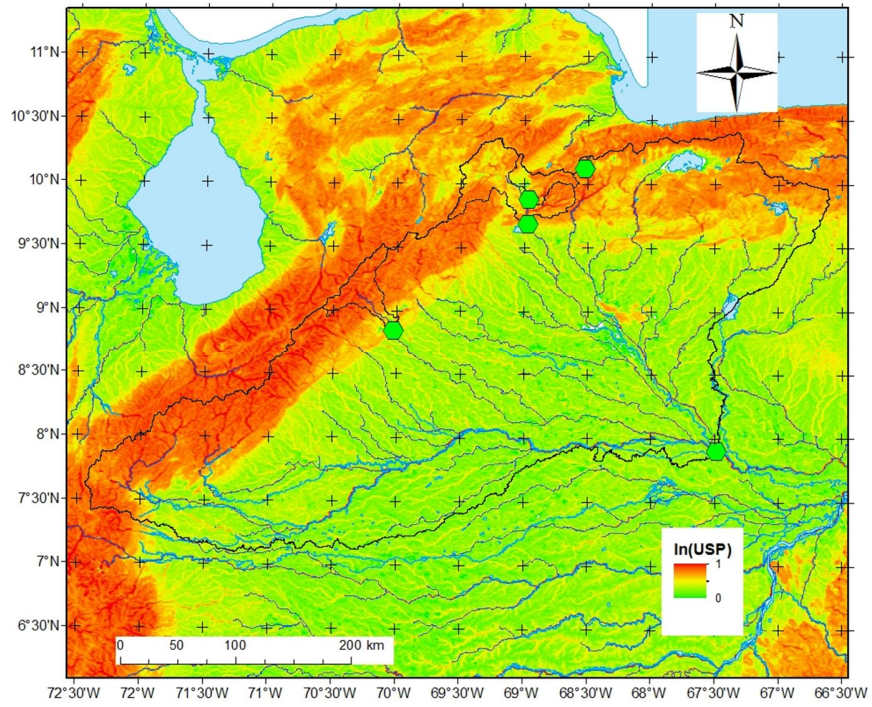


Figura 118. Mapa de $\ln(USP)$.

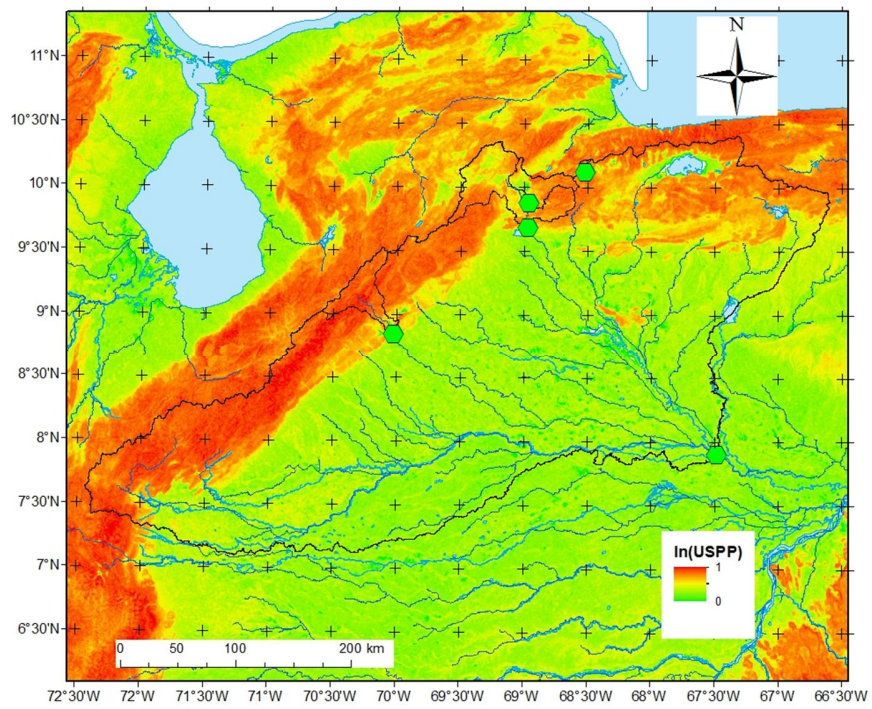


Figura 119. Mapa de $\ln(USPP)$.

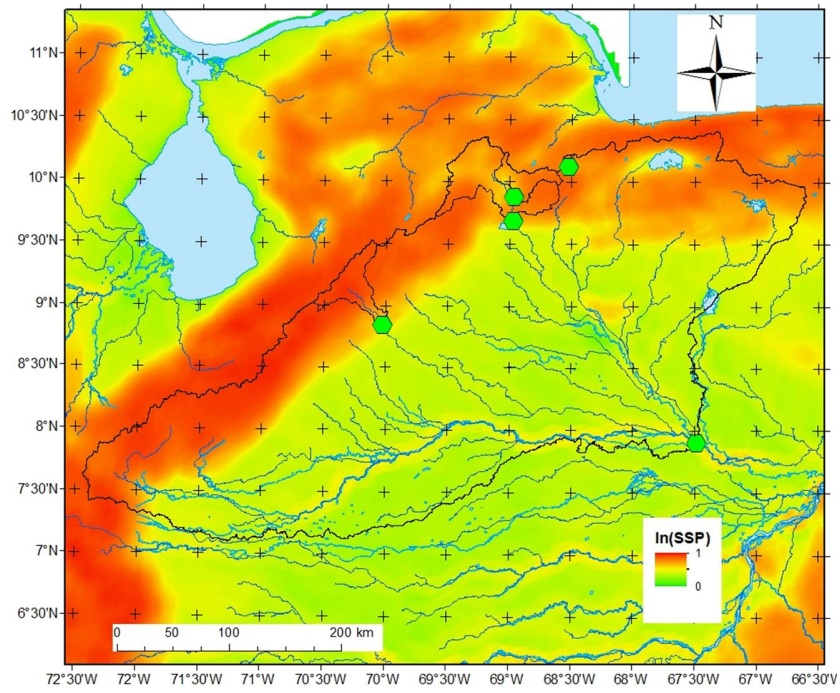


Figura 120. Mapa de $\ln(SSP)$.

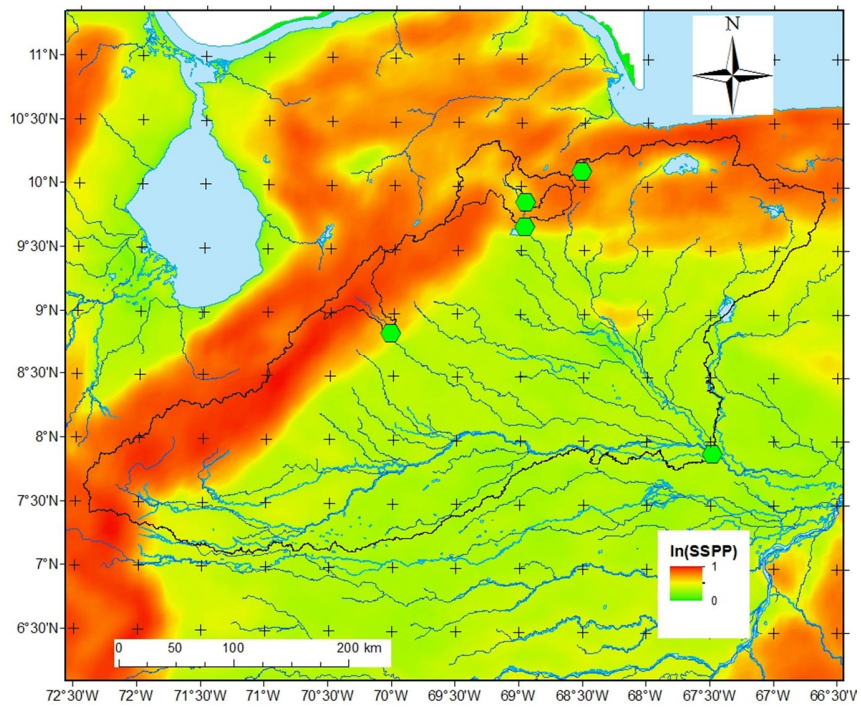


Figura 121. Mapa de $\ln(SSPP)$.

