

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE CLIMA, EROSIÓN Y TECTÓNICA A LO LARGO DEL RÍO GUÁRICO MEDIANTE ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICOS, GEOLÓGICOS Y DATOS TERMOCRONOLÓGICOS EXISTENTES

Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Flores F, Marlene del C
Para optar al Título
de Ingeniero Geólogo

Caracas, Noviembre de 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE CLIMA, EROSIÓN Y TECTÓNICA A LO LARGO DEL RÍO GUÁRICO MEDIANTE ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICOS, GEOLÓGICOS Y DATOS TERMOCRONOLÓGICOS EXISTENTES

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Mauricio Bermúdez

Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Flores F, Marlene del C
Para optar al Título
de Ingeniero Geólogo

Caracas, Noviembre de 2013

Caracas, Noviembre de 2013

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller, titulado:

**“ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE CLIMA, EROSIÓN Y
TECTÓNICA A LO LARGO DEL RÍO GUÁRICO MEDIANTE
ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICOS, GEOLÓGICOS Y DATOS
TERMOCRONOLÓGICOS EXISTENTES”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geólogo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Xavier Bustos
Jurado

Prof. Lenin González
Jurado

Prof. Mauricio Bermúdez
Tutor Académico

A mi familia mi gran apoyo

AGRADECIMIENTOS

Universidad Central de Venezuela, por ser la casa que me ha formado como profesional y en la que cumplo una de mis metas, ser ingeniero.

Al Prof. Mauricio Bermúdez por ser mi tutor y amigo, me enseñó a ver que todo se puede hacer si se quiere, además me inspiró a amar mi carrera y ver el mundo infinito de posibilidades que es la geología.

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*”.

A FUNVISIS quien proporcionó parte de los fondos provenientes del proyecto Geociencia Integral de Los Andes de Mérida (GIAME) coordinado por el Dr. Michael Schmitz.

Al Dr. Prof. Matthias Bernet de la Universidad Joseph Fourier, Grenoble-Francia por la asistencia y discusión en el campo.

A mis padres y a mi abuela, Marlene, Juan y Nali, por darme ánimos en este camino, el apoyo continuo y el amor incondicional, los amo.

A mis hermanos por hacer mis días alegres con sus loqueras y por su amor, cada día agradezco por tenerlos, Juan, Juanda, Gio, Hayder, Cari, Alimer.

A mi negrita linda, mi sami, por llenar de luz nuestra familia con su llegada.

A mi primo Alexander, por ser ese amigo con el que puedo hablar, y a mi tía Mercedes por ser tan cariñosa y servicial, haciendo de su casa mi segundo hogar.

A mis amigos, que vivieron la experiencia de esta etapa conmigo, y siempre estuvieron en mis altos y bemoles, rieron y lloraron conmigo, aguataron mi carácter y aun así siguieron siendo mis amigos, los quiero con todo mi corazón, doy gracias inmensas por tenerlos en mi vida. Mafer, Edison, Zully, Mati, Yashi.

Al prof. Xavier Bustos por siempre estar dispuesto a ayudar y a sacarme de dudas en la realización de este trabajo.

A Morella, por siempre ayudar en lo que fuera en la biblioteca de la escuela de Geología.

A mi cotutor Joaquín, por darle un toque alegre y divertido a las tardes en el laboratorio, llenando de sonrisas e inocencia todo el lugar.

A mis compañeros Charles Viana y Surisaday Arcia quienes compartieron conmigo durante las actividades de campo.

Flores F. Marlene del C

**ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE CLIMA, EROSIÓN Y
TECTÓNICA A LO LARGO DEL RÍO GUÁRICO MEDIANTE
ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICOS, GEOLÓGICOS Y DATOS
TERMOCRONOLÓGICOS EXISTENTES**

Tutor Académico: Prof. Mauricio Bermúdez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2013, 204 páginas.

Palabras claves: Geomorfología Cuantitativa, minerales pesados, río Guárico.

RESUMEN:

En el presente Trabajo Especial de Grado, se combina una parte de la geomorfología cuantitativa llamada análisis digital del terreno, con análisis visual y computarizado de minerales pesados y termocronología con la finalidad de analizar la relación entre el clima, la tectónica y los procesos superficiales a lo largo de los orógenos circundantes a la cuenca del río Guárico. Se recolectaron tres muestras de sedimentos modernos de ríos, de 10 kilogramos cada una, estas muestras fueron tomadas en tres sub-cuencas internas a la cuenca del río Guárico, en el centro de Venezuela. Las dos primeras conformadas por los embalses de Camatagua y de Guárico, y la tercera es la del río Orituco, con áreas de 2243, 5744 y 8895 km², respectivamente. Las muestras de sedimentos modernos fueron analizadas visualmente, mediante el microscopio de luz polarizada, las imágenes de los minerales fueron estudiadas mediante el software Imagej y se finalizó con la geomorfología cuantitativa de la zona. Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que, los mayores índices de erosión se encuentran presentes en la sub-cuenca del embalse de Camatagua, seguido por la del embalse de Guárico y la sub-cuenca del río Orituco. Estas relaciones se conservan cuando se incluyen los efectos de precipitación uniforme y variables. La sub-cuenca del embalse de Camatagua, posee la menor tasa de índice de humedad, mientras que la de Guárico y

Orituco poseen valores similares. En cuanto al contenido mineralógico, la sub-cuenca del río Orituco posee una mayor variedad de minerales pesados, entre los cuales destacan: circón, rutilo, anatasa, brokita, espinela, berilio, esfena, apatito y xenotimo; Mientras que en las sub-cuencas de Camatagua y Guárico se encuentran: rutilo, olivino y esfena. En cuanto a las características de los granos, los del río Orituco tienen un mayor grado de redondez que las de las otras dos cuencas, esto corrobora el hecho de que los posibles terrenos fuentes están mucho más lejanos para esta cuenca que para el resto de las sub-cuencas. Sin embargo, la esfericidad es mayor en las cuencas de Camatagua y Guárico. Posiblemente esta esfericidad sea remanente producto de los procesos de abrasión ocurridos durante las corrientes turbidíticas que caracterizan a la Formación Guárico.

Los altos índices de erosión para las sub-cuencas de Camatagua y Guárico pudieran estar reflejando el efecto de movimientos a lo largo de fallas, remoción de material y acomodación del mismo, aguas abajo. En términos de exhumación, alrededor de las tres cuencas estudiadas las sub-cuencas de Camatagua y Guárico posiblemente experimenten dos (2) fases de exhumación diferentes, una Oligoceno y otra Mioceno. Mientras que la sub-cuenca del río Orituco posiblemente sufra una fase de exhumación continúa durante el Mioceno, según (Kohn et al., 1984; Pérez de Armas, 2005).

Se finalizó con el mapa combinado, el cual posee el índice de erosión aunado con las precipitaciones y las estructuras, con esto se puede observar la existencia de mayor erosión hacia la sub cuenca del embalse de Camatagua, donde presenta mayor complejidad estructural lo que podría decir que existe una relación entre la alta tasa de erosión y la complejidad estructural, las fallas presentes parecen reactivarse a diferentes períodos de tiempo y a su vez el movimiento de las fallas causa la ruptura de las rocas, por lo que eso va en contra de la esfericidad y redondez observadas. Los resultados sugieren un patrón de esfericidad y redondez heredados del proceso de depositación de la Formación.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN:.....	vii
1.1 INTRODUCCIÓN.....	20
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	21
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	21
1.4 OBJETIVOS.....	21
<i>1.4.1 Objetivo General</i>	21
<i>1.4.2 Objetivos Específicos</i>	22
1.5 ALCANCE	22
1.6 ANTECEDENTES	23
<i>1.6.1 Antecedentes de la zona de estudio</i>	23
<i>1.6.2 Antecedentes trabajos previos</i>	24
2. CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO FÍSICO DE LA CUENCA DEL RÍO GUÁRICO.....	26
2.1 INTRODUCCIÓN.....	26
2.2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	26
2.3 GEOLOGÍA	27
<i>2.3.1 Geología regional</i>	27
<i>2.3.2 Formaciones geológicas presentes</i>	36
<i>2.3.3 Geología estructural</i>	40
<i>2.3.4 Aspectos geomorfológicos</i>	47
2.4 CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS	49
<i>2.4.1 Clima</i>	49

2.4.2	<i>Relieve</i>	51
2.4.3	<i>Temperatura</i>	52
2.4.4	<i>Precipitaciones</i>	53
2.4.5	<i>Vegetación</i>	55
2.4.6	<i>Evaporación</i>	56
2.4.7	<i>Húmedad Relativa</i>	56
2.4.8	<i>Vientos</i>	57
2.4.8	<i>Insolación</i>	58
3.	METODOLOGÍA	59
3.1	INTRODUCCIÓN.....	59
3.2	RECOPIACIONES	59
3.2.1	<i>Recopilación bibliográfica</i>	59
3.2.2	<i>Recopilación cartográfica</i>	59
3.3	TRABAJO DE CAMPO.....	59
3.3.1	<i>Recolección de muestras</i>	59
3.4	TRABAJO DE LABORATORIO	61
3.4.1	<i>Preparación de secciones epóxicas</i>	61
3.5	ETAPA DE OFICINA.....	73
3.5.1	<i>Análisis visual de minerales pesados</i>	73
3.5.2	<i>Análisis de imágenes de minerales pesados mediante ImageJ</i>	79
3.5.3	<i>Geomorfología cuantitativa</i>	86
4.	GEOMORFOLOGÍA CUANTITATIVA.....	88
4.1	INTRODUCCIÓN.....	88
4.2	PARÁMETROS DE ENTRADA EN ARCGIS	88

4.3 CORRECCIONES DE ARTEFACTOS SOBRE LOS MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL.....	91
4.3.1 Corrección del MED (relleno o "fill").....	91
4.4 CÁLCULOS DE PARÁMETROS HIDROLÓGICOS.....	96
4.4.1 Cálculo de la dirección de flujo o "flow-direction".....	96
4.4.2 Cuencas hidrográficas o "watershed".....	100
4.4.3 Acumulación de flujo o "flow accumulation".....	102
4.4.5 Clasificación de drenajes o "stream-order".....	105
4.4.6 Longitud de flujo o "flow-length".....	108
4.5 CÁLCULO DE ÍNDICES TOPOGRÁFICOS (ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO).....	109
4.5.1 Pendiente.....	109
4.5.2 Índice de transporte de sedimento (STI).....	114
4.5.3 Índice de humedad (WI).....	114
4.5.4 Índices de erosión.....	115
4.5.5 Cálculo del relieve.....	117
4.6 OBTENCIÓN DE VARIABLES GLOBALES EN UN ENTORNO DE INTERÉS.....	118
4.6.1 Estadísticas focalizadas o "focal statistics".....	118
5. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	121
5.1 INTRODUCCIÓN.....	121
5.2 ANÁLISIS VISUAL DE MINERALES PESADOS.....	121
5.3 ANÁLISIS DE IMÁGENES DE MINERALES PESADOS.....	126
5.4 ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO.....	129
5.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	140

6. CONCLUSIONES	144
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio (Tomado y modificado de Hackley et al., 2005)	26
Figura 2. Mapa de fallas cuaternarias de Venezuela, las líneas verdes y rojas indican la falla la Victoria y la falla de Santa Rosa, respectivamente.	27
Figura 3. Distribución de las rocas Jurásicas en Venezuela.....	33
Figura 4. Distribución de las unidades Alóctonas y Autóctonas.	36
Figura 5. Estructuras sedimentarias presentes en la Formación Guárico: (A) "hummocky cross-bedding" (tomado: http://geology.gsapubs.org) (B) "herring-bonecross-bedding"	39
Figura 6. Fajas tectónicas de la Cordillera de la Costa de Venezuela.....	40
Figura 7. Mapa neotectónico de Venezuela (Tomado y modificado de FUNVISIS 1993)	42
Figura 8. Anticlinales de Taguay y Barbacoas.....	44
Figura 9. Sinclinal de Carmen de Cura y Falla de Guarumen (tomada y modificada del mapa de Creole company, Camatagua, 1965).....	45
Figura 10. Cortes geológicos de la región de Camatagua, Estado Aragua (Tomada y modificada de los Mapas Creole, 1966).....	47
Figura 11. Clasificación climática del área de estudio según Köppen (Tomado y modificado de www.venemia.com)	51
Figura 12. Temperatura promedio en el estado Guárico.	53
Figura 13. Tasa de precipitación anual promedio para el área de estudio (Tomado y modificado de www.venemia.com)	53
Figura 14. Mapa de distribución de precipitaciones (percentil 75%) para distintos períodos a lo largo de estado Guárico	54
Figura 15. Mapa de pisos húmedos de la parte central de la Cordillera de la Costa de Venezuela (Tomado de http://www.venemia.com/Vzla/VzlaClima/VeneClima10.php)	56

Figura 16. Mapa de humedad relativa de la parte central de la Cordillera de la Costa de Venezuela, humedad relativa media anual (%) (Tomado de http://www.inameh.gob.ve).....	57
Figura 17. Mapa de vientos alisios de Venezuela.....	57
Figura 18. Mapa de insolación de la parte central de la Cordillera de la Costa de Venezuela, insolación media anual (horas días ⁻¹) (Tomado de http://www.inameh.gob.ve).....	58
Figura 19. Recolección muestras de río: (a) en el lecho del río, (b) llenado de la bolsa para sedimentos modernos de ríos.	60
Figura 20. (a) Mapa geológico de Venezuela mostrando el área de estudio (Modificado de Hackley et al., 2005). (b) Los cuadrados en rojo representan las muestras detríticas recolectadas para este trabajo. Los círculos de colores representan las edades de trazas de fisión in-situ existentes en la zona (Pérez de Armas, 2005) ..	61
Figura 21. Tamizado de la muestra en húmedo.	62
Figura 22. (a) Mesa Wilfley, (b) canales donde se encuentra los minerales pesados .	62
Figura 23. Separación de los minerales pesados	63
Figura 24. Materiales para la separación magnética manual	64
Figura 25. Proceso de separación de magnetita de la muestra	64
Figura 26. (a) Equipo de separación magnética magnet-Lift. (b) Muestras obtenidas después del proceso de separación.....	65
Figura 27. Esquema de separación de minerales pesados.....	66
Figura 28. Separación de minerales mediante bromoformo	67
Figura 29. Embudo de separación en la campana extractora con material separado ..	67
Figura 30. Lavado del mineral, vasos de precipitado con Bromoformo	68
Figura 31. Precipitación del Bromoformo en el embudo.....	69
Figura 32. Separador Magnético Frantz.....	69
Figura 33. Materiales para el montaje de las secciones epóxicas	71

Figura 34. Materiales utilizados para el pulido de la pastilla.....	72
Figura 35. Muestras epóxicas.....	73
Figura 36. Microscopio de luz polarizada.....	74
Figura 37. Esquema que muestra el efecto de filtros polarizadores en un rayo de luz.	75
Figura 38. Esquema simplificando la técnica de iluminación con luz polarizada. El filtro polarizador (1) está localizado por debajo del condensador (2) y el espécimen (3) es iluminado con luz polarizada lineal. El analizador (5) rotado en ángulo de 90° en relación a (1) está localizado detrás del objetivo (4). Una lente (6) en el tubo forma la imagen intermedia (7).	76
Figura 39. Carta de índice de esfericidad y redondez (Tomada y modificada de Krumbein y Loss, 1963).....	77
Figura 40. Escala de tamaño de grano de Udden-Wentworth, modificado de Adams y otros (1984).....	79
Figura 41. Secuencia de pasos realizada para el análisis digital de minerales pesados.	80
Figura 42. Adquisición de imágenes en una cámara digital.....	81
Figura 43. Software de análisis de imagen digital	82
Figura 44. Imagen digital blanco y negro, en su forma normal y ampliada, en esta última puede observarse los píxeles.....	83
Figura 45. Imagen digital a color, en su forma normal y ampliada, en esta última puede observarse los píxeles y la combinación o codificación de colores.	84
Figura 46. Imagen de ejemplo de calculo morfométrico	85
Figura 47. Resultado del análisis de grano realizado sobre la tabla de índices de esfericidad y redondez de Krumbein.....	86
Figura 48. Modelo de elevación digital (MED) a 90 metros para Venezuela. La topografía digital fue descargada de http://dds.cr.usgs.gov/srtm/ y proyectada en ArcGIS 10.0 usando el sistema de coordenadas WGS1984.	89

Figura 49. Detalle del modelo de elevación digital, las zonas en marrón a blanco representan las máximas elevaciones. Las zonas en amarillo y azul claro representan depresiones, en este caso, ríos.....	90
Figura 50. Ejemplo de red de drenaje derivada del modelo de elevación.....	91
Figura 51. Imagen de ejemplo resultado de la aplicación de la rutina canal o "channel"	92
Figura 52. Vista de perfil de una depresión en un modelo de elevación digital. Una depresión es un píxel cuyo valor (en este caso la altura) es muy inferior a los valores cercanos.....	93
Figura 53. Vista de perfil de un canal antes y después de ejecutar la corrección del ráster (a) relleno de la depresión (b) remoción de picos altos dentro del ráster.....	95
Figura 54. Imagen ejemplo de la dirección de flujo.....	97
Figura 55. Valores de dirección de flujo obtenidos para el entorno vecino a un píxel dentro del MED.....	98
Figura 56. Partes de una cuenca hidrográfica. Los puntos de fluidez o puntos de capturas representan la confluencia de dos o más tributarios.	101
Figura 57. Ejemplo de delineación de las cuencas hidrográficas. (a) subcuencas dentro de un área específica. (b) contornos y tributarios para cada subcuenca	101
Figura 58. Imagen de la salida del comando acumulación de flujo	103
Figura 59. (a) Dirección de flujo, (b) acumulación de flujo (Tomada de la página de ayuda de ArcGIS 10.0).....	103
Figura 60. Método de clasificación de drenajes: (a) Strahler. (b) Shreve.....	106
Figura 61. Ejemplo de un ráster de salida después de la clasificación de drenajes usando el orden de Strahler.	107
Figura 62. Ejemplo de salida de la función longitud de flujo o "flow-length"	108
Figura 63. Cálculo de la pendiente.....	109
Figura 64. Ventana utilizada para calcular las derivadas de las matrices de elevación	111
Figura 65. Ejemplo de cálculo de pendiente en ArcGIS 10.0 a partir del MED.....	113

Figura 66. 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.....	117
Figura 67. 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.....	118
Figura 68. Imágenes de minerales pesados derivados de sedimentos modernos del río Guárico: 1) Rutilo, 2) Esfena, 3)Brokita.....	122
Figura 69. Imagen de las muestras donde se observa la diferencia general de redondez y esfericidad.	123
Figura 70. Comparación de concentración de minerales pesados por muestra para las fracciones a 0.4A.....	124
Figura 71. Comparación de concentración de minerales pesados por muestra para las fracciones separadas a 0.8A.	125
Figura 72. Comparación de concentración de minerales pesados por muestra para las secciones epóxicas	126
Figura 73. Comparación entre índices de redondez y esfericidad promedios calculados y observados.....	128
Figura 74. Mapa de relieve con las tres cuencas analizadas en este trabajo. Cuenca 1: Embalse de Camatagua. Cuenca 2: sub-cuenca de Guárico. Cuenca 3: sub-cuenca del río Orituco.	13131
Figura 75. Mapa de pendientes a lo largo de las tres sub-cuencas estudiadas.	133
Figura 76. Mapa de índice de erosión: Potencial total de flujo (TSP) a) Uniforme, b) Con precipitación variable	134
Figura 77. Mapa de índice de erosión: Poder de corte de la corriente (SSP) a) Uniforme, b) con precipitación variable	135
Figura 78. Mapa de índice de erosión: poder unitario de la corriente (USP) a) Uniforme, b) con precipitación variable	136

Figura 79. Mapa de índice de humedad (WI) a) Uniforme, b) con precipitación variable.....	137
Figura 80. Mapa de índice de transporte de sedimentos (STI)	138
Figura 81. Comparación de índices de erosión promedios con precipitación uniforme y variable para cada cuenca.....	139
Figura 82. Comparación de índices de humedad para cada sub-cuenca.	139
Figura 1. Mapa combinado: Estructuras, atributos primarios y secundarios con precipitaciones.....	140
Figura 84. (a) Flujo turbulento de alta densidad en una corriente turbidítica. (b) Trayectorias de transporte de algunos clastos "trazadores". Los clastos más grande se mueven rápidamente por "deslizamiento" en la parte superior de la capa de flujo inercial. La variación entre forma/tamaño varían de acuerdo a la exposición de la partícula en las diferentes capas ("layers") del canal.	142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Minerales pesados separados por el equipo isodinámico Frantz de acuerdo a amperaje y ángulos de inclinación (Tomado de Hess, 1959).....	70
Tabla 2. Sintaxis y descripción de la rutina para determinar depresiones o "sinks" ..	94
Tabla 3. Sintaxis y descripción del comando para efectuar rellenos o "fills" en un ráster	96
Tabla 4. Sintaxis y descripción de la rutina de dirección de flujo o "flow direction"	100
Tabla 5. Sintaxis y descripción de la rutina para la delineación de cuencas hidrográficas o "watershed"	102
Tabla 6. Sintaxis y descripción de la rutina de acumulación de flujo o "flow accumulation"	104
Tabla 7. Sintaxis del comando clasificación de drenajes ("Stream order")	107
Tabla 8. Sintaxis del comando longitud de flujo o "flow-length"	108
Tabla 9. Ejemplo de cálculo de pendiente en porcentaje y en grados.....	111
Tabla 10. Sintaxis del comando pendiente o "slope"	113
Tabla 11. Sintaxis del comando estadística focal o "focal-statistics"	119
Tabla 12. Resultado de análisis de minerales a través de análisis visuales y de imágenes.....	127
Tabla 13. Valores promedios de índices de redondez y esfericidad calculados y observados para cada muestra.....	129
Tabla 14. Valores de atributos primarios del terreno para cada cuenca.....	132
Tabla 15. Valores de precipitación y atributos secundarios del terreno para cada cuenca.....	132
Tabla 16. Valores de índices de erosión para cada cuenca	132

CAPITULO I

1. PRELIMINARES

1.1 INTRODUCCIÓN

La discriminación de las relaciones entre clima, erosión y tectónica a lo largo del río Guárico mediante análisis geomorfológicos, geológicos, sedimentológicos combinados con información derivada de datos termocronológicos existentes en el área es una nueva metodología que permitirá entender cómo todos estos procesos han interactuado en el transcurso del tiempo geológico. La forma del paisaje actual de los orógenos circundantes (parte central de la Serranía del Interior) a la cuenca del río Guárico refleja la interacción entre todos esos procesos antes mencionados. Principalmente, debido a que los mismos pueden actuar en forma acoplada o no, incidiendo directamente sobre los mecanismos de erosión, haciendo que la tasa aumente paulatinamente al igual que la tasa de incisión del río Guárico, impactando directamente sobre la actividad humana, y aumentando la exhumación de las cadenas montañosas circundantes.

El estudio de índices topográficos primarios y secundarios está basado en el uso de ecuaciones matemáticas (Wilson y Gallant, 2000), empleadas en un área específica, arrojando datos de interés, los cuales pueden ser utilizados para la comparación entre si y el análisis detallado de diferentes tipos de variables. Los mismos indicarán la existencia de una alta erosión, bien sea por procesos internos terrestres (tectónica) o procesos externos (clima y acción del hombre).

Estudiar la tasa de erosión, la relación entre el terreno fuente, proveniencia y acumulación de flujo de partículas mediante análisis geomorfológicos y sedimentológicos cuantitativos, es un estudio novedoso que no se ha realizado en esta zona de Venezuela lo cual puede servir para la continuación de un estudio de dataciones o como base de posteriores estudios.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El paisaje actual que muestra la cuenca del río Guárico y sus orógenos circundantes es el resultado de la combinación de diversos factores como: la litología, relieve, el clima, reactivación de fallas por procesos geodinámicos como orogénesis y las intervenciones antrópicas, entre otros. Esto ha ocasionado un aumento de las tasas de erosión e incisión del río Guárico, que puede afectar la actividad humana e incluso incrementar la tasa de exhumación del orógeno (England y Molnar, 1990). Entender la variación temporal de tales tasas y relacionarlas con la orogénesis de las cadenas circundantes es vital para entender la relación existente entre clima, tectónica y procesos superficiales de esta parte del país.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La integración de métodos geomorfológicos con el estudio de los atributos primarios y secundarios del terreno (ejemplo: pendiente, índice de humedad del terreno y medidas de erosión actual, entre otros) junto con observaciones de geología de campo, estructural, sedimentológicas y tectónica permitirá entender la relación existente entre clima, tectónica y procesos superficiales registrada en la cuenca del río Guárico. Esta discriminación es vital para entender un poco más todos los procesos involucrados y así, aportar nuevos datos al conocimiento actual de la geodinámica del Caribe.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Estudiar las interacciones entre relieve, erosión y clima mediante análisis geomorfológico, medidas de índices primarios y secundarios topográficos, geología de campo, geología estructural, análisis sedimentológicos y tectónica alrededor de la cuenca del Río Guárico, con la finalidad de conocer las relaciones entre clima y tectónica en el contexto geodinámico actual conformado por las Placas Caribe y Suramérica.

1.4.2 Objetivos Específicos

- (a) Realizar estudios de proveniencia, mediante análisis de forma, redondez, esfericidad sobre minerales pesados pertenecientes a sedimentos detríticos del río Guárico y sus principales tributarios.

- (b) Calcular la tasa de erosión y acumulación de flujo de partículas mediante índices topográficos primarios y secundarios del terreno (Wilson y Gallant, 2000).

- (c) Crear un mapa combinado a escala 1:1400000 que incluya: geológico estructural de la zona del piedemonte, atributos topográficos primarios y secundarios del terreno y de distribución de minerales pesados alrededor de la zona de estudio, con la finalidad de establecer su proveniencia sedimentaria mediante comparación con minerales in-situ recolectados en áreas cercanas.

- (d) Relacionar cambios mineralógicos, tasas de incisión y tasas de erosión con levantamiento de las cadenas montañosas circundantes y discriminar estos en el contexto geodinámico, mediante el uso de las edades termocronológicas existentes (Pérez de Armas, 2005).

1.5 ALCANCE

El estudio forma parte de un proyecto de investigación a escala regional de los Laboratorios de Termocronología y Geomatemáticas de la UCV. El aporte de este trabajo especial de grado será proporcionar las primeras medidas teóricas de los atributos primarios y secundarios del terreno, así como análisis geomorfológicos cuantitativos y el cálculo de las variaciones laterales en los procesos erosivos de ríos tributarios al cauce principal de la cuenca del río Guárico. También se proporcionará un mapa geológico-estructural detallado de la zona de estudio y se discriminarán zonas potenciales de alta erosión, considerando la litología, y la relación entre las formas de granos mediante análisis visuales como indicadores de proveniencia

sedimentaria. Aunque no se contemplan dataciones dentro de este trabajo, estos minerales serían datados a futuro dentro del proyecto macro, y se prepararán las secciones para su posterior fechado.

1.6 ANTECEDENTES

1.6.1 Antecedentes de la zona de estudio

Camacho (2004) realizó estudios estructurales a partir de geofísica integrada, implementando y desarrollando una serie de métodos para decidir con un grado de incertidumbre menor la ubicación de una serie de estructuras en subsuelo. El objetivo principal del trabajo fue corroborar y delimitar las fallas selladas por sedimentos a partir de geofísica integrada, en la zona Sureste de Villa de Cura (Falla del Río Guárico) y San José de Río Chico (Falla Los Colorados).

Morales y Vilorio (2005) determinaron la interrelación existente entre unidades geológicas y propiedades del suelo en la cuenca alta del río Guárico. En donde predicen las propiedades del suelo a partir de la información ambiental disponible. Este estudio tuvo como propósito investigar si existen relaciones cuantitativas entre características del suelo y las formaciones geológicas que afloran en esta región, que permitieran utilizar mapas geológicos para predecir propiedades relevantes de suelo. Los autores realizaron un análisis de discriminante canónico para explorar la correlación entre las propiedades de los suelos y las unidades geológicas, y evaluaron la capacidad de predicción de estas unidades por medio de la correlación intra-clase.

Pérez de Armas (2005) combinó estudios de termocronología por trazas de fisión en apatitos junto con interpretación sísmica con la finalidad de discriminar la historia termal de parte de la Serranía del Interior y parte de la cuenca de Guárico. Este trabajo indica que un importante evento termal ocurrió durante el Eoceno. También permitió discriminar la reactivación de fallas extensionales cretácicas en la cuenca de Guárico.

Guillen y Toribio (2006) realizaron una compilación, digitalización y actualización geológica-cartográfica de la zona Nor-Central, estados Guárico y Aragua, en el que se encuentra material geológico estructural de las zonas de estudio.

Pindell et al. (2009), realizaron estudios de proveniencia, en el centro/oriental de Venezuela, mediante la identificación de minerales pesados con la finalidad de proporcionar datos adicionales para entender la interacción entre las placas Suramericana y Caribe.

Coello (2012), estudió el significado tectónico y la procedencia de la Formación Guárico a través de análisis petrográficos y minerales pesados. Este trabajo aportó un soporte a los estudios previos realizados en referencia a los tipos de roca que constituyeron las posibles fuentes de sedimentos para el depocentro de la cuenca antepaís en la que se depositó dicha unidad durante el Maastrichtiense-Eoceno temprano, a lo largo de toda su extensión geográfica y así presentar un modelo evolutivo tectono-estratigráfico, que explique cuales eran las áreas expuestas en aquel momento.

1.6.2 Antecedentes Trabajos previos

Flores y Méndez (2005). Establecieron la correlación estratigráfica y geocronología de las quebradas Hoyos y Vichú empleando el método de huellas de fisión combinados con análisis de imágenes para determinar relaciones entre terreno fuente y procedencia sedimentaria.

Méndez et al., (2007). Investigaron la influencia que ejerce la estructura fisiográfica de la microcuenca y la estructura de la red de drenaje en las respuestas rápidas y violentas del sistema mediante cálculos y mediciones de parámetros morfométricos; cálculo del tiempo de concentración; y estimación de los hidrogramas unitarios y caudales pico de crecientes.

Bermúdez et al., (2012). Realizaron la discriminación de la relación existente entre clima, tectónica, y procesos superficiales, mediante comparación múltiple de tasas de erosión a corto plazo con tasas de erosión a largo plazo estimados a partir de datos termocronológicos detríticos a lo largo de Los Andes de Venezuela.

CAPITULO II

2. CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO FÍSICO DE LA CUENCA DEL RÍO GUÁRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo tiene como objetivo presentar detalladamente la ubicación, características geológicas, estructurales y geomorfológicas del área de estudio.

2.2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio está comprendida a lo largo del Río Guárico y de sus tributarios principales comenzando desde el Embalse de Camatagua hasta su desembocadura en el Río Orinoco (que posee una cuenca de aproximadamente 800.000 km²), aunque en sus comienzos es un río de altura o de serranías; al pasar las inmediaciones de la población del Sombrero constituye un río de llanuras.

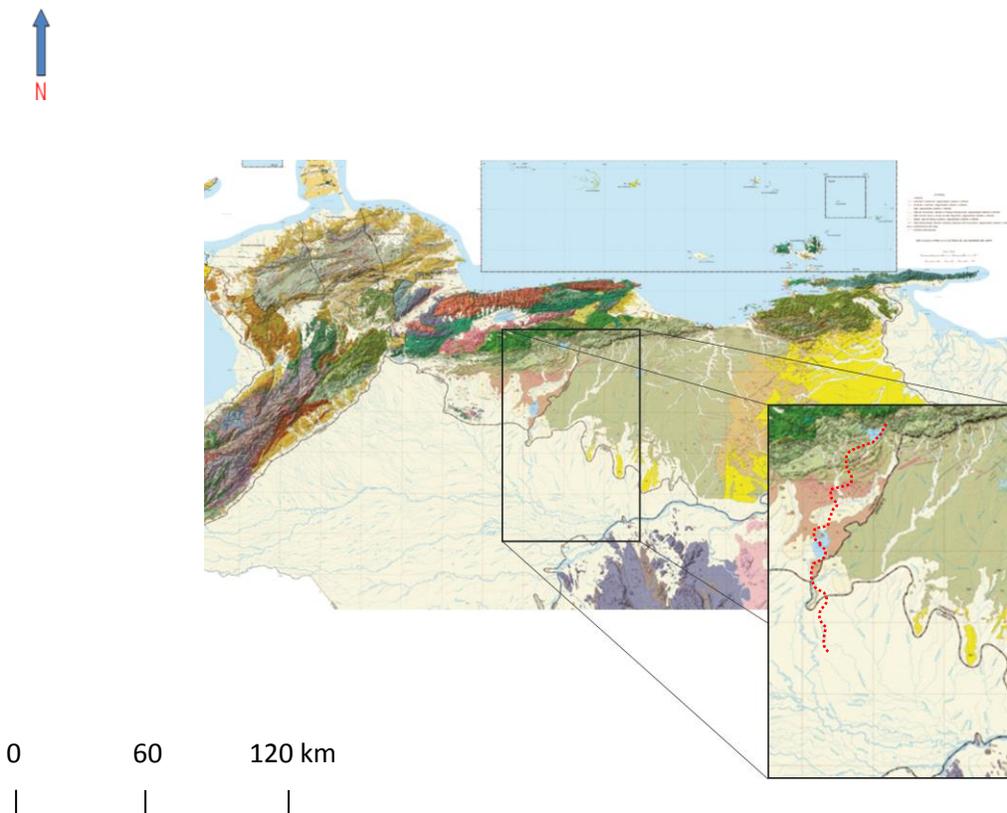


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio (Tomado y modificado de Hackley et al., 2005)

2.3 GEOLOGÍA

2.3.1 Geología Regional

Serranía del Interior

Faja Caucaagua-El Tinaco (Terreno)

La Faja tectónica de Caucaagua el Tinaco, esta situada en la parte norte de la Serranía del Interior entre la zona de la falla de La Victoria y la falla Santa Rosa. La Faja Caucaagua-El Tinaco (Terreno) es equivalente a grandes rasgos a la faja tectónica. (Menéndez, 1966). La Figura 2 muestra las fallas anteriormente mencionadas denotadas en color rojo y verde.

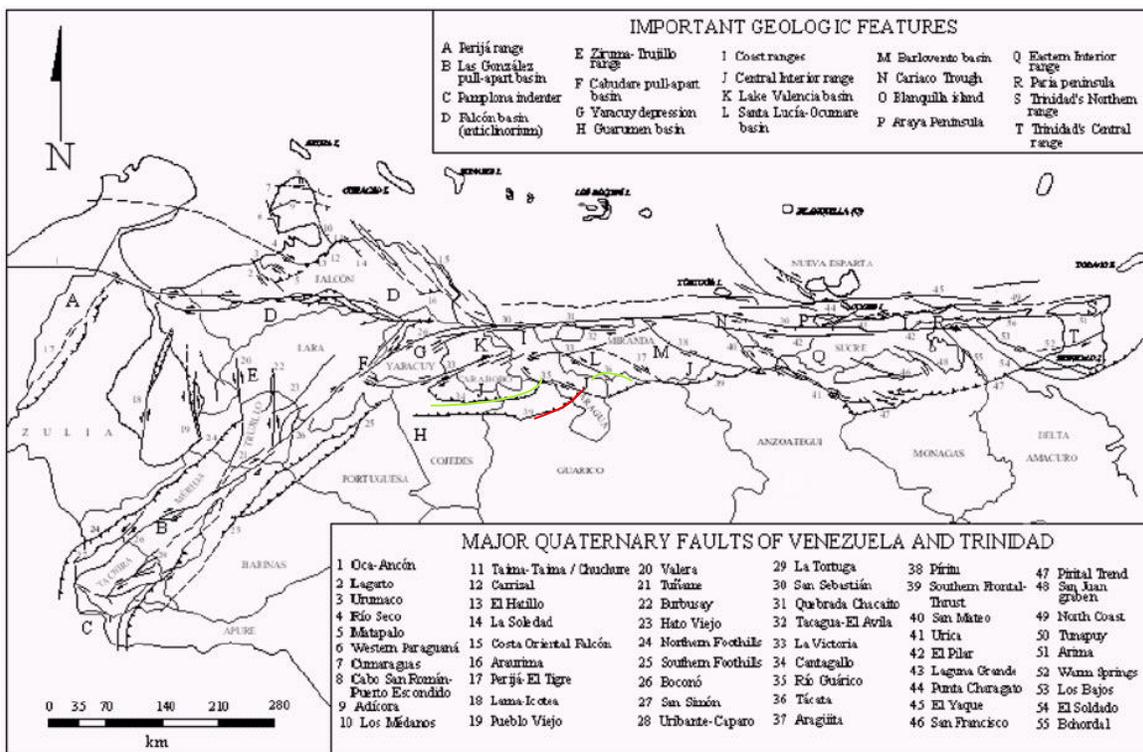


Figura 3. Mapa de fallas cuaternarias de Venezuela, las líneas verdes y rojas indican la falla la Victoria y la falla de Santa Rosa, respectivamente. (simplificado por Audemard et al. 2000)

La unidad mas antigua esta representada por el complejo El Tinaco de edad probablemente pre-mesozoica, comprende dos unidades metasedimentarias el Gneis de la Aguadita en su parte inferior y los esquistos de Tinapú en su parte superior. El Gneis de la Aguadita, corresponde a la parte más antigua del complejo de El Tinaco y consiste en una intercalación de gneises horbléndicos, gneises biotíticos, anfibolitas y rocas cuarzo-plagioclasicas (Menendez, 1965).

La unidad es una alternancia de capas máficas y félsicas de 5 a 30 cm de espesor promedio que alcanza raras veces hasta 1 m; esta alternancia, de colores contrastantes, produce el aspecto bandeado del gneis. Las capas félsicas (rocas cuarzo-plagioclásticas) suelen ser más delgadas que las máficas (gneis hornblendico-cuarzo-oligoclástico y anfibolitas). Se desconoce su base, en su tope la unidad concordante y transicional con el esquisto de Tinapú suprayacente. Localmente el Gneis de La Aguadita infrayace a las formaciones Cojedes, Querecual, Las Placitas, Pilacones (Código Estratigráfico de Venezuela, 1997).

Roca ígneas del Complejo El Tinaco

También conocida como roca de Conoropa, es una secuencia de rocas metavolcánicas de bajo grado y metasedimentos argiláceos y calcáreos, intercalados con metaconglomerados y metareniscas que afloran en una angosta faja entre las poblaciones de Caucagua y Santa Teresa, estado Miranda (Seidrs, 1965).

En el extremo occidental del terreno, están expuestos un bloque de manto subcontinental (Peridotita de Tinaquillo) y la discontinuidad de Mohorovich, gradando a parte del Complejo El Tinaco, el cual representa la corteza continental en la facies profunda de granulita exhumada.

En la región de El Tinaco, el complejo fue erosionado y está cubierto en inconformidad por la unidad de las volcánico-sedimentarias Las Placitas (de edad probablemente Cretácica), la cual aflora como cuerpos aislados de remanentes erosionales. Todas las unidades han sufrido metamorfismo retrogrado en una fase dominante y penetrativa en el Neógeno de la facies del esquisto verde (clorita).

En el extremo más oriental del terreno y en contacto de falla con la Filita de Tucutunemo, afloran las unidades filíticas de Urape y Muruguata las cuales contienen lentes de volcánoclasticas y exhibe cuerpos de mármol con foraminíferos de edad Cretácica.

La Peridotita de Tinaquillo es una masa ultramáfica de forma tabular de unos 3 km de espesor (Mackenzie, 1966) y está constituida por un sólo cuerpo con dimensiones de 13

por 7 km, expuesta al noroeste de Tinaquillo, sector nor-central del estado Cojedes (tomado de Léxico Estratigráfico PDVSA, 2007). Entra en contacto tectónico concordante con el Gneis de La Aguadita del Complejo de El Tinaco hacia el sur, desarrollando una zona de rocas cataclásticas y de intensa deformación; mientras que hacia el norte y noroeste, cabalga sobre las rocas de los Esquistos de Las Mercedes a través del Corrimiento de Manrique (Mattson, 1985; Ostos, 1985) (tomado de Léxico Estratigráfico PDVSA, 2007)

Faja de Loma de Hierro

Compuesta por dos terrenos, Terreno Paracotos, proviene de un protolito de rocas clásticas que fue depositado en un ambiente turbidítico con edad Maastrichtiense. El Terreno Loma de Hierro, es principalmente un bloque de placa litosférica oceánica, por lo cual, la suite ofiolítica fragmentada contiene unidades ultramáficas, gabros y basaltos. (Beck, C., 1986)

Faja de Villa de Cura

La faja está limitada al norte por el corrimiento de Agua Fría y al sur por una serie de fallas de corrimiento, la más importante de las cuales es la de Cantagallo. Dentro de esta faja se encuentran rocas volcánicas del Grupo Villa de Cura (Bellizia y Rodríguez, 1976). La misma pertenece por completo a un complejo de subducción de arco de isla oceánica y puede ser dividido en dos terrenos que van de norte a sur respectivamente.

El Grupo Villa de Cura de edad aparentemente Cretáceo Superior, pero que ha sido emplazado en la Cordillera de la Costa durante el Terciario Superior, considerándose así por algunos autores como un bloque alóctono.

Basándose en la abundancia relativa de tipos de rocas, dividió el Grupo de Villa de Cura en cuatro formaciones que de mas antigua a mas joven son: Formación el Caño, con metatobas afaníticas finamente menores de lavas básicas y andesíticas; Formación el Chino, metatobas estratificadas de grano fino y cantidades menores de basaltos espiliticos, meta-ftanitas, filitas y esquistos. Formación El Carmen, meta-tobas y meta-basalto y Formación Santa Isabel, compuesta en su mayoría por esquistos cloríticos (Shagam, 1960).

Faja Piemontina

La Napa Piemontina fue despegada de un sub-estrato Albiense y pre- Albiense, sufriendo dos fases tectónicas compresivas mayores. La primera, en el Eoceno medio Inferior, produjo la aloctonía de la Napa Metavolcánica de Villa de Cura sobre la Zona Piemontina interna, mientras esta última sufrió un plegamiento y un acortamiento fuerte. La segunda, en el Mioceno medio superior, produjo un corrimiento parcial de la Napa Piemontina ya tectonizada sobre el Mioceno, junto con un nuevo acortamiento de esta última y de la franja septentrional de la cuenca miocena. (Vassoevic, 1957).

La faja se divide, en tres unidades principales sobrecorridas una sobre la otra, en unidad de Guatopo, Río Orituco, Río Taguay.

Unidad de Guatopo, Se encuentra directamente corrida por rocas volcánicas básicas macizas, atribuidas a la Formación Tiara. Esta unidad presenta una secuencia espesa de flysch arenoso-conglomerático (Vassoevic, 1957). Estas rocas han sido atribuidas al Paleoceno- Eoceno inferior (Formación Guárico).

Unidad Río Orituco, Flysch arenoso-lutítico (Formación Guárico), se presenta en alternancias generalmente delgadas y con estratificación muy regular. Los niveles infrayacentes del Cretáceo superior, se compone desde abajo hacia arriba por calizas afaníticas a menudo silíceas, chert y limolitas síliceas, y limolitas síliceas y lutitas (Beck, 1977).

Unidad Río Taguay, es la unidad mas meridional y se caracteriza por su flysch únicamente lutítico, que empieza con un nivel muy rico en icnofósiles del género ophiomorfa. Este flysch (Formación Guárico) se atribuye al paleoceno por su posición estratigráfica (Beck, 1977).

Summa et al. (2003), dicen haber interpretado la estructura de la Serranía en profundidad como un basamento Mesozoico con fallas normales, algunas de las cuales han sido invertidas, de edad similar a la del Graben de Espino. Además, complementan su análisis diciendo que la sección sedimentaria que subyace a la Serranía del Interior es, probablemente, de origen sedimentario y volcánico de edad Jurásica, sedimentario y meta – sedimentario de edad Paleozoica, y evaporitas que, tal vez, puedan funcionar como

décollement con una gran influencia sobre las fallas someras. Según Dahlstrom (1970) c.p. Carnevalli et al. (1988), un ambiente geológico específico tiene un conjunto limitado de estructuras. La familia de estructuras de la Serranía del Interior corresponde a estructuras de frentes de montaña, las cuales comprenden pliegues concéntricos, cabalgamientos, fallas rumbo – deslizantes y fallas normales tardías (Carnevalli et al., 1988).

Historia Geológica

Las formaciones estudiadas pasaron por una serie de procesos, los cuales comenzaron a finales del Silúrico y se dividen en cuatro secuencias:

1. Mega secuencia Pre Rift
2. Mega secuencia Rift
3. Mega secuencia Margen Pasivo
4. Mega secuencia Colisión Oblicua

Mega secuencia Pre Rift

Los eventos en esta fase se desarrollan en el periodo Paleozoico, se produce la orogénesis Caledoniana (final del Silúrico), seguida de la orogénesis Caparoensis (Devónico Temprano) (González de Juana *et al.* 1980). Se produce un hiatus depositacional asociado en la región con las formaciones Carrizal y Hato Viejo de la subcuenca de Guárico, durante el período Cámbrico Temprano (Di Giacomo 1985). Para el período del Paleozoico Tardío, ocurre la orogénesis Herciniana (Pérmico Tardío).

El macizo de El Baúl es una unidad orográfica compuesta por sedimentos metamorfizados, rocas graníticas y coladas de lava interestratificadas con tobas, aglomerados, brechas y conglomerados. Las rocas ígneas se encuentran asociadas a un margen continental activo con plutonismo y vulcanismo andesítico y riolítico, estas rocas están representadas por la Asociación Granítica El Baúl y por la Súper Asociación Guacamayas.

La primera incluye cuerpos plutónicos graníticos, de edades entre Cámbrico a Pérmico Temprano; y la segunda se trata de lavas, tobas lapílicas, tobas de ceniza, areniscas tobáceas y cuerpos latíticos, con edades en el Pérmico Temprano (Martin 1960, Viscarret *et al.* 2007).

Durante el periodo Triásico, los efectos de la orogénesis Herciniana ocasionaron la ausencia de depósitos sedimentarios debido a la inexistencia de zonas deprimidas, condicionando la presencia de cuerpos ígneos, plutónicos y volcánicos en la región de Los Andes. Algunas unidades litológicas se encuentran asociadas a dos provincias geológicas denominadas como Bloque Caparo (autóctono) y Terreno Mérida (alóctono) (Bellizia y Pimentel, 1994), los cuales fueron estructurados durante dicha orogénesis, y se produjeron numerosos cuerpos ígneos intrusivos y volcánicos con edad Triásico (Burkley 1976, Van der Lelij *et al.* 2011).

MegasecuenciaRift

La megasecunciarift desarrollada durante el Jurásico Tardío y el Cretácico Temprano, puede ser correlacionable con la Formación La Quinta (Formación Ipire, L.E.V., 1970) al oeste de la subcuena de Maturín en el Graben de Espino. Esta formación fue depositada en ambientes continentales, está compuesta principalmente de lutitas rojas y mantos basálticos (Parnaud *et al.*, 1995). Estas capas rojas constituyen la sección antigua de la secuencia autóctona del norte de Suramérica y parecen estar presentes sobre una amplia zona del noreste de Suramérica (Eva *et al.*, 1989).

Según Erlich y Barret (1992), el proceso de rifting que afectó el margen norte de Suramérica fue parte de la apertura del Atlántico nor-central, cuando Norteamérica se separó de Gondwana. Esta apertura fue diacrónica siendo más antigua en el norte y más joven en el sur entre Norte y Suramérica. EL registro sedimentario sugiere que el rifting ocurrido a lo largo del este de Venezuela se inició en el pre-Barremiense, aunque los datos radiométricos en rocas ígneas indican una edad Triásico Tardío – Jurásico Temprano (Figura 2).

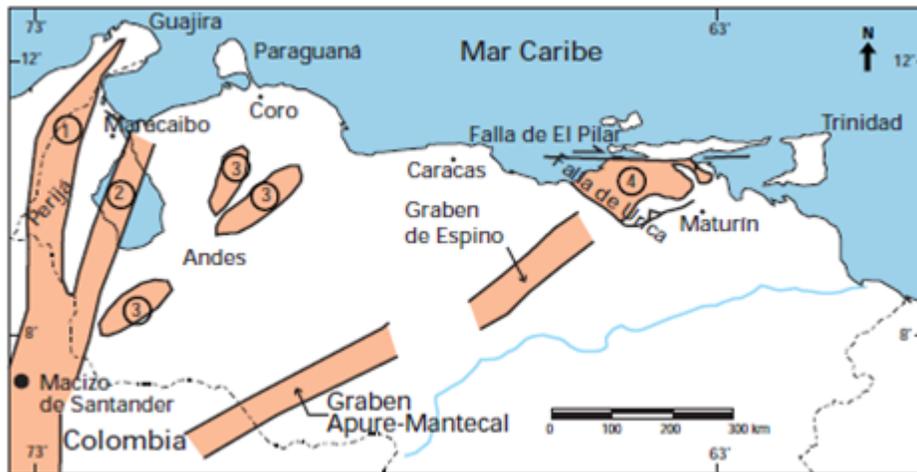


Figura 4. Distribución de las rocas Jurásicas en Venezuela.
(Tomado de Yoris Y Ostos 1997)

Megasecuencia de Margen Pasivo

Abarca las rocas del Cretácico - Paléogeno y está caracterizada por tres eventos transgresivos, que se desarrollaron de norte a sur, y culminaron durante el Turoniense, en el Paleoceno- Eoceno Temprano y en el Oligoceno (Parnaud et al. 1995).

Las unidades cretácicas del margen pasivo inician con la depositación de la Formación Barranquín (Von der Osten, 1957), sobre esta se depositan las unidades carbonáticas de plataforma (Formación El Cantil), que marcan el nivel máximo transgresivo y son diacrónicos de norte a sur

El inicio del primer evento transgresivo comienza con la depositación de areniscas basales de la Formación Barranquín, estando marcado el máximo avance de la transgresión por los depósitos carbonáticos de plataforma, los cuales son diacrónicos en la dirección norte- sur, identificándose así como una secuencia intermedia del Cretácico.

Al norte del área Pilar, las calizas presentes corresponden al nivel superior de la Formación Barranquín, perteneciente al Barremiense. Más hacia el sur corresponde con los afloramientos Albiense de la Formación El Cantil. En el campo El Furrial las calizas transgresivas son de edad Aptiense-Campaniense y corresponden a las formaciones El Cantil, Querecual y San Antonio.

Durante el Paleoceno- Eoceno se inicia el siguiente evento transgresivo, el cual ocurre posterior a la regresión del Mastrichtiense, representado por la Formación San Juan. El último evento transgresivo se desarrolló durante el Oligoceno y comenzó con la depositación de las areniscas basales de la Formación Merecure, la cual fue depositada en un ambiente continental en la parte sur de la cuenca y en un ambiente de plataforma interna hacia la parte norte de la cuenca. Está compuesta principalmente de una alternancia de areniscas de grano fino a grueso y lutitas (Parnaud et al, 1995).

Según Erlich y Barret (1992), este período de margen pasivo abarca el final del proceso de rifting en el Jurásico Tardío – Cretácico Temprano hasta el inicio de la actividad tectónica en el Eoceno. En este período el margen norte de Suramérica sufre una marcada subsidencia y permite la acumulación de 3 a 4 km de rocas clásticas predominantemente marinas.

La secuencia de margen pasivo esta compuesta por rocas clásticas marinas del Cretácico al Oligoceno, durante el Oligoceno, el margen pasivo fue un grueso prisma sedimentario, el cual se adelgazaba hacia el sur con terminaciones onlap contra las rocas precámbricas del escudo de Guayana (Di Croce et al., 1995).

Basado en el registro sedimentario de la subcuenca de Guárico y Maturín, la depositación del margen pasivo pudo haberse iniciado durante el Hauteriviense tardío – Barremiense, con las areniscas y lutitas fluvio-deltaicas de la Formación Barranquín. La parte superior de la misma muestra claramente la influencia temprana de subsidencia y transgresión marina sobre el margen continental (Erlich y Barrett, 1992).

