

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA Y GEOCRONOLÓGICA DE LAS QUEBRADAS HOYOS Y VICHÚ POR EL METODO DE HUELLAS DE FISIÓN, FORMACION BETIJOQUE, ESTADO TRUJILLO”

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela para
Optar al título de Ingeniero Geólogo
Por los Brs.
Flores Juan
Méndez Arelis

Caracas, Junio de 2005

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA Y GEOCRONOLÓGICA DE LAS QUEBRADAS HOYOS Y VICHÚ POR EL METODO DE HUELLAS DE FISIÓN, FORMACION BETIJOQUE, ESTADO TRUJILLO”

Tutor académico: Mauricio Bermúdez

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela para
Optar al título de Ingeniero Geólogo
Por los Bachilleres: Flores Juan
Méndez Arelis

Caracas, Junio de 2005

Caracas, Junio de 2005

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Brs. Juan Flores y Arelis Méndez, titulado:

“CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA Y GEOCRONOLÓGICA DE LAS QUEBRADAS HOYOS Y VICHÚ POR EL METODO DE HUELLAS DE FISIÓN, FORMACION BETIJOQUE, ESTADO TRUJILLO”

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, los declaran APROBADO.

Jurado

Jurado

Tutor

*A mi Dios por su ayuda para
la culminación de este trabajo,
gracias Padre.
A mi esposa por su paciencia y dedicación,
gracias por todo Marlene.
Agradezco con mucho gusto a
Ana Mercedes Dávila (Tata)
por ser suegra y madre
A mis hijos
(Juan Javier, Juan David, Marlenita y Juan Darío)
por su comprensión
Juan*

*A mi adorada hija Victoria Elena Campos
Por haber venido a este mundo a alegrarme la vida
en estos tiempos de desesperanza
para poder darle un futuro mejor
Arelis*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al profesor Mauricio Bermúdez por su ayuda como profesor y amigo, gracias profesor.

Al profesor Ricardo Alezones por su ayuda incondicional y oportuna, muchas gracias. Quiero dar un agradecimiento muy especial también a todos los compañeros que colaboraron para la realización de este Trabajo Especial de Grado, donde puedo nombrar a Humberto, gracias por tu cámara hermano.

Por último agradezco a mi compañera por esos momentos buenos y no buenos pero, todos momentos de aprender algo siempre, gracias Arelis.

Juan Flores

Quiero agradecer a muchísimas personas por su inspiración y ayuda en la realización de este Trabajo Especial de Grado

En primer lugar, quiero agradecer al profesor Mauricio Bermúdez ya que sin el no hubiera terminado esta Tesis. Gracias profesor por haber esperado tanto y haberme brindado la oportunidad de culminar mis estudios.

Quiero agradecer a varias personas que me ayudaron en mis estudios. Gracias Pedro, Jorge y a mi prima Yelitza por su colaboración en la elaboración de los trabajos escritos de la carrera.

También quiero agradecer a mi compañero de tesis por su espera y paciencia en la culminación de este Trabajo Especial de Grado, Gracias Juan Flores.

Y finalmente, tengo una deuda de gratitud con mis padres por ayudarme en esta última etapa de mis estudios cuidando y queriendo mucho a mi hija victoria. Gracias mamá y papá que no hay forma ni manera de atribuirle esta ayuda que me prestaron. De la misma manera a Alejandra Mabel, mi hermana por haber brindado apoyo.

“No puedo terminar esto agradecimiento sin hacer un reconocimiento especial a mi esposo Rafael Campos por haberme brindado toda la ayuda que estaba a su alcance para mi carrera ya que sin él fuera sido difícil terminarla, porque nunca vio un obstáculo en mis viaje, en mis trabajos y no me faltó nada económicamente ni logísticamente. Gracias amor por todo”.

Areli Mendez

Flores M., Juan G. y Méndez, Arelis.

**CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA Y GEOCRONOLÓGICA
DE LAS QUEBRADAS HOYOS Y VICHÚ POR EL METODO DE
HUELLAS DE FISIÓN, FORMACION BETIJOQUE, ESTADO
TRUJILLO**

**Tutor Académico: MSc. Mauricio A., Bermúdez C. Tesis. Caracas,
U. C. V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y
Geofísica (Geología). 2005, 132 páginas.**

Palabras Claves: análisis de imágenes de partículas, huellas de fisión, longitud de huellas, propiedades de partículas, eventos termales, correlación, quebrada Los Hoyos, quebrada Vichú, Formación Betijoque, miembros Vichú y Sanalejos.

Resumen

Las quebradas Los Hoyos y Vichú se encuentran en el flanco norte de Los Andes Venezolanos, y están muy cercanas entre sí, específicamente entre las poblaciones de Isnotú-Betijoque y Sabana de Mendoza, en el estado Trujillo, en ambas quebradas afloran la formación Betijoque, esta última se divide en dos miembros: Vichú y Sanalejos. La formación se caracteriza por no poseer fósiles diagnósticos o guías que permitan fecharlas.

Las areniscas detríticas que yacen en estas dos quebradas, se concentraron lateralmente por la erosión de la cordillera andina durante su levantamiento y plegamiento. Hacer una correlación de la manera usual no es posible, no sólo por la falta de capas guías o fósiles, sino por la presencia de fuertes cambios laterales.

El objetivo de este trabajo especial de grado fue hacer una correlación estratigráfica y geocronológica lateral de ambas quebradas y ubicar en ellas cada uno de los miembros de la Formación Betijoque utilizando el método de huellas de fisión. Sin embargo, no fue posible fechar los sedimentos ya que no se irradiaron las muestras para obtener las huellas inducidas y así poder emplear la ecuación de edad práctica del método de huellas de fisión (Wagner y Van Den Haute, 1992). No obstante, esto no fue impedimento, ya que se hizo una “correlación lateral” entre ambas quebradas usando análisis de propiedades de partículas para determinar proveniencia de sedimentos y longitudes de huellas de fisión espontáneas, este último análisis proporciona información confiable (Wagner y Van Den Haute 1992) sobre

los últimos eventos termales que han afectado los terrenos fuentes de donde provienen los sedimentos estudiados para ambas quebradas.

Se analizaron un total de 9 muestras de 15 kilogramos cada una, 5 provenientes de Hoyos y 4 provenientes de Vichú, a las cuales se les separó los minerales pesados obteniéndose un total de 118 granos de apatitos, 68 para Hoyos y 50 para Vichú, para aplicarles el método de huellas de fisión y los análisis de partículas. Este último, se realizó utilizando un programa para análisis de imágenes llamado Scion Image utilizado en medicina y en otras ciencias aplicadas.

Los resultados obtenidos sugieren que hay dos terrenos fuentes posibles, tal vez alguno de los granitos de Los Andes Venezolanos fechados anteriormente (Kohn-Shagam, 1984; Mora, 1995). Debido a que se encontraron dos clases bien definidas de partículas según sus propiedades (forma, redondez, esfericidad). Una población con valores altos y otra con valores intermedios de propiedades. Con respecto a los episodios tecto-termicos se registraron 4 en Hoyos y 3 en Vichú, posiblemente el episodio que falta en esta última tenga que ver con el Miembro Vichú.

Este trabajo representa un primer esfuerzo por combinar las ventajas de procedimientos de análisis de partículas mediante análisis de imágenes, longitudes de huellas de fisión y métodos estadísticos para la obtención de información con un alto grado de confiabilidad.

INDICE GENERAL

<i>AGRADECIMIENTOS</i>	<i>V</i>
<i>Resumen</i>	<i>VII</i>
<i>LISTA DE FIGURAS</i>	<i>XI</i>
<i>GENERALIDADES</i>	<i>3</i>
Introducción	<i>3</i>
Objetivos	<i>3</i>
Objetivo General	<i>3</i>
Objetivos Específicos.....	<i>3</i>
Planteamiento del Problema.....	<i>4</i>
Antecedentes del Método de Huellas de Fisión	<i>4</i>
Antecedentes del Marco Geológico	<i>6</i>
Metodología	<i>7</i>
Oficina.....	<i>7</i>
Campo	<i>8</i>
Laboratorio.....	<i>8</i>
<i>MARCO GEOLÓGICO</i>	<i>10</i>
Introducción	<i>10</i>
Localización, Extensiones y Acceso	<i>10</i>
Clima	<i>12</i>
Relieve	<i>12</i>
Hidrografía	<i>13</i>
Erosión y Meteorización	<i>13</i>
Vegetación y suelos	<i>14</i>
Estratigrafía Regional.....	<i>14</i>
Formación Isnotú (Edad Mioceno)	<i>16</i>
Formación Betijoque (Edad Mioceno).....	<i>17</i>
Geología Regional.....	<i>19</i>
Evolución Tectónica e Histórica Geológica.....	<i>22</i>
Rasgos geomorfológicos y fotogeológicos	<i>24</i>
Relieve	<i>24</i>
Drenaje	<i>25</i>
Geología Local	<i>26</i>
Litología	<i>27</i>
Estratigrafía Local.....	<i>29</i>
Quebrada Vichú	<i>29</i>
Quebrada Los Hoyos.....	<i>32</i>
Selección de muestras	<i>35</i>
<i>MÉTODO DE HUELLAS DE FISIÓN</i>	<i>36</i>
Introducción	<i>36</i>
Fase 1: Preparación de la muestra.....	<i>36</i>
Procedimientos.....	<i>36</i>
Fase 2: Separación gravimétrica y magnética.....	<i>42</i>
Procedimientos.....	<i>42</i>

Diagrama de Flujo para la Fase 2.....	43
Fase 3. Procesamiento del Apatito.....	47
Procedimiento.....	48
Diagrama de Flujo para la Fase 3.....	48
Importancia de las huellas de fisión espontáneas.....	51
Efecto de la temperatura sobre las huellas y el posible significado geológico.....	53
<i>ANÁLISIS DE FORMAS DE PARTÍCULAS</i>	58
Introducción.....	58
Propiedades de partículas.....	58
Forma de la partícula.....	59
Índices de la esfericidad y de la forma.....	60
Importancia de la forma.....	65
Redondez.....	66
Textura superficial.....	70
Otros métodos para analizar y cuantificar la forma de la partícula en 2D.....	72
Técnicas de Análisis de Contornos.....	72
Técnica de análisis de superficies planares.....	74
Métodos de adquisición de distribuciones de tamaños de cristales.....	74
Conversión estereológica de dimensiones 2D a las dimensiones verdaderas (3D).....	80
Formas y fábricas del cristal.....	80
Fuentes de error en los análisis.....	82
Descripción del programa Scion Image.....	83
<i>RESULTADOS Y ANÁLISIS</i>	90
Introducción.....	90
Resultados de los Análisis de Partículas.....	90
Estadística descriptiva.....	90
Clasificación de formas.....	93
Otros análisis estadísticos.....	105
Análisis termal mediante longitudes de huellas de fisión espontáneas.....	109
Análisis de longitudes de huellas para la quebrada Los Hoyos.....	110
Análisis de longitudes de huellas para la quebrada Vichú.....	112
<i>CONCLUSIONES</i>	116
<i>REFERENCIAS</i>	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Ubicación Geográfica de la zona de estudio.....	11
Figura 2.2: Estratigrafía de la zona de estudio junto con la columna de tiempo geológico.....	15
Figura 2.3: Extensión de la Formación Isnotú.....	16
Figura 2.4: Extensión de La Formación Betijoque.....	18
Figura 2.5: Estructura en flor	20
Figura 2.6: Evolución en el Mioceno-Plioceno.....	23
Figura 2.7: Tope de la secuencia Quebrada Vichú.....	25
Figura 2.8: Base de la secuencia Quebrada Vichú.....	26
Figura 2.9: Tope de la secuencia Quebrada Los Hoyos.....	27
Figura 2.10: Posible Contacto Quebrada Los Hoyos.....	28
Figura 2.11: Selección de muestra.....	29
Figura 2.12: Fotografía aérea.....	34
Figura 3.1: Procesamiento de la Muestra.....	36
Figura 3.2 Trituradora.....	37
Figura 3.3: Mesa de sacudida de Wilfley.....	38
Figura 3.4: Turbulencia.....	39
Figura 3.5: Ultrasonido.....	40
Figura 3.6: Horno Isotérmico.....	41
Figura 3.7: Separación magnética (imán).....	42
Figura 3.8: Procesamiento de minerales.....	43
Figura 3.9: Campana Extractora.....	43
Figura 3.10: Embudo de separación en la campana extractora.....	44
Figura 3.11: Lavado del Mineral.....	44
Figura 3.12: Precipitación del Bromoformo.....	46
Figura 3.13: Separador Magnético Frantz.....	47
Figura 3.14: Procesamiento del apatito.....	48
Figura 3.15: Materiales para el montaje del apatito.....	49
Figura 3.16: Materiales utilizados para el pulido de las pastillas.....	50
Figura 3.17: Granos de apatitos.....	51
Figura 3.18: Etapas de la formación de una huella de fisión.....	52
Figura 3.19: Gráfico ilustrativo de la temperatura de cierre y de la zona de producción de huella.....	53
Figura 3.20: Subsistencia de cuenca.....	55
Figura 3.21: Levantamiento tectónico de una cuenca.....	55
Figura 4.1: Representación gráfica simplificada de la forma de la partícula, redondez y superficie textural.....	60

Figura 4.2: Circunferencia sobre un grano de la quebrada Los Hoyos.....	61
Figura 4.3: Clasificación de formas de guijarro.....	64
Figura 4.4: Diagrama Triangular.....	64
Figura 4.5: Relación de r a R	67
Figura 4.6: Escala Verbal de redondez.....	68
Figura 4.7: Carta visual de redondez y esfericidad para partícula de arena.....	68
Figura 4.9: Procedimiento de desarrollamiento del contorno del grano.....	73
Figura 4.10: Dimensión de la intersección.....	76
Figura 4.11: Aplicación del Programa Scion Image para determinar crecimiento de células cerebrales.....	84
Figura 4.12: Opciones de medición de parámetros del programa Scion Image.....	85
Figura 4.13: Representación esquemática de los pasos realizados para el análisis de imágenes y los resultados.....	88
Figura 5.1: Diagrama ternario de la muestra H002.....	93
Figura 5.2: Diagrama ternario de la muestra H005.....	94
Figura 5.3: Diagrama ternario de la muestra H007.....	95
Figura 5.4: Diagrama ternario de la muestra H009.....	96
Figura 5.5: Diagrama ternario de la muestra H011.....	96
Figura 5.6: Diagrama ternario de todas las muestras de la Quebrada Los Hoyos.....	97
Figura 5.7: Diagrama ternario de la muestra V037.....	98
Figura 5.8: Diagrama ternario de la muestra V091.....	99
Figura 5.9: Diagrama ternario de la muestra V095.....	99
Figura 5.10: Diagrama ternario de la muestra V101.....	100
Figura 5.11: Diagrama ternario de todas las muestras de la Quebrada Vichú.....	101
Figura 5.12: Relación entre esfericidad matemática e índices de forma para las muestras de la Quebrada Los Hoyos.....	102
Figura 5.13: Ajuste de los datos de índices de forma de las muestras de la Quebrada los Hoyos por regresión lineal.....	103
Figura 5.14: Relación entre esfericidad matemática e índices de forma para las muestras de la Quebrada Vichú.....	104
Figura 5.15: Ajuste de los datos de índices de forma de las muestras de la Quebrada Vichú por regresión lineal.....	105
Figura 5.16: Ajuste de los datos de índices de forma y esfericidad matemática para las muestras de la Quebrada Los Hoyos y Vichú con sus respectivos ajuste.....	106

Figura 5.17: Histograma de forma.....	107
Figura 5.18: Relaciones entre diámetro mayores y menores de las elipses para los granos de Hoyos y Vichú.....	108
Figura 5.19: Dendograma o análisis de cluster para detectar poblaciones de forma.....	109
Figura 5.20: Dendograma o análisis de cluster para detectar poblaciones de forma en las dos quebradas.....	110
Figura 5.21: Longitudes de Huellas de Fisión espontáneas para las muestras de Los Hoyos.....	111
Figura 5.22: Histograma con curvas de densidad de probabilidad de longitudes de Huellas espontáneas para las muestras individuales de Los Hoyos.....	112
Figura 5.23: Histograma con curvas de densidad de probabilidad de longitudes de Huellas espontáneas para todas las muestras de Los Hoyos.....	113
Figura 5.24: : Longitudes de Huellas de Fisión espontáneas para la muestra de Vichú.....	114
Figura 5.25: Histograma con curvas de densidad de probabilidad de longitudes de Huellas espontáneas para las muestras individuales de Vichú.....	115
Figura 5.26: Histograma con curvas de densidad de probabilidad de longitudes de Huellas espontáneas para todas las muestras de Vichú.....	

LIST.	Tabla 3.1: Clasificación de minerales pesados según su índice de susceptibilidad magnética.....	
	Tabla 3.2: Huellas de Fisión, temperatura de retención de los materiales terrestres basados en el desvanecimiento de huellas..	
	Tabla 4.1: Relación de clase verbal de redondeo de Power, a la redondez de Wadell y la escala de ρ	47
	Tabla 4.2: Parámetros básicos medidos con el programa de análisis de imágenes.....	53
	Tabla 4.3: Principales características sedimentológicas.....	39
	Tabla 5.1: Estadística descriptiva de los parámetros obtenidos por la Quebradas Los Hoyos.....	90
	Tabla 5.2: Estadística descriptiva de los parámetros obtenidos por la Quebrada Vichú.....	90
	Tabla 5.3: Parámetro de análisis de cluster o construcción de dendograma.....	92
	Tabla 5.4: Muestra estudiada para análisis de longitudes de Huecos de Fisión Espontáneas.....	93
		108
		109

INTRODUCCIÓN

El método de datación por huellas de fisión, se basa en el estudio de una serie de marcas provocadas por procesos de fisión espontánea que experimentan los átomos de elementos radiactivos como el Uranio U^{238} . Las huellas de fisión se observan entonces en minerales que contienen átomos de U^{238} , como los apatitos. Estos minerales son de origen magmático y metamórfico pero se encuentran también removilizados en rocas sedimentarias detríticas

A diferencia de otros métodos de datación, éste ofrece información sobre la temperatura a la que ha estado sometido el material a lo largo de su historia geológica.

El objetivo general de este Trabajo Especial de Grado es utilizar el método de Huellas de Fisión basado en la técnica del detector externo aplicado a apatitos detríticos contenidos en las Formaciones Betijoque e Isnotú con la finalidad de correlacionar las columnas estratigráficas aflorantes en las Quebradas Los Hoyos y Vichú ubicadas en el estado Trujillo.

Se espera que el método de Huellas de Fisión nos ayude a correlacionar lateralmente estas quebradas para establecer la influencia de los ambientes sedimentarios de esta zona.

El actual Trabajo Especial de Grado se presenta en cinco capítulos:

En el primer capítulo se establecen los objetivos de este Trabajo Especial de Grado, los antecedentes, el alcance, las limitaciones y los pasos necesarios para el desarrollo del mismo.

El segundo capítulo se refiere a los aspectos geográficos y geológicos, incluyendo ubicación de la zona de estudio, geología regional, geología local, características principales de las formaciones geológicas, columnas estratigráficas, interpretación de las fotografías aéreas de la zona de estudio e interpretación de las secciones finas de las muestras recolectadas en campo.

El tercer capítulo describe el procedimiento mediante el cual se separan los minerales pesados de las muestras de sedimentos tomados en campo para conseguir el

mineral Apatito, los equipos utilizados para la separación de estos minerales y la obtención de la huella de fisión.

En el cuarto capítulo se estudia la forma de la partícula, esfericidad, redondez y textura superficial, con el fin de analizar estadísticamente los granos provenientes de las Quebradas Vichú y Los Hoyos a través de gráficos, utilizando como aplicación el programa *Scion Image*.

El último y quinto capítulo incluye el análisis de los resultados de los gráficos de la forma de la partícula, con la finalidad de identificar ambientes depositacionales y posibles terrenos fuentes.

Posteriormente se realizan las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

Introducción

En el presente capítulo se establecen los objetivos de este Trabajo Especial de Grado, los antecedentes, el alcance, las limitaciones y los pasos necesarios para el desarrollo de este trabajo.

Objetivos

Objetivo General

El objetivo general en este Trabajo es utilizar el método de Huellas de Fisión basado en la técnica del detector externo aplicado a apatitos detríticos contenidos en la Formación Betijoque con la finalidad de correlacionar las columnas estratigráficas aflorantes en las quebradas Los Hoyos y Vichú ubicadas en el estado Trujillo.

Objetivos Específicos

1. Elaboración del corte y mapa geológico del área de estudio.
2. Levantamiento de dos columnas estratigráficas detalladas de las quebradas Los Hoyos y Vichú, donde afloran la formación Betijoque.
3. Separación de minerales pesados para la obtención de apatitos detríticos en muestras de rocas no consolidadas.
4. Aplicación de la técnica del detector externo (TDE) sobre las muestras recolectadas.
5. Elaboración de una columna estratigráfica general.

6. Determinación de estructuras geológicas principales dentro de la zona de estudio, mediante estudio fotogeológico detallado y observaciones realizadas en campo.
7. Correlación de eventos termales mediante mediciones de longitud de huellas de fisión espontáneas sobre minerales de apatitos existentes en muestras pertenecientes a areniscas de la formación Betijoque presentes en las quebradas Los Hoyos y Vichú.
8. Determinación de posibles terrenos fuentes, mediante estudios morfológicos de minerales pesados.

Planteamiento del Problema

El problema planteado en este Trabajo Especial de Grado es estudiar la continuidad lateral de las formaciones antes mencionadas sobre las secciones aflorantes en las quebradas Los Hoyos y Vichú muy próximas entre sí, con una separación horizontal promedio de 2 kilómetros. Parte de estas formaciones fueron fechadas por huellas de fisión en los trabajos de *Mora* (1995) y *Yegres* (2003), sin embargo hasta el momento no se ha correlacionado lateralmente ambas quebradas con la finalidad de establecer la influencia del ambiente sedimentario en esta zona. Aun más con la extensión planteada es posible identificar si existen otros terrenos fuentes asociados a los ya determinados en los trabajos previos de *Khon et al.* (1984), *Mora* (1995) y *Yegres* (2003).

Antecedentes del Método de Huellas de Fisión

Hahn y Strassmann en 1938, descubrieron la fisión de los átomos, cuando bombardearon uranio con neutrones y obtuvieron bario. Esta fisión produjo una huella la cual fue observada por primera vez por *Silo y Barnes* en 1959. Estas huellas pueden ser ampliadas con la finalidad de hacerlas visibles bajo el microscopio óptico, utilizando soluciones químicas apropiadas, este proceso se llama *revelado* o *ataque*

químico y fue realizado por *Price y Walker* en 1962, quienes también notaron la fisión espontánea de átomos de U^{238} producida en la naturaleza sobre micas muscovitas y determinaron otras aplicaciones de las huellas de fisión sobre partículas.

Una de estas aplicaciones es la datación de minerales como tektitas (rocas generadas por impactos de meteoritos con la superficie terrestre) y vidrios volcánicos, específicamente, *Fleischer y Price* fecharon estos minerales en 1964, y sus resultados fueron concordantes con otros métodos de datación radiométrica, de esta manera, ellos establecieron el uso del método de huellas de fisión para datar eventos geológicos en el tiempo. Otros autores como *Wagner* (1966), *Bigazzi* (1967) y *Naeser* (1980) entre otros, perfeccionaron la técnica e implementaron el uso de detectores externos o micas que son colocados sobre los minerales que contienen átomos de U^{238} , con la finalidad de mejorar el método de huellas de fisión y aplicarlos sobre rocas con diferentes concentraciones de uranio.

Con respecto a la zona de estudio, se ha investigado muy poco utilizando el método de huellas de fisión, una de estas fue realizada por *Shagam y Kohn* en 1984, sobre los minerales circón, esfena y apatito, con la finalidad de establecer las diferentes edades de éstos cuerpos ígneos, el aporte más importante de este trabajo, es que se establecieron algunos de los terrenos fuentes.

Mora, (1994), determinó algunas edades sobre las molasas presentes en los flancos norte y sur de los Andes Venezolanos en un trabajo inédito publicado para LAGOVEN, C.A.

Yegres, (2003), describió y efectuó los pasos necesarios para aplicar el método de huellas de fisión con la técnica del detector externo en la Formación Betijoque.

Antecedentes del Marco Geológico

Berry (1921) menciona que los únicos fósiles encontrados en la localidad tipo de la Formación Betijoque son restos de plantas del tipo: *Blechnum Betijoquensis*, *Ficus Betijoquensis* y *Ectraida Boweni*.

Garner en 1926 fue el primero en publicar con el término de Formación Betijoque las descripciones de una secuencia ubicada en las afueras del pueblo de Betijoque, al oeste del estado Trujillo, y *Liddle* en (1928) fue el primero en realizar una descripción completa de la unidad bajo el nombre de Capas de Betijoque, pero incluyendo en este término a las formaciones Isnotú y Palmar. Luego en (1946) *Sutton* describe a la formación Betijoque formada por Capas masivas y arcillas, los conglomerados representan el 25% de la unidad. Posteriormente (*C.V.E.T*) (1970) considera la edad de la formación Betijoque como Mioceno Tardío a Plioceno, basado en la correlación regional y apoyada por la determinación de los restos de plantas encontradas por *Berry* (1921).

García y Campos (1972) definen dos estilos tectónicos muy diferentes en la región Valera – Escuque. Un estilo tectónico más antiguo que se extiende hasta el Triásico y otro más joven caracterizado por el levantamiento o inclinación de bloques a consecuencia de reacciones mecánicas entre bloques corticales. Este último prevalece hasta nuestros días también. Ellos en el año 1977 definieron una columna estratigráfica en la región Valera - Escuque que incluye rocas cuya edad se extiende desde el Precámbrico tardío al Cuaternario. Las rocas precámbricas pertenecen a la “Facies Sierra Nevada” del Grupo Iglesia.

Taherí et al., en 1991 presenta los resultados parciales sobre la textura y geometría de los litosomas aflorantes en la Formación Betijoque al noreste de Valera, estado Trujillo y *Aquino* en 1992 presenta un estudio sobre el modelaje de geometría en los cuerpos sedimentarios de la Formación Betijoque en el área de

interés del presente estudio. Los resultados de este trabajo constituyen el primer paso para poder predecir arquitectura externa y características externas en estos ambientes continentales.

Vargas, Yoris, Maguregui. & Taheri Jornadas LV Aniversario de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, describe y caracteriza las diferentes litofacies presentes en dos afloramientos de la Formación Betijoque (Mioceno-Plioceno) que representan unos 70 m de espesor que incluye 9 parasecuencias de canal-planicie de inundación, pertenecientes a ambientes continentales en la parte distal de un abanico aluvial.

Álvarez en 1996, presenta un estudio de porosidad y permeabilidad en la Formación Betijoque de un total de 29 muestras de areniscas que pertenecen a las facies abanico distal, abanico medio-distal y abanico medio la cual se caracteriza por contener porosidad primaria y secundaria. La porosidad primaria más resaltante es la de tipo interpartícula y dentro de la porosidad secundaria las más representativas son las de tipo empaquetamiento inhomogéneo, poros elongados y disolución parcial de grano.

Metodología

Oficina

- a) Se realizó la fotointerpretación de la zona de estudio.
- b) Se utilizaron las bases de datos: GeoRef (Termocronología de la UCV), Science Citation Index (IVIC), las bibliotecas nacionales (INTEVEP, PDVSA, ULA, UDO, LUZ, USB), Ministerio de Energías y Minas, Instituto de Ingeniería (MCT) e Internet.
- c) Se estudió el método de huellas de fisión a través de la técnica del detector externo.

- d) Se estudió con detalle cada uno de los equipos de laboratorio, se leyeron los manuales y se siguieron las medidas de seguridad dentro del laboratorio.
- e) Se estudiaron diferentes programas para el análisis de imágenes de minerales pesados, así como las diferentes variables que proporcionan la relación de los minerales con la cercanía del terreno fuente.

Campo

- a) Se levantaron las columnas estratigráficas de la Formación Betijoque en detalle de las secciones aflorantes en las quebradas Los Hoyos y Vichú, estado Trujillo.
- b) Se tomaron las muestras de areniscas para aplicarles el Método de Huellas de Fisión.
- c) Se elaboraron mapas y cortes geológicos.

Laboratorio

- a) Se realizó un estudio detallado de las secciones finas de muestras pertenecientes a la quebrada Vichú.
- b) Se extrajeron los granos de apatito por los diferentes métodos (gravimétrico, magnético y la técnica de separación de minerales pesados a través de ataque químico).
- c) Se preparó la muestra basándose en la técnica del detector externo con la finalidad de estudiar las huellas espontáneas.
- d) Se estudiaron la forma de los minerales pesados, y se tomaron varias medidas bajo un microscopio.
- e) Se estudio grano por grano las huellas de fisión espontáneas y la morfología de estos granos en un programa de análisis de imágenes conocido como Scion Image, utilizado en medicina.

- f) Se estudió la relación entre longitud de huellas de fisión espontánea y propiedades físicas de los granos, para establecer parámetros como número de fuentes, distancia de la fuente, profundidad termal de la fuente.
- g) Se graficaron y se interpretaron estos resultados.

CAPITULO II

MARCO GEOLÓGICO

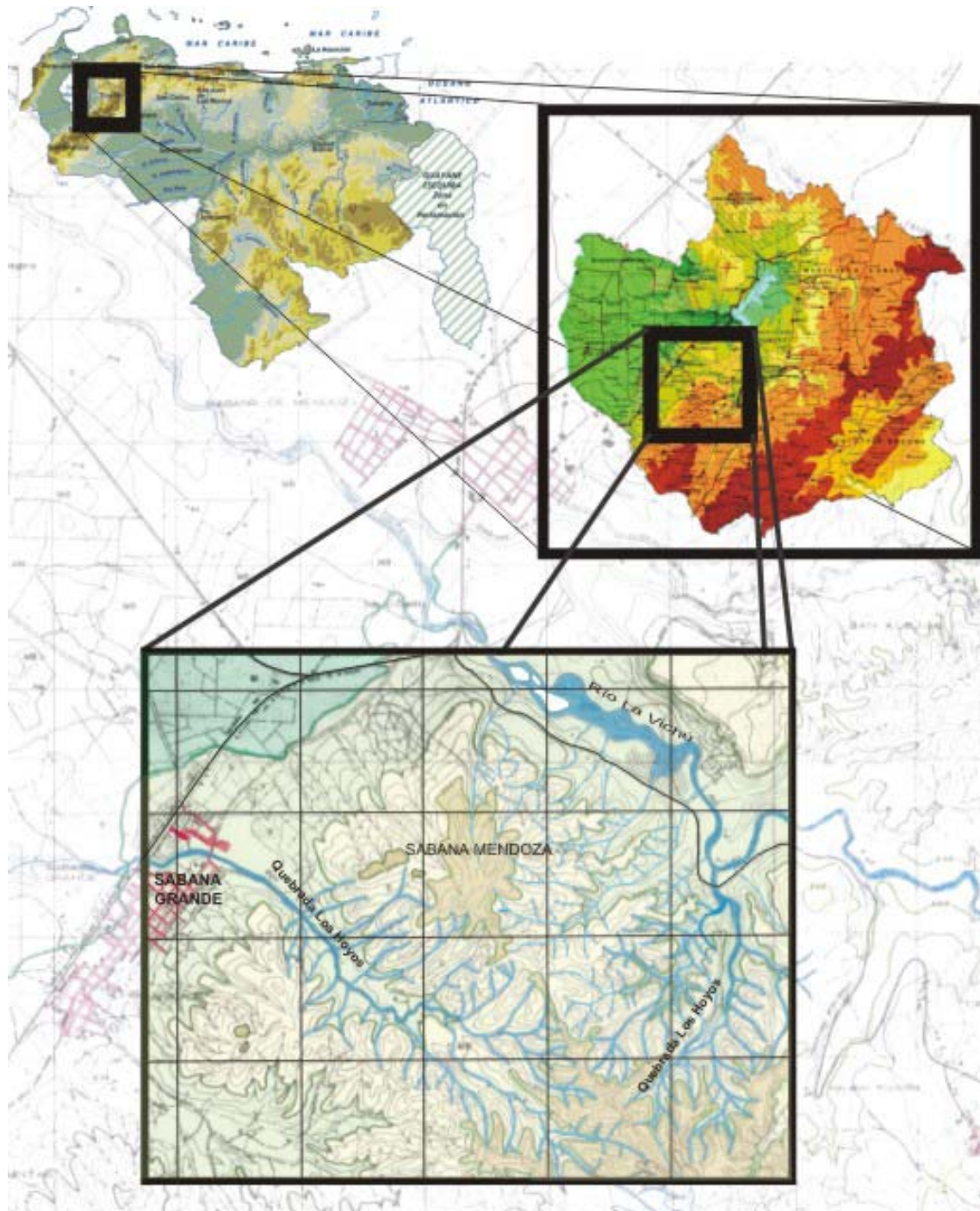
Introducción

En este capítulo, se presentan algunos aspectos geográficos y geológicos de la zona de estudio, tales como: ubicación, extensión, zonas de acceso, geografía física, geología regional, local, estructural e interpretación de fotografías aéreas. Así como también las características principales de las formaciones geológicas presentes en la zona de trabajo.

Localización, Extensiones y Acceso

El área de estudio, específicamente se localiza en el límite entre las poblaciones de Isnotú y Sabana de Mendoza para la quebrada Vichú y para la quebrada Hoyos entre las poblaciones de Sabana Grande y Betijoque, ubicadas en las coordenadas IGSB: Hoja 6044 Betijoque coordenadas 1040000mN. a 1044.000mN, 302.000mE a 308.000mE. La zona abarca una superficie aproximada de 10 km².