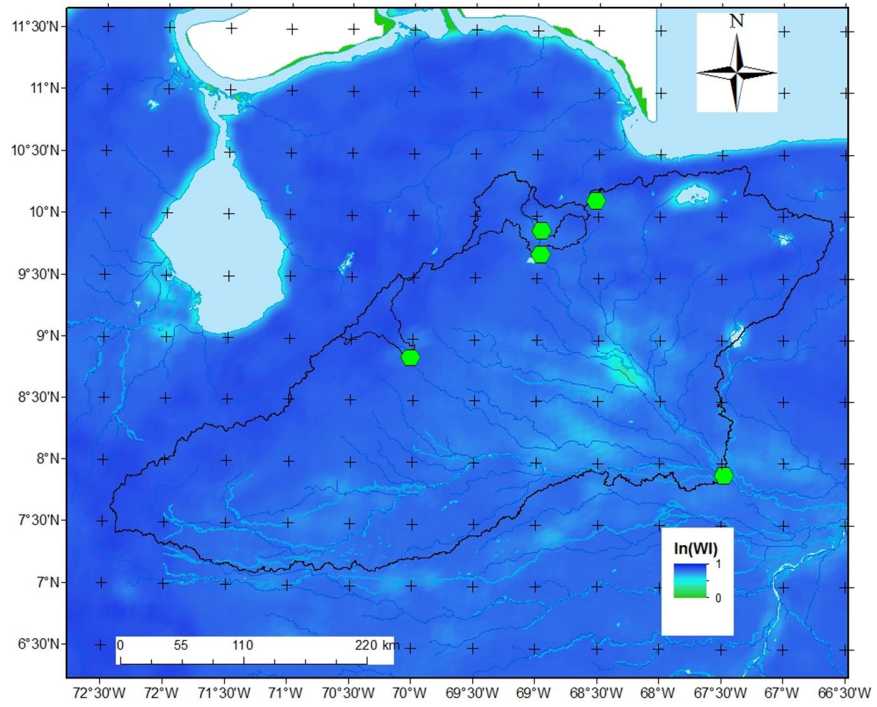


Figura 122. Mapa de $\ln(WI)$.

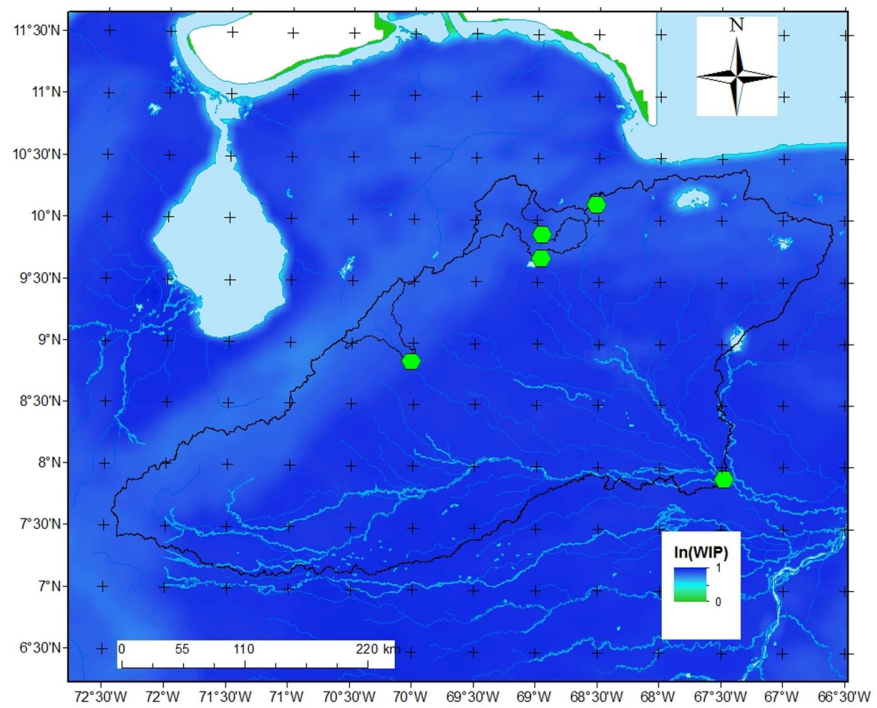


Figura 123. Mapa de $\ln(WIP)$.

De acuerdo a los resultados proyectados en la Figura 124, por las diferentes cuencas y sub-cuenca, se pudo notar que en el atributo de la precipitación la cuenca del río Boconó posee un mayor índice de precipitación, luego la cuenca de Apure, le sigue Peña, Nirgua y la que presenta un menor índice de precipitación es la sub-cuenca de la muestra in-situ de la Falla de Boconó (MIBF). En el atributo relieve que provee de sedimentos a las cuencas, la del río Boconó presenta un mayor índice que el resto de las cuencas estudiadas, luego se tiene a Peña, después la cuenca de Nirgua, MIBF y comparadas con la cuenca de Apure, se observa que esta posee el menor índice de relieve. La energía sísmica es el producto de la energía acumulada después de un sismo en la zona de estudio, nuevamente la cuenca del Río Boconó, presenta un mayor índice, seguida por la MIBF, luego está la cuenca de Apure, sigue la cuenca de Nirgua y la que tiene un menor índice es la de Peña.

Los índices de erosión representado por los atributos secundarios poder de flujo total (TSP), la tendencia de la cuenca con mayor impacto es la cuenca del Río Boconó, luego tenemos a la cuenca de Apure, la MIBF, Nirgua y la de menor valor es la de Peña. El índice de poder de flujo unitario (USP), predomina también en la cuenca del río Boconó, seguido por la subcuenca de la muestra in-situ Falla de Boconó (MIBF), luego Nirgua, Peña y por último Apure. El índice del poder de flujo de cizalla (SSP), ocurre como en el caso anterior, la cuenca del río Boconó está superando a las demás cuencas o sub-cuencas, esta seguido por la subcuenca de la muestra in-situ de la falla de Boconó (MIBF), luego la cuenca de Nirgua, después le sigue Peña y por último la cuenca de Apure. El índice de poder de flujo total con precipitación (TSPP), en este índice predomina la cuenca del Río Nirgua y la sigue la cuenca del río Boconó y en menor proporción están Peña, MIBF y por último con un menor índice la cuenca de Apure. En cambio el índice de poder unitario con precipitación (USPP) está comandado por la sub-cuenca de la muestra in situ de la falla de Boconó (MIBF) y seguida por la cuenca del río Nirgua, luego la cuenca de Apure, después la cuenca de Boconó y con el menor índice Peña. El valor del poder de flujo de cizalla con precipitación (SSPP), está liderado por la sub-cuenca de la muestra in situ de la falla de Boconó (MIBF), luego le sigue la cuenca del río Nirgua y muy de cerca está la cuenca de Apure, en menor proporción se encuentra la cuenca de Boconó y por último Peña.

En cuanto al índice de humedad (WI) y el índice de humedad con precipitación (WIP), la relación existente entre cuencas es parecida en ambos índices, siendo la mayor la cuenca del río Apure, Peña, Boconó, MIBF y por último perteneciente a la cuenca de Nirgua en WI, mientras que en WIP la que posee el menor índice de humedad es MIBF. En cuanto a los índices de capacidad de transporte de sedimento (STI) domina la cuenca de Apure, seguido de la sub-cuenca de la muestra in situ de la Falla de Boconó (MIBF), luego le sigue la cuenca de Boconó, después Nirgua y con el menor índice y casi nulo Peña. En cambio en el índice de capacidad de transporte de sedimentos con precipitación (STIP) se tienen un repunte de Peña, luego la cuenca de Nirgua y la sub-cuenca representada por la muestra in-situ de la falla de Boconó (MIBF), seguida por la cuenca de Apure y en menor proporción de transporte la cuenca del río Nirgua.