Mega secuencia Colisión Oblicua

La placa del Caribe y la placa Sur América colisionaron tangencialmente y de manera diacrónica. La colisión comenzó durante el Eoceno Inferior-Medio en el Oeste, fue más prominente durante el Oligoceno- Mioceno Medio en el Este y continua hasta el presente (Erlich y Barret, 1992; Pindell, 1991). Durante esta fase se formaron los márgenes actuales de esta cuenca.

La megasecuencia de margen pasivo finalizó en el Oligoceno debido a la colisión de la placa Caribe con la placa de Suramérica, la cuenca preexistente cambió a una cuenca

antepaís. La colisión oblicua migró progresivamente hacia el este durante el Oligoceno Tardío y Mioceno Temprano, dividiendo la cuenca antepaís en tres secciones: 1) un área meridional desde Cerro Negro hasta Oritupano. 2) la parte central desde Acema-Casma hasta Pirital, correspondiente al “foredeep” y 3) un área septentrional al norte de la falla de Pirital, correspondiente a la zona de sobrecorrimientos (Parnaud et al, 1995).

El “foredeep” también migró desde el norte hacia el sur, migración que estuvo asociada al apilamiento de las unidades alóctonas, emplazadas por la colisión entre las Placas. Este fue rellenado principalmente durante el Plioceno-Pleistoceno con la depositación de las formaciones La Pica y Las Piedras, depositadas en ambientes marino-somero a continental.

Erlich y Barret (1990) describieron la historia de las placas tectónicas del norte de Venezuela y Trinidad como dominada por desplazamientos rumbo-deslizantes (strike-slip) de bloques de corteza discretos, donde el desplazamiento tangencial y cabalgamiento de un bloque relativamente competente (Bloque de Margarita), respecto a los terrenos autóctonos de la placa Suramericana, emplazó los terrenos alóctonos de la Cordillera de la Costa y Villa de Cura durante el Eoceno Inferior (ver Figura 3).

Contrariamente, Pindell et al., (1991) consideran que las rocas pertenecientes al flanco norte son autóctonas, puesto que formaban parte de un margen pasivo de edad Paleozoico que formó un sobre-corrimiento por efecto de los esfuerzos compresivos y de cizalla, durante el choque oblicuo entre la placa Caribe y la placa Suramericana.

La fase de margen pasivo aparentemente finalizó de manera diacrónica a lo largo del borde norte de Suramérica. El inicio del movimiento rumbo-deslizante transpresional es más antiguo en el oeste de Venezuela y hacia el norte de Colombia, posiblemente de edad Eoceno Temprano a Medio y más joven en el este, en el oriente venezolano y norte de Trinidad con edad Oligoceno a Mioceno Medio. La deformación a todo lo largo del norte de Venezuela ha continuado hasta el presente, probablemente como resultado del movimiento relativo hacia el este de la Placa Caribe respecto a la Placa Suramericana. Durante esta fase de desarrollo de la cuenca antepaís, las subcuencas de Guárico y Maturín fueron superpuestas sobre la antigua secuencia de margen pasivo (Erlich y Barrett, 1992).

En la parte nor-central de la subcuenca de Maturín las areniscas y lutitas de la Formación Naricual de edad Oligoceno, depositadas en ambientes deltáicos a marino somero, suprayacen de forma discordante a la Formación San Juan del Cretácico Tardío, con la erosión del Paleoceno y el Eoceno. La sedimentación de la subcuenca de Guárico es posterior al inicio del levantamiento del Eoceno Medio.

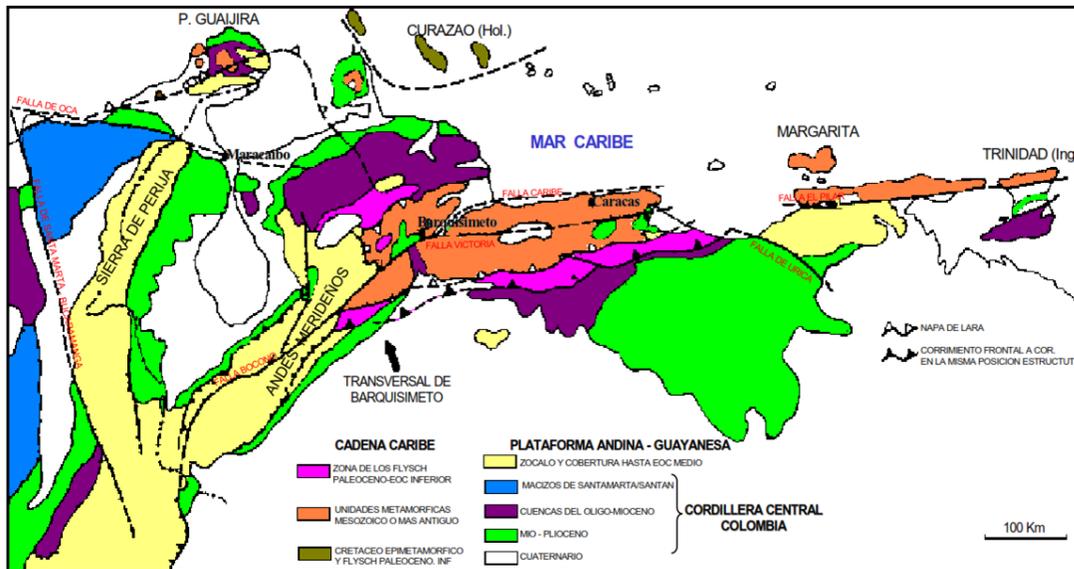


Figura 5. Distribución de las unidades Alóctonas y Autóctonas.
(Tomado de Mendoza, 2005)

2.3.2 Formaciones geológicas presentes

La zona de estudio está comprendida a lo largo del Río Guárico y de sus tributarios principales comenzando desde el Embalse de Camatagua hasta su desembocadura en el Río Orinoco, el mismo posee una cuenca de aproximadamente 800.000 km², aunque en sus comienzos es un río de altura o de serranías; al pasar las inmediaciones de la población del Sombrero pasa a ser un río de llanuras.

La geología de la zona de estudio está compuesta por una serie de formaciones las cuales atraviesa el Río Guárico:

Formación Mucaria (Cretácico), se compone principalmente de lutitas silíceas de color gris oscuro, las cuales meteorizan con color marrón claro. Se encuentra ftanita gris claro en bandas delgadas y capas ocasionales de hasta 1 m de espesor, de un microconglomerado calcáreo formado por fragmentos de rocas ígneas básicas, cuarzo y

feldespatos. En tres niveles de la sección, Renz y Short (op. cit.) describen calizas lenticulares de grano fino y color gris azulado, que pasa a marrón verdoso claro por meteorización. Las calizas son en parte conglomeráticas, con fragmentos de gneis y esquistos micáceos y ftanita negra. En la sección del cerro Pilancones, la litología es semejante a la descrita, pero sin calizas ni conglomerados. En la sección del cerro Buena Vista, la formación consiste en lutitas y lutitas limosas, sericíticas, con menor proporción de ftanitas.

En el cerro de El Morro, la sección incluye tres capas de 3 a 10 m de espesor de areniscas de grano fino y color blanquecino. Menéndez (1965), describe la unidad en el sector del río Araguaita, como formada en un 90% por lutitas silíceas, sericíticas, de color gris oscuro, con cantidades menores de limolitas silíceas a ferruginosas y algunas capas de ftanita gris. Las calizas están notoriamente ausentes en este sector. En el área El Pao-Tiznados, Jarvis (op. cit.) describe lutitas similares a las de la sección tipo, formando el 80 a 85% de la sección con 10 a 15% de areniscas de grano fino a medio y conglomerados, y un 5% de calizas afaníticas laminadas, apareciendo la ftanita sólo en pequeñas cantidades. En la región de Camatagua, Bell (op. cit.) menciona limolitas silíceas lajosas y lutitas físciles color gris, laminares, con cantidades menores de calizas afaníticas laminadas, gris, y areniscas gradadas de color gris claro.

Formación Guárico (Cretácico-Terciario), Peirson (1965a) y Peirson et al. 1966) proporcionaron las descripciones más completas. En general, la unidad se caracteriza por una predominancia de depósitos flysch compuesto de espesas secuencias de alternancias monótonas de areniscas y lutitas delgadas, tipificadas por las secuencias "Bouma" y abundantes icnofósiles. La formación presenta algunas variantes litológicas como el "wildflysch" (Miembro Los Cajones), las calizas arrecifales (Miembro Morro del Faro), la facies cercana al arrecife (Miembro Caramacate) y la facies de conglomerados (Miembro Mamonal), y la facies de areniscas gruesas.

La facies flysch que constituye 90% de la formación, se compone de alternancias monótonas de lutitas, areniscas y limolitas turbidíticas, en capas muy finas a medias, cuarcíticas y grauváquicas con lutitas y arcilitas gris oscuras a gris oliva, finamente micáceas y débilmente físciles. La interstratificación de láminas finas de limolita, lutita y

arenisca, en capas que raramente exceden un espesor de 15-25 cm es extraordinariamente monótona. Las estructuras de base, icnofósiles, secuencias de Bouma y otras estructuras menores atribuidas a corrientes de turbidés, caracterizan al flysch. Las arcilitas conforman el 35% a 50% de la formación. Se meteorizan al color verde oliva oscuro con manchas marrón rojizas. La piritita y material calcáreo son muy escasos; la mica muy fina y la limolita de grano muy fino son ubíquos. Las lutitas son moderadamente duras, con fractura subconcoidea y astillosa. Localmente, existen nódulos, concreciones y lentes de arcilita ferruginosa ("clay-ironstone"). Son abundantes los turboglifos, acanaladuras y lineaciones de corriente.

Formación Quebradón (Oligoceno-Mioceno), La unidad consiste predominantemente en lutitas mal estratificadas y poco resistentes a la erosión, de color variable entre azul-gris y negro, en parte carbonáceas, con lignitos delgados intercalados localmente. Interestratificadas se hallan areniscas de grano variable usualmente impuras, formando capas de 20 a 80 cm de espesor, aunque alcanzan localmente los 10 m. Las estructuras más comunes son la estratificación y laminación cruzada, y las rizaduras en el tope de las capas de areniscas. Las capas gruesas de conglomerados de la sección tipo no se observan más al oeste (Evanoff, op. cit.).

La descripción previa es ampliada por Beck (1986), quien cita de la región de Altagracia de Orituco, la frecuencia de capas de arenisca arcillosa con estructura flaser, y bioturbaciones localmente comunes. Reporta además, areniscas con cemento calcáreo o ferruginoso, micáceas, conteniendo localmente minerales ferromagnesianos, plagioclasa, filita y minerales opacos. La matriz puede estar presente en porcentajes suficientes, como para llamárseles subgrauvacas. Las pelitas se componen de cuarzo en fracción limo, arcilla, minerales, ferromagnesianos oxidados y muscovita. Lentillas ovoidales de limolita roja, centimétricas, son atribuidos por Beck (1986) a clastos pelíticos.

Vivas y Campos (op. cit.), describieron en el área tipo los conglomerados líticos, los cuales, son lenticulares, formando paquetes de 3 m de espesor. Están compuestos de guijarros de menos de 4 cm de diámetro de cuarzo, ftanita, carbón, etc. Dominan los clastos subredondeados (70%) sobre los subangulares (30%) y se hallan en una matriz siliceoarenáceo, localmente calcáreo y de color pardo rojizo. El yeso y la jarosita son

constituyentes menores en las lutitas. En el área occidental de los afloramientos (estados Cojedes, Guárico noroccidental y Aragua), la formación desarrolla un miembro basal predominantemente arenoso, denominado Miembro Galera (Peirson, 1963).

Formación Roblecito (Eoceno-Mioceno), Patterson y Wilson (1953) describen la formación como la continuación de la depositación iniciada por la Formación La Pascua y predominantemente, una unidad de lutita marina que es transicional con las areniscas transgresivas de La Pascua y gradacional hacia arriba con las areniscas y lutitas menos marinas de la Formación Chaguaramas. En el subsuelo, la formación consiste en lutitas gris a gris oscuro, medianamente duras, físis, comúnmente limosas, no-calcáreas, frecuentemente glauconíticas y microfósilíferas. Los 150-160 m, tanto basales como superiores, se vuelven mas limosos y finamente arenosos, carbonáceos y micáceos, gradando en muchos niveles a areniscas laminadas muy arcillosas de grano muy fino. Las lutitas contienen laminas y manchas de yeso y marcasita; la pirita y microfósiles pirítizados son comunes en las lutitas limpias y puras de la parte media de la formación. Las lutitas limpias alternan con numerosas capas delgadas de arcilita siderítica marrón y densa. Las lutitas, limolitas y areniscas de la parte basal muestran bioturbaciones, laminaciones onduladas, rizaduras de corriente, estratificación cruzada de torrente ("hummocky cross-bedding") y estratificación de espina de pescado ("herring-bone cross-bedding"), además de niveles de pelecípodos (ver Figuras 5A y B).

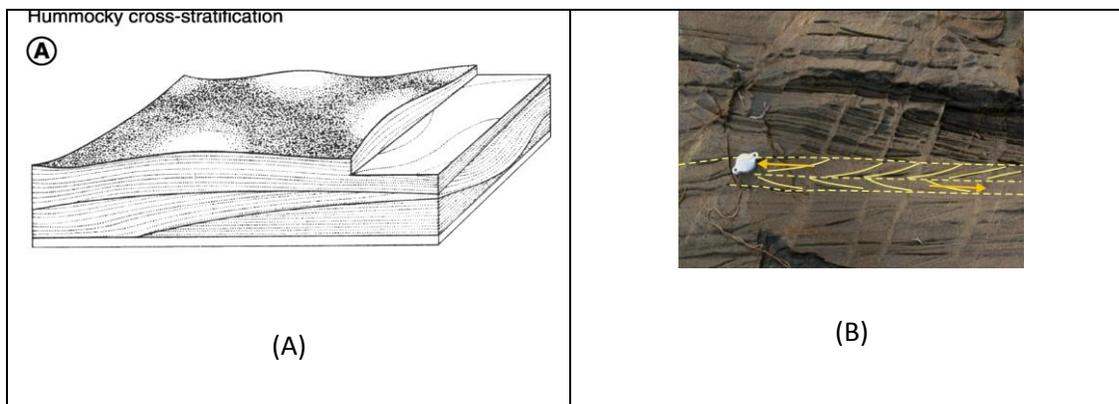


Figura 6. Estructuras sedimentarias presentes en la Formación Guárico: (A) "hummocky cross-bedding" (tomado: <http://geology.gsapubs.org>) (B) "herring-bone cross-bedding" (Tomado: <http://all-geo.org/highlyallochthonous/>)

2.3.3 Geología estructural

La zona de estudio se divide en dos partes, la que se encuentra al norte, predominadas por estructuras y hacia el sur de Venezuela donde corresponde a zonas bajas llegando a ser llanos sin complejidad estructural predominante.

Camatagua es una región complicada estructuralmente, según el mapa geológico de La Creole nº AR4,1966, hacia el noreste se observa un grupo de fallas inversas que ocupan gran extensión superficial desde El Taque hasta Los Cajones; Debajo de esta zona hacia el suroeste se encuentra la Falla Camatagüita con dirección dextral y otra falla que no posee nombre quienes se unen y se vuelven asintótica al oeste, a la altura de San Alejo al lado del río Guárico se encuentran un sinclinal y anticlinal de pequeñas proporciones con respecto a las otras estructuras presentes. En la parte baja de la zona se encuentran una serie de estratificaciones volcadas y anticlinales volcados a la altura de La Ceiba, en su lado oeste se encuentra el frente de falla inversa marcado desde el río Guárico hasta la quebrada El Valle y la Falla Guarumen con dirección normal. Entre las estructuras predominantes se encuentra el anticlinal Taguay, que ocupa desde el sur del río Guárico hasta el río Taguay y El sinclinal de Carmen de Cura al este de Camatagua. Finalizando en el noreste de Camatagua se encuentra una serie de fallas inversas, sinclinal volcado, anticlinal y sinclinal en la parte alta del cuadrante a la altura de la Serranía de Santa Rosa.

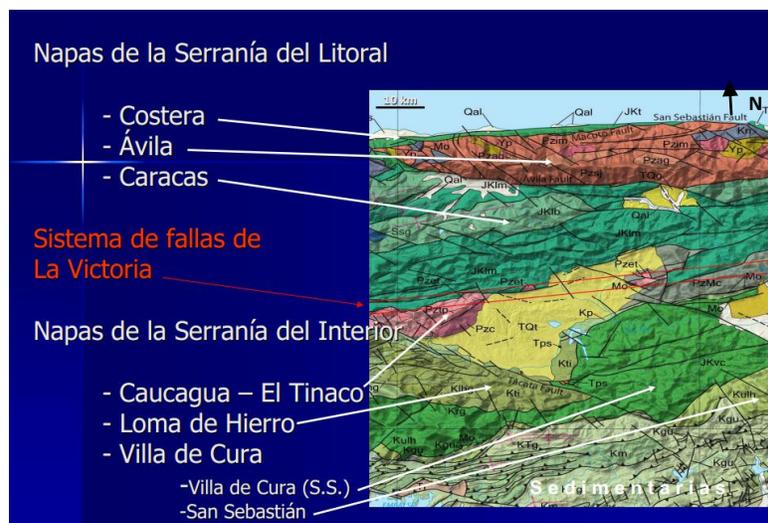


Figura 7. Fajas tectónicas de la Cordillera de la Costa de Venezuela.
(Tomado de Urbani F, 2005).

Hacia el norte de Venezuela el área de estudio está compuesta por una serie de estructuras tales como:

El frente de corrimiento Guárico, corresponde a una extensa zona de corrimientos que se presentan de forma discontinua, ocasionalmente en relevos estructurales y a través de fallas ciegas, y generalmente disectadas y desplazadas por estructuras rumbo deslizantes que funcionan como zonas de desahogo para las masas emplazantes (Guillen y Toribio (2006).

La dirección o rumbo se mantiene a lo largo de toda su extensión en N70°- 80°E. En profundidad se une al igual que todo el conjunto de corrimientos, al despegue se ha interpretado en la sección más inferior y arcillosa de la Formación Roblecito (Polanco, 2004).

Falla río Guárico, se encuentra seccionando la Cordillera de la Costa al norte de Venezuela, cortando principalmente a las rocas metamórficas (napas) que fueron emplazadas durante la colisión oblicua que afectó a la región. Esta falla se extiende desde el sureste del lago de Valencia al noreste del Embalse de Camatagua (Guillen y Toribio, 2006).

A su vez se encuentra dividida en dos secciones conectadas por un corrimiento, que por su geometría generaría la restricción del desplazamiento de la misma. La sección sur de esta falla posee una dirección promedio de N77° W± 18°, con sentido de movimiento dextral al igual que la falla principal, con una tasa de movimiento ≤ 0.3 mm/ yr. Audemard (2000)

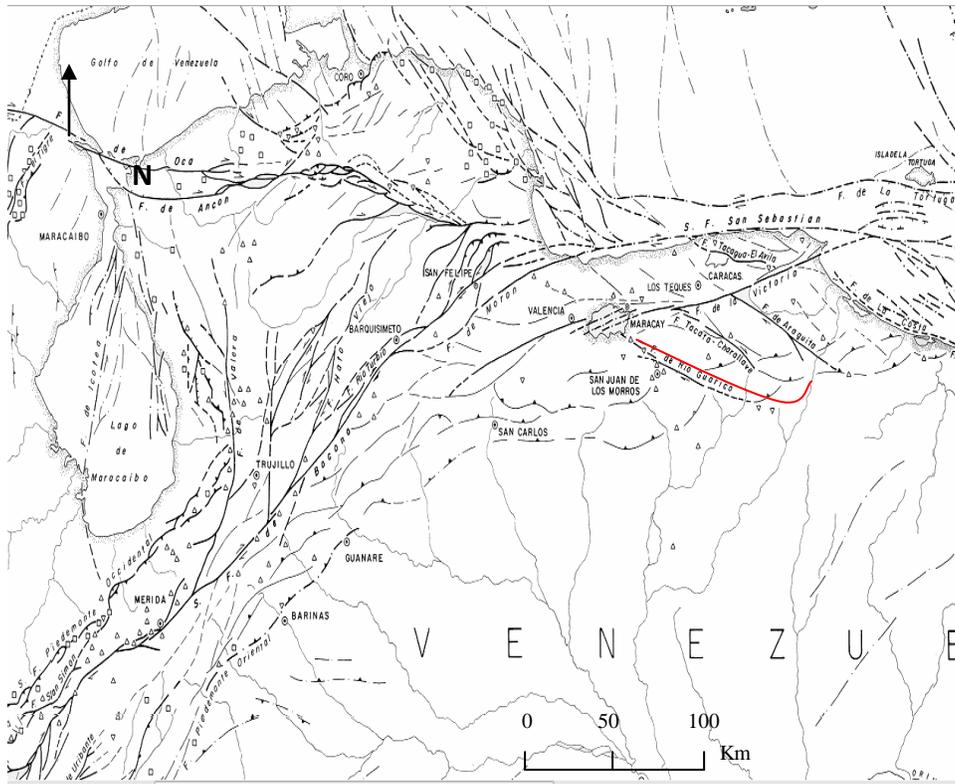


Figura 8. Mapa neotectónico de Venezuela (Tomado y modificado de FUNVISIS 1993)

Dentro del área de estudio, en el segmento más meridional de la sección sur de la falla de río Guárico, localmente se encuentra la falla Camatagüita. Aún cuando la mayoría de los autores que han cartografiado este segmento coincide en que el sentido de la falla es dextral, se cree que una componente inversa no es nada despreciable, por lo cual sugieren que el sentido de esta falla es dextral inversa pasando a inversa dextral cuando se va uniendo al frente de corrimiento de Guárico. Esta apreciación la hacen basándose en la proximidad y el empalme con el frente de corrimiento, la geometría de la curvatura del conjunto de corrimiento de la faja piemontina que se encuentran en contacto con la falla, la existencia de la ventana tectónica de Camataguita (Formación Roblecito), y la tendencia que tiene esta sección sur de la falla de Río Guárico a ir disminuyendo el buzamiento en profundidad (Guillen y Toribio, 2006).

Falla Aragüita, deriva de la falla de La Victoria y se prolonga de forma oblicua y continua hasta alcanzar el frente de corrimiento, su sentido de movimiento es dextral como el conjunto de fallas cuasi paralelas (Guillen y Toribio, 2006).

Ventana tectónica de Camatagüita, según Peirson (1965) consiste en un corrimiento basal poco profundo que montó a la faja piemontina sobre la Formación Roblecito sin provocar deformación considerable, encerrada por la falla Camatagüita al sur y un corrimiento al norte, siendo Roblecito más joven que la Formación Guárico que la rodea. La misma fue reportada por De Cizancourt (1951) en base a la presencia de fósiles. Posteriormente Bell (1968) propone con ciertas objeciones al modelo anterior, su explicación en la que establece que cuando se produjo la fractura que dio origen a la Falla Camatagüita, en el bloque este se originó un efecto de arrollamiento que plegó a rocas pocos competentes (lutitas de Roblecito) hasta formar un anticlinal en el subsuelo que se fue doblando hacia delante y arriba, y que parcialmente fue arrancado durante el avance de la faja piemontina por encima de la misma.

Anticlinal de Taguay (ver Figura 6), se ubica al suroeste del poblado de Taguay, extendiéndose unos 20 km de longitud. El anticlinal es un pliegue abierto que tiene una inmersión al suroeste, en donde aflora netamente la Formación Quebradón. Se cree que esta estructura fue uno de los primeros pliegues en formarse durante el avance de las napas o fajas (Guillen y Toribio, 2006).

Anticlinal de Barbacoas (ver Figura 6), según Guillen y Toribio (2006) este pliegue se puede catalogar como un pliegue suave que afecta a las formaciones Quebradón y Quiamare, está ubicado al oeste y Suroeste del poblado de Lezama, extendiéndose longitudinalmente por 40 km.

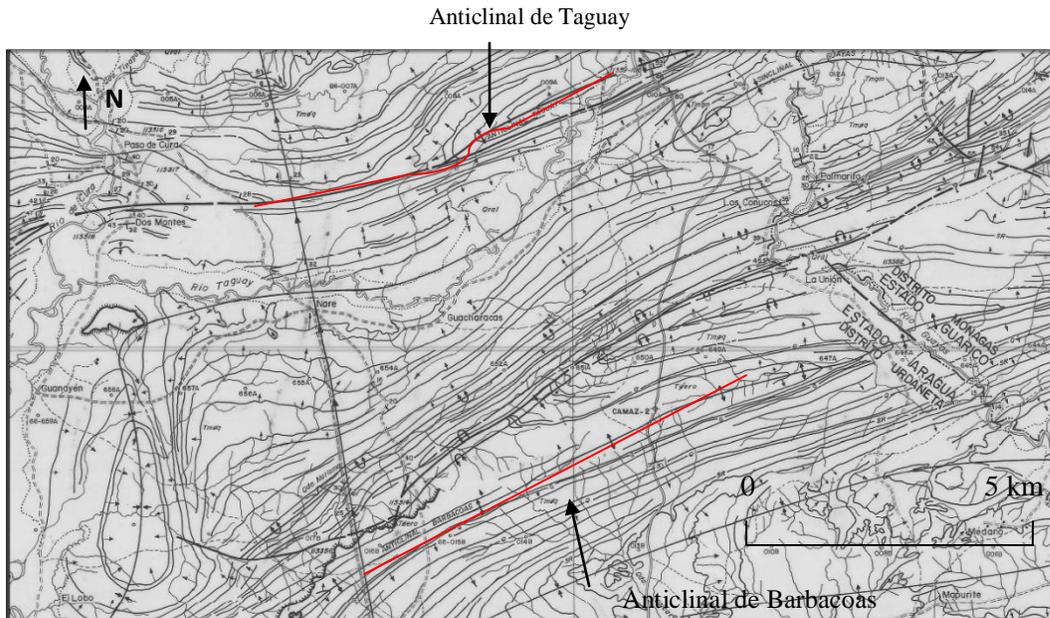


Figura 9. Anticlinales de Taguay y Barbacoas
(Tomado y modificado del mapa de Creole Company, Camatagua, 1965)

Zona de Villa de Cura, es una fosa tectónica ocupada por la Formación Paracotos, que se encuentra entre la cuenca de Tucutunemo y las formaciones del grupo de Villa de Cura, la cual está limitada al norte y al sur por las fallas de Santa Rosa y Agua Fría respectivamente.

Dentro de estas fallas existe una unidad representada por un bloque de rocas sedimentarias no metamorfizadas, fallado y deprimido contra el bloque de Villa de Cura. Esta zona consiste en una secuencia de pequeños anticlinales y sinclinales generalmente volcados en forma asimétrica hacia el norte, que varían desde estructuras abiertas a pliegues comprimidos (Espinola y Ollarves, 2002)

Es posible que exista una falla transcurrente principal a lo largo del frente de los sistemas metamórficos, pero que las relaciones están ocultas por una cubierta de roca más joven.

El movimiento horizontal de la falla de Guárico, no es más de 3 km. Creando una pequeña cuenca de tracción ("*pull-apart*") en la zona de la población Villa de Cura, desplazada por la fosa de Paracotos. Es posible que esta falla transcurrente se desarrollase durante el primer período de deformación y represente, un plano de cizallamiento.

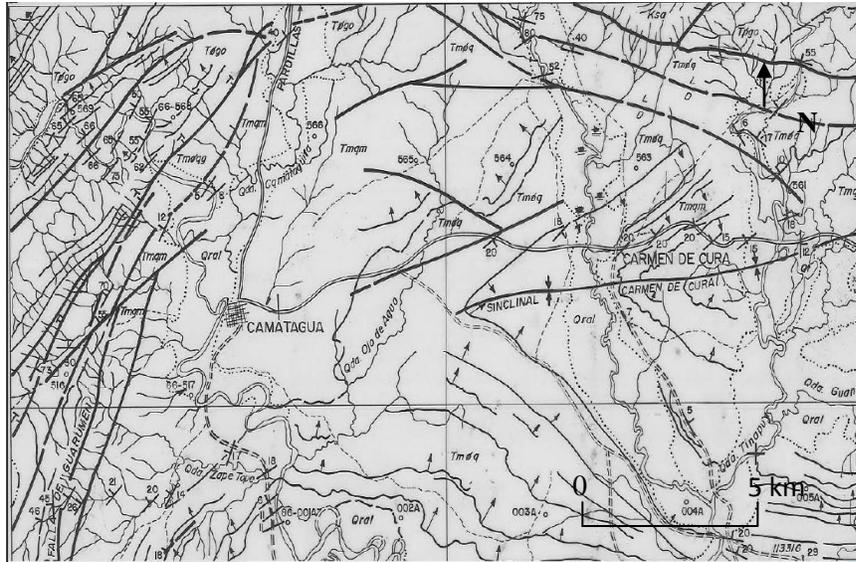
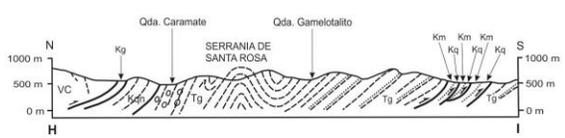
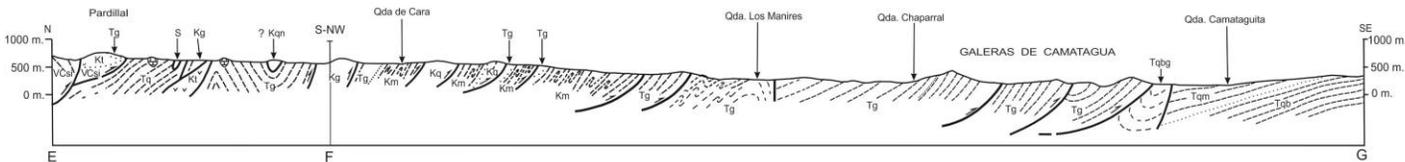
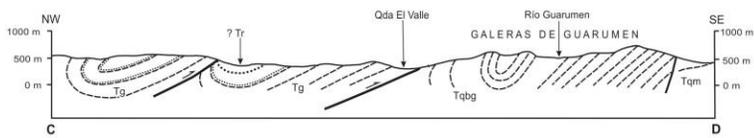
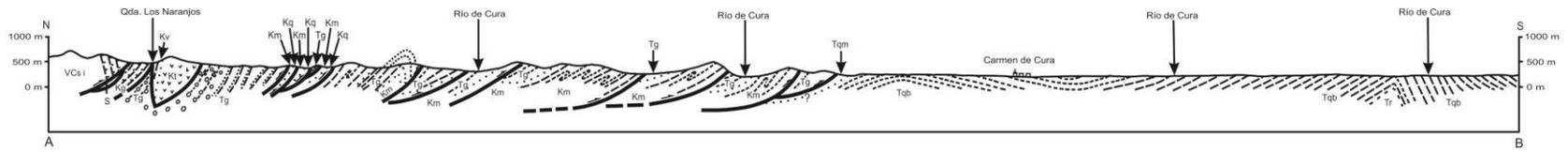


Figura 10. Sinclinal de Carmen de Cura y Falla de Guarumen (tomada y modificada del mapa de Creole Company, Camatagua, 1965)

La Figura 10 muestra diversas secciones transversales o cortes geológico-estructural a lo largo del área de estudio, la ubicación de los cortes puede ser visualizada en el mapa Creole company, Camatagua, anexo.



GEOLOGY BY J. S. BELL - 1966
 PRINCETON UNIVERSITY
 FIELD WORK SPONSORED BY
 DIRECCION DE GEOLOGIA
 MINISTERIO DE MINAS E HIDROCARBUROS
 APPROVED: A. VINAS R.

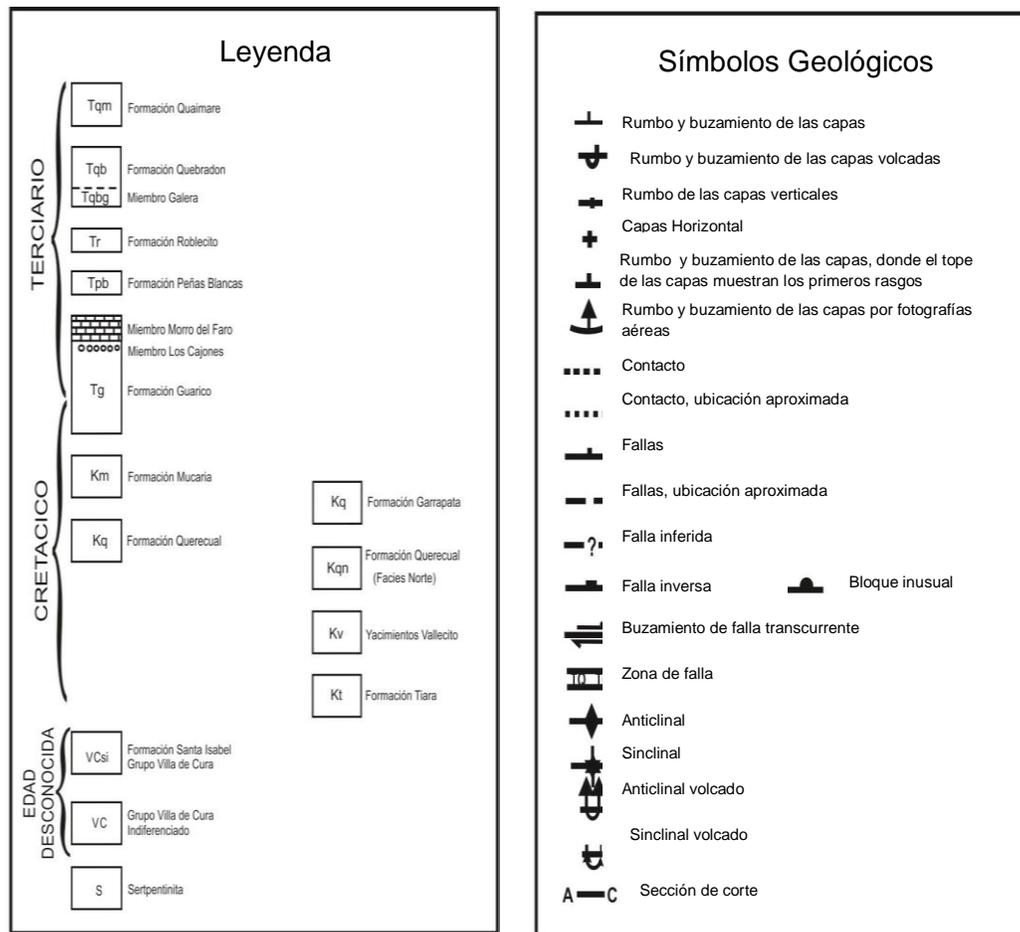


Figura 11. Cortes geológicos de la región de Camatagua, estado Aragua (Tomada y modificada de los Mapas Creole, 1966)

2.3.4 Aspectos Geomorfológicos

El río Guárico abarca una gran extensión superficial por lo cual la zona de estudio está compuesta por topografías distintivas entre sí, comenzando por la unidad de montaña ubicado al norte del embalse de Camatagua donde provienen los drenajes secundarios. La unidad Piemontina, es una transición entre las montañas y la zona llana, la cual posee cambios abruptos en algunas zonas debido a la complejidad estructural elevada. Finalizando con la topografía de llanura, compuesta por los llanos centrales.

Unidad de montaña: Esta zona está ubicada al norte del embalse Camatagua y forma parte de la serranía del interior, las alturas van desde 800 a 1200 m, con pendientes abruptas y de inclinación moderada, los topes varían de semi redondeados a formas angulosas.

Unidad Piemontina: Las alturas van de 500 a 300 m y disminuyendo hacia los llanos, esta zona esta compuesta por una serie de elevaciones con pendientes suaves, cóncavas y abruptas por lo general.

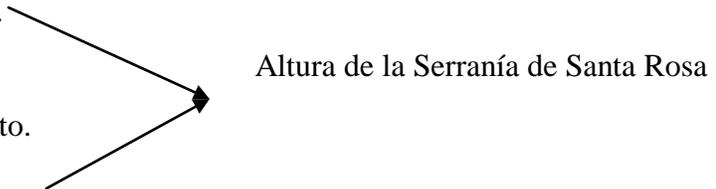
Drenaje: El río se desplaza desde San Juan de los Morros atravesando el embalse de Camatagua, continuando hacia el embalse de Guárico hasta su unión con el río Apure, para finalizar en el Orinoco. Este río es meándrico específicamente hacia los llanos, debido a que posee una extensión apreciable como llanura de inundación, donde se generan curvas pronunciadas conocidas como meandros. Se observan zonas con complejidad estructural que rigen la dirección del río, cambiando bruscamente la dirección y generando formas rectilíneas. En la salida del embalse de Camatagua se puede observar el cambio abrupto que posee el drenaje, generando una especie de cuadrado.

La red de drenaje presente es característico de las zonas montañosas. Varía entre drenaje enrejado, dendrítico y rectangular, el drenaje enrejado presenta tributarios de primer orden largos y de trazado recto, siendo a menudo paralelos a un curso principal. Los tributarios cortos confluyen con los canales mayores formando ángulos aproximadamente rectos. Estas formas indican un importante control estructural y se desarrollan sobre zonas que han sido fuertemente plegadas, y puede indicar una alternancia de estratos subyacentes de rocas resistentes y no resistentes a la erosión, deslizándose los tributarios cortos sobre los lados de las capas más resistentes levantadas. Normalmente se desarrollan en los flancos de anticlinales.

Drenaje rectangular, En la zona montañosa se observó este tipo de drenaje, ya que se genera, entre el tributario y el cauce principal, ángulos rectos. Esto es debido al control estructural presente en el área.

Drenaje dendrítico, son cursos pequeños, cortos e irregulares, que andan en todas las direcciones, cubren áreas amplias y llegan al río principal formando cualquier ángulo. Se forman en áreas con laderas moderadas, baja cobertura vegetal; se observan más hacia el pie de monte y la llanura.

El control estructural de la zona, ha generado una serie de estructuras que han sido modificadas por la erosión, mostrando así un relieve plegado afectado por la misma:

- Mont arrasado, ubicado en la quebrada los Manires.
 - Val, Erosionado por el río Guárico a la altura de San alejo.
 - Val, qda. Gamelotalito.
 - Val, qda. Cambur.
 - Cluze, qda. Gamelotalito.
 - Cluze, qda. Cambur.
 - Val, Carmen de Cura.
 - Mont arrasado, Río de Cura.
- 
- Altura de la Serranía de Santa Rosa

2.4 CARACTERÍSTICAS FISIOGRAFICAS

2.4.1 Clima

El clima del área de estudio varía poco en los dos estados que abarca, en el estado Aragua, debido al contrastado relieve de diversas altitudes se presentan varios tipos de clima. En la faja litoral domina un clima semiárido y cálido, como se evidencia en Turiamo y Puerto Maya, aunque en elevaciones del flanco septentrional de la Serranía de Litoral se producen lluvias orográficas que posibilitan condiciones húmedas y más frescas.

En las altitudes de la cordillera de la Costa se expresa un clima isotermo de altura, alcanzándose en Colonia Tovar, a 1.790 msnm de altitud, una temperatura media anual de sólo 15,4 °C y precipitaciones de 1.000 mm anuales. En la depresión del lago de Valencia y valles de Aragua se reconocen condiciones más cálidas,

registrándose en Maracay a 436 msnm de altitud una temperatura media anual de 25,5 °C y una pluviosidad anual de 834 mm, con una estación seca bien definida. En el sector llanero se evidencia un clima tropical lluvioso de sabana, con precipitaciones medias de 1.100 mm, con una rigurosa estación seca y temperaturas medias anuales de 26 °C. (González, 2006).

El estado Guárico a su vez presenta temperaturas medias anuales superiores a 26°C de acuerdo a la clasificación climática de Köppen (Figura 11), el clima predominante es el clima tropical lluvioso de sabana, con rigurosa estación seca y altas temperaturas medias. En las zonas cercanas a la Serranía del Litoral se observan condiciones menos rigurosas como en San Juan de los Morros, emplazado a 429 m. de altitud, donde se registran temperaturas medias de 24,30 y pluviosidades anuales muy fluctuantes entre 929 mm. a 1.423 mm (Figura 12). En el Llano Alto, en Calabozo, a 101 m. de altitud, la temperatura media es de 27,50 y la pluviosidad anual asciende a 1.476 mm., acentuándose las condiciones de aridez en el sector oriental, registrándose en Valle de la Pascua, a 125 m. de altitud, una temperatura media anual de 26,70 y una pluviosidad anual entre 634 a 961 mm (Vila, M., 1965).

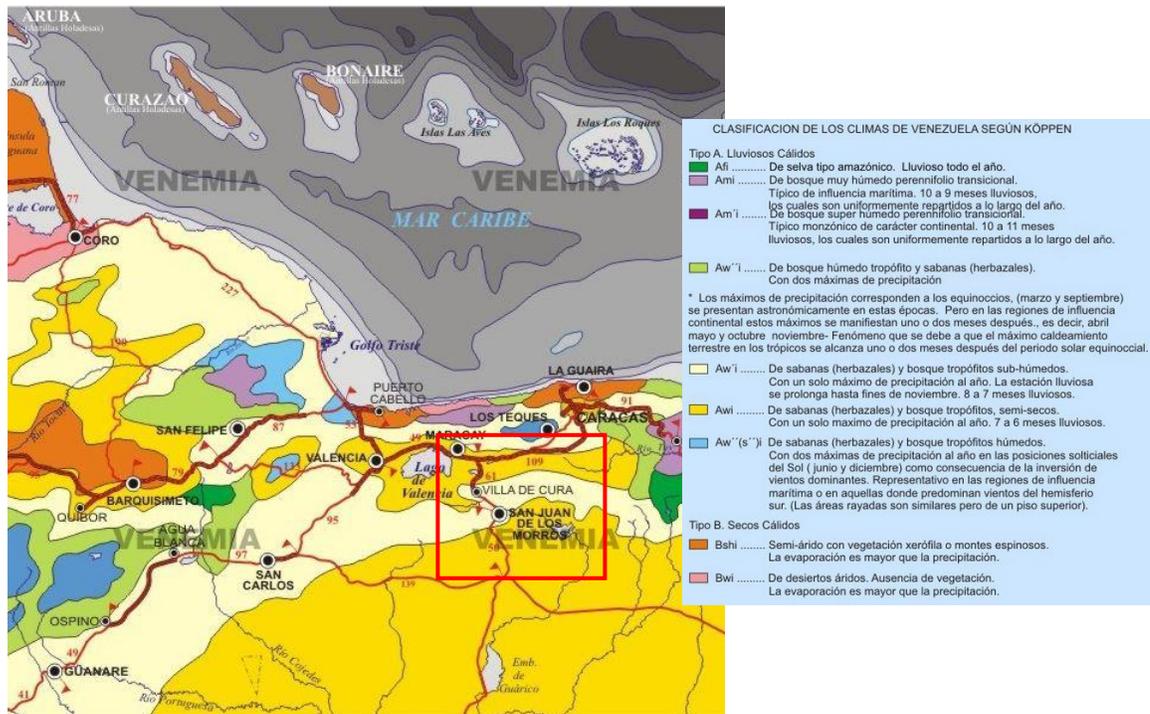


Figura 12. Clasificación climática del área de estudio según Köppen (Tomado y modificado de www.venemia.com)

2.4.2 Relieve

El relieve de la zona varía comenzando por un área montañosa que forma parte de la cordillera de la costa con picos que varían entre 800 a 1400 m.s.n.m, las pendientes son abrupta y suaves correspondiendo a la zona en la que se encuentren, se observan abrupta en la unidades montañosas, mas suaves hacia el pie de monte comenzando en áreas con menores alturas que las antes descriptas.

La Serranía interior ocupa la parte central del estado y sus alturas varían desde 500 hasta 1900 m.s.n.m. La parte sur de Aragua esta ocupada por amplias extensiones de escasa pendiente, llamadas llanos, y cuya llanura varia entre 150 y 300 m.s.n.m. Las mayores elevaciones de la entidad son: Los Picos Ceniza y Agustín Codazzi sitúa en la cordillera de la costa y el pico Platillón que se encuentra en la serranía del interior (Vila, 1965; 1966).

Hacia el embalse de Guarico, ubicado en el estado con su mismo nombre, el relieve de la zona es llano con alturas de 400 a 500 m.s.n.n, debido a que forma parte

de los llanos centrales de Venezuela, está constituido por planicies aluviales que ocupan parte del territorio, zonas con relieves ligeramente ondulados y planos. Una de las características principales de la zona son los Morros de San Juan, el cual es la unidad mas alta del lugar con 1060 m.s.n.m.

Fisiográficamente, el estado Guárico pertenece a las provincias naturales de los Llanos Centrales y al Sistema de la Costa. La provincia de los Llanos Centrales se caracteriza por presentar los paisajes de altiplanicies de denudación y de mesas, valles, planicies aluviales y eólicas, los cuales cubren más del 90% de la superficie estatal. La altiplanicie de denudación abarca el 40% del estado, presentando un relieve ondulado con pendientes suaves y colinas; La altiplanicie de mesa cubre el 16,3% de la superficie estatal, el relieve que caracteriza a este paisaje varía de plano a ondulado, con pendientes que van de 1 a 3% y bordes de taludes disectados; el paisaje de valles constituye el 9% del estado, está caracterizado por vegas y terrazas de relieve plano a ligeramente ondulado, con pendientes menores del 3%; las planicies aluviales ocupan el 24% del territorio estatal, representadas por extensas áreas de relieve principalmente plano con pendientes de 0 a 3%; las planicies eólicas representan el 8% del estado con un relieve de plano a ondulado y pendientes de 1 a 8%. La provincia fisiográfica del Sistema de la Costa en la entidad se caracteriza por el paisaje de montaña y el sector de piedemonte, los cuales ocupan el 4% de la superficie estatal, presentando un relieve accidentado con pendientes de suaves a empinadas respectivamente (Vila, M, 1965).

2.4.3 Temperatura

La temperatura promedio anual en el estado Guárico oscila entre 25 (mínima) y 38 °C (máxima).

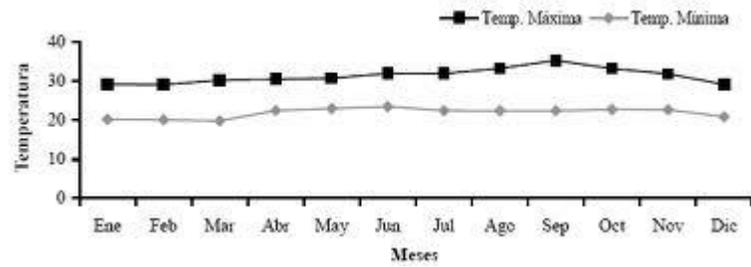


Figura 13. Temperatura promedio en el estado Guárico.

2.4.4 Precipitaciones

La Figura 13 representa la precipitación promedio anual a lo largo de Venezuela, para el área de estudio esta varía de 800 a 1600 mm/año. Sin embargo, la Figura 14 ilustra las variaciones en los períodos secos y húmedos.

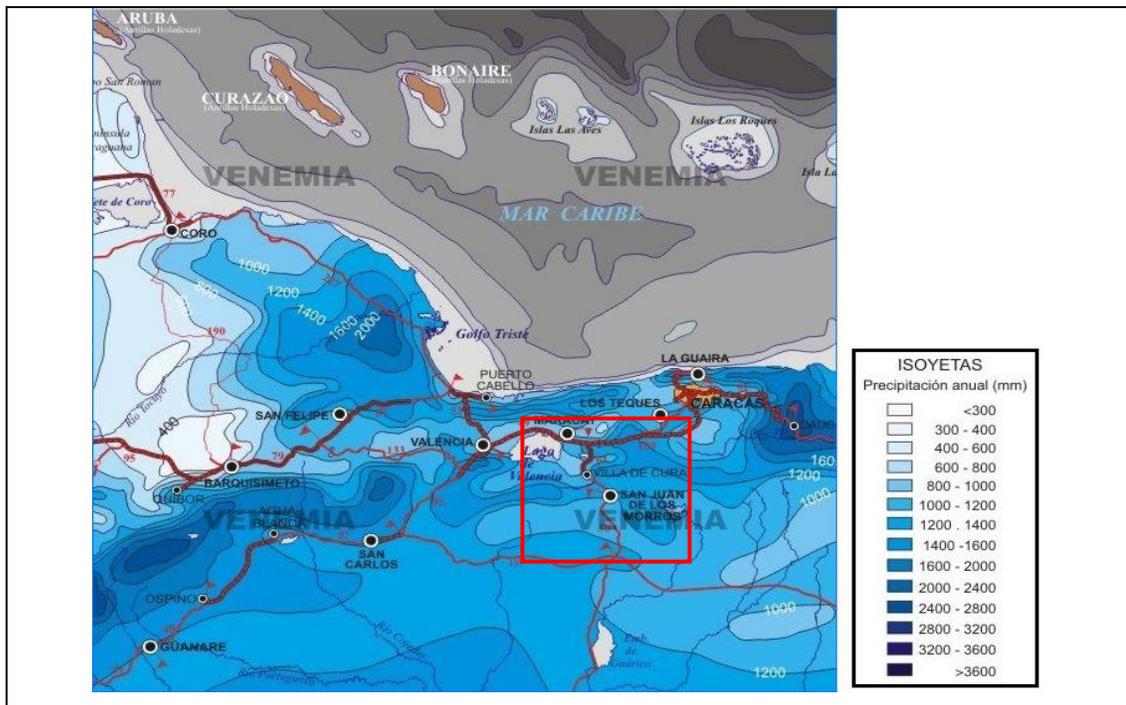
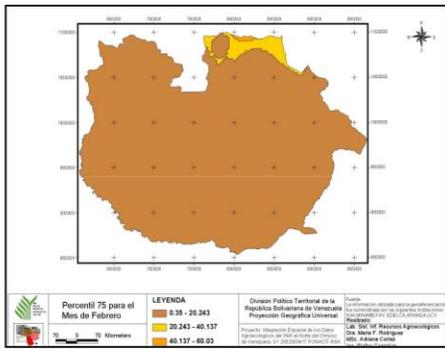
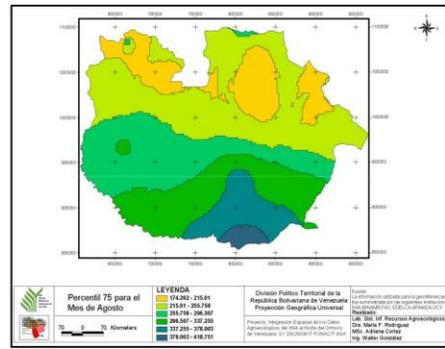


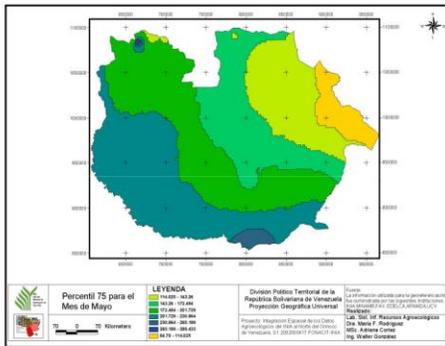
Figura 14. Tasa de precipitación anual promedio para el área de estudio (Tomado y modificado de www.venemia.com)



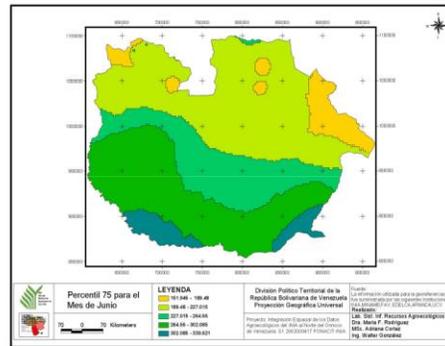
Mapa de distribución de la precipitación (P75%) para el mes más seco (Febrero) en el estado Guárico, Venezuela



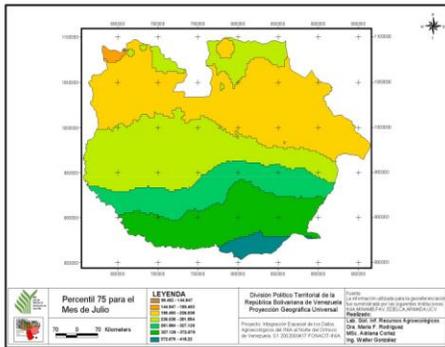
Mapa de distribución de la precipitación (P75%) para el mes más húmedo (Agosto) en el estado Guárico, Venezuela



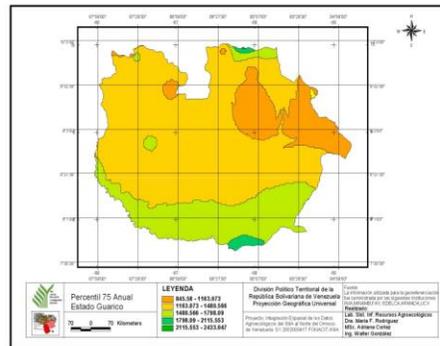
Mapa de distribución de la precipitación (P75%) para el mes de Mayo en el estado Guárico, Venezuela



Mapa de distribución de la precipitación (P75%) para el mes Junio en el estado Guárico, Venezuela



Mapa de distribución de la precipitación (P75%) para el mes Julio en el estado Guárico, Venezuela



Mapa de distribución (P75%) total anual en el estado Guárico, Venezuela

Figura 15. Mapa de distribución de precipitaciones (percentil 75%) para distintos períodos a lo largo de estado Guárico

(Tomado y modificado de http://www.sian.inia.gov.ve/repositorio/congresos/CVCS19/suelo_espacio_tiempo/SET25.pdf)

2.4.5 Vegetación

La vegetación en el estado Aragua es muy variable y va en función de las condiciones climáticas, altitud y tipo de suelo de la zona en donde se encuentre, predominando los bosques, matorrales, herbazales, gramíneas, espinares, entre otros. Entre los que cabe mencionar están los Samanes, el cual es el árbol emblemático del estado, Jobos, Cedro, Caoba, Ceiba, Palmas, Granadillos, Palmas, Helechos, Espinares entre otros.

