

**ANÁLISIS GEOLÓGICO Y GEOMECÁNICO DEL DEPÓSITO CUATERNARIO  
DE LA LEJÍA, ASOCIADO A LA FALLA CHITAGÁ.**

**JORGE LEONARDO CHAPARRO CORDÓN**

**WILLIAM FERNANDO DUARTE DELGADO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2013**



**ANÁLISIS GEOLÓGICO Y GEOMECÁNICO DEL DEPÓSITO CUATERNARIO  
DE LA LEJÍA, ASOCIADO A LA FALLA CHITAGÁ.**

**JORGE LEONARDO CHAPARRO CORDÓN**

**WILLIAM FERNANDO DUARTE DELGADO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**Director:**

**FRANCISCO ALBERTO VELANDIA PATIÑO**

**Geólogo MSc.**

**Codirector:**

**JAIME ARTURO ROMERO LEON**

**Geólogo PhD (Servicio Geológico Colombiano)**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2013**



## DEDICATORIA DE JORGE

*En primer lugar este trabajo va dedicado al Todopoderoso,*

*porque él es la razón de mi existencia;*

*A mis padres, hermanas, mis preciados sobrinos, tíos, tías, primos y a mi*

*abuelita que con su apoyo incondicional*

*son la inspiración para dar lo mejor de mí cada día;*

*A todos mis amigos que siempre han creído en mí y me han tendido*

*la mano en esos momentos difíciles.*

*Con el corazón en la mano les doy mil gracias a todos*

*y sepan que sin ustedes este logro en mi vida no hubiese sido posible.*



## DEDICATORIA DE WILLIAM

*Para Dios por su incondicional compañía, durante los momentos felices y  
difíciles por los que he tenido que afrontar.*

*A mis padres y hermana por su apoyo en cada paso y cada decisión tomada.*

*Principalmente este trabajo va dedicado para mi hija el regalo más hermoso que  
Dios me ha podido dar, para que se convierta en la luz de mis ojos y en el motor  
de mi vida.*



## AGRADECIMIENTOS

Al Dios todopoderoso que nos dió la iluminación para generar las ideas que permitieron sacar adelante este proyecto de grado.

Con la mano puesta en el corazón queremos agradecer a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Geología por el conocimiento que nos proporcionó a lo largo de estos años con la orientación de todo el equipo de profesionales con los que cuenta; al Servicio Geológico Colombiano por brindarnos la oportunidad de participar en este magno proyecto de investigación y por su atenta colaboración en cada etapa del desarrollo de este proyecto.

A los buenos geólogos Astrid Sandoval y Jaime Romero, al Ingeniero Topógrafo Yohan Montero por su apoyo constante en la ejecución del proyecto; al dedicado geólogo Francisco Velandia por su paciencia y compromiso en la dirección de este proyecto; al geotecnista Vladimir Merchán por su disposición para aportar sus ideas y conceptos; a los técnicos de laboratorio de suelos de la Universidad Industrial de Santander, Jairo "La Mechu" y Germán; al cuerpo de bomberos de Pamplona; al señor Mauricio Villamizar propietario de la Finca Ranchería donde se encuentra el depósito La Lejía y a todos aquellos que de una otra manera aportaron un granito de arena en el alcance de este logro.

Finalmente, agradecer a los geólogos Alvaro Solarte y Diego Ibañez por su tiempo, honestidad y sensatez en el momento de revisar, corregir y evaluar este trabajo.



## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	27
1.2. Justificación.....	30
2. OBJETIVOS .....	31
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	31
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	31
3. LOCALIZACIÓN .....	32
4. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	35
5. ANTECEDENTES .....	71
6. MARCO GEOLÓGICO .....	78
6.1. ESTRATIGRAFÍA.....	78
6.1.1. Neis de Bucaramanga (pEb).....	81
6.1.2. Ortoneis de Pamplona (pDo) .....	82
6.1.3. Cuarzomonzonita, Granito y Pórfido Cuarzoso (JRcg) .....	82
6.1.4. Granito de Durania (dg) .....	82
6.1.5. Formación Girón (Jg).....	83
6.1.6. Formación Tibú-Mercedes (Kitm) .....	83
6.1.7. Formación Aguardiente (Kia).....	84
6.1.8. Formación Capacho (Kic) .....	84
6.1.9. Formación La Luna (Ksl) .....	84