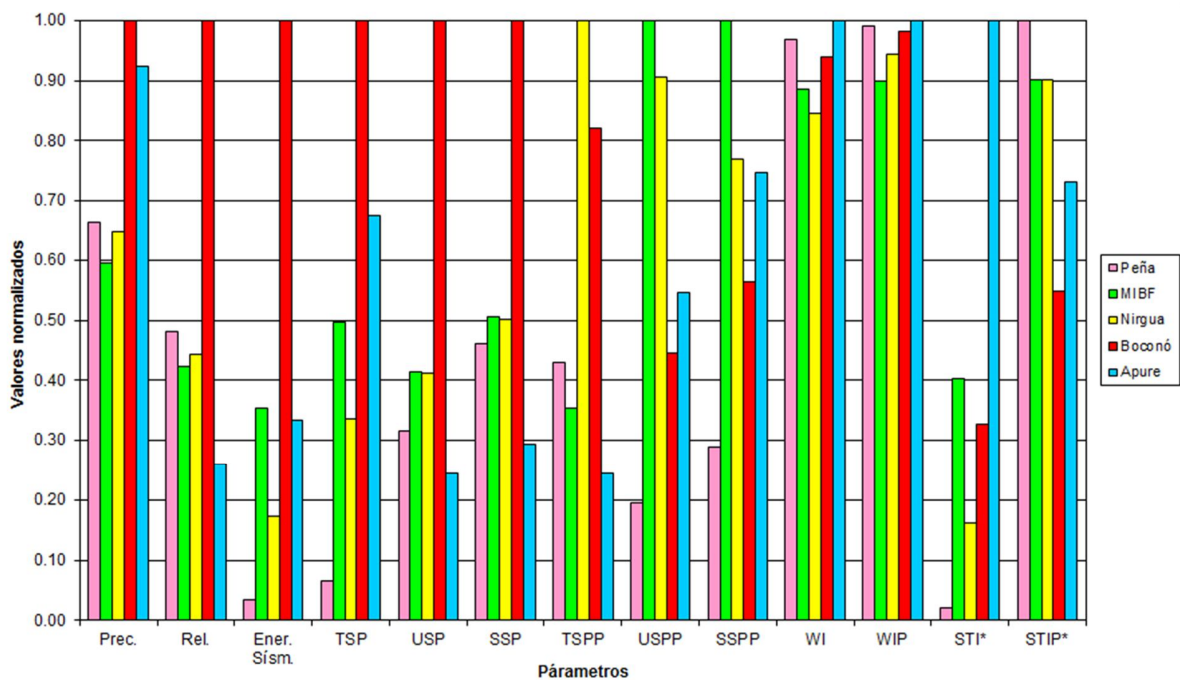


Figura 124. Comparación de índices de precipitación, relieve, energía sísmica, erosión promedios sin precipitación y con precipitación uniforme para cada cuenca, índices de humedad sin precipitación y con precipitación e índices de transporte de sedimentos sin precipitación y con precipitación.

En la Figura 125, en esta mapa representado por la cantidad y rango de sismicidad, se asume el efecto del movimiento de las placas Suramerica y Caribe, así como la agrupación de sismos a lo largo de las cadenas montañosas (La Cordillera de Los Andes, Serranía del Interior y La Cordillera de La Costa), lo cual podemos asumir la actividad existente en dichas zonas, debido a la presencia de las fallas Oca-Acon, San Sebastian, Falla de Boconó, Falla de La Victoria, corrimiento Manrique y la Falla La Guacamaya. Es por tal motivo que podemos decir que nuestra zona de estudio esta enmarcada en una actividad sismica activa.

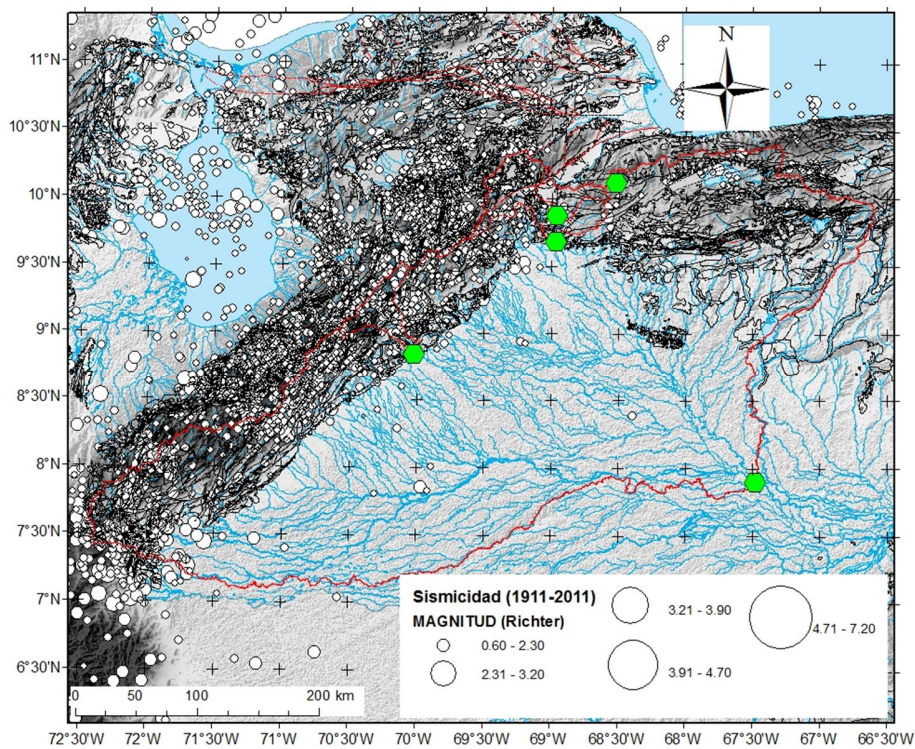


Figura 125. Mapa de sismicidad de la zona de estudio, de magnitud (Richter).

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el análisis petrográfico de las muestras Las Palmas 1 y Las Palmas 5, provienen de un metamorfismo de contacto, con una textura lepidoporfidoblástica y su mineralogía presenta bastante alteración. La muestra de la falla de Boconó (MIBF) se expone microfracturas y recristalización de minerales, es una roca metamórfica (mármol).

En el estudio comparativo con el software ImageJ y el modelo de Krumbein realizado a la fracción de minerales pesados no magnéticos, se pudo constatar la fidelidad de los resultados en la esfericidad. La madurez textural de las muestras analizadas oscila entre inmaduro a maduro, esto señala que los sedimentos modernos estudiados provienen de diferentes fuentes, algunos de fuentes alejadas que han sido retrabajados por el transporte y dan como resultado minerales subredondeados y otros, que poseen poco transporte, son más angulosos.

El análisis geoquímico realizado a la fracción de minerales pesados para cada muestra, se constató vía microscopía electrónica de barrido (MEB), encontrándose en el río Apure: biotita, cuarzo, rutilo, Ilmenita, apatito, heulandita, esfena, andalucita, anortita/anortoclasa y zircón. En el río Boconó: rutilo, circon, monacita, apatito y cuarzo. En la Falla de Boconó muestra in-situ (MIBF): rutilo, cuarzo, fayalita, calcita y hematita. En el río Nirgua: rutilo, cuarzo, esfena, microclino, leucita, clinozoisita, estauroлита y albita. En la quebrada Peña 1: rutilo, cuarzo, ilmenita, circon, fayalita, microclino. En Peña 3: cuarzo, ilmenita, anortita/anortoclasa. En LP1: cuarzo, anortita/anortoclasa, fayalita, calcita, hematita y ortosa. En LP5: cuarzo, apatito, anortita/anortoclasa, fayalita, calcita y hematita. En el tributario de Cojedes: cuarzo, andalucita y circon. En Tucuragua1: rutilo, cuarzo, anortita/anortoclasa y ortosa. Y en Tucuragua3: rutilo, cuarzo, circon y microclino.

El análisis de difracción de RX para el río Apure presenta los siguientes minerales: cuarzo, monacita y fayalita. En el río Boconó: cuarzo, monacita y fayalita. En LP1: calcita. En LP5: cuarzo, monacita, calcita y forsterita. En el río Nirgua: cuarzo, albita, microclino y

granate. En el tributario de Cojedes: cuarzo, monacita. En el río Tucuragua 1: microclino, circon, cuarzo, clinoenstatita. En Tucuragua 3: granate, apatito, microclino, cuarzo y monacita. En la Falla de Boconó (MIBF): circon, perovskita, monacita, fayalita y calcita. Y en la quebrada Peña: muscovita, cuarzo y monacita.