La principal vía de acceso es la carretera Panamericana específicamente el segmento que va desde Sabana de Mendoza hasta Betijoque para la quebrada Vichú y Sabana de Mendoza hasta Sabana Grande para la quebrada Hoyos. En la figura 2.1, se ilustra la ubicación del estado Trujillo y la zona de estudio, delimitada por el rectángulo negro.



*Figura 2.1: Ubicación geográfica de la zona de estudio.
(Tomado y modificado de Mapas de Venezuela y Carta 6044)*

Geografía Física

Clima

El relieve favorece la formación de una serie de climas locales, donde los vientos juegan un papel muy importante, penetrando al estado tanto por el noreste, como por el este (vientos Llaneros). www.trujillovirtual.com/nacer

El clima predominante en casi la totalidad del estado corresponde, según la clasificación de Kóeppen, a clima de sabana (Aw), con una temperatura media anual aproximada en la capital del estado de 23,5 °C y precipitaciones que alcanzan los 936 mm al año.

Relieve

La entidad se caracteriza por presentar un relieve muy accidentado, donde el 69% de su superficie lo constituye espacios montañosos y reducidos valles intra montanos; un 17% corresponde a una transición entre relieves accidentados y áreas bajas circundantes y un 14% está representado por un área plana en forma de planicie de explayamiento y desbordamiento. Estos sectores presentan una serie de restricciones para su utilización; en el caso de los valles, por el carácter tectónico y fallado que determina una alta incidencia sísmica y en las planicies, por los problemas de mal drenaje y ocurrencia temporal de inundaciones.

www.trujillovirtual.com/nacer

La Cordillera de Trujillo constituye la columna vertebral de las tierras trujillanas. Esta cordillera y la prolongación de la Sierra del Norte, dan origen a dos valles: el valle alto del río Motatán y el valle del río Momboy, ambos se encuentran separados por una fila que presenta alturas superiores a los 2.000 m integrando un profundo surco. En dirección suroeste-noreste se desarrolla el valle del río Boconó dominado por filas que remontan alturas superiores a los 3.000 m.

En el oeste la Sabana de Monay y los Llanos del Cenizo constituye una zona llana y pantanosa que mediante obras de canalización se convirtió en una importante área de producción de maíz, arroz y plátano.

Hidrografía

En el estado Trujillo existen dos grandes cuencas principales: la cuenca hidrográfica del río Motatán, que vierte sus aguas en la hoya del Lago de Maracaibo, esta constituye la cuenca de mayor superficie y es la principal fuente de agua disponible, tanto para el consumo humano como para riego, siendo sus principales afluentes los ríos Jiménez, Castan, Monboy, Jirajara, Carache y Monaicito, y la cuenca del río Boconó, que drena sus aguas al río Orinoco, representan una superficie de 1.600 Km² y dispone de aguas superficiales para dotar de acueductos a todos los centros poblados localizados dentro de ella, quedando excedentes para riego y otros usos. Los principales afluentes de esta cuenca son: río Negro y Butaré, y las quebradas San Miguel y San Rafael. www.trujillovirtual.com/nacer

Otras características de la hidrografía trujillana es la disponibilidad de aguas subterráneas, localizadas fundamentalmente en la planicie aluvial; fuentes de aguas termales, alcanzando temperaturas de 50 C°, entre las cuales se menciona El Baño y Aguas Calientes; la formación de ciénagas, las cuales conforman una franja de 50 Km al oeste del estado y, por último, la constitución de pequeños espejos de agua en las tierras altas, por arriba de los 3.000 m.

Erosión y Meteorización

La cuenca del río Motatán tiene un área aproximada de 4.454 Km² hasta la estación hidrométrica de Agua Viva ubicada en el cruce del río Motatán con la carretera Panamericana. El estado Trujillo presenta una variedad de condiciones edafológicas, geológicas y topográficas, con características de sistema agroecológicos asociados, dadas las fuertes pendientes y la intervención antrópica que caracteriza a la

región andina. Los principales problemas de degradación se asocian con el proceso de erosión hídrica. La existencia predominante de patrones de drenaje de tipo paralelo pone en evidencia el predominio de fallas y otros fenómenos tectónicos, lo cual favorece los procesos de erosión hídrica. *Materano, (1981).*

Vegetación y suelos

Vegetación

Las características físico-naturales, particularmente el relieve y el clima, influyen en la formación de la cobertura vegetal natural, la cual actúa como reguladora, tanto del régimen hídrico como de las condiciones climáticas. En aquellas áreas de mayor humedad, sobre todo en las zonas donde nacen los ríos Boconó, Río Negro, Saguás, Bonilla, Castán, Jirajara y Villegas, y en algunos sectores de la zona baja predomina el bosque alto en forma muy dispersa. Las áreas de las ciénagas se caracterizan por una vegetación arbórea poco desarrollada; al norte del estado predominan los pastos, mientras que en las montañas se extiende los paisajes de paramos y se localizan selvas nubladas por arriba de los 1.700 m y por debajo de dichas formaciones forestales se encuentran los bosques montanos y premontanos.

www.auyantepuy.com/web/referencia

Suelos

Es tradicionalmente agrícola, el estado Trujillo posee. El Plan Estatal de Ordenación expone que un 64.5% del territorio posee buenas condiciones para la implementación de una variedad de sistemas productivos agropecuarios de cierta intensidad y que el 35,5% restante está cubierto de vegetación natural protectora.

Los suelos presentan una variabilidad como consecuencia de los bruscos cambios de altitud, precipitación, topografía y el material parental. *Materano, (1981).*

Estratigrafía Regional

En la figura 2.2 se ilustra la situación relativa y las edades de las formaciones que constituyen la zona de estudio. En este trabajo las formaciones de interés son Betijoque e Isnotú. La primera dividida en dos miembros: Sanalejos y Vichú de edades, según la columna de tiempo ubicada a la derecha de esta figura, Mioceno Tardío a Pleistoceno, y la segunda con una edad Mioceno Temprano a Mioceno Medio según el (L.E.V. 2001)

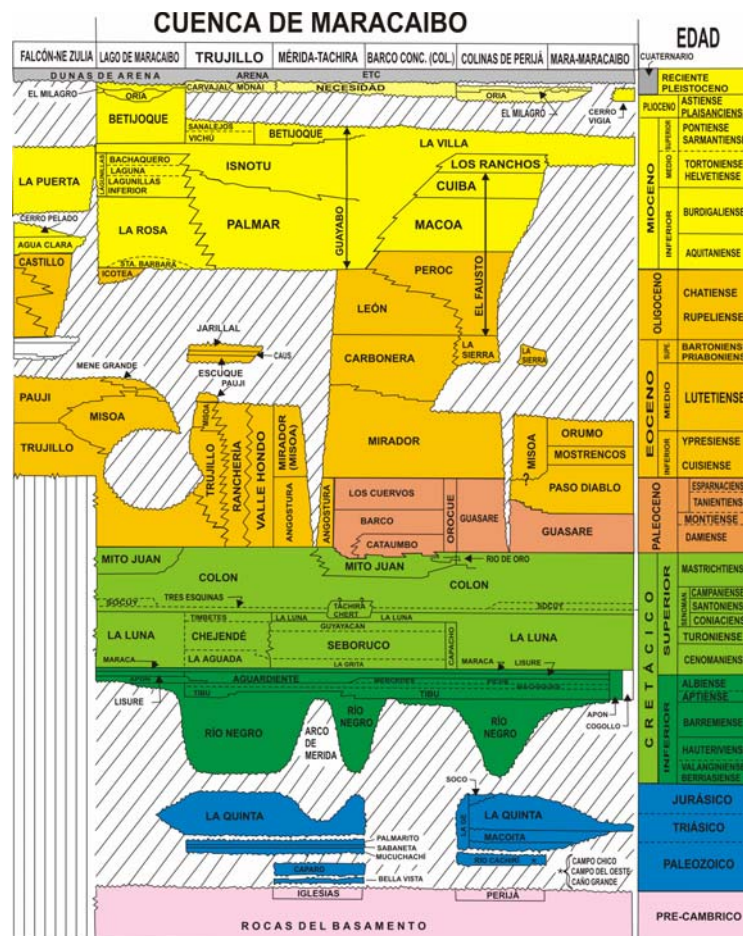


Figura 2.2: Estratigrafía de la zona de estudio junto con la columna de tiempo geológico. (Tomada del L.E.V. 2001)

Formación Isnotú (Edad Mioceno)

La extensión de la Formación Isnotú es mostrada en la Figura 2.3, esta formación abarca casi tres estados: Táchira, Mérida y Trujillo. Pertenece al Grupo Guayabo, la localidad tipo aflora en y al oeste del pueblo de Isnotú sobre la carretera Motatán- Betijoque, Trujillo oeste-central. (L.E.V. 2001).



*Figura 2.3: Extensión de la Formación Isnotú.
(Tomado y modificado del L.E.V, 2001)*

Durante el Mioceno Medio a Tardío, el ambiente dominante fue continental, representado por sedimentación de abanicos aluviales y ríos entrelazados de la Formación Isnotú. Según el C.I.E.N. (1998), litoestratigráficamente predominan las arcillas (65%) con numerosas areniscas intercaladas y capas subordinadas de arcilla laminar, carbón y conglomerados. Las arcillas son macizas pero blandas, de color gris claro, corrientemente abigarradas en rojo, púrpura y amarillo y localmente carbonáceas; las areniscas son de color variable, principalmente blanca a gris claro y

se presenta en capas de 2 a 3 metros de espesor. La formación carece casi totalmente de fósiles, salvo restos indeterminados de plantas.

Contactos: En la región tipo la unidad es discordante sobre la Formación Paují y unidades más antiguas (Salvador, 1961-a). Más al sur es concordante y transicional sobre la Formación Palmar, que difiere de ella por su color y mayor contenido de arenisca y lutitas. Infrayace concordante y transicionalmente a la Formación Betijoque, que se diferencia por sus conglomerados conspicuos, areniscas parduscas y ausencia de colores abigarrados.

Formación Betijoque (Edad Mioceno)

En la figura 2.4 se aprecia la extensión de la Formación Betijoque, el cual se extiende principalmente a lo largo del estado Mérida, desaparece en la frontera con el estado Táchira y tiene una menor presencia hacia el estado Trujillo.

Esta formación se divide en dos miembros:

Miembro Inferior Vichú

Este miembro consiste típicamente en limolitas gris verdosas, frecuentemente intercaladas con areniscas pardas de grano fino a grueso; hacia el tope del miembro aparecen conglomerados delgados; toda la secuencia contiene frecuentes perdigones de cuarzo y ocasionalmente restos de madera fósil. (L.E.V. 2001)

Contacto: El Miembro Vichú (inferior) es concordante y transicional tanto con el Miembro Sanalejos suprayacente como con la Formación Isnotú infrayacente.

Ambiente: la mayor parte de la unidad se depositó bajo condiciones similares a las de la Formación Isnotú, pero sin los fenómenos de oxidación de esta última, hacia su parte superior se produjeron levantamientos leves que precedieron la etapa de levantamientos pronunciados ocurridos en tiempos del Miembro Sanalejos. Vargas, (1992)

Miembro Tardío Sanalejos

Se caracteriza por ser fundamentalmente conglomerático con capas de hasta 12 m de espesor, además hay intercalaciones de areniscas y limolitas.

Contactos: concordante y transicional con el Miembro Vichú y en discordancia angular por debajo de la Formación Carvajal. (L.E.V. 2001)

Ambiente: el carácter conglomerático del Miembro Sanalejos indica movimientos intensos durante su sedimentación, que corresponden al periodo de mayor levantamiento de la Cordillera. Vargas. (1992)



Figura 2.4: Extensión de la Formación Betijoque.
(Tomado y modificado del L.E.V, 2001)

Geología Regional

Las estructuras que caracterizan la región andina son el producto de una serie de ciclos orogénicos que han sucedido en el tiempo desde antes del Paleozoico. Dichos ciclos incluyen la depositación de secuencias sedimentarias, su posterior metamorfismo y deformación regional.

Cuando se observa la cordillera andina actual, se puede percibir un patrón estructural basado principalmente en bloques fallados. Estos bloques según lo expresa *González de Juana et al, (1968)*, constituyen grandes unidades que se han diferenciado, tanto en función de los esfuerzos que han experimentado, variables en el tiempo y espacio, como en función de su contenido litológico particular. El estilo estructural viene definido en base al patrón de cizallamiento que es bien conocido en cuanto a su existencia, más no en relación a su funcionamiento y edad.

El sistema de fallas andino es muy prominente, al igual que el de Perijá, sigue el curso de la cordillera, dirección noreste, y la falla más importante es la conocida falla de Boconó, de unos 450 kilómetros de longitud y desplazamiento dextral transcurrente dominante. Según *Schubert (González de Juana, 1968)* el movimiento a lo largo de otras fallas de la región es primordialmente inverso. Este mismo autor, *Schubert* en 1982, describe la estructura general del levantamiento andino, como producto de los esfuerzos compresivos de la Falla de Boconó generándose una estructura en flor (figura 2.5), siendo uno de los modelos más aceptados.



Figura 2.5. Estructura en flor, elevaciones tectónicas producidas en la zona de cizallamiento intenso y en momentos transgresivos
(Tomado de www.usuarios.lycas.es/aepect/astenosfera/documentos)

Posteriormente, *Feo-Codecido* (1970), relaciona los sistemas de falla transcurrente de la región (norte de América del Sur) entre ellas Boconó, con el movimiento relativo entre las placas del Caribe y Suramérica.

Kellog (1984), interpreta las fases tectónicas cenozoicas en Perijá y zonas adyacentes, así como las edades de las discordancias asociadas a levantamientos regionales:

- I.- Fase Tectónica Eoceno Temprano – 53 Ma.
- II.- Fase Tectónica Eoceno Medio (Orogenia Caribe) – 45 Ma.
- III.- Fase Tectónica Oligoceno Temprano – 25 Ma.
- IV.- Fase Tectónica Mioceno Tardío, presente (Orogenia Andina) – 3 Ma.

También interpreta que el levantamiento del Macizo de Santa Marta, Sierra de Perijá y los Andes Venezolanos, está relacionado a la convergencia Caribe-Norte Andino a lo largo de las fallas marginales del Sur del Caribe.

Vásquez y Dickey (1972) estudiaron las fallas más importantes del noroeste de Venezuela. Entre las conclusiones más importantes se pueden mencionar:

- La falla de Oca es la mayor falla transcurrente en el norte de Sur América y estuvo activa desde el Cretácico Tardío al Plioceno. La poca actividad sísmica sugiere que en la actualidad los desplazamientos a lo largo de esta falla son poco importantes.
- Evidencias de movimientos de la placa del Caribe hacia el este, relativo a la placa de Sur América, sugieren que el movimiento transcurrente sinistral a lo largo de la Falla de Santa Marta, en el post Mioceno, causó el final del movimiento a lo largo de Falla de Oca, las Cocuizas y la Falla de Palestina, y al mismo tiempo, comenzó el desplazamiento a lo largo de la Falla de Boconó.

Deratmiroff (1971) menciona que los andes venezolanos fueron sometidos a una deformación por efecto de cizallas a través de todo el Terciario. La interpretación se fundamenta en las llamadas “ramas” destrales a lo largo de la falla de Boconó, y el gran levantamiento que comenzó en los Andes en el Mioceno Tardío, considerando una orientación entre 80°-90° para el esfuerzo comprensivo principal, el cual sería el responsable de la generación de la zona de falla de Boconó y los corrimientos asociados.

Según *Ramírez y Campos* (1972) durante el Mioceno Tardío, la región Andina sufre el primer periodo de deformación consecuencia de movimientos verticales, que originaron bloques acompañados por fallas inversas de buzamiento elevado a verticales, con deslizamiento de secuencias más antiguas sobre las unidades del Terciario Superior.

Audemard (1999), estudió las evidencias geomorfológicas, estructurales y tectónicas de la deformación activa en los Llanos Orientales de Venezuela, Cordillera de Los Andes de Venezuela y Cordillera Oriental de Los Andes colombianos.

Audemard, et al. (1999), presentan un estudio del movimiento de la Falla de Boconó y sus implicaciones sobre los terremotos más importantes sucedidos en Venezuela.

Evolución Tectónica e Histórica Geológica

Los Andes Venezolanos son la prolongación de la Cordillera Oriental de Colombia, esta Cordillera Oriental se bifurca en el nudo de Pamplona formando dos cadenas, una de las cuales continúa hacia el norte formando la Sierra de Perijá y la otra se dirige en sentido noroeste, penetrando en Venezuela formando la cordillera de los Andes Venezolanos. (www.ingegomin.gov.ve/SinopsisdeGeologiaVenezuela.)

El levantamiento de los Andes Venezolanos fue diacrónico. El primer levantamiento ocurriría en el margen noroeste de la cordillera entre el Oligoceno y el Mioceno, seguido por el levantamiento del Sector suroccidental de la Cadena en el Mioceno Tardío, entonces se puede decir que en la zona de estudio en el Mioceno Medio-Tardío hubo regresión hacia el noreste, representada por la Formación Isnotú (ambiente continental) en la región de Valera – Escuque.

Al oeste de la ciudad de Valera se pueden observar bloques de rocas paleozoicas y cretácicas empujadas en la secuencia arcillosa de la Formación Isnotú lo cual indican deslizamientos gravitacionales en el Mioceno Medio – Tardío.

Durante el Mioceno superior en la región de Valera – Escuque desaparece el ambiente oxidante de la Formación Isnotú y continúan depositándose las arcillas gris verdosa del Miembro Vichú de la Formación Betijoque sobre llanuras aluviales. Hacia fines del Mioceno Tardío hubo fuerte levantamiento de la Cordillera Andina indicado por la litología fundamentalmente conglomerática del Miembro Sanalejos de la Formación Betijoque, proveniente de la erosión de la Cordillera de los Andes rejuvenecida, La Figura 2.6, representa la geología regional del occidente de Venezuela durante el Mioceno-Plioceno, en donde grandes cantidades de sedimentos continentales se depositaron durante este período en los flancos norte y sur de la Cordillera Andina. En este período se depositó la Formación Isnotú y sobre esta se

depositó la Formación Betijoque. Un equivalente de la Formación Isnotú es la Formación La Puerta hacia el noroccidente. Vargas,(1992).

En el Plioceno hubo nuevo rejuvenecimiento de la región evidenciado en la inclinación del Miembro Sanalejos (Formación Betijoque).

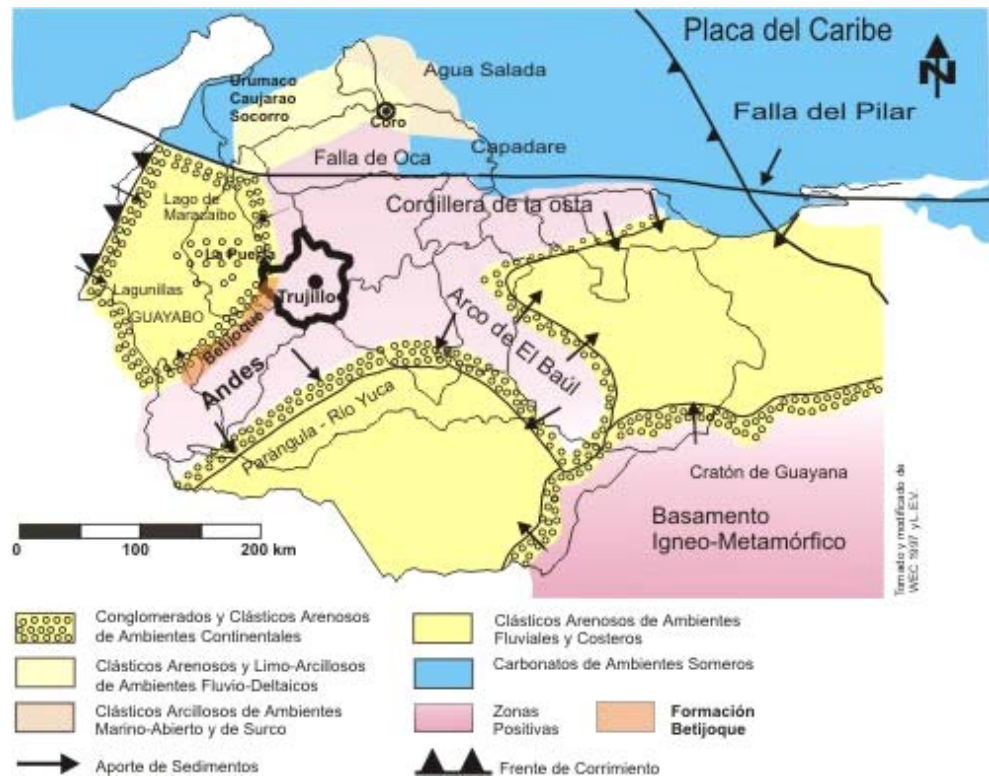


Figura 2.6. Evolución en el Mioceno-Plioceno.
(Tomado y modificado de WEC 1997 y LEV)

Rasgos geomorfológicos y fotogeológicos

Relieve

En esta zona se presenta un relieve conformado por dos áreas: un área de relieve abrupto y un área de piedemonte con una suave pendiente, Figura 2.12.

Área de relieve abrupto

Esta área está situada hacia el sureste de la zona de estudio, circundando la población de Betijoque, la altura predominante está a unos 760 metros al este de la población señalada, presentando filas muy pronunciadas en dirección noreste-suroeste, con estribaciones bastante abruptas.

Desde la altura mayor situada al sureste de Betijoque, se reducen hacia el noroeste observándose que la población de Betijoque se encuentra sobre una meseta. Esta meseta tiene una altura mayor de mas de 600 metros situada hacia el centro norte de la población y su altura menor está entre 480 y 500 metros hacia el sur, lo cual representa una diferencia de altura entre 100 y 120 metros. Esta pendiente está inclinada hacia el norte de dicha población.

Hacia el oeste de la zona de estudio las alturas se reducen terminando a menos de 100 metros de altura cerca del piedemonte.

Las direcciones que presentan las filas van desde N40E hasta N70E en su mayor parte, todas estas filas se encuentran alrededor de la población de Betijoque. Algunas de las filas situadas hacia el oeste de las descritas anteriormente presentan direcciones opuestas a estas desde N30W hasta N50W. Una de las filas presenta dirección N85E y está situada en el extremo sur de la zona.

Una gran parte de las filas, más o menos un 50%, situadas cerca del piedemonte presentan dirección entre N40W y N70W. Otra parte, más o menos, un 35% tienen dirección N50E y finalmente un 15% con dirección NS.

Las estribaciones presentes en esta zona en un alto porcentaje tienen dirección perpendicular a las filas con algunas excepciones.

Los valles formados en esta zona tienen todos forma de “V”, con pendientes pronunciadas, el drenaje tiende a estar bastante encajado.

Área de Piedemonte

El área de piedemonte está situado al noroeste de la zona de estudio, presentándose con una diferencia de altura de aproximadamente 20 metros. Todos los drenajes principales desembocan en esta área por lo cual la misma es apta para desarrollar labores agrícolas. No presenta quiebres abruptos de pendiente y si los tiene no son visibles a simple vista.

Drenaje

En esta zona se presentan tres drenajes principales dominantes de tercer y cuarto orden, unos siete drenajes de segundo orden y una gran cantidad de primer orden. Hacia el este, de la zona, la densidad del drenaje es muy alta disminuyendo a hacia el oeste.

Al este de Betijoque la frecuencia del drenaje es muy alta, no así al oeste de la población señalada ya que allí se presenta una densidad media, figura 2.12.

Drenajes principales

Los drenajes principales están dispuestos con dirección sureste-noroeste con sentido de aguas abajo hacia el noroeste, estos drenajes están ubicados semi paralelamente entre si al noroeste de Betijoque. Al sureste de Betijoque se observa otra forma de ubicación, en este caso uno de los drenajes principales se presenta con cierta perpendicularidad en sentido este-oeste.

El patrón de canal que se presenta en el caso de los drenajes principales se puede definir, hacia el este de la zona de estudio, como irregular particularmente al este de Betijoque, pasando a regular cuando nos movemos hacia el oeste y luego terminando como transicional en la zona de piedemonte.

Se debe observar que el drenaje principal presenta cambios en las etapas a lo largo de su recorrido, así se observa que en la zona que se encuentra al este de Betijoque los cauces presentan etapa juvenil con valles en forma de “V”, esto es particularmente notorio en el valle al sureste de Betijoque (en realidad es al costado sureste). Luego, al hacer un estudio de la zona hacia el oeste de Betijoque vemos que el patrón comienza a cambiar haciéndose menos encajado hasta el comienzo del piedemonte donde se observa una etapa de madurez caracterizada por un cauce bien definido con una planicie de inundación amplia para acomodar todos sus meandros.

Drenaje Tributario

El drenaje tributario está conformado por drenajes de primer orden, segundo orden y tercer orden. En el área que se encuentra al norte y al sureste de Betijoque, en general, se presenta un patrón de drenaje enramado y en algunos casos de paralelo a semi paralelo, en el extremo sur de esta área los tributarios tienen grandes extensiones, al norte de esta área los tributarios se hacen más pequeños en extensión. Al oeste de Betijoque los tributarios en un alto porcentaje (90%) es de gran extensión y un bajo porcentaje (10%) presenta una extensión pequeña. Mucho más hacia el oeste el porcentaje de tributarios pequeños aumenta observándose más o menos un 50% con respecto a los de gran extensión.

Las direcciones dominantes de los tributarios en el área que se encuentra al sureste de Betijoque se presentan noreste-suroeste, con algunas excepciones noroeste-sureste. En la zona al oeste de Betijoque las direcciones de los tributarios presentan un cambio en dirección noreste-sureste con algunas excepciones en la cual el drenaje tiene dirección sureste-noroeste. En la zona más hacia el oeste cerca del piedemonte las direcciones son compartidas en más o menos igual porcentaje tanto sureste-noroeste como noroeste-suroeste.

Geología Local

Esta zona presenta una serie de capas las cuales tienen tendencia a alinearse en sentido noreste-suroeste, todas con buzamiento hacia el norte. Para definir el buzamiento de las capas se conforman dos zonas: una zona situada al este y otra situada al oeste de Betijoque la cual presenta las capas de manera que las que tienen más inclinación se encuentran al norte de esta zona, disminuyendo hacia el sureste hasta tener capas prácticamente horizontales de acuerdo con la curva que forma el borde de estas.

En la zona que se encuentra más hacia el oeste de Betijoque se tiene una disposición similar a la anterior con la diferencia que es menos inclinado cerca del piedemonte y se reduce la cantidad de capas, observándose también una reducción en el tamaño de las mismas, figura 2.12.

Litología

De acuerdo con la interpretación mostrada se pueden definir dos tipos de litologías: una situada alrededor de la población de Betijoque, presentando una litología dura bastante impermeable por la alta densidad de drenajes presentes. La otra zona está dominada por una litología menos dura y mucho más suelta que la anterior bastante impermeable, ya que los ríos presentes en la zona prácticamente desaparecen, figura 2.12.

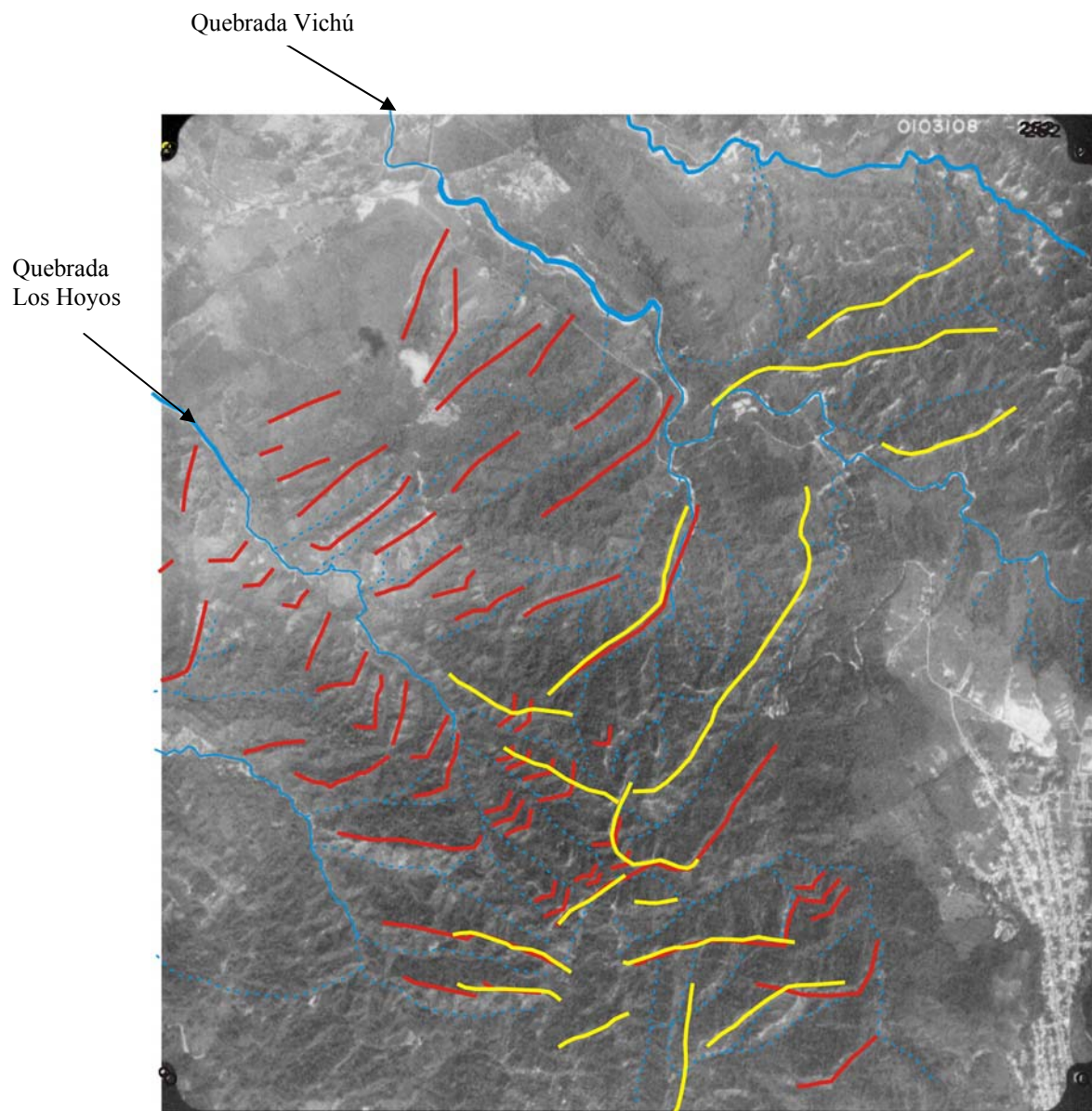



Figura 2.12 Fotografía aérea Misión 0103108 #252

Leyenda:

- | | | | |
|------------------|---|-------|---|
| Ríos Principales |  | Capas |  |
| Ríos Secundarios |  | Filas |  |

Estratigrafía Local

Quebrada Vichú

En esta zona de estudio se definió un miembro llamado Sanalejos (Formación Betijoque) ubicado entre las localidades de Isnotu-Betijoque y Sabana de Mendoza estado. Trujillo. En el anexo # 1 esta la Columna Estratigráfica.

Esta sección posee un espesor verdadero aproximado de 2750 m. Su litología consiste de un 60% de conglomerados, 25% de arenisca, 15% de limolitas.

Los conglomerados varían de espesor desde 12 m hasta niveles, disminuyendo hacia la base. Los clastos son metamórficos, meta-ígneos, ígneos y sedimentarios. En el tope de la sección los conglomerados se encuentra soportado por clastos (Figura 2.7.C), aproximadamente de tamaño peñones y hacia la base se encuentran soportados por matriz, estos clastos son aproximadamente de tamaño guijarro, donde se encuentran como niveles de conglomerados. En el tope de la sección hay clastos desde angulosos a subredondeados, mal escogidos, pero a medida que nos vamos hacia la base de la sección los clastos son desde subredondeados a redondeados y el escogimiento es moderado. La matriz de arena hacia el tope es de grano grueso a medio su color meteorizado: marrón claro y color fresco: marrón, hacia la base la matriz es de grano medio a fino, es de color meteorizado gris oscuro y color fresco gris.



(A)



(B)



(C)

Figura 2.7. Tope de la secuencia. Capas N35E 20N (A) Intercalación de areniscas conglomeráticas y limolitas, donde los espesores de los conglomerados son mayores a 1 metro, mientras que las limolitas varían entre 0.5 a 1.5 metros de espesor. (B) Intercalación de areniscas conglomeráticas y limonitas, las areniscas conglomeráticas son mayores a 1 metro y las limolitas varían entre 1 a 2 metros de espesor. (C) Tamaño de los clastos varían desde peñones a guijarros, mal escogido.

Las areniscas varían de espesor desde 0.5 a 10 m. En el tope de la secuencia la arenisca se presenta como arenisca conglomerática (figura 2.7. B) de grano grueso con un color meteorizado marrón claro y el color fresco marrón y hacia la base de la secuencia las areniscas son de grano medio a fino con niveles de conglomerados en la base de tamaño 2 a 12 cm. (figura 2.8), su color meteorizado es gris claro y su color fresco es gris. Río arriba se consiguen las areniscas están mas compactas.