6.1.10. Formación Colon- Mito Juan (Kscm) .....	86
6.1.11. Formación Barco (Tpb).....	86
6.1.12. Depósitos cuaternarios (Qal) .....	87
6.2. GEOMORFOLOGÍA .....	89
6.2.1. Morfoclimatología .....	89
6.2.2. Morfogénesis y Morfología .....	90
6.2.2.1. Red de Drenaje .....	93
6.2.2.2. Geoformas de origen Denudacional.....	95
6.2.2.3. Geoformas de origen estructural .....	99
6.2.2.4. Geoformas Periglaciares.....	101
6.2.3. Morfometría .....	104
6.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL .....	108
6.3.1. Falla de Pamplona.....	110
6.3.2. Falla de Chitagá.....	112
6.3.3. Sinclinal de Pamplonita .....	114
6.3.4. Análisis estructural mediante cortes geológicos .....	116
6.3.5. Sismicidad .....	124
7. RESULTADOS .....	129
7.1. Resultados del levantamiento de las trincheras paleosismológicas de La Lejía.....	129
7.1.1. TRINCHERA-1.....	132
7.1.2. TRINCHERA-2.....	134
7.1.3. TRINCHERA-3.....	138



7.2. Resultados de la descripción sedimentológica y las propiedades físicas de las muestras.....	143
7.2.1. MUESTRA TR2-M1S.....	143
7.2.2. MUESTRA TR2-M2S.....	144
7.3. Resultados de análisis químicos.....	151
7.3.1. Fluorescencia de rayos x.....	151
7.3.2. Difracción de rayos x.....	155
7.4. Resultados de los ensayos geotécnicos.....	162
7.4.1. Resultados de Humedad natural Inicial y Final.....	163
7.4.2. Resultados de Limites de Atterberg.....	165
7.4.3. Resultados de consolidación unidimensional de suelos.....	176
8. DISCUSIÓN.....	184
9. CONCLUSIONES.....	194
10. RECOMENDACIONES.....	197
11. BIBLIOGRAFÍA.....	199
12. ANEXOS.....	207
12.1. Catálogo sísmico de Pamplona y zonas aledañas, en donde se registran los eventos ocurridos desde 1993 – 2012 (Tomado del catálogo de sismicidad de la Red Sismológica Nacional).....	208
12.2. Lecturas registradas y gráficas de Desplazamiento vs. Raíz del tiempo para cada día del ensayo de Consolidación para la muestra TR2-M1G.....	212
12.3. Lecturas registradas y gráficas de desplazamiento vs. Raíz del tiempo para cada día del ensayo de Consolidación para la muestra TR2-M4G.....	225



12.4. Gráfica de relación de vacíos vs esfuerzo vertical efectivo para la muestra TR2-M1G.....	235
12.5. Gráfica de Relación de Vacíos vs Esfuerzo Vertical efectivo para la muestra TR2-M4G.....	236
13. INDICE DE TÉRMINOS.....	237



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 Imágen satelital Landsat 7 en donde se ubicó la Lejía, que corresponde al área de estudio. (Tomado de <a href="http://glovis.usgs.gov/">http://glovis.usgs.gov/</a> , con Path: 7 y Row: 55) .....	33
FIGURA 2 Localización y delimitación (Polígono negro) del depósito de la Lejía, de acuerdo al índice de planchas del IGAC. (Tomado del sitio web: <a href="http://geoportal.igac.gov.co/ssigl2.0/visor/galeria.req?mapald=19">http://geoportal.igac.gov.co/ssigl2.0/visor/galeria.req?mapald=19</a> ).....	34
FIGURA 3 Interface gráfica del Programa Global Mapper 12.0. Se identificó el depósito la Lejía con línea amarilla. ....	37
FIGURA 4 Entorno del Programa ArcGis 10.0 en su extensión ArcMap. Se visualiza el mapa de contornos de la zona de estudio. Las zonas con menor densidad de curvas, corresponden a la cabecera municipal de Pamplona y a la llanura de Fontibón.....	38
FIGURA 5 Esquema inicial propuesto para la Trinchera de exploración paleosismológica en el sitio la Lejía (Tomado de Ingeominas, 2011).....	42
FIGURA 6 Perfil geoelectrico en el que se observa un acuñamiento de la unidad Cuaternaria Qal (Tomado de Moyano, 2010).....	43
FIGURA 7 Perfil geoelectrico en el que se observa el mayor espesor (150 m) de la Unidad Qal hacia el centro del depósito (Tomado de Moyano, 2010).....	43
FIGURA 8 Localización en campo de los apiques realizados para medición de nivel freático. ....	45
FIGURA 9 Demarcación con estacas para localizar los sitios de apertura de las Trincheras.45	
FIGURA 10 Apertura manual de la Trinchera-1.....	46
FIGURA 11 (a) Vista de la Trinchera-2 con entibado de las paredes. (b) Carpa para proteger el interior de Trinchera-2 contra la lluvia.....	47
FIGURA 12 Apertura de la Trinchera-3 con retroexcavadora (a). Nótese el nivel freático y el colapso de algunas de las paredes a pesar del apuntalado (b).....	48
FIGURA 13 <i>Log-matic</i> construido para elaborar el foto-mosaico de la pared este de la Trinchera-3. ....	49
FIGURA 14 Muestra en pedestal para ensayos de consolidación unidimensional de suelos.51	
FIGURA 15 Toma de muestras con Tubo de PVC.....	52
FIGURA 16 Prueba de resistencia en estado seco.....	55
FIGURA 17 Prueba de dilatancia. ....	56
FIGURA 18 Prueba de tenacidad.....	56
	16