Después de realizar el Modelo de Elevación Digital (DEM), se obtuvo que los atributos de primer orden de las cuencas: Peña, Apure, Muestra in situ Falla de Boconó (MIBF), Nirgua y Rio Boconó son las siguientes, Peña: Área= 66.6 Km², perímetro = 43.7 Km, la pendiente (S)= 8.59±5.88° y elevación= 909.52±136.53 m. MIBF: Área= 4165.8 Km², perímetro= 449.3 Km, pendiente= 8.92±7.25 y elevación= 651.62±337.49 m. Nirgua: Área= 975.0 Km², perímetro = 221.0 Km, la pendiente (S)= 8.94±7.45° y elevación= 535.67±284.55 m. Boconó: Área= 1639.0 Km², perímetro = 295.0 Km, la pendiente (S)= 17.92±9.31° y elevación= 1738.91±903.06 m. Apure: Área= 122931.5 Km², perímetro = 3195.0 Km, la pendiente (S)= 4.79±8.15° y elevación= 380.52±577.60 m.

La tasa de erosión para cada cuenca es, Peña: TSP=2.42E+04±2.42E+05, USP=25.04±41.99, SSP=6.57±7.84. MIBF: TSP=1.84E+05±4.23E+06, USP=32.95±122.14, SSP=7.20±11.95. Nirgua: TSP=1.25E+05±1.82E+06, USP=32.78±117.53, SSP=7.12±11.94. Boconó: TSP=3.71E+05±6.82E+06, USP=79.52±252.77, SSP=14.23±19.00. Apure: TSP=2.51E+05±1.00E+07, USP=19.48±111.73, SSP=4.16±10.34.

En cuanto a las estructuras presentes en dicha zona de estudio, se obtuvieron debido a la cantidad y rango de sismicidad presente en el MED, y se asume el efecto del movimiento de las placas Suramerica y Caribe, así como de las fallas Oca-Acon, San Sebastian, Falla de Boconó, Falla de La Victoria, corrimiento Manrique y la Falla La Guacamaya, por la agrupación de sismos a lo largo de las cadenas montañosas (La Cordillera de Los Andes, Serranía del Interior y La Cordillera de La Costa), por lo cual asumimos que nuestra zona de estudio existe actualmente actividad sísmica.

La cuenca de Boconó está trabajando de manera acoplada en cuanto a la tectónica y el clima, para la generación de nuevo relieve y el transporte de sedimentos (erosión), esto puede

ser debido a que la fuente principal de dichos sedimentos proviene del Páramo El Cendé. En cambio en la cuenca de Apure existe un predominio del clima sobre la tectónica y están trabajando de manera desacoplada una con respecto a la otra. El transporte de sedimentos es abundante y tiende a disminuir un poco cuando hay precipitación. En la cuenca de Peña existe un predominio del clima sobre la tectónica (casi nula), casi no hay transporte de sedimentos y los índices de erosión son muy bajos. En la sub-cuenca MIBF, existe casi un acoplamiento entre los índices o valores de la tectónica y el clima, el relieve es modificado, hay transporte de sedimentos y cuando hay precipitación el índice de transporte de sedimentos aumenta. A diferencia de la cuenca de Nirgua que el índice de transporte disminuye con la precipitación, es probable que esta anomalía se produzca por la actividad tectónica, prevaleciendo esta sobre el clima, por lo tanto hay un desacoplamiento entre tectónica y clima, la tasa de sedimentación es de regular a alta, esto se debe a que en esta zona llueve 8 meses al año.

Se recomienda realizar análisis de elementos minoritarios a los minerales pesados para terminar de completar la caracterización geoquímica.

Se insta a continuar revisando en el ImageJ u otro analizador de imagen, haciendo ensayos hasta lograr obtener la redondez automatizada, ya que la esfericidad obtenida por el software y comparada con el modelo de Krumbein está muy cercana al resultado correcto, la incertidumbre es demasiado pequeña.

REFERENCIAS

- A. C. M., VOLPE, B; VENIALBO, J. (2001). *Medición de objetos por análisis de imágenes*.
- AGUERREVERE S. E. & G. ZULOAGA. 1937. *Observaciones geológicas en la parte central de la Cordillera de la Costa*. *Boletín de Geología y Minería* (Min. de Fomento, Caracas), 1(2,3,4):8-24, 10 ilustr.
- ALLEN, S. (2008). *From object to field: field conditions in architecture and urbanism*, en *Practice: Architecture, technique + representation*, Routledge, New York.
- ANSELMETTI, F. S., and EBERLI, G. P. (1993). *Controls of sonic velocity in carbonates: Pure and Applied Geophysics*, v. 141, p. 287–323.
- AUBERT, A., STILLEA, P., and PROBSTA, A. (2001). *REE Fractionation During Granite Weathering And Removal By Waters And Suspended Loads: Sr and Nd isotopic evidence*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 65, Issue 3, 1. Pages 387–406.
- AUDEMARD, F. A., A. SINGER & J. A. RODRÍGUEZ. 1998. *Estudio de neotectónica y geología de fallas activas del triángulo de fallas de Boconó, Oca-Ancón y Valera*. FUNVISIS, informe inédito para INTEVEP, 138 p. + mapa 1:250.000.
- AUDEMARD, F., J.W. COX, R.L. DART, N. MACHETTE & K. HALLER (2000). *Map and database of Quaternary faults in Venezuela and its offshore regions*. USGS, Open – File Report 00-018, 78 pp.
- AZOCAR Y. y RODRÍGUEZ R. (2007) *Importancia del eje Orinoco – Apure en el desarrollo sostenible del país*. Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Ingeniería Civil.
- BELLIZIA & RODRÍGUEZ (1967). *Consideraciones sobre la estratigrafía de los estados Lara, Yaracuy, Cojedes y Carabobo*. Caracas: Bol. Geol., 9(18), p. 515-547.

- BELLIZZIA, A. y G. D. RODRÍGUEZ (1968). *Consideraciones sobre la estratigrafía de los Estados Lara, Yaracuy, Cojedes y Carabobo*. Bol. Geol. 9(18): 515-564.
- BELLIZZIA, A. y RODRÍGUEZ, G, D. (1969). *Geología de la región de Barquisimeto – Urachiche – Río Tocuyo (Resumen)*. Mem. IV Cong. Geol. Venez., 1. 93,
- BELLIZIA & RODRÍGUEZ (1976). *Geología del estado Yaracuy*. Bol. Geol., Caracas, Public. esp. 5, (6), p. 3317-3417. <http://www.pdvsa.com/lexico/u10w.htm>.
- BELLIZZIA & RODRÍGUEZ (1986). *Sistema montañoso del Caribe: Una Cordillera alóctona en la parte norte de América del Sur*. VI Cong. Geol. Venez., 10: 6657-6836.
- BENDA, L. y DUNNE. T. (1997). *Stochastic forcing of sediment routing and storage in channel net Works*. Water resour. Res. 33:2865-80.
- BERMÚDEZ, M. (2006). *Procedimientos del Laboratorio de Termocronología de la UCV para la datación de eventos tectotérmicos recientes mediante el método de huellas de fisión en apatitos detríticos*. Trabajo de Ascenso a Profesor Agregado, 156 p. EGMG-UCV.
- BERMÚDEZ, M. y ANAYA, R. (2007). *Calibración del separador magnético de alta intensidad Magnet-lift mlh (13) 111-5*. Para su uso en el Laboratorio de Termocronología de la UCV. Laboratorios de Termocronología y Geomatemáticas, Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela
- BERMÚDEZ, M., VAN DER BEEK, P. & BERNET, M. (2009). *Exhumación Diacrónica durante el Mioceno – Plioceno de Los Andes de Mérida*. Laboratorios de Termocronología y Geomatemáticas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- BERMÚDEZ, M., VAN DER BEEK, P., BERNET M (2012). *Strong tectonic and weak climatic control on exhumation rates in the Venezuelan Andes*. Laboratorios de Termocronología y Geomatemáticas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. Institut des Sciences de