La costa tiene vegetación espinar, a partir de los 250 m. comienza la selva que cubre la cordillera, con su diferente clase de vegetación de acuerdo a la altura, desde la vegetación baja a la alta, más arriba de los 1750 m. que se transforma en formaciones boscosas. Hacia el sur, en las llanuras, las sabanas, se cubren de pastos naturales.

La vegetación del estado Guárico está representada por el bosque seco tropical, el cual constituye uno de los ambientes naturales más extensos del país, variando desde los estratos arboráceos hasta formaciones arbústicos, herbáceas y sabanas.

Los recursos forestales están limitados por las condiciones físico-naturales de los llanos, destacando la marcada pobreza de las condiciones físicas del suelo y un régimen climático muy diferenciado que condicionan el desarrollo de comunidades arbóreas, las cuales se encuentran vinculadas a los cursos de los ríos, formando líneas boscosas denominadas bosques de galería. En tal sentido, el potencial forestal abarca una superficie de 1.531.077 hectáreas, de las cuales se estima que el 25% corresponde a lotes boscosos con fines productivos.

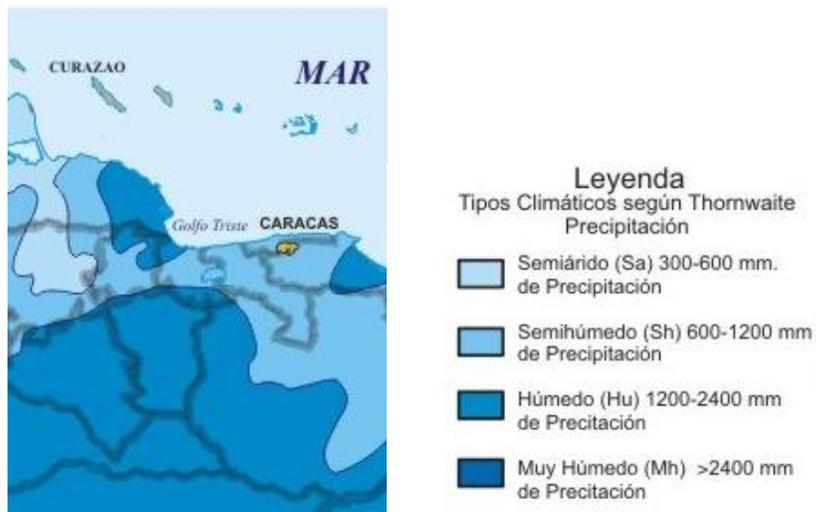


Figura 16. Mapa de pisos húmedos de la parte central de la Cordillera de la Costa de Venezuela (Tomado de <http://www.venemia.com/Vzla/VzlaClima/VeneClima10.php>)

2.4.6 Evaporación

En general la evaporación es alta en temporada seca (Máximo en Marzo) en prácticamente todo el país, con valores extremos de hasta 15 mm/día y disminuye en temporada lluviosa a 5 mm/día (entre Julio y Agosto).

2.4.7 Humedad Relativa

Debido a la posición latitudinal de Venezuela, en el trópico húmedo, sus valores de humedad relativa son altos todo el año. Los promedios anuales de HR varían de 70% a 85%.

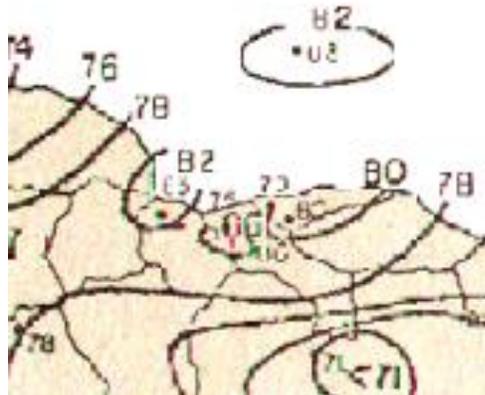


Figura 17. Mapa de humedad relativa de la parte central de la Cordillera de la Costa de Venezuela, humedad relativa media anual (%)(Tomado de <http://www.inameh.gob.ve>)

2.4.8 Vientos

Al sur del país el viento es débil (ver Figura 17), con velocidades promedio menores a 5 km/hora. Las direcciones prevalecientes son las del primer cuadrante (E, ENE, NE), correspondientes Al Alisio. La excepción son las zonas de montaña, donde la dirección prevaleciente la determina la orientación de las laderas. (Alvarez Bernal, 1983; Goldbrunner, 1984).

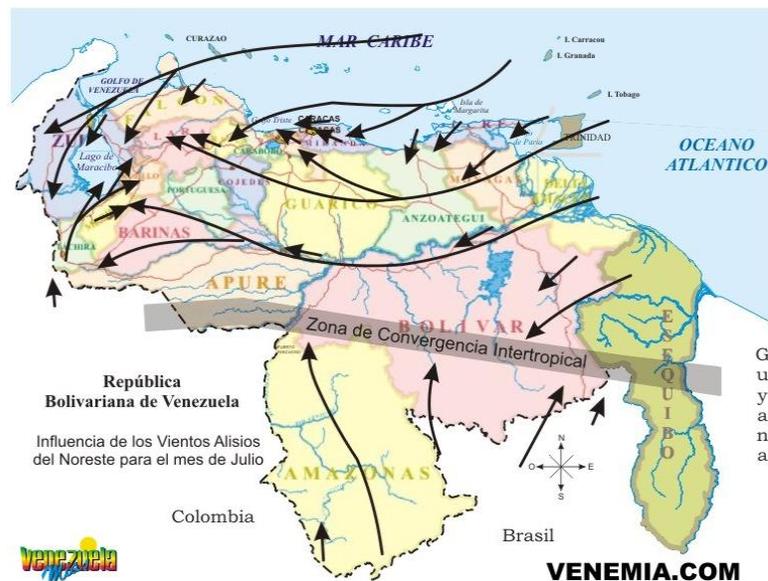


Figura 18. Mapa de vientos alisios de Venezuela (Tomado de <http://www.venemia.com/Vzla/VzlaClima/VeneClima10.php>)

2.4.8 Insolación

Se refiere a las horas de sol brillante. En este tipo de datos es factible el valor cero horas, aunque no es frecuente en la zona intertropical (se trata de los días completamente nublados en los que no se vio al sol directamente en ningún momento). La insolación es alta en temporada seca (máximo variable entre Febrero y Marzo), baja en temporada lluviosa (mínimo entre Junio y Julio), pudiendo variar se presentan a la entrada de aguas (Abril-Mayo) (ver Figura 18).

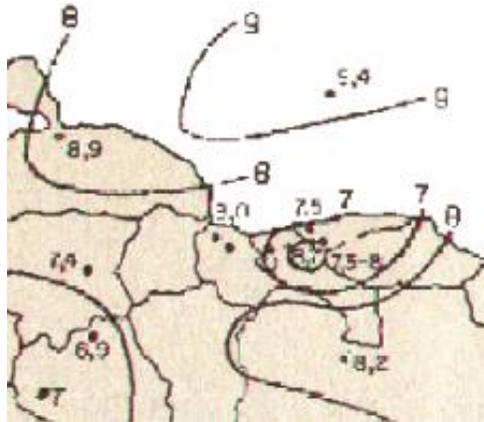


Figura 19. Mapa de insolación de la parte central de la Cordillera de la Costa de Venezuela, insolación media anual (horas día⁻¹) (Tomado de <http://www.inameh.gob.ve>)

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA

3.1 INTRODUCCIÓN

El estudio de la zona se llevo a cabo en cuatro etapas, comenzando por la recopilación bibliográfica, siguiendo con el trabajo de campo, trabajo de laboratorio y finalmente el trabajo de oficina. En este capítulo se describen cada una de esas etapas.

3.2 RECOPIACIONES

3.2.1 Recopilación bibliográfica

Antes de comenzar el estudio se comenzó con la búsqueda de material bibliográfico relacionado con la zona y estudios posteriores, para así obtener una base geológica y poder crear un análisis sustentado por esos trabajos.

3.2.2 Recopilación cartográfica

Se utilizaron mapas de distintos tipos para ubicación de la zona de estudio, de los puntos específicos para la recolección de muestras y la geología estructural. Los cuales son: Mapas Creole company, escala 1:100000, específicamente 226059_D7, 226071_E7, 226072_E8, 226084_F7.

Mapas Topográficos, escala 1: 100000, hoja: 6845,6745,6744.

Mapa Geológico de Venezuela, escala 1:750.000, de HACKLEY *et al.* 2006.

3.3 TRABAJO DE CAMPO

3.3.1 Recolección de muestras

La recolección estuvo basada principalmente en obtener muestras de ríos, en los lugares de fácil acceso y que no posean un alto grado de contaminación que afectara el estudio. La recolección de muestra de mano estaba atada a la existencia de afloramientos en la zona de recolección de muestras de ríos, debido a que este era el objetivo principal y las muestras de manos servirían para dar alguna información adicional, sólo en el caso de que estuviesen presentes.

Se obtuvo un kilo de minerales pesados concentrados mediante el método de batea en cada punto escogido, también se seleccionó cuatro kilogramos de sedimentos modernos de ríos para la concentración de minerales por otros métodos en el laboratorio. Así los puntos de muestreo fueron tres: Embalse de Camatagua, Embalse de Guárico, Río Orituco. Para la extracción de las muestras se tomó los sedimentos en los bancos de arenas del cauce del río y sus tributarios, lo cual se realizó con una pala como se observa en las Figura 19a y 19b.

La identificación de las muestras estaba referida al río de la recolección y la utilización de la misma, el 1 para minerales pesados y el 2 para termocronología. Las del Embalse de Camatagua y Embalse de Guárico se denominaron GUA-1, GUA-2, GUA-3, GUA-4; Río Orituco, el cual es un afluente del río Guárico, se denominaron ORI-1 y ORI-2.

En la Figura 20 se aprecia el lugar de las muestras recolectadas durante el trabajo de campo.



(a)



(b)

Figura 20. *Recolección muestras de río: (a) en el lecho del río, (b) llenado de la bolsa para sedimentos modernos de ríos.*

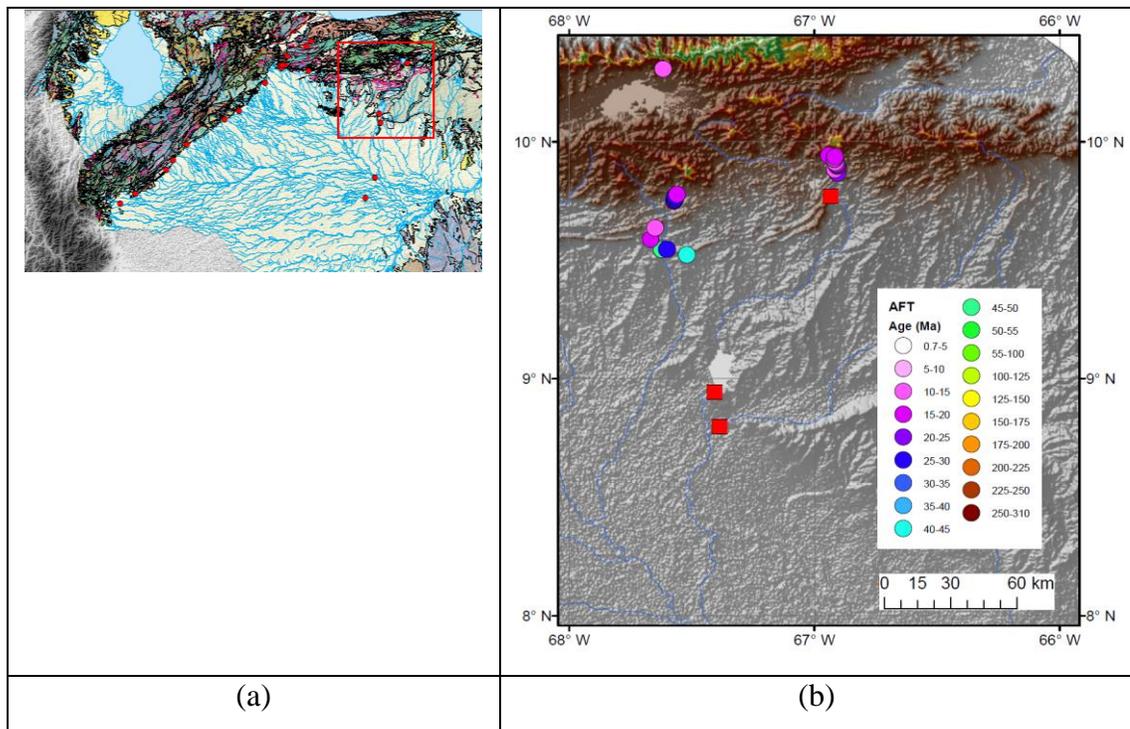


Figura 21. (a) Mapa geológica de Venezuela mostrando el área de estudio (Modificado de Hackley et al., 2005). (b) Los cuadrados en rojo representan las muestras detríticas recolectadas para este trabajo. Los círculos de colores representan las edades de trazas de fisión in-situ existentes en la zona (Pérez de Armas, 2005)

3.4 TRABAJO DE LABORATORIO

3.4.1 Preparación de secciones epóxicas

Estudio de minerales pesados mediante muestras epóxicas. Para llegar a este análisis primero la muestra tuvo que pasar por una serie de etapas:

- ❖ **TAMIZADORA:** Es un equipo con estructura cilíndrica con aros en la parte superior para soportar las mallas, como se observa en la Figura 21. Su objetivo es separar los diferentes tamaños y agrupar las rocas pulverizadas según el tamaño de grano. Se utilizan los tamices de malla No. 200 (granos menores 0.074 mm) y malla No. 60 (granos mayores a 0.25 mm).



Figura 22. Tamizado de la muestra en húmedo. Laboratorio de la escuela de Geología, Minas y Geofísica, U.C.V

- ❖ **MESA DE SACUDIDAS WILFLEY:** En esta mesa se separan en forma eficaz los minerales densos, (finos de ligeros a gruesos), de los minerales menos densos. Esta constituida por una serie de canales distribuidos en 7 salidas (Figuras 22 y 23). Los sedimentos que se recogen en los canales inician su estratificación por densidad de tamaño. Esta estratificación se perfecciona mientras los granos avanzan longitudinalmente por el tablero. En la Figura 22a se observa la mesa de sacudidas. Se utilizan las muestras de los canales 1-2, los cuales poseen los minerales pesados (Figura 22b).



(a)



(b)

Figura 23. (a) Mesa Wilfley, (b) canales donde se encuentra los minerales pesados, Laboratorio de la escuela de Geología, Minas y Geofísica, U.C.V



Figura 24. Separación de los minerales pesados, Laboratorio de la escuela de Geología, Minas y Geofísica, U.C.V

Antes de pasar al siguiente punto las muestras fueron puestas a secar en el horno.

- ❖ **SEPARACION MAGNÉTICA MANUAL (IMAN):** Con el imán se separan los minerales magnéticos ferromagnéticos del resto de los sedimentos. Generalmente es 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 salgan minerales pesados, se repite el proceso hasta que se haya realizado en toda la muestra, los minerales pesados obtenidos se colocan aparte los cuales serán utilizados en el resto del estudio. En la Figura 24 se observa el mineral magnético separado después de aplicar el imán, la muestra sin aplicarle el proceso y el imán usado para este trabajo. La Figura 25 muestra el proceso de extracción de los minerales pesados.

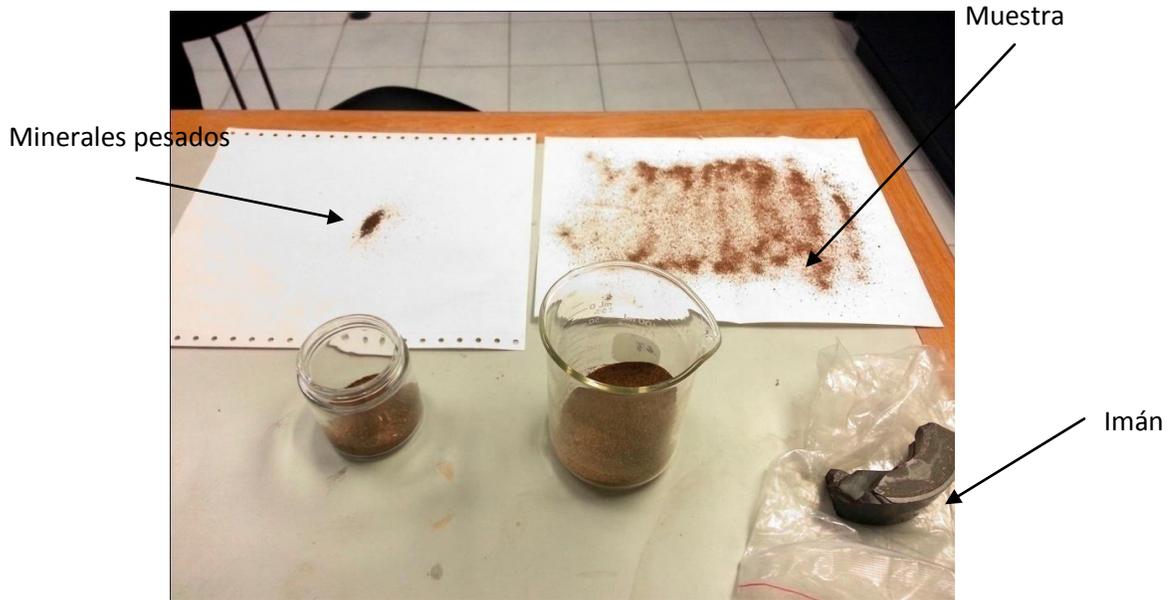


Figura 25. *Materiales para la separación magnética manual*



Figura 26. *Proceso de separación de magnetita de la muestra*

- ❖ **SEPARACIÓN MAGNETICA POR EL MAGNET-LIFT:** La muestra no magnética separada mediante el imán común, es utilizada en la continuación del estudio, los minerales pesados obtenidos con el imán son guardados para estudios posteriores, ya libre de ferromagnéticos la muestra es pasa por el equipo de separación magnética de alta intensidad magnet-lift (Bermúdez y Anaya, 2007), Figura 26a, a diferentes niveles de amperaje para ir obteniendo

los minerales pesado, desde 0,2 a 0,8 A (ver Figura 26b). La muestra de no magnéticos obtenida es usada en el proceso de separación por líquidos pesados (Bromoformo).



(a)



(b)

Figura 27. (a) Equipo de separación magnética magnet-Lift. (b) Muestras obtenidas después del proceso de separación. Laboratorio de termocronología de la escuela de Geología, Minas y Geofísica, U.C.V

- ❖ **SEPARACIÓN GRAVIMÉTRICA Y MAGNÉTICA:** Esta fase incluye la separación de la muestra por densidades, utilizando líquidos pesados como Bromoformo, Benzyl Benzoato y Diodometano. Primeramente se hace una separación de la muestra a través de Bromoformo que tiene una densidad de 2.96 grs/cm^3 , en minerales pesados y livianos, los pesados son puestos a secar y pasados por el equipo de separación magnética isodinámica Frantz, en diferentes nivel de amperaje (0.4, 0.8, 1.2) y con un grado de inclinación de 20° lo que nos daría minerales específicos. Luego se hace una segunda separación con las muestras 0.8 y 1.2 unidas, las cuales son pasadas a través del líquido Diyodometano, con una densidad de 3.3 grs/cm^3 posteriormente se le aplica una separación magnética (Frantz) a la muestra obtenida de pesados y se pasa de nuevo por 0.8 y 1,2.

Este procedimiento se aplica una vez que la muestra esté lavada, seca y desmagnetizada con el imán de mano y pasada por el magnet-Lift, utilizando la muestra final denominada no magnéticos. La Figura 27 ilustra mediante un diagrama de flujo el proceso de separación mediante líquidos pesados.

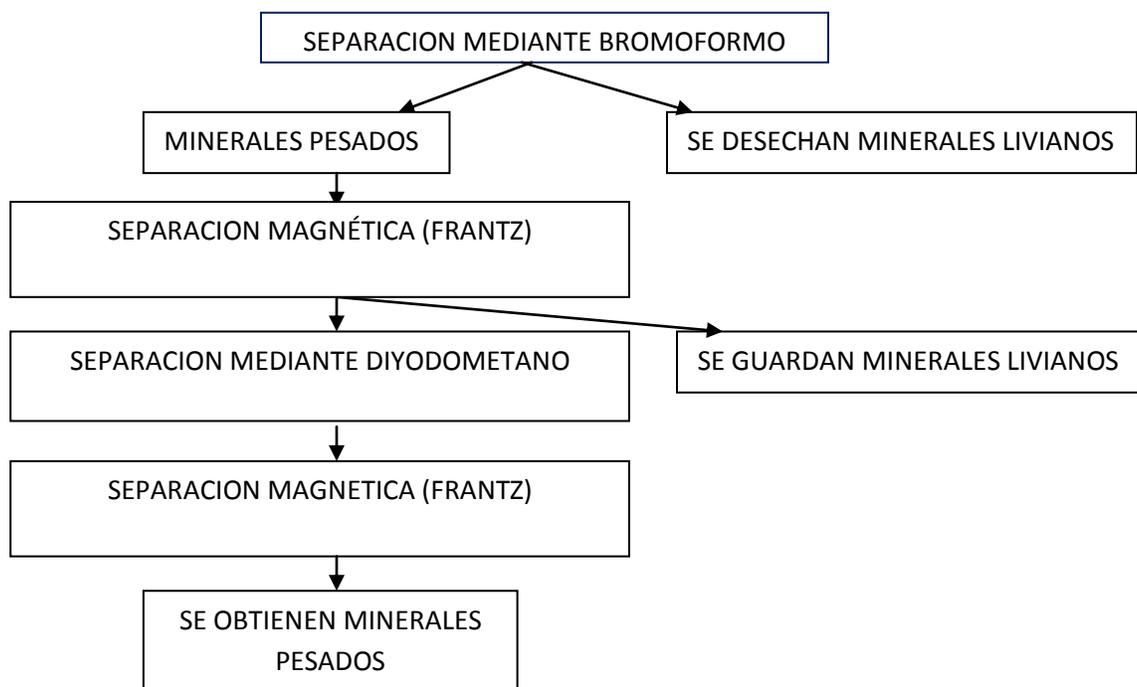


Figura 28. Esquema de separación de minerales pesados

- ❖ **SEPARACIÓN DE MINERALES PESADOS MEDIANTE BROMOFORMO (CHBr_3)** : El bromoformo se utiliza para separar los minerales pesados y así obtener una fracción de mineral de densidad mayor o igual a 2.96 gr/cm^3 . También se puede emplear (Tetrabromoetano, acetyl tetrabromuro, TBE tetrabromuro acetileno o liquido de Mathmanns). En la Figura 28 se muestran los materiales utilizados bajo la campana extractora.



Figura 29. Separación de minerales mediante bromoformo, Laboratorio de termocronología de la escuela de Geología, Minas y Geofísica, U.C.V

- ❖ **OBTENCIÓN DEL MINERAL PESADO:** Después de varios minutos en el Bromoformo los minerales pesados, con densidad mayor o igual a 2.96 gr/cm^3 , caen al fondo del embudo de separación y los livianos, con densidad menor a 2.96 gr/cm^3 , se mantienen sobre el Bromoformo (CHBr_3). En la Figura 29 se observa la separación de minerales por densidades, en esta figura se ha realizado un acercamiento al papel de filtro con la finalidad de mostrar la fracción de minerales pesados obtenida mediante este proceso.

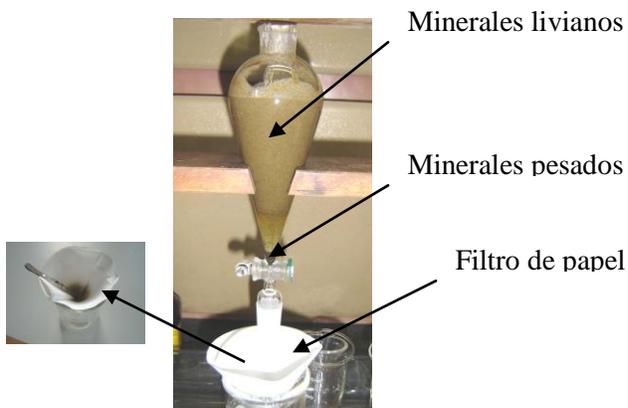


Figura 30. Embudo de separación en la campana extractora con material separado

- ❖ **LAVADO DEL MINERAL:** El mineral es sometido a un fuerte lavado con alcohol absoluto, esto para limpiar el mineral de restos de Bromoformo y así recuperarlo. En la figura 30 se ve claramente el Bromoformo diluido en alcohol absoluto para su recuperación.

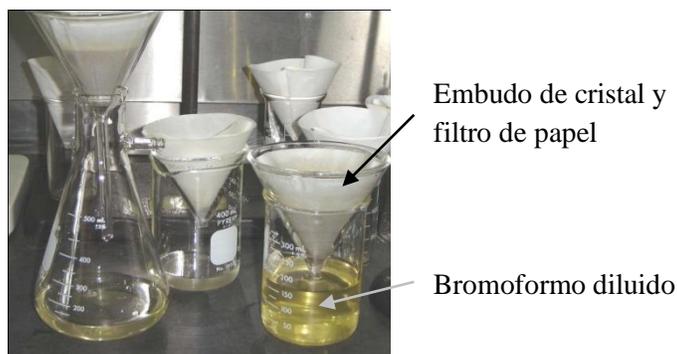


Figura 31. Lavado del mineral, vasos de precipitado con Bromoformo

- ❖ **RECUPERACIÓN DEL BROMOFORMO:** Se debe recuperar el Bromoformo de la mezcla etanol-bromoformo, colocando una cantidad de 400 ml. de esta mezcla junto con 600 ml de agua destilada en un embudo de separación de 1000 ml. Se deja durante 18 horas como mínimo o hasta que precipite y se deslice el Bromoformo del alcohol y del agua destilada, esto se manifiesta por un líquido de color amarillo en el fondo del embudo. En la Figura 31 se aprecia la mezcla de Bromoformo, agua destilada y alcohol absoluto (líquido blanco), después de unas horas el Bromoformo se separa y cae al final del embudo de separación, luego se abre la llave y se filtra el Bromoformo, el cual se colocará en su frasco inicial para un posterior uso.



Figura 32. *Precipitación del Bromoformo en el embudo.*

- ❖ **SEPARADOR MAGNÉTICO FRANTZ:** Consta de dos canales, cuando la muestra es depositada a través de estos canales se separan los minerales magnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos de los no magnéticos dependiendo de la susceptibilidad magnética de cada mineral y del amperaje aplicado en cada corrida. La muestra paso por 0.4, 0.8 y 1.2 en nivel de amperaje. En la figura 32 se observa el equipo. El material resultante de la aplicación de los amperajes entre 0.8 y 1.2 se unió para realizar el siguiente paso, el cual es una separación refinada.



Figura 33. *Separador Magnético Frantz, Laboratorio de termocronología de la escuela de Geología, Minas y Geofísica, U.C.V*

La Tabla 1 muestra cada los diferentes minerales pesados separados de acuerdo al amperaje utilizado en el equipo Frantz.

Tabla 1. *Minerales pesados separados por el equipo isodinámico Frantz de acuerdo a amperaje y ángulos de inclinación (Tomado de Hess, 1959)*

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

- ❖ **SEPARACIÓN REFINADA:** se vierte el líquido diyodometano (densidad 3.33 gr/cm³) sobre un balón de separación o vaso precipitado y luego se le agregan pequeñas porciones de la muestra. Posteriormente, se mezcla lentamente con el removedor de vidrio, se deja reposar por un tiempo. Después de esta separación los minerales pesados obtenidos son pasados por la maquina Frantz con amperajes de 0.8 y 1.2.

❖ SECCIONES EPÓXICAS

LA RESINA: Se mezclan dos partes en una proporción 5 a 1 sobre una plancha térmica a 40° de temperatura, en un molde de barro, se mezclan bien hasta que se vea homogénea. En la Figura 33 se observan todos los materiales a utilizar en este proceso.



Figura 34. *Materiales para el montaje de las secciones epóxicas*

1. EL MOLDE: Se procede a limpiar el molde y se le agrega una película muy fina de vaselina para inmovilizar los granos y ayudar luego al desmoldado.
2. VACIADO: Se agrega el material obtenido del Frantz, pasado por 1,2, tratando de que se acomode en una sola capa. Se le agrega la resina calentada tratando de que no queden burbujas de aire.
3. SECADO Y SEPARADO: La resina con los minerales se deja secar, por lo menos 18 horas, para luego proceder a su separación del molde y obtener la pastilla.

4. PULIDO: El pulido se realiza con diferentes texturas, para esto se usa lijas de 400, 800, 1.200 y 2.000. Luego se procede a completar el pulido con pasta de diamante de 9 y 1 micrones. Por último el pulido se termina con polvo de Oxido de Aluminio de 0,3 micrones. En la Figura 34 se pueden observar todos los materiales que se utilizaron para efectuar el pulido de la pastilla.

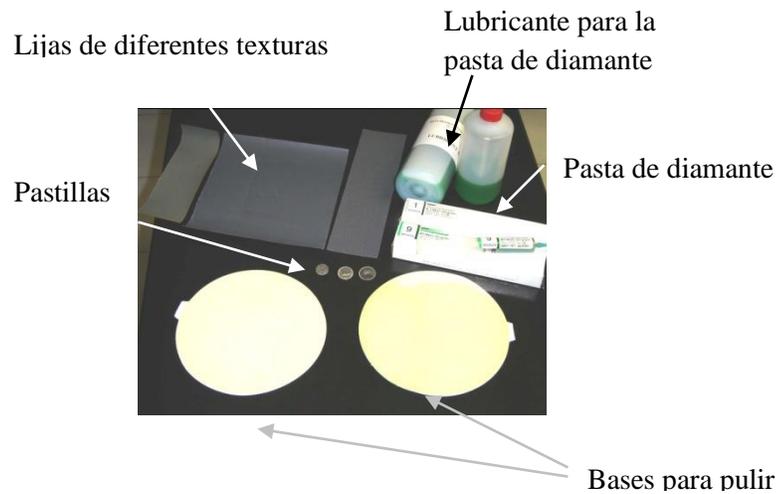


Figura 35. *Materiales utilizados para el pulido de la pastilla.*

Asimismo con la resina restante se generan otras muestras para ser estudiadas con microscopio. En un porta objeto se coloca una pequeña cantidad de resina y encima se coloca las muestras global, las de 0.4, 0.8 A y las que se obtuvieron con el imán común. Todas estas para GUA-1, GUA-3 y ORI-1. En total se analizarán 12 secciones epóxicas para la muestra de minerales pesados globales, es decir sin separación de ningún tipo, sólo hidrogravimétrica, la muestra de minerales pesados a 0.4, 0.8, 1.2 amperes. Todas las muestras que serán analizadas son mostradas en la Figura 35.



Figura 36. *Muestras epóxicas*

3.5 ETAPA DE OFICINA

Esta etapa comprende dos fases, la primera consiste en describir todos los métodos aplicados para analizar las muestras una vez que fueron procesadas de acuerdo a la metodología de laboratorio. La segunda fase consiste en la descripción de las técnicas utilizadas para calcular los índices de erosión y atributos primarios y secundarios del terreno. Ambas fases serán acopladas en el capítulo siguiente y permitirá un estudio detallado de la forma como interactúan los procesos climáticos, tectónicos a lo largo del área de estudio.

3.5.1 Análisis visual de minerales pesados

Para el estudio de las muestras se utilizó un microscopio de luz polarizada (ver Figura 36), una planilla de descripción del mineral (anexo A1) y un cuadro de la muestra en general (anexo A2), a continuación se describirán los implementos usados para la obtención de los resultados.

El microscopio de luz polarizada es universalmente utilizado para examinar tanto granos minerales como, fragmentos y pequeños cristales como secciones delgadas de minerales, rocas y otros cristales. Es particularmente empleado para determinar las propiedades ópticas de los cristales individuales o agregados. Las características distintivas del microscopio son los dispositivos polarizantes y analizador, situado respectivamente debajo y encima de la platina. Son así mismo característicos: la platina rotativa, los lentes, Amici-Bertrand y varios accesorios tales como la lámina de yeso, la cuña de cuarzo y el compensador.



Figura 37. *Microscopio de luz polarizada*
(Tomado de <http://www.asturnatura.com>)

La observación a través del microscopio polarizante, se explica desde la proyección de la luz a través del filtro polarizador hasta el análisis de la imagen. Comenzando desde el rayo de luz que pasa a través del diafragma del condensador ha atravesado el polarizador y, por consiguiente, está polarizado. Cuando salen del condensador, todos los rayos son paralelos, como se puede observar en la figura 37, pero llegan a ser convergentes según su ángulo que depende de la abertura de la subplatina. Los rayos convergentes atraviesan el objeto, modificando éste la trayectoria de la luz y dando origen a efectos ópticos no usuales.

Los rayos divergen sobre el círculo objetivo y pasan a través del artificio analizador cuyos planos forman un ángulo recto con el polarizador (analizador). Estos rayos se funden en un plano de campo final del ocular para producir una imagen de la abertura superior del objetivo. El campo imagen final se ve sobre el objetivo y forma una imagen en la retina del ojo.

La posición de la pupila de salida depende del objetivo utilizado. La distancia de la imagen en el campo superior a las lentes Amici- Bertrand también varía; debe ajustarse la situación del objetivo hasta permitir enfocar dicho campo.

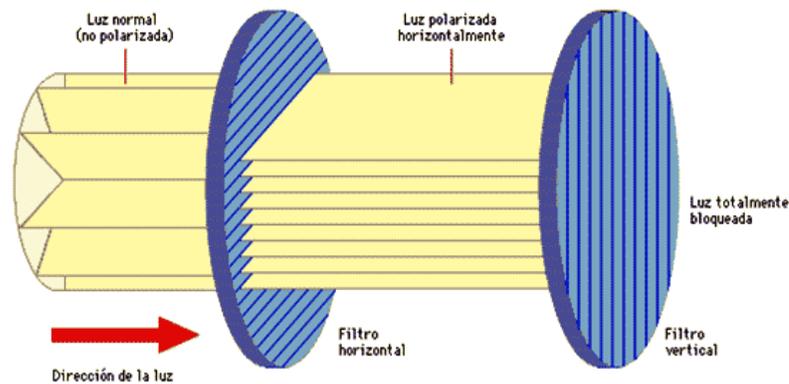


Figura 38. Esquema que muestra el efecto de filtros polarizadores en un rayo de luz.
(Tomado de <http://www.medic.ula.ve>)

La imagen del objetivo, que simula una fuente de luz, es llevada por las lentes Amici-Bertrand hasta el plano del diafragma situado en el tubo del microscopio. El objetivo lleva entonces la imagen al plano de la pupila de salida del microscopio. La pupila del ojo se sitúa a este nivel para observar las figuras de interferencias. Ésta explicación se puede observar gráficamente en la Figura 38 (Kerr, 1965).

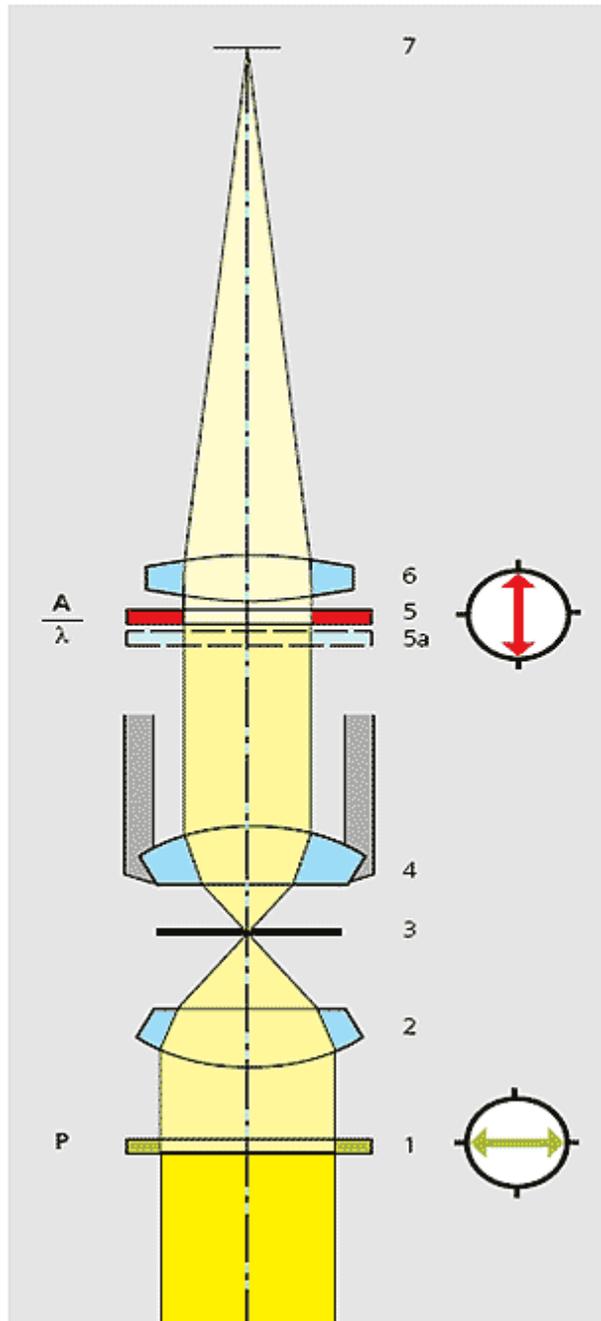


Figura 39. Esquema simplificando la técnica de iluminación con luz polarizada. El filtro polarizador (1) está localizado por debajo del condensador (2) y el espécimen (3) es iluminado con luz polarizada lineal. El analizador (5) rotado en ángulo de 90° en relación a (1) está localizado detrás del objetivo (4). Una lente (6) en el tubo forma la imagen intermedia (7).
 (Tomado de <http://www.medic.ula.ve>)

El estudio de los minerales a través de muestras epóxicas, fue realizado mediante la utilización de una planilla elaborada para la descripción específica de sedimentos (anexo A2), por lo cual no se pudo utilizar la forma de análisis de secciones finas. Se utilizó un atlas de minerales pesados (Heavy minerals in colour, Mange, M. and Maurer, H.) para comparar las propiedades observadas y así poder obtener un resultado. Cabe destacar que para cada muestra, se ubicaron los minerales característicos de las formaciones por la que el río atravesaba, para así tener presente los posibles minerales que se encontrarían. En cada muestra se analizó un total de 50 granos y se utilizó una planilla que fue dividida entre:

- ❖ Textura, en donde se colocó la redondez y esfericidad, utilizando como referencia la carta de Krumbein y Sloss (Ver Figura 39).

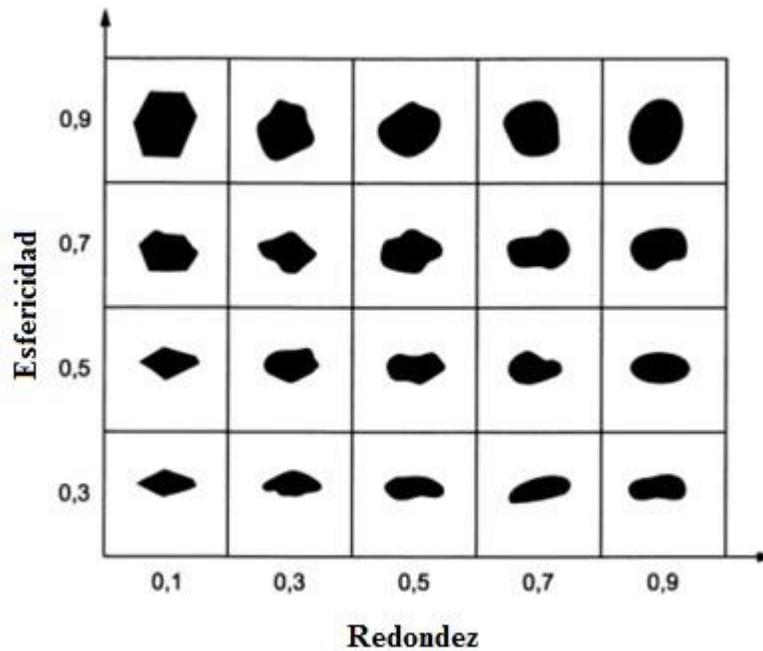


Figura 40. Carta de índice de esfericidad y redondez (Tomada y modificada de Krumbein y Loss, 1963)

La redondez y la esfericidad han demostrado ser útiles propiedades de las partículas cuando se investiga el transporte y la depositación de material sedimentario.

Redondez se refiere a la forma de las aristas y de las esquinas del grano. La redondez fue definida por Wadell (1932) como el radio promedio de la curvatura de las esquinas con el radio del mayor círculo inscrito. El método común de estimación de redondez es comparar visualmente granos de redondez desconocido con imágenes estándar de granos de redondez conocido.

Esfericidad medidas en grados a la que una partícula se aproxima a una forma esférica. fue definida por Wadell (1932) como el radio entre el diámetro de las esferas con el mismo volumen de las partículas y el diámetro de la esfera circunscrita. La esfericidad de la partícula es usualmente determinada por la medida de tres dimensiones lineales, longitud (L), Intermedio (I) y Pequeño (S) diámetro.

- ❖ El tamaño de grano, utilizando el micrómetro del objetivo 20x del microscopio, con un radio de 0,5 mm; se midieron los tamaños aproximados de los granos y se ubicaron desde tamaño arena media 0,63 mm hasta arena muy fina 0,063mm (ver Figura 40).

Clasificación según DIN 4022		Grano diametro (mm)
Arcilla		—
Limo	fino	0,002 mm
	medio	0,0063 mm
	grueso	0,02 mm
Arena	fino	0,063 mm
	medio	0,2 mm
	grueso	0,63mm
Gravas	fino	2mm
	medio	6,3mm
	grueso	20mm
Piedras		63mm

WG98/SED4022A.cdr

Figura 41. Escala de tamaño de grano de Udden-Wentworth, modificado de Adams y otros (1984)
(Tomado de <http://www.geovirtual.cl>)

- ❖ Por último se describieron posibles procesos por los cuales pasó el mineral descrito, alteración, mineralización, recristalización, zonación, crecimiento, inclusiones, fracturas y bordes recubiertos.

3.5.2 Análisis de imágenes de minerales pesados mediante ImageJ

El estudio de análisis digitales ayuda tiene muchas aplicaciones en las geociencias, ya que permite generar datos cuantitativos con un margen de error reducido, en este sentido para el siguiente estudio se utilizó, el software Imagej (Collins, 2007). La Figura 41 muestra la secuencia de pasos realizados en este trabajo con el fin de analizar los minerales pesados mediante técnicas de imágenes.



Figura 42. *Secuencia de pasos realizada para el análisis digital de minerales pesados.*

El análisis digital se define como un conjunto de técnicas destinadas a obtener datos relativos a un sistema objeto de estudio a partir de imágenes de dicho sistema. Los datos de interés suelen ser casi siempre numéricos (Enrique L. 2004).

Las imágenes observadas al microscopio deben adquirirse mediante una cámara fotográfica. La técnica de adquisición de imágenes al microscopio mediante cámaras fotográficas recibe el nombre de fotomicroscopía. Las cámaras fotográficas empleadas pueden ser ópticas o digitales. Para tomar imágenes de microscopía en formato digital es necesario disponer de un microscopio, una cámara fotográfica (o de vídeo) digital, un computador y el software necesario para capturar y analizar las imágenes.

La cámara digital, también denominada cámara CCD o "*charged-coupled device*", contiene un circuito integrado sensible a la luz que captura una imagen transformando cada uno de los elementos de la misma (denominados píxel) en una corriente eléctrica cuya intensidad es proporcional al color del píxel. Algunas características fundamentales de una cámara digital son su resolución, su sensibilidad, y su rango dinámico. La Figura 42 muestra la forma como una imagen es convertida en píxeles.

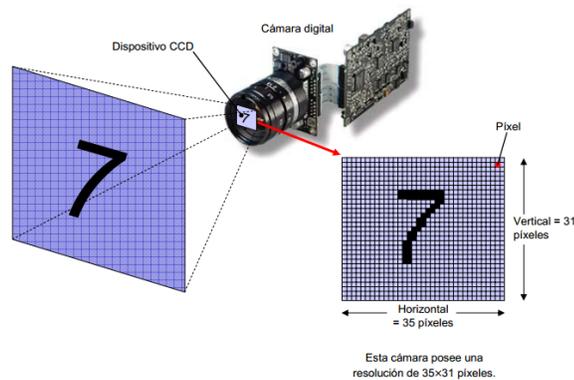


Figura 43. Adquisición de imágenes en una cámara digital
(Tomado de <http://audiolab.usal.es/>)

El software de captura y análisis de imágenes digitales. Es necesario diferenciar entre los procesos de captura y análisis de una imagen digital. Cada uno de ellos se realiza con un software diferente. En general, el software de captura se proporciona junto con la cámara mientras que el de análisis se adquiere aparte. La Figura 43 muestra el caso particular del software de análisis de imágenes conocido como ImageJ (Collins, 2007).

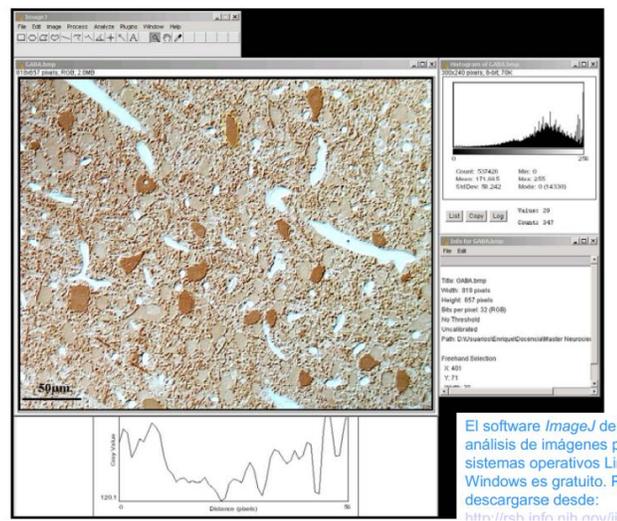


Figura 44. Software de análisis de imagen digital
(Tomado de <http://audiolab.usal.es/>)

La imagen digital, puede describirse como una matriz de puntos denominados píxeles. Esta puede ser a color o en escala de grises. En este último caso, cada píxel posee un tono (o nivel) de gris diferente (Ver Figura 44).

El nivel de gris de cada píxel se expresa mediante un número de N dígitos en sistema binario (o bits). Por ejemplo, en el sistema operativo Windows, cuando la imagen se codifica en 8 bits (8 dígitos) el número binario 00000000 (equivalente al número 0 en el sistema decimal habitual) codifica el color negro. Por el contrario, el número binario 11111111 (equivalente al número 255 en el sistema decimal) codifica el color blanco. Cualquier otra combinación de ocho dígitos binarios indica un tono

de gris diferente entre el blanco y el negro. En el sistema operativo Macintosh, el código de colores es el opuesto. Es decir, el código 00000000 corresponde al color blanco.

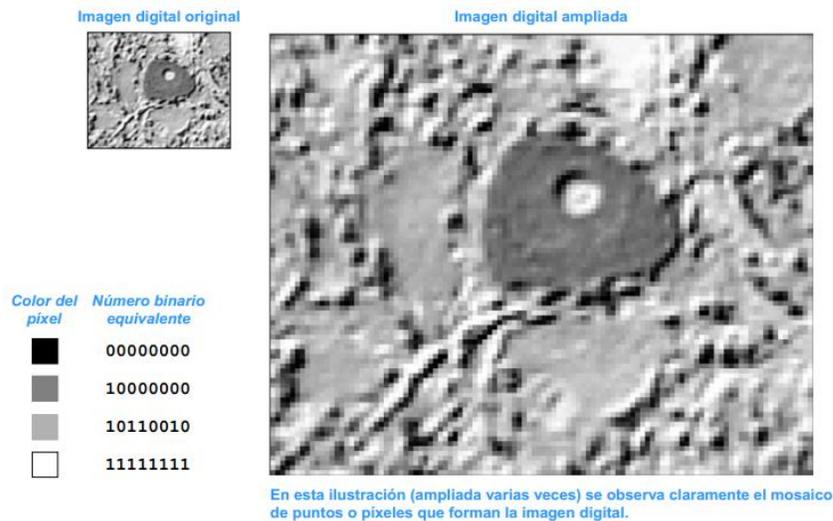


Figura 45. *Imagen digital blanco y negro, en su forma normal y ampliada, en esta última puede observarse los píxeles.*
(Tomado de <http://audiolab.usal.es>)

La imagen digital también puede mostrarse en color. Para capturar este tipo de imágenes, los colores de la misma se descomponen de acuerdo al modelo de color RGB, donde (R=Rojo), (G=Verde) y (B=Azul) mediante un prisma. La cámara digital a color dispone de tres dispositivos CCD (Dispositivo de Cargas Interconectadas) cada uno de los cuales recoge la imagen correspondiente a uno de los tres colores básicos. La imagen digital final se obtiene como la superposición de estas tres imágenes.

De la misma forma que en una imagen en escala de grises el nivel de gris de cada píxel se expresa mediante N bits, ahora el nivel de color de cada píxel de las imágenes en rojo, verde y azul también se expresa mediante N bits. Así, un mismo código de 8 bits (por ejemplo, 10110010 en la ilustración) corresponde a un tono determinado de rojo en la imagen R, pero también a un tono verde en la imagen G, o uno azul en la imagen B (Ver Figura 45).

El color final de un píxel en la imagen compuesta, se obtiene superponiendo los colores correspondientes a dicho píxel en las imágenes componentes. Por ejemplo, para obtener el color marrón del píxel de la ilustración, es necesario superponer los píxeles con códigos 11000101 (R), 10001011 (G), y 01010001 (B). El color final del píxel se expresa mediante un código RGB que no es más que el número binario (o su número decimal equivalente) que se obtiene al concatenar los códigos R, G, y B.