FIGURA 19 Análisis de la sedimentación y/o dispersión.....	57
FIGURA 20 Peso de la muestra en la balanza analítica para el cálculo de Humedad Natural.	58
FIGURA 21 Partes fundamentales que conforman un Consolidómetro.....	60
FIGURA 22 Cajas herméticas donde se encuentra almacenada una de las muestras en pedestal que se utilizó en el ensayo de consolidación.....	62
FIGURA 23 Registro de lecturas de la deformación en el Deformímetro.....	63
FIGURA 24 Muestras almacenadas en PVC. Se muestra la profundidad a la que fue tomada cada una.....	64
FIGURA 25 Copa de Casagrande manual empleada en el ensayo de límites.....	65
FIGURA 26 (a) Uso del ranurador para separar la muestra; (b) Muestra lista para empezar el ensayo.....	67
FIGURA 27 Procedimiento para hallar el límite plástico, se detallan los rollitos de 3 mm de diámetro.....	70
FIGURA 28 Metodología empleada en Paleosismología para el monitoreo de la amenaza sísmica. (Tomado y adaptado de Michetti, 2005).....	75
FIGURA 29 Geología de la zona de estudio. Se observa el depósito Cuaternario de interés Aparece señalado el trazo de los perfiles geológicos para análisis estructural. (Tomado y adaptado de Ward <i>et al.</i> , 1977 y Calderón y Romero, 2009).....	79
FIGURA 30 Leyenda del Mapa Geológico de la zona de estudio mostrado en la FIGURA 29 (Tomado y adaptado de Ward <i>et al.</i> , 1977 y Calderón y Romero, 2009). .....	80
FIGURA 31 Expresión geomorfológica de la Formación Aguardiente (Kia), La Luna (Ksl), Capacho (Kic) y el depósito lagunar de La Lejía (Q0l). .....	85
FIGURA 32 Afloramiento con alto grado de meteorización de la Formación La Luna (Ksl) al oeste del depósito La Lejía, en el cual se observan shales gris oscuro intercalado con lodolitas grises y zonas enriquecidas con materia orgánica.....	85
FIGURA 33 Mapa geológico de los depósitos cuaternarios en el sector la laguna – Fontibón (Tomado de Calderón y Romero, 2009).....	88
FIGURA 34 (a) Aspecto del clima en el depósito de La Lejía; (b) Vegetación típica del sitio en el cual se levantaron las trincheras exploratorias (Frailejón).....	90
FIGURA 35 Modelo TIN (Triangulated Irregular Network) generado con ArcMap 10.0 a partir del mapa de contornos del sector de La Lejía – Pamplona.....	92
FIGURA 36 Fotografía aérea de la zona de estudio, donde se muestran los principales rasgos geomorfológicos incluyendo la red de drenaje.....	94
FIGURA 37 Filo horizontal con crestas sub-puntiagudas.....	95