- La Terre (Isterre), Université Joseph Fourier, Centre National de La Recherche Scientifique (Cnrs), Bp 53, 38041 Grenoble Cedex 9, France.
- BLANCO, B. (1980). *Geología de una zona ubicada en el este de Chivacoa, Distrito Sucre, Bruzual y Nirgua, Estado Yaracuy*. U.C.V. Fac. Ing. Dep. geol. Trabajo Especial de Grado, Inédito, 177p.
- BOGGS, S. Jr. (2009). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Cambridge University Press, Cambridge. 600 pp.
- BURROUGH, P. and MCDONNELL, R. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. 333 pags.
- BURROUGH, P.A., VAN GAANS, P.F.M., and MACMILLAN, R.A., (2000). High - resolution landform classification using fuzzy k-means. *Fuzzy Sets and Systems*, 113: 37-52.
- BUSHMAN, J. R. (1959). Geology of the Barquisimeto áreas. A summary report. *Asoc. Venez. Geol., Min. Y Petrol.*, Bol. Inform., 2(4): 65 – 84.
- BUSHMAN, J. R. (1965). Geología del área de Barquisimeto, Venezuela. *Bol. Geol.*, Caracas, 6(11), p. 311-336.
- CARRARA A., BITELLI G. e CARLA' R. (1997). Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. *Int. Jour. of Geographical Information Science* v. 11, p. 451-473.
- CARTER, J. (1988). *Digital representation of topographic surfaces*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, n. 54, 11, 1577-1580.
- CIEN – COMITÉ INTERFILIALES DE ESTRATIGRAFÍA Y NOMENCLATURA. (1997). *Código Geológico de Venezuela*. <http://www.pdvsa.com/lexico>.
- CREOLE PETROLEUM CORPORATION (1960). *Mapa de Geología de Superficie, Hojas 5-D y 6-D*. Ministerio de Energía y Minas, Dirección de Geología, Caracas. Escala 1:100000

- COELLO, R. (2012). *Integración geológica de la región Bobare – Farriar entre los estados Lara y Yaracuy, Venezuela*. UCV-G, 176 p.
- COLLINS, S. and MOON, G. (1981). *Algorithms for dense digital terrain models*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 47: 71–76.
- COPLANARH (1974). Estudio geomorfológico de los Llanos occidentales. *Ministerio, de Agricultura y Cría*, Caracas, N° 41.
- DALY, C., NEILSON, R., PHILLIPS, D. (1994). *A Statistical-Topographic Model for Mapping Climatological Precipitation over Mountainous Terrain*, *Applied Meteorology*, 33:140-158.
- DEL OLLO D. (1988). *Geoquímicas de las rocas conglomeráticas y arenáceas de la Formación Uairén (Precámbrico) en la región La Hoyada - paraitepuy, estado Bolívar, Venezuela*. TEG, UCV, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Caracas.
- DIETRICH, W., WILSON, C., MONTGOMERY, D., MCKEAN, J., and BAUER, R. (1992). *Erosion thresholds and land surface morphology*. *J. Geology*, 20. Pg. 675-679.
- DIETRICH, W. DINO, G. BELLUGI, L. SKLAR, J. y STOCK. (2003), *Department of Earth and Planetary Science*, University of California, Berkeley, California. A&A, 398, 89
- DIXON, T., FARINA, F., DEMETS, Ch., JANSMA, P., MANN, P., CALAIS, E. (1998). *Relative motion between the Caribbean and North American plates and related boundary zone of deformation from a decade of GPS observations*. *J. Geophys. Res.* 103: 15157-15182.
- EHRlich, R. CRABTREE, S. KENNEDY, S. and CANNON, R. (1984). *Petrographic image analysis I; analyses of reservoir pore complexes: Journal of Sedimentary Petrology*, v. 54, p 1365 – 1376.
- EHRlich, R., CRABTREE, S., HORKOWITZ, K. and HORKOWITZ, J. (1991a). *Petrography and reservoir physics I: objective classification of reservoir porosity: AAPG Bulletin*, v. 75, p 1547 – 1562.

- EHRlich, R., CRABTREE, S., HORKOWITZ, K. and J. P. HORKOWITZ, J. (1991b). *Petrography and reservoir physics III: physical models for permeability and formation factor: AAPG Bulletin, v. 75, p 1579 – 1592.*
- EKLUNDH, L. & MARTENSSON, U. (1995). Rapid generation of DEM from topographic maps. *Int. Jour. GIS 9: 329-340.*
- FEO-CODECIDO G. (1960). Técnica para el estudio de los minerales pesados y su aplicación a la estratigrafía de Venezuela. *Geos, UCV, Caracas. 4: 5-24.*
- FINLAYSON, C., DAVIDSON, N., and STEVENSON, N. (2002a). Wetland inventory, assessment and monitoring – practical techniques and identification of major issues: summary. Pp. 130 – 136. Report 161. Supervising Scientist, Darwin.
- FINLAYSON, C., BEGG, G., HOWES, J., DAVIES, J., TAGI, K., and LOWRY, J. (2002b). *A manual for an Inventory of Asian Wetlands (version 1.0). Wetlands International Global Series 10.* (Wetlands International: Kuala Lumpur.)
- FIX R. and BURT, T. (1995). *Global Positioning System: an effective way to map a small catchment. Earth Surface Processes and Landforms, 20, pp. 817-827.*
- FLORES, J. y MÉNDEZ, A. (2005). Correlación estratigráfica y geocronológica de las quebradas Hoyos y Vichú por el método de huellas de fisión, Formación Betijoque, Estado Trujillo. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, 129 p.
- FLORINSKY, I.V., (1998). Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science, 12: 47–61.*
- FLORINSKY, I.V., (1998). Derivation of topographic variables from a digital elevation model given by a spheroidal trapezoidal grid. *International Journal of Geographical Information Science, 12: 829–852.*
- FOLK, R. J. (1969) *Petrology of Sedimentary Rocks Hemphill Pub. Co. Austin Texas. 182 p.*

- GAMERO, A. & REVETY, M. (2011). *Estudio geoquímico y mineralógico de minerales pesados en la zona nor – occidental del estado Bolívar*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería. Caracas.
- GARCÍA, J. Y MARTÍNEZ, J. (1992). *Recursos Minerales de España. Consejo Superior de Investigaciones Científicas*. Textos universitarios, C.S.I.C. I.S.B.N.:84-00-07263-4.
- GARDINER, V. (1981). Drainage basin morphometry. En: A. Goudie (ed.). *Geomorphological Techniques*. 47-55. George Allen & Unwin. Londres.
- GILES, P. T., and FRANKLIN, S. E., (1996). Comparison of derivative topographic surfaces of a DEM generated from stereoscopic SPOT images with field measurements. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, 1165±1171.
- GOMEZ, F. Y SANDOVAL, R. (2008). *Estudio geofísico integrado en la zona de Yumare – Aroa, Estado Yaracuy y falcón*. Trabajo de grado. UCV, Escuela de Geología, Minas y geofísica.
- GÓMEZ, R. (2012). *Integración geológica de la región Carora Padre Diego, edo. Lara, con énfasis en la formación Matatere y sus contactos*. UCV-G, 128 p.
- GONZÁLEZ DE JUANA, C., J. M. ITURRALDE DE AROZENA & X. PICARD CADILLAT. (1980). *Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas*. Caracas: Ed. Foninves, 1031 p.
- GONZÁLEZ, L. (2006). *Hidrología Básica*. Trabajo Especial de Grado, Universidad de Oriente. Barcelona.
- GRAYSON, R., BLÖSCHL, G., BARLING, R., MOORE, I. (1993). *Process, scale and constraints to hydrological modelin in GIS*. HydroGIS91: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources. IAHS Publ 211.
- GREGORY, K. and WALLING, D. (1973). *Drainage basin form and process: A geomorphological approach*. Edward Arnold. Londres-Inglaterra. 456 p.