Las limolitas se encuentran intercaladas con areniscas conglomeráticas o areniscas, (figura 2.7.A.), de poco espesor, algunas veces en forma de cuña o lentes. Su color meteorizado hacia el tope de la secuencia es marrón rojizo y su color fresco es marrón, hacia la base de la secuencia su color meteorizado es gris oscuro a gris verdoso y su color fresco es gris.



Figura 2.8 Cercano a la base del Miembro Sanalejos, se presentan areniscas con niveles de conglomerados. Los clastos son de tamaño "guijarro" y han disminuido con respecto al tope de la secuencia. Capas N37E 33N

Quebrada Los Hoyos

Esta Quebrada se ubica en la localidad de Sabana Grande y litológicamente se caracteriza por presentar arcilita, limolita, arenisca y conglomerados. Donde un 70% es conglomerado, un 20% es arenisca conglomerática y un 10% es limolita y arcilita. Se definieron dos miembros pertenecientes a la Formación Betijoque.

En esta quebrada se encontró un posible contacto transicional entre el miembro Sanalejos y el miembro Vichú perteneciente a la Formación Betijoque. El primer miembro Sanalejos con un espesor aproximado de 2150 m de granulometría gruesa (conglomerados), intercalación de areniscas conglomeráticas y limolita demostrada en la (figura 2.9.A). El segundo miembro Vichú con un espesor aproximado de 545 m caracterizado por presentar grandes espesor de granulometría fina (arcilitas con espesor de 1.5 a 2 m.) intercaladas con areniscas conglomeráticas como se muestra en la figura 2.10.

La quebrada Los Hoyos se caracteriza por presentar en ambos miembros (Sanalejos y Vichú) conglomerados de un espesor aproximado de 0.2 a 12 m, pero hay que destacar que los conglomerados mantienen a lo largo de la quebrada grandes espesores como se observa en la (figura 2.9.A.), donde encontramos clastos desde subangulosos a subredondeados y su tamaño varían desde 0.5 a 0.12 m, (figura 2.9.B). Hacia la base los conglomerados están soportados por matriz mientras que hacia el tope por clastos, el color meteorizado de la matriz es marrón a gris claro y su color fresco es gris.



A



B

Figura 2.9. Tope de la secuencia. (A) Conglomerados con espesor aproximados desde 1 a 12 m. Intercalación de conglomerado y limolita. Capa N55E 42N. Fotografía tomada con dirección N34W. (B) Tamaño de los clastos y el mal escogimiento

Las areniscas tienen espesores aproximados desde 0.5 a 10 metros, mayormente son areniscas conglomeráticas de grano grueso a medio, Hacia el tope las areniscas presentan color meteorizado marrón rojizo y color fresco marrón, hacia la base el color meteorizado es de gris oscuro a marrón y el color fresco es gris. En dirección de tope a base las limolitas son de color meteorizado marrón oscuro y color fresco marrón claro, a medida que avanzamos hacia la base cambian su color meteorizado a gris verdoso y color fresco gris. Su espesor varía desde 0.2 a 0.5 m. Hacia la base encontramos grandes espesores de arcilita color meteorizado gris verdoso y color fresco gris que pertenece al miembro Vichú.



Figura 2.10. Posible contacto. Arcilitas color meteorizado gris verdoso y gran espesor característico del miembro Vichú. Capa N36E 22N. Fotografía tomada con dirección N25E

Cabe destacar que a lo largo de toda la secuencia estratigráfica, las litologías aflorantes presentan un grado de compactación variable, pero mayoritariamente dominado por una alta friabilidad o baja compactación.

Selección de muestras



Figura 2.11. Selección de muestra (agujero con una profundidad aproximada de un metro Fotografía tomada con una dirección S60W)

Se perfora un agujero de un metro aproximadamente figura 2.11, luego dentro de este se vuelve a perforar para extraer 20 kilos aproximadamente de sedimento, este procedimiento se realiza para evitar errores en los cálculos de la edades ocasionado por incendios foréstaes

MÉTODO DE HUELLAS DE FISIÓN

Introducción

En este capítulo se describe el procedimiento mediante el cual se separan los minerales pesados de la muestra de sedimentos tomados en campo, específicamente el mineral accesorio Apatito. Además, se describe brevemente el funcionamiento de los diferentes equipos utilizados y la secuencia hasta obtener los granos seleccionados para realizar los análisis y las huellas de fisión espontáneas.

Fase 1: Preparación de la muestra

Esta etapa incluye la pulverización, tamizado, separación en la mesa Wilfley, separación por turbulencia, deslemado (limpieza), secado y separación magnética manual con imanes.

Procedimientos

Se tomaron 14 Kg. de muestra (el contenido de cada saco de muestra), con tamaños de diámetro entre 0,25 mm y 0,074 mm, Pertenecientes a las quebradas Los Hoyos y La Vichú del estado Trujillo. Para tomar estas muestras se utilizó como criterio que la muestra estuviera a 50 cm de profundidad evitándose así las huellas de fisión que se forman por alta temperatura de los incendios forestales.

Diagrama de Flujo para la Fase 1

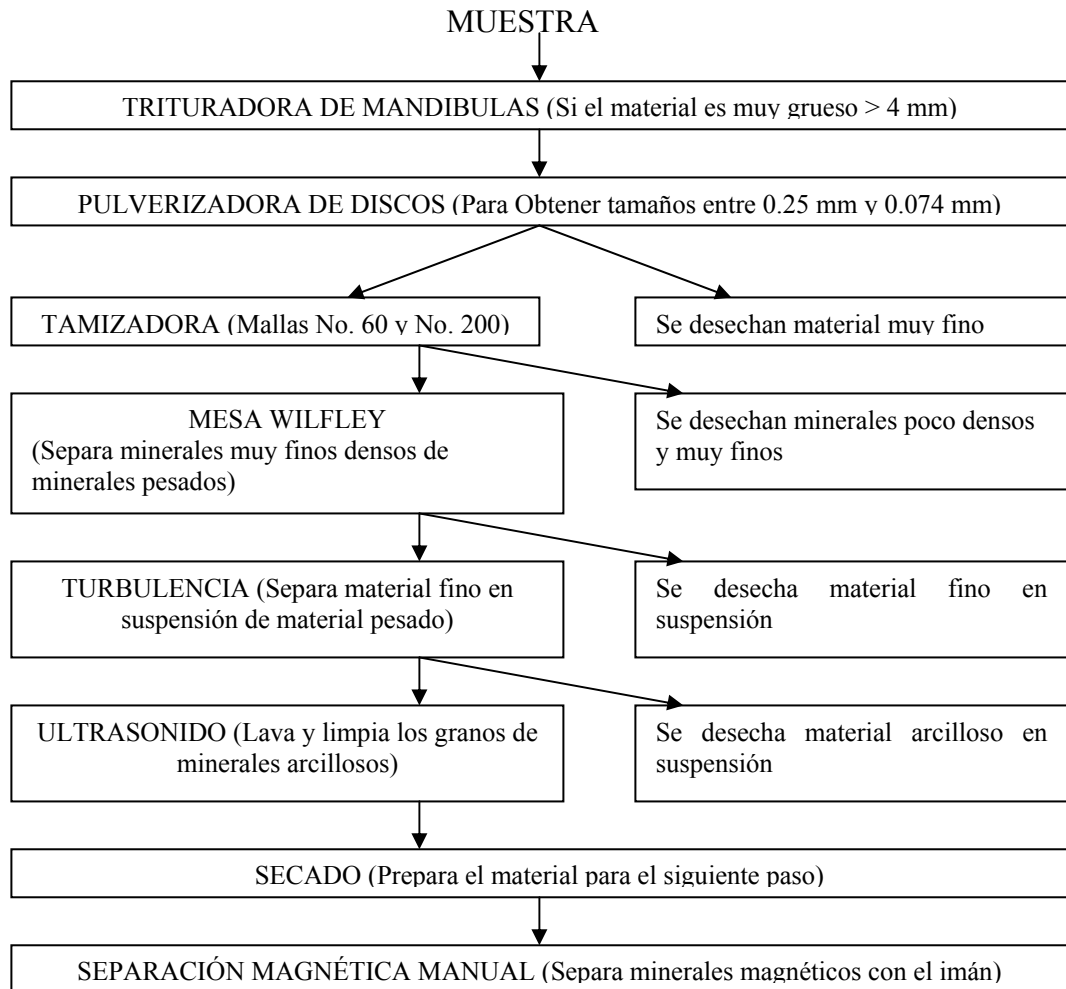


Figura 3.1. Procesamiento de la muestra

En la figura .3.1 están colocados paso a paso todos los procesos por los que pasa la muestra para la obtención del mineral (Apatito), del cual se estudiará la huella de fisión y a continuación se describirá cada equipo utilizado para tratar la muestra.

1. TRITURADORA: Este equipo se utiliza si la muestra que se toma tiene granos mayores a tamaño guijarro (diámetros mayores de 4 mm). El material se tritura y se obtienen granos de menor tamaño. Ver figura 3.2.

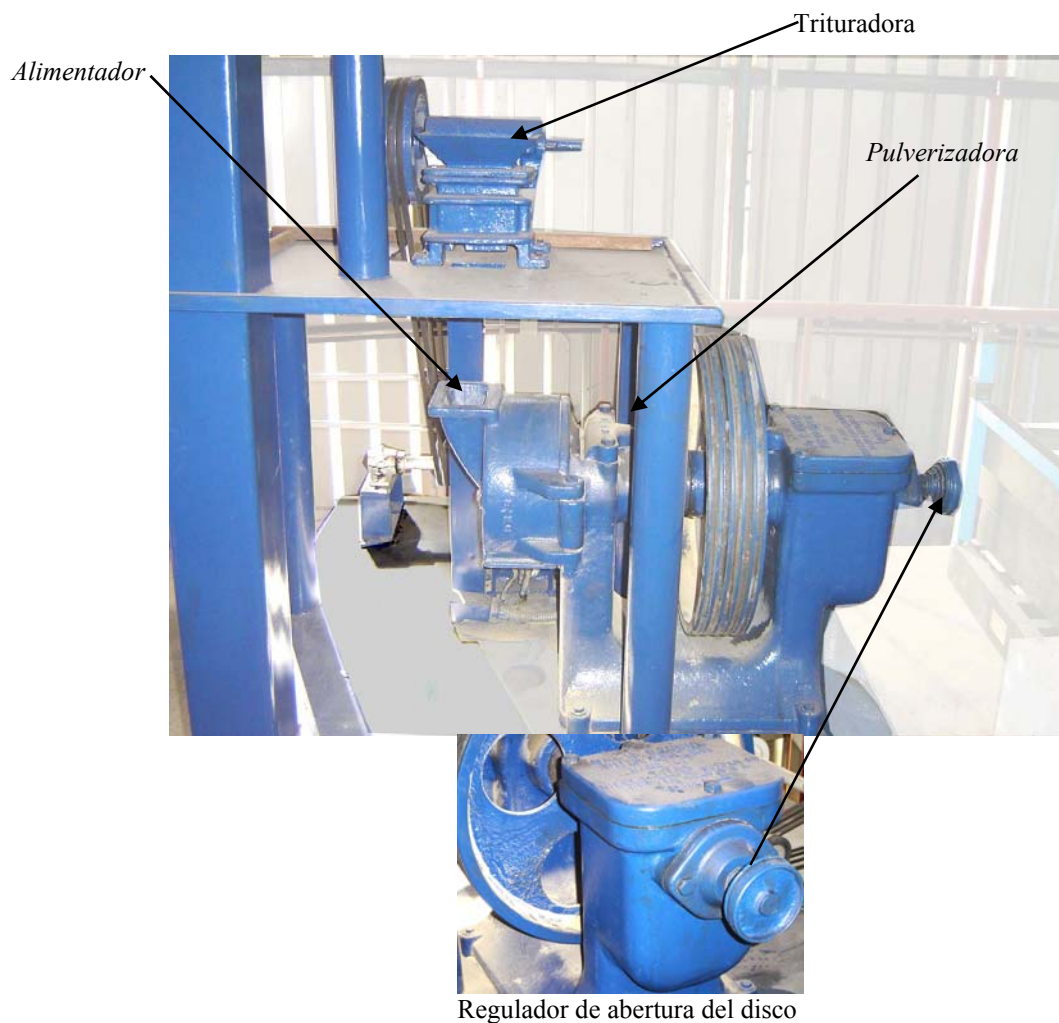


Figura 3.2. La Trituradora en la parte superior y la Pulverizadora de discos

2. PULVERIZADORA DE DISCOS: Con la pulverizadora de discos se puede regular el tamaño de grano que se quiere obtener, que en este caso es entre 0.25 mm y 0.074 mm. Hay que tomar en cuenta que cuando un grano pasa entre los discos, los granos que tienen un tamaño menor que este grano pasan sin ser procesados ya que este les sirve de cuña para sostener los discos en ese momento. En la parte inferior de la figura 3.2 se observa el regulador de abertura del disco, el cual debe revisarse para volver a su posición original.
3. TAMIZADORA: Es un equipo con estructura cilíndrica con aros en la parte superior para soportar las mallas. 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).
4. 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. 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 3.3 se observa la mesa de sacudidas.

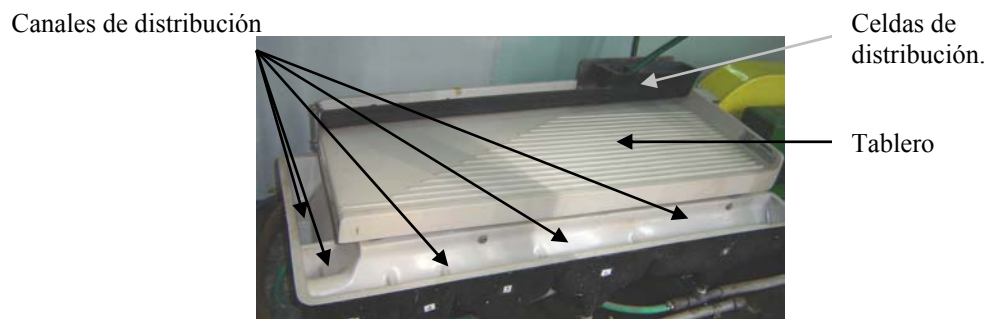


Figura 3.3. Mesa Wilfley

5. **TURBULENCIA:** En esta parte del procedimiento se utilizaron tubos cilíndricos de vidrio transparente y alta presión de agua para crear un movimiento en el cual después de depositarse la muestra el material fino queda suspendido en el agua la cual se desecha junto con el material. Este proceso se repite hasta que el agua se observe bastante clara. En la Figura 3.4 se observa el material separado por turbulencia

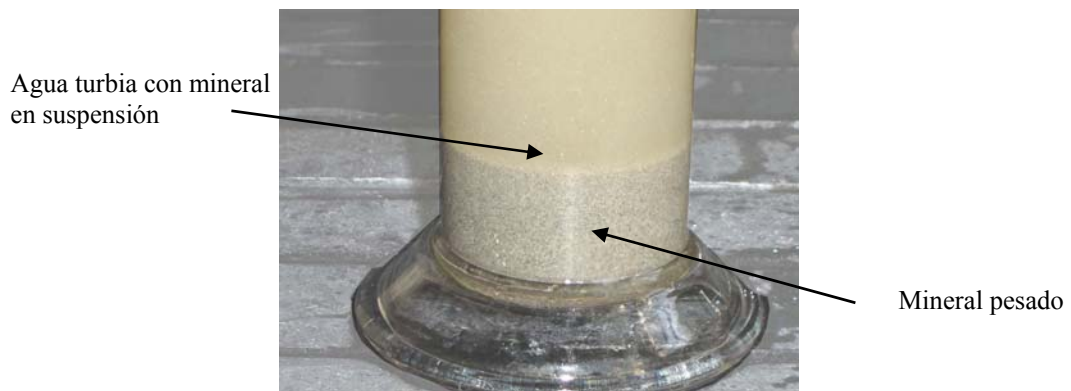


Figura 3.4. Turbulencia, cilindro de vidrio con agua turbia.

6. **ULTRASONIDO:** En este equipo el material es sometido a ultrasonido para despegar el material arcilloso que haya quedado envolviendo o juntando los granos. El oxalato de sodio que se agrega sirve para acumular la arcilla y luego poder eliminarla junto con el agua destilada que se usó. Ver en la Figura 3.5 los vasos precipitados con el material ya procesado.

Oxalato de Sodio Vasos precipitados Equipo Ultrasonido

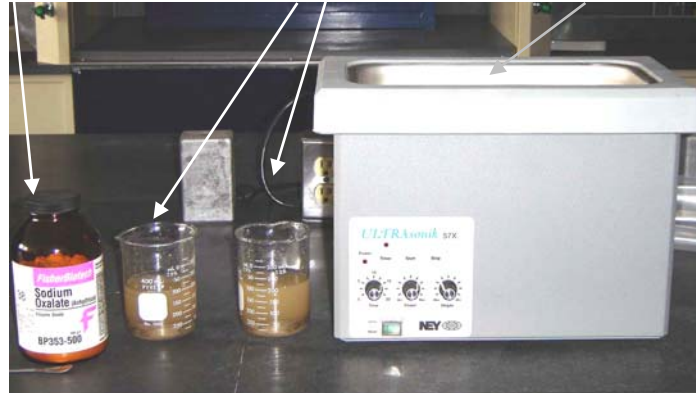


Figura 3.5. Equipo de Ultrasonido.

7. SECADO: El horno isotérmico sirve para secar el material extendido sobre una bandeja de vidrio Pyrex, la temperatura debe oscilar entre 30 y 35 grados centígrados. Ver Figura 3.6.



Figura 3.6. Horno Isotérmico

8. SEPARACION MAGNÉTICA MANUAL (IMAN): Con el imán se separan los minerales magnéticos ferromagnéticos del resto de los sedimentos. Generalmente es magnetita y pirrotita. En la figura 3.7 se observa el mineral magnético separado después de aplicar el imán.



Figura 3.7. Separación magnética manual (imán)

Fase 2: 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 2.98 gr/cm^3 . Luego se hace una segunda separación, en la que se preparan por medio de combinación entre el benzyl benzoato y diodometano, soluciones con densidades de 3.095 y 3.225 gr/cm^3 dado que en este rango se encuentran los minerales a fechar (apatito), posteriormente se le aplica una separación magnética (Frantz) a la muestra obtenida para descartar los minerales ferromagnéticos y paramagnéticos.

Procedimientos

Este procedimiento se aplica una vez que la muestra esté lavada, seca y desmagnetizada con el imán de mano. Al final se obtiene el mineral buscado.

Diagrama de Flujo para la Fase 2

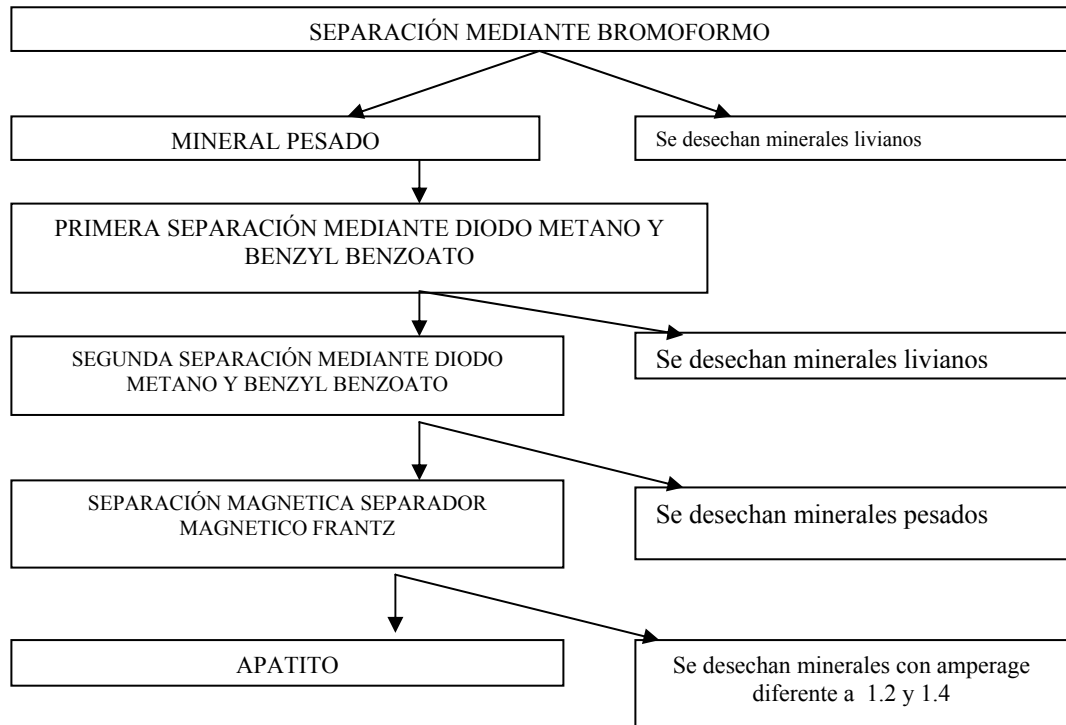


Figura 3.8. Procesamiento de los minerales

9. 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). Ver Figura 3.9 donde se observan los materiales a utilizar en la campana extractora.

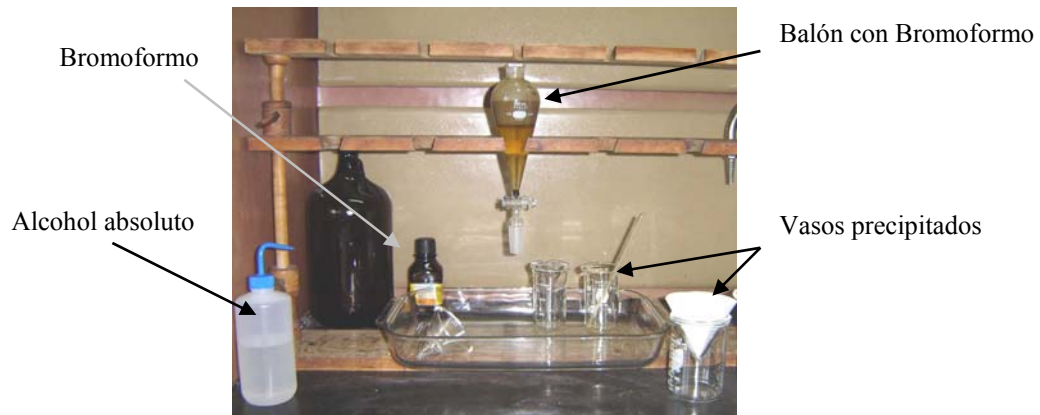


Figura 3.9. Campana extractora con todos los materiales

10. 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 balon y los livianos, con densidad menor a 2.96 gr/cm^3 , se mantienen sobre el bromoformo (CHBr_3). En la figura 3.10 se observa la situación del mineral liviano y el mineral pesado, en la figura pequeña se observa el mineral pesado obtenido por este proceso.

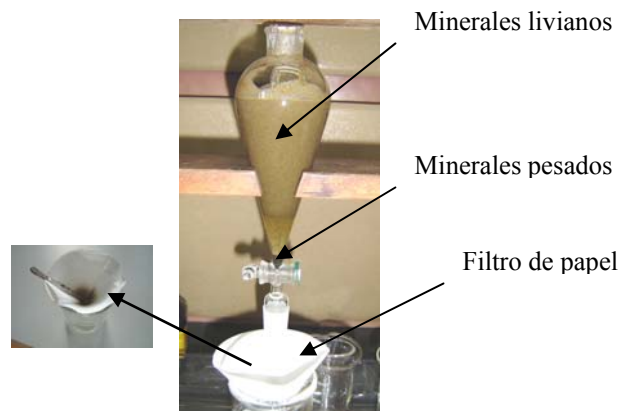


Figura 3.10. Embudo de separación en la campana extractora con material separado

11. 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 3.11 se ve claramente el bromoformo diluido en alcohol absoluto para su recuperación.

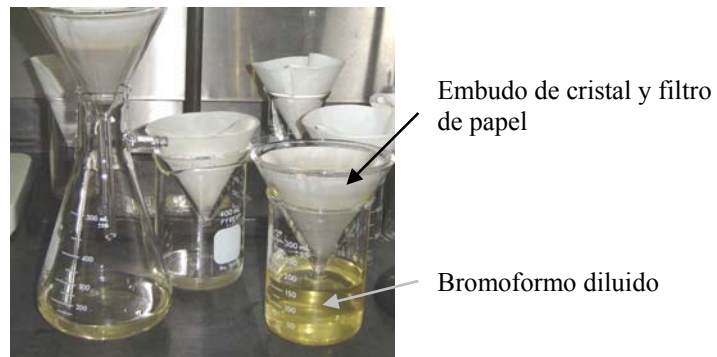


Figura 3.11. Lavado del mineral, vasos de precipitado con Bromoformo

12. RECUPERACIÓN DEL BROMOFORMO: Se debe recuperar el bromoformo de la mezcla alcohol-bromoformo, colocando una cantidad de 400 ml. de esta mezcla junto con 600 ml de agua destilada en un embudo de separación de 1.000 ml. Se deja durante 18 horas como mínimo o hasta que precipite y se desligue 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 3.12 vemos la mezcla de bromoformo, agua destilada y alcohol absoluto (líquido blanco), después de unas horas el bromoformo se separa y cae al final del balón, luego se abre la llave y se filtra el bromoformo, el cual se colocará en su frasco inicial para un posterior uso.

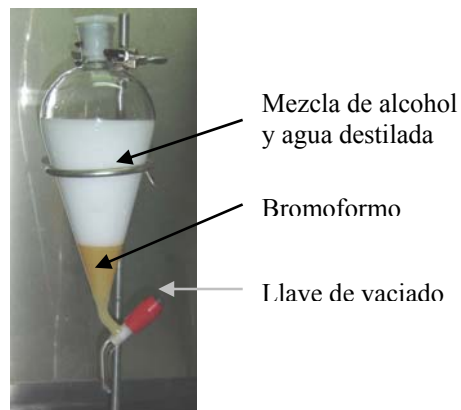


Figura 3.12. Precipitación del Bromoformo en el embudo.

13. SEPARACIÓN REFINADA: Utilizando los líquidos benzyl benzoato (densidad 1.120 gr/cm^3) y diodometano (densidad 3.32 gr/cm^3) a una densidad óptima se vierten sobre un balón separación o vaso precipitado y luego se le agregan pequeñas porciones de la muestra, la misma se mezcla lentamente con el removedor de vidrio, se deja reposar por un tiempo, hasta que se observe la separación de los minerales, arriba estará la fracción de minerales livianos con densidades menores a 3.095 gr/cm^3 y abajo la fracción pesada, minerales con densidades mayores de 3.095 gr/cm^3 , donde se encontraría el mineral Apatito, el cual posee una densidad de 3.2 gr/cm^3 .
14. SEGUNDA REFINACIÓN: Igual que en la primera refinación se requirió preparar 80 ml. de solución, mezclando diodometano y benzyl benzoato, pero esta vez, requiriendo una densidad óptima de 3.325 gr/cm^3 , por lo que se requirió, según la tabla de mezclas de densidades: 75.46 ml. de diodometano y 4.54 ml de benzyl benzoato. Una vez obtenido el líquido con la densidad óptima se vierte este líquido en el embudo de separación y posteriormente se agrega en pequeñas cantidades la fracción obtenida en el paso anterior. Seguidamente se remueve lentamente, se deja reposar por un tiempo, hasta su separación, se recuperará la fracción flotante de interés, que tendrá los minerales con densidades entre 3.095 gr/cm^3 y 3.225 gr/cm^3 , entre ellos el apatito.
15. 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. En la figura 3.13 se observa el equipo



Figura 3.13. Separador Magnético Frantz

Tabla 3-1. Esta tabla nos muestra los minerales pesados clasificados según su índice de susceptibilidad magnética.
(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 Pirrotita	Ilmenita Granate Olivino Cromita Cloritoide	Hornblenda Hipersteno Augita Actinolita Estauroлита Epidoto Biotita Clorita Turmalina	Diopsido Tremolita Enstatita Espinela Estauroлита Moscovita Zoisita Clinozoiita Turmalina	Leucoxeno Apatito Andalucita Monacita Xenotima	Circón Rutilo Pirita Corindón Topacio Fluorita Silimanita Anidrita

Fase 3. Procesamiento del Apatito

En esta fase se procesa el mineral utilizando una resina epoxica para obtener una pastilla, la cual será lijada con diferentes texturas hasta obtener una superficie muy pulida luego se sumergirá en ácido nítrico para después buscar la huella de fisión espontánea.

Procedimiento

Se toman los minerales hallados a la densidad descrita anteriormente y se procede a hacer una pastilla de resina la cual se dejará secar al menos por unas 12 horas o hasta su endurecimiento total. El pulido debe hacerse sobre lijas de texturas diferentes desde la mas gruesa lija de 400 hasta lija 2.000, para luego pasar a pulir con pasta de diamante de 9 y 1 micrones finalizando con oxido de aluminio de 0,3 micrones. El revelado se hará en una solución de ácido nítrico (HNO_3).

Diagrama de Flujo para la Fase 3

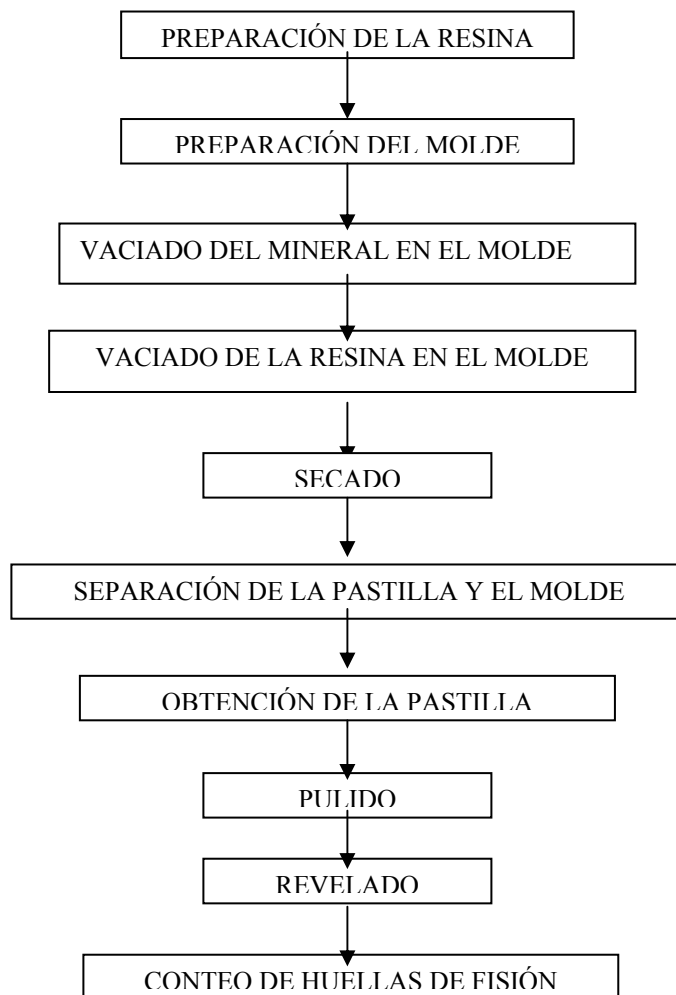


Figura 3.14. Procesamiento del Apatito

16. 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 3.15 se observan todos los materiales a utilizar en este proceso.

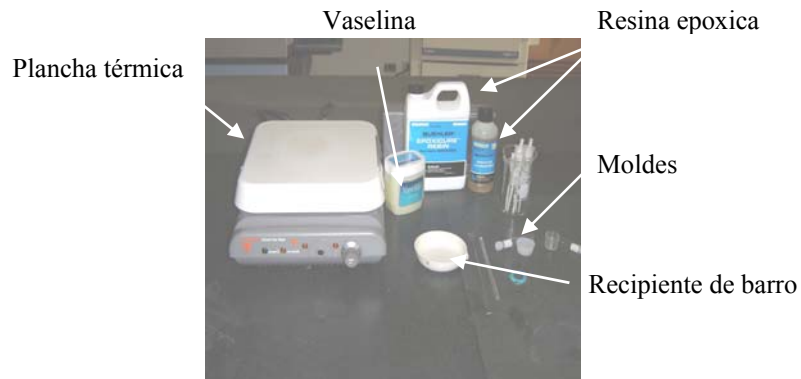


Figura 3.15. Materiales para el montaje del Apatito.

17. 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.
18. VACIADO: Se agrega el mineral tratando de que se acomode en una sola capa. Se le agrega la resina calentada tratando de que no queden burbujas de aire.
19. 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.
20. 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 óxido de aluminio de 0,3 micrones. En la figura 3.16 se pueden observar todos los materiales que se utilizaron para efectuar el pulido de la pastilla.

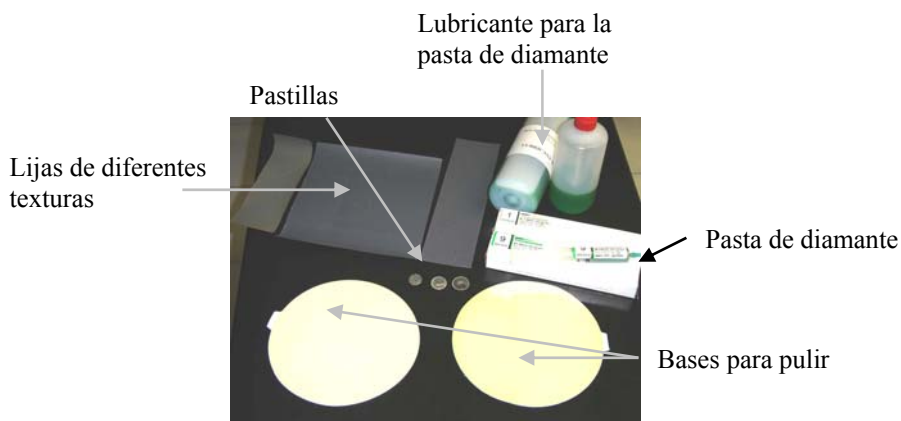


Figura 3.16. Materiales utilizados para el pulido de la pastilla.