FIGURA 38 Los lomos anchos actúan como divisoria de aguas y son útiles para crear caminos de herradura.....	96
FIGURA 39 Colina Denudacional con cimas sub-redondeadas.....	97
FIGURA 40 Colinas y montañas con grado de inclinación variable al este del depósito. ....	97
FIGURA 41 Ladera Denudacional erodada. ....	98
FIGURA 42 Facetas triangulares observadas al nororiente del depósito La Lejía y evidencian la presencia de la Falla Chitagá.....	99
FIGURA 43 Laderas escalonadas observadas en un sector al nororiente del depósito de La Lejía.....	100
FIGURA 44 Silleta de falla asociada al trazo de la falla Chitagá. Panorámica tomada en un sector al nororiente del depósito. Ubicada sobre la Unidad De Cuarzomonzita (JRcg).....	101
FIGURA 45 Bloques erráticos ubicados en el costado oeste del depósito la Lejía.....	102
FIGURA 46 Montículos de Morrenas terminales en al NNW del Depósito La Lejía (Tomado de Calderón y Romero, 2009). ....	103
FIGURA 47 Coluviones interpretados como <i>tills</i> conformando morrenas laterales localizadas sobre el costado oeste del depósito La Lejía. ....	103
FIGURA 48 Mapa de contornos del sector La Lejía –Pamplona elaborado con Global Mapper 12.0 a partir de la base de datos de ASTERDEM. ....	105
FIGURA 49 Mapa de pendientes del sector La Lejía – Pamplona obtenido a partir del mapa de contornos en ArcMap 10.0.....	¡Error! Marcador no definido.
FIGURA 50 Contexto Tectónico general de los Andes del Norte, donde se localizan los principales sistemas de fallas activas y potencialmente activas. 1 = Cordillera Oriental. 2 = Cordillera Central (polimetamórfica), 3 = Occidente (afinidad oceánica) - Cordillera Occidental y Serranía del Baudó, 4 = cratón, 5 = fallas inversas y de cabalgamiento, 6 = zonas de subducción del Pacífico y del Caribe. (Tomado de Taboada <i>et al.</i> , 1998) .....	109
FIGURA 51 Mapa estructural regional, donde sobresalen las principales fallas de la zona de estudio (Tomado de Romero, 2011) .....	111
FIGURA 52 Esquema estructural del sector de La Lejía. Se muestra el trazo de los 3 perfiles geológicos utilizados para el análisis estructural. (Tomado y adaptado de Ward <i>et al.</i> , 1977) .....	113
FIGURA 53 Panorámica al nororiente del depósito de la Lejía, en la cual se resalta el trazo de la Falla Chitagá.....	114
FIGURA 54 Panorámica al nororiente del área donde se realizó la trinchera. Sobresale la Formación Aguardiente (Kia) y se aprecia el eje del Sinclinal de Pamplonita (SP). ....	115



<b>FIGURA 55 Perfil Geológico A - A´</b> .....	<b>118</b>
<b>FIGURA 56 Perfil Geológico B-B´</b> .....	<b>120</b>
<b>FIGURA 57 Perfil Geológico C-C´</b> .....	<b>122</b>
<b>FIGURA 58 Modelo que sintetiza la etapa de compresión que afectó al sector de La Lejía-Pamplona: (a) Etapa inicial previa a la deformación; (b) Esfuerzos de carácter compresivo que generaron plegamientos y fallas inversas (Sinclinal de Pamplonita y Falla Chitagá); (c) Bloque hundido en el centro por acción de las fallas inversas, que generó el espacio de acomodación para formar la cuenca de La Lejía.</b> .....	<b>123</b>
<b>FIGURA 59 Mapa generalizado de fuentes sismogénicas en Colombia (Tomado de Ingeominas y UNAL., 2010).</b> .....	<b>124</b>
<b>FIGURA 60 Mapa de Actividad sísmica en Colombia presentado en el estudio General de Amenaza Sísmica para Colombia (Tomado de Ingeominas <i>et al.</i>, 1996)</b> .....	<b>125</b>
<b>FIGURA 61. Mapa de amenaza sísmica para probabilidades de retorno de 475 años (Tomado de Ingeominas y UNAL., 2010).</b> .....	<b>127</b>
<b>FIGURA 62 Mapas de Amenaza sísmica de Colombia. (a) Período de retorno de 75 años; (b) Período de retorno de 2475 años (Tomado de Ingeominas y UNAL., 2010)</b> .....	<b>128</b>
<b>FIGURA 63 Apique en el cual el nivel freático alcanzó una profundidad de 50 cm (longitud máxima de la regla).</b> .....	<b>130</b>
<b>FIGURA 64 Localización de las trincheras de exploración paleosismológica en el sector de La Lejía. Trinchera 1 (T-1), trinchera 2 (T-2), trinchera 3 (T-3).</b> .....	<b>131</b>
<b>FIGURA 65 Trinchera-1: (a) Panorámica de la excavación y (b) Detalle de los restos vegetales encontrados.</b> .....	<b>133</b>
<b>FIGURA 66 Panorámica de Trinchera-2, donde se muestra el entibado de las paredes.</b> .....	<b>134</b>
<b>FIGURA 67 Detalle de las dos capas de Suelo A y B, encontradas en Trinchera-2.</b> .....	<b>136</b>
<b>FIGURA 68 Modelo en 2 Dimensiones, que representa la geometría, dimensiones finales y puntos de muestreo en la Pared Norte de laTrinchera-2.</b> .....	<b>137</b>
<b>FIGURA 69 Las dos paredes Este (E) y Oeste (W), que conforman la rampa de acceso a la Trinchera de Exploración número 3. Al fondo en la pared Sur (S), se observa el proceso de profundización de la Trinchera con la máquina. Se resalta con un delineado color rojo, el borde o contorno de la Trinchera.</b> .....	<b>139</b>
<b>FIGURA 70 Se observa el contraste en color entre los dos niveles encontrados: El nivel marrón denominado nivel inferior A y el nivel negro que es el nivel superior B con mayor presencia de turba.</b> .....	<b>140</b>