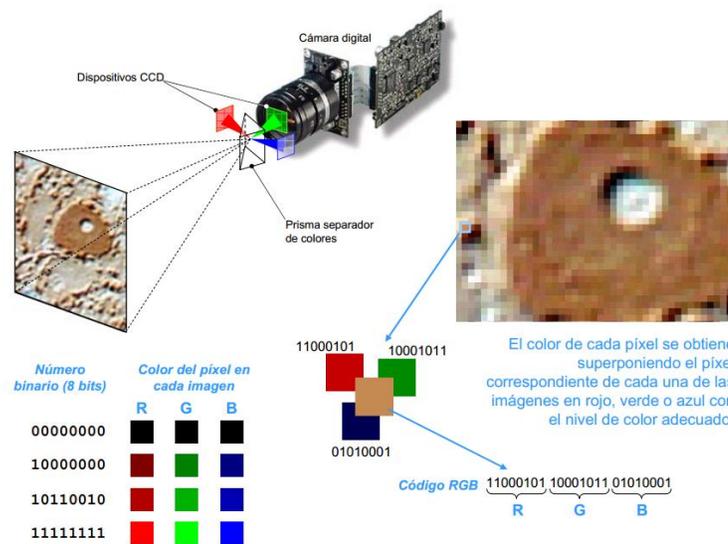


Figura 46. Imagen digital a color, en su forma normal y ampliada, en esta última puede observarse los píxeles y la combinación o codificación de colores.
(Tomado de <http://audiolab.usal.es/>)

Morfometría óptica digital. La morfometría tiene como objetivo realizar mediciones geométricas de regiones o de las partículas visibles en una imagen digital. Permite, por ejemplo, estimar el área de un grano, su perímetro, o incluso estimar la longitud de los ejes de la elipse que mejor describe su forma. Así, la Figura 46 muestra un ejemplo de análisis morfométricos de granos.

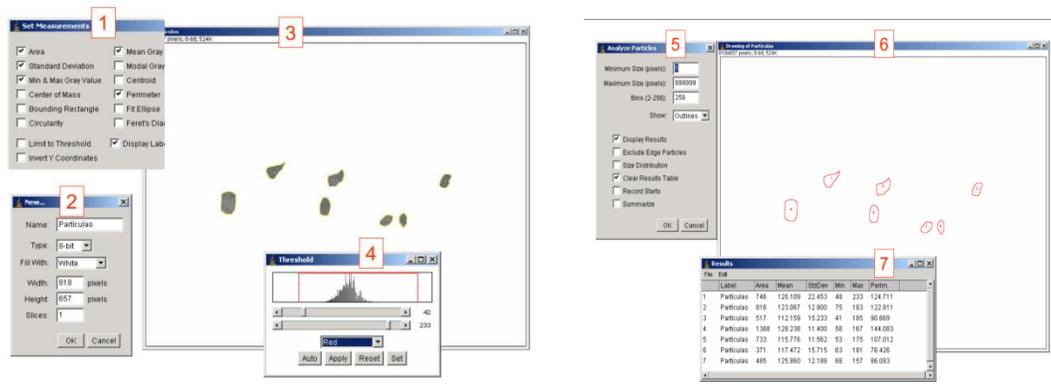
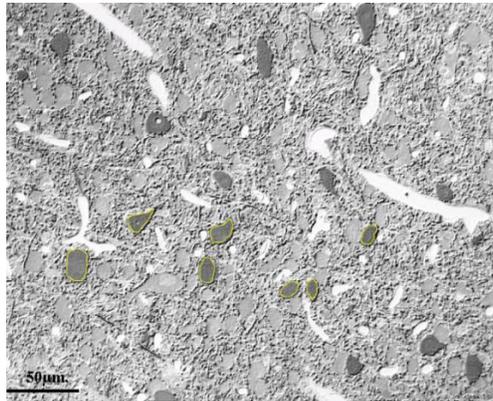


Figura 47. Imagen de ejemplo de calculo morfométrico
(Tomado de <http://audiolab.usal.es/>)

En este trabajo se realizará el estudio y caracterización de los minerales pesados a través del empleo del software *ImageJ* (Ferreira y Rasband, 2012), el cual puede calcular el área de los granos, ajustar elipses, valores de redondez, esfericidad, escala de grises y las estadísticas de cada grano. Los análisis se realizan ajustando a cada grano una cierta cantidad de píxeles. Adicionalmente se pueden medir distancias y ángulos. Puede crear histogramas de densidad y parcelas perfil de línea. Posee funciones de procesamiento de imágenes estándar tales como manipulación del contraste, la nitidez, suavizado, detección de bordes y el filtrado de la mediana.

El análisis de los 50 granos, arrojará una tabla donde se obtendrá la redondez, esfericidad, solidez y ángulo. El cual se comparó con la tabla realizada a los datos

de Kumbrein mediante el análisis de la figura 39 para generar la figura 47, el resultado fue utilizado para estimar los valores promedio de esfericidad y redondez., para saber el nivel de las características de los granos. Este proceso es como el visual solo que en este caso se comparan datos cuantitativos y no por percepción.

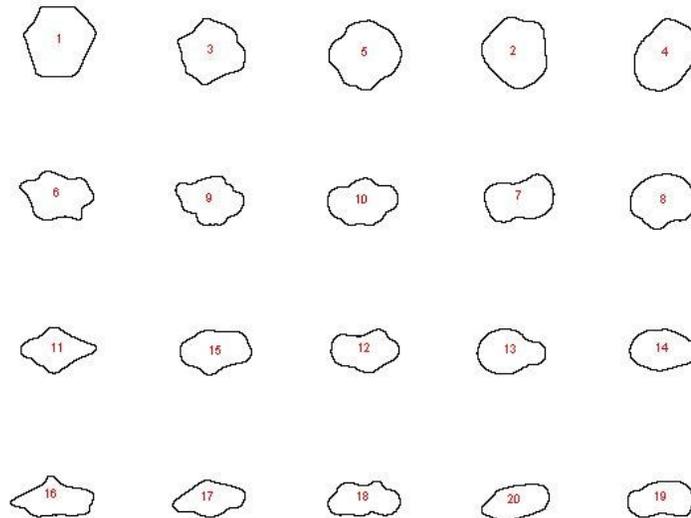


Figura 48. Resultado del análisis de grano realizado sobre la tabla de índices de esfericidad y redondez (Modificado automáticamente de Krumbein, 1941).

3.5.3 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:

1) 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).

2) 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). En el presente Trabajo Especial de Grado se han realizado una serie de cálculos matemáticos comprendidos por la técnica de geomorfología cuantitativa usando el programa *ArcGis 10.0*. Dichos cálculos y las expresiones matemáticas utilizadas serán descritas en el próximo capítulo.

CAPITULO IV

4. GEOMORFOLOGÍA CUANTITATIVA

4.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se presentan los fundamentos teóricos que rigen la geomorfología cuantitativa, así como las ecuaciones utilizadas en este trabajo y la descripción de los parámetros y funciones empleadas en ArcGIS 10.0

4.2 PARÁMETROS DE ENTRADA EN ARCGIS

Para realizar este estudio se analizó el *modelo de elevación digital* (MED, o modelo digital del terreno, MDT), (Li et al.,2005) el cual es una representación de la topografía (altimetría y/o batimetría) de una zona terrestre (o de un planeta telúrico) en una forma adaptada a su utilización mediante un ordenador digital (ordenador) (Felicísimo 1994; 1999; Wilson y Gallant, 2000; Zhu y Gold, 2005). En el presente trabajo, se obtuvo para la zona de estudio el MED con una resolución de 90 metros de la base de datos de la Agencia Espacial Norteamericana (NASA) derivada durante la misión Shuttle Radar Topography Mission, este MED fue procesado y proyectado bajo el sistema de coordenadas mundiales WGS1984 bajo el programa ArcGIS 10.0. La Figura 48 muestra el MED para el territorio venezolano. La zona en blanco dentro de la misma figura representa el área de estudio. En estas figura también se muestra las principales red de drenajes.

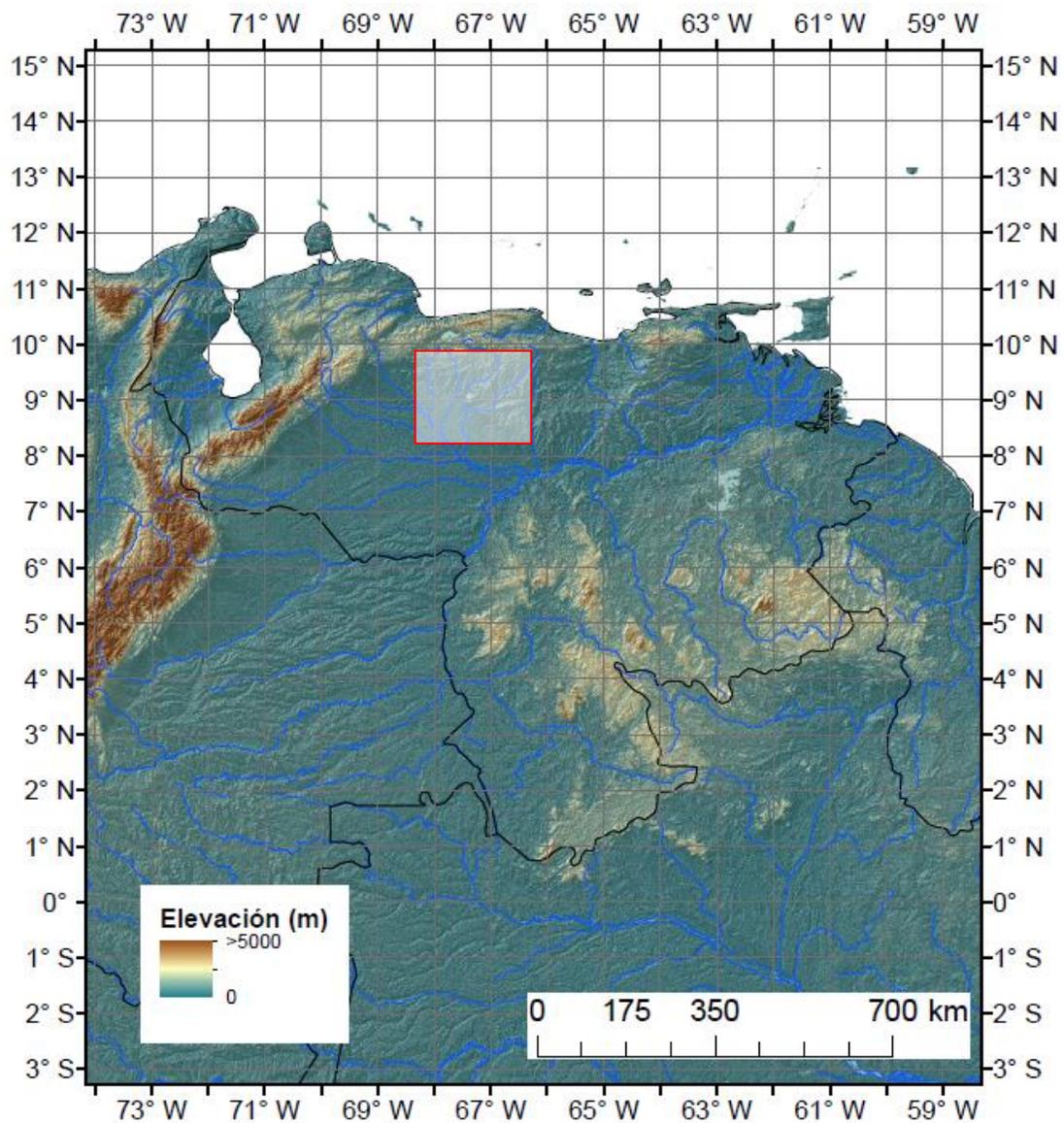


Figura 49. Modelo de elevación digital (MED) a 90 metros para Venezuela. La topografía digital fue descargada de <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/> y proyectada en ArcGIS 10.0 usando el sistema de coordenadas WGS1984.

La Figura 49 muestra un acercamiento al modelo de elevación digital con el fin de mostrar las altas elevaciones y las depresiones. En algunos casos es necesario remover artefactos o desperfectos dentro de los MED (Weibel y Heller, 1991).

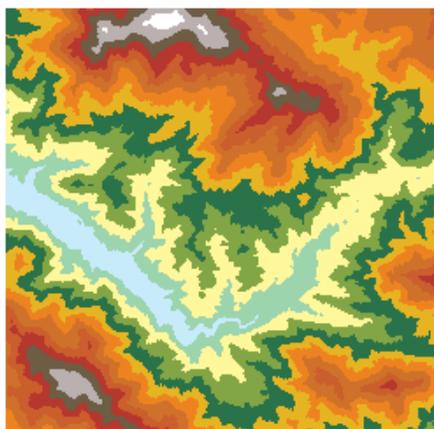


Figura 50. *Detalle del modelo de elevación digital, las zonas en marrón a blanco representan las máximas elevaciones. Las zonas en amarillo y azul claro representan depresiones, en este caso, ríos.*

Mediante las herramientas de análisis espacial de datos ("*spatial analysis tools*") del referido software es posible realizar modelos hidrológicos y extraer la red de drenajes del área de estudio. También es posible calcular atributos primarios del terreno como pendiente, índices de humedad, tasas de erosión basadas en datos de precipitación (Wilson y Gallant, 2000). Las mismas permiten identificar sumideros, determinar la dirección de flujo, calcular la acumulación de flujo, delinear cuencas hidrográficas y crear redes de drenaje (Wilson y Gallant, 2000). La Figura 50 muestra un ejemplo de una red de drenajes obtenidas a partir de un MED, también los diferentes colores representan las subcuencas o área de drenaje de los diferentes tributarios.

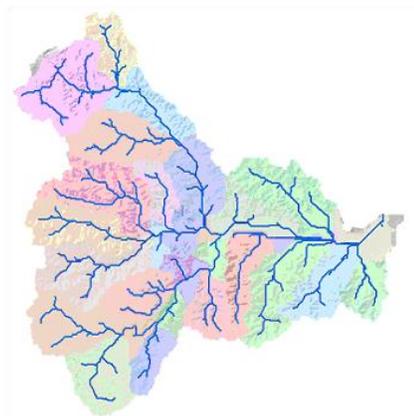


Figura 51. *Ejemplo de red de drenaje derivada del modelo de elevación*

4.3 CORRECCIONES DE ARTEFACTOS SOBRE LOS MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL

4.3.1 Corrección del MED (relleno o "fill")

Antes de procesar un MED es necesario identificar errores dentro del mismo, esto se hace mediante la herramienta canal o "*channel*", depresión o "*sink*" existentes en las herramientas de análisis espacial de ArcGIS 10.0.

Canal: se identifican en el MED original. Un canal suele ser un conjunto de valores incorrectos que generalmente son inferiores a los valores circundantes. Los canales son mostrados en la Figura 51 (los puntos de colores dispersos) son problemáticos debido a que el agua que ingresa en ellos no puede salir. Para garantizar una representación cartográfica del drenaje adecuada, estas depresiones son corregidas mediante la herramienta **Rellenar** o "*fill*".



Figura 52. *Imagen de ejemplo resultado de la aplicación de la rutina canal o "channel"*

Un canal es una celda o conjunto de celdas conectadas espacialmente a cuya dirección de flujo no se le puede asignar ningún valor (ver secciones siguientes). Esto puede ocurrir cuando todas las celdas próximas son mayores que la celda que se está procesando o cuando dos celdas fluyen una dentro de la otra, creando un bucle de dos celdas.

Para crear una representación precisa de la dirección de flujo y, por consiguiente, flujo acumulado, se recomienda utilizar un dataset que esté libre de canales. El modelo digital de elevación (DEM) para la zona de estudio fue procesado para quitar todos los canales, ese nuevo MED es llamado MED sin depresiones.

Los canales en los datos de elevación ocurren generalmente debido a errores en los datos. Comúnmente, estos errores se producen debido a los efectos de muestreo y al redondeo de las elevaciones a números enteros. Los canales que ocurren naturalmente en los datos de elevación con un tamaño de celda de 10 metros o más grande son poco frecuentes (Mark 1988), excepto en áreas glaciales o de karst, y generalmente se pueden considerar como errores. A medida que el tamaño de celda aumenta, la cantidad de canales en un dataset también suele aumentar.

La identificación y remoción de canales durante la creación de un DEM sin depresiones es un proceso iterativo. Cuando se rellena un canal, los límites del área que se rellenó pueden crear nuevos canales que deben rellenarse y así sucesivamente.

A veces resulta útil conocer la profundidad de un canal o un grupo de canales. Esta información se puede utilizar para determinar un valor adecuado a fin de establecer el límite z para la herramienta Relleno ("fill") o para comprender el tipo de errores presentes en los datos. El límite z especifica la profundidad máxima de un canal que se rellenará, sin embargo no necesariamente es la profundidad máxima a la que se rellenará, generalmente es un valor promedio de las celdas circundantes por lo que frecuentemente debe ser mayor a cero. La Figura 52 representa una depresión en el MED.

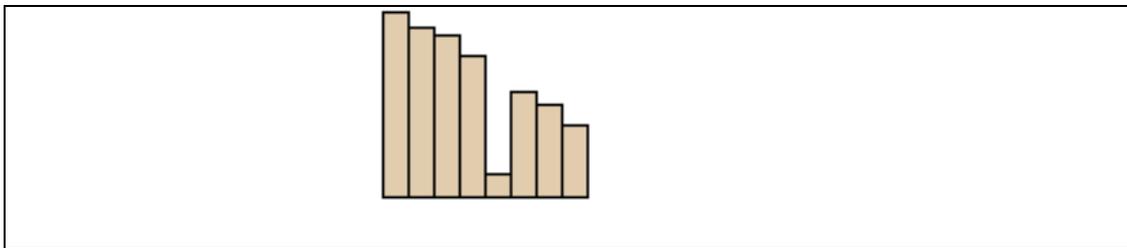


Figura 53. Vista de perfil de una depresión en un modelo de elevación digital. Una depresión es un píxel cuyo valor (en este caso la altura) es muy inferior a los valores cercanos.

La salida de la herramienta *canal* es un ráster entero en el que cada canal tiene asignado un valor único. Los canales están enumerados entre uno y la cantidad de canales.

Tabla 2. Sintaxis y descripción de la rutina para determinar depresiones o "sinks"

Parámetro	Explicación	Tipo de datos
in_flow_direction_ráster	Ráster de entrada que muestra la dirección del flujo de cada celda. El ráster de dirección de flujo se puede crear con la herramienta Dirección de flujo (ver siguientes secciones).	Capa de un ráster
Salida o valores retornados:		
out_flow_direction_ráster	El ráster de salida que muestra la dirección del flujo desde cada celda hasta su vecina con la pendiente descendente más empinada.	Ráster

Relleno: Con frecuencia, los canales (y picos) representan errores debido a la resolución de los datos o el redondeo de elevaciones al valor entero más cercano.

Los canales se deben rellenar para garantizar la representación correcta de cuencas y arroyos. Si los sumideros no se rellenan, una red de drenaje derivada puede ser discontinua.

La herramienta Rellenar utiliza los equivalentes de varias herramientas, existentes en ArcGIS 10.0 como Flujo focalizado, Dirección de flujo, Sumidero, Cuenca hidrográfica y Relleno zonal, para ubicar y rellenar canales. Estas últimas serán explicadas en detalle en las siguientes secciones. La herramienta itera hasta que se rellenan todos los canales dentro del límite z especificado. A medida que se rellenan los canales, se pueden crear otros en los límites de las áreas rellenas, que se eliminarán en la siguiente iteración. La herramienta también se puede utilizar para quitar picos, que son celdas espurias con una elevación mayor de la esperada según la tendencia de la superficie circundante (ver Figura 53). La Figura 53a y b muestran los procesos de corrección del ráster mediante el comando rellenar.

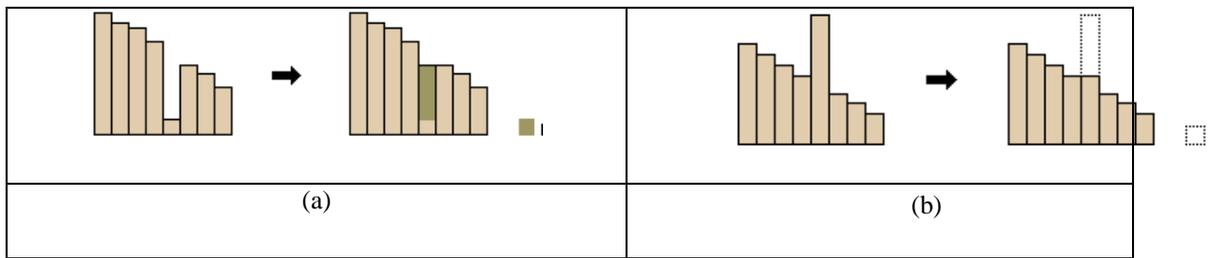


Figura 54. Vista de perfil de un canal antes y después de ejecutar la corrección del ráster (a) relleno de la depresión (b) remoción de picos altos dentro del ráster

Para los MED de resolución de 30 metros realizados por el servicio geológico de los Estados Unidos (USGS), Tarboton et al. (1991) encontraron que del 0,9 al 4,7% de las celdas en un MED eran canales. El ajuste del valor medio de estos canales varía de 2,6 a 4,8 metros. Esto significa que para una cuadrícula de celda de 1.000 por 1.000 (1 millón de celdas), pueden haber de 9.000 a 47.000 canales para rellenar. Otras fuentes de datos de MED pueden tener porcentajes de canales más altos o más bajos, según la forma como sean procesadas las superficies.

Debido a la naturaleza iterativa del comando *Relleno*, se podrían consumir muchos recursos de CPU y del disco, lo cual hace necesario al menos cuatro veces el espacio en disco, con respecto al ráster de entrada. La cantidad de canales que se encuentren en el *límite z* determinará la duración del tiempo de procesamiento. Mientras más sumideros existan, mayor será el tiempo de procesamiento.

Tabla 3. Sintaxis y descripción del comando para efectuar rellenos o "fills" en un ráster

Parámetro	Explicación	Tipo de datos
in_surface_ráster	Ráster de entrada que representa una superficie continua.	Capa de un ráster
z_limit (Opcional)	Diferencia máxima de elevación entre un canal y su punto de fluidez, que debe rellenarse. Si la diferencia en los valores de z entre un canal y su punto de fluidez es mayor que z_limit, ese canal no se rellenará.	Double
Salida o valores retornados:		
out_surface_ráster	El ráster de superficie de salida después de haber rellenado los sumideros.	Ráster

4.4 CÁLCULOS DE PARÁMETROS HIDROLÓGICOS

Los cálculos hidrológicos a partir de modelos digitales de terreno (Olaya Ferrero, 2004) se realizaron en este trabajo utilizando las herramientas de cálculo de ArcGIS 10.0 o *Arc Toolbox*, específicamente los comandos existentes en *Hidrology* del *Spatial Analysis Tool*. Las siguientes figuras ilustran los pasos involucrados en el cálculo de cuencas hidrográficas y redes de drenaje desde un MED. En algunos párrafos a lo largo del texto se usará la palabra **ráster** como sinónimo del MED

Antes de realizar los cálculos hidrológicos lo primero que debe hacerse es corregir la imagen ráster o MED de forma tal que no existan interrupciones en la red fluvial, esto se hizo mediante las herramientas explicadas en la sección anterior.

4.4.1 Cálculo de la dirección de flujo o "flow-direction"

Dirección de flujo (ver Figura 54): Se utiliza el MED como entrada para usar la herramienta *Dirección de flujo*, a partir de ella se determina la dirección en la que el agua fluye fuera de cada celda.

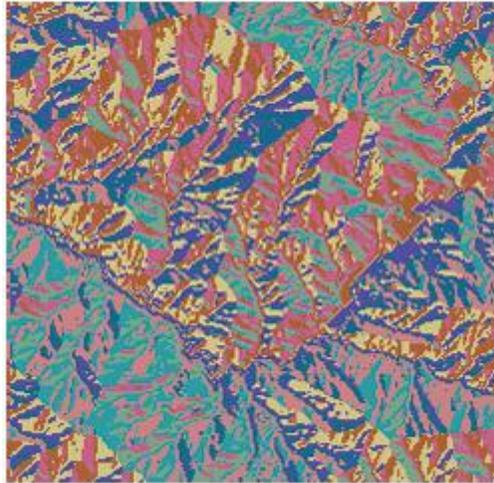


Figura 55. *Imagen ejemplo de la dirección de flujo.*

La dirección de flujo está determinada por la dirección del descenso más empinado, o la caída máxima, desde cada celda. Se calcula de la siguiente manera:

$$\text{máxima caída} = (\text{cambios en elevación} / \text{distancia}) * 100$$

La distancia se calcula entre los centros de las celdas. Por lo tanto, si el tamaño de celda es 1, la distancia entre dos celdas ortogonales es 1, y la distancia entre dos celdas diagonales es 1,414 (la raíz cuadrada de 2). Si el descenso máximo de varias celdas es el mismo, la vecindad se agranda hasta que se encuentra el descenso con mayor pendiente.

Cuando se encuentra la dirección de un descenso más empinado, la celda de salida se codifica con el valor que representa esa dirección.

Si todos los elementos próximos son más altos que la celda de procesamiento, se considerará un ruido que se rellena con el valor más bajo de los elementos próximos, y tiene una dirección de flujo hacia esta celda. Sin embargo, si el canal de una celda está junto al borde físico del MED o tiene como mínimo una celda sin valor de elevación ("NoData") como vecino, no se rellena porque la información del vecino no es suficiente. Para que se considere como un canal verdadero de una celda, debe estar presente toda la información del vecino.

Si dos celdas fluyen entre sí, se trata de canales que tienen una dirección de flujo indefinida. El método que calcula una dirección de flujo de un modelo digital de elevación (MED) se presenta con mayor detalle en Jenson y Domingue (1988).

La salida de la herramienta **Dirección del flujo** ("flow direction") es un ráster entero cuyos valores varían de 1 a 255. Los valores para cada dirección desde el centro del ráster son mostrados en la Figura 55.

32	64	128
16		1
8	4	2

Figura 56. Valores de dirección de flujo obtenidos para el entorno vecino a un píxel dentro del MED.

Por ejemplo, en la Figura 56, si la dirección de la caída más empinada fuese hacia la izquierda de la celda de procesamiento actual, la dirección de flujo estaría codificada como 16.

Si una celda es más baja que sus vecinas, a esa celda se le asigna el valor de su vecina más baja y el flujo se define hacia esta celda. Si varias vecinas poseen el valor más bajo, a la celda se le otorga este valor igualmente, pero el flujo se define con uno de los dos métodos que se explican a continuación. Esto se utiliza para filtrar los canales de una celda, ya que se consideran ruido.

Si una celda posee el mismo cambio en el valor z (elevación) en varias direcciones y esa misma celda es parte de un canal, la dirección de flujo se conoce como indefinida. En tales casos, el valor de esa celda en el ráster de dirección de flujo de salida será la suma de esas direcciones. Por ejemplo, si el cambio en el valor z es el mismo hacia la derecha (dirección de flujo = 1) y hacia abajo (dirección de flujo = 4), la dirección de flujo para esa celda es $1 + 4 = 5$. Las celdas con dirección de flujo indefinida se pueden marcar como canales mediante la herramienta canal.

Si una celda posee el mismo cambio en el valor z en varias direcciones y no es parte de un canal, la dirección de flujo se asigna con un algoritmo de búsqueda que define la dirección más probable (Greenlee, 1987).

El ráster de salida de caída de agua o dirección de flujo se calcula como la diferencia en el valor z dividida por la longitud de la ruta entre los centros de celda y se expresa en porcentajes. Para las celdas adyacentes, esto es análogo a la pendiente en porcentaje entre celdas. En un área plana, la distancia se convierte en la distancia a la celda más cercana de la elevación más baja. El resultado es un mapa de la elevación en porcentaje en la ruta del descenso más empinado de cada celda.

Si se calcula el ráster de caída de agua o dirección de flujo en áreas planas, la distancia hasta las celdas adyacentes diagonales ($1,414 * \text{tamaño de celda}$) se calcula mediante $1,5 * \text{tamaño de celda}$ para aumentar la velocidad de procesamiento mediante cálculos enteros.

Si se utiliza la opción *normal*, una celda en el borde del ráster de superficie fluirá hacia la celda interna con la caída más empinada en el valor z. Si la caída es menor o igual que cero, la celda fluirá fuera del ráster de superficie.

Tabla 4. Sintaxis y descripción de la rutina de dirección de flujo o "flow direction"

Parámetro de entrada	Explicación	Tipo de datos
in_surface_ráster	Ráster de entrada que representa una superficie continua.	Capa de un ráster
force_flow (Opcional)	<p>Especifica si las celdas del borde se desplazarán siempre hacia fuera o seguirás las reglas de flujo normales.</p> <p>NORMAL — Si la caída máxima del interior de la celda de un borde es mayor que cero, la dirección del flujo se determinará de la forma habitual; de lo contrario, la dirección del flujo será hacia el borde. Las celdas que tengan que fluir desde el borde del ráster de la superficie hacia dentro lo harán. Esta es la opción predeterminada.</p> <p>FORCE — Todas las celdas en el borde del ráster de superficie fluirán hacia fuera del ráster de superficie.</p>	Boolean
out_drop_ráster (Opcional)	<p>Un ráster de salida de caída opcional.</p> <p>El ráster de caída muestra la proporción del cambio máximo en la elevación desde cada celda a lo largo de la dirección del flujo hasta la longitud de la ruta entre centros de celda, expresada en porcentajes.</p>	RásterDataset
Salida o valores retornados:		
out_flow_direction_ráster	El ráster de salida que muestra la dirección del flujo desde cada celda hasta su vecina con la pendiente descendente más empinada.	Ráster

4.4.2 Cuencas hidrográficas o "watershed"

Una *cuenca hidrográfica* es el área de pendiente que contribuye con el flujo, generalmente de agua, a una salida común como un drenaje concentrado (ver Figura 56). Puede ser parte de una cuenca hidrográfica más grande y también puede contener cuencas hidrográficas más pequeñas, denominadas subcuencas. Los límites entre las cuencas hidrográficas se denominan *divisiones de drenaje*. La salida, o punto de fluidez, es el punto en la superficie en el que el agua fluye fuera de un área. Es el punto más bajo a lo largo del límite de una cuenca hidrográfica.

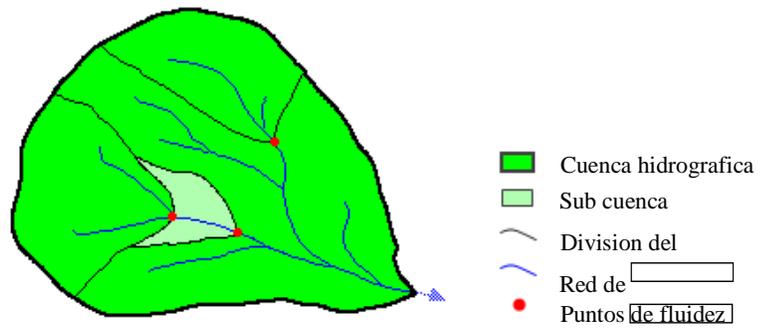


Figura 57. Partes de una cuenca hidrográfica. Los puntos de fluidez o puntos de capturas representan la confluencia de dos o más tributarios.

Las cuencas hidrográficas se definieron teniendo como base el MED corregido y la dirección de flujo del mismo, así se calculó la dirección del flujo y utilizó la herramienta Cuenca hidrográfica ("watershed") en ArcGIS 10.0.

Después, se introducen las ubicaciones de cada una de las muestras recolectadas en campo con la finalidad de determinar el área de la cuenca. También se puede utilizar un umbral de acumulación de flujo. Cuando el umbral se utiliza para definir una cuenca hidrográfica, los puntos de fluidez para la cuenca hidrográfica serán los cruces de una red de drenajes derivados de la acumulación de flujo. Por lo tanto, se debe especificar un ráster de acumulación de flujo y la cantidad mínima de celdas que constituyen el drenaje (el valor de umbral).

La salida es un ráster de las diferentes subcuencas hidrográficas.

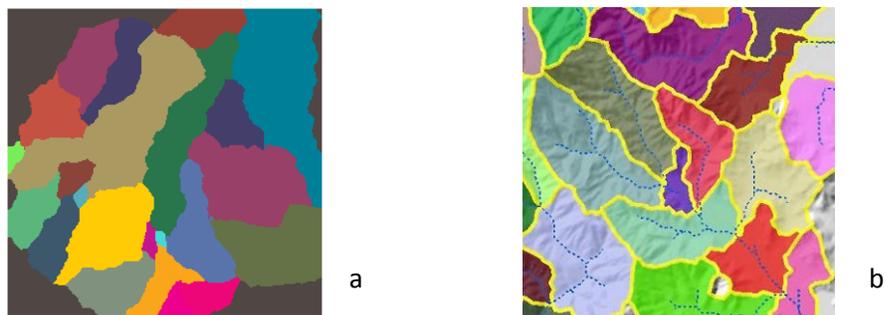


Figura 58. Ejemplo de delineación de las cuencas hidrográficas. (a) subcuencas dentro de un área específica. (b) contornos y tributarios para cada subcuenca

Tabla 5. Sintaxis y descripción de la rutina para la delineación de cuencas hidrográficas o "watershed"

Parámetro	Explicación	Tipo de datos
in_flow_direction_ráster	Ráster de entrada que muestra la dirección del flujo de cada celda.	Ráster Layer
in_pour_point_data	El ráster de dirección de flujo se puede crear con la herramienta Dirección de flujo. Las ubicaciones de punto de fluidez de entrada. Para un ráster, esto representa las celdas por sobre las que se determinará el área de contribución o la cuenca. Todas las celdas que no son NoData se utilizarán como celdas de origen. Para un dataset de entidad de punto, esto representa las ubicaciones por sobre las que se determinará el área de contribución o la cuenca.	Capa de un ráster o vector
pour_point_field (Opcional)	Campo utilizado para asignar valores a las ubicaciones de punto corriente. Si el dataset de punto corriente es un ráster, utilice Valor. Si el dataset de punto corriente es una entidad, utilice un campo numérico. Si el campo contiene valores de punto flotante, se truncarán en enteros.	Conjunto de escalares
Salida o valores retornados:		
out_ráster	El ráster de salida que muestra el área de contribución. Será de tipo entero.	Ráster

4.4.3 Acumulación de flujo o "flow accumulation"

Para crear una red de drenaje, se utiliza la herramienta *Acumulación de flujo* o "flow accumulation" para calcular el número de celdas que contribuyen con el la acumulación de fluidos para una ubicación en particular. Para calcular la acumulación de flujo se utiliza el ráster de dirección de flujo de salida que se creó en el paso anterior como entrada (ver Figura 58).

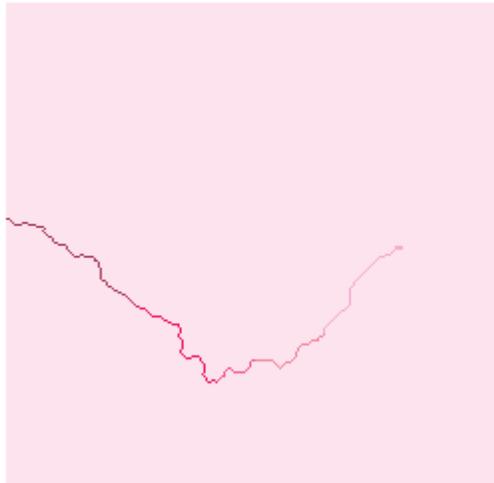


Figura 59. Imagen de la salida del comando acumulación de flujo

La herramienta *Acumulación de flujo* calcula el flujo acumulado como el peso acumulado de todas las celdas que fluyen en cada celda de pendiente descendente en el ráster de salida. Si no se proporciona un ráster de peso, se aplica un peso de 1 a cada celda, y el valor de celdas en el ráster de salida es el número de celdas que fluye en cada celda.

En la Figura 59a se muestra la contribución o dirección de recorrido del agua desde cada celda o píxel y en la Figura 59b se realiza el conteo del número de píxeles que fluyen hacia cada celda (acumulación de flujo).

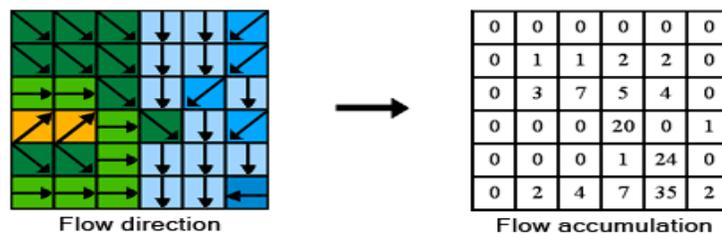


Figura 60. (a) Dirección de flujo, (b) acumulación de flujo (Tomada de la página de ayuda de ArcGIS 10.0)

Las celdas con una acumulación de flujo alta son áreas de flujo concentrado y pueden ser útiles para identificar canales de drenaje. Esto se analiza mediante la herramienta de Identificación de redes de arroyos ("*Stream link*"). Las celdas con una

acumulación de flujo de 0 son alturas topográficas locales y se pueden utilizar para identificar crestas o nacientes de ríos.

Uno de los usos de la herramienta Acumulación de flujo con un ráster de peso de entrada puede ser determinar cuánta lluvia ha caído en una cuenca hidrográfica determinada. En ese caso, el ráster de peso puede ser un ráster continuo que representa las precipitaciones promedio durante un período de tiempo determinado, por ejemplo en una tormenta o fenómeno climático. La salida desde la herramienta puede representar la cantidad de lluvia que puede fluir por cada celda, asumiendo que toda la lluvia se convirtió en escorrentía y que no hubo intercepción, evapotranspiración o pérdida al agua subterránea. También se puede visualizar como la cantidad de lluvia que cayó en la superficie, a una pendiente ascendente desde cada celda.

En este trabajo utilizamos una acumulación de flujo uniforme, es decir, que es independiente del patrón de precipitaciones en el área y otra tomando en cuenta el patrón de precipitaciones acumulado en la zona de estudio.

Tabla 6. Sintaxis y descripción de la rutina de acumulación de flujo o "flow accumulation"

Parámetro	Explicación	Tipo de datos
in_flow_direction_ráster	Ráster de entrada que muestra la dirección del flujo de cada celda. El ráster de dirección de flujo se puede crear con la herramienta Dirección de flujo.	Capa de un ráster
in_weight_ráster (Opcional)	Ráster de entrada opcional para aplicar un peso en cada celda. Si no se especifica ningún ráster de peso, se aplicará un peso predeterminado de 1 a cada celda. Para cada celda del ráster de salida, el resultado será la cantidad de celdas que fluyan en el mismo.	Capa de un ráster
data_type (Opcional)	El ráster de acumulación de salida puede ser de tipo entero o punto flotante. FLOTANTE — El ráster de salida será de tipo punto flotante. Esta es la opción predeterminada. INTEGER — El ráster de salida será de tipo entero.	ráster
Salida o valores retornados:		
out_accumulation_ráster	El ráster de salida que muestra el flujo acumulado para cada celda.	Ráster

Se puede especificar un subconjunto del ráster del modelo de Acumulación de flujo; la etapa inicial define el sistema de red de drenajes ("drainage-networks"). Esta tarea se puede realizar con la herramienta Evaluación condicional ("conditional") o utilizando Álgebra de mapas ("map_algebra"). Un ejemplo de sintaxis general para utilizar la Evaluación condicional y crear un nuevo ráster sería: `newraster = con(accum > 100, 1)`. Todas las celdas con más de 100 píxeles que fluyen hacia ellas forman parte de la red de arroyos.

4.4.5 Clasificación de drenajes o "stream-order"

Para representar el orden de cada uno de los segmentos o tributarios de la red de drenajes y así caracterizar la misma se pueden emplear las técnicas Shreve y Strahler (Nagle, 2000). En matemáticas, el número de Strahler o número de Horton-Strahler, es una forma numérica que expresa la complejidad de una ramificación. Estas entran en la llamada Teoría de Grafos (Tutte, 2001). Este número fue desarrollado por primera vez en hidrología por Robert E. Horton y por Arthur Newell Strahler (Nagle, 2000); en este campo se conoce como el orden de secuencia de Strahler y se usa para definir el tamaño de una corriente, basándose en la jerarquía de los afluentes. Otros sistemas de ordenamiento han sido desarrollados por Shreve (1966, 1967) y Hodgkinson et al. (2006).

La clasificación de drenajes es un método que asigna un orden numérico a los vínculos en una red y está basado en la cantidad de afluentes. Se pueden inferir algunas características de los drenajes simplemente al conocer el orden. En ambos métodos, siempre se asigna un valor de 1 a los segmentos de drenaje aguas arriba, o los vínculos exteriores.

Método de Strahler: En el método de Strahler, se asigna un orden de 1 a todos los vínculos sin afluentes y se los conoce como de primer orden.

La clasificación aumenta cuando los drenajes del mismo orden se intersectan. Por lo tanto, la intersección de dos vínculos de primer orden creará un vínculo de segundo orden, la intersección de dos vínculos de segundo orden creará un vínculo de

tercer orden, y así sucesivamente. Sin embargo, la intersección de dos vínculos de distintos órdenes no aumentará el orden. Por ejemplo, la intersección de un vínculo de primer orden y segundo orden no creará un vínculo de tercer orden pero mantendrá el orden del vínculo con el orden más alto. El método de Strahler es el método de clasificación de drenaje más conocido. Sin embargo, debido a que este método sólo aumenta el orden en las intersecciones del mismo orden, no tiene en cuenta todos los vínculos y puede ser susceptible a la adición o remoción de vínculos.

Método de Shreve: El método de Shreve tiene en cuenta todos los vínculos en la red. Al igual que en el método de Strahler, a todos los vínculos exteriores se les asigna un orden de 1. Para todos los vínculos interiores del método de Shreve, sin embargo, los órdenes son aditivos. Por ejemplo, la intersección de dos vínculos de primer orden crea un vínculo de segundo orden, la intersección de un vínculo de primer orden y uno de segundo orden crea un vínculo de tercer orden, y la intersección de un vínculo de segundo orden y uno de tercer orden crea un vínculo de cuarto orden.

Debido a que los órdenes son aditivos, los números del método de Shreve se conocen como magnitudes en lugar de órdenes. La magnitud de un vínculo en el método de Shreve es el número de vínculos de drenajes arriba.

La Figura 60 muestra una comparación de la clasificación de drenaje mediante ambos métodos.

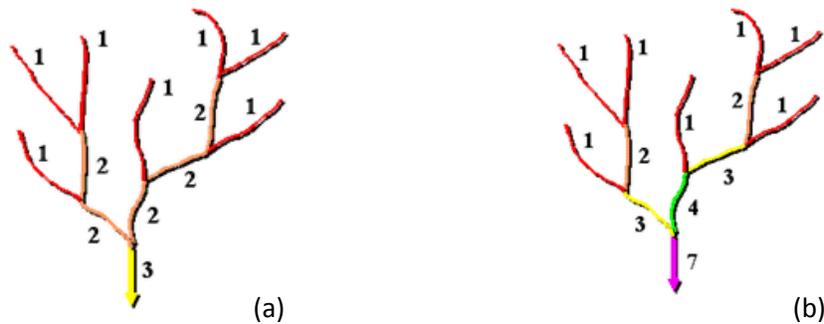


Figura 61. Método de clasificación de drenajes: (a) Strahler. (b) Shreve

La Figura 61 ilustra el ráster de salida al aplicar la rutina de clasificación de drenajes en ArcGIS 10.0.

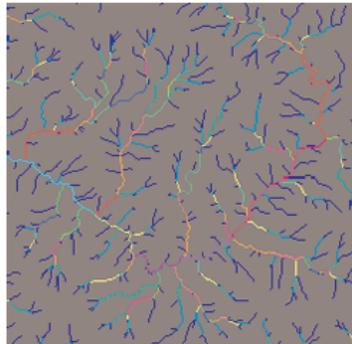


Figura 62. Ejemplo de un ráster de salida después de la clasificación de drenajes usando el orden de Strahler.

Tabla 7. Sintaxis del comando clasificación de drenajes ("Stream order")

Parámetro	Explicación	Tipo de datos
in_stream_raster	Ráster de entrada que representa una red de corriente lineal.	Raster Layer
in_flow_direction_raster	Ráster de entrada que muestra la dirección del flujo de cada celda. El ráster de dirección de flujo se puede crear con la herramienta Dirección de flujo.	Raster Layer
order_method (Opcional)	El método utilizado para asignar la clasificación de arroyos. <ul style="list-style-type: none"> • STRAHLER — El método de clasificación de arroyos propuesto por Strahler en 1952. La clasificación de un arroyo sólo aumenta cuando los arroyos del mismo orden intersectan. • SHREVE — El método de clasificación de arroyos por magnitud, propuesto por Shreve en 1967. A todos los vínculos sin afluentes se les asigna una magnitud (un orden) de 1. Las magnitudes son pendientes descendentes aditivas. Cuando dos vínculos intersectan, se suman sus magnitudes y éstas se asignan al vínculo de pendiente descendente. 	String
Salida o valores retornados:		
out_raster	El ráster de clasificación de arroyos de salida. Será de tipo entero.	Raster

4.4.6 Longitud de flujo o "flow-length"

Se puede determinar la longitud (L) de la ruta de flujo, ya sea en pendiente ascendente o descendente, desde cada celda dentro de una cuenca hidrográfica dada. Esto es útil para calcular el tiempo de recorrido del agua a través de una cuenca hidrográfica. La Figura 43 muestra un ejemplo de la longitud de Flujo calculada para un ráster.

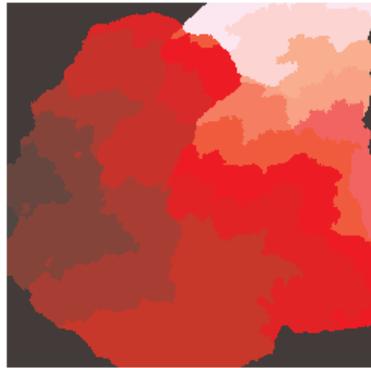


Figura 63. Ejemplo de salida de la función longitud de flujo o "flow-length"

Tabla 8. Sintaxis del comando longitud de flujo o "flow-length"

Parámetro	Explicación	Tipo de datos
in_flow_direction_raster	Ráster de entrada que muestra la dirección del flujo de cada celda.	Raster Layer
direction_measurement (Opcional)	La dirección de medición a lo largo de la ruta de flujo. <ul style="list-style-type: none"> DOWNSTREAM — Calcula la distancia de la pendiente descendente a lo largo de la ruta de flujo. UPSTREAM — Calcula la distancia más larga de la pendiente ascendente a lo largo de la ruta de flujo. 	String
in_weight_raster (Opcional)	Ráster de entrada opcional para aplicar un peso en cada celda. Si no se especifica ningún ráster de peso, se aplicará un peso predeterminado de 1 a cada celda..	Raster Layer
Salida o valores retornados:		
out_raster	El ráster de salida que muestra, para cada celda, la distancia aguas arriba o aguas abajo a lo largo de una ruta de flujo.	Ráster

La herramienta también se pueden utilizar para crear diagramas de distancia-área de eventos hipotéticos de precipitación y escorrentía mediante el ráster de peso, como una impedancia al movimiento descendente.

4.5 CÁLCULO DE ÍNDICES TOPOGRÁFICOS (ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO)

Los cálculos de índices topográficos primarios y secundarios fueron analizados a través de los índices de erosión, potencial total de la corriente (TSP), potencial de corte de la corriente (SSP), potencial de unidad de la corriente (USP), índice de transporte de sedimento (STI), índice de humedad (WI). Cada uno de éstos índices necesita que la pendiente sobre el MED sea calculada previamente.

4.5.1 Pendiente

La pendiente es una forma de medir el grado de inclinación del terreno. A mayor inclinación mayor valor de pendiente. La pendiente se mide calculando la tangente de la superficie. La tangente se calcula dividiendo el cambio vertical en altitud entre la distancia horizontal. Si visualizáramos la superficie en sección transversal, podríamos ver un triángulo rectángulo mostrado en la Figura 63.

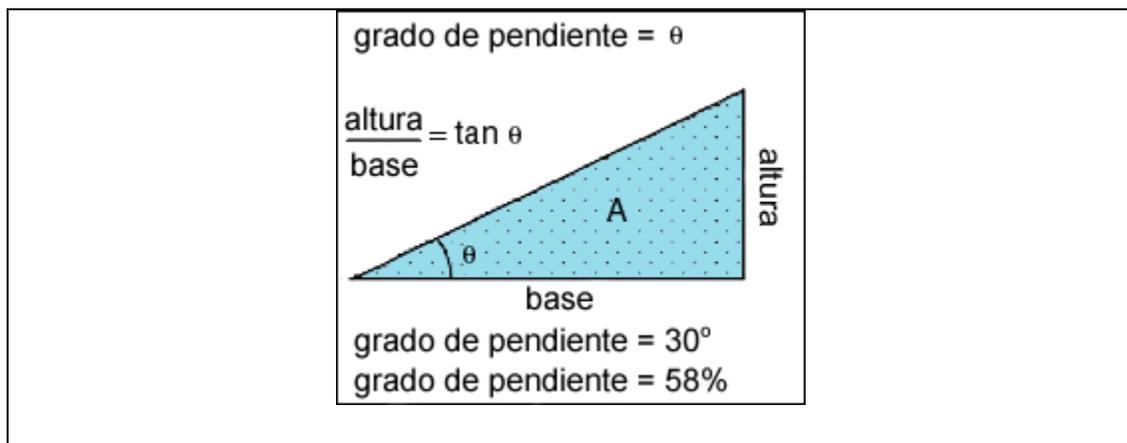


Figura 64. Cálculo de la pendiente

Normalmente la pendiente se expresa en planimetría como un porcentaje de pendiente que equivale al valor de la tangente (pendiente) multiplicado por 100.

$$\text{Porcentaje de Pendiente} = (\text{Altura} / \text{Base}) * 100$$

Esta forma de expresar la pendiente es muy común, aunque puede ser algo confusa porque por ejemplo un valor de pendiente del 100% se corresponde con un ángulo de 45 grados ya que la altura y la base de un ángulo de 45 grados coinciden y al dividirlos da como resultado 1 que si se multiplica por 100 es igual a una pendiente del 100%. De hecho el porcentaje de pendiente tiende al infinito en tanto en cuanto la pendiente se aproxime a una superficie vertical (la distancia base se aproxima a 0). En la práctica esto es imposible en una base de datos de tipo ráster porque la base nunca es menor que el valor del ancho de la celda (píxel).

Otra forma de expresar la pendiente es en grados. Para calcular los grados se utiliza el valor de arcotangente de la pendiente:

$$\text{Pendiente en Grados} = \text{ArcTangente} (\text{Altura} / \text{Base})$$

Si se toma el valor de un mapa de pendientes, nos indicará cuan rápido varía dicha pendiente. Es el equivalente a calcular la segunda derivada de la superficie. En un mapa topográfico es una medida de la rugosidad de la superficie, factor importante a la hora de estimar los efectos de enfriamiento por el viento en los microclimas (Superficies rugosas crean turbulencias y mezcla de masas de aire de temperaturas diferentes. Esto genera mayor efecto de enfriamiento sobre el suelo). Analizando estos ejemplos vemos la utilidad de considerar la pendiente como una medida del cambio en una superficie.

Cuando en un SIG medimos la pendiente, el mapa de entrada debe ser un mapa de intervalos que represente una superficie como un conjunto de valores continuos (coma flotante). El resultado es de tipo intervalo. La Tabla 9 muestra un ejemplo de la variación de la pendiente con la altura en grados y en porcentaje.

Tabla 9. Ejemplo de cálculo de pendiente en porcentaje y en grados

altura	base	tangente (altura/base)	porcentaje pendiente	grados pendiente
1	100	0.01	1	0.57
5	100	0.05	5	2.86
10	100	0.1	10	5.71
25	100	0.25	25	14.03
50	100	0.5	50	26.56
100	100	1	100	45
150	100	1.5	150	56.30
200	100	2	200	63.43

Métodos para calcular la pendiente, la orientación y el sombreado del relieve en un SIG raster

Gradiente de pendiente

El gradiente de pendientes se calcula a partir de una ventana de 3x3 celdas como se muestra en el esquema inferior. La ventana inferior representa la altitud de los 8 vecinos más próximos (Z) que rodean a la celda de columna i y fila j . La Figura 64 muestra la ventana (o kernel) utilizada en el cálculo de las derivadas de las matrices de elevación. Esta ventana 3x3 se desplaza sucesivamente por encima del mapa para calcular las variables derivadas; la pendiente y la orientación.