- GUEVARA, E. y CARTAYA, H. (1991). Hidrología: Una introducción a la ciencia hidrológica aplicada. GUECA. Valencia-Venezuela. 358 p.
- HACKLEY, P.C., URBANI, F., KARLSEN, A.W., GARRITY, C.P. (2005). *Geologic shaded relief map of Venezuela*: USGS Open – file Report 2005 – 1038. <http://pubs.usgs.gov/of/2005/1038/>.
- HACKLEY, P., URBANI, F., KARLSEN, A., & GARRITY, C. (2006). *Mapa Geológico de Venezuela a Escala 1:750.000*. Washington D.C.: U.S. Geological Survey, Open File Report 1109. <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1109/>.
- HEINRICH, E. W. (1966). *The geology of carbonatites*. (Reprinted in 1980): Chicago, Rand McNally and Company, 555 p.
- HENAO, J. (1998). Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Universidad Santo Tomás. Santafé de Bogotá-Colombia. 396 p.
- HERNÁNDEZ, A. (2008). *Estudios geofísicos integrados en las ciudades de Duaca y Tamanaca*. Proyecto de grado. Caracas, Venezuela. Universidad Central de Venezuela. 130p.
- HESS, H. (1959). *Notes on operation of Frantz Isodynamic Magnetic Separator*. Pamphlet published by S.G. Frantz Co., Inc., 87 p.
- HORTON, R. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*. 56: 275-370.
- HUTCHINSON, M.F. (1988). *Calculation of hydrologically sound digital elevation models*. Proceedings of the Third International Symposium on Spatial Data Handling, Sydney, Australia. International Geographical Union, pp. 117-133.
- HUTCHINSON, M.F. (1989). *A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits*. *Journal of Hydrology* 106: pp.211 - 232.

- HUTCHINSON, M.F. (1995). *Stochastic space-time weather models from ground-based data. Agricultural and Forest Meteorology* 73: 237-264.
- HUTCHINSON, M.F. (1996). *A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models*. Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, NCGIA, University of California, Santa Barbara.
- JENSON, S. and J. DOMINGUE, (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11):1593-1600.
- JONES, P., GROISMAN, P., COUGHLAN, M., PLUMMER, N., WANG, W. and Karl, T., (1990). *Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land*. *Nature* 347 , 169-172.
- KEMP, R. (1997), *Environmental Policy and Technical Change. A Comparison of the Technological Impact of Policy Instruments*, Cheltenham, Edward Elgar.
- KIDNER, D. and SMITH, D.H. (1992) *Digital terrain models for radio path profiles*. Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Data Handling, Zurich, pp.240.
- KREZNOR, W., OLSON, K., BANWART, W. and JOHNSON, D. (1989). *Soil, landscape, y erosion relationships in a Northwest Illinois watershed*. *Soil Sci. Soc.Am. J.*, 53, 1763-1771.
- KIRKBY, M. (1996). *Hidrological Slope Models: The Influence of Climate*. En: E. Derbyshire (Ed.), *Geomorphology and Climate*, John Wiley.
- KLEIN, K. y HURLBUT, C. (1997). *Manual de Mineralogía*. 4ª Ed. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
- KRAJEWSKI, S. A. and B. L. GIBBS (1994). *Computer contouring generates artifacts*, *Geotimes*, no. 39, pp. 15–19.
- KRUMBEIN and SLOSS. (1963). *Stratigraphy and Sedimentation*. A Geology Series. U.S.A. 660 p.

- KUMLER, M.P. (1994). *An intensive comparison of triangulated irregular networks (TINs) and digital elevation models*. *Cartographica* 31: 1–99.
- KUO, Y.M., HARRIS, W.G., MUÑOZ-CARPENA, R., and RHUE R.D., and Li Y., (2009). *Apatite Control of Phosphorus Release to Runoff from Soils of Phosphate Mine Reclamation Areas*. *Water Air Soil Pollut.* 202:189–198 DOI 10.1007/s11270-008-9969-4.
- LAMBE, T. W. y WHITMAN, R. V. (1997). *Mecánica de suelos*. Mexico, Ed. Limusa, ISBN 968-18-1894-6.
- LAYMAN, J. M. (2002). *Porosity Characterization Utilizing Petrographic Image Analysis: Implications for Rapid Identification and Ranking of Reservoir Flow Units, Happy Spraberry Field, Garza County, Texas*. Trabajo Especial de Grado, Texas A&M University, E.U.A.
- LEE, J. (1991). *Comparison of existing methods for building triangular irregular network models of terrain from grid digital elevation models*. *International Journal of Geographical Information Systems* 5: 267–285.
- LEWIS, R. & SMITH, D. (1994). Ministry of Education (2): *Lesotho Education Sector Strategic Plan 2005-20*. Ministry of education Report: Policy Guidelines. 2000. (1-35)
- LEOPOLD, L.; GORDON, M. and MILLER, J. (1964). *Fluvial processes in Geomorphology*. W. H. Freeman and Company. San Francisco-USA. 872 p.
- LIKENS, G. BORMANN, F. PIERCE, R. EATON, J. and JOHNSON, N. (1977). *Biogeochemistry of a forested ecosystem*. Springer-Verlag, New York, New York, USA.
- MACKEY (1996). *El papel de los SIG y modelación ambiental en la conservación de la biodiversidad. En las actas de la Tercera Internacional Conferencia sobre la integración de GIS y Modelación Ambiental*, Santa Fe, Nuevo México, 21 a 25 enero, 1996, editado por NCGIA. Copyright © 1996 por el Centro Nacional Geográfico de Información y Análisis de la Universidad de California, Santa Barbará.

- MACSOTAY O., J. F., STEPHAN, Y E. ALVAREZ, (1987). Grupo Lara: Sedimentitas oceánicas y peninsulares en el Cretáceo alóctono de Venezuela occidental. *Bol. Geol.*, (28): 3-78.
- MALANSON, G. y ARMSTRONG. M. (1997). *Issues in spatial representation: effects of cell number and between-cell step size*. *Geographical and Environmental Modelling*, 1 (1):47-64.
- MARTZ, L. W., and E. de JONG. (1988). Catch: A Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models. *Computers and Geosciences*, 14(5):627-640.
- MAYER, L. (1990). *An Introduction to Quatitative Geomorphology: an exercise manual*, Prentice-Hill, Englewood Cliffs NJ, Prentice Hall, 380 p.
- MEDEROS I. (2009). *Modelaje Geofísico de La Región Farriar – Morón, Estados Yaracuy y Carabobo*. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Geofísica.
- MENÉNDEZ, A. (1965). *Geología del área de El Tinaco, centro norte del Estado Cojedes*. *Bol. Geol.* 6(12): 417-543.
- MENÉNDEZ G. (1992). *Uso de fracciones magnéticas y no magnéticas de minerales pesados en sedimentos de río para la prospección geoquímica del Alto de Paragua, estado Bolívar, Venezuela*. TEG, UCV, Facultad de Ciencias, Caracas, 87 p.
- MILOSVSKI, V. & KÓNONOV, V. (1982). *Mineralogía*. Editorial Mir, Moscú.
- MITASOVA, H., J. HOFIERKA, M. ZLOCHA, and L.R. IVERSON, (1996). Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *Int. Journal of Geographical Information Science*, 10(5), 629-641.
- MONSALVE, G. (2000). *Hidrología en la Ingeniería*. Escuela Colombiana de Ingeniería. Santafé de Bogotá-Colombia. 382 p.
- MONTGOMERY, D. and DIETRICH, W. (1995). *Hydrologic processes in a low-gradient source area*. *Water Resources Research*, 31 (1), 1-10.

- MOORE, I., BURCH, G. and MACKENZIE, D. (1988). *Topographic effect on the distribution of surface soil water and location of ephemeral gullies*. American Society of Agricultural Engineers Transactions. Vol. 31. Pg. 1098-1107.
- MOORE, L. & FOSTER, G. (1990). *Hydraulics and overland flow*. In ANDERSON, M. & BURT, T. (Eds): *Process studies in hillslope hidrology*. 215-254. John Willey and sons. England.
- MOORE, I. and GRAYSON, R. (1991). *Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data*. Water Resources Research, 27 (6), 1177-1191.
- MOORE, I., GRAYSON, R. & LADSON (1991). *Modelado de terreno digital, una revisión de las aplicaciones hidrológicas, geomorfológicas y ecológicas*. Procesos hidrológicos 5:3-30, Copiado ©1991 por John Wiley and Sons Ltd.
- MOORE, I., LEWIS, A., GALLANT, J. (1993). *Terrain attributes: Estimation methods and scale effect*. En Jakerman, A. J., Beck, M. B., McAleer, M. J., (eds.) *Modelling Change in Environmental Systems*. New York. NY, John Wiley and Sons: 189-214.
- MORGAN, B. A., (1966). *Significación de las eclogitas en la Cordillera de la Costa*. Bol. Geol., Caracas, 8(15): 154-155.
- MORGAN, B. A. (1968). *Eclogite and eclogite-amphibolite from Puerto Cabello, Venezuela*. Geol. Soc. Amer., Spec. Paper. 115: 155-156.
- MORGAN, B. A., (1969). *Geología de la región de Valencia, Carabobo, Venezuela*. Bol. Geol., Caracas, 10(20): 3-136.
- MORGAN, B. A., (1970). *Petrology and mineralogy of eclogite and garnet amphibolite from Puerto Cabello, Venezuela*. Journal of Petrology. 11(1): 101-145.
- MORGAN, B. A., (1971). *Metamorphic facies between Valencia and Puerto Cabello in the Cordillera de la Costa, Venezuela (Resumen)*. Trans. 5th. Caribb. Geol. Conf., Queens College Geological Bulletin, 5: 116.