21. REVELADO: En una solución de ácido nítrico (HNO_3), 5,5 molar a una temperatura de 20 grados se sumerge la pastilla por 20 segundos, luego se sumerge en un vaso precipitado con agua destilada por 30 segundos y en otro vaso con agua destilada por 1 minuto.

22. CONTEO: El conteo de huellas de fisión se realiza en un microscopio cuya potencia tenga un mínimo de 1.200X, o sea que el ocular deba ser suficientemente potente (12X por lo menos) y el lente utilizado para este caso debe ser de 100X. En la figura 3-12 vemos huellas de fisión espontáneas encerradas en los círculos rojos en un grano de apatito.

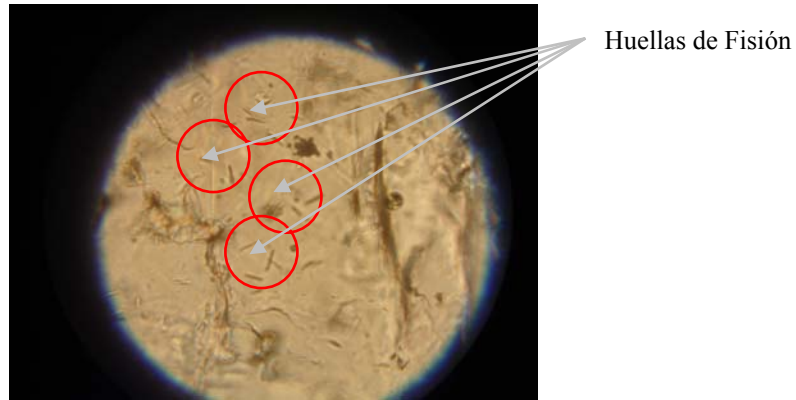


Figura 3.17. Grano de Apatito

Importancia de las huellas de fisión espontáneas

Recordemos que una *huella de fisión* (Wagner et al, 1992) es un canal o surco con una trayectoria lineal medida en micras (μ) o nanomicras ($n\mu$), que se forma en un medio sólido, como resultado de la fragmentación o fisión de un isótopo inestable. Cada fragmento es expelido en dirección opuesta al centro de ubicación espacial del átomo original en el sólido, colisionando con la estructura mineralógica y generándose una huella de fisión.

En la Figura 3.18 se observa la formación de la huella de fisión de acuerdo al modelo más utilizado. En esta figura se tiene un núcleo en estado de excitación el cual al separarse ioniza y choca contra los iones circundantes generando una trayectoria conocida como traza o huella de fisión.

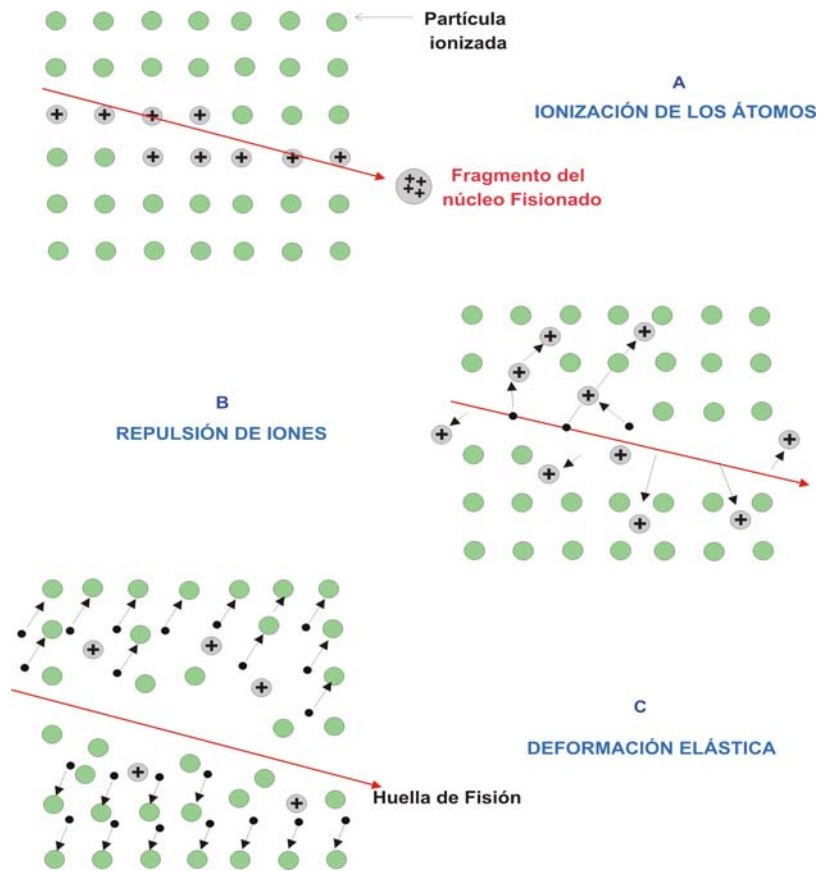


Figura 3.18. Etapas de la formación de una huella de fisión.
(Tomado de Coronado y Rey, 2003).

El Rango de la huella es la medida de la trayectoria de la zona de daño o surco creado por la partícula al hacer fisión nuclear en el sólido. También puede definirse, como el vector que conecta el punto de inicio con la posición final de la partícula. La longitud normal de una huella de fisión está entre los 20 y 16 micrones (μ) y puede variar dependiendo del tiempo que el grano del mineral accesorio que posee la huella pase en una ventana o superficie conocida como:

Zona de Desvanecimiento Parcial (P.A.Z.) (Wagne et al, 1992), existen valores de temperatura específicos que actúan como un límite a partir del cual pueden comenzar a formarse las huellas, denominada temperatura de cierre o “closure temperature”. Disminuyendo el valor de la temperatura de cierre, se ubica la zona de retención de huellas, en donde éstas se generan. Por encima de esa temperatura límite

se localiza la zona de desvanecimiento parcial o “partial annealing zone” en la cual las huellas son desvanecidas.

Las zonas de desvanecimiento parcial, de retención de huellas, y la temperatura de cierre varían según el mineral. En el caso particular del apatito, como se ilustra en la Figura 3.19, la zona de retención de huellas comprende desde los 125 °C (temperatura de cierre) hasta los 60°C, aunque pueden generarse huellas cercanas a la superficie, debido a la naturaleza aleatoria del proceso de decaimiento radioactivo. Por arriba de los 125 °C se encuentra la zona de desvanecimiento parcial, en donde comienzan a borrarse las huellas. También las huellas son sensibles a eventos geológicos que hacen que éstas pasen por la isoterma que equivale a la temperatura de cierre.



Figura 3.19. Gráfico ilustrativo de la temperatura de cierre y de las zonas de producción de huellas y de desvanecimiento parcial, en apatitos.

(Tomada de Coronado y Rey, 2003)

Efecto de la temperatura sobre las huellas y el posible significado geológico

La temperatura representa un parámetro muy importante en la generación y borrado de las huellas de fisión. Si un mineral u otro sólido en donde se hayan formado huellas, se somete a una temperatura mayor al límite de la temperatura de cierre, dichas huellas comenzarán a borrarse. Este proceso es conocido como desvanecimiento o “annealing”, en donde disminuye parcialmente la longitud de las huellas. Según se aumente la temperatura y el tiempo de exposición a ella, la longitud o rango de huella comienza a disminuir hasta que finalmente desaparece del

detector. Este fenómeno representa un “reset” del tiempo acumulado en dicho sólido. Si el sólido se enfría, nuevamente comenzará a generar huellas pero la edad que registrará éste será la acumulada a partir del último enfriamiento.

Es importante establecer que para la interpretación de la edad obtenida por el método de huellas de fisión, se debe tomar en cuenta el contexto geológico de la zona en donde se obtuvieron las muestras de roca, es decir, características de sedimentación, tectónica, subsidencia de cuencas, etc., pueden producir un cambio en la ubicación de la temperatura de cierre en el sistema, lo cual se registraría en el sólido. A través de la datación por el método de huellas de fisión pueden obtenerse una o varias edades, representando más de un evento geológico y por ende, se debe integrar este dato a la geología para determinar correctamente la edad. Por ejemplo, puede ocurrir que una cuenca en donde se depositaran los sedimentos que ya habrían comenzado a acumular edad, subsidiera. A consecuencia, según la tasa de subsidencia que se genere, presentará una variación de las isócronas traduciéndose en un incremento de la temperatura, que afectaría a las zonas de desvanecimiento parcial, así como también, a la temperatura de cierre. El resultado es un posible desvanecimiento de las huellas, parcial o total, que generaría un cambio en la edad que los detectores registren, es decir, una variación considerable de la temperatura puede disminuir o aumentar la longitud de huella, inclusive borrarla totalmente. En la figura 3.20 se representa el contexto geológico en donde se desarrolla el proceso descrito.

FORMACIÓN DE HUELLAS DE FISIÓN

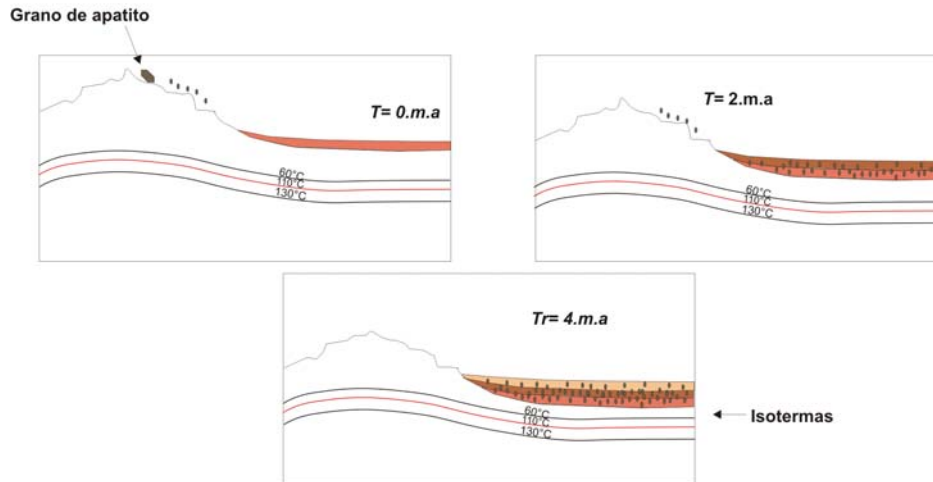


Figura 3.20. Subsidencia de una cuenca.
(Tomado de Coronado y Rey, 2003).

En contraste, si se produce levantamiento de la zona, la isoterma crítica se traslada a otro nivel en donde los minerales accesorios comenzarán a registrar huellas de fisión al pasar por ésta (temperatura de cierre), pues a medida que se acercan a la superficie son expuestos por procesos erosivos, y así recolectarlos en campo permitirían obtener la edad del último evento tectotérmico. Tal como se aprecia en la figura 3.21.

FORMACIÓN DE HUELLAS DE FISIÓN

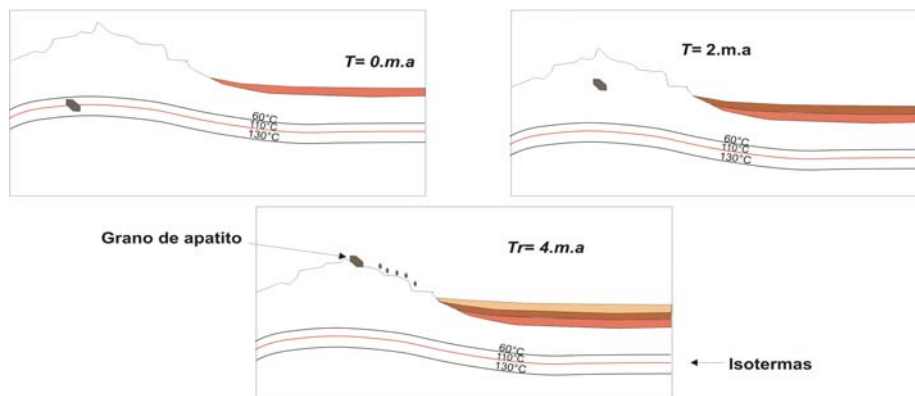


Figura 3.21. Levantamiento tectónico de una cuenca.
(Tomado de Coronado y Rey, 2003).

Para fechar un sedimento hay que tomar en cuenta el tiempo de transporte del grano a la cuenca, el tiempo que tarda este en pasar la PAZ y el tiempo que transcurre en llegar a la superficie, sin embargo la longitud de la huella de fisión espontánea se ha mantenido durante todo este proceso por lo que es posible la: determinación de paleotemperaturas con el método de huellas de fisión.

Determinación de paleotemperaturas con el método de huellas de fisión

Existe una estrecha relación entre la edad de una roca obtenida por el método de huellas de fisión y la temperatura a la cual estuvo sometida (Bertagnolli, et. al, 1981). Incluso hoy en día existen modelos matemáticos (Dunkl, 2002) en los cuales teniendo la longitud de las huellas de fisión espontáneas, la tasa de erosión, el relieve y la edad se tiene una imagen de la configuración inicial y de la posición de los estratos dentro de la cuenca. De esta manera, obteniendo las longitudes de huellas de fisión espontáneas de los granos recolectados y asumiendo los parámetros normales de que el gradiente geotérmico varía 30°C en 1 Km de profundidad, junto con los parámetros de annealing (desvanecimiento) de huellas con la temperatura (Ver tabla 3.2) se puede tener una idea de la proveniencia o fuente del grano. En esta tabla se dan las temperatura (fijas) para el grado de reducción $\rho/\rho_0 = 0.5$ por el 50% de la densidad de ρ_0 recientemente la huella de fisión inducida es borrada. Debido a la información escasa para algunos datos de desvanecimiento de la huella de fisión algunos valores no pudieron ser calculados

*Tabla 3.2 Huellas de fisión temperatura de retención de los materiales terrestres basados en el desvanecimiento de la huella de fisión en experimentos y extrapolación a largo plazo.
Tomado de Wagner et al, (1992)*

Material	50% Temperatura de retención (°C)					
	Localidad	1 h	1 a	10 ² a	10 ⁴ a	10 ⁶ a
Apatite						
Sljudjanka	336	220	174	138	108	80
Eldora	330	220	175	140	110	80
Flockenbach	340	225	175	140	115	85
Liebersbach	330	240	200	165	140	120
Durango	335	225	180	145	115	90
Zircon						
Indochina	700	550	480	420	370	330
Alcoota	700	520	450	390	340	300
Srilanka	620					

No se pudo calcular la edad de las rocas, debido a que no se enviaron las muestras al reactor por falta de tiempo y dinero, asumiendo la edad de estas formaciones las cuales fueron fechadas por Mora (1995), y conocidas las disposiciones de los estratos sólo trataremos en los siguientes capítulos de correlacionar el grano con su fuente.

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE FORMAS DE PARTÍCULAS

Introducción

La forma de la partícula está definida por tres aspectos diferentes pero relacionados entre sí: la forma, se refiere a la totalidad, la configuración global de la partícula y refleja variaciones en las proporciones de las longitudes de ejes mayores, la forma se confunde a menudo con la redondez, que es una medida de la agudeza de las esquinas del grano, o suavidad. La textura superficial se refiere a microrelieves, hoyos, fisuras, discontinuidades en el grano. Estas tres relaciones pueden ser ordenadas, siendo la forma de primer orden, la redondez de segundo y la textura superficial de tercer orden. El objetivo de este capítulo es estudiar teóricamente estas relaciones con el fin de analizar los granos provenientes de las quebradas Vichú y Los Hoyos mediante esta técnica, su importancia radica en que permite identificar ambientes depositacionales y es otra manera de discriminar los terrenos fuentes donde provienen estos granos.

Propiedades de partículas

La textura detallada de una roca sedimentaria esta ampliamente determinada por el tamaño y la forma de las partículas, además de su arreglo dentro de la matriz. En sedimentos (clásticos, rocas detríticas) transportados mecánicamente, existen 6 propiedades que influyen en la textura final del depósito.

- a) Tamaño
- b) Forma (esfericidad)
- c) Redondez
- d) Textura superficial
- e) Orientación

f) Composición mineralógica

Las primeras cinco propiedades son texturales y la última es composicional. Aquí estudiaremos sólo las primeras cuatro, y para los análisis estadísticos consideraremos sólo las primeras tres, ya que dan información adicional sobre la cercanía del terreno fuente, además la orientación y la composición mineralógica no aplica en estos análisis ya que estamos trabajando con granos extraídos de la matriz de una sola composición, granos de apatitos.

Forma de la partícula

La forma, la redondez y la textura superficial son propiedades independientes, tal como se muestra en la Figura 4.1 y cada una de ellas puede ser obtenida teóricamente sin que se afecte el otro parámetro. La forma y la redondez tienen una correlación positiva en depósitos sedimentarios (Boogs, 1987) ya que las partículas que son altamente esféricas en forma tienden a estar muy redondeadas, pero el cambio en la forma o redondez afecta la textura superficial debido a que son expuestas nuevas superficies. Los tres aspectos fundamentales de la forma pueden ser ordenados jerárquicamente la forma es una propiedad de primer orden, la redondez una propiedad de segundo orden superimpuesta sobre la forma, y la textura superficial es una propiedad de tercer orden superimpuesta sobre las esquinas del grano y entre las esquinas de la superficie.

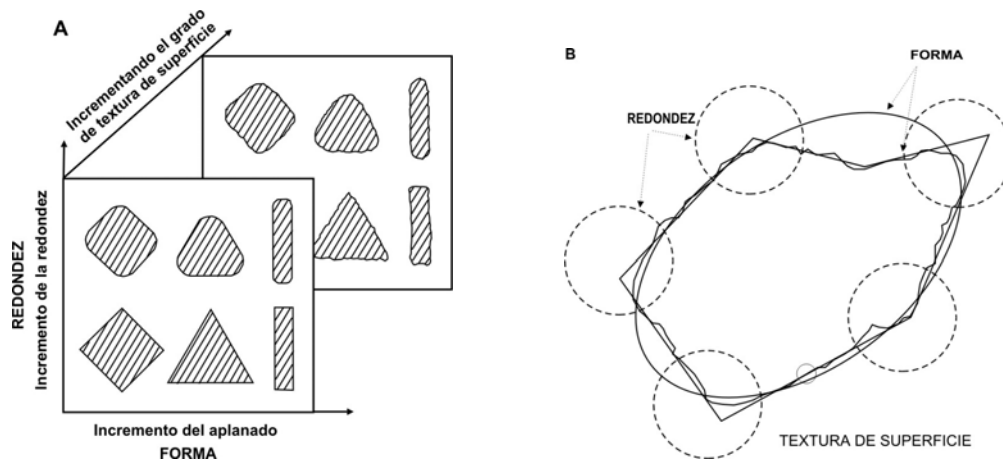


Figura 4.1: Representación gráfica simplificada de la forma de la partícula, redondez y superficie textural. (A) Muestra la independencia de estos parámetros, (B) muestra su relación jerárquica; la línea oscura irregular es el borde de la partícula. (Tomado de Boogs, 1987)

Índices de la esfericidad y de la forma

La forma refleja variaciones en las proporciones de partículas. Por lo tanto, para estimar la mayoría de los parámetros de la forma se requiere conocer las longitudes relativas a los tres ejes principales (largo, intermedio, corto) de una partícula. Se han propuesto numerosas medidas matemáticas para expresar la forma, pero de todas las relaciones **la esfericidad** es probablemente la más utilizada. Este concepto fue introducido por *Wadell* (1932) quién definió la esfericidad matemáticamente, como el cociente de los diámetros del menor círculo que se encuentre dentro de la partícula con el de una esfera que posee el mismo volumen de la partícula en estudio. Esto se puede ser apreciado en la Figura 4.2 donde, la esfericidad viene dad por el cociente entre el diámetro de la circunferencia azul y el diámetro de la circunferencia roja. En esta figura, la circunferencia de color rojo representa aquella cuya esfera ocupa mas o menos el mismo volumen de la partícula y la

circunferencia azul representa la menor la circunferencia circunscrita a la partícula.

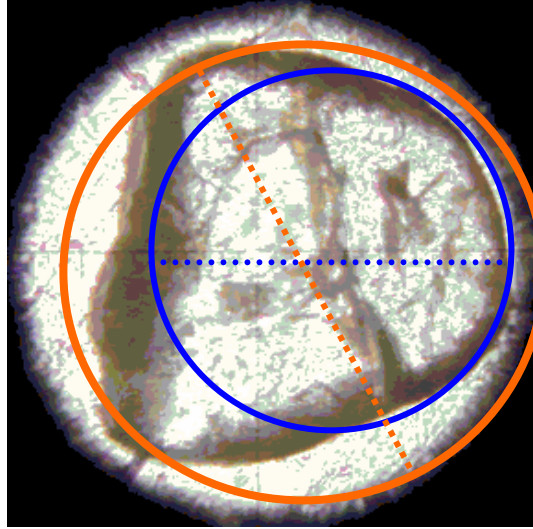


Figura 4.2: Circunferencias necesarias para determinar esfericidad sobre un grano de la Quebrada Los Hoyos.

Así la fórmula de esfericidad (ψ) viene dada por:

$$\psi = \frac{D_{Cm}}{D_{CM}}, \quad (4.1)$$

donde D_{Cm} y D_{CM} son los diámetros de la circunferencia menor y mayor respectivamente. Si una partícula se asemeja a una esfera el valor de (4.1) se aproxima a 1.

Wadell determinó los volúmenes de partículas grandes, sumergiendo la partícula en agua y midiendo el cambio de volumen del agua. Krumbein (1941) modificó el concepto de la esfericidad de Wadell levemente para expresar esfericidad, por la relación:

$$\psi = \sqrt[3]{\frac{\text{volumen de la partícula}}{\text{volumen de la esfera circunscrita}}} \quad (4.2)$$

El volumen de una esfera está dado por:

$$V_{esf} = \frac{\pi}{6} D^3$$

donde D es el diámetro de la esfera. El volumen aproximado de partículas naturales puede ser calculado si se asume que las partículas son elipsoides triaxiales, es decir, que tienen tres diámetros D_L , D_I , y D_S , donde los sub-índices L , I , y S se refieren a las longitudes de los ejes largo, intermedio, y corto del elipsoide. Sustituyendo cada uno de estos ejes en la ecuación (4.2), podemos expresar la esfericidad de la siguiente forma:

$$\psi_i = \sqrt[3]{\frac{\pi/6 D_L D_I D_S}{\pi/6 D_L^3}} = \sqrt[3]{\frac{D_S D_I}{D_L^2}} \quad (4.3)$$

La esfericidad de una partícula determinada por esta relación se llama esfericidad de intercepción (ψ_i) y puede ser calculada midiendo los ejes largos, intermedios y cortos de una partícula y sustituyendo estos valores en la fórmula (4.3).

Sneed y Folk (1958) sugirieron que la esfericidad de intercepción de Krumbein dada por (4.3) no representa correctamente el comportamiento de las partículas dentro de un fluido y la forma como éstas se acomodan. Por ejemplo una partícula en forma de vara llega más rápida que una partícula en forma de disco, aunque la fórmula de esfericidad de intercepción sugiera lo contrario. Las partículas que flotan en el agua tienden a establecer áreas de máxima proyección (plano de longitud y ejes intermedios) perpendicular a la dirección de movimiento, y las partículas pequeñas que descansan en el fondo se orientan perpendicular a la dirección de flujo actual.

Motivado a esto, Sneed y Folk (1958) propusieron una medida de la esfericidad llamada la esfericidad máxima de la proyección (ψ_p), que expresa mejor el comportamiento de la partícula en un fluido. La esfericidad máxima de proyección se define matemáticamente como el cociente entre el área de proyección máxima de una esfera con el mismo volumen de la partícula y el área de proyección máxima de la partícula:

$$\psi_p = \sqrt[3]{\frac{D_s^2}{D_L D_I}} \quad (4.4)$$

Esta última expresión es ideal en el caso de que las partículas hayan sido depositadas por agua, en el caso de otro tipo de transporte como el viento o el hielo presenta inconvenientes debido a que las áreas de proyección se complican.

Sin tener en cuenta la medida de esfericidad usada, la experiencia ha mostrado que las partículas que tienen la misma esfericidad matemáticamente pueden diferir considerablemente en su forma global (Boggs, 1995). Por lo tanto, es necesario definir alguna medida adicional o índice de la forma que permita una representación más gráfica.

En 1935, Zingg propuso dos índices de la forma: $\frac{D_I}{D_L}$ y $\frac{D_S}{D_I}$ para definir cuatro campos de forma: (disco, esferoide, hoja y rodillo) sobre un gráfico bivariado. Las líneas de igual esfericidad de intercepción cruzan las gráficas como curvas hiperbólicas, estas indican que existen partículas de apariencia diferente a la vista que pueden tener el mismo valor de esfericidad matemática. En la figura 4.3 se ilustran: (A) la clasificación de formas de guijarro según Zingg y (B) las relaciones entre la esfericidad matemática y los campos de forma de Zingg.

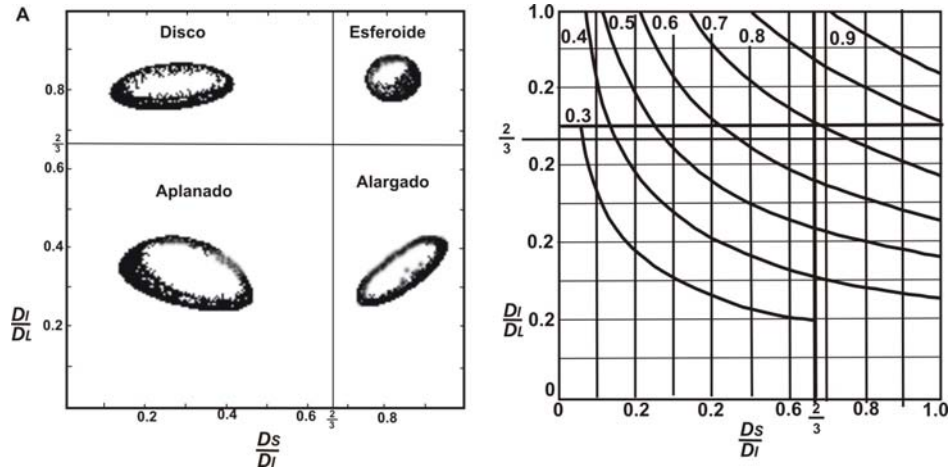


Figura 4.3: (A) clasificación de formas de guijarro y (B) relaciones entre la esfericidad matemática y los campos de forma de Zingg. (Tomado y modificado de Boogs, 1997)

Sneed y Folk (1958) utilizaron dos índices de forma un poco diferentes para construir un diagrama triangular de forma, este puede ser apreciado en la figura 4.4 en esta se grafica $\frac{D_S}{D_L}$ versus $\frac{D_L - D_I}{D_L - D_S}$ para crear diez líneas de campos de forma (compacta, C; planas, P; hojas, H; alongadas, E). Las cuales representan las líneas de esfericidad máxima de proyección dibujadas a través de los diferentes campos, esto es una forma de ilustrar la disparidad entre la esfericidad matemática y la forma real.

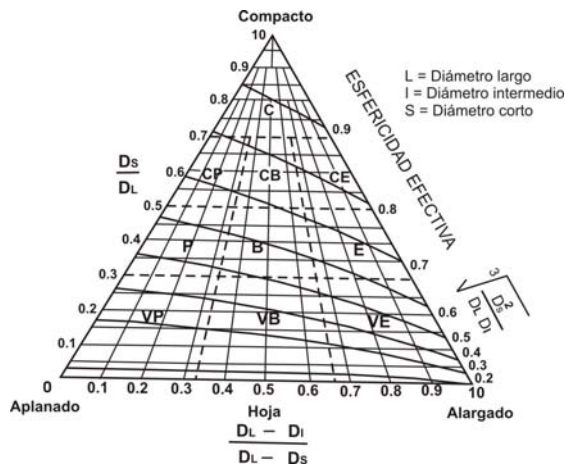


Figura 4.4 Diagrama triangular. Clasificación de forma de guijarros según Sneed y Fol. (Tomado del Boggs, 1997.)

Importancia de la forma

La forma de los granos con tamaño arena y de granos minerales más pequeños en depósitos sedimentarios es una función principalmente de la forma original de los minerales. Debido a su dureza y resistencia, así como también su alta abundancia en rocas sedimentarias siliciclásticas, el cuarzo es comúnmente el único mineral examinado en estudio de formas, sin embargo en esta investigación, se estudiarán para estos análisis, granos de minerales accesorios, específicamente los de apatito los cuales son resistentes y tienen una alta durabilidad al momento de erosionarse los terrenos fuentes, debido a que en la zona la mayoría de las rocas erosionadas son granitos con un porcentaje considerable de minerales pesados. El estudio sobre estos apatitos tiene un doble propósito, estudiar las huellas de fisión espontáneas que indican rasgos térmicos de las rocas fuentes, correlacionándolas de acuerdo a sus propiedades térmicas; y los análisis de forma que permiten verificar la distancia del terreno fuente.

Los numerosos estudios han demostrado que la forma de granos pequeños de cuarzo no es modificada perceptiblemente durante el transporte, aunque pueden ocurrir cambios muy leves en los primeros tiempos del transporte, la forma de guijarros y fragmentos más grandes son también una función de la forma que es heredada de la roca fuente, aunque, debido a la abrasión y a la fractura, los guijarros se modifican durante transporte a una mayor extensión que los granos del tamaño de arena.

La forma de partícula tiene un efecto muy pronunciado sobre el comportamiento de la velocidad, en general, mientras menos esférica sea la partícula, más baja es su velocidad. La forma de la partícula afecta así, la transportabilidad relativa de las partículas que viajan en suspensión. La forma, también afecta a la transportabilidad de partículas más grandes que se mueven por tracción. En general, la esfera y los rodillos se transportan más fácilmente que las hojas y los discos que tengan la misma masa. Por lo tanto existe un transporte preferencial de esferas y rodillos, mientras que río abajo los guijarros cambian su

forma por efecto de la abrasión. En este tipo de fenómenos o cambios de forma, es difícil o casi imposible diferenciar los cambios causados por abrasión del guijarro. Un problema más controversial ha sido encontrar formas de discos de guijarros aplanados en las playas. El predominio de estos ha sido atribuido alternativamente al transporte selectivo por medio de un depósito regresivo que dejan estos guijarros aplanados.

Estos guijarros aplanados se forman por el efecto abrasivo del oleaje (Dobking y Folk, 1970).

Todavía no se ha demostrado que la forma de partículas, según lo expresado por valores de la esfericidad o las medidas de la forma de Zingg-Folk, se puede utilizar solamente como herramientas confiable para interpretar ambientes depositacionales. Aunque los estudios empíricos demuestran algunas diferencias relativas en esfericidad o índices de forma de granos de diversos ambientes. Estas diferencias no han demostrado ser suficientemente distintivas para permitir la discriminación ambiental. Además, es muy difícil medir exactamente la forma tridimensional de granos del tamaño de arena, particularmente en sedimentos noconsolidados. En una sección fina, por ejemplo, podemos ver solamente dos dimensiones de una partícula, y ninguna de las dos dimensiones puede representar la longitud verdadera del eje de la partícula. Estos problemas y otros que se presentan a la hora de realizar los análisis serán expuestos en las próximas secciones.

Redondez

Wadell (1932) definió la redondez matemática como la media aritmética de la redondez de las esquinas individuales del grano en el plano de medición. La redondez de esquinas individuales es dada por el cociente del radio de curvatura de las esquinas con el radio del círculo de mayor tamaño que se puede inscribir dentro del contorno del grano en el plano de medición. El grado de redondez es expresado como:

$$R_w = \frac{\sum (r/R)}{N} = \frac{\sum (r)}{RN} \quad (4.5)$$

Donde r es el radio de curvatura de las esquinas individuales, R es el radio del círculo máximo inscrito y N es el número de esquinas. La relación de r con R es ilustrada en la figura 4.5. Debido a que deben realizarse numerosas medidas del radio, es necesario mucho tiempo para determinar la redondez de Wadell de una gran cantidad de granos. Por tal razón, se han propuesto (Boggs, 1995) medidas más simples de la redondez que requieren solamente que el radio de la esquina más aguda sea dividido por el radio del círculo inscrito.