$Z_{i-1, j+1}$	$Z_{i, j+1}$	$Z_{i+1, j+1}$
$Z_{i-1, j}$	$Z_{i, j}$	$Z_{i+1, j}$
$Z_{i-1, j-1}$	$Z_{i, j-1}$	$Z_{i+1, j-1}$

Figura 65. Ventana utilizada para calcular las derivadas de las matrices de elevación

Si se precisa la media de la pendiente, los gradientes este-oeste se calculan de la siguiente manera:

$$\delta EO = [(Z_{i+1,j+1} + 2Z_{i+1,j} + Z_{i+1,j-1}) - (Z_{i-1,j+1} + 2Z_{i-1,j} + Z_{i-1,j-1})] / 8\delta X$$

El gradiente norte-sur se calcula:

$$\delta NS = [(Z_{i+1,j+1} + 2Z_{i,j+1} + Z_{i-1,j+1}) - (Z_{i+1,j-1} + 2Z_{i,j-1} + Z_{i-1,j-1})] / 8\delta y$$

Donde

δx = la distancia este-oeste a través de la celda (anchura de la celda)

δy = la distancia norte-sur a través de la celda (altura de la celda)

El Porcentaje de Pendiente se calcula:

$$\% \text{Pendiente} = 100 * [(\delta EO)^2 + (\delta NS)^2]^{1/2}$$

La pendiente en grados se calcula:

$$\text{Pendiente (grados)} = \text{ArcTangente}[(\delta EO)^2 + (\delta NS)^2]^{1/2}$$

El valor de máxima pendiente se calcula a partir del máximo valor de gradiente de los 8 vecinos más próximos. La máxima pendiente hacia abajo se calcula a partir del máximo gradiente de la celda o celdas que son menores o iguales al valor de elevación de la celda central. Si no existe un vecino de valor inferior se asigna el valor de -1 a la celda central. Al calcularlo se obtiene el gradiente o tasa de cambio máximo en el valor z desde cada celda de una superficie de ráster. La Figura 65 ilustra un ejemplo del cálculo de pendiente (en grados) a partir del MED. ArcGIS 10.0 permite calcular la pendiente en cualquiera de las dos formas.

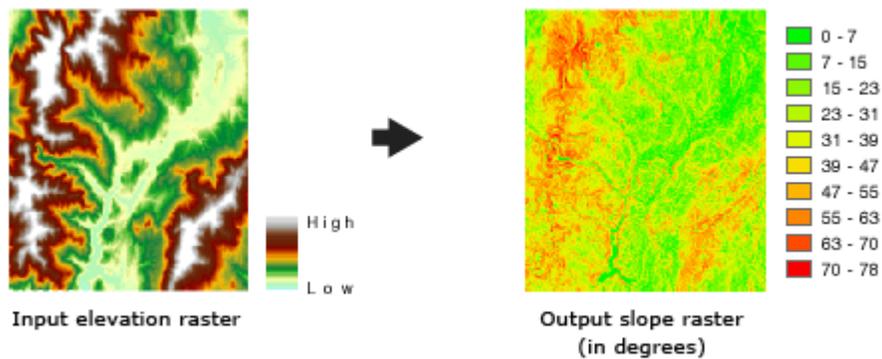


Figura 66. Ejemplo de calculo de pendiente en ArcGIS 10.0 a partir del MED.

El uso de un factor z es esencial para corregir los cálculos de la pendiente cuando las unidades z de la superficie se expresan en unidades diferentes de las unidades x,y de terreno. El rango de valores en la salida depende del tipo de unidades de medición. Para grados, el rango de valores de pendiente es de 0 a 90. Para aumentar el porcentaje, el rango es de 0 a esencialmente infinito. Una superficie plana es 0 por ciento, una superficie de 45 grados es 100 por ciento y, a medida que la superficie se vuelve más vertical, la elevación en porcentaje se vuelve cada vez mayor.

Tabla 10. Sintaxis del comando pendiente o "slope"

Parámetro	Explicación	Tipo de datos
in_raster	Ráster de entrada de superficie.	Capa de un ráster
output_measurement (Opcional)	Determina las unidades de medición (grados o porcentajes) de los datos de la pendiente de salida. DEGREE — La inclinación de la pendiente se calculará en grados. PERCENT_RISE — Palabra clave que genera como salida la elevación en porcentaje, que también se conoce como pendiente en porcentaje.	String

z_factor (Opcional)	<p>Cantidad de unidades x,y de suelo en una unidad z de superficie.</p> <p>El factor z ajusta las unidades de medida para las unidades z cuando son diferentes de las unidades x, y de la superficie de entrada. Los valores z de la superficie de entrada se multiplican por el factor z al calcular la superficie de salida final.</p> <p>Si las unidades z y las unidades x,y están en las mismas unidades de medida, el factor z es 1. Esta es la opción predeterminada.</p> <p>Si las unidades z y las unidades x,y están en diferentes unidades de medida, el factor z se debe establecer en el factor adecuado o los resultados serán incorrectos. Por ejemplo, si las unidades z son pies y las unidades x, y son metros, debe utilizar un factor z de 0,3048 para convertir las unidades z de pies a metros (1 pie = 0,3048 metros).</p>	Double
Salida o valores retornados:		
out_ráster	Ráster de pendiente de salida.	Ráster

4.5.2 Índice de transporte de sedimento (STI)

Esta herramienta puede ser usada para calcular el índice de transporte de sedimento descrito por Moore & Burch (1986), este índice es derivado de la teoría del potencial de unidad de la corriente y es usado a veces en lugares con factores de longitud de pendiente en la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE) para longitudes de pendiente menores que 100 m y pendientes menores de 14°. El índice combina el área de contribución de la pendiente ascendente (As), bajo el supuesto de que el área que contribuye es la descarga directamente relacionada, y la pendiente (B)

$$STI = (m + 1) \times (A_s / 22.13)^m \times \sin(B / 0.0896)^n$$

4.5.3 Índice de humedad (WI)

Es utilizada para el calculo de índice de humedad topográfico, comúnmente usado en el modelado del marco de precipitación-escorrentía. El índice describe la tendencia de un lugar a ser saturado debido al área de contribución y características de las pendientes locales.

$$\mathbf{WI = Ln(As / \tan(Slope))}$$

4.5.4 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:

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

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:

4.5.4.1 Poder de flujo total o (TSP)

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

$$TSP = A_s S$$

4.5.4.2 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:

$$USP = \sqrt{A_s} S$$

4.5.4.3 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:

$$SSP = \sqrt[3]{A_s S^2}$$

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. 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 66 ilustra un ejemplo del índice de erosión TSP derivado para un área de

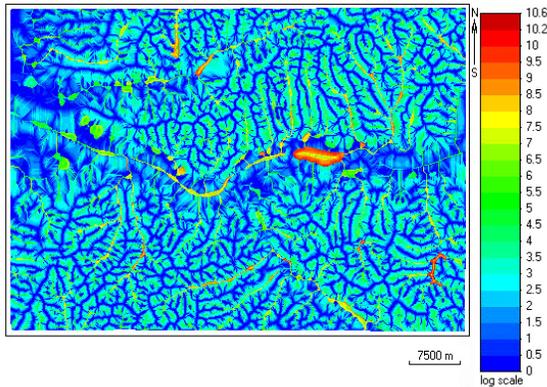


Figura 67. Índice de erosión TSP calculado para la región de Kurst, Rusia CA este fue calculado por Florinsky (2012) usando el método de Evans–Young . El MED consiste de 147.875 nodos, 455 columnas x 325 filas; la resolución del raster usado fue de 150 m.

4.5.5 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:

$$R = H_r - h$$

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 67 muestra esta herramienta.

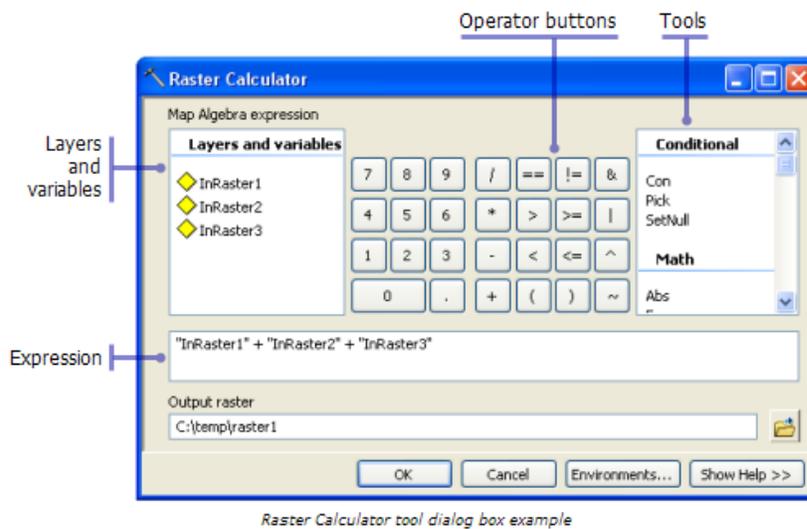


Figura 68. Calculadora de ráster existente en ArcGIS 10.0, diversas funciones matemáticas son disponibles y fueron utilizadas a lo largo de este trabajo para derivar los índices primarios y secundarios del terreno, los cálculos hidrológicos y las operaciones algebraicas necesarias para derivar cada una de las expresiones matemáticas anteriormente mencionadas.

4.6 OBTENCIÓN DE VARIABLES GLOBALES EN UN ENTORNO DE INTERÉS

Para tomar valores significativos que representen todos los puntos o píxeles dentro de la cuenca del río Guárico y sus diferentes subcuencas, se utilizó el comando estadística focalizada o "focal statistics" en ArcGIS 10.0

4.6.1 Estadísticas focalizadas o "focal statistics"

Esta herramienta permite realizar operaciones algebraicas y obtener valores estadísticos para el entorno de un píxel dado o ubicación. La geometría del entorno puede ser definida por el usuario como circular, cuadrada, anillo, rectángulo o irregular. Dentro de estos valores estadísticos se incluye el máximo, el promedio, el mínimo, desviación estándar, mediana, rango, entre otras funciones.

En este estudio se realizó las estadísticas focales de la vecindad circular de la zona de estudio, calculándose el máximo valor de la vecindad, con radios de 3,5 y 7 km respectivamente.

Conceptualmente, en la ejecución, el algoritmo visita cada celda en el ráster y calcula la estadística específica con la vecindad identificada. La celda para la cual se calcula la estadística se denomina la celda de procesamiento. El valor de la celda de procesamiento, como todos los valores de celda en la vecindad identificada, se incluyen en el cálculo de las estadísticas de la misma. Las vecindades se pueden superponer de modo que las celdas de una también se pueden incluir en la de otra celda de procesamiento. La tabla 11 resume las variables de entrada, salida y el tipo de datos utilizados por la función estadística focal.

Tabla 11. *Sintaxis del comando estadística focal o "focal-statistics"*

Parámetro	Explicación	Tipo de datos
in_ráster	El ráster donde se realizan los cálculos de las estadísticas focalizadas.	Capa de un ráster
neighborhood (Opcional)	<p>La clase de Vecindad indica la forma del área alrededor de cada celda utilizada para calcular la estadística.</p> <p>Los diferentes tipos de vecindad disponible son NbrAnnulus, NbrCircle, NbrRectangle, NbrWedge, NbrIrregular, y NbrWeight</p> <p>El parámetro {CELL MAP} define las unidades de distancia como unidades de celda o unidades de mapa.</p> <p>La vecindad predeterminada es un cuadrado de ancho y altura de 3 celdas.</p>	Neighborhood
statistics_type (Opcional)	<p>El tipo de estadística que se calculará.</p> <p>VALOR MEDIO — Calcula la media (valor medio) de las celdas en la vecindad.</p> <p>MAJORITY — Calcula la mayoría (valor que se produce con más frecuencia) de las celdas en la vecindad</p> <p>MAXIMUM — Calcula el máximo (mayor valor) de las celdas en la vecindad.</p> <p>MEDIAN — Calcula la mediana de las celdas en la vecindad.</p> <p>MINIMUM — Calcula el mínimo (valor inferior) de las celdas en la vecindad.</p> <p>MINORITY — Calcula la minoría (valor que se produce con menor frecuencia) de las celdas en la vecindad.</p> <p>RANGE — Calcula el rango (diferencia entre los valores mayor e inferior) de las celdas en la vecindad.</p> <p>STD — Calcula la desviación estándar de las celdas en la vecindad.</p>	String

	<p>SUM — Calcula la suma (total de todos los valores) de las celdas en la vecindad.</p> <p>VARIETY — Calcula la variedad (el número de valores únicos) de las celdas en la vecindad.</p> <p>El tipo de estadísticas predeterminado es MEAN.</p>	
ignore_nodata (Opcional)	<p>Indica si los valores NoData serán ignorados por el cálculo de estadísticas.</p> <p>DATOS — Especifica que si existe un valor NoData dentro de una vecindad, este se ignorará. Para determinar el valor de salida sólo se utilizarán las celdas dentro de la vecindad que contengan valores de datos. Esta es la opción predeterminada.</p> <p>NODATA —Especifica que si cualquier celda de una vecindad tiene el valor de NoData, la salida de la celda de procesamiento será NoData. Mediante esta opción, la presencia de un valor NoData implica que no hay información suficiente para determinar el valor estadístico de la vecindad.</p>	Boolean
Salida o valores retornados:		
out_ráster	El ráster de estadísticas focalizadas de salida.	Ráster

CAPITULO V

5. RESULTADOS, ANALÍISIS Y DISCUSIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

El estudio de la geología ha evolucionado con el tiempo, a medida que se van creando nuevos software esta ciencia ha mejorado los datos que genera, debido a que ya no son solo datos cualitativos sino que son también cuantitativos con el agregado de la precisión otorgada por el programa. En este capítulo se muestra los resultados e integración de los análisis mediante estudios de las secciones epóxicas de minerales pesados y de geomorfología cuantitativa.

5.2 ANÁLISIS VISUAL DE MINERALES PESADOS

El siguiente análisis se realizó con la ayuda de un microscopio polarizante, donde se observaron las características del mineral para identificarlo, también se realizó el análisis de textura del mismo, indicando su nivel de redondez y esfericidad, usando la tabla de Kumbrein (1941) resultante del análisis digital de imágenes (ver Figura 39).

El estudio visual de minerales pesados arrojó como resultado la existencia de minerales que predominaban en cantidad con respecto a otros. En porcentaje, teniendo en cuenta que se estudiaron 150 granos por muestra, los minerales predominantes fueron, Embalse de Camatagua (GUA-1), esfena 15%, rutilo 14%, Embalse de Guárico (GUA-3), rutilo 16%, esfena 15%, río Orituco (ORI-1), Rutilo 36%, Brokita 6%. En la Figura 68 se presenta una imagen representativa de estos minerales.

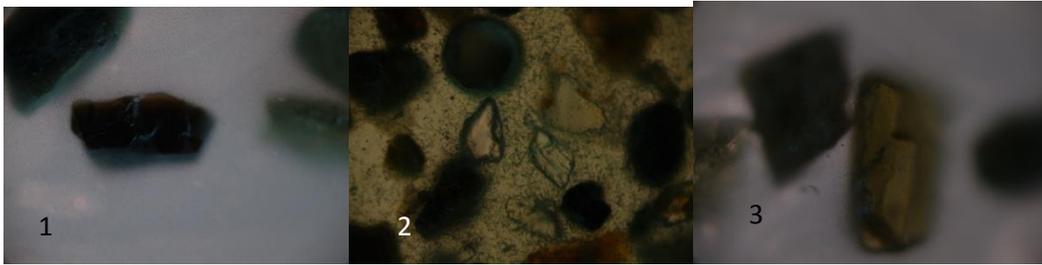


Figura 69. *Imágenes de minerales pesados derivados de sedimentos modernos del río Guárico: 1) Rutilo, 2) Esfena, 3) Brokita*

En cada muestra, se observó diferencias en la redondez y esfericidad en forma general, exponiendo que las muestras tomadas en el río Orituco (ORI-1), el cual es un drenaje secundario del río Guárico, presenta alta redondez, secundada por GUA-3, tomada en la salida del Embalse de Camatagua. La que posee mas formas angulosas y menos redondeadas son las de GUA-1. Con respecto a la esfericidad el que posee mayor esfericidad es GUA-3, le sigue ORI-1 y finalizando con GUA-1, con esto se puede decir que las muestras GUA-3 Y ORI-1, indican un mayor transporte por lo que se diría que la fuente se encuentra alejada al contrario de las tomadas en GUA-1. Se puede observar en la Figura 69 las diferencias entre cada una de las muestras.

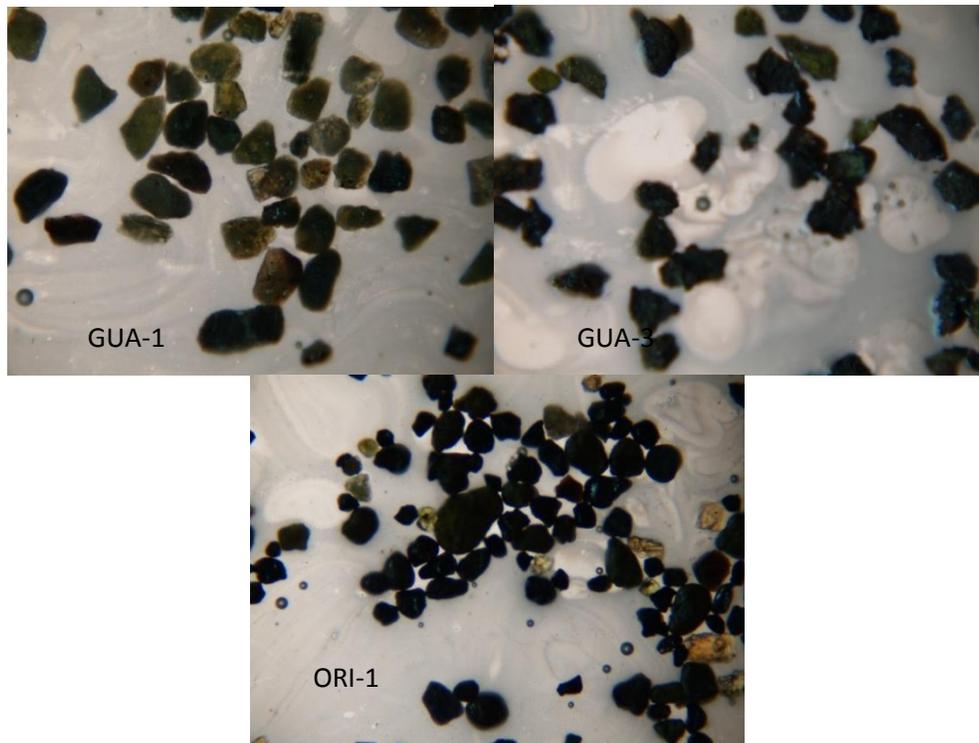


Figura 70. *Imagen de las muestras donde se observa la diferencia general de redondez y esfericidad.*

La Figura 70 muestra la comparación entre las diferentes muestras concentradas y separadas magnéticamente a 0.4 A. Las muestras GUA-1 y GUA-3 son muy similares, y los minerales de mayor frecuencia son rutilo, olivino y esfena. La muestra ORI-1 tiene una mayor variedad de minerales pesados entre los cuales destacan: circón, pirita, olivino y silimanita, siendo la muestra GUA-3 la que posee mayor frecuencia de estas partículas. En todas las muestras se encontraron fragmentos de rocas, los cuales no fue posible definir bajo el microscopio normal, es necesario realizar estudios más detallados tales como microscopía electrónica de barrido.

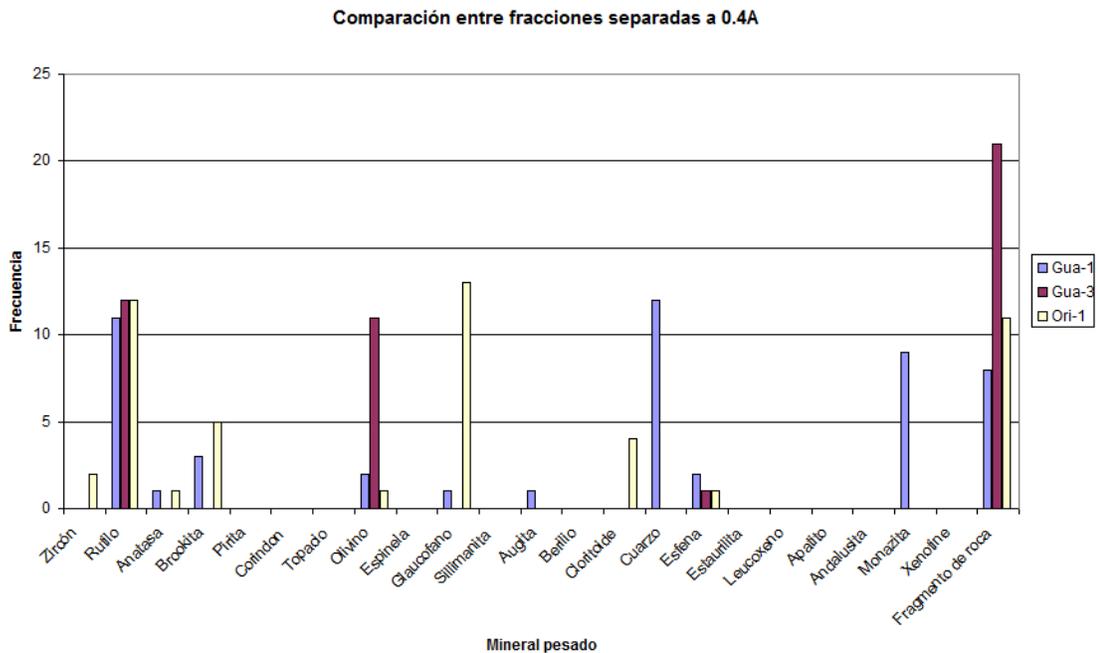


Figura 71. Comparación de concentración de minerales pesados por muestra para las fracciones a 0.4A.

La Figura 71 muestra que GUA-1 y GUA-3 presentan muchas similitudes en cuanto al contenido de minerales pesados para la porción separadas magnéticamente a 0.8 A. El mineral monacita yace en la fracción 0.4 y 0.8 A para la muestra GUA-1. La muestra ORI-1 posee la mayor variabilidad mineral, entre los cuales destacan: circón, rutilo, anatasita, brookita, espinela, berilio, esfena, apatito y xenotino.

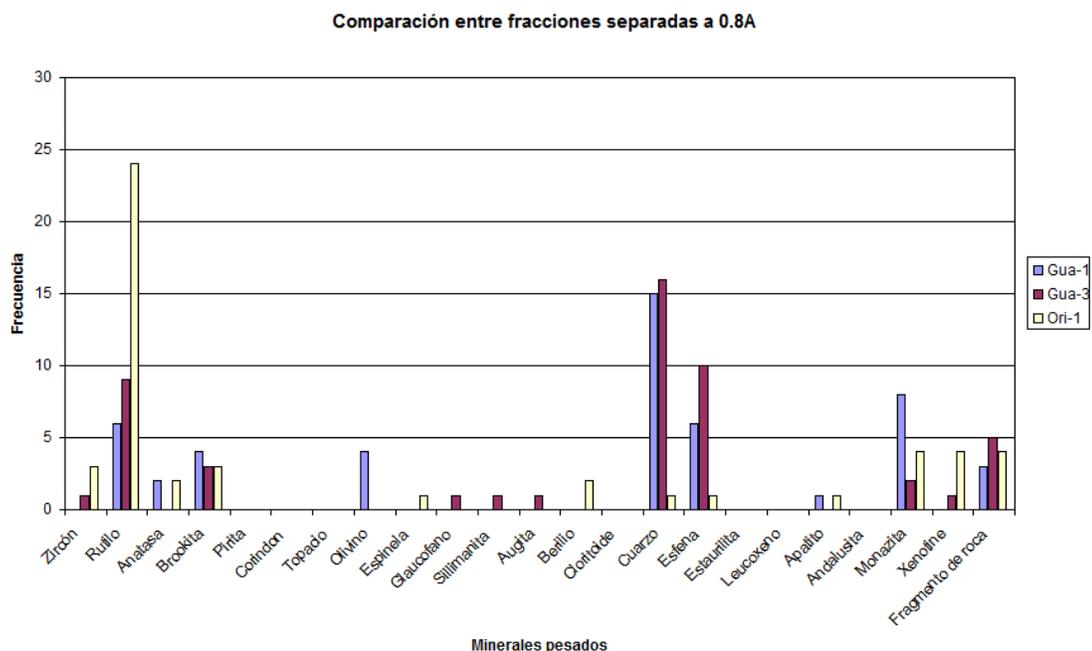


Figura 72. Comparación de concentración de minerales pesados por muestra para las fracciones separadas a 0.8A.

Las secciones epóxicas fueron preparadas después de la separación magnética a 1.2 A, con la finalidad de fechar posteriormente los minerales pesados por el método de trazas de fisión, de las tres muestras la que posee mayor contenido de apatitos y otros minerales datables por este método (circón, esfena y monacita) fue la muestra ORI-1.

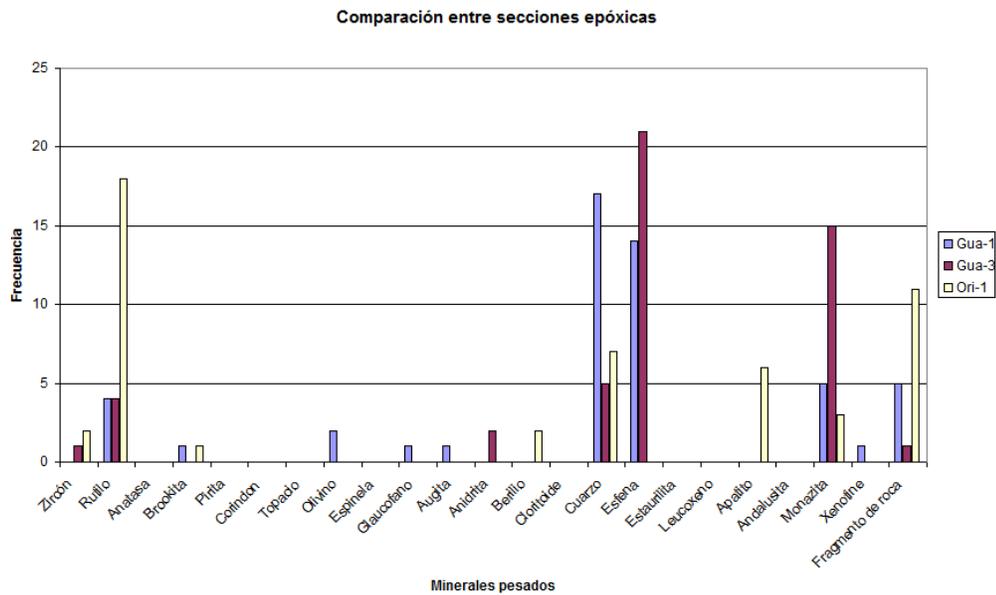


Figura 73. Comparación de concentración de minerales pesados por muestra para las secciones epóxicas

5.3 ANÁLISIS DE IMÁGENES DE MINERALES PESADOS

El estudio de los minerales mediante el software ImageJ, mostró cuantitativamente la redondez y esfericidad de los minerales analizados, dando así con mayor exactitud los datos a diferencia de los obtenidos por visualización.

Los resultados mostrados en la Tabla 12 y la Figura 73 permiten identificar que las muestras que poseían mayor redondez, fue ORI-1 teniendo valores de 0.657 a 0.460, seguido de GUA-3 con 0.550 a 0.458 y finalizando GUA-1 con valores entre 0.475 y 0.430. En cuanto a la esfericidad por su parte las muestras conservan este mismo orden, ORI-1 con valores que van de 0.786 a 0.425, GUA-3 a su vez posee valores de 0.723 a 0.550 y GUA-1 como la muestra que posee menor esfericidad, con valores de 0.712 a 0.681. Exponiendo así que ORI-1 posee mayor redondez y esfericidad.

Al comparar los valores obtenidos por observación y usando el software ImageJ (ver tabla 12 y Figura 73), se puede notar una gran diferencia entre los valores

observados y calculados. Sistemáticamente los valores calculados tienden a ser mayor que los observados. No es el objetivo de este trabajo profundizar en el estudio de tales diferencias, sin embargo, cabe resaltar que generalmente esto se debe a variaciones en el ajuste de elipses debido a uniformización de píxeles, entre otros fenómenos numéricos. A pesar de lo anterior, esto no cambia las observaciones antes mencionadas, en particular el hecho de que la muestra ORI-1 sea la que posea el mayor grado de redondez.

Tabla 12. Resultado de análisis de minerales a través de análisis visuales y de imágenes.

MUESTRAS	VISUAL		CALCULADA	
	REDONDEZ	ESFERICIDAD	REDONDEZ	ESFERICIDAD
GUA-1 (0.4)	0.346	0.571	0.475	0.681
GUA-1 (0.8)	0.300	0.521	0.430	0.700
GUA-1 (epoxi)	0.311	0.455	0.464	0.712
GUA-3 (0.4)	0.244	0.481	0.475	0.550
GUA-3 (0.8)	0.384	0.753	0.550	0.704
GUA-3 (epoxi)	0.406	0.581	0.458	0.723
ORI-1 (0.4)	0.390	0.603	0.547	0.786
ORI-1 (0.8)	0.514	0.518	0.657	0.714
ORI-1 (epoxi)	0.361	0.367	0.460	0.425

La Figura 73 permite confirmar lo anteriormente descrito, existen diferencias entre las dos muestras pertenecientes al río Guárico, Gua-1 y Gua-3, la esfericidad es relativamente la misma, sin embargo a nivel de redondez, Gua-1 posee menor redondez que Gua-3.

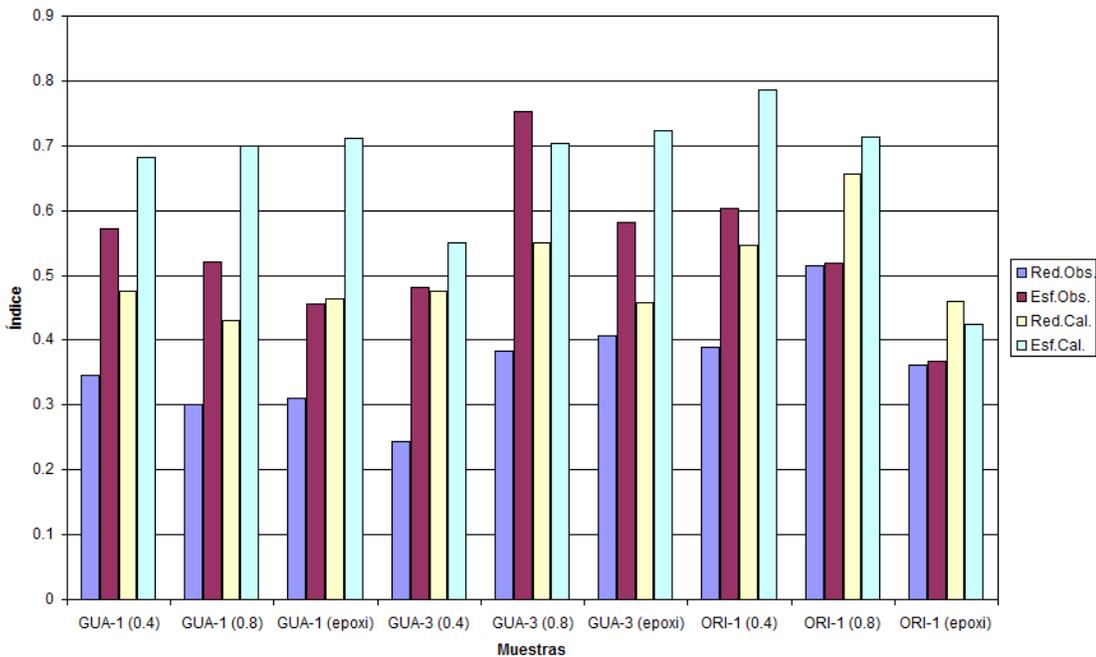


Figura 74. Comparación entre índices de redondez y esfericidad promedios calculados y observados

La Tabla 13 muestra los valores promedios encontrados en cada subcuenca del río Guárico, la sub-cuenca de Camatagua presenta menor redondez, seguido por el embalse del río Guárico y la cuenca del río Orituco. En cuanto a la esfericidad, las observaciones son a la inversa, el río Orituco posee la menor esfericidad, seguido por la sub-cuenca de Camatagua y el embalse de Guárico. La esfericidad es un parámetro tridimensional definido como la relación entre la superficie que tendría una esfera del mismo volumen que la partícula y la superficie real de la partícula. En todas las muestras la esfericidad es mayor que el grado de redondez.

Tabla 13. Valores promedios de índices de redondez y esfericidad calculados y observados para cada muestra

Raster	VISUAL		CALCULADA	
	REDONDEZ	ESFERICIDAD	REDONDEZ	ESFERICIDAD
Cuenca Camatagua	0.319	0.515	0.456	0.697
Embalse Guárico	0.344	0.605	0.494	0.659
Cuenca del río Orituco	0.496	0.421	0.554	0.641

5.4 ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO

Los resultados mostrados en la tabla 14 indican que la subcuenca de Camatagua es la que posee menor área (2243 km²) pero mayor pendiente ($12 \pm 7.93^\circ$), elevación (671.49 ± 259.66 metros) y relieve (189.61 ± 104.68 m, 370.33 ± 174.47 m, 498 ± 214.88 m y 617.22 ± 237.56 m, para radios de 1, 3, 5 y 7 km). Seguidos por la sub-cuenca del Embalse de Guárico con área de 5744 km², pendiente de $4.21 \pm 5.47^\circ$, elevación de 260.6 ± 165.07 metros y relieves entre 58.7 a 285.7 metros. La cuenca del río Orituco es la que posee mayor extensión (8895 km²), menor pendiente ($2.31 \pm 4.17^\circ$), menor elevación (219.16 ± 156 m) y menor relieve oscilando entre 30.58 a 108.42 metros para los diferentes radios considerados.

La Tabla 15 indica que la sub-cuenca de Camatagua posee la mayor tasa de precipitación según los datos satelitales TRMM de la NASA procesados por Bookhagen (2010), estableciendo un promedio durante los años (2000-2012) de 1432 ± 284.86 mm/año, seguido por la cuenca del embalse de Guárico (1431.20 ± 249.18 mm/año) y la subcuenca del río Orituco (1051.45 ± 289.40 mm/año). En términos de índices de humedad uniforme (WI) y con precipitaciones (WIP) los resultados son muy similares (10.8-11.34 asumiendo la misma tasa de precipitaciones) y este tiende a aumentar de forma homogénea (18.05 a 18.36) para las tres subcuencas cuando la precipitación es incorporada a las ecuaciones. La cuenca que posee menor transporte de sedimentos (STI) es la sub-cuenca de Camatagua. La cuenca del río Orituco posee mayor índice de transporte de sedimentos y la sub-cuenca del embalse de Guárico

posee un índice de transporte de sedimentos intermedios, lo que significa que el tamaño de la cuenca es pequeño en comparación con la de Orituco, sin embargo como lo que se erosiona está muy cerca, y se deposita en los embalses, la mayoría, la capacidad de transporte de sedimentos es menor a la del río Orituco.

En cuanto a los valores de índices de erosión mostrados en la Tabla 16, la cuenca del embalse de Camatagua presenta la mayor tasa de erosión para cualquiera de los índices (TSP, USP y SSP) asumiendo precipitación uniforme y variable (TSPP, USPP, SSPP) en el tiempo. La Figura 81 ilustra la comparación en términos de índices de erosión para cada una de las cuencas estudiadas. Al incorporar la tasa de precipitaciones en los modelos de erosión se observa un incremento en estos índices, manteniendo la misma relación, es decir, la cuenca del embalse de Camatagua presenta los mayores índices, seguido por las sub-cuencas del embalse de Guárico y del río Orituco.

Los diferentes atributos primarios y secundarios del terreno resumidos en las tablas 14, 15 y 16 son presentadas en forma gráfica en las Figuras 74 a 80. La Figura 74 muestra el mapa de elevaciones con las tres subcuencas estudiadas.

La Figura 75 representa el mapa de pendientes, nótese en esta figura que las mayores pendientes se encuentran en la cuenca del embalse de Camatagua. Las Figuras 76, 77 y 78 ilustra los diferentes índices de erosión TSP, SSP y USP. Las Figuras 79 y 80 representan los índices de humedad (WI) y la capacidad de transporte de sedimentos (STI), respectivamente.

La Figura 82 muestra los valores de índices de humedad promedio registrado en cada sub-cuenca. Las sub-cuencas de Orituco y Guárico poseen valores muy similares en términos de índices de humedad con precipitación uniforme y variable. El embalse de Camatagua es el que posee menor índice de humedad, esto se relaciona

con el hecho de que posea la menor área, la mayor pendiente, y el mayor relieve lo cual hace difícil la acumulación de agua.

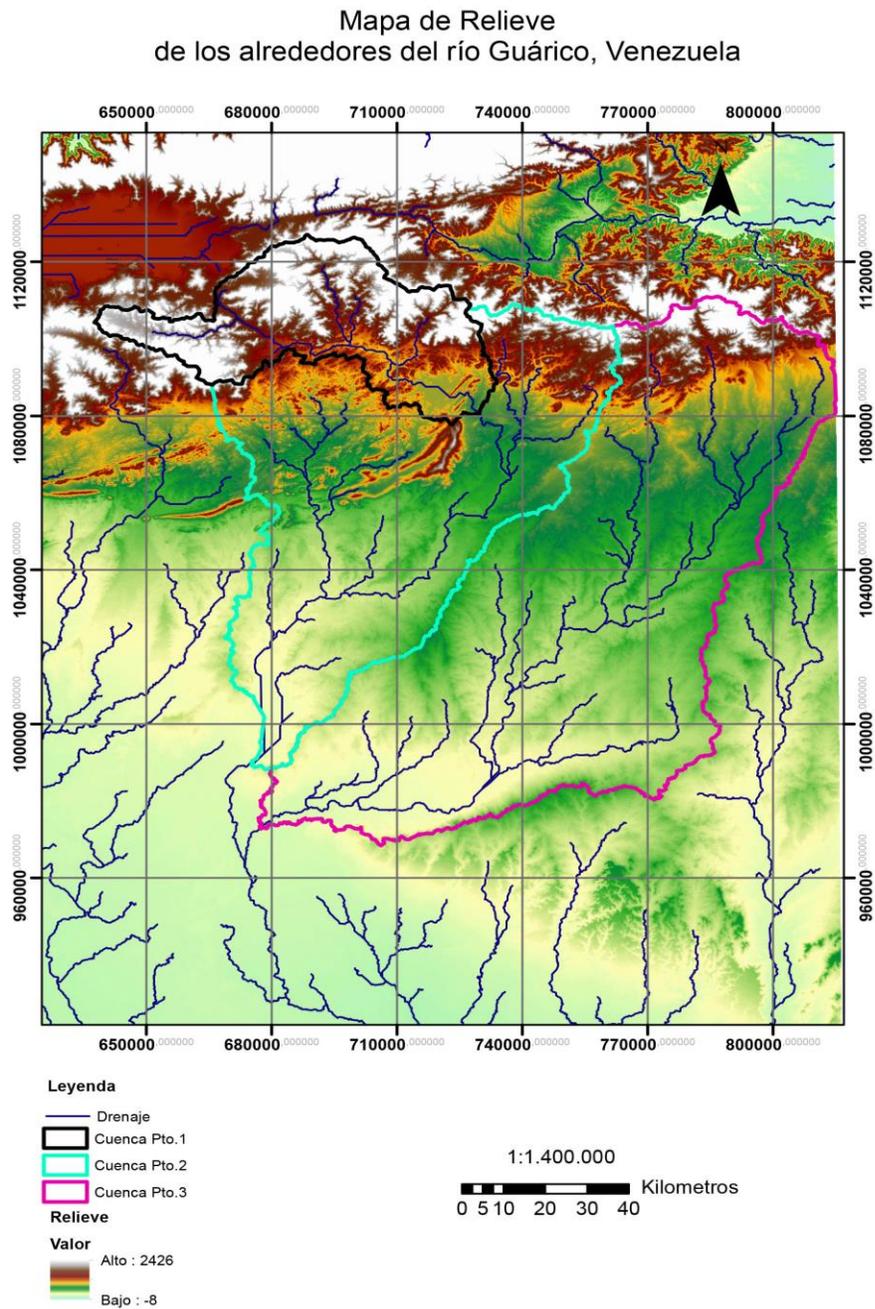


Figura 75. Mapa de relieve con las tres cuencas analizadas en este trabajo. Cuenca 1: Embalse de Camatagua. Cuenca 2: sub-cuenca de Guárico. Cuenca 3: sub-cuenca del río Orituco.

Tabla 14. Valores de atributos primarios del terreno para cada cuenca

Raster	Area (km ²)	Pendiente (°)		Elevación		Relieve 1km		Relieve 3km		Relieve 5km		Relieve 7km	
		mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd
Cuenca Camatagua	2243	12.86	7.93	671.49	259.66	189.61	104.68	370.33	174.47	498	214.88	617.22	237.56
Embalse Guárico	5744	4.21	5.47	260.6	165.07	58.87	72.79	116.12	128.66	257.38	236.4	329.23	285.7
Cuenca del río Orituco	8895	2.31	4.17	219.16	156	30.58	55.17	60.25	101.18	83.48	131.14	108.42	161.24

Tabla 15. Valores de precipitación y atributos secundarios del terreno para cada cuenca

Raster	PRECIPITACION		WI		WIP		STI		STIP	
	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd
Cuenca Camatagua	1432.43	284.86	10.80	2.60	18.05	2.62	8.50E-05	0.01	8.50E-05	0.01
Embalse Guárico	1341.20	249.18	11.18	2.82	18.36	2.83	1.40E-03	0.04	1.40E-03	0.04
Cuenca del río Orituco	1051.45	289.40	11.34	2.83	18.26	2.85	2.02E-03	0.05	2.02E-03	0.05

Tabla 16. Valores de índices de erosión para cada cuenca

Raster	TSP		USP		SSP		TSPP		USPP		SSPP	
	mean	sd										
Cuenca Camatagua	2.47E+10	4.75E+11	4.89E+06	1.73E+07	2.08E+04	3.23E+04	3.74E+13	7.13E+14	1.87E+08	6.75E+08	2.35E+05	3.70E+05
Embalse Guárico	1.20E+10	2.79E+11	1.54E+06	6.93E+06	8.34E+03	1.75E+04	1.71E+13	3.92E+14	5.92E+07	2.68E+08	9.42E+04	2.01E+05
Cuenca del río Orituco	8.44E+09	1.97E+11	9.04E+05	4.50E+06	5.49E+03	1.32E+04	9.66E+12	2.14E+14	3.23E+07	1.70E+08	5.80E+04	1.47E+05

Mapa de pendiente de los alrededores del río Guárico, Venezuela

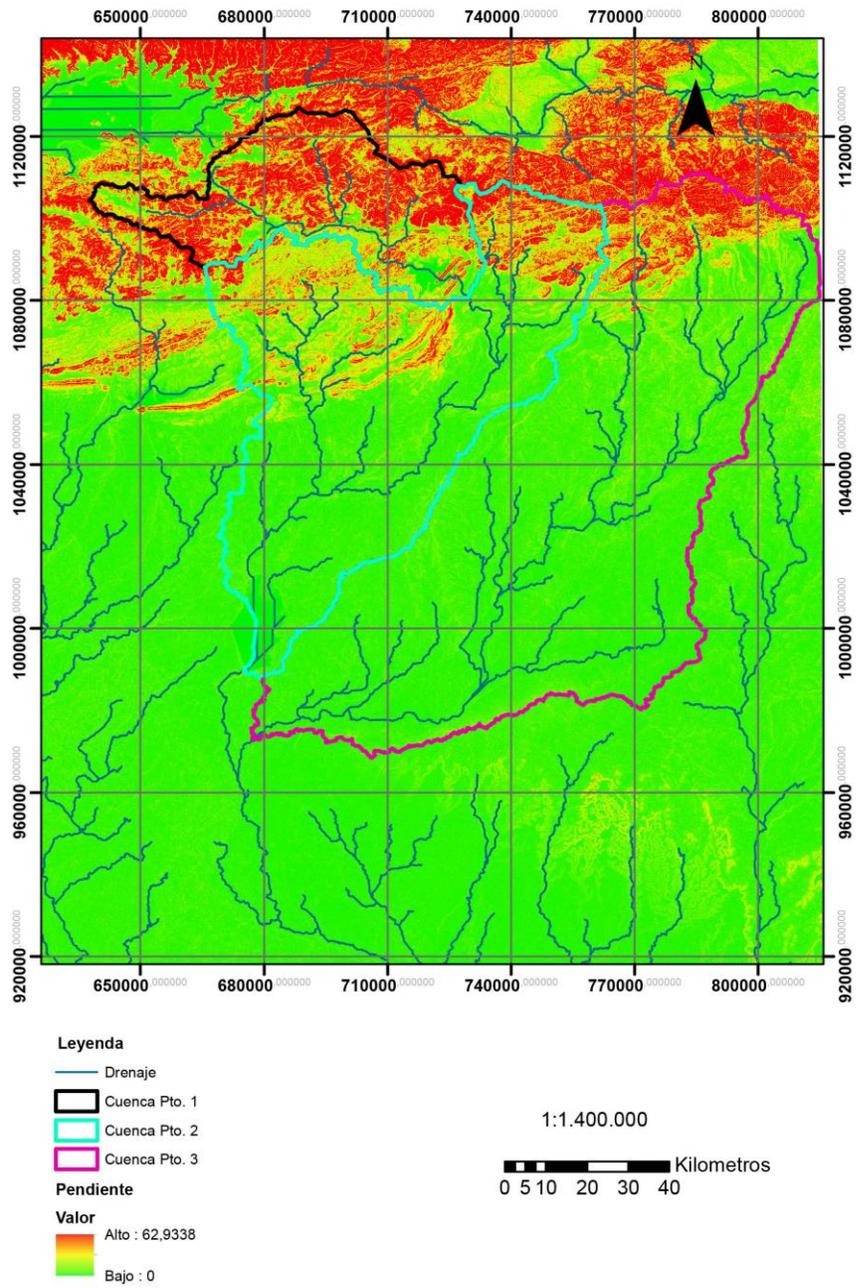


Figura 76. Mapa de pendientes a lo largo de las tres sub-cuencas estudiadas.