- NAVARRO, E., M. OSTOS y F. YORIS, (1988). *Revisión y redefinición de unidades litoestratigráficas y síntesis de un modelo tectónico para la evolución de la parte Norte-central de Venezuela durante el Jurásico medio - Paleogeno*. Acta Científica Venezolana, 39: 427-436.
- NAVARRO J. (2007). *Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas*. Disponible: <http://www.navarro.cl/articulos/ArticuloIndigenaIquique.htm>.
- ONSTAD, C. and BRAKENSIEK, D. (1968). *The synthesis of distributed inputs for hydrograph predictions*, Water resources research. Vol. 4, N° 5, US. Published by the American Geophysical Union. p. 849-1151.
- OSTOS, M. (1990). *Evolución tectónica del margen sur-central del Caribe basado en datos geoquímicos*. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela, Geos 30: 1-294.
- PASTRANA, S. (2003). Análisis topológico de cuencas. (On line) <http://club.telepolis.com/geografo/geomorfologia/analcuen.htm>
- PECORA, W. T. (1956). *Carbonatites: a review*. Bull. Geol. Soc. America 67,2: 1537-1556.
- PÉREZ, D. (1977). Fundamentos de geomorfología dinámica con énfasis en los procesos fluviales. Venezuela, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Dirección General de Información e Investigación del Ambiente, Dirección de Hidrología. Caracas – Venezuela. 70 p.
- PETTIJOHN, F. J., (1963). *Chemical composition of sandstones—excluding carbonate and volcanic sands*, in Fleischer, M., ed., *Data of Geochemistry*, sixth edition, U. S. Geological Survey Professional Paper 440-S, 21 p.
- PETTIJHON, F. J. (1975). *Sedimentary rocks*. New York: Harper and Brothers, 628 p.
- PDVSA – LÉXICO ESTRATIGRÁFICO. (2010). *Formación Nirgua*. Tomado de <http://www.pdv.com/lexico/image/n200-5.gif>.

- PDVSA – LÉXICO ESTRATIGRÁFICO. (2010). *Fase Nirgua, en el sector de las Serranías de Aroa y Nirgua*. Tomado de <http://www.pdv.com/lexico/image/n200-4.gif>.
- PDVSA – LÉXICO ESTRATIGRÁFICO. (2010). *Formación Nirgua, complejo La Costa*. Tomado de <http://www.pdv.com/lexico/image/n200-3.gif>. *Mapa geológico simplificado del Complejo La Costa*. Tomado de <http://www.pdv.com/lexico/image/c1402-2.gif>. *Mapa geológico del Macizo de El Avila*. Tomado de <http://www.pdv.com/lexico/image/c1402-3.gif>.
- PDVSA – LÉXICO ESTRATIGRÁFICO. (2010). *Extensión del Complejo Yaritagua hacia el sur de Chivacoa*. Tomado de <http://www.pdv.com/lexico/image/y300-1.gif>. *Detalle de la distribución de la Formación Yaritagua*. Tomado de <http://www.pdv.com/lexico/image/y300-2.gif>.
- PDVSA – LÉXICO ESTRATIGRÁFICO. (2010). *Formación Aroa, Extensión de la napa de la Cordillera de la Costa*. Tomado de <http://www.pdv.com/lexico/image/aroa.jpg>. <http://www.pdv.com/lexico/image/1990-1.gif>.
- PDVSA – LÉXICO ESTRATIGRÁFICO. (2010). *Formación Mamey. Grupo Los Cristales. Formación Agua Blanca. Formación Gobernador (Miembro Masparrito). Formación Cojedes. Esquistos de Apure*.
- PECORA, W. (1956). *Carbonatites; a review*. *Geological Society of America Bulletin*, vol.67, no.11, pp. 1537–1555.
- PHILLIPS, V. (1986). *Remedies to problems caused by agriculture: The engineering solution, en effects of Land use on Fresh Waters*, J. F. de L. G. Solbé (ed.), pp. 315-328. Publ. Water Research Centre, Ellis Horwood Limited, Chichester.
- RAWLE, A. (2006). *Basic Principles of Particle Size Analysis*. Malvern Instruments Limited (<http://www.malvern.co.uk>), Worcestershire, UK.
- RASBAND, W. y FERREIRA, T. (2012). *Guía de usuario de ImageJ IJ 1.46r*.

- RENZ, H. H. (1956). Casupal Beds. En CVET – COMITÉ VENEZOLANO DE ESTRATIGRAFÍA Y TERMINOLOGÍA (ed.), *Léxico estratigráfico de Venezuela*. <http://www.pdvs.com/lexico/1edic/c66ii.htm>. Consulta 25 mayo 2012.
- RIVAS, M. (1994). *Segundo Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Ministerio del Ambiente y de los recursos Naturales*.
- RUZYLA, K., and D. I. JEZEK, (1987). *Staining method for recognition of pore space in thin and polished sections*: Journal of Sedimentary Petrology, v. 57, no. 4, p. 777–778.
- SCHÄFFER, J. (1981). *Las métricas naturales en Faceless conos*, Ann. Mat. Pura Appl, (4) 127: 173-185.
- SCHAFFER, H.R.(1981). *Social development in early childhood*. In A.J.Chapman & A.Gale (eds), Psychology for Professional Groups.
- SCHUBERT, C. (1970). *Venezuela y la “Nueva Tectónica Global*. Acta Científica Venezolana. V 211, p. 16 – 16.
- SCHUBERT, C. (1972). *Boconó fault, Venezuelan Andes*. Science; 175: 558-561.
- SCHUBERT, C. (1976). *Investigaciones Neotectónicas en Venezuela: objetivos y resultados*. Interciencia, v. 1, p. 159 – 169.
- SCHUBERT, C. (1980-a). *Morfología neotectónica de una falla rumbo – deslizante e informe preliminar sobre la falla de Boconó, Andes merideños*: Acta Cient. Venezolana, 31: 98-111.
- SCHUBERT, C. (1980-b). Late Cenozoic pull-apart basins, Boconó fault zona, Venezuelan Andes: *Jour. of Struct. Geol.*, 2: 463-468.
- SENCIALES, J. (1998). El análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico. Norba. X: 155-183. (On line) <http://www.fyl-unex.com/foro/publicaciones/norba/files/10/p10.pdf>
- SIVAPALAN, M. & WOOD, E.F. (1986). *Spatial heterogeneity and scale in the infiltration response of catchments*, to appear in Scale Problems in Hydrology, V. Gupta, I. R.

- SMITH, D. and STOPP, P. (1978). *The river basin: An introduction to the study of hydrology*. Cambridge University Press. Cambridge – Great Britain. 273 p.
- SNETSINGER, K. (1969). *Manganoan ilmenite from a Sierran Adamellite*. *American Mineralogist*, 54, march – april.
- SOLÓRZANO, A. y VARGUILLAS, P. (2008) *Caracterización geoquímica de muestras de pozos exploratorios en el aluvión de la cuenca de Barquisimeto- Cabudare, estado Lara*. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Geología.
- SPEIGHT, J.G. (1974, 1980). A parametric approach to landform regions. *Inst. Brit. Geography, Special Publication 7*, pp.213–230.
- SOUBLETTE, A. (2013) *Preservación del patrimonio cultural existente en El Picacho en el proceso de evaluación de yacimiento mineral no metálico, sector Los Cogollos, municipio Nirgua, estado Yaracuy*. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas.
- STAINFORTH, R. M., (1968). El desarrollo de la terminología estratigráfica en el estado Lara. *Bol. Inf., Asoc. Venez. Geol. Min. Petrol.*, 11(9): 243-253.
- STEPHAN J. F. (1982). *Evolution Geodynamique du Domine Caraibe Andes et Chaîne Caraibe sur la Transversale de Barquisiméto. (Vénézuéla)*. Univ. Pierre et Marie Curie, Thèse Doct. Etat., inédito, 512 p. (Publicado en *Geos*, UCV, Caracas, (42): 142 - 145, 2012).
- STRAHLER, A. (1968). Quantitative Geomorphology. En: R. Fairbridge (ed.). *The Encyclopedia of Geomorphology (Encyclopedia of Earth Sciences Series, T. 3)*. 898-912. Dowden, Hutchinson & Ross. Pennsylvania-USA.
- STRAHLER, A. (1985). *Geografía Física (7a. ed.)*. Editorial Omega, S. A. Barcelona – España.