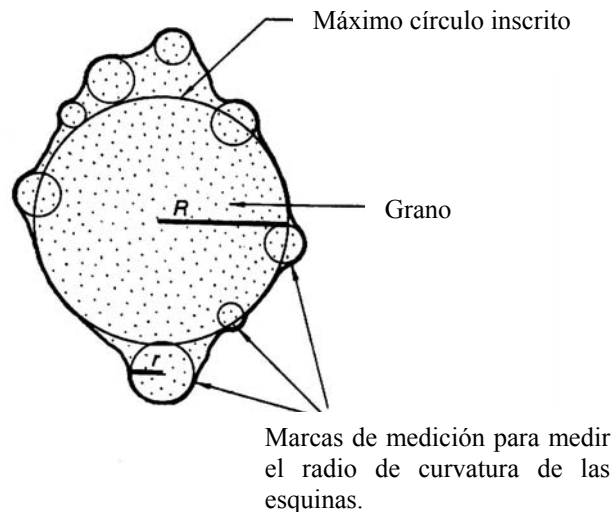


Figura 4.5: Relación del radio (r) de la curvatura de las esquinas con el radio de la mayor esfera inscrita en el grano.
(Tomada de Boggs, 1997)

A menudo se utilizan escalas de comparación o cartas visuales que consisten en sistemas de imágenes del grano, para hacer las estimaciones visuales rápidas de su redondez, entre estas cartas visuales se tienen las de Krumbein (1941) y Powers (1953), esta última llamada *escala verbal* es la más utilizada. La representación visual y la escala verbal de redondez se muestran en la Figura 4.6, y los límites matemáticos de cada clase verbal de la redondez son proporcionados en la tabla 4.1. El intervalo entre las clases de redondez es aproximadamente igual a $\sqrt{2}$. Es decir, el intervalo de cada clase es 1.41 veces mayor que la clase precedente. Folk (1955) desarrolló una transformación logarítmica de esta escala, llamada la escala ρ , también mostrada en la tabla 4.1. El error del operador en estimar redondez del grano de cartas visuales es

muy alto, y la confiabilidad de resultados incluso por el mismo operador es muy baja. Los métodos visuales de la valoración rinden solamente una primera aproximación de la distribución verdadera de la redondez en una población de granos y no son recomendables para usarlos en investigaciones de gran envergadura.

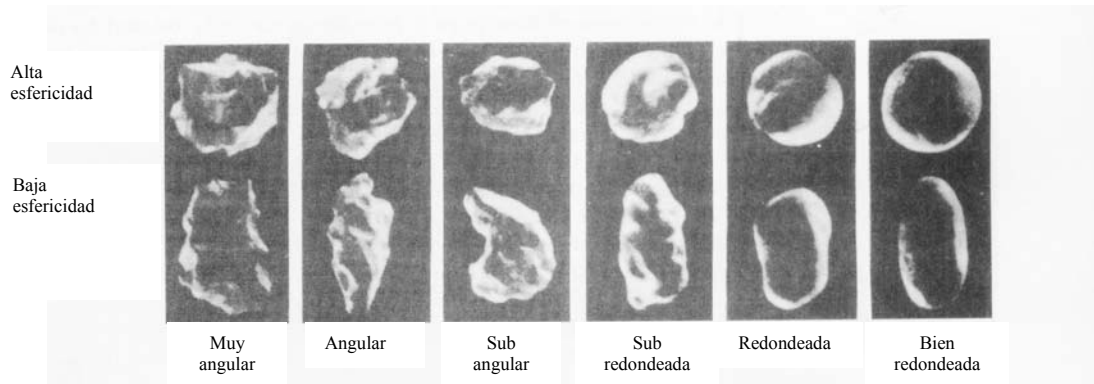


Figura 4.6: Escala verbal de redondez (Powers, 1953)
(Tomada de Boogs, 1997)

Esta escala verbal también puede ser representada gráficamente tal como se observa en la figura 4.7.

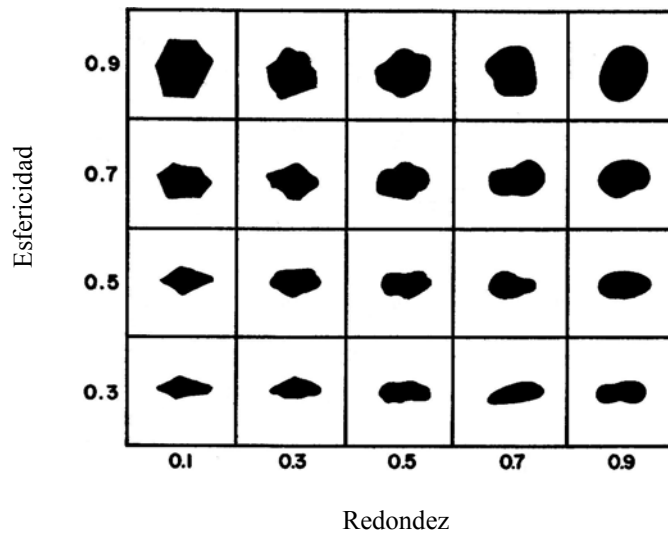


Figura 4.7: Carta de estimación visual de redondez y esfericidad para partículas de arena
(Tomada de Krumbein y Sloss, 1963)

Tabla 4.1 Relación de clase verbal de redondeo de Power a la redondez de Wadell y la escala de ρ . (tomado del Boggs, 1997)

Clase Verbal de Power	Intervalo de Clase de Wadell	Escala de ρ de Folk.
Muy angular	0.12-0.17	0.00-1.00
Angular	0.17-0.25	1.00-2.00
Subangular	0.25-0.35	2.00-3.00
Subredondeado	0.35-0.49	3.00-4.00
Redondeado	0.49-0.70	4.00-5.00
Bien redondeado	0.70-1.0	5.00-6.00

Importancia de la redondez

La redondez del grano en un depósito sedimentario es una función de la composición del grano, tamaño de grano, tipo de transporte y distancia de transporte. Los grano duros, resistentes tales como cuarzo y el circón se redondean menos durante transporte que los granos débiles como el feldespatos y los piroxenos. Los guijarros gruesos se redondean comúnmente más fácil que los guijarros más finos o de tamaño arena por cualquier proceso del transporte. Debido a estos factores, es siempre necesario trabajar con partículas de igual composición y del mismo tamaño, para que los resultados de los análisis de redondez sean significativos.

Una vez adquirido, la redondez de granos de cuarzo no es fácil perderla y puede ser preservada a través de varios ciclos de sedimentación. La presencia de granos de cuarzo bien redondeado de la presencia en areniscas antiguas puede indicar episodio de transporte eólico en su historia pero puede ser difícil o imposible determinar si la redondez tomó lugar durante el último episodio de transporte o durante algún otro ciclo previo.

La redondez de guijarros transportados se relaciona fuertemente con la composición y el tamaño del guijarro (Boggs, 1969). Los guijarros pequeños tales como pizarra y caliza se redondean mucho más fácil que los guijarros de cuarcita o de “cherts”, y los guijarros grandes son comúnmente mejores redondeados que guijarros más pequeños. Aunque el transporte de la corriente no es bueno para redondear granos pequeños de cuarzo, aquellos con tamaño de guijarro pequeños puede redondearse bien por transporte de la corriente.

La presencia de guijarros bien redondeados en rocas sedimentarias antiguas es generalmente indicativa de transporte fluvial. El grado de redondez no depende de estimaciones confiables de la distancia, sino del medio de transporte. La cantidad más grande de granos con alto índice de redondez ocurre en los primeros tiempos del transporte, generalmente dentro del primer kilómetro. También la redondez de los guijarros no es un indicador único de ambientes fluviales porque también pueden llegar a redondearse en ambientes playeros y lacustres. Sin embargo, los guijarros fluviales redondeados pueden eventualmente ser transportados a un ambiente marino cercano donde ellos pueden ser retrabajados por corrientes turbidíticas y resedimentados en partes profundas del océano.

Textura superficial

La superficie de guijarros y granos de minerales pueden ser pulidas, de manera que se pueden observar una variedad de fracturas a pequeña escala, rasgos de bajo relieve como: hoyos, rayas y fracturas. Estas texturas superficiales se originan de diversas formas incluyendo la abrasión mecánica durante el transporte del sedimento, o pulidas tectónicas durante la deformación; y el grabado por corrosión química, en los cuales hay precipitación y crecimientos de minerales autigénicos en las superficies del grano durante el proceso de diagénesis o meteorización. En superficies gruesas pueden observarse rasgos texturales utilizando un microscopio petrográfico o una lupa; sin embargo, el estudio detallado de la textura superficial requiere

amplificaciones altas. Krinsley (1962) desarrollo esta línea de investigación mediante el uso de microscopios electrónicos para altas amplificaciones de la superficie.

La mayoría de los investigadores que estudian la textura superficial de granos de sedimento lo hacen sobre granos de cuarzo debido a su dureza física y estabilidad química lo cual permite que estas partículas retengan su superficie por largos períodos de tiempo geológico. A través del estudio de miles de granos de cuarzo, de varios ambientes depositacionales modernos, se han identificado mas de 25 superficies texturales diferentes incluyendo fracturas concoidales, rayas curvadas y rectilíneas, estrías, capas volcadas, canales de meandro, grabado químico en formas de V's y grabados en formas de V's mecánicamente formadas (Toro, 1986).

La textura superficial parece ser más susceptible a cambiar durante el transporte del sedimento y depositación más que la esfericidad y la redondez. Al remover las texturas superficiales antiguas se generan nuevos rasgos que probablemente son más marcados que en la esfericidad y redondez., las superficies texturales tienen una mayor probabilidad de producirse durante el último ciclo de transporte del sedimento o el último ambiente depositacional. Por consiguiente, los geólogos se interesan en las superficies texturales ya que son posibles indicadores de condiciones de transporte y ambientes depositacionales antiguos. La utilidad de las superficies texturales en análisis medioambientales es limitada debido a que pueden producirse tipos similares de marcas sobre la superficie de los granos en ambientes diferentes. También, pueden permanecer marcas producidas en granos en un ambiente anterior durante el transporte a otro ambiente. Aunque se requiere menos abrasión para remover las texturas superficiales que para modificar la redondez y la esfericidad, las marcas inherentes a un ambiente previo pueden permanecer sobre los granos por largos períodos de tiempo antes de que ellas sean removidas o reemplazadas por las diferentes marcas producidas en un nuevo ambiente. Por ejemplo, los granos en un ambiente marino ártico todavía pueden retener rasgos de microrelieve de superficie adquiridos durante el transporte glacial de los granos al ambiente.

Con cuidado y el uso de métodos estadísticos, ha sido posible demostrar en base a las texturas superficiales en granos de cuarzo por lo menos tres ambientes modernos: litoral (playa y costero), eólico (desierto) y glacial. La forma de granos en cuarzo de ambientes litorales es caracterizado por marcas en forma de V y por modelos de fractura concoidal. Granos depositados en ambientes eólicos muestran suavidad en la superficie y son redondeados, conchas irregulares voltedas, y rasgos de la precipitación. Los granos de los depósitos glaciales tienen patrones de fracturas y estriaciones paralelas a semiparalelas. También se han extendido las técnicas sobre análisis de textura superficial de granos de cuarzo en ambientes modernos para estudiar de depósitos sedimentarios antiguos. La interpretación de paleoambientes en base a la textura superficial es complicada por el hecho que las microtexturas de la superficie pueden cambiar por procesos diagenéticos además de sobrecrecimiento del cemento o por grabación química y disolución.

Otros métodos para analizar y cuantificar la forma de la partícula en 2D

En Clark, (1981) se hace una revisión de los métodos existentes para obtener la forma de los granos para su posterior análisis, Básicamente hay dos técnicas fundamentales:

Técnicas de Análisis de Contornos

Se refieren a la obtención de parámetros del contorno del grano cuyos métodos más usados son; los métodos de Fourier, los cuales serán descritos brevemente por su alta resolución, por la importancia que tienen y debido a que actualmente existen diversos programas en los cuales el uso de este método se puede hacer de forma rutinario; métodos de distribución, métodos de densidad de pendientes; métodos de cuerda a perímetro mejor conocidos como Espectro de esfericidad.

La idea es obtener los parámetros de esfericidad y redondez para delinear la forma de las partículas con un alto grado de aproximación, con este fin pueden emplearse otros métodos matemáticos más exactos, como por ejemplo el análisis de Fourier (Boggs, 1997; Schwarcz y Shane, 1969). Basados en este método existen aplicaciones como las de Boon et. al, 1982 quienes obtienen información espectral de perfiles de granos digitalizados de cuarzo por medio de este análisis.

El principio general del método es “desenrollar” la forma del grano, convertir esta forma en una curva o señal, cuyos parámetros como amplitud, período, frecuencia deben ser obtenidos para tener una representación matemática de esta forma. Para esto la señal puede ser procesada por otros métodos como: la transformadas de ondículas, métodos multifractales (Boggs, 1997), análisis armónico, o cual otro método para análisis de señales (Oppenheim, 1998).

En la figura 4.9 se muestra como el contorno del grano es extraído para posteriormente obtener los parámetros de esta señal. Como el objetivo de esta investigación no es aplicar estos métodos de deconvolución, o de análisis de señales, no se desarrolló esta parte con mayor profundidad, en el caso de que exista interés particular en hacer estos análisis el lector puede revisar otras referencias (Lakhan, 1981; Schwarcz y Shane, 1969; Full, Ehrlich y Kennedy, 1984; Clark, 1981, entre otros).

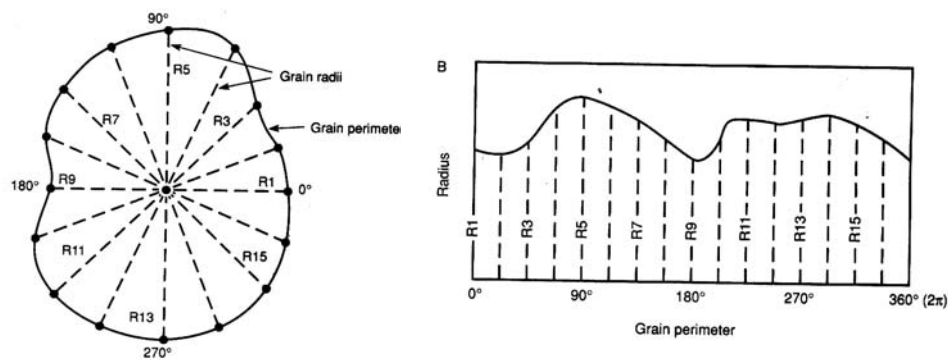


Figura 4.9: Procedimiento de desenrollamiento del contorno del grano para estudiar posteriormente la ondícula generada.
(Tomada de Boggs, 1995)

Técnica de análisis de superficies planares

Dentro de la cual se tienen métodos como elipses equivalentes y representación binaria. La primera trata de aproximar la superficie del grano a superficies esféricas conocidas y la representación binaria es un análisis de los elementos que se encuentran sobre la superficie, como por ejemplo en una fotografía estudiar los pixels que la conforman. En esta investigación utilizaremos este tipo de técnicas ya que es mucho más sencilla y se tiene la ventaja de que los granos a estudiar por el método de huellas de fisión se encuentran sobre una sección fina en donde es mucho más fácil tener una representación visual del grano, que tratar de parametrizar su contorno. La obtención de los datos para aplicar esta técnica será estudiado con detalle en las próximas secciones.

Métodos de adquisición de distribuciones de tamaños de cristales

Las distribuciones de tamaños de cristales se pueden medir directamente cuando los cristales pueden ser extraídos de un volumen de roca —una situación algo inusual para la mayoría de las rocas ígneas, excepto quizás para las carbonatitas. Se ha alcanzado un gran éxito utilizando tomografía de rayos X para los minerales en rocas con concentraciones bajas, tales como granate o diamante (Denison y Carlson 1997; Rowe et al. 1997). En general, este método no puede separar cristales provenientes de un mismo mineral, aunque ha habido recientemente cierto progreso en este campo (Proussevitch y Sahagian 2000).

La mayoría de los datos de DTC se determinan de secciones en dos dimensiones de rocas en afloramiento, conocidas como secciones finas. La conversión de dos dimensiones a los parámetros tridimensionales no es simple y será discutida más adelante. Estas secciones de dos dimensiones son las imágenes que necesitan ser procesadas para extraer los diferentes parámetros que describen las intersecciones, tales como longitud, ancho, área, perímetro, orientación, y

localización del centro de figura. El proceso puede ser manual o automático. En el tratamiento manual, las diversas intersecciones son identificadas por el ojo, usando color, birrefringencia, clivajes, y otras características. Esta técnica es laboriosa, pero los datos obtenidos son de buena calidad para realizar análisis (Higgins, 2003)

El proceso de obtención de imagen automática es mucho más rápida, pero es actualmente es menos elaborado, ya que usa solamente los colores para la clasificación de partículas. Sin embargo, en algunas circunstancias puede dar resultados muy útiles. En estos se debe tener un control de calidad muy bueno, por ejemplo mediante el análisis manual de algunas muestras seleccionadas.

El análisis textural más simple implica solamente una sección. Si existe una fábrica apreciable (foliación o lineación), entonces se necesitan secciones paralelas y normales a la estructura dominante o un estimado cuantitativo de la naturaleza y calidad de la fábrica, así como su orientación con respecto a la sección. La máxima información sobre la textura de una roca se puede obtener solamente de muchas secciones en serie. Sin embargo, la cantidad de trabajo implica que la cantidad de granos y la confiabilidad estadística, puede ser sacrificado. Si solamente se necesita las dimensiones promedios de los cristales y la roca es masiva (no tiene fábrica), entonces se pueden aplicar varias técnicas estereológicas. La mayoría de estas utilizan dos secciones paralelas con un espaciamiento conocido (Howard y Reed 1998; Royet 1991).

Las longitudes y los anchos de intersecciones se pueden definir de diversas maneras (Fig. 4.10 (A)). Sin embargo, la definición exacta que se use no es importante, con tal que se utilice en forma constante. En el modelo presentado por Higgins (2003) la longitud se define como la dimensión más grande de la intersección. El área de cada intersección se define únicamente, pero desafortunadamente no es el mejor parámetro del tamaño para las correcciones estereológicas (Higgins, 1994)

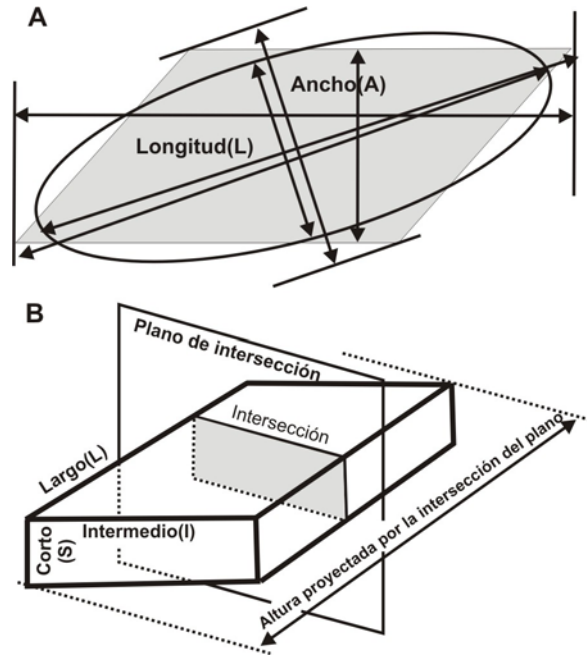


Figura 4.10 (A) Dimensiones de la intersección. (B) A como paralelepípedo.
(Tomado de Higgins, 2003)

Se indican tres definiciones posibles de la longitud y de la anchura; La longitud máxima y una anchura ortogonal son apropiadas para los cristales irregulares. Sin embargo, para las intersecciones con los paralelepípedos el ancho se define más fácilmente como el ancho mínimo de la intersección, con la longitud perpendicular a este. Muchos programas automáticos de análisis de imagen aproximan la intersección con una elipse de la misma longitud de área y ancho conocidas como elipses que se ajustan al cristal. (B) El paralelepípedo, este sólido es caracterizado por tres dimensiones: Corto, intermedio, y largo. Un plano que intersecta el objeto dará un poliedro de tres a seis lados (Higgins 1994). Los ejemplos de tales intersecciones se demuestran en el cuadro 2.

Algunos cristales grandes se pueden medir directamente del afloramiento, por ejemplo, megacristales en granitos (Higgins 2000) o oicristos en rocas máficas. Los cristales se pueden medir con una regla, o con sus contornos montados sobre una grilla o malla para posteriormente medirlo más adelante, o se puede tomar un

mosaico de fotografías para un análisis posterior. Para las superficies glacialmente pulidas las intersecciones con la superficie se pueden medir. Pero donde ha habido un mayor desgaste por la acción atmosférica los megacrístales pueden estar orientados hacia fuera de la superficie. En este caso se puede medir el tamaño verdadero 3D de los cristales. Sin embargo, debe establecerse el tamaño cristalino mínimo que puede ser medido de forma constante.

Para las rocas que contienen cristales grandes, se pueden cortar losas las cuales pueden ser muy útiles. La superficie se puede pulir, grabar al agua o manchar para realzar el contraste entre los diversos minerales. Dos de las mejores manchas se producen con Nitrato de Cobalto y con ácido fluorhídrico, que mancha de color naranja todo el feldespato potásico, mientras que colorea en rojo las plagioclasas.

Otros minerales también pueden ser manchados (Hutchison 1974). Los cristales en losas se pueden medir manualmente en los afloramientos. Las losas se pueden también colocar en un explorador de imágenes y ser analizados automáticamente o manualmente. Para el análisis de imagen automático, la imagen primero se debe reducir (procesar en blanco y negro) a una imagen binaria del mineral del interés. Esto es hecho seleccionando los valores de color asociados al mineral para propósitos generales usando los siguientes softwares de procesamiento de imágenes, (adobe Photoshop, Corel, LViewPro), o los programas dedicados a favorecer las imágenes como el SigmaScan, IPLab, e ImageTool. La imagen se puede manipular para quitar los "ruidos" (píxeles individuales o grupos pequeños de píxeles) o para separar cristales individuales.

Varias imágenes se pueden producir para diversos minerales en la roca. La imagen binaria se puede analizar por programas de gran alcance existentes en la red de forma gratuita tales como: NIH (para Macintosh) y Scion imagen (para Windows).

Las secciones finas pueden ser medidas manualmente en varias formas. La más simple de ellas es usando una escala en el microscopio para medir la longitud y el ancho de los cristales. Este método tiene la ventaja de que se pueden emplear diferentes aumentos y orientaciones para identificar el cristales. Todos los cristales

con intersecciones mayores al límite inferior deber ser medidos. Sin embargo, es difícil medir anchos de huellas sobre los cristales por lo que debe tomarse una fotografía de los granos.

Un método más complejo incluye tomar fotografías de partes de una sección delgada o de la sección completa. Estos pueden ser medidos en tres formas diferentes: (1) la longitud del cristal y en ancho pueden ser obtenidas con una regla; (2) los cristales se pueden montar sobre un epoxy transparente, que después se explora y se analiza automáticamente según lo antes mencionado; y (3) las fotografías se pueden poner en una tabla digitalizadora y el contorno de cada cristal en la fotografía se convierte a digital.

Varios programas comerciales (SigmaScan, o Measure) se pueden utilizar para controlar la tableta digitalizadora y para reducir los datos posicionales crudos a los parámetros morfométricos. En cada caso el contorno real del cristal en la sección fina se debe verificar con un microscopio de luz polarizada. Las imágenes finas de la sección también se pueden analizar por métodos automáticos, en cuanto a las losas. La imagen se puede adquirir directamente del microscopio con una cámara fotográfica digital, o los mosaicos de fotografías pueden ser explorados. Algunos sistemas de análisis de imagen permiten una combinación de estos métodos: los contornos cristalinos se pueden seleccionar manualmente de la imagen procesada.

Las imágenes de cristales muy pequeños se pueden obtener usando la luz reflejada o con un microscopio electrónico de exploración, el usar una retrodispersión de imagen del electrón o un microsondeo electrónico del electrón con los mapas de la radiografía. Estas imágenes se pueden analizar exactamente de la misma manera que las secciones finas y las losas. No importa qué método se utilice para adquirir datos del tamaño de la intersección, debe establecerse el tamaño mínimo que puede ser reconocido y ser medido. Es también importante registrar los detalles del método de adquisición de datos y las medidas tomadas para asegurar un adecuado control de calidad.

La forma de cristales tiene otro interés particular (Sunagawa 1987), pero en estos análisis también es importante realizar correcciones estereológicas. Aquí las

formas cristalinas totales se simplifican y se definen en términos del cociente de los radios y el grado de redondez.

El cociente de los radios tiene tres parámetros, las dimensiones cortas, intermedias, y largas (S:I:L). Si los cristales se pueden separar de la matriz, después su forma se puede medir directamente. No es necesario tener una separación cuantitativa, como la que se Resultados de las Medidas

La mayoría de los métodos de adquisición de datos producen la misma lista de resultados de las características cristalinas de intersección, tales como longitud, ancho, área, orientación, y el área de la superficie medida. El primer paso es calcular la distribución de frecuencia de la densidad del número de área. Los datos de DTC tienen comúnmente una distribución normal-logarítmica aproximada (Higgins, 2003), por lo tanto, es mejor utilizar intervalos de tamaño logarítmicos para las medidas de la longitud y de ancho (Sahagian y Proussevitch 1998; Saltikov 1967). El intervalo de clases dependerá de la cantidad de los datos (número de los cristales medidos), de la gama de los tamaños cristalinos, y del método estereológico de conversión usado. De acuerdo a la experiencia de Higgins, (2003) por cada 10 granos debe usarse un intervalo de clases de 4 o 5. Más intervalos de clases pueden introducir errores porque hay pocos cristales en cada clase y también porque necesitan más corrección durante la conversión estereológica. El número de cristales en cada clase es dividido por el área total medida para estimar la densidad del número del área, $nA(DXY)$, para cada intervalo del tamaño, DX a DY . En este trabajo, las longitudes tridimensionales son indicadas en mayúsculas y las longitudes y anchos de intersección en minúsculas.

Algunos autores utilizan la frecuencia acumulativa de las longitudes de intersección, $NA(D)$ en vez de la densidad del número de intersecciones. Ésta es la suma de todas las intersecciones más pequeñas que D (Cashman y Marsh, 1988) o raramente más grande que D (Peterson, 1996). La distribución de frecuencia acumulativa se puede convertir a $nA(DXY)$ por intervalos discretos. Donde sean escasos los datos, por ejemplo para los cristales grandes, los métodos de la frecuencia acumulativa tienen la ventaja de la eliminación de clases vacías. En algunos casos, el

uso de los métodos de la frecuencia acumulativa elimina un paso en los cálculos (véase Peterson, 1996).

Conversión estereológica de dimensiones 2D a las dimensiones verdaderas (3D)

Existen diversas fórmulas matemáticas que permiten convertir las medidas realizadas en 2D a 3D (Higgins, 2003) sin embargo si se toma una sección fina en donde el eje “c” de los granos estén en contacto cerrado sobre la superficie de la sección, no es necesario realizar este tipo de conversiones, ya que puede asumirse que la superficie del cristal representa una rebanada del grano, y los demás valores pueden ser interpolados a partir de las observaciones realizadas sobre esta rebanada, esta será una de las suposiciones hechas para esta investigación.

Formas y fábricas del cristal

La forma de cristales tiene otro interés particular (Sunagawa 1987), pero en estos análisis también es importante realizar correcciones estereológicas. Aquí las formas cristalinas totales se simplifican y se definen en términos del cociente de los radios y el grado de redondez.

El cociente de los radios tiene tres parámetros, las dimensiones cortas, intermedias, y largas ($S:I:L$). Si los cristales se pueden separar de la matriz, después su forma se puede medir directamente. No es necesario tener una separación cuantitativa, como la que se utilizaba para las distribuciones de los tamaños de los cristales. Típicamente no es posible separar cristales, y su forma se debe estimar de los parámetros de las distribuciones del cociente de la intersección ancho/longitud (a/l).

Higgins (1994) demostró para que una roca masiva (sin ninguna orientación preferencial) y los cristales modelados como paralelepípedos, la moda de a/l es igual a C/I . El cociente I/L es más difícil de determinarse, pero se puede estimar de la oblicuidad de las distribuciones de a/l como sigue:

$$Oblicuidad = \frac{\frac{\bar{a}}{I} - \text{moda}\left(\frac{a}{I}\right)}{\sigma\left(\frac{a}{I}\right)}$$

y,

$$\frac{I}{L} = Oblicuidad + 0.5$$

Estas ecuaciones no son exactas para las formas muy cercanas. Pero si en el caso de que la roca presente lineaciones o sea foliada, así la moda de a/I de las secciones paralelas o normales a la fábrica puede dar valores mucho más exactos de C/I e I/L . El grado de redondez puede variar de euهدral (angular) a elipsoide. Las formas cristalinas cóncavas y de ramificaciones no se pueden corregir por los métodos propuestos aquí y se deben medir por métodos estereológicos directos. Una característica especial de los gráficos de distribución de intersección para paralelepípedos es que el tallo de las intersecciones más pequeñas a la moda son casi independientes de la longitud y el ancho. La misma distribución para esferas disminuye la abundancia de longitud del ancho a cero. Por lo tanto el efecto del redondeo puede ser aproximado modificando la parte de la distribución a la izquierda de la moda, la forma exacta de la función no está clara, sino se puede aproximar de la manera siguiente: un factor de redondez se define para estar entre uno (los elipsoides) y cero (los cristales angulares). La función disminuye el paralelepípedo al punto donde el factor de redondez se iguala al cociente de I/S . Entonces la función disminuye linealmente a cero en los valores pequeños de las intersecciones.

La fábrica en rocas se puede definir por una orientación preferida de las formas o de las orientaciones cristalinas del enrejado cristalino. Solamente las orientaciones forma-preferidas afectarán la conversión estereológica de las DTC, aunque las orientaciones preferenciales de enrejado yacen a la derecha. La fábrica puede ser lineada o foliada y la calidad puede variar de la alineación perfecta de todos los cristales a ninguna alineación (equivalente a una roca masiva). Los efectos de

orientaciones preferenciales en las probabilidades de las dimensiones de la intersección se pueden calcular de un modelo numérico como el antes mencionado, a menos que la orientación de los planos de intersección tengan un modelo particular.

Fuentes de error en los análisis

La inexactitud en la determinación de las densidades se presenta principalmente a partir de tres fuentes de errores. Es más fácil entender y cuantificar estos errores para que el lector los tenga presentes a la hora de hacer una investigación de este tipo. La primera es que al tomar la raíz cuadrada del número de intersecciones dentro de un intervalo, este valor generalmente es significativo para intervalos más grandes de 20 intersecciones. (Es decir, la desviación estándar es más exacta si se tienen más de 20 observaciones)

La segunda fuente de error está en el valor de los parámetros PXY de la probabilidad usado en las correcciones estereológicas. Aunque estos parámetros se definen de manera exacta para formas convexas fijas, los cristales en la mayoría de los sistemas naturales tienen formas más irregulares y variables. Otra fuente del error asociado a las correcciones es que el tallo de las intersecciones más grandes que el intervalo modal está incluido en el intervalo modal. Aunque en nuestro caso particular, esta fuente de error es sustituida por los errores al tratar de extender la forma del grano a 3D, por lo tanto sólo se harán análisis en 2D.

Por lo tanto, es difícil estimar las contribuciones de estas fuentes de errores al error total. Sin embargo, es fácil calcular la contribución de los errores de cuentas de otros intervalos a la corrección total de un intervalo. Esta fuente del error es la más importante para intervalos pequeños, donde son más significativas las correcciones.

La tercera fuente de error en la conversión de dimensiones cristalinas intermedias (para las medidas de la longitud de intersección) o de dimensiones cristalinas cortas (para las medidas de ancho de intersección) a las longitudes cristalinas (los criterios del tamaño usados en este trabajo). Los errores en la

determinación de la forma cristalina producirán errores sistemáticos en la densidad y el tamaño.

Descripción del programa Scion Image

Scion Image es un programa de procesamiento y análisis de imágenes para PC's compatibles con IBM, está basado en el programa NIH *Image* de la plataforma Macintosh. En este, se pueden adquirir, mostrar, editar y animar imágenes. Sólo reconoce y guarda imágenes en los formatos TIFF y BMP, proporcionando una mayor compatibilidad con otras aplicaciones, incluyendo programas para escanear, editar y publicar análisis de imágenes. Este programa soporta muchas funciones estándar de procesamiento de imágenes, perfiles de densidades, suavizados, afilados, detección de bordes, filtros promedios y convolución espacial con núcleos definidos por el usuario.

El *Scion Image* para Windows puede ser usado para medir el área, media, centroide, perímetro, etc, o el usuario puede definir regiones de interés. Este también permite hacer un análisis de partículas y proporciona herramientas para medir longitudes de trayectorias y ángulos. Se pueden realizar calibraciones espaciales para proveer un universo de datos reales y medidas de longitud. La calibración de densidad pueden ser hechas en vez de radiaciones o estándares de densidad óptica usando unidades específicas definidas por el usuario. Los resultados pueden ser impresos, exportados a archivos de textos o copiados en el portapapeles.

Una paleta de herramientas soporta edición de color e imágenes en escala de grises, incluyendo la capacidad para hacer líneas, rectángulos y texto, además se puede voltear, rotar, invertir y escalar selecciones de la imagen. Este programa soporta múltiples ventanas y ocho niveles de aumento, además todas las funciones aplicadas se pueden deshacer.

Scion Image para Windows puede ser modificado y programado via la construcción de un lenguaje macro Pascal.

Scion Image for Windows require una PC IBM con una tarjeta de video de 4MB de RAM, se recomienda para el tratamiento de imágenes en 3D una PC con 16

MB o más de RAM. Este programa es una aplicación en 32-bit, por lo que requiere un sistema operativo Microsoft Windows 95 o Microsoft Windows NT 4.0.

Este programa ha sido utilizado en muchas ramas de la ciencia, como la medicina, para examinar el desarrollo de células cerebrales y el momento en el cual éstas se dividen para dar origen a nuevas células. También ha sido utilizado para medir propiedades de porosidad y compactación en arenas, y para simular comportamientos de estructuras bajo nieve. En la Figura 4.11 se observa la aplicación de este programa en la medicina.