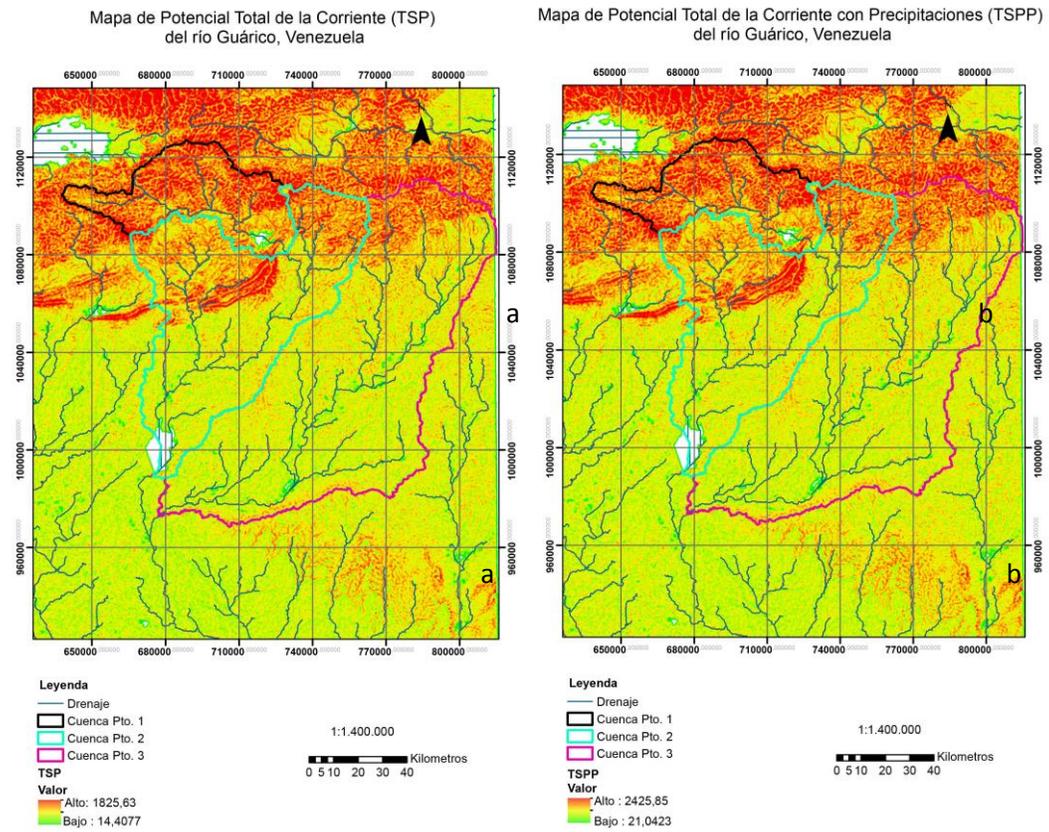
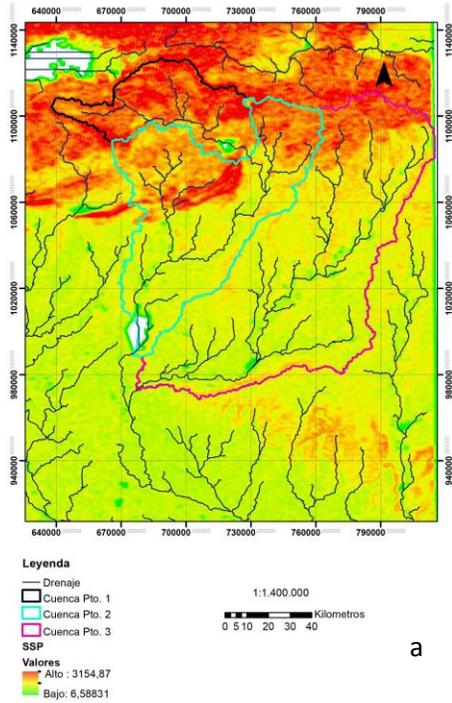


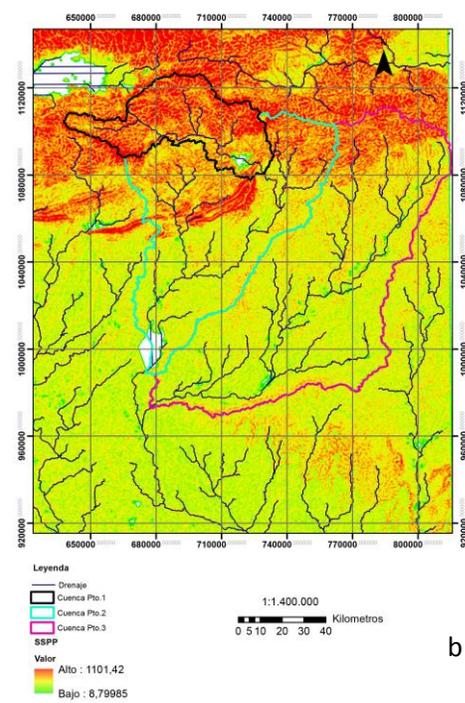
Figura 77. Mapa de índice de erosión: Potencial total de flujo (TSP) a) Uniforme, b) Con precipitación variable

Mapa de Potencial de Corte de la Corriente (SSP)
del río Guárico, Venezuela



a

Mapa de Potencial de Corte de la Corriente con Precipitaciones (SSPP)
del río Guárico, Venezuela



b

Figura 78. Mapa de índice de erosión: Poder de corte de la corriente (SSP) a) Uniforme, b) con precipitación variable

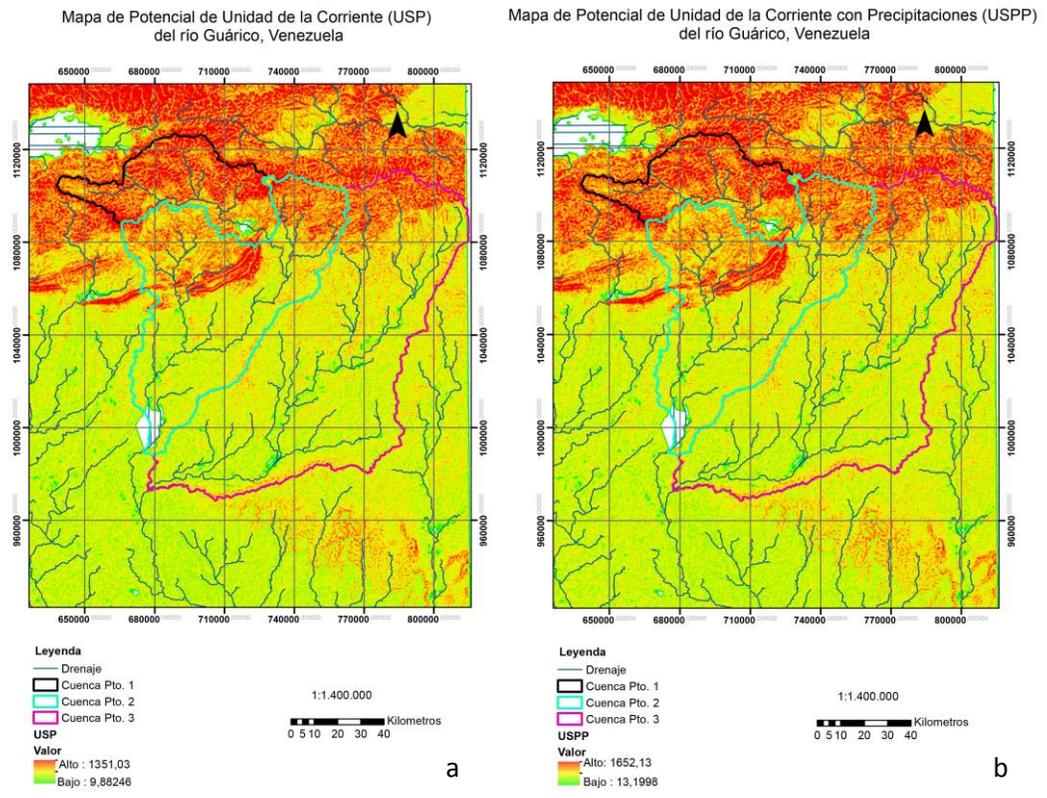


Figura 79. Mapa de índice de erosión: poder unitario de la corriente (USP) a) Uniforme, b) con precipitación variable

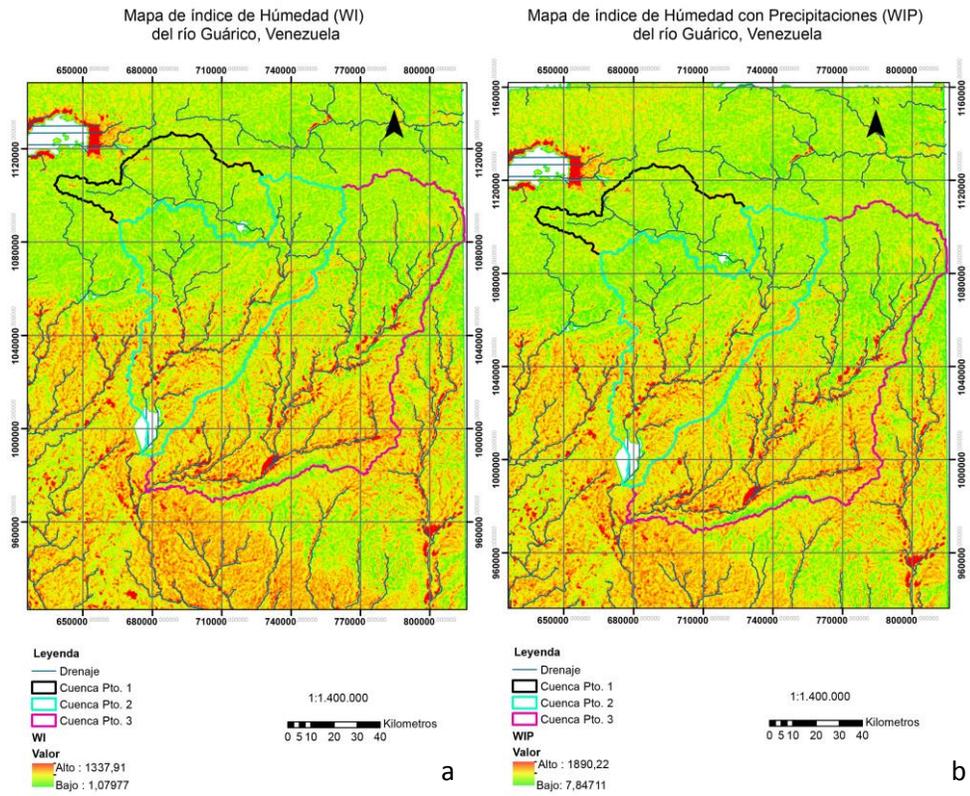


Figura 80. Mapa de índice de humedad (WI) a) Uniforme, b) con precipitación variable

Mapa de Índice de Transporte de Sedimento (STI) del río Guárico, Venezuela

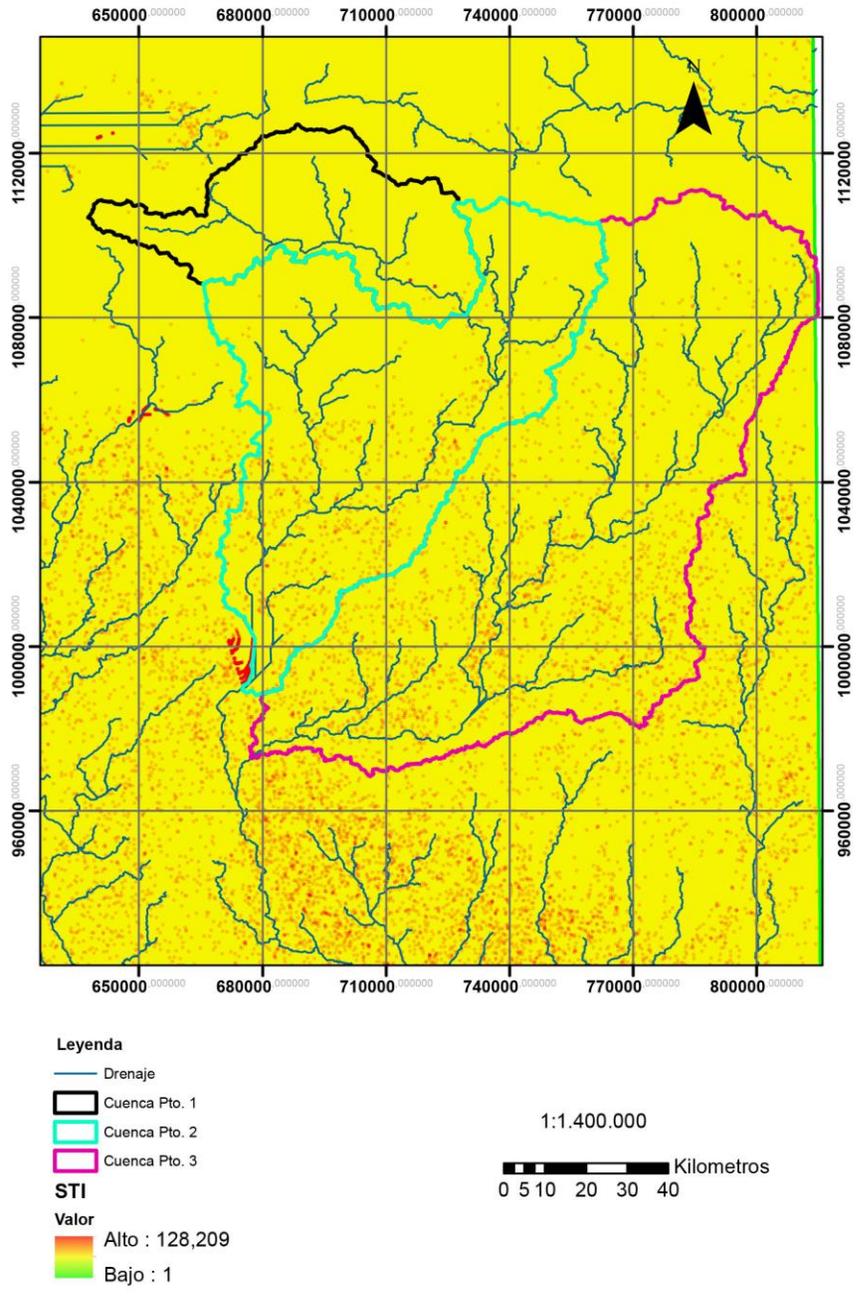


Figura 81. Mapa de índice de transporte de sedimentos (STI)

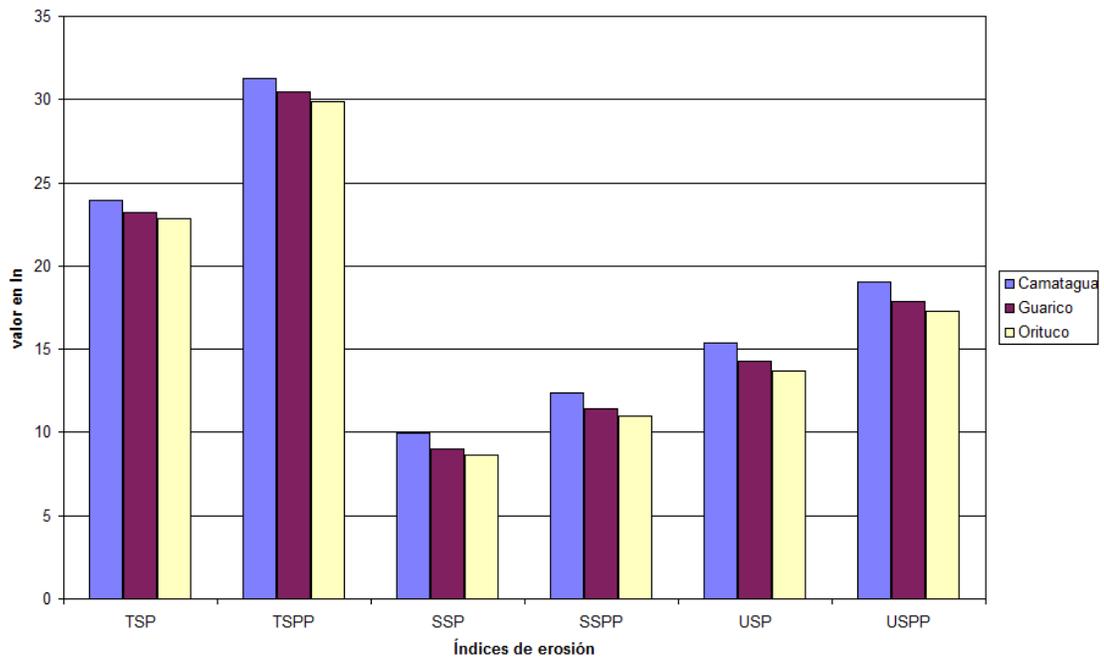


Figura 82. Comparación de índices de erosión promedios con precipitación uniforme y variable para cada cuenca.

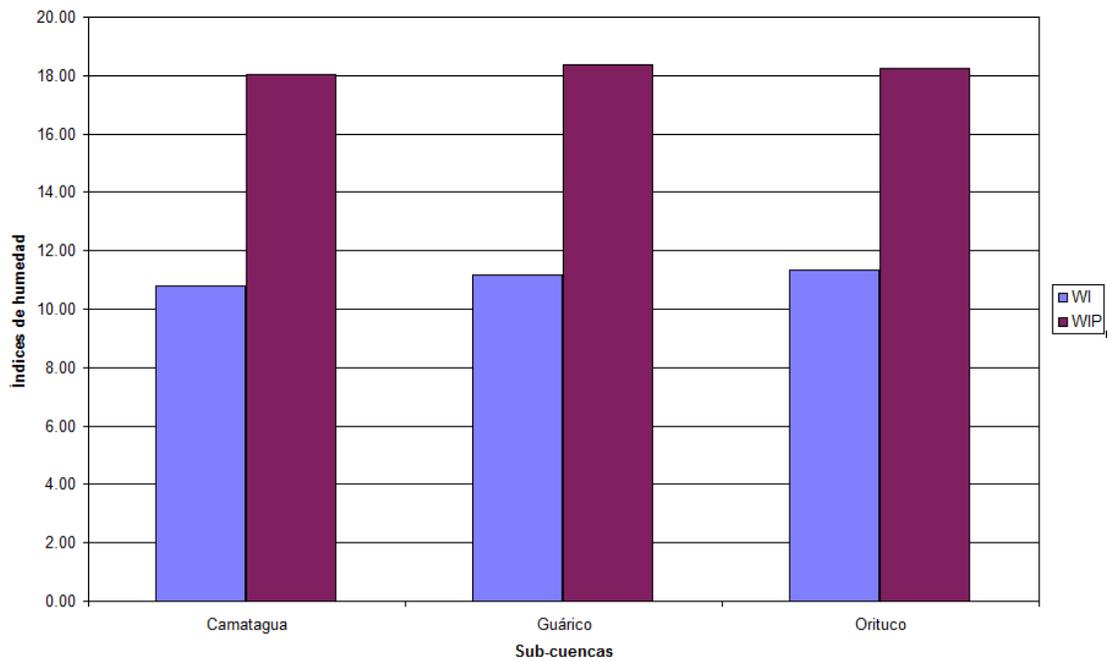


Figura 83. Comparación de índices de humedad para cada sub-cuenca.

Mapa Combinado: Estructuras, atributos primarios y secundarios con precipitaciones

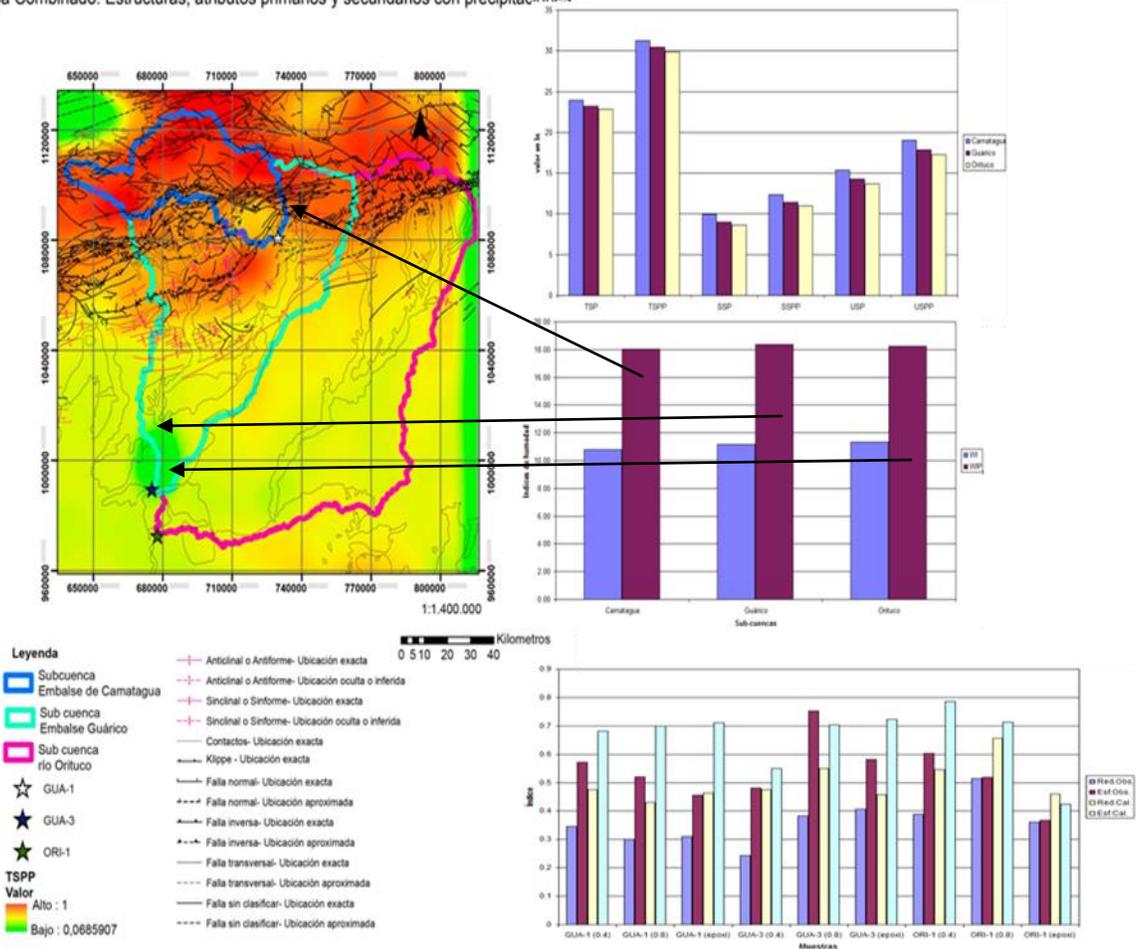
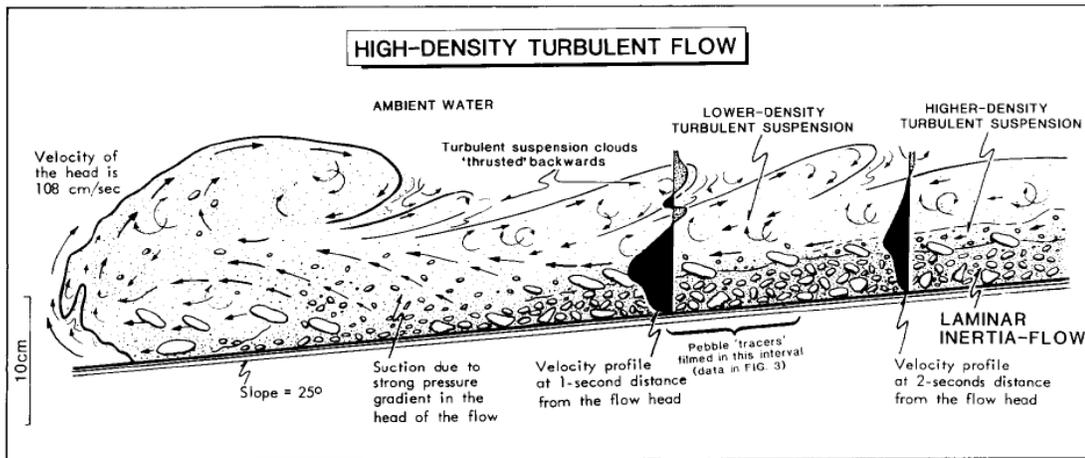


Figura 84. Mapa combinado: Estructuras, atributos primarios y secundarios con precipitaciones.

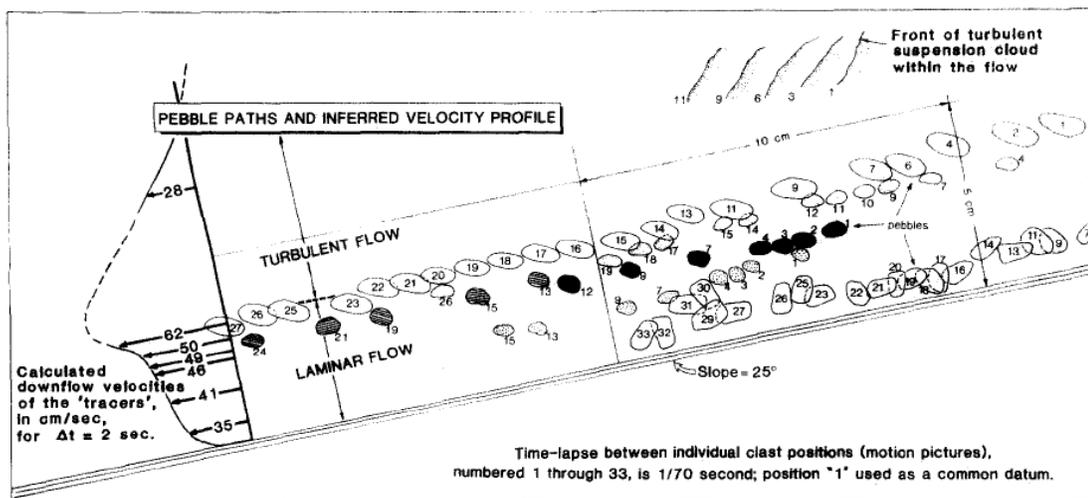
5.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para la discusión de los resultados no fue posible establecer correlaciones estadísticas como las presentadas por Bermúdez et al. (2012) principalmente porque el número de sub-cuencas estudiadas sólo representan tres puntos. Estadísticamente resulta fácil ajustar una recta a pocos puntos, por lo cual los coeficientes de correlación no arrojarían resultados confiables. Sin embargo en términos cuantitativos, el hecho de que la subcuenca del río Orituco posea los granos con mayor índice de redondez, baja pendiente, menor relieve, mayor índice de transporte de sedimentos, menores índices de erosión, y menores tasas de precipitación indica que los minerales pesados están siendo transportados desde sectores más lejanos de la Cordillera. Adicionalmente, la erosión registrada en la sub-cuenca no refleja la erosión que se pudiera estar produciendo en los posibles terrenos fuentes. Esto se correlaciona con el hecho de que en términos de contenido de minerales pesados, las muestras pertenecientes a esta sub-cuenca poseen una amplia gama de minerales en comparación con las otras dos subcuencas.

Con respecto a la Cuenca del Embalse de Guárico y la sub-cuenca de Camatagua, los valores similares de redondez corroboran la cercanía de la fuente. La alta tasa de erosión registrada en estas subcuencas se correlaciona con valores intermedios de esfericidad. Para materiales pulverizados y sometidos a la abrasión, los valores de esfericidad (0.6-0.7) serían muy parecidos a los valores observados y calculados para las muestras representativas de ambas cuencas. Al no haber variación entre los valores de esfericidad calculados por el programa, pareciera indicar que la abrasión entre esas subcuencas es casi la misma, y la posible pulverización sea la combinación de trituramiento por fallas presentes en la zona de estudio, combinadas con el tipo de formación geológica que se está erosionando. Otra posibilidad es que la alta esfericidad observada pudiera ser heredada de procesos de abrasión en corrientes turbidíticas y de la posición de la partícula dentro de las diferentes capas de flujo (Figura 83). En el caso particular de estas subcuencas, los materiales erosionados pertenecen a la Formación Guárico, la cual se depositó en un ambiente turbidico.



(a)



(b)

Figura 85. (a) Flujo turbulento de alta densidad en una corriente turbidítica. (b) Trayectorias de transporte de algunos clastos "trazadores". Los clastos más grande se mueven rápidamente por "deslizamiento" en la parte superior de la capa de flujo inercial. La variación entre forma/tamaño varían de acuerdo a la exposición de la partícula en las diferentes capas ("layers") del canal. (Tomado de Postma et al., 1988).

Los índices de humedad y capacidad de transporte de sedimentos indican que las tres subcuencas conformarían un sistema concatenado, en el cual el material es removido por la combinación de efectos climáticos y tectónicos de los sitios de mayor pendiente y relieve (orógenos al norte del Embalse de Guárico y de Camatagua), y transportados a sistemas con mayor capacidad para transportar y

acomodar sedimentos. Los mayores valores de erosión se encuentran en la sub-cuenca de Camatagua, la cual está muy cerca de la cadena montañosa y de las principales estructuras presentes en la región. Para esta sub-cuenca la erosión pudiera reflejar el efecto de movimientos a lo largo de fallas, remoción de material y acomodación del mismo, aguas abajo. En términos de exhumación, alrededor de las tres cuencas estudiadas se puede discriminar en la Figura 20, 2 fases de exhumación diferentes, una Oligocena-Miocena a la izquierda de la zona de estudio, y otra ocurrida durante el Mioceno para la región cercana al área de estudio Según (Bermúdez, com. pers.) lo que se puede interpretar de los datos de termocronología existentes (Kohn et al., 1984; Pérez de Armas, 2005).

El mapa combinado obtenido de la unión de las estructuras presentes en la zona y los índices de erosión con precipitaciones, dio como resultado la existencia de mayor erosión en la subcuenca del embalse de Camatagua, coincidiendo con ser la zona de mayor complejidad tectónica, en cuanto a la textura de los granos presente en la zona, las fallas presentes parecen reactivarse a diferentes períodos de tiempo por lo que el movimiento de las fallas causa la ruptura de las rocas, haciendo que vaya en contra de los resultados obtenidos de esfericidad y redondez. Los mismos sugieren un patrón de esfericidad y redondez heredados del proceso de depositación de la Formación. Si se rompen los granos esperamos que la redondez disminuya, en términos globales, Guárico y Camatagua presentan menos redondez no sólo porque la fuente esta cercana sino también porque podría ser producto del fallamiento, y el material es rápidamente transportado y depositado en el embalse. Además diferentes cambios en el flujo de partículas durante la depositación de la turbidita de la Formación Guárico pudiera moldear los granos de forma diferente.

La similitud en tasas de erosión posiblemente esté reflejando la similitud en los patrones de exhumación para ese sector. Sin embargo, es necesario fechar los minerales detríticos obtenidos en este trabajo con la finalidad de comparar la erosión a gran escala temporal con la erosión a corta escala.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que las tres sub-cuencas analizadas: Camatagua, Guárico y Orituco están trabajando de forma acoplada, es decir, las tres subcuencas conformarían un sistema concatenado, en el cual el material es removido por la combinación de efectos climáticos y tectónicos de los sitios de mayor pendiente y relieve, en este caso los orógenos ubicados al norte de cada una de las sub-cuencas y transportados a sistemas con mayor capacidad para transportar y acomodar sedimentos. Los mayores valores de erosión se encuentran en la sub-cuenca de Camatagua, la cual está muy cerca de la cadena montañosa y de las principales estructuras presentes en la región. Para esta sub-cuenca la erosión pudiera reflejar el efecto de movimientos a lo largo de fallas, remoción de material y acomodación del mismo, aguas abajo. En términos de exhumación, alrededor de las tres cuencas estudiadas las sub-cuencas de Camatagua y Guárico posiblemente experimenten 2 fases de exhumación diferentes, una Oligocena y otra Miocena. Mientras que la sub-cuenca del río Orituco posiblemente sufra una fase de exhumación continua durante el Mioceno.

En términos de contenidos mineralógicos y procedencia sedimentaria, puede decirse, que la sub-cuenca del río Orituco exhibe una mineralogía más diversa, con mayores valores de redondez, lo que parece indicar que esta cuenca de mayor área está recibiendo sedimentos de zonas muy alejadas, la erosión de esas zonas no puede ser detectada ya que se necesitarían estudios más detallados in-situ hacia el norte de este sector. Las sub-cuencas de Camatagua y Guárico poseen valores similares de redondez, pero su esfericidad tiende a ser mayor que las muestras del río Orituco. Quizás esto se deba al hecho de que la mayor parte del material proviene de la Formación Guárico la cual está integrada principalmente por depósitos turbidíticos tipo flysch y wildflysh. La esfericidad observada y calculada para estas dos sub-cuencas es mucho mayor que la encontrada en el río Orituco, quizás esto refleje un proceso anterior (heredado) de abrasión o retrabajo producido en corrientes tipo

turbiditas. Adicionalmente, el hecho de que al norte del embalse de Camatagua y de Guárico existan diversos sistemas de fallas ayudan a pulverizar el material, el cual es transportado y depositado rápidamente en zonas cercanas a los embalses.

En cuanto a la metodología usada se puede decir que es robusta para identificar la relación entre la erosión y la forma como los granos son transportados. Cuando se combinan con las edades termocronológicas (trabajo en proceso) los resultados son de alta resolución según lo demostrado por Bermúdez et al., 2012. quien utilizando 7 muestras detríticas demostró que éstas reproducen con una mayor confiabilidad las 100 muestras in-situ, fechadas por el anteriormente.

El software usado, Arcgis, es adecuado para este trabajo debido a que permite incorporar expresiones matemáticas, gracias a la programación en python. Cabe destacar que se usaron otros software como prueba y ninguno cumplió mejor las expectativas a la hora de realizar el cálculo del modelado geomorfológico.

En el futuro es recomendable terminar de fechar por el método de trazas de fisión en apatitos y circones las muestras de sedimentos modernos de ríos separadas en este Trabajo Especial de Grado, y comparar estas edades con edades in-situ existentes en la zona.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adams, A.E., MacKenzie, W.S. and Guilford, C. 1984. *Atlas of Sedimentary Rocks under the Microscope*, Longman, Harlow.

Allen, P. *From landscapes into geological history*, *Nature* 451, 274-276

ArcGis., 2011, ArcGis desktop 10.0

<http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/009z00000062000000.htm>

Audemard, F., Mbachette, m., Cox, j., Dart, r. Andhaller, h. (2000). *Map and database of quaternary faults and folds in venezuela and its offshore regions*. USGS.open-file report 00-0018

Bastidas y Méndez (2006). *Estudios de porosidad de núcleos usando análisis e imágenes visuales en la Formación Misoa en los campos Ceuta, Barua y Motatán del lago de Maracaibo*, 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, 180 p.

Beck, Ch., 1977. *Geología de la Faja Piemontina del Frente de Montañas en el noreste del Estado Guárico, Venezuela*. V Congr. Geol. Venezolano, 2: 759-786.

Beck, C., 1986. *Géologie de la chaîne Caraïbe au méridien de Caracas (Venezuela)*. Société Géologique du Nord, Villeneuve d'Ascq, Francia, 462 p.

Bell J. 1966, *Mapa Geológico de Camatagua*, Creole Petroleum Corporation Caracas. Escala 1: 50.000

Bermúdez, M.A. (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., van der Beek, P., Bernet, M. (2012). *Strong tectonic and weak climatic control on exhumation rates in the Venezuelan Andes*, doi:10.1130/L212.1

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. Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V., Vol. 22, N° 3, 73–84 P.

Bookhagen, B. (2010). *High resolution spatiotemporal distribution of rainfall seasonality and extreme events*. based on a 12-year TRMM time series, in review.(1998-2009).<http://www.geog.ucsb.edu/~bodo/TRMM/>. (último acceso en julio-agosto 2013)

Camacho D., Pedro P. 2004, *Ubicación y caracterización de fallas selladas por sedimentos a partir de evaluación geofísica integrada, en las zonas de Villa de Cura (falla del Río Guárico) y Barlovento (falla Los Colorados)* Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geofísico, inédito, 121 P.

CBM- Centro de Biología Molecular , 2011, *Herramienta de contaje de partículas* <http://www.cbm.uam.es>

Coello V., 2005, “*Significado tectónico y procedencia de la formación Guárico a través de análisis petrográfico y minerales pesados, Venezuela norcentral*” 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, 264 P.

Coello R., 2005, “*Integración geológica de la región Bobare-Farriar, entre los estados Lara y Yaracuy, Venezuela*” 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, 190 P.

Creole Petroleum Corporation, 1965, *Mapa de superficie Estado Guarico, Venezuela*, (D7) . Escala 1: 100.000

Creole Petroleum Corporation, 1965, *Mapa de superficie Estado Guarico, Venezuela*, (E7) . Escala 1: 100.000

Creole Petroleum Corporation, 1965, *Mapa de superficie Estado Guarico, Venezuela*, (F7) . Escala 1: 100.000

Creole Petroleum Corporation, 1965, *Mapa de superficie Estado Aragua, Venezuela*, (E8). Escala 1: 100.000

Dietrich, W. Bellugi, D. Sklar, L. Stock, J. Heimsath, A. Roering, J. 2003. *Geomorphic Transport Laws for Predicting Landscape Form and Dynamics*, American Geophysical Union, 30 P.

Enciclopedia Microsoft® Encarta® Online 2007, de la World Wide Web: <http://es.encarta.msn.com> © 1997-2007 Microsoft

Felicísimo, A.M. (1994) *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en ciencias ambientales* 118 pp. (<http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/libromdt.pdf>)

Felicísimo, A.M. (1999) *La utilización de los MDT en los estudios del medio físico*, 16 pp. (http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/ITGE_150a.pdf)

Ferreira, T. & Rasband, W. 2012. *ImageJ User Guide*: IJ 1.46 P.

Flores J. Méndez A., 2005, “*Correlación estratigráfica y geocronológica de las quebradas Hoyos y Vichú por el metodo de huellas de fisión, formaciones Isnotú y 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., 2012. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*. Elsevier / Academic Press, Amsterdam, 379 P.

González R. 2006, *Atlas geográfico histórico del estado Aragua, República Bolivariana de Venezuela : contiene material pedagógico y turístico de sus 18 municipios*, Editorial El Aragüeño, Venezuela 133 P.

Greenlee, D. D. 1987. "Raster and Vector Processing for Scanned Linework." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 53 (10): 1383–1387 P.

Guinness, P. 1999 *Advanced Geography: Concepts and Cases Abingdon*, Hodder and Stoughton.

Hackley, p.c., Urbani, f., Karlsen, a., Garrity, c. 2005. *mapa geológico de Venezuela*. open file 2005-1038. USGS, 2 P.

Hess, H. H. 1959. *Notes on operation of Frantz Isodynamic Magnetic Separator*: S.G. Frantz Co. Instrument Instruction Booklet, 1-6 P.

Hodgkinson, J.H., McLoughlin, S. & Cox, M.E. 2006. *The influence of structural grain on drainage in a metamorphic sub-catchment: Laceys Creek, southeast Queensland, Australia*. *Geomorphology*, 81: 394-407 P.

Jenson, S. K. y J. O. Domingue. 1988. "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11): 1593–1600 P.

Kerr, P. 1965. *Mineralogía óptica*, McGraw-Hill Book company, INC, New York, Toronto. 14-17 P.

Kohn, B.P., Shagam, R., and Subieta, T., 1984, *Results and preliminary implications of sixteen fission-track ages from rocks of the western Caribbean Mountains, Venezuela*, in Bonini, W.E., Hargraves, R.B., and Shagam, R., eds., *The Caribbean–South American plate boundary and regional tectonics*: Geological Society of America Memoir 162, 415–421 P.

Krumbein, W.C., 1941. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology* 11 (2), 64–72 P.

Li, Z., Zhu, Q. and Gold, C. (2005): *Digital terrain modeling: principles and methodology*. CRC Press: Boca Raton, FL, 323 P.

Lopez E. 2004. *Análisis de imagen* Universidad de Salamanca <http://audiolab.usal.es/Documentos/Docencia/Master%20Neurociencias.pdf>

Machado D., Puche M., Viloria J. , Parra M., Primera M. 2007 *Geoespacialización de información climática mediante la utilización de sistemas de información geográfica. caso cuenca alta del río guárico*. Proyecto Manejo Integral de la Cuenca Alta del Río Guárico, Núcleo de Investigación y Excelencia, Proyecto Iniciativa Científica del milenio. UCV. UNERG.INIA.

UPEL <http://ceer.isa.utl.pt/cyted/venezuela2008/Geoespacializacion.pdf>

Mange, M. and Maurer H. 1992. *Heavy minerals in clours*, Chapman and Halla, New York, 128 P.

Mark, D. M. 1988. *"Network Models in Geomorphology."* *Modelling Geomorphological Systems*, ed. M. G. Anderson. New York: John Wiley. 73–97 P.

Martelo, M, 2003, *La precipitación en Venezuela y su relación con el sistema climático*. INAMEH.

http://www.inameh.gob.ve/documentos/precipitacion_venezuela_relacion_sistema%20climatico.pdf

Mayer, L., (1990) *Introduction to Quantitative Geomorphology: an exercise manual*, Englewood Cliffs NJ, Prentice Hall, 380 P.

Mederos V. Ignacio J, 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. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geofísico, inédito, 122 P.

Méndez, W., Córdova, J., Cartaya, S., y Pacheco, H., (2007). *Geomorfología y respuesta hidrológica de la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, Estado Vargas, Venezuela*. Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V., Vol. 22, N° 1., 5–20 P.

Mendoza, V. 2005, *Geología de Venezuela, Tomo II. Cretácico, Terciario y Reciente Sedimentario de Venezuela*. UDO. Escuela de Ciencias de la Tierra. Ciudad Bolívar.

Molnar P. & England P., 1990. *Late cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: Chicken or egg?*, nature 346, 29-34 P.

Moore, I. and Burch, G. (1986) *Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation*. Soil Society of America Journal, 50, 1294 – 1298 P.

Morales A. y Viloría J. 2005 *morales g. interrelación entre unidades geológicas y propiedades del suelo en la cuenca alta del río Guárico, Venezuela*. revista de la sociedad venezolana de la ciencia del suelo y del instituto de edafología de la facultad de agronomía de la Universidad Central de Venezuela, vol 13, nº1.

Nagle, G. (2000) *Advanced Geography*, Oxford University Press.

Olaya Ferrero, V. (2004) *Hidrología Computacional y Modelos Digitales de Terreno* 365 P.

PDVSA-LÉXICO ESTRATIGRÁFICO (2010). *Fm Guárico, Fm Mucaria, Fm Roblecito y Fm Quebradon*. <http://www.pdvsa.com/lexico/u10w.htm> consulta 12 Julio 2011.

Pérez de Armas, J., 2005, *Tectonic and thermal history of the western Serranía del Interior foreland fold and thrust belt and Guárico basin, north-central Venezuela: Implications of new apatite fission-track analysis and seismic interpretation*: Geological Society of America Special Papers, v. 394, p. 271-314 P.

Pindell et al., 2009, *Clastic domains of sandstones in central/eastern Venezuela, Trinidad, and Barbados: heavy mineral and tectonic constraints on provenance and palaeogeography*. Geological Society of London, Special Publication.67 P.

Shreve, R.L., 1967. *Infinite topologically random channel networks*. Journal of Geology 75, 178–186 P.

Shreve, R.L., 1966. *Statistical law of stream numbers*. Journal of Geology 74, 17–37 P.

Tarboton, D. G., R. L. Bras, e I. Rodriguez-Iturbe. 1991. *On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data*. Hydrological Processes. 5: 81–100 P.

Tardáguila, P. 2002.”*Integración de la geología de la zona de Choroni-Puerto Maya y Maracay, estados Aragua y Carabobo*” Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo 161 P.

Tiago Ferreira T., and Rasband Wayne 2012. ImageJ User Guide IJ 1.46 r (<http://rsbweb.nih.gov/ij/docs/user-guide.pdf>).

Toribio E. Guillén W. 2006 “*Compilación, digitalización y actualización geológica-cartográfica de la zona Nor-Central estados Guárico y Aragua* ” Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo 225 P.

Tutte, W.T. (2001), *Graph Theory*, Cambridge University Press, p. 30, ISBN 978-0-521-79489-3.

- Urbani, F., Camposano, L., Audemard, F., Lalleman, H. 2005, *Cordillera de la Costa, Venezuela: Geological field trip. Venezuela*. 5-6, P.
- Vila M. 1957 *Geografía de Venezuela marco texto para la educación secundaria y normal*, Fundación Eugenio Mendoza, Venezuela 407 P.
- Vila M. 1965 *Aspectos geográficos del Estado Guárico*, Corporación Venezolana de Fomento, División de Estudios Generales, Venezuela 235 P.
- Vila M. 1966 *Aspectos geográficos del Estado Aragua*, Corporación Venezolana de Fomento, División de Estudios Generales, Venezuela 260 P.
- Weibel, R. & Heller, M. (1991) *Digital Terrain Modelling Geographical Information Systems: Principles and Applications*, John Wiley & sons pp. 269297 (<http://www.wiley.co.uk/wileychi/gis/resources.html>)
- Wood, J. (1996) *The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models* (<http://www.soi.city.ac.uk/jwo/phd/>)
- Wilson, J.P.; Gallant, J.C. (2000). "Chapter 1". In Wilson, J.P., and Gallant, J.C. (Eds.). *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York: Wiley. 1–27 P. ISBN 0-471-32188-5. Retrieved 2007-02-16.
- Whipple, K. 2004. *Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens*. Department of Earth, Atmospheric and Planetary Science, Massachusetts Institute of Technology, Earth Planet. Sci. 32:151–85, 35 P.
- Yoris, F. y M. Ostos (1997) *Geología de Venezuela: Geología general y Cuencas Petrolíferas*. En: Singer, J., ed., WEC 1997. Evaluación de pozos: Schlumberger-Surencó C.A. 1ra ed., Jolley Printing, Texas.

ANEXOS

Fecha:

N° de muestra:

Textura

Redondez (%)	
Muy Anguloso (0-0,2)	
Anguloso (0,2-0,4)	
Sub Anguloso (0,4-0,6)	
Sub Redondeado (0,6-0,9)	
Redondeado (1)	

Esfericidad	(%)
Alta Esfericidad (0,7-0,9)	
Media Esfericidad (0,3-0,7)	
Baja Esfericidad (0-0,3)	

Tamaño de Grano (mm):											
Arena Media				Arena Fina				Arena Muy Fina			
0,42	0,35	0,3	0,25	0,21	0,177	0,149	0,125	0,105	0,088	0,007	0,063

Procesos

	Alteración	Mineralización	Recristalización
Feldspatos			
Muscovita			
Biotita			
Otros Minerales			

Zonación				
Crecimiento				
Inclusiones				
Fracturas				
Bordes recubierto				

Tabla A1. Reporte ejemplo utilizado para el estudio de los minerales

		Abundancia	Tamaño de Grano											Procesos				Esfericidad	Redondez									
			Arena Media				Arena fina				Arena muy Fina			Alteración	Inclusión	Fractura	Recristalización											
			0,42	0,35	0,3	0,25	0,21	0,177	0,149	0,125	0,105	0,088	0,0074							0,0625								
No Magnéticos	Zircón																											
	Rutilo	6				3	1		2									2			0.8	0.6						
	Anatasa	2					1		1									2			0.9	0.1						
	Brookita	4					3		1									2			0.4	0.4						
	Pirita																											
	Corindon																											
	Topacio																											
	Olivino	4							1	2														0.8	0.5			
	Espinela																											
	Glaucofano																											
	Sillimanita																											
	Anidrita																											
	Berilio																											
	Cloritoide																											
Cuarzo	15					4	4		7									6			0.7	0.5						
Magnéticos	Esfena	6							1	5														0.9	0.7			
	Estaurilita																											
	Leucoxeno																											
	Apatito	1								1								1				0.3	0.7					
	Andalusita																											
	Monazita	8									5	3						3				0.7	0.5					
Xenotime																												
Fragmento de roca		3						3																0.6	0.8			

Tabla A3. Identificación y características de los granos, muestra GUA-1 (0.8)

	Abundancia	Tamaño de Grano												Procesos						
		Arena Media				Arena fina				Arena muy Fina				Alteración	Inclusión	Fractura	Recristalización	Esfericidad	Redondez	
		0,42	0,35	0,3	0,25	0,21	0,177	0,149	0,125	0,105	0,088	0,0074	0,0625							
No Magnéticos	Zircón																			
	Rutilo	4					3		1								2	0.6	0.5	
	Anatasa																			
	Brookita	1					1										1	0.3	0.1	
	Pirita																			
	Corindón																			
	Topacio																			
	Olivino	2								2									0.6	0.2
	Espinela																			
	Glaucofano	1									1								0.5	0.9
	Horblenda	1									1								0.9	0.3
	Anidrita																			
	Berilio																			
Cloritoide																				
Cuarzo	17						7	5	5							7	0.6	0.6		
Magnéticos	Esfena	14					2	8	4							4		0.8	0.6	
	Estaurilita																			
	Leucoxeno																			
	Apatito																			
	Andalusita																			
	Monazita	5							2	3						3	5	0.5	0.6	
Xenotina	1									1							0.3	0.3		
Fragmento de roca	5						1		4								0.5	0.6		

Tabla A4. Identificación y características de los granos, muestra GUA-1 (epóxica)

		Abundancia	Tamaño de Grano											Procesos				Esfericidad	Redondez								
			Arena Media				Arena fina				Arena muy Fina			Alteración	Inclusión	Fractura	Mieralización										
			0,42	0,35	0,3	0,25	0,21	0,177	0,149	0,125	0,105	0,088	0,0074							0,0625							
No Magnéticos	Zircón																										
	Rutilo	12						8	3	1							6	10	0.6	0.4							
	Anatasa																										
	Brookita																										
	Pirita																										
	Corindon																										
	Topacio																										
	Olivino	11						2	9										10	0.8	0.6						
	Espinela																										
	Glaucofano																										
	Sillimanita																										
	Anidrita																										
	Berilio																										
	Cloritoide																										
	Cuarzo																										
Magnéticos	Esfena	1									1						1	1					0.3	0.3			
	Estaurilita																										
	Leucoxeno																										
	Apatito																										
	Andalusita																										
	Monazita																										
	Xenotina																										
Fragmento de roca		21						17	4										21	0.7	0.5						

Tabla A5. Identificación y características de los granos, muestra GUA-3 (0.4)

		Abundancia	Tamaño de Grano												Procesos				Esfericidad	Redondez		
			Arena Media				Arena fina				Arena muy Fina				Alteración	Inclusión	Fractura	Mineralización				
			0,42	0,35	0,3	0,25	0,21	0,177	0,149	0,125	0,105	0,088	0,0074	0,0625								
No Magnéticos	Zircón	1									1						1			0.3	0.7	
	Rutilo	9						6		3								3	5	0.5	0.6	
	Anatasa																					
	Brookita	3						2		1										0.7	0.2	
	Pirita																					
	Corindon																					
	Topacio																					
	Olivino																					
	Espinela																					
	Glaucofano	1						1													0.3	0.1
	Augita	1									1								1		0.3	0.1
	Anidrita	1									1										0.9	0.5
	Berilio																					
	Cloritoide																					
Cuarzo	16						9		5	2									14	0.7	0.5	
Magnéticos	Esfena	10							6	4										7	0.7	0.4
	Estaurilita																					
	Leucoxeno																					
	Apatito																					
	Andalusita																					
	Monazita	2								2							2				0.3	0.7
	Xenotina	1								1											0.9	0.7
Fragmento de roca	5						4			1									5	0.6	0.7	

Tabla A6. Identificación y características de los granos, muestra GUA-3 (0.8)

		Abundancia	Tamaño de Grano											Procesos				Esfericidad	Redondez		
			Arena Media				Arena fina				Arena muy Fina			Alteración	Inclusión	Fractura	Mineralización				
			0,42	0,35	0,3	0,25	0,21	0,177	0,149	0,125	0,105	0,088	0,0074							0,0625	
No Magnéticos	Zircón	1								1							1			0.3	0.9
	Rutilo	4						1	3									2		0.4	0.3
	Anatasa																				
	Brookita																			0.3	0.1
	Pirita																				
	Corindon																				
	Topacio																				
	Olivino																				
	Espinela																				
	Glaucofano																				
	Sillimanita																				
	Anidrita	2								1	1									0.5	0.7
	Berilo																				
Cloritoide																					
Cuarzo	5								4	1							1		0.7	0.4	
Magnéticos	Esfena	21						4	7	10								17	0.8	0.6	
	Estaurilita																				
	Leucoxeno																				
	Apatito																				
	Andalusita																				
	Monazita	15								9	5	1					3	9	0.8	0.7	
Xenotina																					
Fragmento de roca	1									1									0.3	0.1	

Tabla A7. Identificación y características de los granos, muestra GUA-3 (epóxica)

	Abundancia	Tamaño de Grano												Procesos				Esfericidad	Redondez	
		Arena Media				Arena fina				Arena muy Fina				Alteración	Inclusión	Fractura	Recristalización			
		0,42	0,35	0,3	0,25	0,21	0,177	0,149	0,125	0,105	0,088	0,0074	0,0625							
No Magnéticos	Zircón	2						1		1						2			0.4	0.3
	Rutilo	12			1	4		3	2	1	1						5		0.5	0.3
	Anatasa	1									1					1			0.5	0.4
	Brookita	5						1		3	1					1	2			
	Pirita																			
	Corindon																			
	Topacio																			
	Olivino	1						1											0.9	0.1
	Fluorita																			
	Glaucofano	13				2		2		7	2						13		0.5	0.3
	Sillimanita																			
	Anidrita																			
	Berilio																			
	Cloritoide	4						2			2						4		0.6	0.3
Cuarzo																				
Magnéticos	Esfena	1								1						1		0.3	0.7	
	Estaurilita																			
	Leucoxeno																			
	Apatito																			
	Andalusita																			
	Monazita																			
Xenotime																				
Fragmento de roca	11					6	3			2								0.6	0.5	

Tabla A8. Identificación y características de los granos, muestra ORI-1 (0.4)

	Abundancia	Tamaño de Grano												Procesos				Esfericidad	Redondez	
		Arena Media				Arena fina				Arena muy Fina				Alteración	Inclusión	Fractura	Recristalización			
		0,42	0,35	0,3	0,25	0,21	0,177	0,149	0,125	0,105	0,088	0,0074	0,0625							
No Magnéticos	Zircón	3					1		2							3			0.8	0.7
	Rutilo	24			6		9	2	7								20		0.5	0.4
	Anatasa	2					1		2								3		0.6	0.1
	Brookita	3					1		2							1	2		0.4	0.4
	Pirita																			
	Corindon																			
	Topacio																			
	Olivino																			
	Espinela	1									1					1			0.9	0.1
	Glaucofano																			
	Sillimanita																			
	Anidrita																			
	Berilio	2					2									2			0.9	0.9
	Cloritoide																			
Cuarzo	1				1											1		0.3	0.5	
Magnéticos	Esfena	1								1						1		0.1	0.9	
	Estaurilita																			
	Leucoxeno																			
	Apatito	1																0.3	0.7	
	Andalusita																			
	Monazita	4								1					1			0.6	0.5	
Xenotina	4																0.4	0.8		
Fragmento de roca	4				6		2		2									0.3	0.4	

Tabla A9. Identificación y características de los granos, muestra ORI-1 (0.8)

		Abundancia	Tamaño de Grano											Procesos				Esfericidad	Redondez		
			Arena Media				Arena fina			Arena muy Fina				Alteración	Inclusión	Fractura	Recristalización				
			0,42	0,35	0,3	0,25	0,21	0,177	0,149	0,125	0,105	0,088	0,0074							0,0625	
No Magnéticos	Zircón	2							2							2			0.5	0.9	
	Rutilo	18				6		3		5	4						13		0.3	0.6	
	Anatasa																				
	Brookita	1						1											0.3	0.1	
	Pirita																				
	Corindon																				
	Topacio																				
	Olivino																				
	Espinela																				
	Glaucofano																				
	Sillimanita																				
	Anidrita																				
	Berilio	2							2								2			0.9	0.1
	Cloritoide																				
Cuarzo	7							2		5							3		0.6	0.5	
Magnéticos	Esfena																				
	Estaurilita																				
	Leucoxeno																				
	Apatito	6								2	4								0.3	0.7	
	Andalusita																				
	Mohazita	3									2		1				3		0.5	0.9	
Xenotina																					
Fragmento de roca		11					6	3			2								0.6	0.7	

Tabla A10. Identificación y características de los granos, muestra ORI-1 (epóxica)

Muestra GUA-1 (0.4)