FIGURA 71 <i>Fotolog</i> de la pared este. Se observan los 2 horizontes en la trinchera diferenciados por su color característico. El nivel superior A color negro, el nivel inferior B color marrón claro y el nivel de transición con un color gris, que se ubica entre los dos horizontes de suelo predominantes.....	141
FIGURA 72 Aspecto de la muestra TR2-M1S (escala en cm) .....	143
FIGURA 73 TR2-M1S: (a) Presencia de cristales de Muscovita, el brillo que presenta la muestra se debe a su alto contenido de agua. (b) Se observa elevada proporción de materia orgánica, constituida en gran parte por restos de tallos. ....	144
FIGURA 74 Detalle de la variación de color en la zona de transición: S: Nivel superior color negro (TR2-M1S); I: Nivel inferior color café (TR2-M2S) .....	145
FIGURA 75 TR2-M2S: (a) y (b) Se observan rastros de materia orgánica (raíces). ....	146
FIGURA 76 TR2-M2S: (a) Presencia de cristales de cuarzo (b) Cristales de Moscovita. ....	147
FIGURA 77 Difractograma de la muestra TR2-M1RX.....	156
FIGURA 78 Patrón de comparación obtenido para la identificación de la muestra TR2-M1RX. ....	157
FIGURA 79 Difractograma de la muestra TR2-M2RX.....	158
FIGURA 80 Patrón de comparación obtenido para la identificación de la muestra TR2-M2RX. ....	159
FIGURA 81 Difractograma de la muestra TR3-M1RX.....	160
FIGURA 82 Patrón de comparación obtenido para la identificación de la muestra TR3-M1RX. ....	160
FIGURA 83 Curva de fluidez obtenida para la muestra TR2-M5G.....	169
FIGURA 84 Carta de Plasticidad para la clasificación de suelos en partículas finas, (Tomado páginas web: H, Edd, 2010). ....	175
FIGURA 85 Grafica que muestra la relación entre la variación de altura respecto a la raíz del tiempo, para la muestra TR2-M1G. a. Día de ensayo 1, se inicia el proceso de carga. b. Día de ensayo 4, se inicia la descarga de la muestra. ....	178
FIGURA 87 Curva de Compresibilidad de la Muestra TR2-M1G, en la cual se ha hallado por el método Casagrande la carga de preconsolidación ( $\sigma_p$ ). Con el valor de $\sigma_v$ , ya es posible calcular RSC.....	180
FIGURA 87 Curva de Compresibilidad de la muestra TR2-M4G, en la cual se ha calculado por el método Casagrande la carga de preconsolidación ( $\sigma_p$ ). ....	181
FIGURA 88 Mapa de extensión glacial durante el Pleistoceno Superior en la Sierra Nevada del Cocuy (Tomado de Flórez, 2003).....	186



**FIGURA 89 Modelo del avance glaciar, elaborado en base al modelo de elevación digital de la zona, con Global Mapper 10.0: (1) Lengua glaciar; (2) Morrena lateral; (3) Morrena terminal.**