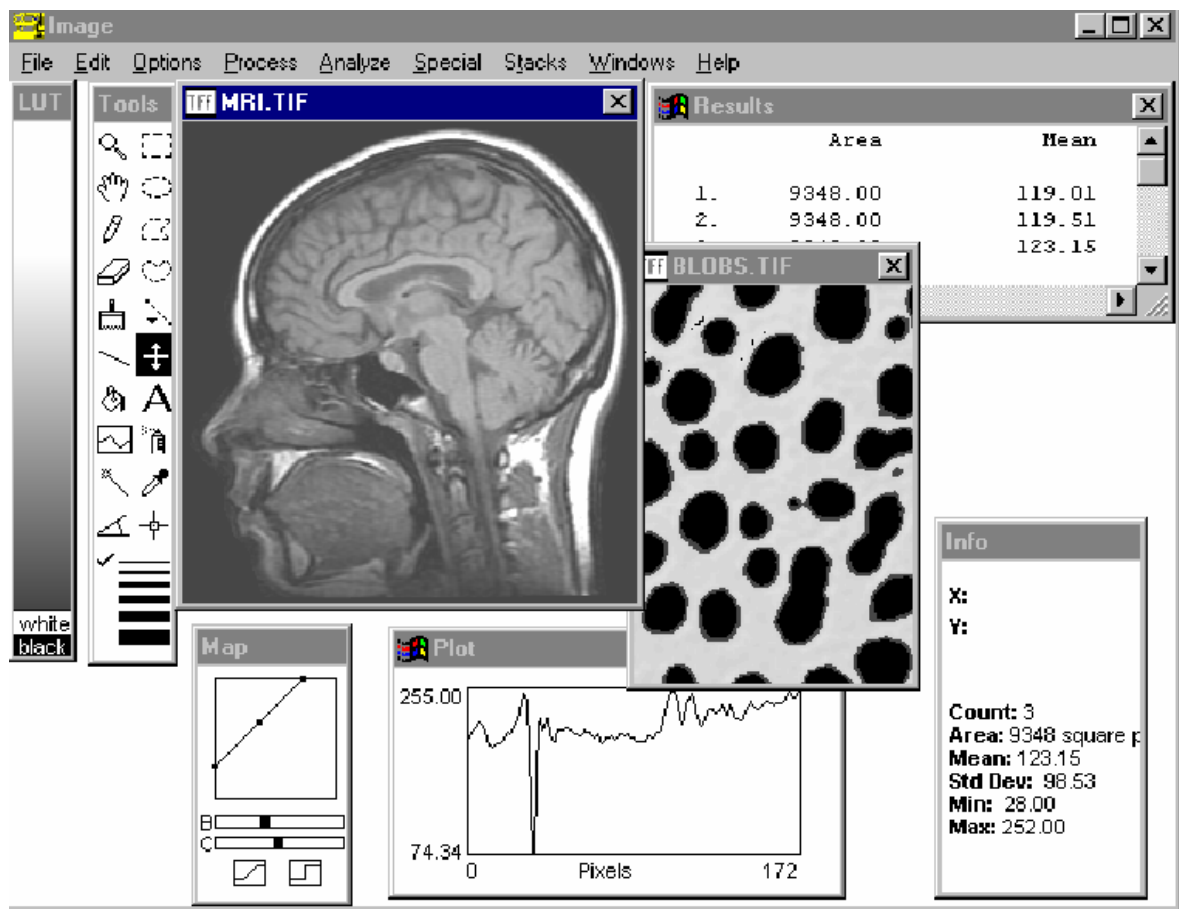


Figura 4.11: Aplicación del programa Scion image para determinar crecimientos de células cerebrales.

(Tomado del Manual de Scion Image, 2000)

Valores arrojados en el análisis de partículas por el programa Scion image

El programa calcula diferentes parámetros, esto se hace seleccionado en el menú analizar la opción de parámetros a medir, esta es mostrada en la figura 4.12.

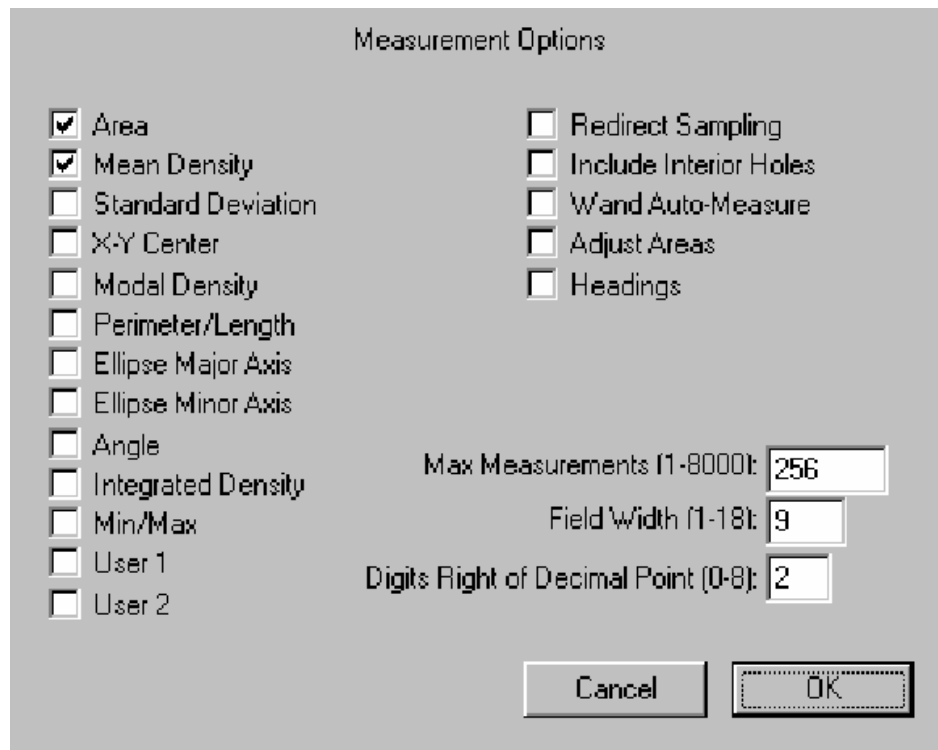


Figura 4.2: Opciones de medición de parámetros del programa Scion Image.

A continuación describimos los parámetros más importantes considerados para este trabajo especial de grado:

Area: Area de selección en pixels, aunque puede modificarse la escala a micras, milímetros cuadrados, etc.

Densidad Promedio: Promedio de grises dentro de la selección, esto es, la suma de los valores grises de todos los pixels en la selección, dividida entre el número de pixels. Se puede generar una curva de densidades.

Desviación estándar: Desviación estándar de los valores de grises usados para generar el valor promedio de grises.

Centro X-Y: Centro de la mayor elipse ajustada, medida de cualquiera de las esquinas superior izquierda o inferior derecha de la imagen.

Valor Modal: Valor gris más frecuente en la imagen, corresponde a los picos altos en el histograma.

Perimetro/Longitud: Longitud alrededor del borde de la imagen seleccionada.

Ejes Mayor/Menor: Longitudes de los ejes mayor y menor de la mayor elipse ajustada.

Angulo: Angulo entre el eje mayor y una línea paralela al eje x de la imagen. También representa el ángulo entre dos puntos cualesquiera seleccionado de la imagen.

Densidad integrada: Suma de los valores grises dentro de la selección con el fondo sustraído. Es usado para medir el tamaño o volumen de puntos. Se calcula usando la siguiente formula:

$$D_i = N * (\text{PROMEDIO-FONDO})$$

donde N es el número de pixels en la selección y el fondo es el valor gris modal (el que más se repite) después de suavizar el histograma.

Min/Max: Valores de grises máximo y mínimo dentro de la selección.

User 1, User 2: Agrega nuevas columnas a la tabla de resultados puede ser empleadas por el usuario para definir nuevas medidas.

Análisis particulares realizados para la obtención de los parámetros de forma y redondez de granos de apatito.

Después de lo anteriormente mencionado, hemos diseñado un análisis particular para la obtención de los parámetros de nuestros granos, esto puede ser resumido en forma gráfica en la figura 4.13. La primera columna se refiere al software utilizado, la segunda se refiere al procedimiento ejecutado con esos programas, la tercera columna se refiere a la obtención de la imagen binaria, donde se medirán los parámetros de la tabla 4.2 y en la última columna de resultados se muestran las principales gráficas estudiadas, la primera es una imagen de la superficie del grano, esta es una manera de extrapolar la forma del grano y usar la escala verbal de Powers mostrada en las secciones anteriores, el siguiente gráfico de esta columna representa cada uno de los parámetros obtenidos con el programa Scion image, posteriormente se muestra un perfil de la superficie del grano, esto muestra las irregularidades o textura superficial del grano medida en escala de grises, luego se gráfica en un diagrama ternario se muestra la clasificación de forma de guijarros por Sneed y Folk, por último, se realizan otros gráficos que no aparecen aquí para simplificar la figura, como: histogramas, gráficos de regresión, gráficos de cajas, análisis de discriminantes, curvas de densidad de probabilidad y otros gráficos estadísticos para representar lo mejor posible los resultados. Esto será mostrados en el siguiente capítulo y se trata de mostrar la dependencia entre los análisis de forma y la información térmica que cada grano trae consigo.

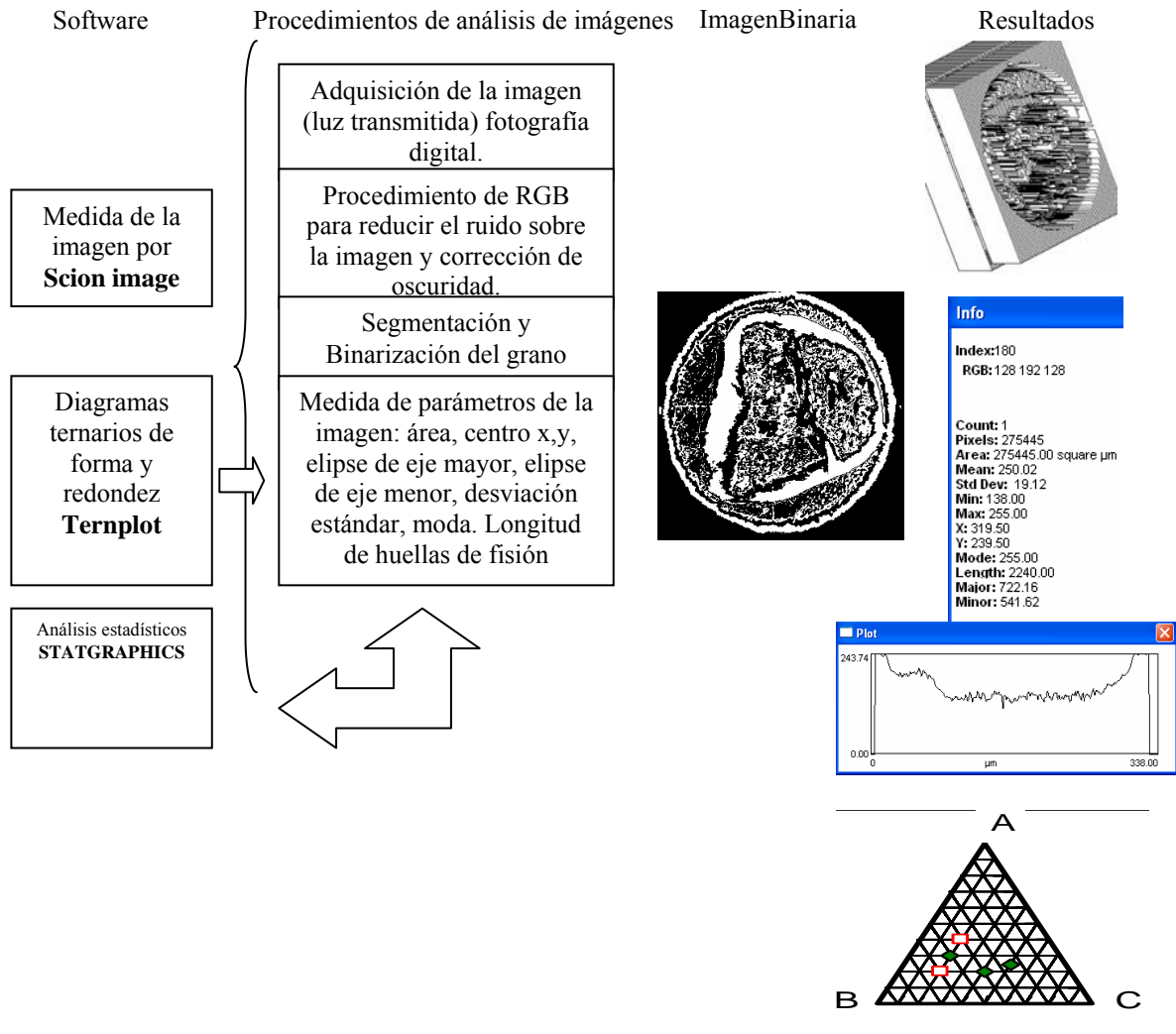


Figura 4.13: Representación esquemática de los pasos realizados para el análisis de imágenes y los resultados.

En la tabla 4.2 se describen cada uno de los parámetros básicos medidos en este trabajo con el programa de análisis de imágenes para posteriormente en el capítulo siguiente mostrar los resultados y su interpretación.

En la tabla 4.3, se muestran las principales características sedimentarias que pueden ser obtenidas con los parámetros calculados según la tabla 4.2, además de esto hay otras características como grado de escogimiento y porosidad que pueden ser

derivados de 4.2. Como estudiamos granos separados de la matriz no mostramos las expresiones matemáticas de éstas características.

Tabla 4.2: Parámetros básicos medidos con el programa de análisis de imágenes, los cuales son usados en el cálculo de características sedimentológicas (ver tabla 4.3).

Parámetro	Descripción
A_{vm}	Area de la ventana medida
A_g	Area de la sección del grano
L_g	Perímetro de la sección del grano, suma de todas las longitudes de la ventana medida.
Ejes a, b	Longitud aparente de los ejes mayor y menor de las elipses ajustadas en el borde de la partícula.
α	Angulo entre las longitudes aparentes de los ejes respecto a la horizontal.
r	Distancia del centro de un grano al centro de otro grano vecino.
n	Número de granos en la ventana estudiada

Tabla 4.3: Principales características sedimentológicas

Variable	Descripción	Consideraciones	Variabes estadísticas
Tamaño de grano: d_g	$d_g = \sqrt{\frac{4A_g}{\pi}}$	Equivalente al diámetro del área del grano estudiado.	Media, mediana, curtosis, oblicuidad (métodos gráficos de Petitjohn et. al., 1987)
Forma del grano: q	$q = \frac{b}{a}$	Cociente de los diámetros, varía entre 0 y 1, elipsoidal a esférico respectivamente	Media, mediana, desviación, curtosis, oblicuidad
Area de superficie específica: S_p	$S_p = \frac{4L_g}{\pi(A_{vm} - A_g)}$	Superficie específica expresada como área superficial por unidad de volumen del material sólido.	
Orientación de los granos: θ_g y R_g	$C = \sum n_i \cos(2\alpha)$ $S = \sum n_i \sin(2\alpha)$ $\theta_g = \left[\arctan\left(\frac{S}{C}\right) + k \frac{\pi}{2} \right]$ <p>con $k=0, 2$ o 4 dependiendo del cuadrante.</p>	θ_g orientación promedio del grano, R_g orientación en línea recta, ni número de observaciones i , dentro del intervalo angular	θ_{g1} y θ_{g2} primera y segunda frecuencia ocurrida dentro del intervalo angular.

CAPITULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Introducción

A continuación mostraremos los resultados obtenidos al medir las longitudes de huellas de fisión espontáneas para las muestras de las quebradas Los Hoyos y Vichú respectivamente derivados de los procedimientos descritos en el tercer capítulo y los análisis de partículas descritos en el capítulo anterior para los mismos minerales accesorios, en conjunto se analizaron un total de 9 muestras, 5 de Hoyos y 4 de Vichú, de estas se seleccionaron en promedio 118 granos, (68 de Hoyos y 50 de Vichú). En este capítulo se relacionan todos los resultados obtenidos, se presenta la estadística descriptiva de los datos y se correlacionan análisis de partículas con longitudes de huellas de fisión para tratar de correlacionar termalmente y por morfología de granos ambas quebradas.

Resultados de los Análisis de Partículas

Estadística descriptiva

Al aplicar el programa Scion Image a cada una de las muestras que se analizaron se obtuvieron una serie de datos mencionados en el capítulo anterior: área, media, centro XY, diámetro de eje mayor y eje menor de elipse, entre otros, con éstos se calcularon otros parámetros como los descritos en la tabla 4.2. Además de esto, se midieron de forma manual utilizando el programa antes descrito los diámetro corto (DS), diámetro largo (DL) y diámetro intermedio (DI).

En la tabla 5.1 y 5.2 pueden observarse la estadística descriptiva de cada uno de los parámetros calculados para las diferentes muestras por quebradas.

Tabla 5.1: Estadística descriptiva de los parámetros obtenidos para la Quebrada Los Hoyos.

Estadística descriptiva Quebrada Los Hoyos (N=68)									
	Longitud	D.Elip.May.	D.Elip.Men.	D.L.	D.S.	D.I.	DS/DL	DI/DL	q
Min:	155.92	50.07	32.85	111.73	16.48	109.35	0.04	0.73	0.36
1st Qu.:	385.15	128.76	79.04	229.56	143.71	215.41	0.50	0.91	0.53
Mean:	511.62	172.79	109.08	320.94	199.25	320.54	0.64	0.94	0.64
Median:	538.72	170.36	107.79	298.36	181.36	297.93	0.61	0.98	0.63
3rd Qu.:	612.00	205.55	135.90	415.26	254.39	409.31	0.76	1.00	0.75
Max:	920.09	319.49	229.67	577.60	429.28	679.70	1.01	1.00	0.95
Variance:	33532.95	4006.36	1819.22	13095.04	6691.54	16225.79	0.03	0.0054	0.02
Std Dev.:	183.12	63.29	42.65	114.43	81.80	127.38	0.18	0.0738	0.14
SE Mean:	22.20	7.67	5.17	13.87	9.91	15.44	0.02	0.0089	0.01
LCL Mean:	467.30	157.47	98.75	293.25	179.45	289.70	0.59	0.92	0.60
UCL Mean:	555.95	188.11	119.40	348.64	219.05	351.37	0.68	0.96	0.67
Skewness:	0.15	0.23	0.45	0.40	0.59	0.58	0.12	1.40	0.14
Kurtosis:	-0.52	-0.49	-0.16	-0.84	0.01	-0.37	0.49	1.09	-0.72

En esta tabla los valores estadísticos están ubicados en la primera columna de la izquierda, estos son: min, se refiere al mínimo valor; 1st Qu, es el primer cuantil de la muestra, mean es el promedio, median es la mediana, 3rd Qu, es el tercer cuantil, max es el máximo de la muestra, variance es la varianza, Std Dev es la desviación estándar, SE Mean es el error de la media, LCL Mean es la media de los valores más pequeños, UCL es la media de los valores más grandes, Skewness es el sesgo o el grado de aproximación a una distribución simétrica como la Gaussiana, y Kurtosis es el estadístico asociado a la curtosis de una muestra.

Cada uno de estos estadísticos se obtuvieron sólo para la longitud, diámetros de la elipse mayor y menor, diámetros largos, corto e intermedio, cociente entre los diámetros y la forma (q) a fin de simplificar el tamaño de la tabla. Nótese que la media para los cocientes DS/DL, DI/DL y q son respectivamente 0.61, 0.98, y 0.63, sus varianzas respectivas son 0.03, 0.0054 y 0.02 lo cual indica que los resultados para cada uno de los granos están muy cercanos entre sí, observando los promedios antes mencionados y llevándolos a la Figura 4.4 de Zingg, se observa que el promedio cae justo en una zona límite entre formas esféricas y discos. La alta varianza de las longitudes de los granos, y los diámetros de las elipses están indicando una alta variedad de tamaños de granos, esto se esperaba debido a que para la separación de los minerales pesados se usaron mallas entre 60 y 200.

El primer cuantil para DS/DL y DI/DL (0.50,0.91) y tercer cuantil (0.76,1) discriminan dos zonas en la figura 4.4, una de zona de discos y la segunda una zona de esferas. El valor de la forma (q) es de 0.64, esto indica que hay un grado de redondez en los granos de acuerdo a la tabla 4.1 de las relaciones de Powers. Los valores pequeños del sesgo de DS/DL y q indican que se puede aproximar estos parámetros por una distribución normal, es decir, que estas propiedades se comportan similares para todos los granos.

Tabla 5.2: Estadística descriptiva de los parámetros obtenidos para la Quebrada Vichú.

Estadística descriptiva Quebrada Vichú (N=50)									
	Longitud	D.El.May	D.El.Men.	D.L.	D.S.	D.I.	DS.DL	DI.DL	q
Min:	177.66	63.09	40.22	119.54	19.68	125.32	0.11	0.72	0.43
1st Qu.:	353.05	123.33	88.81	209.50	148.56	210.72	0.57	0.87	0.57
Mean:	510.60	169.38	117.20	294.81	197.35	282.17	0.68	0.93	0.70
Median:	495.27	167.75	109.61	262.33	190.14	260.30	0.69	0.98	0.73
3rd Qu.:	645.80	212.70	144.01	367.66	240.47	330.83	0.80	1.00	0.82
Max:	846.48	272.50	211.03	590.88	342.70	494.55	0.98	1.00	0.89
Variance:	28902.54	3166.07	1766.43	1135.3	4866.16	8597.15	0.02	0.005	0.02
Std Dev.:	170.007	56.26	42.02	106.55	69.75	92.72	0.16	0.08	0.14
SE Mean:	24.04	7.95	5.94	15.06	9.86	13.11	0.02	0.01	0.02
LCL Mean:	462.29	153.39	105.26	264.52	177.52	255.82	0.63	0.91	0.66
UCL Mean:	558.92	185.37	129.15	325.09	217.17	308.52	0.73	0.95	0.74
Skewness:	0.18	0.14	0.52	68.54	0.01	0.60	0.75	0.95	0.41
Kurtosis:	-0.96	-1.07	-0.34	541.99	-0.28	-0.46	1.47	-0.33	-1.12

En la tabla 5.2 la media para los cocientes DS/DL, DI/DL y q son respectivamente 0.69, 0.98, y 0.73, sus varianzas respectivas son 0.02, 0.005 y 0.02 al igual que en la tabla anterior demuestra que los resultados están muy cercanos entre sí, observando los promedios antes mencionados y llevándolos a la Figura 4.4 de Zingg, se observa que el promedio cae justo en una zona límite entre formas esféricas y discos. Esta varianza de las longitudes de los granos, y los diámetros de las elipses indican una variedad de tamaños de granos, debido al uso de mallas 60 y 200 para la separación de los minerales.

El primer cuantil para DS/DL y DI/DL (0.57, 0.87) y tercer cuantil (0.80,1) estos valores marcan dos zonas en la figura 4.4, una de discos y una de esferas. El valor de la forma (q) es de 0.70, esto muestra la redondez en los granos en la tabla 4.1 de las relaciones de Powers. Los valores del sesgo de DS/DL y q indican que se

puede aproximar estos parámetros por una distribución normal, por lo tanto estas propiedades tienen comportamiento similar para todos los granos.

Clasificación de formas

a) Según Sneed y Folk. (diagramas ternarios).

Posteriormente se obtuvieron los parámetros necesarios para hacer la clasificación de forma según Sneed y Folk. (1959). por medio de la representación gráfica en diagramas ternarios usando para ello un macro construido en excel llamado Ternplot. Se hicieron las clasificaciones muestras por muestra de cada quebrada y posteriormente se graficaron todos los datos por quebrada en diagramas separados y juntos para tratar de identificar alguna diferencia entre las dos quebradas. A continuación se muestran en los diferentes figuras (5.1 a 5.6) la clasificación para las muestras de Hoyos.

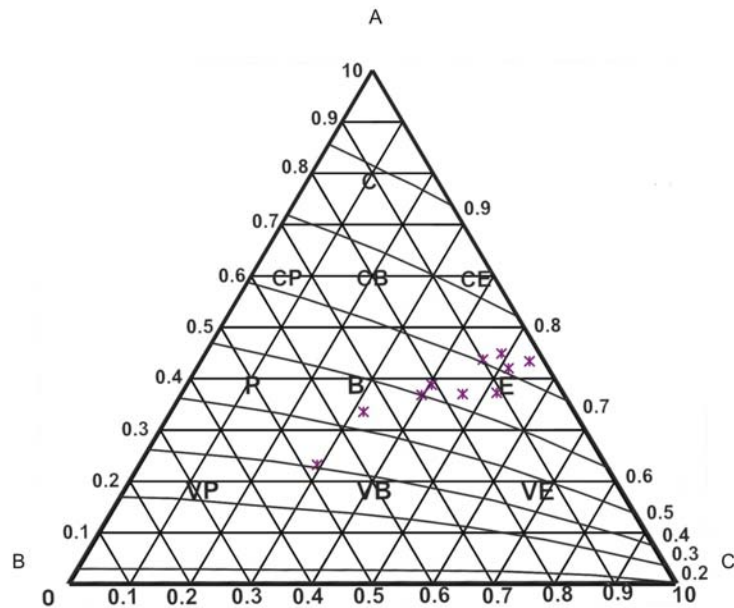


Figura 5.1. Diagrama ternario de la muestra H002

Según esta figura la muestra H002, está entre B y E, es decir, entre Blade (hoja) y elongado. Aunque no hay una alta concentración de puntos en estas formas, es decir hay una tendencia pero están un poco separadas.

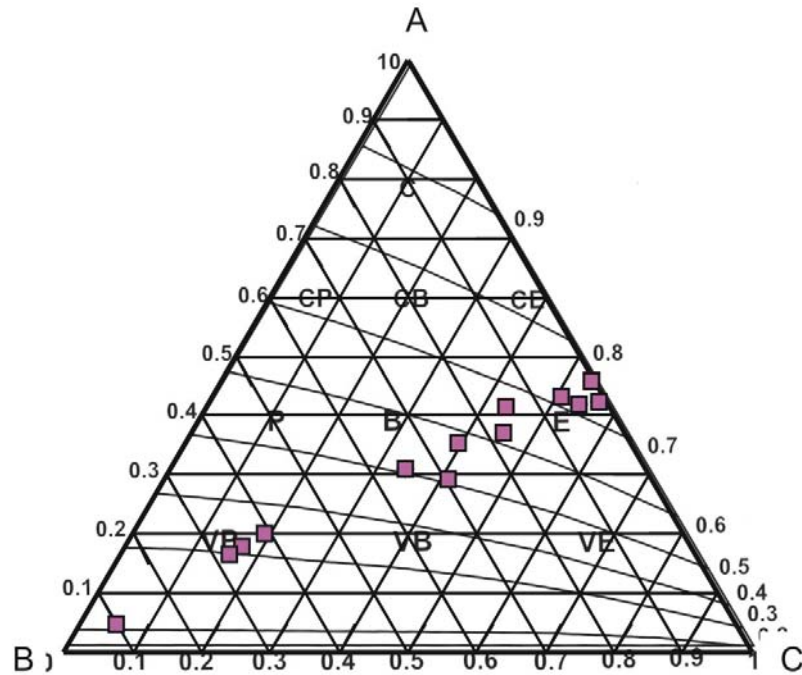


Figura 5.2. Diagrama ternario de la muestra H005

En contraste, la Figura 5.2 para la muestra H005, muestra cuatro tipos de forma, en poca proporción representada por un grano aparece la forma muy aplanada, luego una transición entre VB-B y alargada.

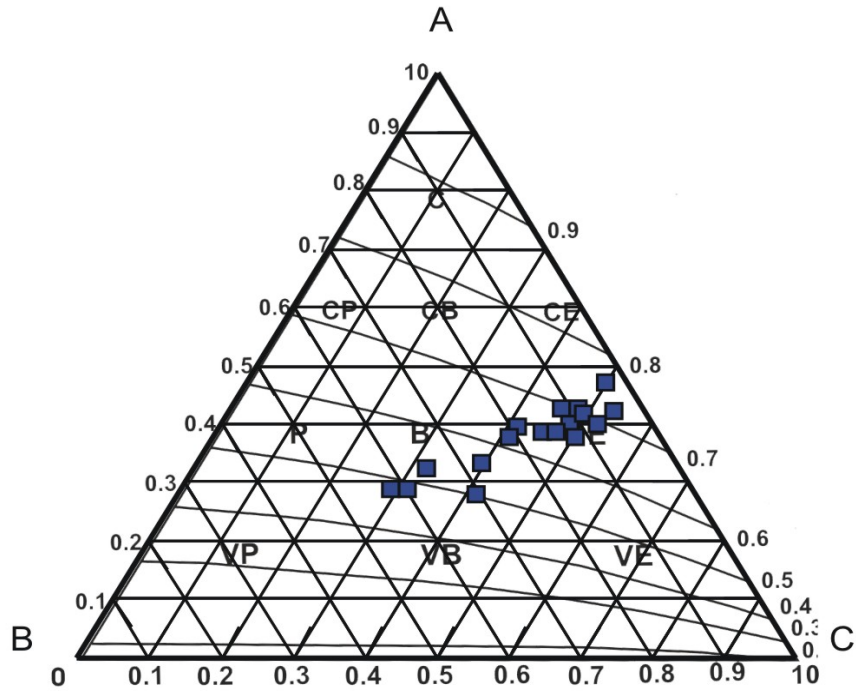


Figura 5.3. Diagrama ternario de la muestra H007

En la figura 5.3, la muestra H007 proporciona los dos tipos de forma similares a la muestra H002. En esta muestra aumenta la cercanía entre los puntos en la forma alargada.

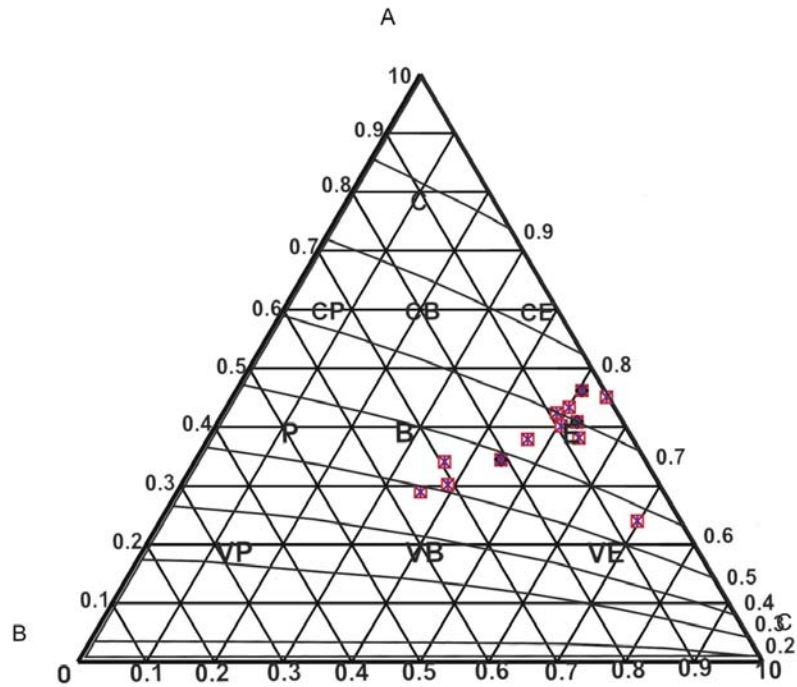


Figura 5.4. Diagrama ternario de la muestra H009

La Figura 5.4, es muy similar a la figura 5.4, con la diferencia de que sólo hay un grano en muy alargado (VE).

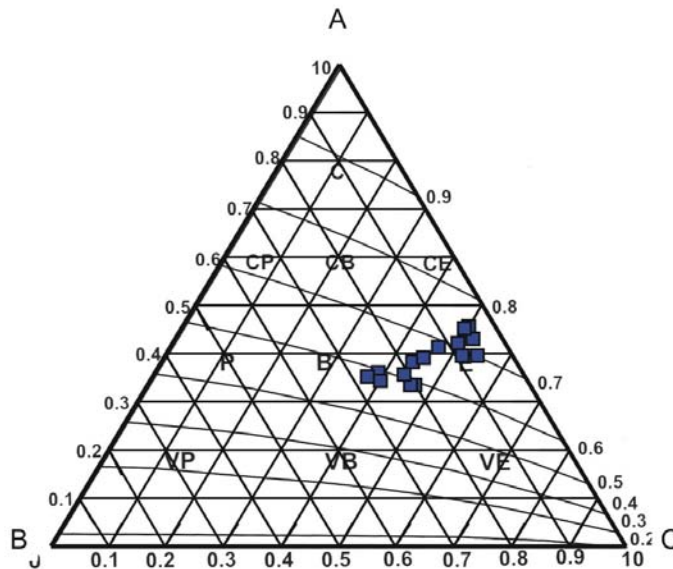


Figura 5.5. Diagrama ternario de la muestra H011

En la Figura 5.5, hay una disminución de la tendencia B, y una mayor concentración en la forma alargada (E).