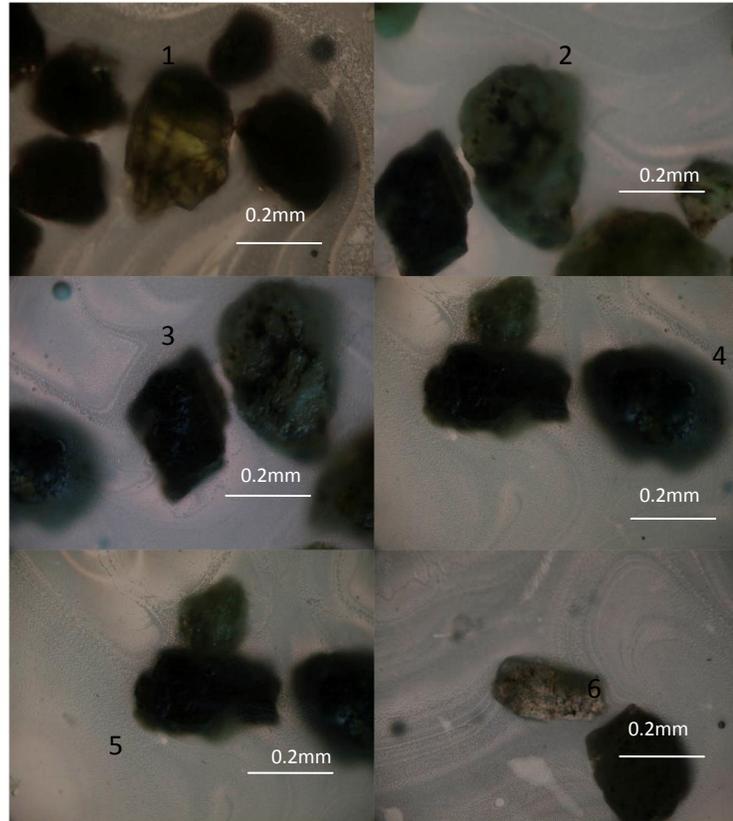


Figura A1. 1.-Augita 2.- Cuarzo, 3.- Rutilo, 4.-Fragmento de roca, 5.-Rutilo, 6.-Monacita

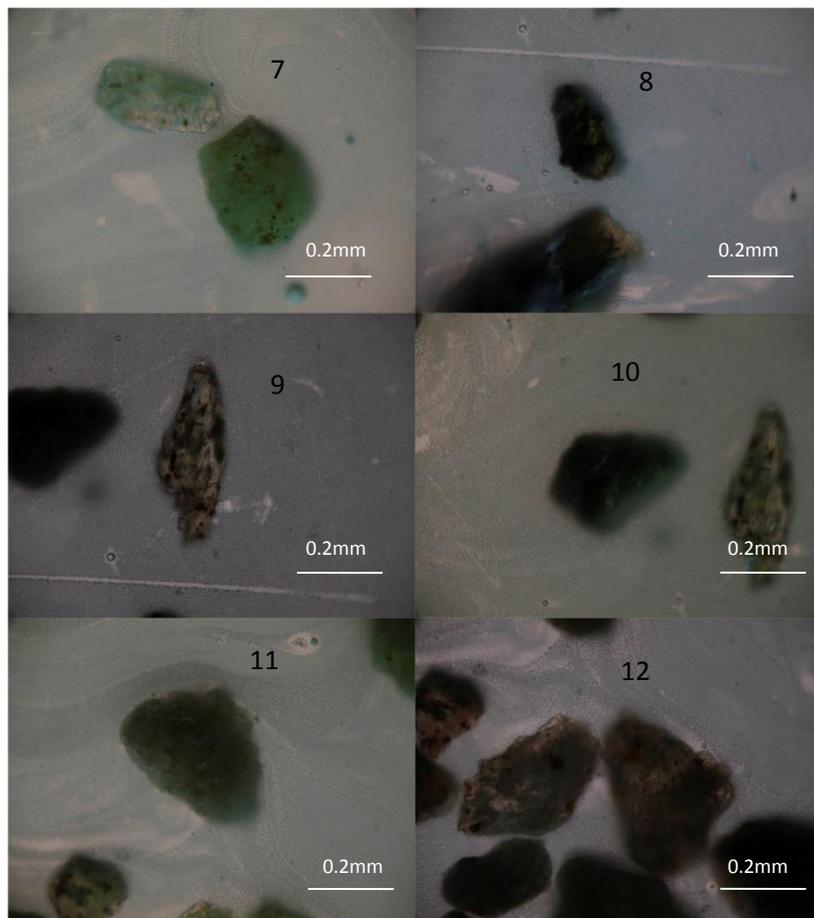


Figura A2. 7.-Cuarzo, 8.- Rutilo, 9.- Monacita, 10.-Fragmento de roca, 11.-Cuarzo, 12.-Monacita

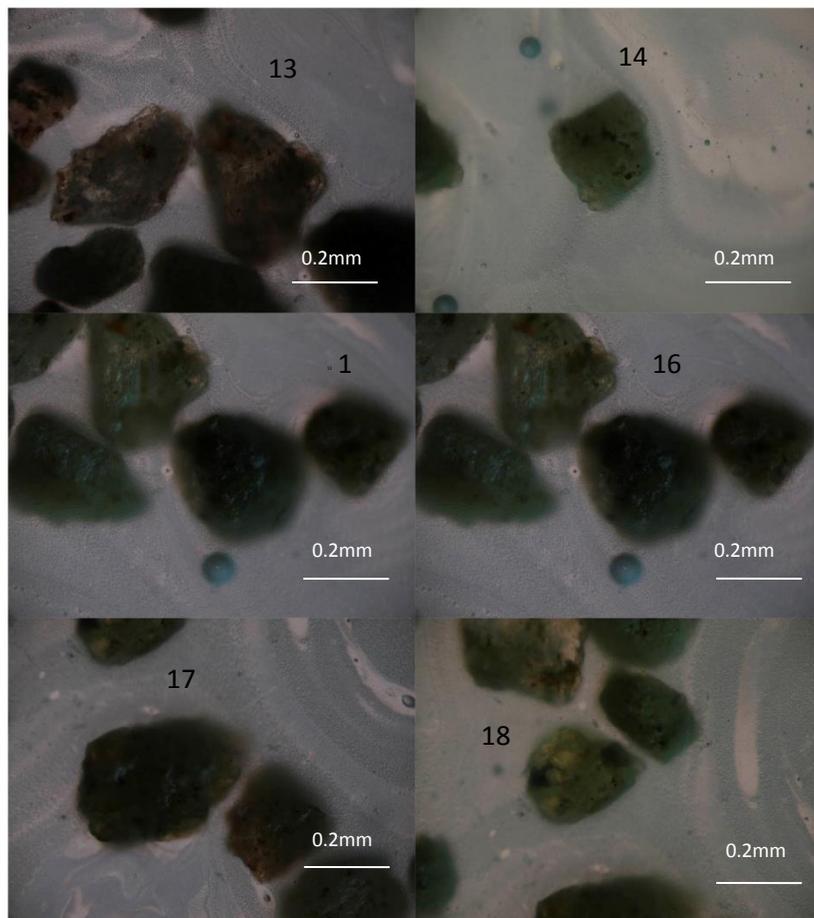


Figura A3. 13.-Monacita, 14.- Cuarzo, 15.- Fragmento de roca, 16.-Fragmento de roca, 17.-Cuarzo, 18.-Monacita

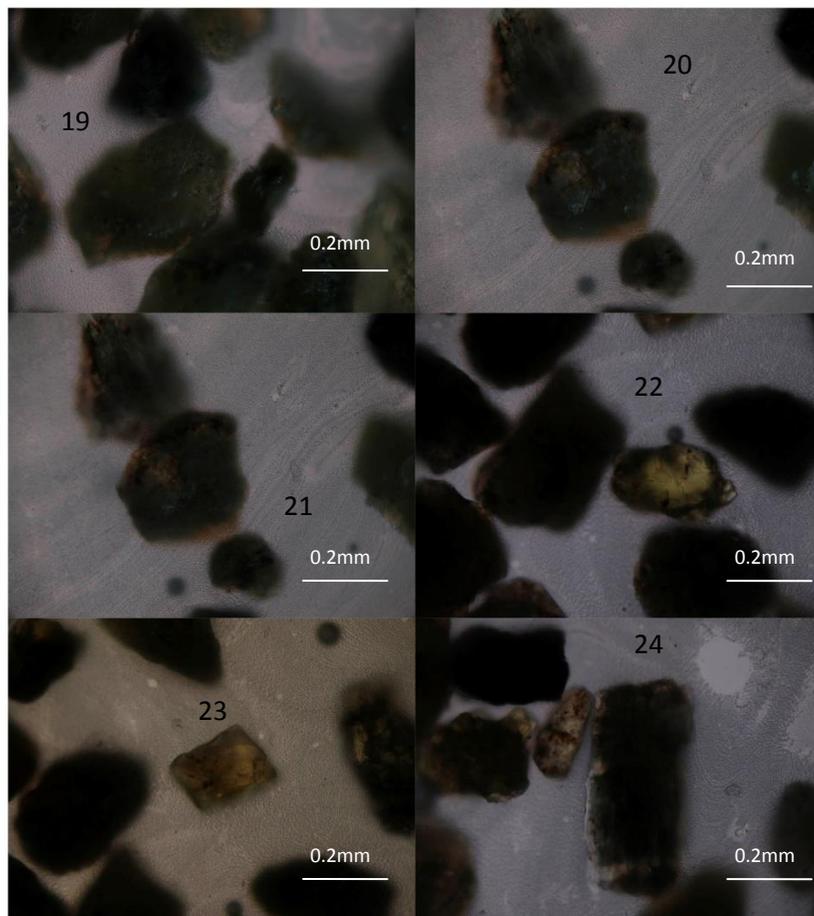


Figura A4. 19.-Cuarzo, 20.-Fragmento de roca, 21.-
Cuarzo, 22.-Monacita, 23.- Esfena, 24.- Brokita

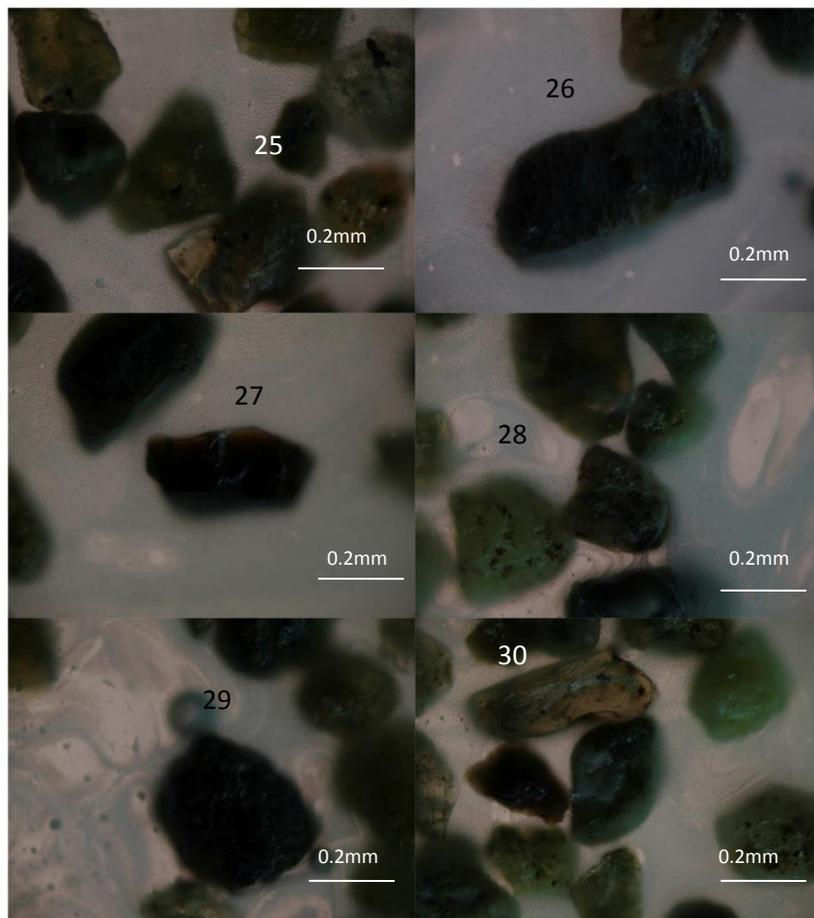


Figura A5. 23.-Monacita, 24.- Fragmento de roca, 25.- Rutilo, 26.-Cuarzo, 27.- Rutilo, 28.-Monacita

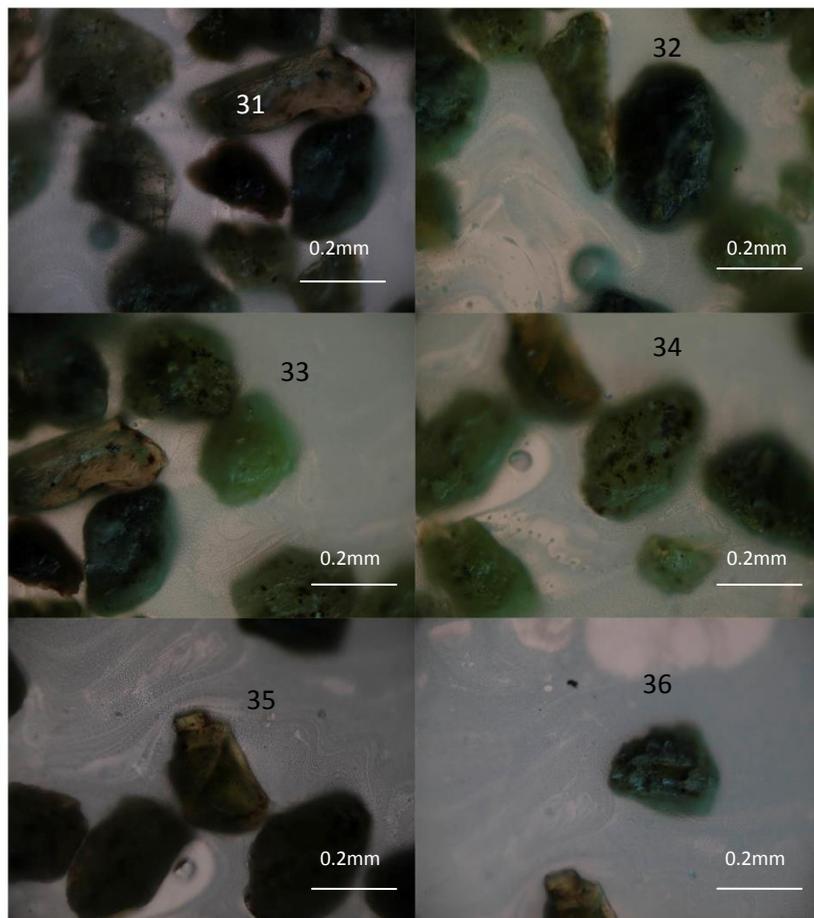


Figura A6. 31.- *Rutilo*, 32.-*Rutilo*, 33.-*Cuarzo*, 34.-*Cuarzo*, 35.- *Brokita*, 36.-*Cuarzo*

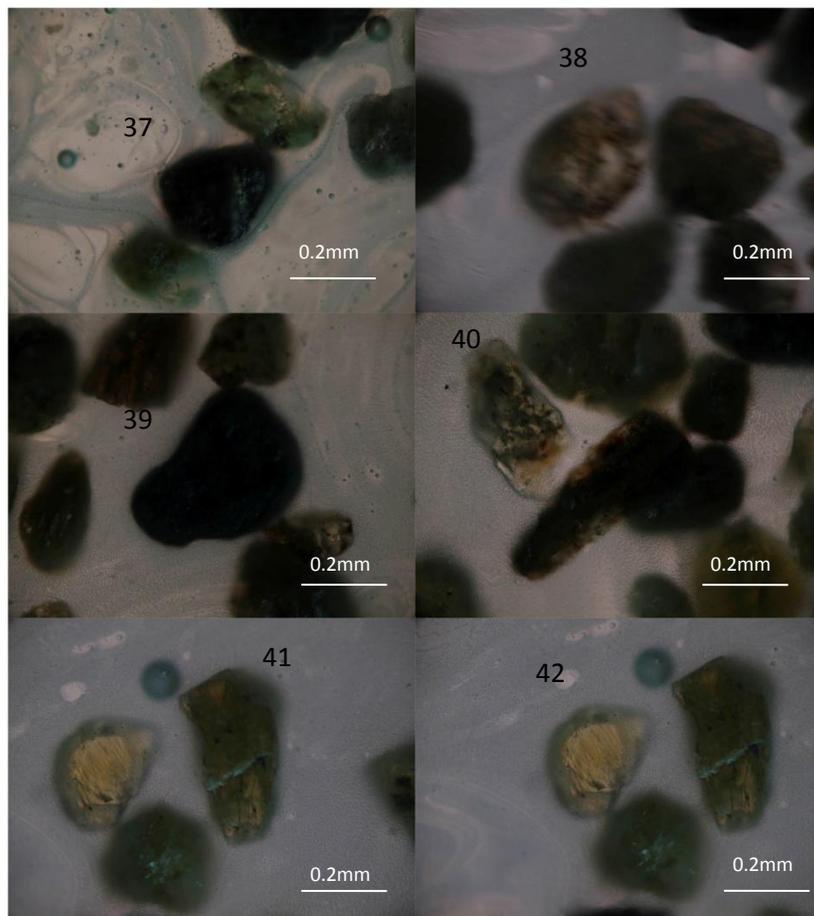


Figura A7. 37.- Rutilo, 38.-Monacita, 39.-Fragmento de roca, 40.-Monacita, 41.-Brokita, 42.- Esfena

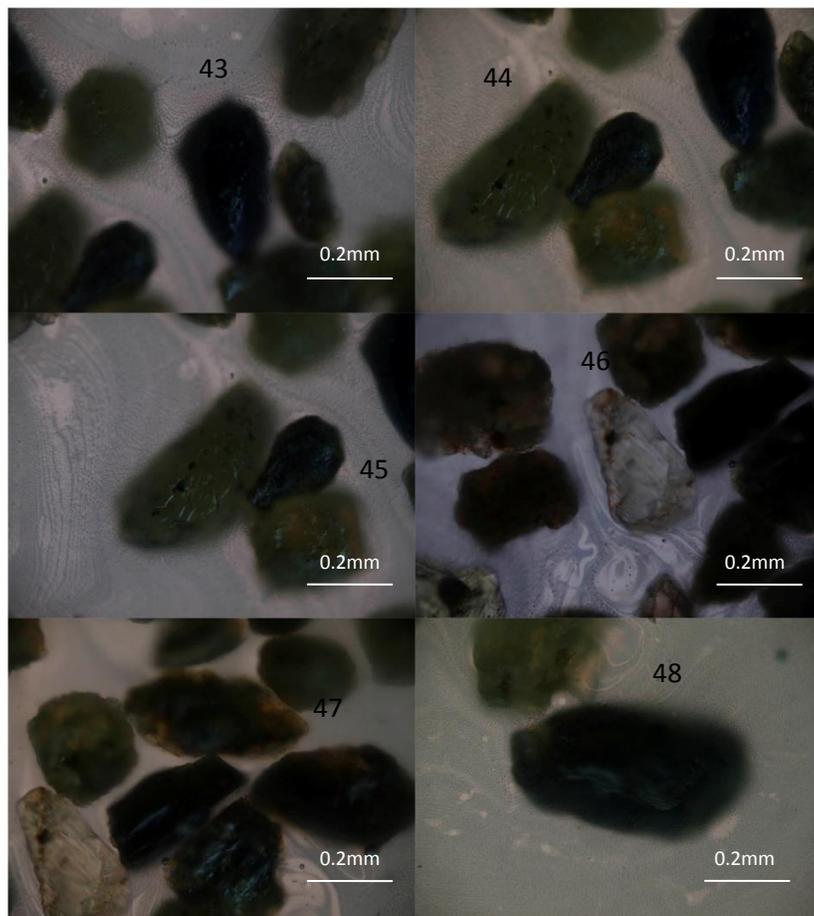


Figura A8. 43.-Rutilo, 44.-olivino, 45.-Olivino, 46.-Anatasa, 47.-Rutilo, 48.- Rutilo

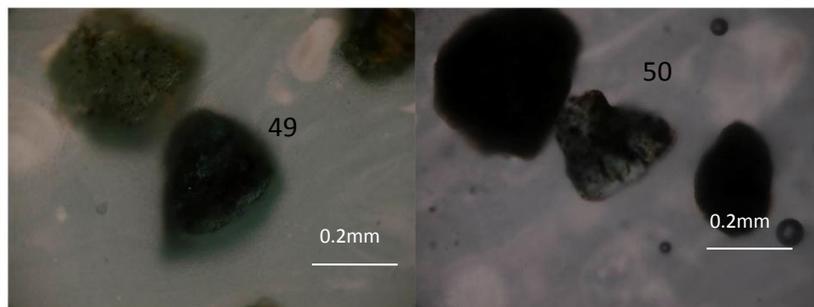


Figura A9. 49.- Fragmento de roca, 50.- Glaucofano

Muestra GUA-1 (0.8)

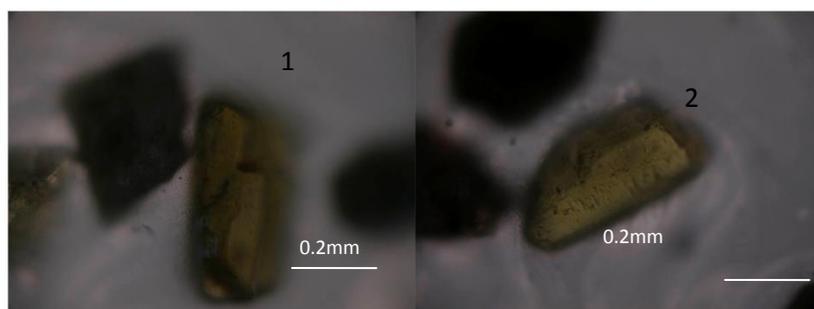


Figura A10. 1.-Brokita, 2.-Brokita

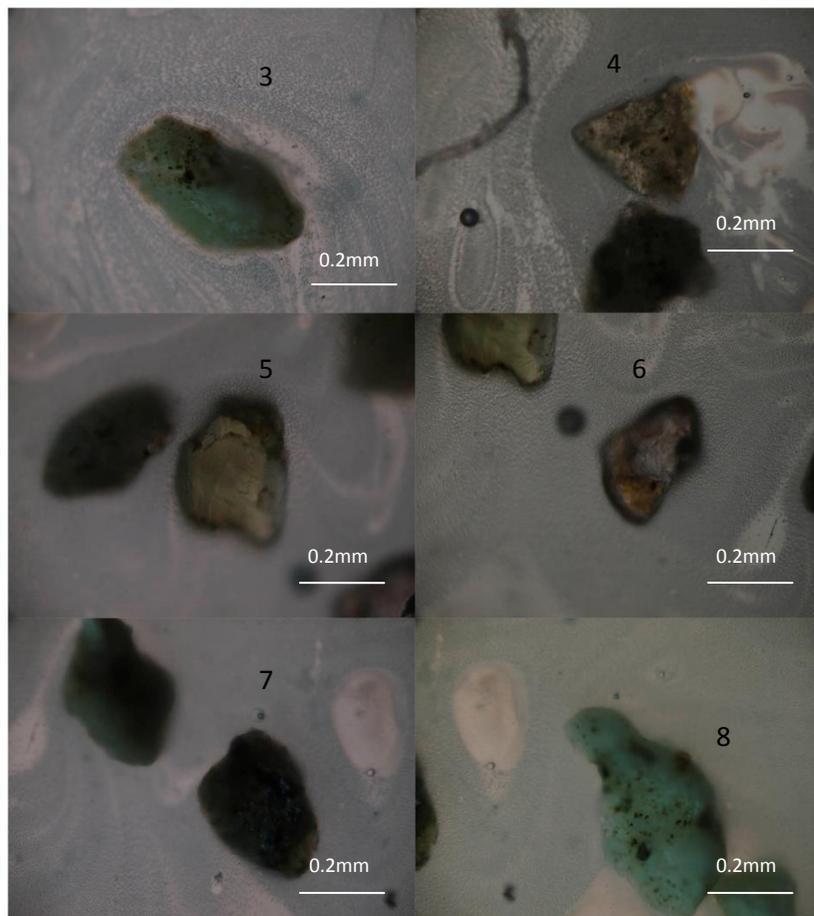


Figura A11. 3.-Cuarzo, 4.- Monacita, 5.-Esfena,
6.- Monacita, 7.-Brokita 8.-Cuarzo

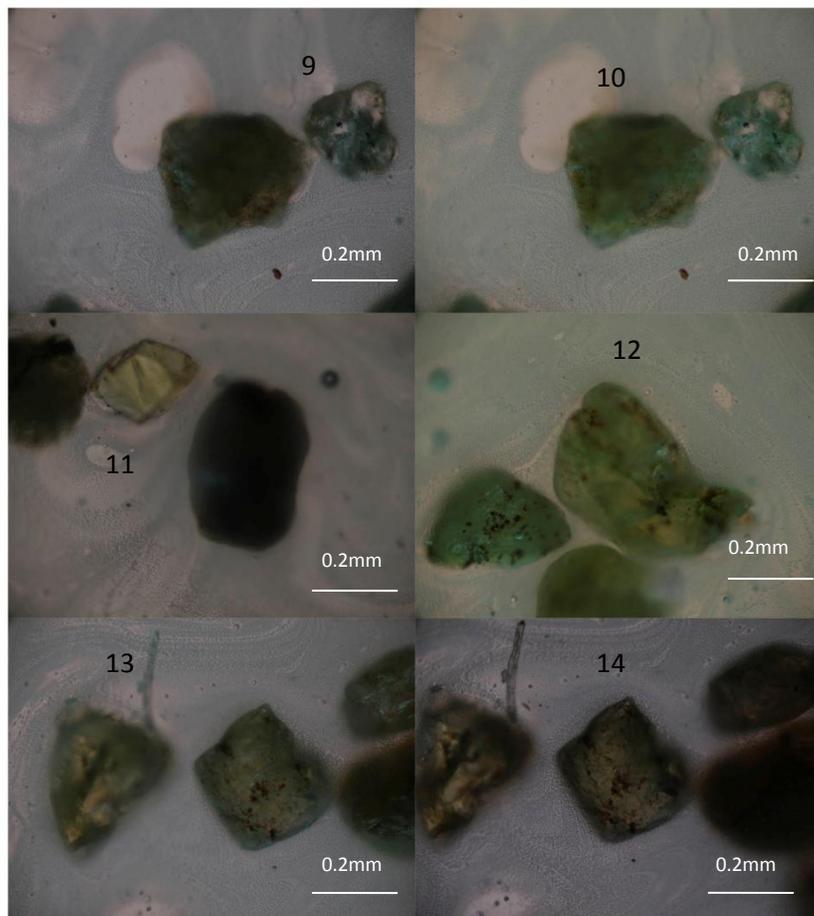


Figura A12. 9.- *Monacita*, 10.- *Cuarzo*, 11.- *Esfena*, 12.-*Monacita*, 13.- *Monacita*, 14.- *Anatasa*

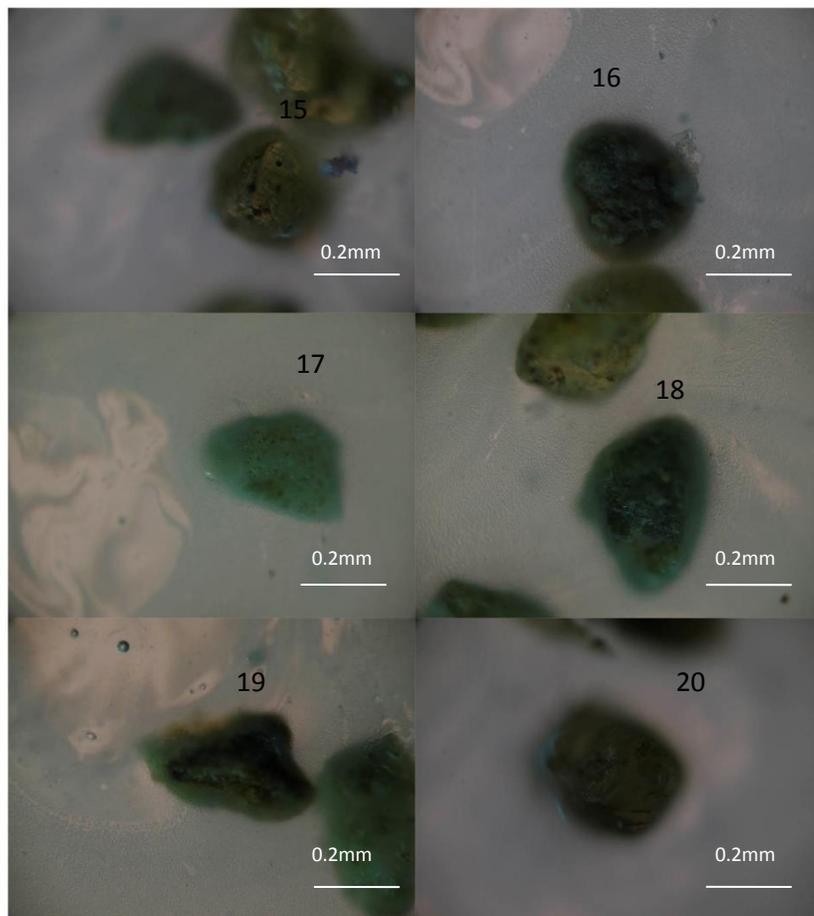


Figura A13. 15.- *Esfena*, 16.- *Fragmento de roca*,
17.-*Cuarzo*, 18.-*Olivino*, 19.-*rutilo*, 20.- *Esfena*

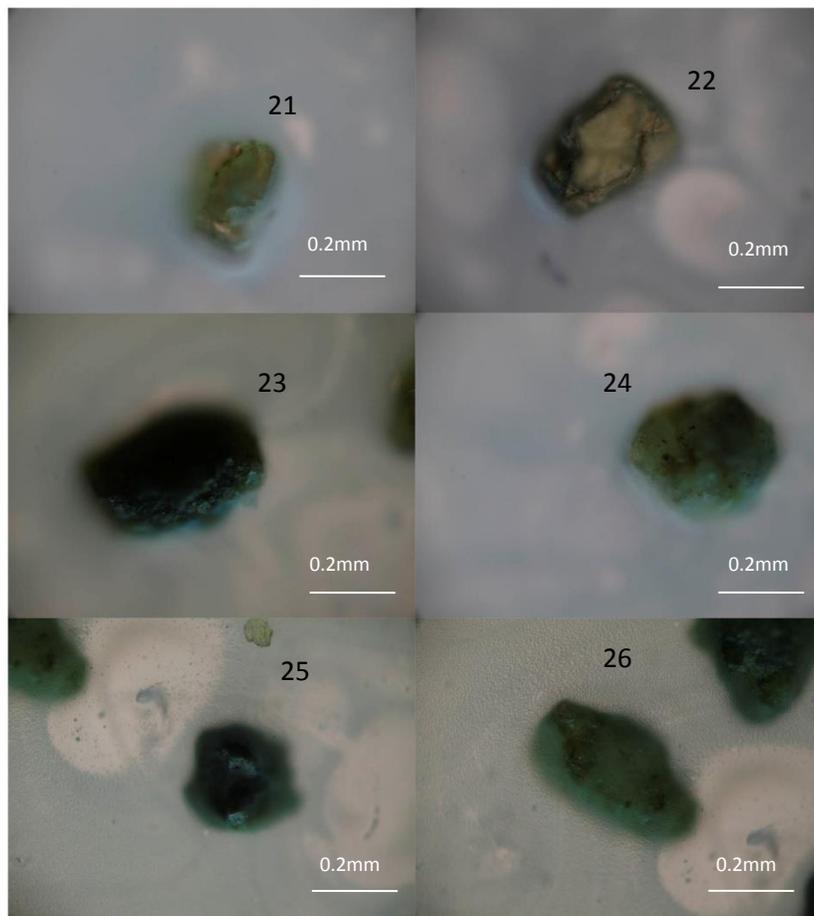


Figura A14. 21.- Olivino, 22.-Brokita, 23.- Rutilo, 24.-Caurzo, 25.- Rutilo, 26.- Cuarzo

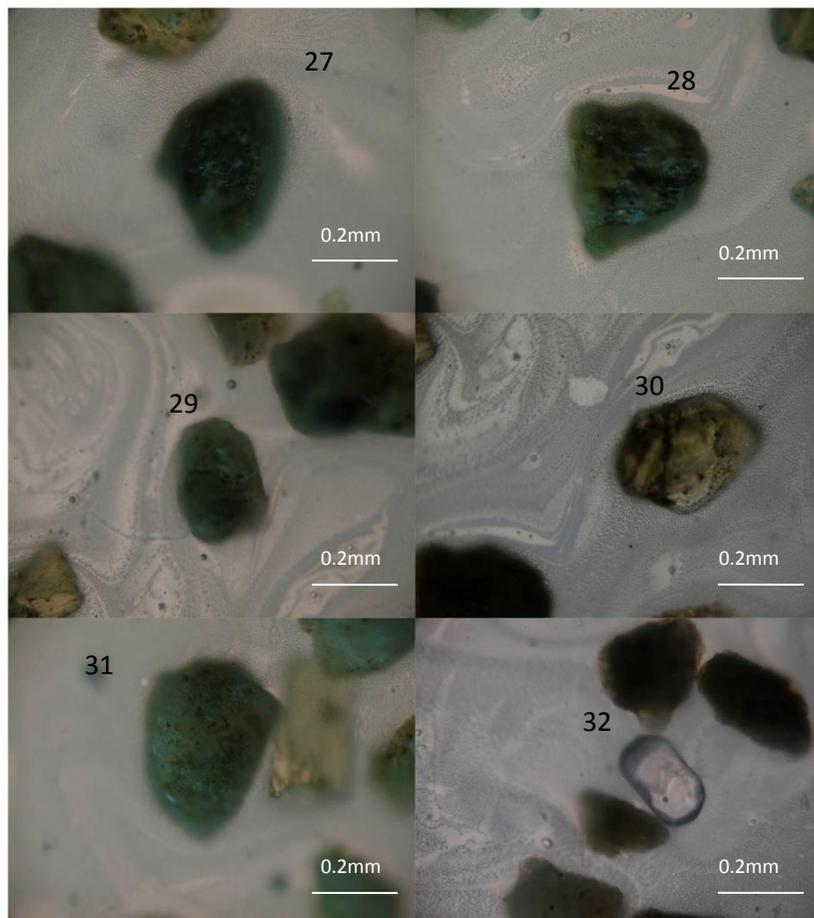


Figura A15. 27.-Rutilo, 28.-Fragmento de roca, 29.- Cuarzo, 30.-Esfena, 31.-Cuarzo, 32.-Apatito

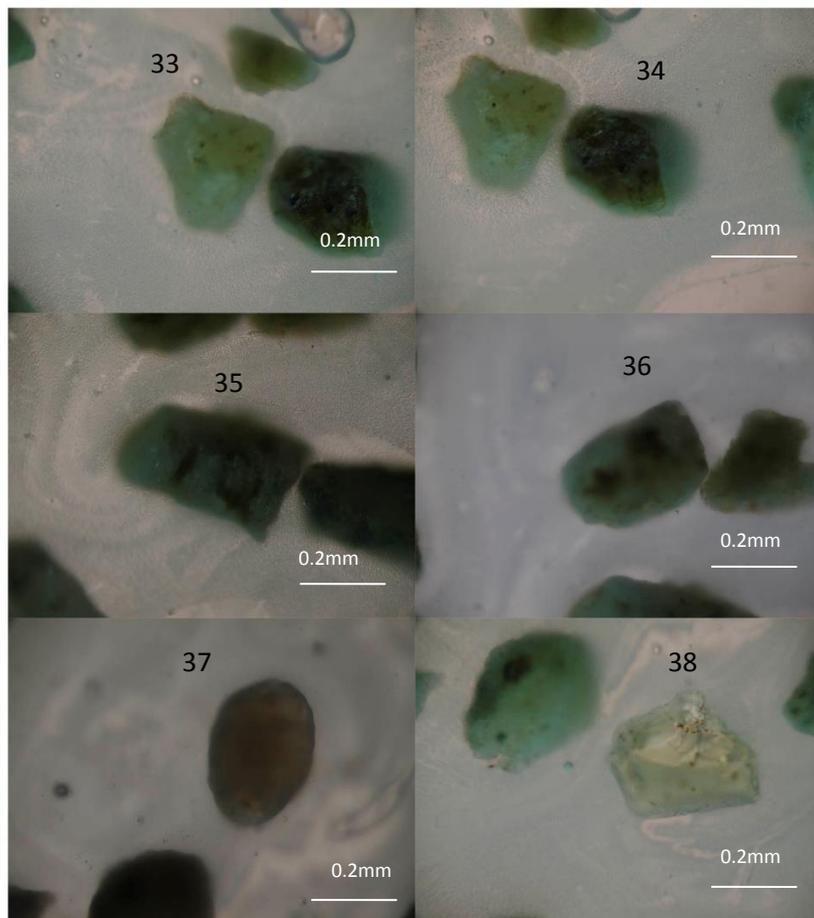


Figura A16. 33.-Cuarzo, 34.-Rutilo, 35.- Cuarzo, 36.- Cuarzo, 37.-Monacita, 38.-Anatasa

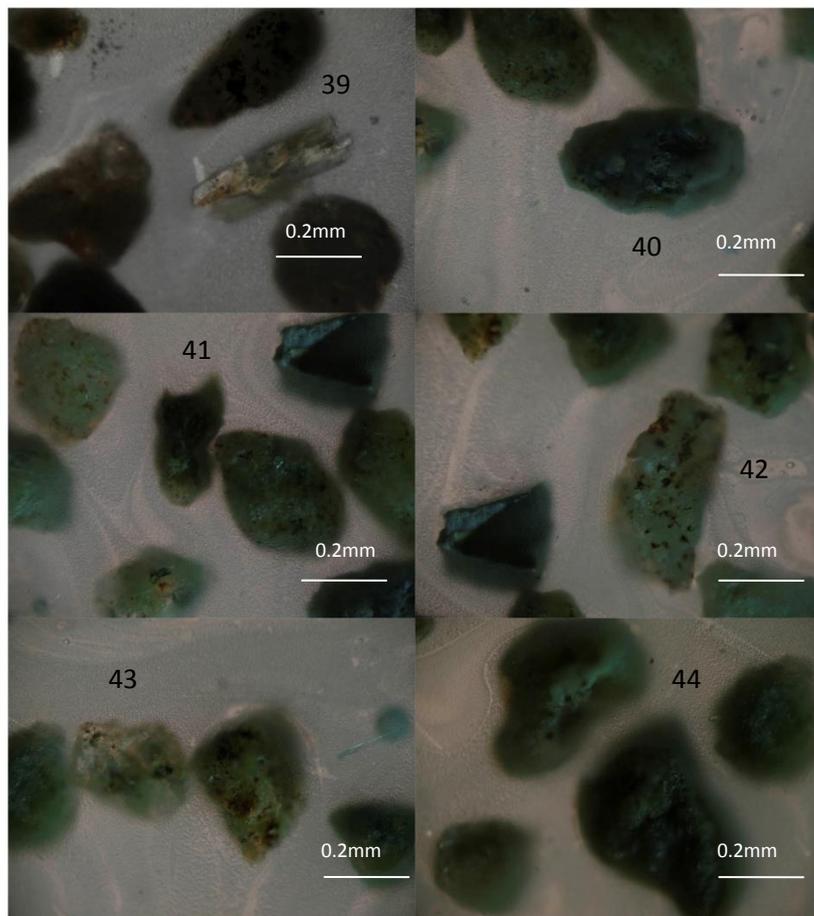


Figura A17. 39.- Kianite, 40.-Fragmento de roca, 41.-Olivino, 42.- Cuarzo, 43.-Monacita, 44.-Rutilo

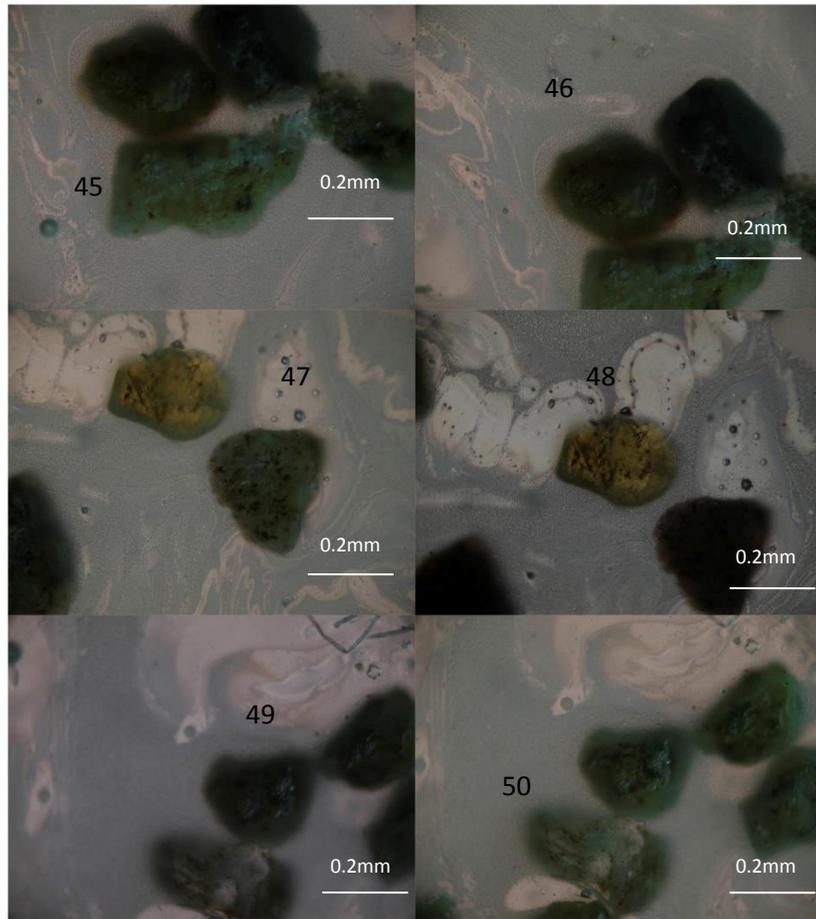


Figura A18. 45.-Cuarzo, 46.-Olivino, 47.-Cuarzo, 48.-Esfena, 49.-Cuarzo, 50.-Monacita

Muestra GUA-1 (epóxica)

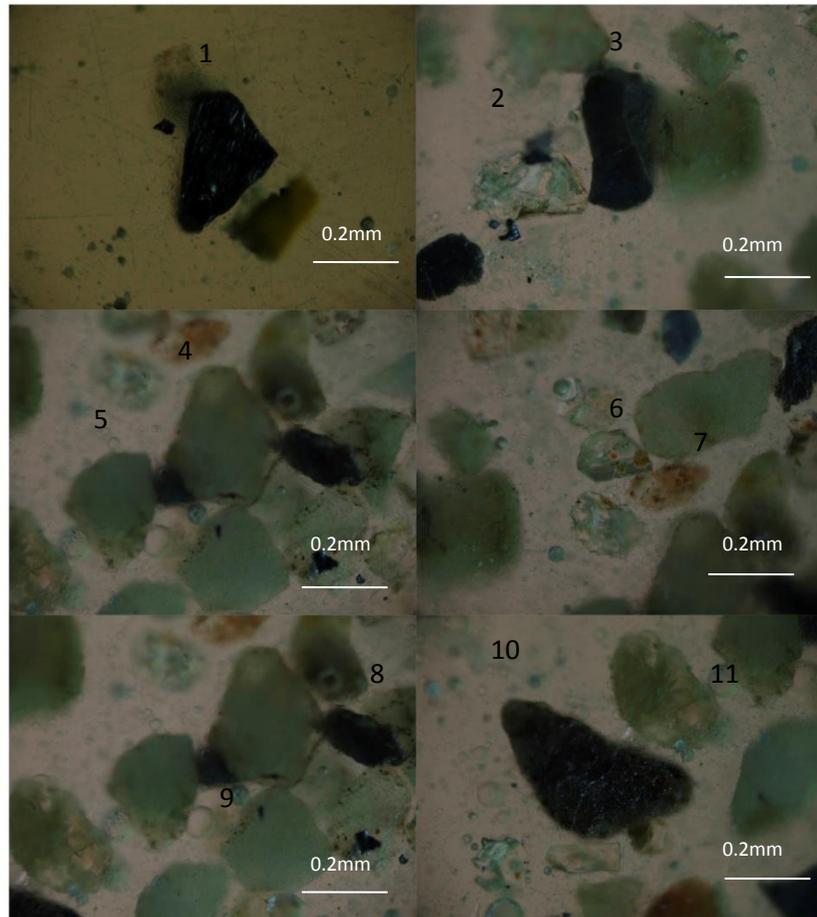


Figura A19. 1.-Horblenda, 2.-Esfena, 3.-Fragmento de roca, 4.-Cuarzo, 5.-Cuarzo, 6.-Xenotime, 7.-Monacita, 8.-Fragmento de roca, 9.- Cuarzo, 10.-Olivino, 11.-Esfena

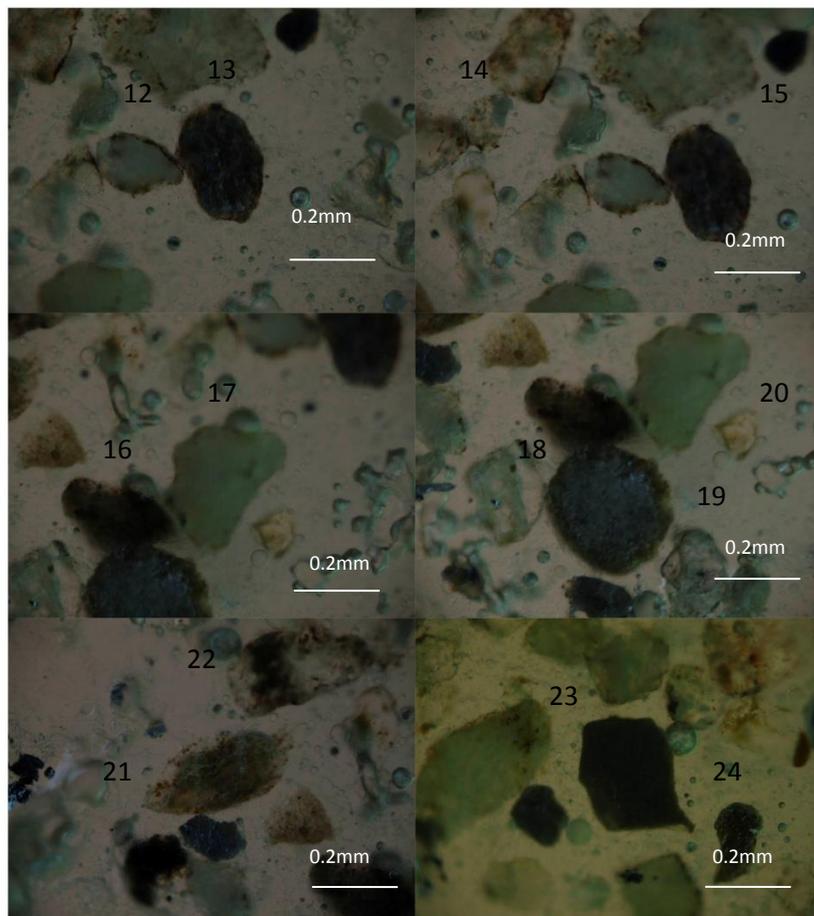


Figura A20. 12.-Cuarzo, 13.-Rutilo, 14.-Esfena, 15.-Cuarzo, 16.-Monacita, 17.- Cuarzo, 18.-Fragmento de roca, 19.-Esfena, 20.-Esfena, 21.-Monacita, 22.-Monacita, 23.-Olivino, 24.-Rutilo

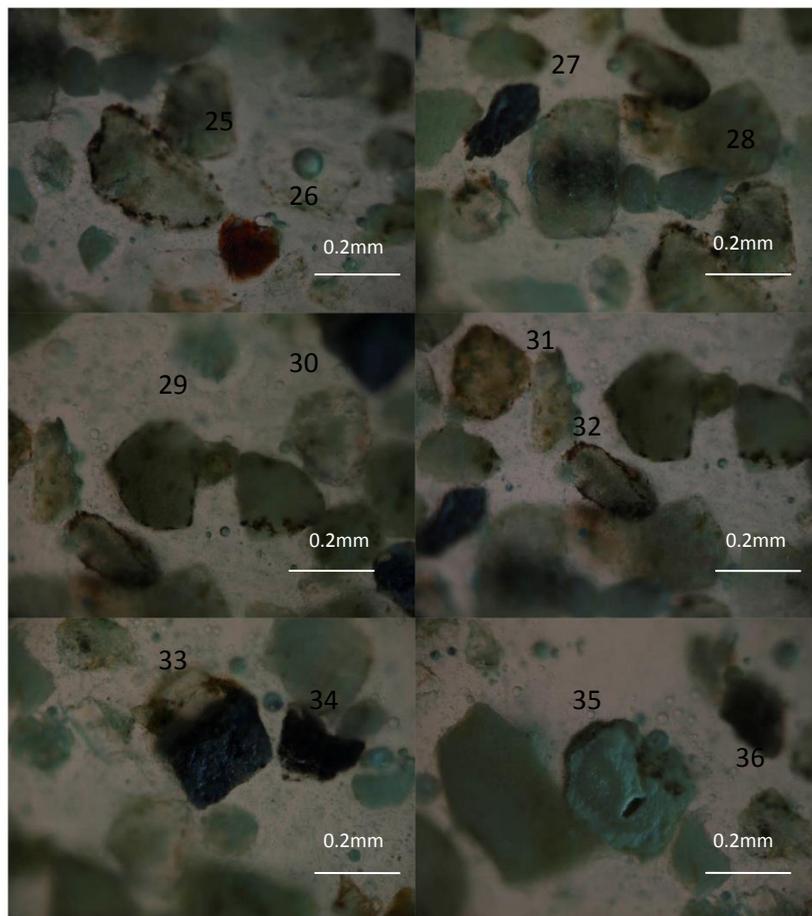


Figura A21. 25.-Cuarzo, 26.-Rutilo, 27.-Cuarzo, 28.-Cuarzo, 29.-Cuarzo, 30.-Esfena, 31.-Esfena, 32.-Cuarzo, 33.-Fragmento de roca, 34.-Fragmento de roca, 35.-Cuarzo, 36.-Esfena

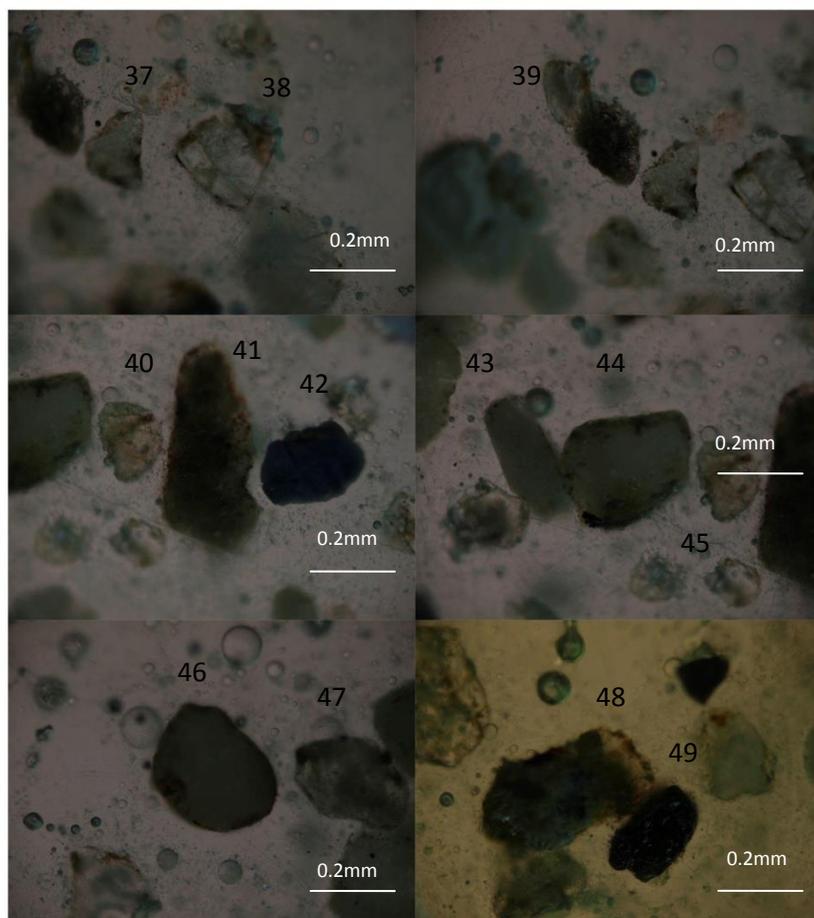


Figura A22. 37.-Cuarzo, 38.-Esfena, 39.-Monacita, 40.-Esfena, 41.-Cuarzo, 42.-Glaucofano, 43.-Cuarzo, 44.-Cuarzo, 45.-Esfena, 46.-Cuarzo, 48.-Brokita, 49.-Rutilo