- TAJCHMAN, (1981). *On computing topographic characteristics of a mountain catchment*. Canadian J. Forest Res., 11: 768-774.
- TUCKER, G., and WHIPPLE, K. (2002). Topographic outcomes predicted by stream erosion models: Sensitivity analysis and intermodal comparison, *J. Geophys. Res.*, 10.1029/2001JB000162.
- TWIGG, J. (1998). *Understanding Vulnerability* – an introduction in Twigg J, Bhatt MR eds.
- URBANI, F. (1989). *El Gneis de Cabriales, Carabobo, Venezuela*. Geos, UCV, Caracas, (29): 276 - 277.
- URBANI, F., O. CONTRERAS y F. BARRIOS, (1989a). *Geología de dos geotransversales de la Cordillera de la Costa*. Parte 4. Geología de la región de El Palito - Valencia - Mariara. Carabobo. *Bol. Geociencias*, UCV, Caracas, (16): 1 - 128.
- URBANI, F., O. CONTRERAS y F. BARRIOS, (1989b). *Reconocimiento geológico de la región de El Palito - Valencia - Mariara - Carabobo*. Mem. VII Congreso Geológico Venezolano, Barquisimeto, 1: 175 - 198.
- URBANI, F. y M. OSTOS, (1989). *El Complejo Avila, Cordillera de la Costa, Venezuela*. Geos, UCV, Caracas, (29): 205 - 217.
- URBANI, F. (2008a) *Revisión de la nomenclatura de las unidades de rocas ígneas y metamórficas del norte de Venezuela*. *Bol. Acad. C. Fis., Mat., y Nat. Vol. LXVIII Nos. 3:* 27-43.
- URBANI, F. (2008b). *Revisión de la nomenclatura de las unidades de rocas ígneas y metamórficas del norte de Venezuela*. *Bol. Acad. C. Fís., Mat. y Nat. Vol. 68(3):* 27-43.
- United States Geological Survey (USGS), (1993). *Digital Elevation Models: Data Users Guide*. Reston, VA, United States Geological Survey.
- VILA, M-A. (1976a). *Diccionario de tierras y aguas*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Cartografía Nacional. Caracas.

- WADELL, H. (1932). Volume, shape, and roundness of rock particles, *Journal of Geology* 40: 443–451.
- WEIBEL, R. & HELLER, M. (1991). *Digital terrain model*. Geographical Information Systems, Vol. 1, Longman, Scientific and Technical.
- WHIPPLE, K. (2004). *Bedrock Rivers and the geomorphology of active orogens*: Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 32, 151–185.
- WILSON, J. (1996). *GIS-based land surface/subsurface models*: New potential for new models. In NCGIA (ed.) Proceedings of the Third International Conference Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, New Mexico. Santa Barbara, National Center for Geographic Information and Analysis, University of California.
- WILSON, J. and BURROUGH, P. (1999). *Dynamic modeling, Geostatistics, and Fuzzy Classification*: New Sneakers for a New Geography Annals of the Association of American Geographers, V. 89, n4:736-747.
- WILSON, J. (1999). *Spatial models of soil erosion and GIS*. En Fotheringham, A.S.; Wegener, M. (eds.) Spatial Models and GIS: New Potential and New Models. London, Taylor and Francis: 83–108.
- WILSON, J. y GALLANT, J. (2000). *Digital Terrain Analysis*. (eds), Terrain Analysis: Principles and Applications, New York :John Wiley and Sons: 1 – 26.
- WISE, S. (1998). *Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours*. Hydrological Processes 14.
- WOOD, J. (1996). *The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models*, Tesis Doctoral, University of Leicester, Department of Geography, Leicester, UK. <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd>.
- YU, Z. (1997). *Grid-Spacing Effect on Watershed Hydrology Simulations*. Hydrological Science and Technology, American Institute of Hydrology, 13 (1-4), p. 75-85.

ZEVENBERG, L. and THORNE, C. (1987). *Quantitative analysis of land surface topography*. *Earth Surface Processes and Landforms* 12:47–56.

Referencias electrónicas:

<http://www.yaracuy.net/wp-content/uploads/2011/05/mapa-yaracuy.jpg>.

[http://es.getamap.net/mapas/venezuela/venezuela_\(general\)/_buria_rio/](http://es.getamap.net/mapas/venezuela/venezuela_(general)/_buria_rio/).

<http://pubs.usgs.gov/of/2000/ofr-00-0018/ofr-00-0018.pdf> y Hackley et al., 2005

<http://www.pdv.com/lexico/image/y300-1.gif>

<http://www.pdv.com/lexico/image/y300-2.gif>

<http://www.pdv.com/lexico/image/n200-1.gif>

<http://www.pdv.com/lexico/image/n200-3.gif>

<http://www.pdv.com/lexico/image/n200-4.gif>

<http://www.pdv.com/lexico/image/n200-5.gif>

<http://www.pdv.com/lexico/image/c1402-2.gif>

<http://www.pdv.com/lexico/image/c1402-3.gif>

<http://www.pdv.com/lexico/image/1990-1.gif>

<http://www.pdv.com/lexico/image/aroa.jpg>

http://es.getamap.net/busca_mapas_1_9+41+13+n+68+58+43+w.html

https://sites.google.com/site/nirguaweb/mapa_himno_y_escudo_de_nirgua

<http://www.yaracuy.net/wp-content/uploads/2011/05/mapa-yaracuy.jpg>

[http://es.getamap.net/mapas/venezuela/venezuela_\(general\)/_buria_rio/](http://es.getamap.net/mapas/venezuela/venezuela_(general)/_buria_rio/)

http://es.getamap.net/busca_mapas_1_n+10+2+57+w+68+38+22.html.

http://es.getamap.net/busca_mapas_1_n+9+43+51+w+69+0+3.html.

http://es.getamap.net/busca_mapas_1_n+10+7+28+w+68+33+33.html.

https://sites.google.com/site/nirguaweb/mapa_himno_y_escudo_de_nirgua.

<http://www.venemia.com/>.

http://es.getamap.net/busca_mapas_1_09+43+43+n+69+02+16+w.html)

<http://boletinambiental.files.wordpress.com/2008/08/portuguesa1.jpg>

<http://2.bp.blogspot.com/-FoXYRY5-zy0/TjYiZ8cKQil/AAAAAAAAAQ4/XvcIWb2IS1c/s1600/sistema.jpg>

<http://photos1.blogger.com/blogger/2860/2039/1600/riobocono.jpg>

http://es.getamap.net/busca_mapas_1_8+50+46+n+70+00+33+w.html

http://1.bp.blogspot.com/_LT0bNpO8cHA/S73-F7YGVfI/AAAAAAAAACY4/-wAa850dAc8/s1600/cende1.jpg

http://es.getamap.net/busca_mapas_1_7+54+8+n+67+28+21w.html

<http://www.unalmed.edu.co/rrodriguez/Geoquimica/concentrados%20minerales.htm>

http://cartografia.fi-a.unam.mx/temas/estratigrafia_sedimentologia/PE105211_ES_PrPar.pdf

<http://www.gnu.org/philosophy/stallman-kth.html>

<http://es.wikipedia.org/wiki/ImageJ>

<http://rsbweb.nih.gov/ij/docs/user-guide.pdf>

<http://forofotografiasalva.blogspot.com/2012/03/profundidad-de-pixel-o-profundidad-de.html>.

<http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/index.html>.

<http://cret.cnu.edu.cn/syjc/content/giswb/vol2/contents.ht>