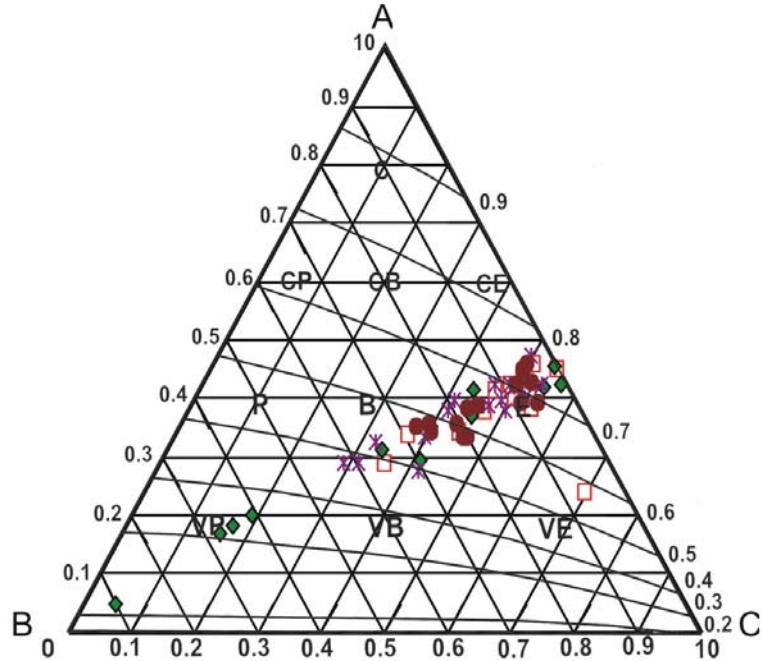


Figura 5.6. Diagrama ternario de todas las muestras de la quebrada Hoyos

La figura 5.6 resume el comportamiento de todas las muestras de la quebrada Hoyos, se puede observar que hay una clara tendencia desde VB (very blade) muy hojaldrado y B (blade) forma de hoja, hasta E (elongate) alargado, sólo la muestra H005 presenta granos en VP (very platy) muy aplanado. También se aprecia que a medida que nos acercamos a la base los granos se concentran más en la forma alargada, mientras que hacia el tope hay dos patrones de formas.

En las figuras 5.7 a 5.11 se aprecian las clasificaciones de forma para las muestras de la quebrada Vichú. En la Figura 5.7 se representa la muestra V037, la tendencia de forma desde B hasta E con una mayor dispersión en esta parte que se desvía un poco hacia la zona de compacidad.

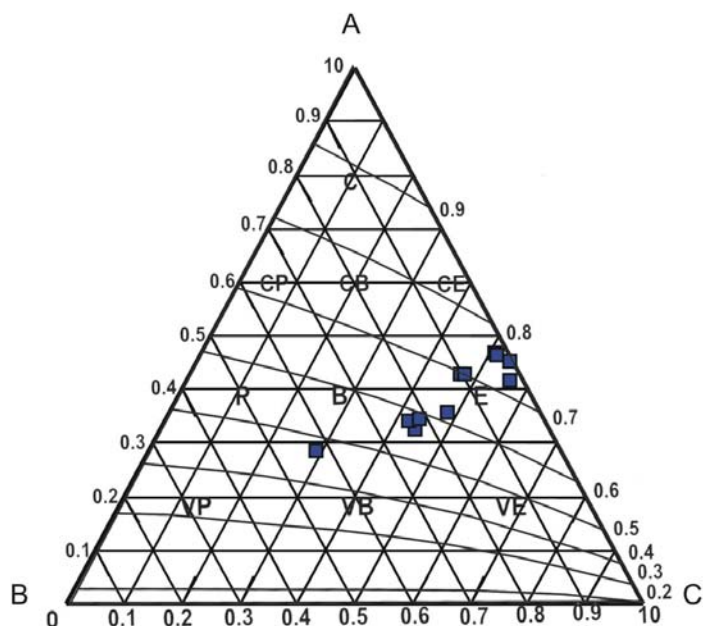


Figura 5.7. Diagrama ternario de la muestra V037

Esta tendencia se mantiene en la Figura 5.8, para la muestra V091, donde la tendencia es en una zona intermedia entre B y E, hacia lo compacto. La Figura 5.9, es similar a las anteriores, dando indicio de un grano aplanado.

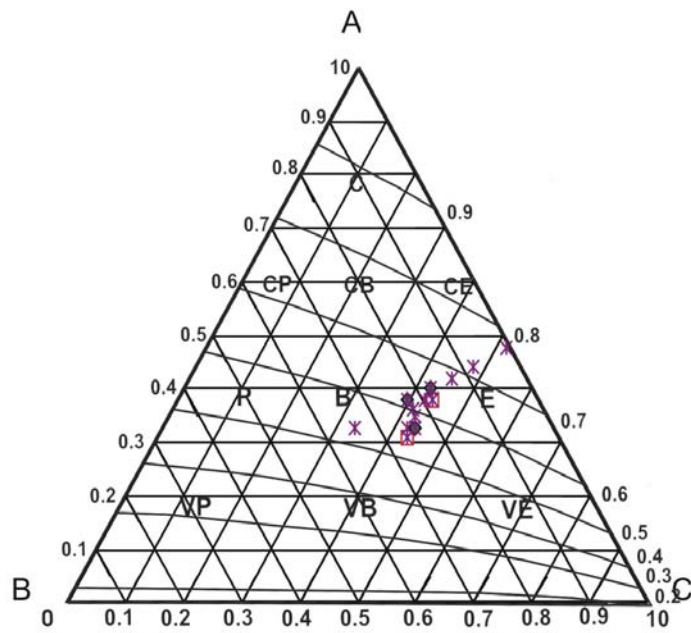


Figura 5.8. Diagrama ternario de la muestra V091

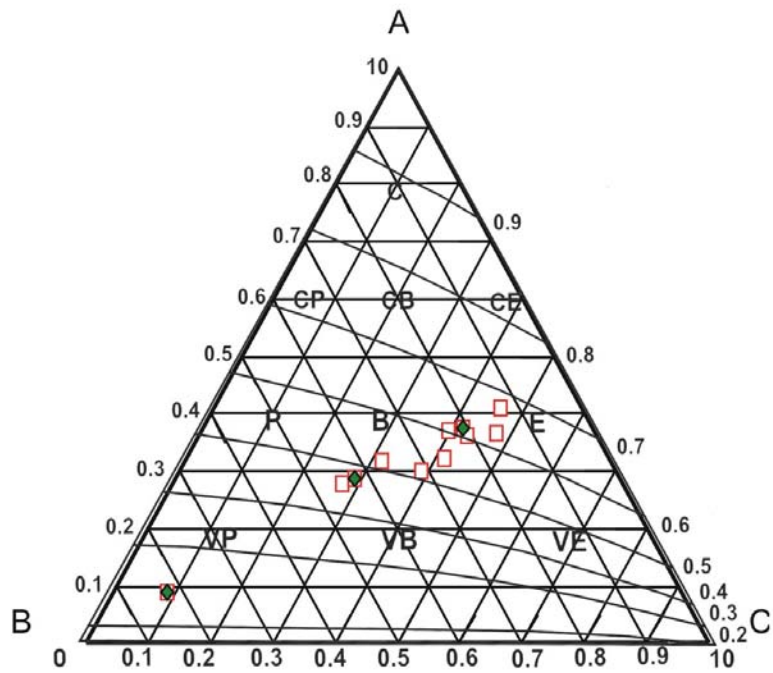


Figura 5.9. Diagrama ternario de la muestra V095

En la figura 5.10 se mantiene la tendencia de todas las figuras anteriores, con la diferencia de una observación que queda entre VP y VB.

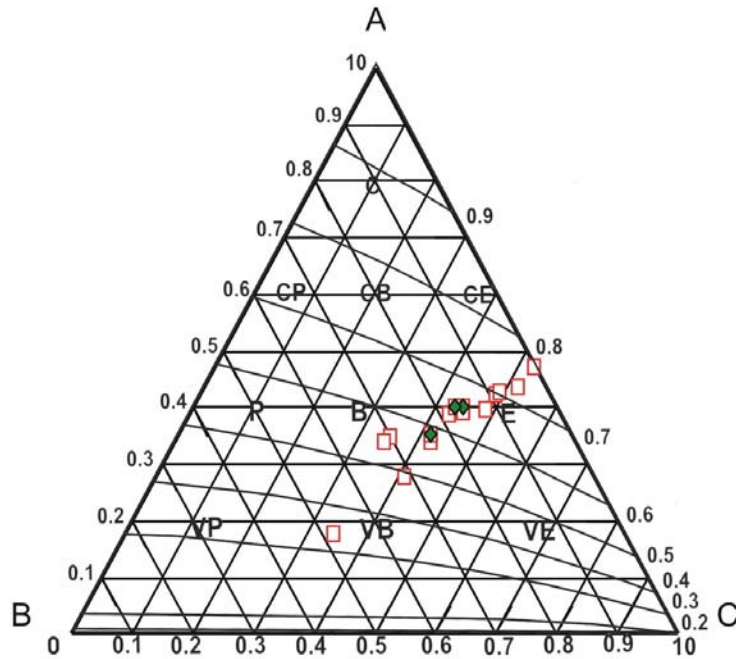


Figura 5.10. Diagrama ternario de la muestra V101

Al representar todas las muestras de Vichú en un solo diagrama en la Figura 5.11 se aprecia una tendencia desde VB (very blade) muy hojaldrado y B (blade) forma de hoja hasta por arriba de E (elongate) alargado y CE (compact elongate) alargado compacto. Sólo se observa un grano por debajo de VP (very plate) muy aplanado y otro muy cerca de VB (very blade) pertenecientes a las muestras V095 y V101 respectivamente. Comparando esta gráfica con la de Hoyos, se observa que a medida que nos movemos hacia el tope de la quebrada Vichú el comportamiento es similar al tope de Hoyos, con un grado mayor de compactación, producto tal vez del peso de la secuencia sedimentaria.

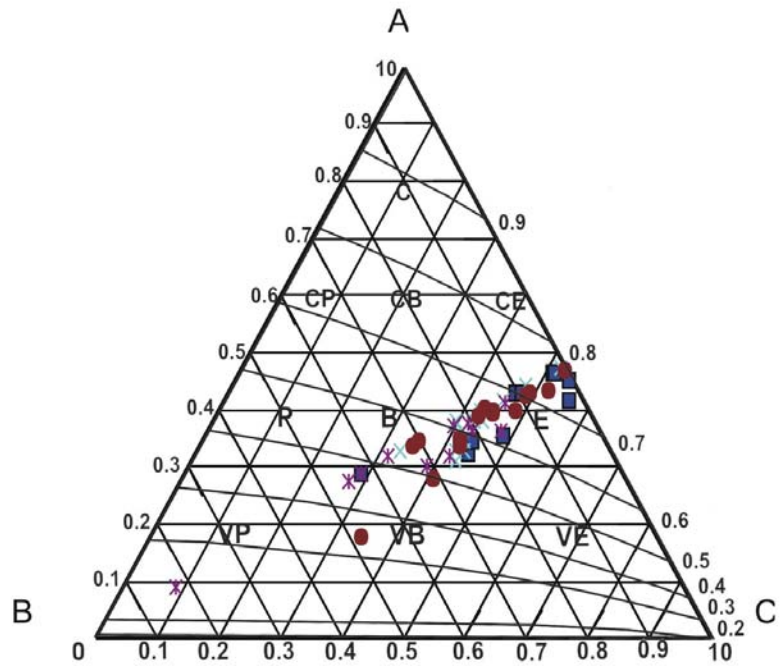


Figura 5.11. Diagrama ternario de todas las muestras de la quebrada Vichú

b) *Clasificación según Zingg*

De acuerdo a lo tratado en el capítulo IV, es posible representar gráficamente los resultados según la figura 4.4, donde se utilizan los índices de formas y las relaciones matemáticas de esfericidad. Así en la Figura 5.12 se observan los resultados para las muestras de la quebrada Hoyos. En esta figura se aprecia que hay dos zonas de formas principales una esférica en el cuadrante superior derecho, y otra de disco en el cuadrante superior izquierdo.

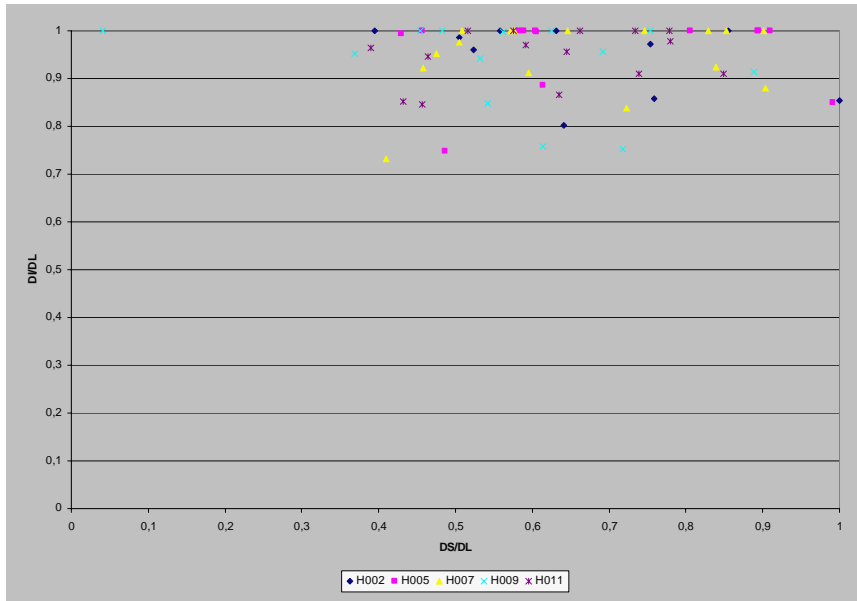


Figura 5.12. Relación entre esfericidad matemática e índices de forma para las muestras de la quebrada Hoyos

La Figura 5.13, es idéntica a la figura anterior, con la diferencia de que se seleccionó el rango de datos entre 0.7 a 1 para el cociente DS/DL y se le hizo un análisis de regresión lineal para detectar si había algún tipo de tendencia dentro de esta muestra, la recta ajustada es casi una constante, nótese la alta dispersión de los datos y el poco “ajuste” de la recta, con un error cuadrático de $3 \cdot 10^{-5}$, es una regresión negativa, lo cual evidencia un poco el comportamiento caótico entre los índices de forma y la esfericidad matemática.

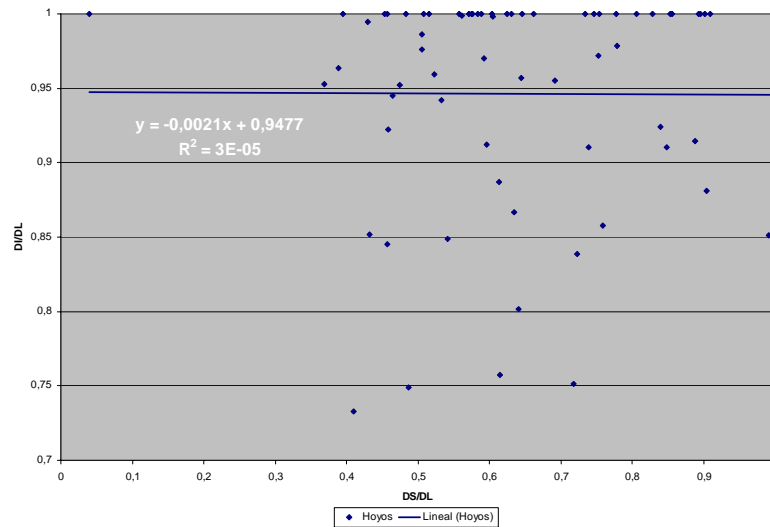


Figura 5.13: Ajuste de los datos de índices de forma de las muestras de la quebrada Hoyos por regresión lineal

Análogamente, se hicieron estos análisis a las muestras de la quebrada Vichú en la Figura 5.14, donde si se aprecia una regresión fuertemente lineal con un error cuadrático de 0.8323 entre los índices de forma, esto indica que en estas muestras hay una relación entre DS/DL y DI/DL que indica que un orden específico con respecto a la esfericidad. Igualmente, hay dos sectores según la Figura 4.4 de Zingg, un sector de discos en el cuadrante superior izquierdo y otro sector de esferas en el cuadrante superior derecho.

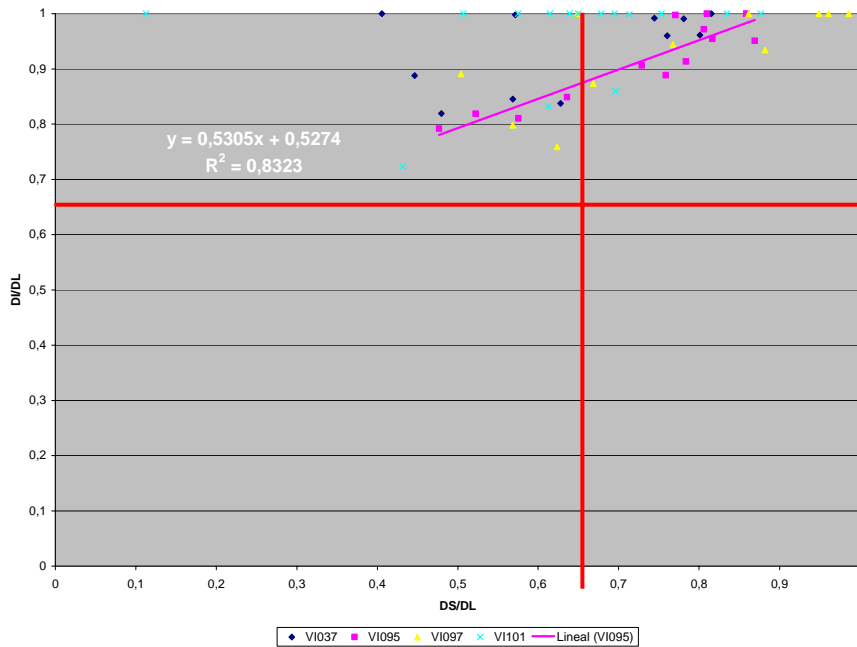


Figura 5.14. Relación entre esfericidad matemática e índices de forma para las muestras de la quebrada Vichú

La Figura 5.15 es similar a la figura 5.14, con la diferencia de que se seleccionó el rango de datos entre 0.7 a 1 para el cociente DS/DL y se le hizo un análisis de regresión lineal para detectar la tendencia observada en la figura anterior, al hacer una regresión más general igualmente se consigue un ajuste lineal, pero con un error cuadrático mucho más bajo producto de la influencia de las muestras con valores de DS/DL cercanos a 1, es decir de las muestras más esféricas.

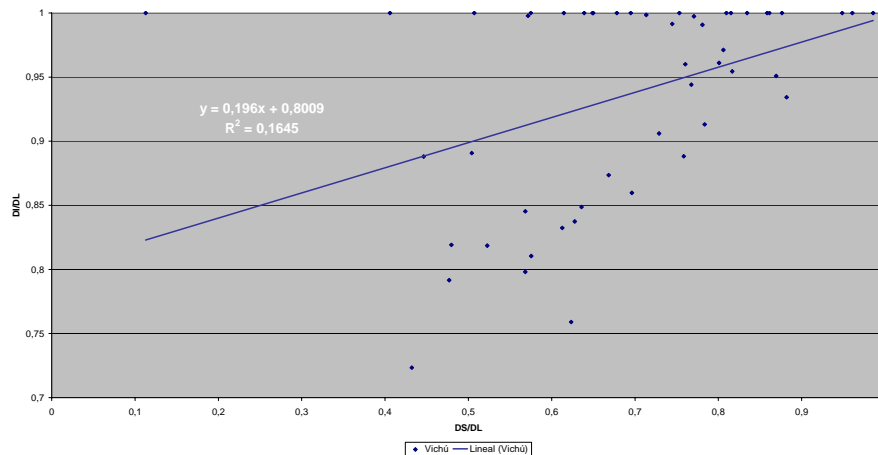


Figura 5.15: Ajuste de los datos de índices de forma de las muestras de la quebrada Vichú por regresión lineal

En la Figura 5.16 se resume el comportamiento de las muestras de ambas quebradas junto con los ajustes de regresión logarítmico para el caso de las muestras de Hoyos y lineal para el caso de Vichú. En esta gráfica se observa que hay una similitud entre las formas de Hoyos y Vichú, lo cual evidencia que posiblemente provengan de las mismas fuentes o muy cercanas entre sí.

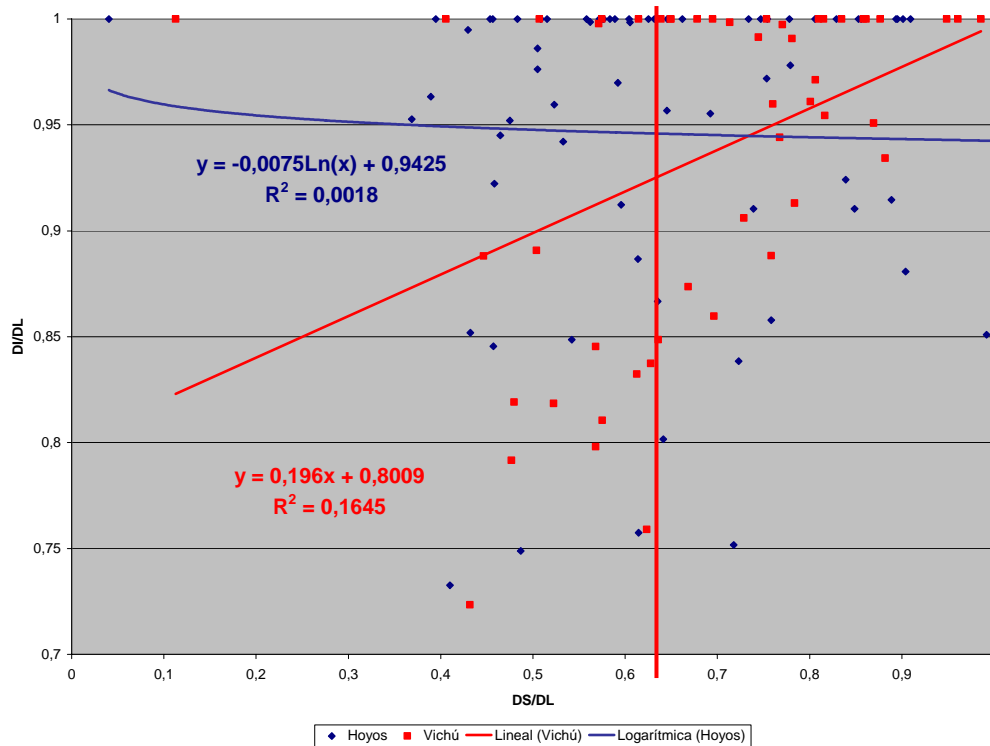
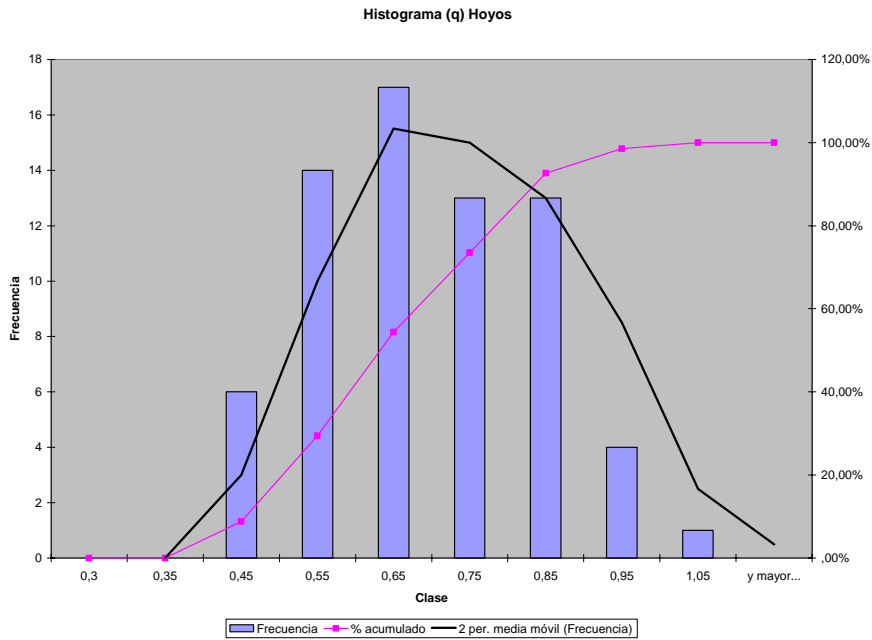


Figura 5.16: Ajuste de los datos de índices de forma y esfericidad matemáticas para las muestras de las quebradas Los Hoyos y Vichú con sus respectivos ajustes.

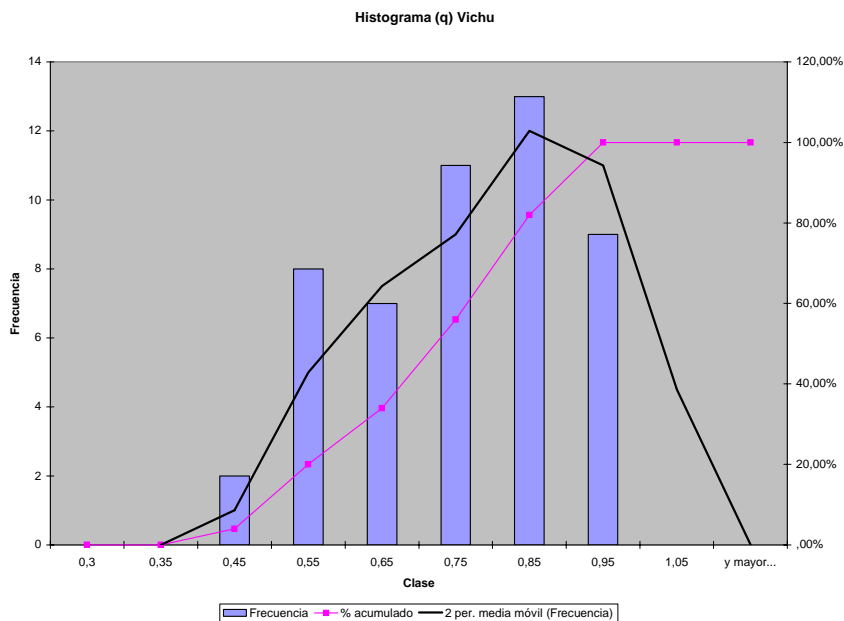
Otros análisis estadísticos

En la Figura 5.17, se muestran los histograma de forma (q), frecuencia acumulada y polígono de frecuencia por media móvil para: (A) muestras de la quebrada Los Hoyos, (B) muestras de la quebrada Vichú respectivamente el máximo del histograma A se alcanza para un valor de $q=0.65$ siendo el que tiene mayor frecuencia, este valor indica un grado medio en la redondez de las muestras de la quebrada Los Hoyos. Mientras que en a quebrada Vichú el máximo se alcanza en $q=0.85$ lo cual indica un mayor grado de redondez y que posiblemente la fuente esté

mas lejana que en Hoyos con respecto a la curva de frecuencia acumulada se puede decir que para Hoyos la mayor concentración de frecuencia está en el intervalo [0.35,0.85] y para Vichú el mayor porcentaje está en [0.45, 0.95].



(A)



(B)

Figura 5.17. Histograma de forma (q), frecuencia acumulada y polígono de frecuencia por media móvil para: (A) Muestras de Hoyos, (B) Muestras de Vichú.

En la figura 5.18 se muestran las relaciones entre los diámetros de los ejes mayores y menores de las elipses con sus respectivos ajustes lineales para los granos de las muestras de Hoyos y Vichú. Básicamente se presentan las mismas tendencias, los errores cuadráticos son similares 0.67 y 0.60 respectivamente lo cual indica que la distancia recorrida para la depositación de los granos es muy parecida.

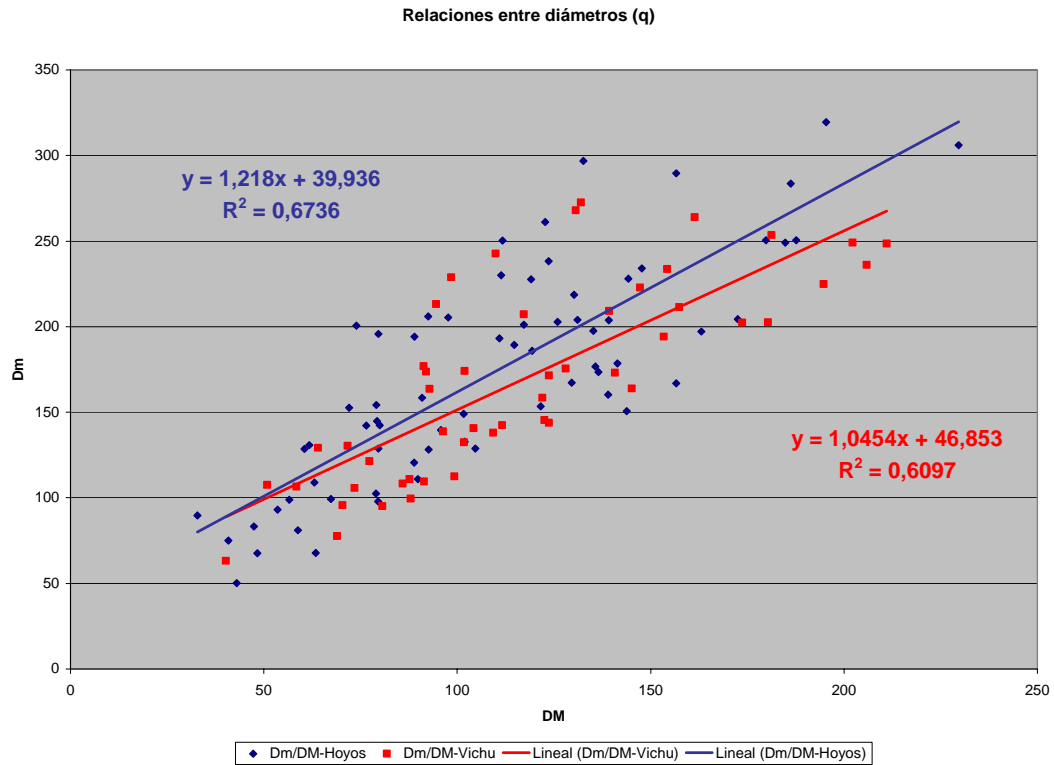


Figura 5.18 relaciones entre diámetros mayores y menores de las elipses para los granos de Hoyos y Vichú.

En la figura 5.19 se ilustran los análisis de cluster o dendogramas para las formas de los granos de las muestras de Vichú y Hoyos, este método estadístico agrupa los granos con características similares de forma utilizando la técnica del entorno más cercano con una métrica euclídea, nótese que hay una mayor separación en las distancias de las características de forma similar en los granos de Hoyos, que varía entre 0 y 0.24, mientras que para Vichú la distancia entre subgrupos es menor, lo cual indica que a pesar de que hay una mayor cantidad de grupos con características similares todas sus formas están muy cercanas entre si. Los parámetros

para la construcción de estos dendogramas son mostrados en la tabla 5.3. Los centroides están muy cercanos entre si, significando esto que las formas son similares en las dos muestras, aunque es mayor en las muestras de Vichú.

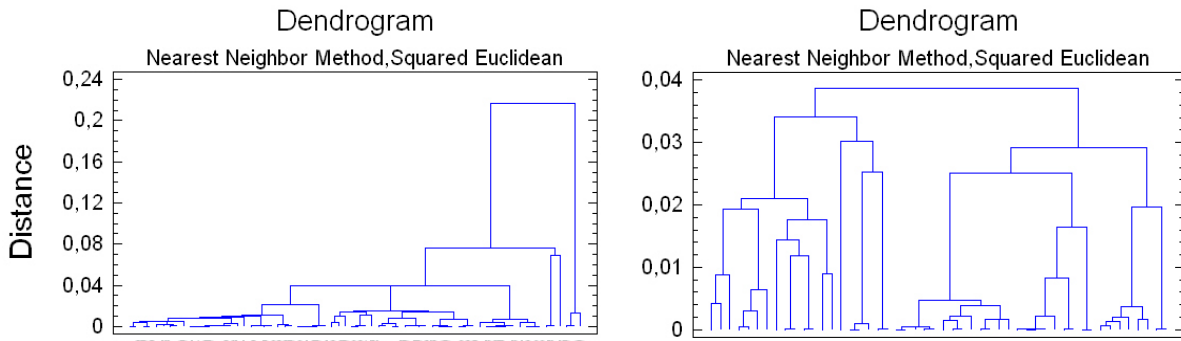


Figura 5.19. Dendogramas o análisis de cluster para detectar poblaciones de forma en (A) Hoyos y (B) Vichú.

Tabla 5.3: Parámetros del análisis de cluster o construcción de dendogramas

Parámetros	qHoyos	qVichú
Número de casos:	68	50
Método de Cluster:	Entorno cercano	Entorno cercano
Métrica usada:	Distancia euclidea	Distancia euclidea
Centroide:	0,643173	0,703131

El dendograma para las muestras pertenecientes a las dos quebradas se aprecia en la figura 5.20 en donde hay dos ramas principales, la rama derecha que está menos discriminada representa la quebrada Vichú, mientras que la rama izquierda, que está más subdividida representa a la quebrada Hoyos.