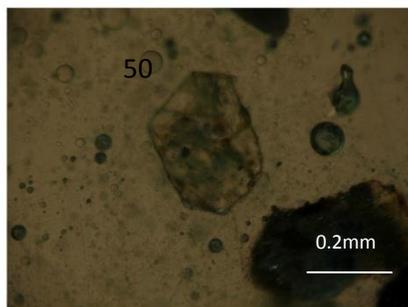


Figura A23. 50.-*Esfena*

Muestra GUA-3 (0.4)

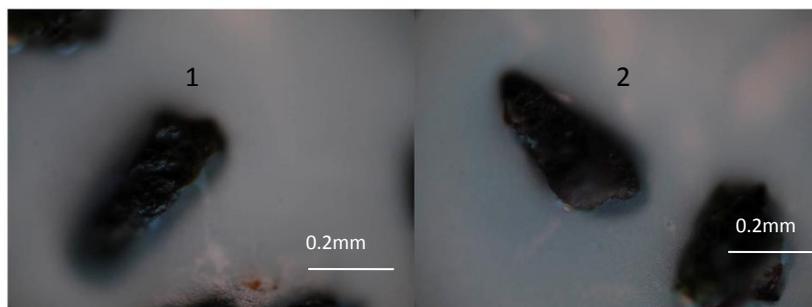


Figura A24. 1.-*Rutilo*, 2.-*Rutilo*

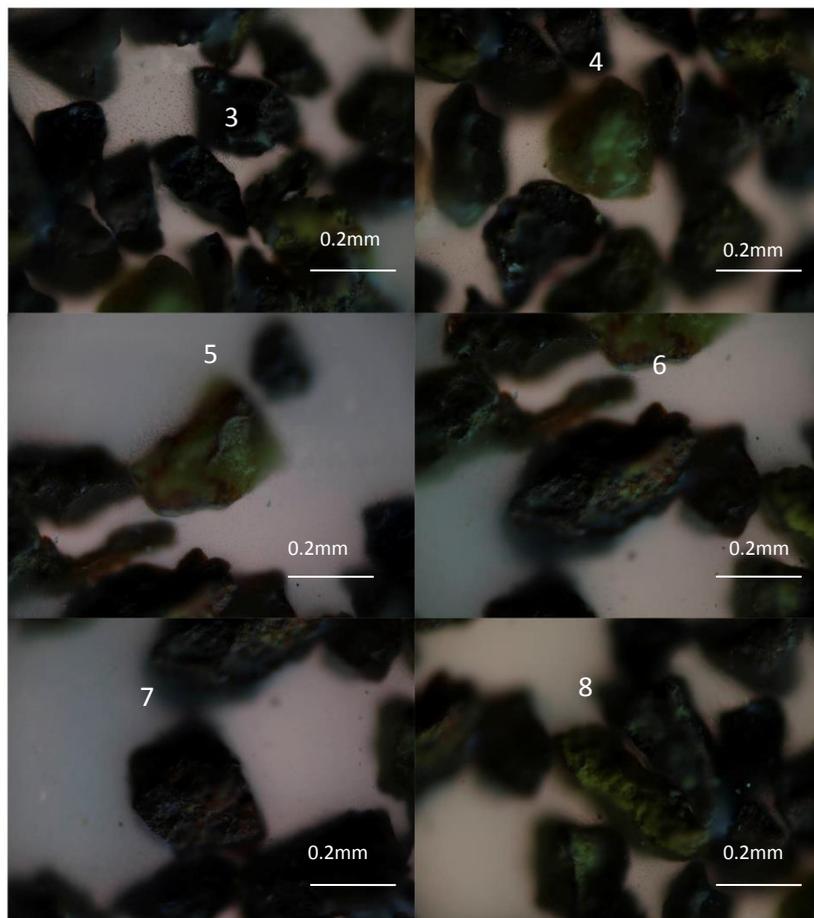


Figura A25. 3.-Rutilo, 4.-Olivino, 5.-Olivino, 6.-Rutilo, 7.-Rutilo, 8.-Fragmento de roca

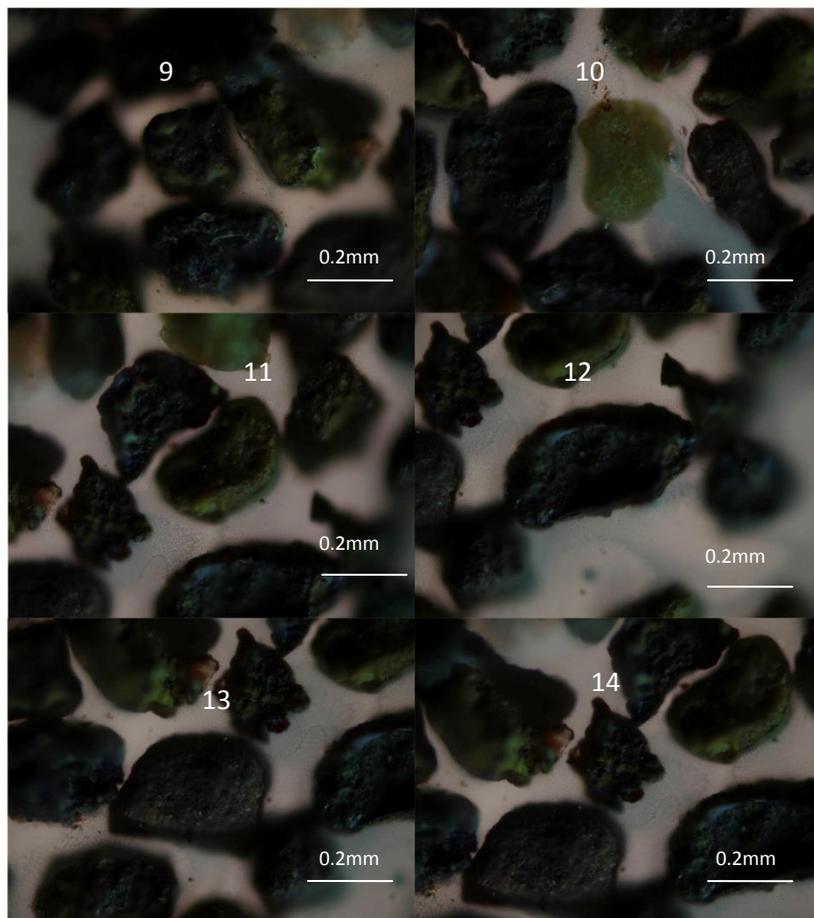


Figura A26. 9.-Fragmento de roca, 10.-Olivino, 11.-
Fragmento de roca, 12.- Fragmento de roca, 13.- Fragmento de
roca, 14.-Rutilo

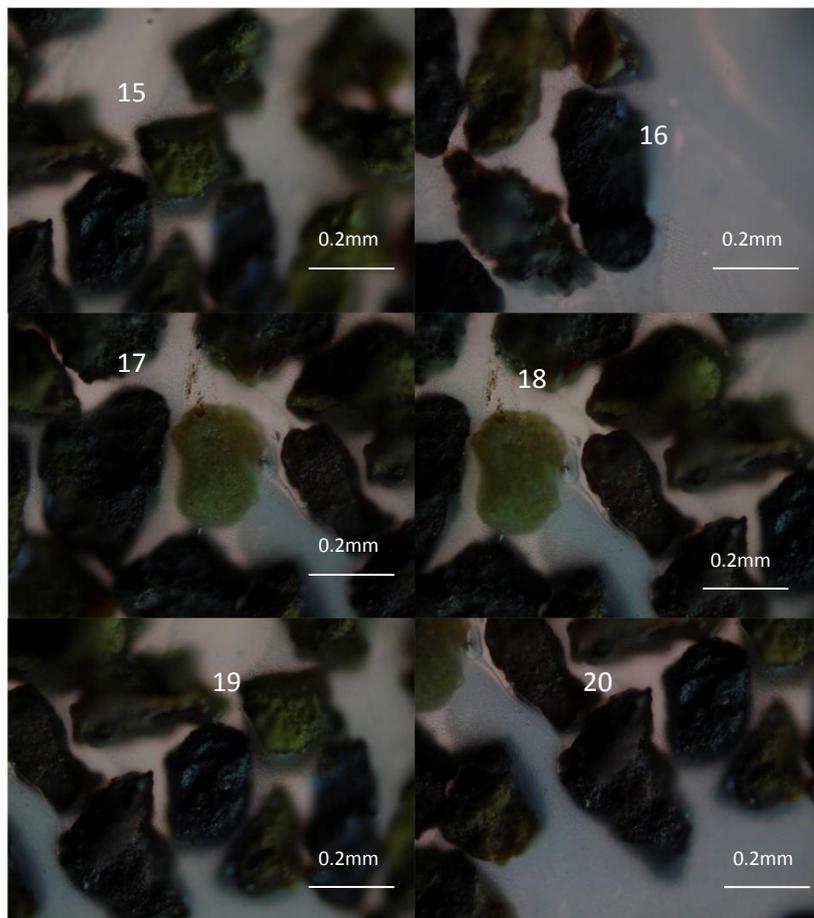


Figura A27. 15.-Fragmento de roca, 16.-Rutilo, 17.-
Fragmento de roca, 18.-Olivino, 19.-Rutilo, 20.- Fragmento de
roca

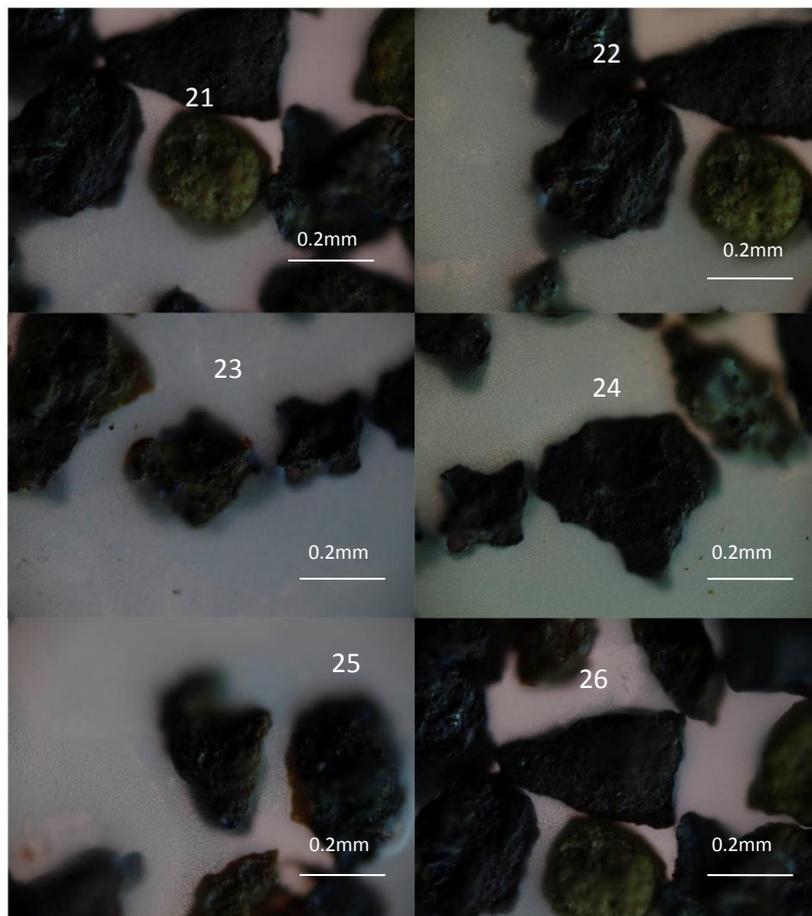


Figura A28. 21.-Olivino, 22.-Rutilo, 23.-Rutilo, 24.-Fragmento de roca, 25.-Olivino, 26.-Fragmento de roca

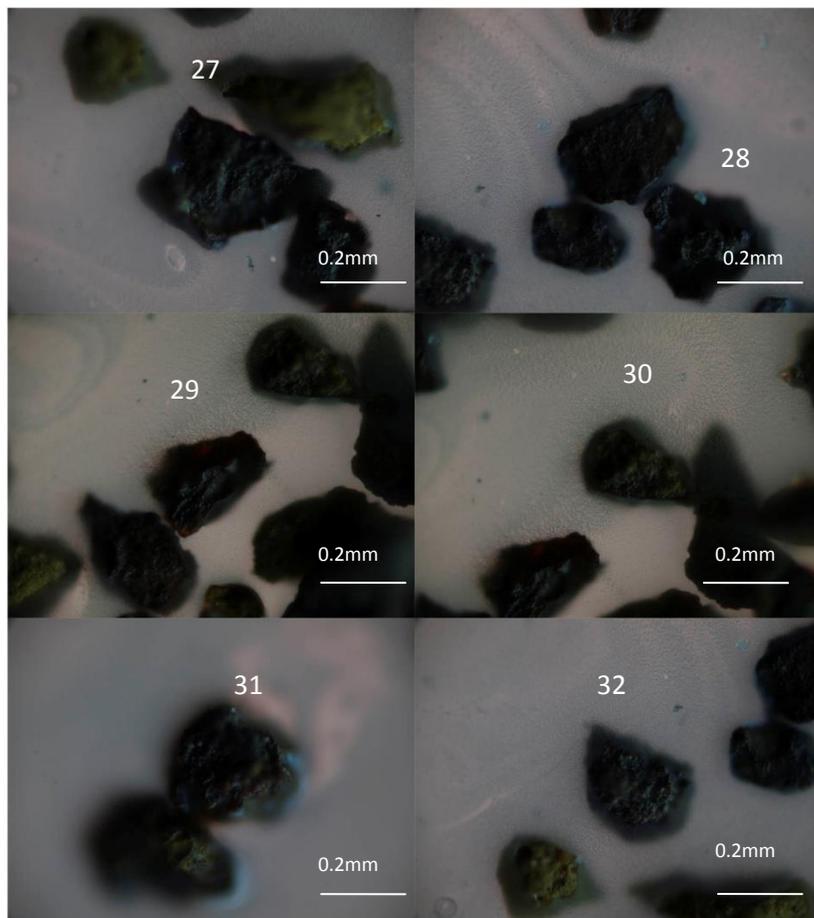


Figura A29. 27.-Fragmento de roca, 28.-Rutilo, 29.-Rutilo, 30.-Fragmento de roca, 31.-Rutilo, 32.-Fragmento de roca

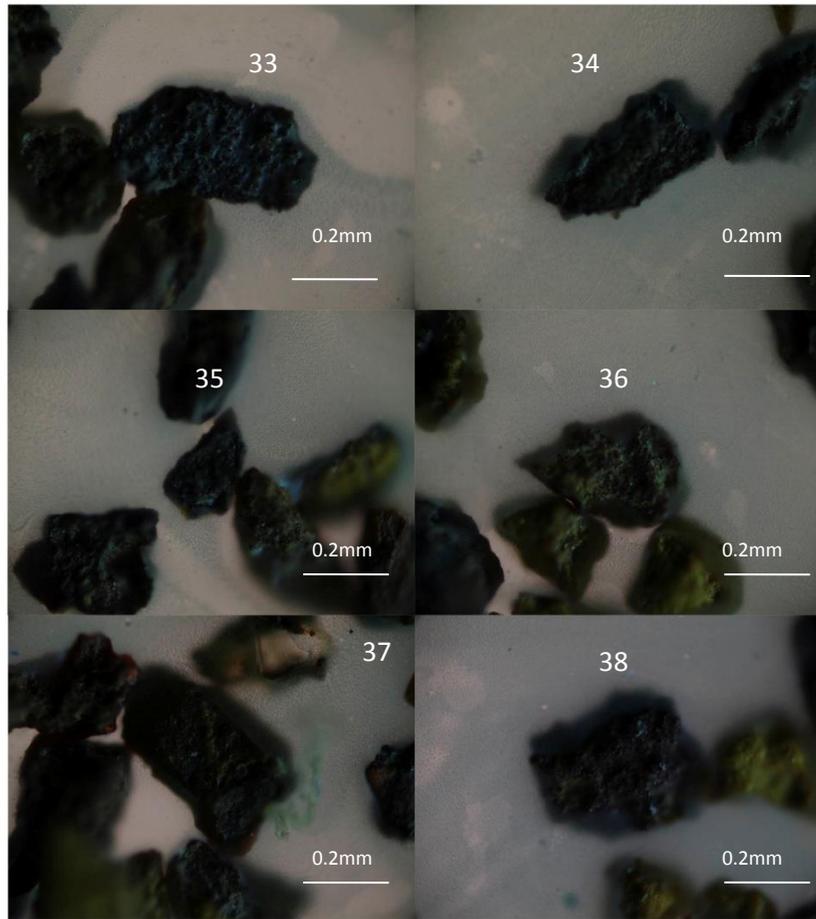


Figura A30. 33.-Fragmento de roca, 34.- Fragmento de roca, 35.- Fragmento de roca, 36.-Fragmento de roca, 37.-Esfena, 38.- Fragmento de roca

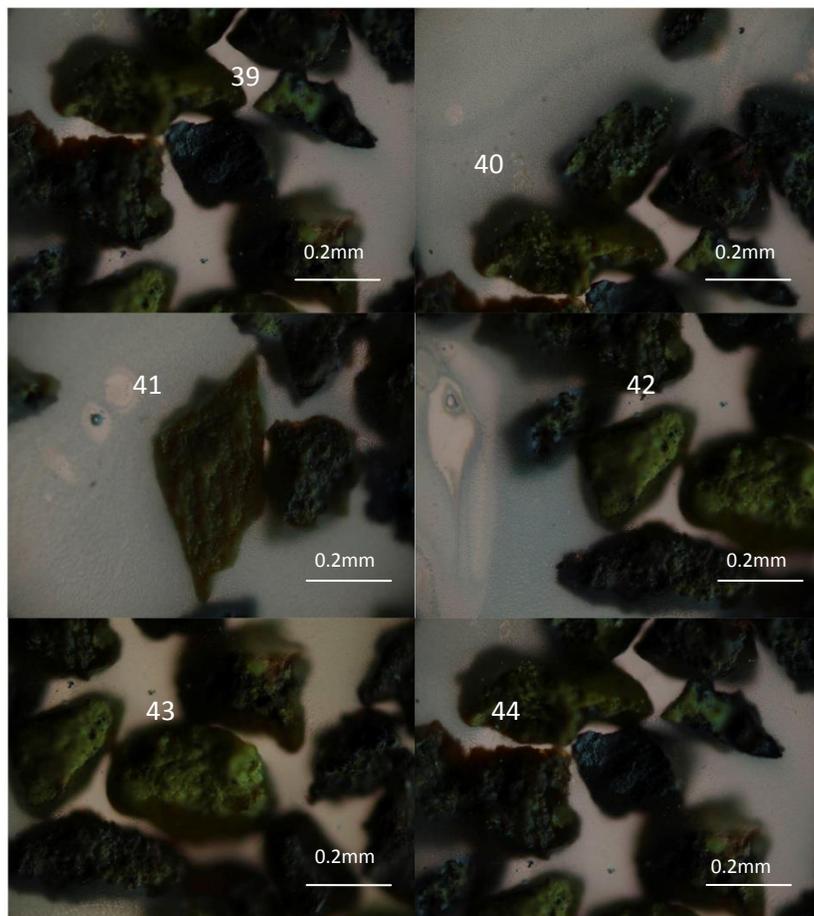


Figura A31. 39.-Rutilo, 40.-Olivino, 41.-Fragmento de roca, 42.-Fragmento de roca, 43.-Fragmento de roca, 44.-Rutilo

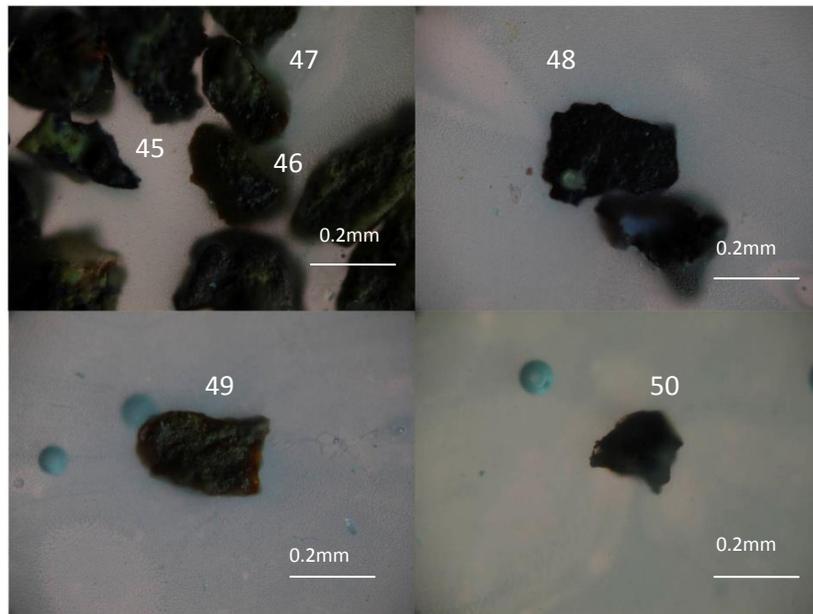


Figura A32. 45.- *Rutilo*, 46.-*Rutilo*, 47.-*Rutilo*, 48.-*Fragmento de roca*, 49.-*Rutilo*, 50.-*Rutilo*

Muestra GUA-3 (0.8)

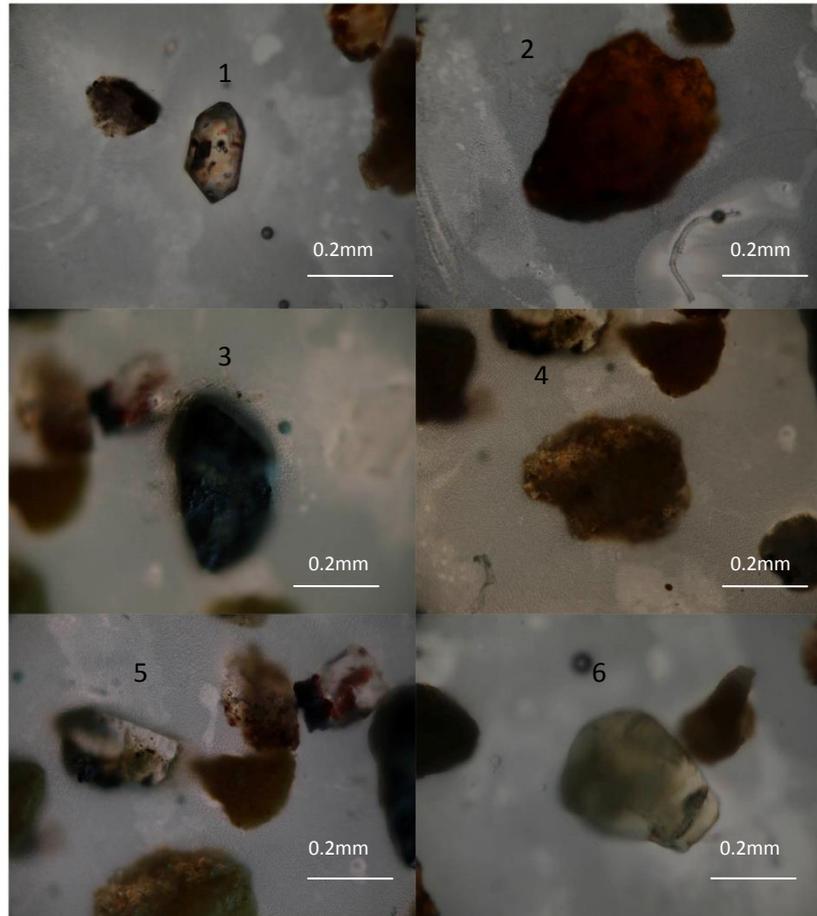


Figura A33. 1.- Zircon, 2.- Rutilo, 3.-Fragmento de roca, 4.- Esfena, 5.-Monacita, 6.-Anhidrita

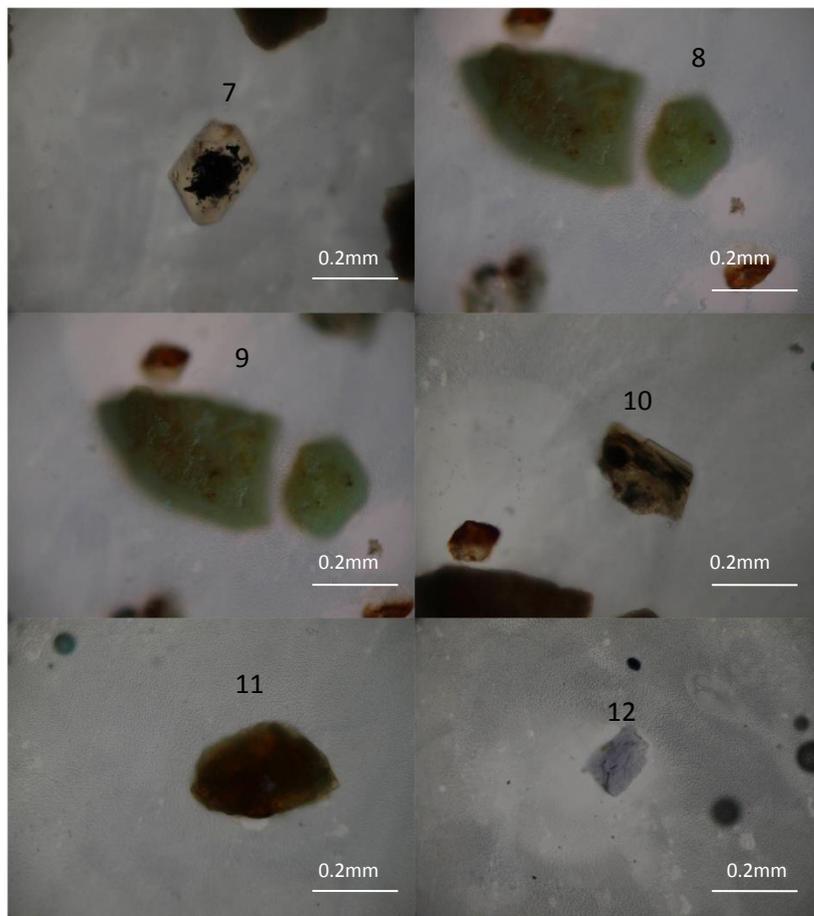


Figura A34. 7.-Monacita, 8.-Cuarzo, 9.-Cuarzo, 10.-Augita, 11.-Rutilo, 12.-Glaucofano

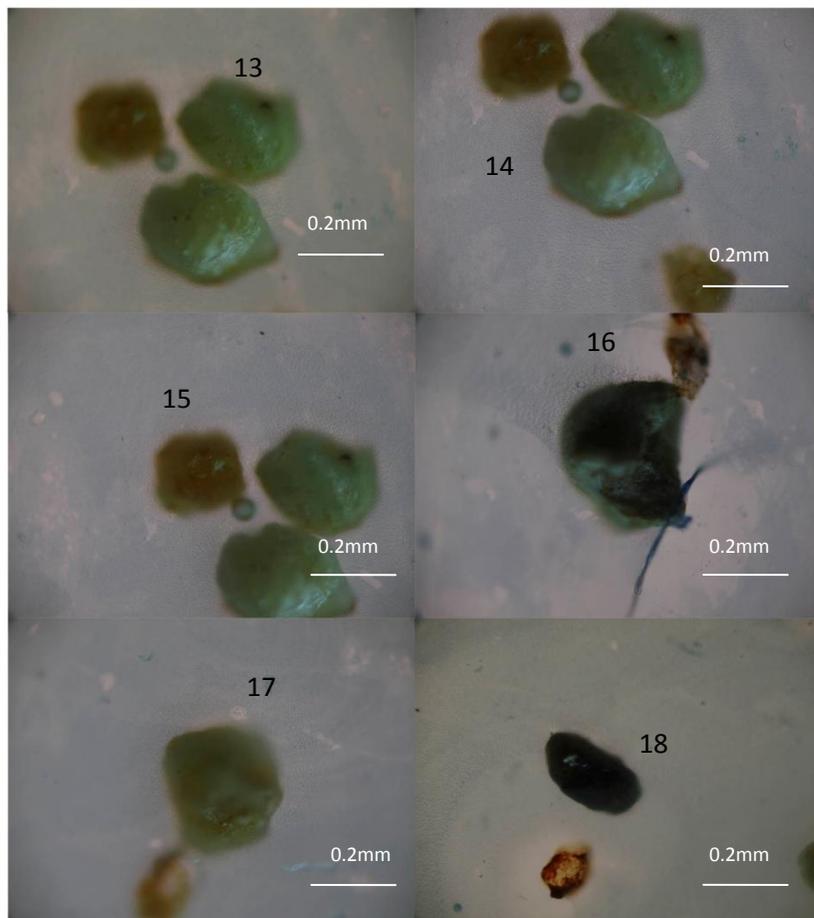


Figura A35. 13.-Cuarzo, 14.-Cuarzo, 15.-Brokita, 16.-
Fragmento de roca, 17.-Cuarzo, 18.-Rutilo

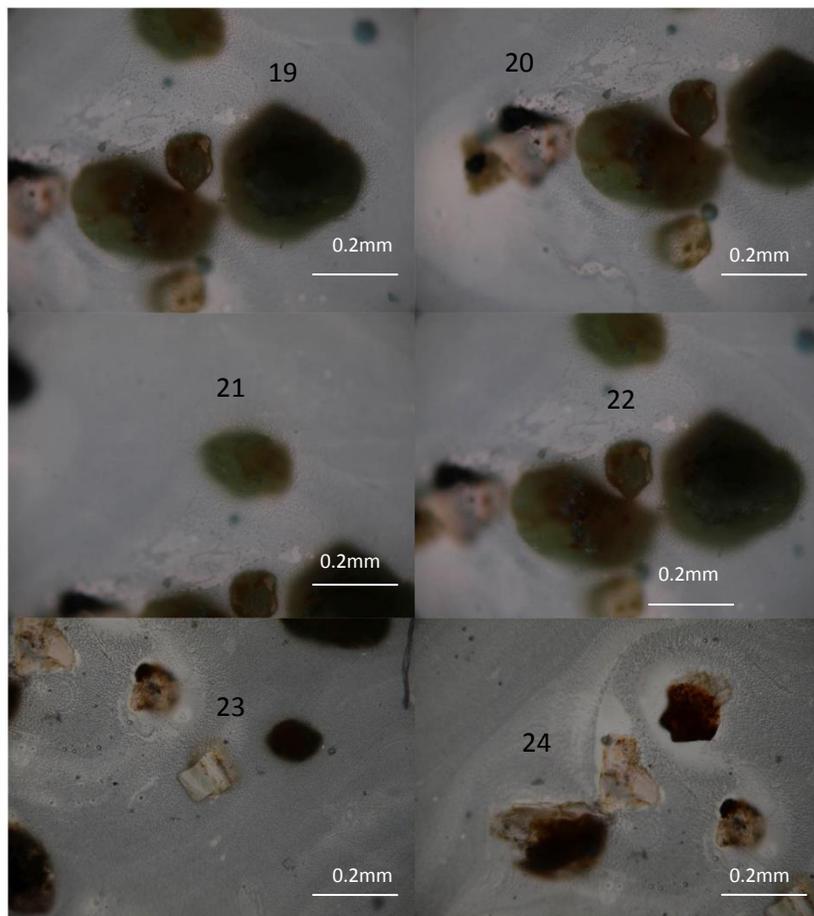


Figura A36. 19.-Cuarzo, 20.-Esfena, 21.-Cuarzo, 22.- Cuarzo, 23.-Esfena, 24.- Rutilo

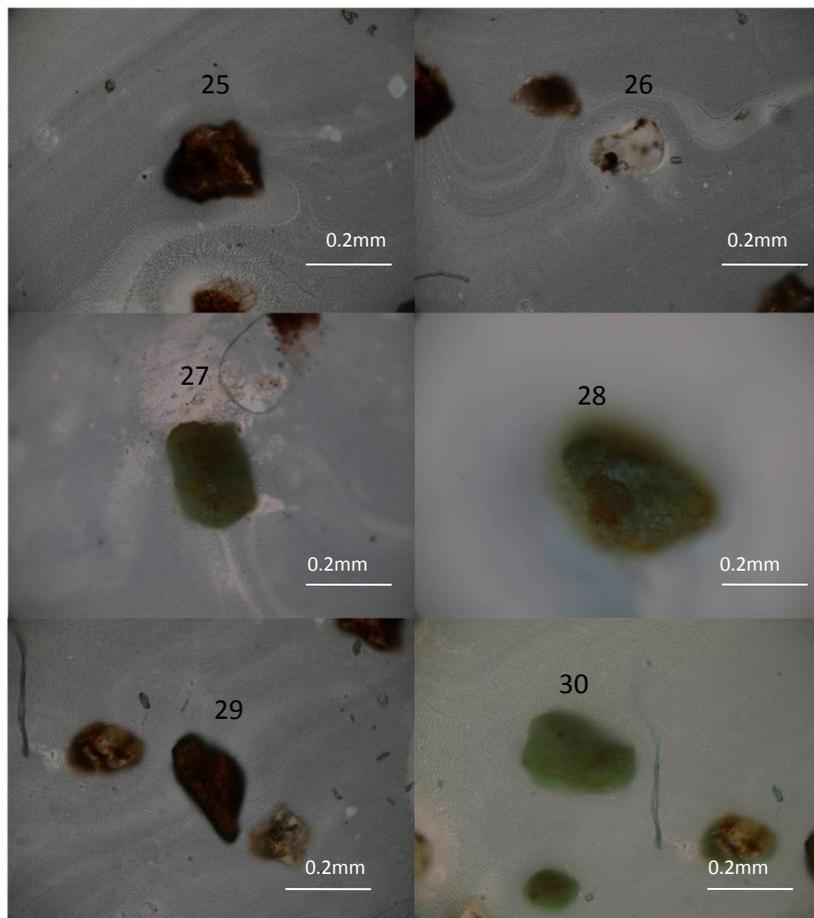


Figura A37. 25.-Rutilo, 26.-Esfena, 27.-Cuarzo, 28.-Cuarzo, 29.-Rutilo, 30.-Cuarzo

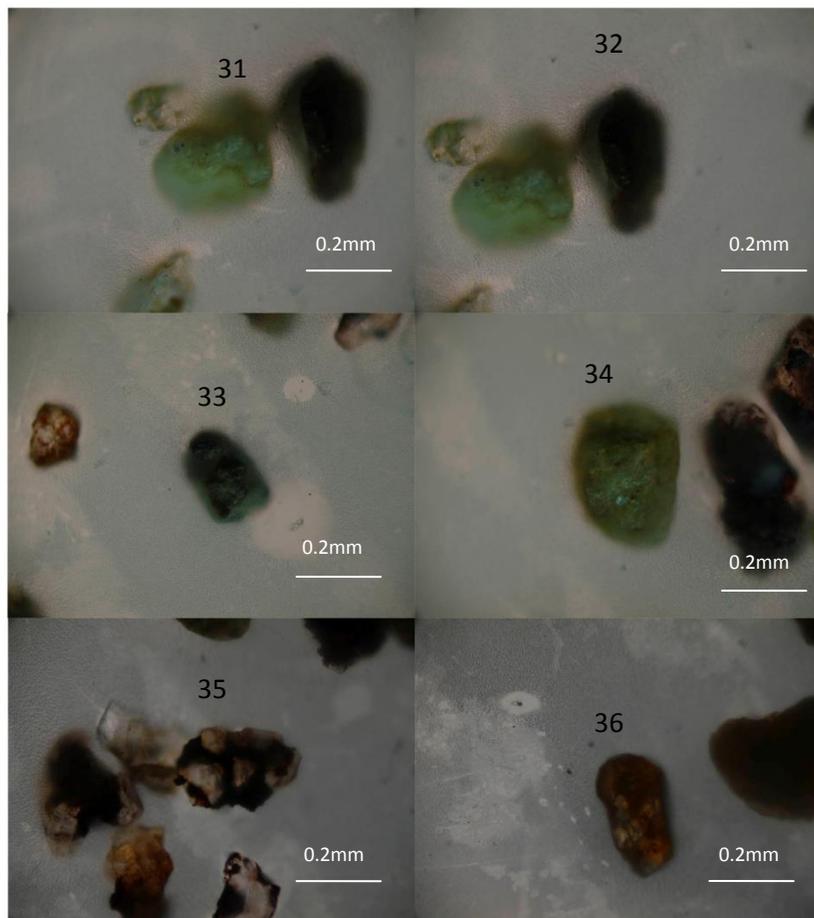


Figura A38. 31.-Cuarzo, 32.-Rutilo, 33.-Fragmento de roca, 34.-Fragmento de roca, 35.-Esfena con rutilo, 36.-Rutilo

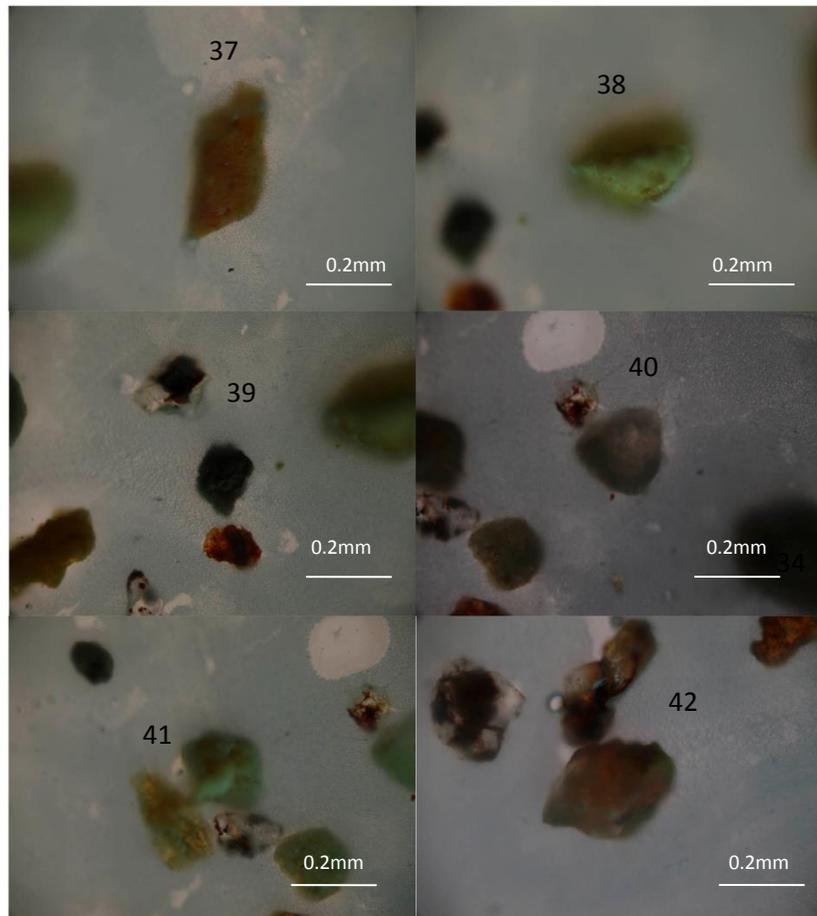


Figura A39. 37.-Brokita, 38.-Fragmento de roca, 39.-Esfena, 40.-Xenotime, 41.-Esfena, 42.-Cuarzo

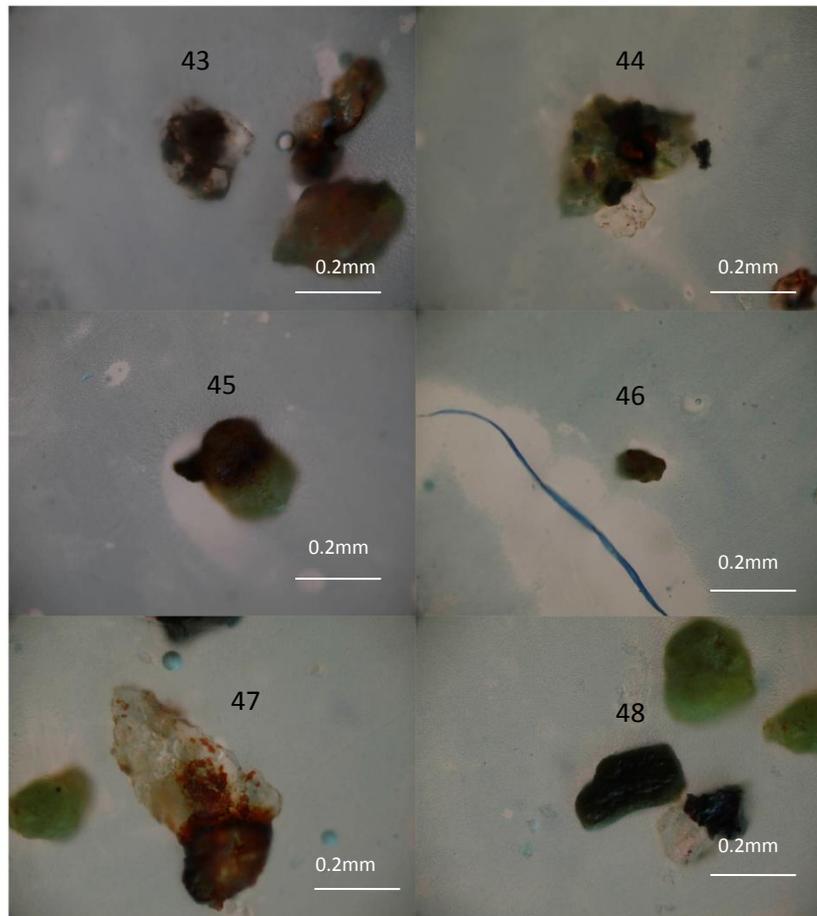


Figura A40. 43.-Esfena, 44.-Esfena, 45.-Cuarzo, 46.-Cuarzo, 47.- Esfena, 48.-Rutilo

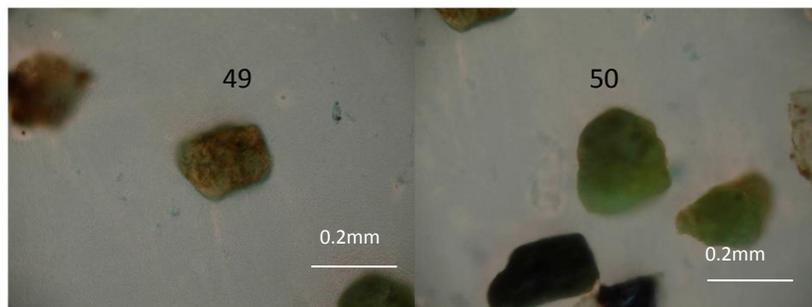


Figura A41. 49.-Brokita, 50.-Cuarzo

Muestra GUA-3 (EPÓXICA)

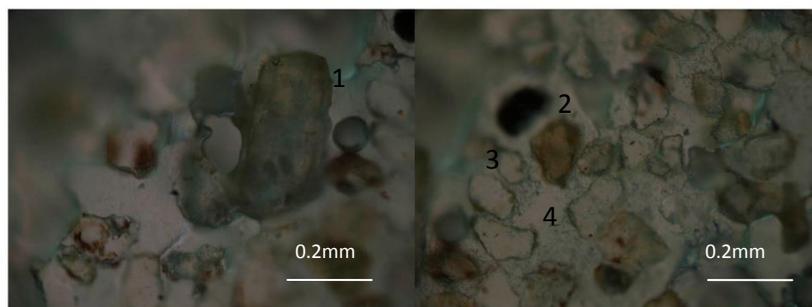


Figura A42. 1.-Monacita, 2.-Esfena, 3.- Esfena, 4.-Esfena

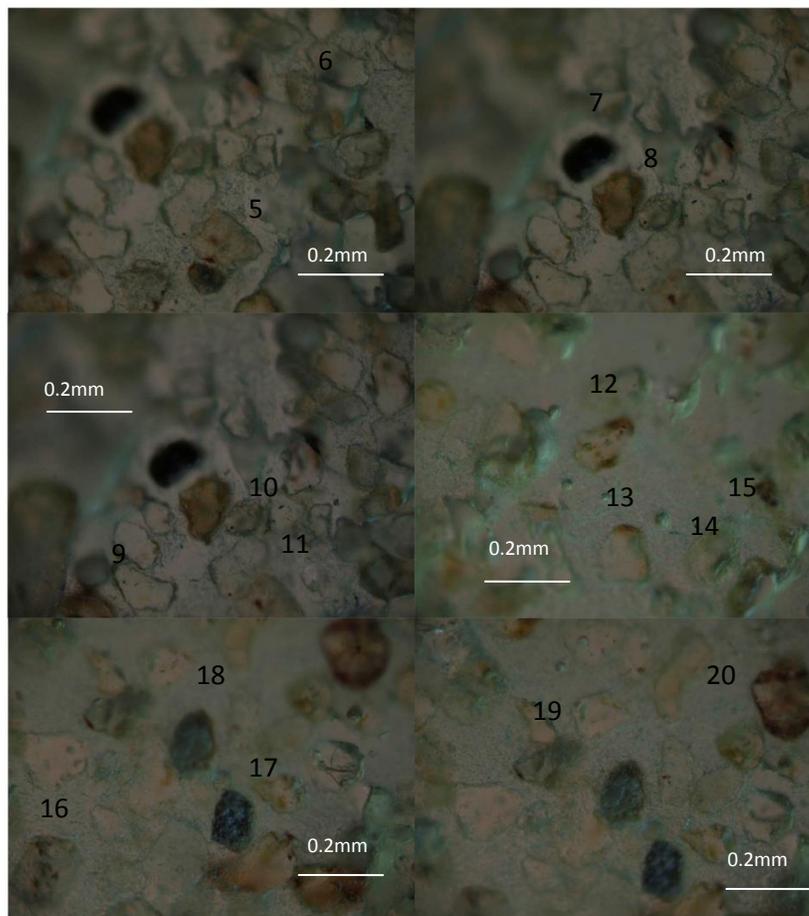


Figura A43. 5.-Monacita, 6.-Esfena, 7.-Rutilo, 8.-Rutilo, 9.-Monacita, 10.-Monacita, 11.-Esfena, 12.-Monacita, 13.-Esfena, 14.-Esfena, 15.-Esfena, 16.-Zircon, 17-Fragmento de roca, 18.-Cuarzo, 19.- Esfena, 20.-Monacita

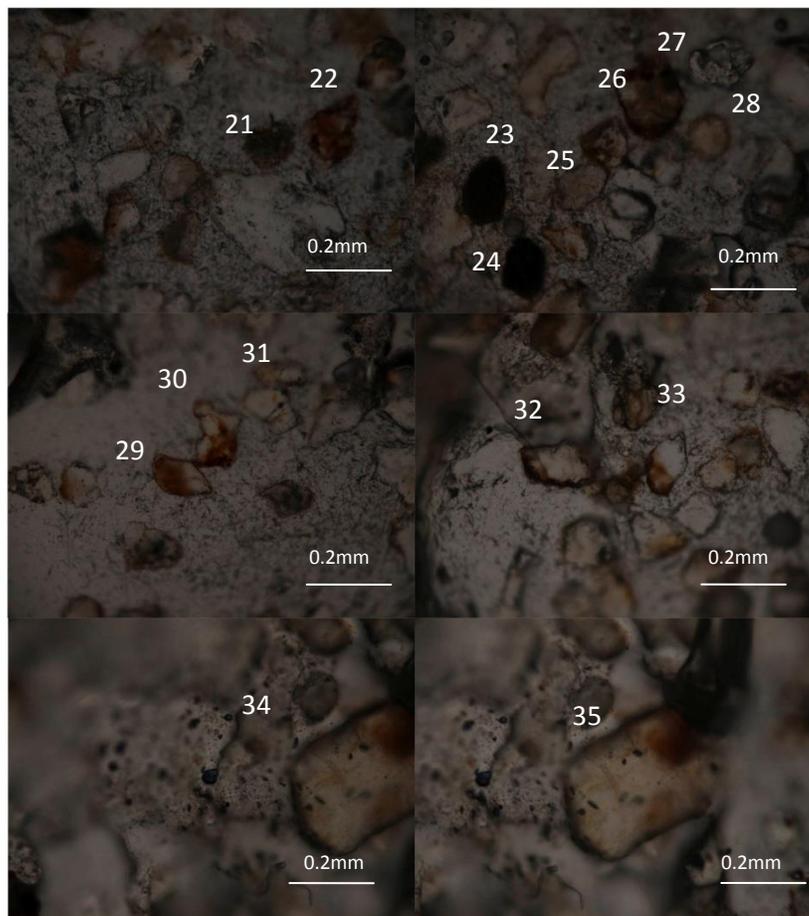


Figura A44. 21.-Cuarzo, 22.-Esfena, 23.- Rutilo, 24.-Rutilo, 25.- Monacita, 26.-Monacita, 27.-Esfena, 28.-Monacita, 29.-Esfena, 30.-Esfena, 31.-Esfena, 32.-Cuarzo, 33.-Monacita, 34.-Cuarzo, 35.- Monacita

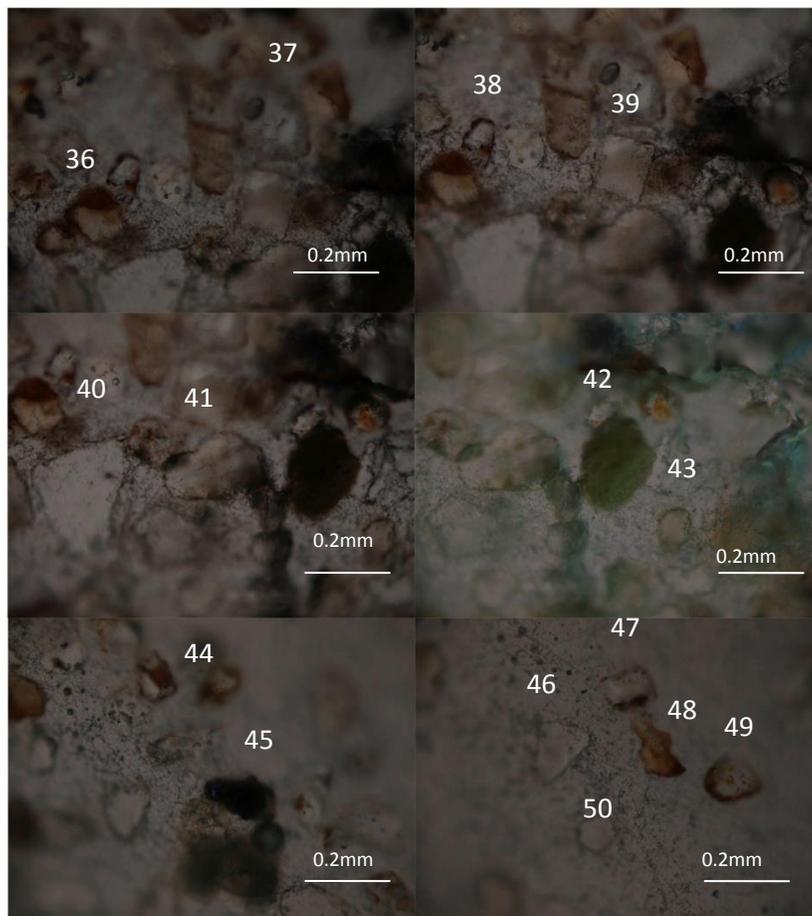


Figura A45. 36.-Monacita, 37.-Zircon, 38.-Esfena, 39.-Esfena, 40.-Esfena, 41.-Anidrita, 42.-Cuarzo, 43.-Monacita, 44.-Esfena, 45.-Rutilo, 46.-Esfena, 47.-Anidrita, 48.-Esfena, 49.-Monacita, 50.-Esfena