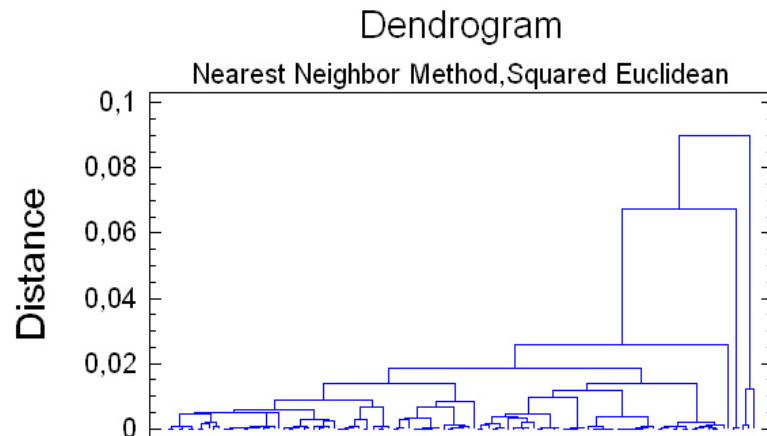


Figura 5.20. Dendrograma o análisis de cluster para detectar poblaciones de forma en las dos quebradas.

Análisis termal mediante longitudes de huellas de fisión espontáneas

Al concluir los análisis de partículas de granos, para poder correlacionar e identificar los posibles terrenos fuentes entre las dos quebradas fue necesario realizar un análisis detallado de longitudes de huellas de fisión espontáneas, la cantidad de granos estudiados y el número de huellas por muestra a las que se le realizaron los análisis están resumidos en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Muestras estudiadas para análisis de longitudes de huellas de fisión espontáneas.

Muestra	# de Granos	# de Huellas
H002	8	80
H005	8	43
H007	8	72
H009	8	77
H011	8	34
VI037	2	6
VI091	8	80
VI095	3	26
VII01	7	80
TOTAL	60	498

Análisis de longitudes de huellas para la quebrada Los Hoyos

En la Figura 5.21 se observan las longitudes de huellas (en micras) en el eje y, y en el eje x, el número de huellas estudiadas por muestra. En esta gráfica se observa a priori tres tendencias de longitudes, una entre 9 y 10 micras, otra entre 12 y 14 micras, mayores a 16 micrómetros. Para aclarar bien estas tendencias es necesario, realizar histogramas con curvas de densidades para cada muestra y separar éstas densidades con un 95% de confianza.

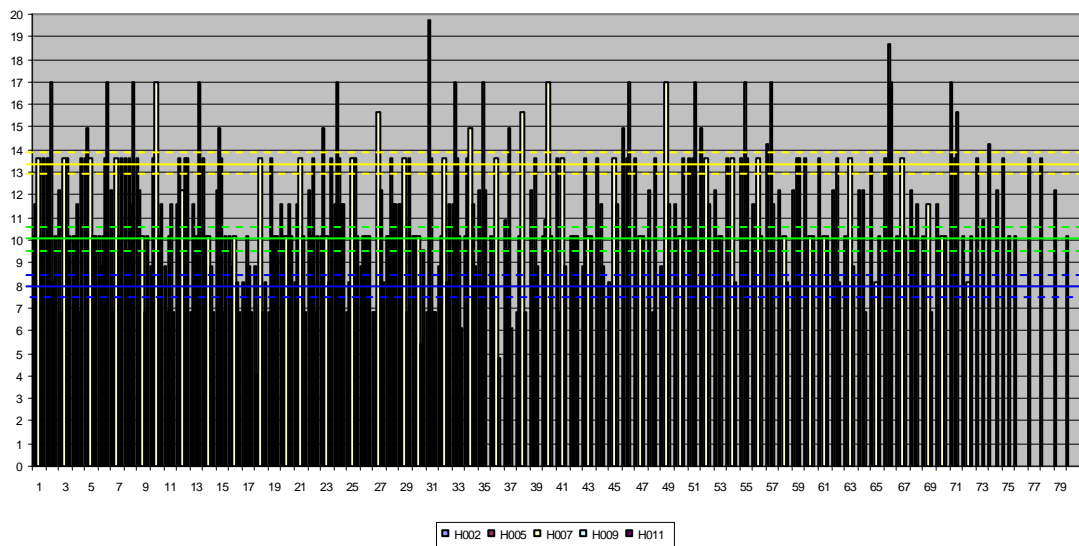


Figura 5.21: Longitudes de huellas de fisión espontánea para las muestras de Hoyos.

En la figura 5.22, se observan los histogramas con curvas de densidad de probabilidad Gaussiana, el eje y representan valores de probabilidad, para cada una de las muestras de la quebrada Hoyos, para la H002, se reconocen 4 máximos, uno en 7, 10, 12 y 14 respectivamente. Para la H005 se reconoce uno en 10 micrómetros y un posible pico en 12 micrómetros, para la H007 se identifican 3 picos en 10, 14 y 17, para la H009, 3 picos 7, 10, y 17 y un posible pico en 12. Para la muestra H011 se reconocen igualmente 4 máximos en 7, 10, 13.5 y 17.

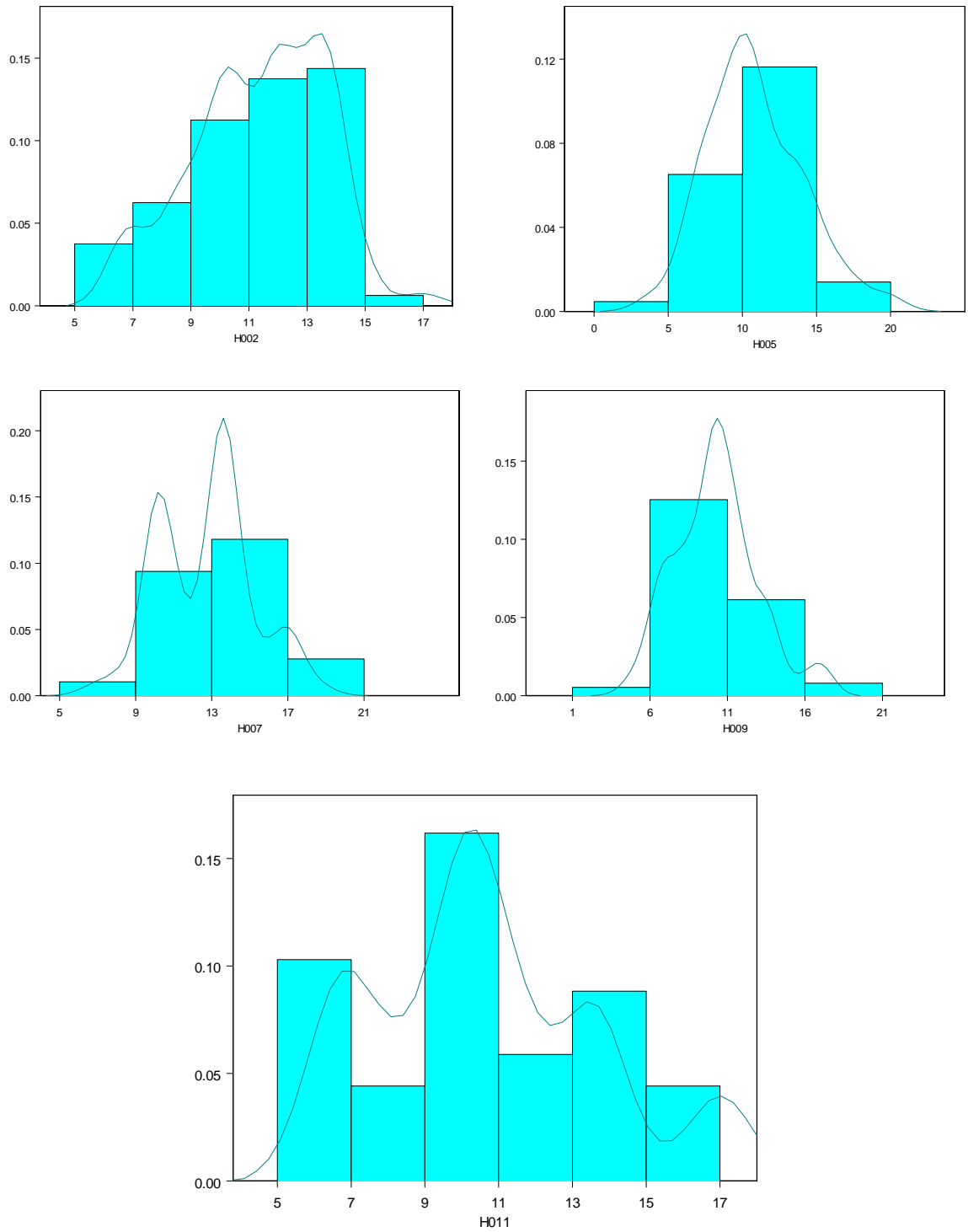


Figura 5.22: Histogramas con curvas de densidad de probabilidad de longitudes de huellas espontáneas para las muestras individuales de Hoyos.

Para identificar globalmente las diferentes poblaciones de longitudes de huellas se graficaron todas las muestras de Hoyos en un solo histograma con su respectiva función de densidad de probabilidad, lo cual se aprecia en la Figura 5.23 y se identificaron por métodos de separación de densidades (Brandon, 1998) 4 poblaciones, lo cual posiblemente equivalga a 4 episodios termales o fuentes para estas muestras, en 7, 10, 12 y 17.

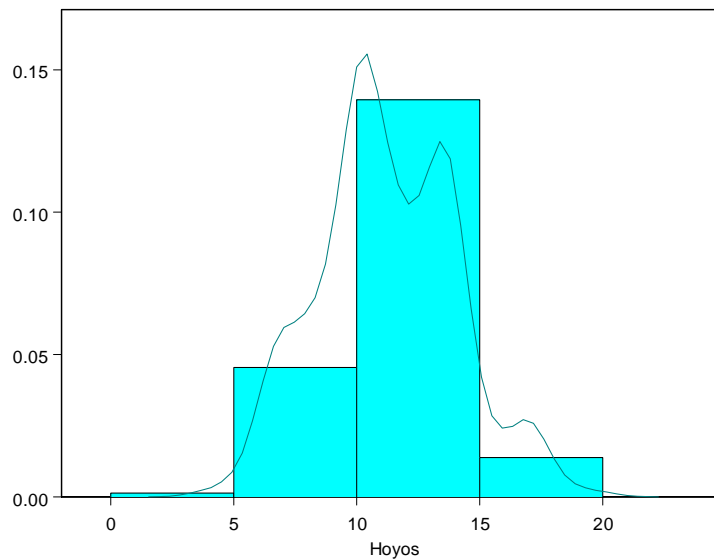


Figura 5.23: Histograma con curvas de densidad de probabilidad de longitudes de huellas espontáneas para todas las muestras de Hoyos.

Análisis de longitudes de huellas para la quebrada Vichú

En la Figura 5.24 se observan las longitudes de huellas (en micras) en el eje y, y en el eje x, el número de huellas estudiadas por muestra. En esta gráfica se observa a priori tres tendencias de longitudes, una entre 9 y 10 micras, otra entre 12 y 14 micras, y la última a 17 micrómetros. Para aclarar bien estas tendencias es necesario, se hicieron histogramas con curvas de densidades para cada muestra similares a las de Hoyos. En esta figura las líneas horizontales sólidas corresponden a las medias de las poblaciones separadas a priori, y las líneas horizontales punteadas corresponden a sus límites de confiabilidad.

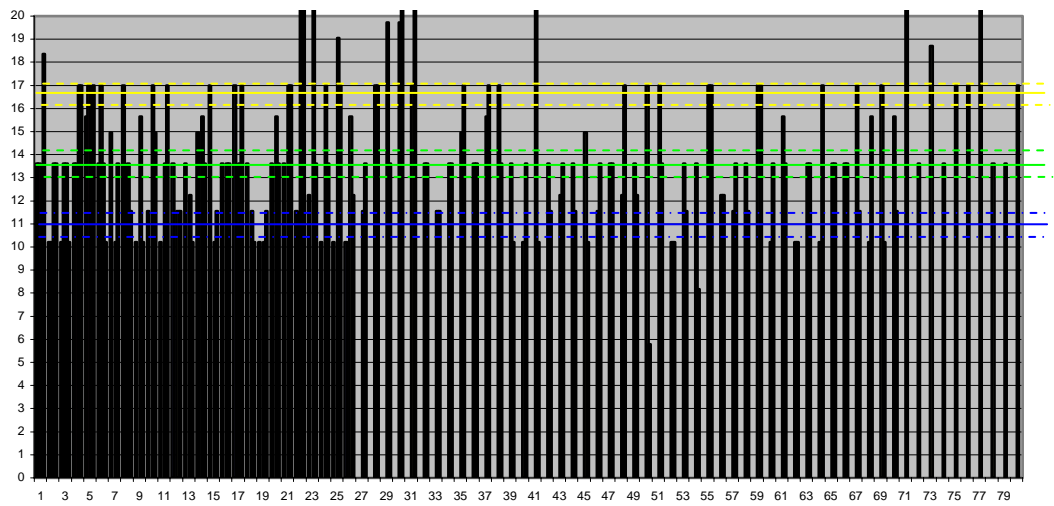


Figura 5.24: Longitudes de huellas de fisión espontáneas para las muestras de Vichú.

En la figura 5.25, se observan los histogramas con curvas de densidad de probabilidad Gaussiana, el eje y representan valores de probabilidad, para cada una de las muestras de la quebrada Vichú, para la muestra V037, se reconocen 4 máximos, uno en 10.5, 13.5, 17 y 20 respectivamente. Para la V091 se reconoce 3 máximos 10,13.5 y 17 micrómetros, para la V095 se identifican 3 picos en 10, 13.5 y 17, para la V101, 2 picos 12, y 17 y un posible pico en 10.

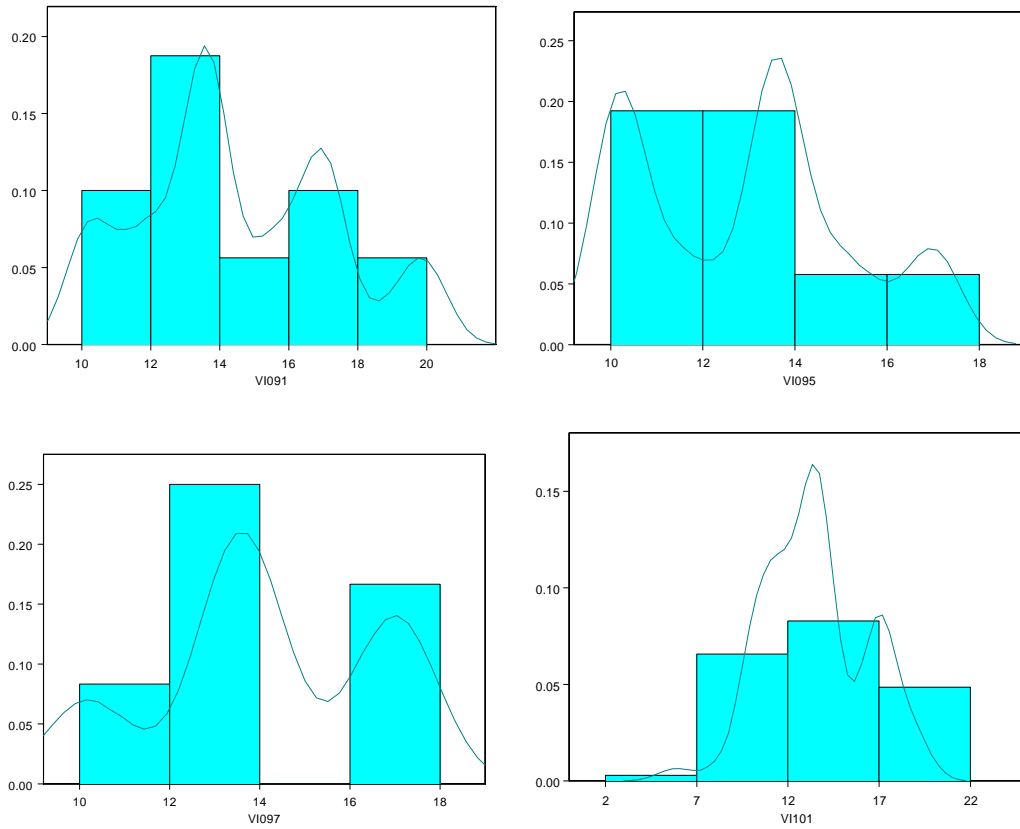


Figura 5.25: Histogramas con curvas de densidad de probabilidad de longitudes de huellas espontáneas para las muestras individuales de Vichú.

Con la finalidad de validar estas últimas observaciones se hizo un grafico de densidades de probabilidad sobre el histograma de las 4 muestras de Vichú y se realizó un análisis de estimación de densidades reconociéndose 4 posibles fuentes o patrones termales uno en 10, 13, 17 y 20. El de 17 y 20 puede ser considerado como uno sólo con 95% de confianza.

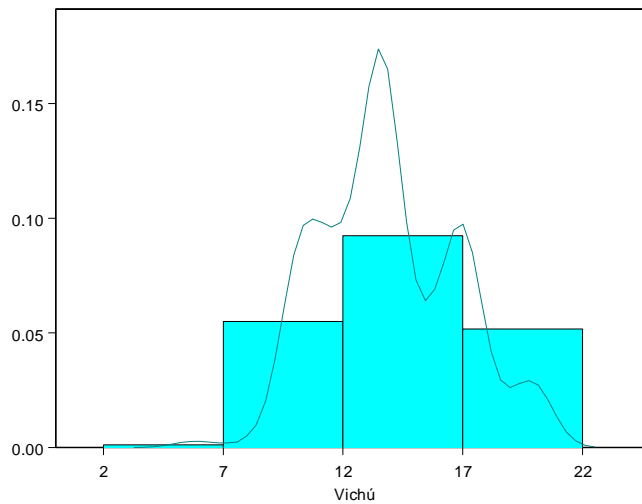


Figura 5.26: Histograma con curvas de densidad de probabilidad de longitudes de huellas espontáneas para todas las muestras de Vichú.

Correlacionando los resultados de análisis de longitudes de huellas de fisión espontáneas para las quebradas Hoyos y Vichú, se observa que se identifican 3 terrenos fuentes o episodios tectotermiales comunes, en 10, 13 y 17 micrones, el de 7 micrones que aparece en la quebrada Los Hoyos no se encuentra en la quebrada Vichú, el patrón de 17 micrones de longitud de huellas indica que hubo un evento más o menos rápido que hizo que todas las huellas mantuvieran su longitud, mientras que los de 13 y 10 micrones indican una mayor tasa de desvanecimiento por lo cual el terreno pasó mucho más tiempo por debajo de la isoterma de 110°C, mientras que el de 7 micrones indica un mayor desvanecimiento de huellas y un mayor tiempo en la zona de desvanecimiento parcial o PAZ. Relacionando, esto con los análisis de partículas, se puede interpretar que en la quebrada Los Hoyos hay una mayor variedad de eventos tectotérmicos y de formas granulométricas, mientras que en la quebrada Vichú los granos están más redondeados, evidenciando esto una mayor distancia entre la fuente y el sitio de depositación. Estos tres terrenos están asociados al Miembro Vichú. Posiblemente el terreno fuente que no aparece en Vichú, sea del Miembro Sanalejos, ya que los granos se encuentran menos redondeados y vienen de una mayor profundidad.

CONCLUSIONES

La Formación Betijoque está compuesta por dos miembros: el Miembro Vichú y el miembro Sanalejos. El primer miembro, Sanalejos, está constituido por conglomerados de grandes espesores que alcanzan los 12 metros, areniscas las cuales en su mayoría son areniscas conglomeráticas de grano medio a grueso y lutitas que se presentan en forma de cuñas y lentes. A medida que caminamos hacia la base los conglomerados disminuyen y aumentan las capas de areniscas y lutitas. El segundo miembro, Vichú, se caracteriza por lutitas y areniscas de grandes espesores de color meteorizado gris verdoso y color fresco gris, disminuyendo el tamaño de grano con respecto al Miembro Sanalejos

Con respecto a la petrografía en estas formaciones no se puede definir un tipo de roca debido a que el sedimento es muy friable y es difícil realizar una sección fina confiable.

La cuenca de sedimentación a la cual pertenecen los miembros de la Formación Betijoque presenta más de una fuente de sedimentos de acuerdo a los análisis de partículas. Una de estas características es la forma esferoide la cual define una distancia mucho mayor que la forma de disco. La forma esferoide implica un mayor retrabajo del grano antes de su depositación y la forma de disco nos muestra retrabajo y compactación de la columna de sedimentaria.

Las dos características anteriores nos definen dos terrenos fuentes, posiblemente de algún granito de los Andes, fechados en el trabajo Kohn y Shagam (1984) o por Mora (1995), como los de la Soledad, Monte Carmelo u otros, con cuatro episodios termales cuya información se origina por el estudio de las longitudes de huellas de fisión espontánea halladas en las muestras de sedimentos de la Formación Betijoque. De estos episodios tres son coincidentes en las quebradas Vichú y Hoyos, pertenecientes al Miembro Sanalejos. El episodio no coincidente posiblemente pertenezca al Miembro Vichú o a otra formación, como la Formación Isnotú.

Las características del ambiente sedimentario de la Formación Betijoque nos indica que esta se depositó en la parte proximal de un abanico aluvial. El aumento de espesor progresivo de las capas de conglomerados y del tamaño de sus clastos hacia el tope de la secuencia está asociado con etapas avanzadas del levantamiento orogénico cuando la pendiente de los bordes de la cuenca es mayor. El material sinsedimentario proveniente de capas mas antiguas de la secuencia depositadas en capas mas jóvenes, indica el proceso de retrabajo de la cuenca originado a medida que los bordes de la misma son elevados como parte del levantamiento de la cordillera, dando lugar a las numerosas pulsaciones indicadas según los intervalos de clastos gruesos.

Para investigaciones a futuro, se recomienda hacer un estudio completo de toda la formación y terminar de fechar las rocas. Por ultimo con la información obtenida utilizar un programa de análisis de cuenca sedimentarias para unir episodios tectotermicos con edades provenientes del método de huellas de fisión.

REFERENCIAS

Alvarez, K. (1996). *Caracterización genética de las propiedades de porosidad y permeabilidad, en Facies Fluvio-Deltaicas, Estado Trujillo y Táchira*. Tesis de Grado. UCV.

Audemard (1999) *Seismicity, neotectonics and stress field of northern Venezuela*. Funvisis. Earthquake, tectonics, stress field.

Banks, P. (1984) *Mesozoic Pleistocene fission track Ages and Rocks of the Venezuelan Andes and their tectonic implications Geological Society of America, Memoria*, 162 p. 365-384.

Berg, E.; Bense, V. and Schlager, W. (2002) *Assessing Textural Variation in Cemented Sands Using Digital Image Analysis of thin Sections*. Email: berg@geo.vu.nl.

Bermúdez, M. Alson, P. y Mora, J. (2003) *Ecuación fundamental de la Edad para datación de material rocoso y su adaptación a la Ecuación Práctica para el Método de Huellas de Fisión*. Artículo enviado a la Revista de la Facultad de Ingeniería. Universidad central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 7p.

Berry, E. W., 1921. *Tertiary fossil plants from Venezuela*. *U.S. Nat. Mus., Proc.*, 59(2388): 553-579

Bigazzi (1967) *Length of fission tracks and age of muscovite samples* *Earth Planet. Sci. Lett*3, 434-8p

Boggs, S. (1987). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. University of Oregon. U.S.A. 774p

Boggs, S. (1995) *Principles of sedimentology and Stratigraphy*, 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River. 465p

Bona, R. (2004). *Caracterización de apatitos pertenecientes a la toba del Fish Canyon*, montañas San Juan de Colorado, USA. Estándar internacional de fechado por huellas de fisión. Tesis de Grado. UCV, 143p

Calzadilla, M (1978) *Radiometría*. Ministerio de Educación. Editorial Pueblo y Educación. Playa, Ciudad de La Habana, Cuba. 130p.

Campos, V. Ramirez, C. (1973) *Geología del estado Trujillo*. Congreso Latinoamericano de Geología. 301-305p.

Cashman, K.V. and Marsh, B.D. (1988) *Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallisation II*. Makaopuhi lava lake. Contributions to Mineralogy and Petrology, 99, 292–305p

Coronado Y. y Rey, J. (2003) *Aplicación del Método de Huellas de Fisión Basados en la técnica del Detector Externo en Apatitos Detríticos de las Areniscas Pertenecientes a las Formaciones Trujillo y Misoa aflorantes en las Quebrada Albarico al NO del Edo. Lara*. Escuela de Geología, Minas y GEOFÍSICA, UCV, Trabajo Especial de Grado, Inédito.

Denison, C. and Carlson, W.D. (1997) *Three-dimensional quantitative textural analysis of metamorphic rocks using high-resolution computed X-ray tomography; Part II, Application to natural samples*. Journal of Metamorphic Geology, 15, 45–57p.

Fleischer y Prices (1964) *Fission Track age and trach-annealing behaviour of some micas*. Science 143, p 349-51

Folk, R. (1969). *Petrología de las rocas sedimentarias*. Instituto de Geología de la U.N.A.N., México D-F., México. 405p

- (1974) *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill, Austir,. Tex., 182p
- (1970) Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. *New Zealand jour. Geol, and Gephysics*,. V13, 937-968p.
- Howard, V. and Reed, M.G. (1998) *Unbiased stereology: three-dimensional measurement in microscopy*. xvii, 246 p. Bios Scientific Publishers/Springer, Oxford
- Hutchison, C.S. (1974) *Laboratory handbook of petrographic techniques*. 527 p. Wiley, New York.
- Hutchison (1974) *Atlas of sedimentary rocks Ander the microscope*. New York, vol33. article4 p115-129
- García, R. Campos, C. (1973) *Evolución tectónica e historia geológica de la región de Valera – Escuque, Estado Trujillo y Zulia*. Congreso Latinoamericano de Geología. 1825-1836p.
- Gonzáles de Juana, C. Y Picard, X. (1980) *Geología de Venezuela y de sus cuencas Petrolíferas*. Ediciones FONINVES. Caracas. Tomo I y II.
- Gonzalez De Juana, C (1968) *Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas*. Caracas, Foninves, Tomo I y II; 1031p.
- Green, P (1981). *A new look at staristics in fisión track dating Nucl. Track*. Vol. 5. N°.1/2. Great Britain 77-86pp
- Higgins, M.D. (1994) *Determination of crystal morphology and size from bulk Measurements on thin sections: numerical modelling*. *American Mineralogist*, 79 113–119.
- (1996) *Magma dynamics beneath Kameni volcano, Greece, as revealed by crystal size and shape measurements*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 70, 37–48.

———(1998) *Origin of anorthosite by textural coarsening: Quantitative measurements of a natural sequence of textural development*. *Journal of Petrology*, 39,1307–1325.

———(1998) *Origin of megacrysts in granitoids by textural coarsening: A Crystal*

———(1998) *Size Distribution (CSD) Study of Microcline in the Cathedral Peak Granodiorite, Sierra Nevada, California*. In C. Fernandez, and A. Castro, Eds. *Understanding*

———(1999) *Granites: Integrating Modern and Classical Techniques*. Special Publication 158, p. 207–219. Geological Society of London, London

———(2000) *Measurement of crystal size distributions*. *American Mineralogist*, Vol 85, 1105-1116p.

Khon, B.P., O'Sullivan, P. and Shagam, R. (1995) *Apatite fission track ages from the Venezuelan Andes and their tectonic significance*. *Geological Society of America Annual Meeting*. Geological Society of America Abstracts with Programs. New Orleans, November 1995, 27, 6 pp A229.

Khon and Shagan (1984) *Mesozoic Pleistoceno Fisión Track ayer on rock of the Venezuela Andes and Their Tectonic implications*. Geological Society of America Memor 162

Krumbein and Pettijohn (1968) *Manual of sedimentary y petrography*. New York, Appleton-Century-Crofts, 549p

Krumbein & Graybill, (1965). *An Introduction To Statistical Models in Geology*. International Series in the Earth Sciences. U.S.A. 475p.

Krumbein, W. (1938) *Manual of Sedimentary Petrography*. The Century Earth Science Series. U.S.A. 549p

Krumbein, and Sloss. (1963). *Stratigraphy and Sedimentation*. A Geology Series. U.S.A. 660p

Lugo, J. (1991). *Cretaceous to Neogene Tectonic Control on Sedimentation: Maracaibo Basin, Venezuela*. Unpubl. PhD dissertation. The University of Texas at Austin, Texas, U.S.A. 218p.

Marsh, B.D. (1998) *On the interpretation of Crystal Size Distributions in magmatic systems*. Journal of Petrology, 39, 553–600.

Marsh, B. (1988) *Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization I. Theory*. Contributions to Mineralogy and Petrology, 99, 277–291.

Menéndez, C y Perez, Jaime (1992) *Modelo Estructural Del Franco Norandino Entre Las Poblaciones La Fría-Bocono-Sabana Grande-El Cobre, Edo. Trujillo*. Escuela de Geología, Minas Y geofísica, UCV, Trabajo Especial de Grado. Inedito.

Mora, J (1995) *Método de Huellas De Fisión como una herramienta útil para la datación de rocas en cuencas sedimentarias*. UCV. Informe LAGOVEN. 71p

Naeser (1980) *Fission Track dating of apatite and zircon: an inter-laboratory comparison*. Nucl Tracks s, p65-72

Peterson, T.D. (1996) *A refined technique for measuring crystal size distributions in thin section*. Contributions to Mineralogy and Petrology, 124, 395–405.

Price and Walker (1962) *Chemical etching of charged particle tracks in solids*, J.Appl. Phys 33, p407-12

Proussevitch, A.A. and Sahagian, D.L. (2000) *Recognition of discrete objects within complex 3D voxelized structures*. Computers and Geoscience, in press.

Rowe, T., Kappelman, J., Carlson, W.D., Ketcham, R.A., and Denison, C. (1997) *High-resolution computed tomography; a breakthrough technology for earth scientists*. *Geotimes*, 42(9), 23–27.

Royet, J.-P. (1991) *Stereology: A method for analysing images*. *Progress in Neurobiology*, 37, 433–474

Saltikov, S.A. (1967) *The determination of the size distribution of particles in an opaque material from a measurement of the size distributions of their sections*. In H. Elias, Ed. *Proceedings of the Second International Congress for Stereology*, p. 163–173. Springer-Verlag, Berlin

Sahagian, D.L. and Proussevitch, A.A. (1998) *3D particle size distributions from 2D observations; stereology for natural applications*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 84(3–4), 173–196.

Saltikov, S.A. (1967) *The determination of the size distribution of particles in an opaque material from a measurement of the size distributions of their sections*. In H. Elias, Ed. *Proceedings of the Second International Congress for Stereology*, Springer-Verlag, Berlin 163–173p

Sneed, and. Folk, (1958). *Pebbles in the lower Colorado River, Texas a study in particle morphogenesis*. *Jour, Geology*. V66. 114-150p

Sunagawa, I. (1987) *Morphology of crystals*. Reidel, Dordrecht, The Netherlands 743 p

Sutton, F. A., 1946. *Geology of Maracaibo basin, Venezuela*, *Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull.*, 30(10): 1621-1741

Schwartz y Shane (1969) *Measurement of particles shape by fourier análisis*:
Sedimentology, v13, p213-231

Taheri () Geometría y textura de los litosomas aflorantes de la formación Betijoque
aflorante en la región de Valera. III Simposio Interfilial de geología, Petrofísica y
Sísmica de Producción

Vargas, Yoris, Maguregui. & Taheri, (1993) *Descripción y caracterización de las
diferentes litofacies presentes en dos afloramientos de la Formación Betijoque
(Mioceno-Plioceno)*. Jornadas LV Aniversario de la Escuela de Geología, Minas y
Geofísica Geos 32

Vargas, M. (1992) *Caracterización de heterogeneidades internas de litofacies en una
secuencia de la Formación Betijoque, Valera Estado Trujillo*. Tesis de grado. UCV.
151p.

Vasquez y Dickey (1972) Major Faulting in northwestern Venezuela and its relation
to global tectonics, Transactions Caribbean Geological Conference, 6th, p191-202

Wagner, G. Van Den Haute, P (1992) *Fission Track Dating*. Solid Earth Sciences
Library. Kluwer Academic Publishers. U.S.A. 285p.

Yegres C: (2003) *El Metodo de Huellas de Fisión basado en la técnica del detector
externo para el cálculo de la edad de la formación Betijoque*. Trabajo Especial de
Grado, UCV. 115p

Zingg, Th. (1935) Beitrage zur Schotteranalyse. Schweiz Mineralog. Petrog. Mitt.
v15, 39-140p.

Referencias Virtuales

Brandow (1998) www.brandonu.ca/library/journals

Clark (1981) www.seaes.manchester.ac.uk/intraned

Deramirotf (1971) www.pdvsa.com/lexico

Feo-Codecido (1970) www.pdvsa.com/lexico

Folk (1955) <http://jsedres.geoscienceworld.org>

Garner (1926) www.pdvsa.com/lexico

Hahn y Strassman (1938) <http://chemcases.com/2003version/nuclear>

Higgin (2003) www.smast.umassd.edu/cmastweb

Kellog (1984) www.cuug.ab.ca/maracaibo

Krinsley (1962) www.staff.amu.edu.pl

Krumbein and Power, (1941) www.ce.gatech.edu/laboratory/particleshape

Lakhan (1981) <http://osfl.amu.edu>

Liddle (1928) www.pdvsa.com/lexico

Oppenheim (1998) www.geos.litb.ac.in/msc.gpcourse

Ramirez y Campos (1972) www.pdv.com/lexico/museo/rocas

Toro (1986) www.sc.usb.ve/post.geol

Wadell (1932) <http://pbisotopes.ess.sunysb.edu>

www.trujillovirtual.com/nacer

www.auyantepuy.com/web/referencia

www.lexico.pdv.com

www.usuarios.lycas.es/aepect/astenosfera/documentos