..... 188



## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA 1</b> Categorías de Pendientes en Grados y Porcentajes, según Alvarado <i>et al.</i> (1982)	111
<b>TABLA 2</b> Resultados de la medición manual de niveles freáticos.	133
<b>TABLA 3</b> Coordenadas geográficas (Magna SIRGAS) adquiridas con GPS, de las tres Trincheras exploratorias abiertas para la investigación paleosismológica.	375
<b>TABLA 4</b> Resumen de las muestras recolectadas en campo.	146
<b>TABLA 5</b> Clasificación de suelos finos según propiedades físicas (Tomado de Duque y Escobar, 2002).	152
<b>TABLA 6</b> Resumen de las propiedades sedimentológicas y físicas observadas en las muestras de mano del nivel superior (TR2-M2S) e inferior (TR2-M1S) del depósito La Lejía.	153
<b>TABLA 7</b> Subórdenes de clasificación para histosoles basado en la Soil Taxonomy (Tomado y adaptado de Gisbert, 2002)	154
<b>TABLA 8</b> Resultados de la fluorescencia de rayos x (FRX) en muestras tomadas de las trincheras 2 y 3.	157
<b>TABLA 9</b> Condiciones generales de medida de las muestras analizadas con difracción de rayos x.	46
<b>TABLA 10</b> Resumen de los resultados de difracción de rayos X para la muestra TR2-M1RX.	161
<b>TABLA 11</b> Resumen de los resultados de difracción de rayos X para la muestra TR2-M2RX.	163
<b>TABLA 12</b> Resumen de los resultados de difracción de rayos X para la muestra TR3-M1RX.	49
<b>TABLA 13</b> Datos iniciales y Resultados de Humedad Natural Inicial.	168
<b>TABLA 14</b> Datos y Resultados del Ensayo de Humedad Final.	169
<b>TABLA 15</b> Resumen de los parámetros y resultados del ensayo de límite plástico para la muestra TR2-M5G.	5572



<b>TABLA 16</b> Parámetros y resultados obtenidos para en el ensayo de límite plástico aplicado a la muestra TR2-M5G.....	<b>174</b>
<b>TABLA 17</b> Resumen de los resultados de los ensayos de límites de Atterberg para la muestra TR2-M5G. ....	<b>177</b>
<b>TABLA 18</b> Símbolos para clasificar los suelos utilizado por el Sistema de Clasificación de Suelos Unificado (Tomado de páginas web: H, Edd, 2010).....	<b>178</b>
<b>TABLA 19</b> Datos Iniciales de las muestras para el ensayo de Consolidación.....	<b>181</b>
<b>TABLA 20</b> Resultados de los parámetros de consolidación calculados a partir de los datos iniciales y de la gráfica de compresibilidad para cada una de las muestras analizadas.....	<b>187</b>
<b>TABLA 21</b> Valores estándar para la clasificación del suelo en base a la Relación de sobreconsolidación (Tomado de Merchán, 2011). ....	<b>627</b>



## **LISTA DE ANEXOS**

**ANEXO 1** Catalogo sísmico de Pamplona y zonas aledañas, en donde se registran los eventos ocurridos desde 1993-2012 (Tomado del catálogo de sismicidad de la Red Sismológica Nacional)

**ANEXO 2** Lecturas registradas y gráficas de Desplazamiento vs. Raíz del tiempo para cada día del ensayo de Consolidación para la muestra TR2-M1G

**ANEXO 3** R Lecturas registradas y gráficas de desplazamiento vs. Raíz del tiempo para cada día del ensayo de Consolidación para la muestra TR2-M4G.

**ANEXO 4** Gráfica de relación de vacíos vs esfuerzo vertical efectivo para la muestra TR2-M1G

**ANEXO 5** Gráfica de Relación de Vacíos vs Esfuerzo Vertical efectivo para la muestra TR2-M4G.



## RESUMEN

### ANÁLISIS GEOLÓGICO Y GEOMECÁNICO DEL DEPÓSITO CUATERNARIO DE LA LEJÍA (NORTE DE SANTANDER), ASOCIADO A LA FALLA CHITAGÁ Y SU POSIBLE ACTIVIDAD NEOTECTÓNICA\*.

JORGE LEONARDO CHAPARRO CORDÓN\*\*

WILLIAM FERNANDO DUARTE DELGADO\*\*

**Palabras clave:** Neotectónica, consolidación, compresión, histosol, glaciación.

El Servicio Geológico Colombiano adelanta estudios de paleosismología en la Falla Chitagá (Norte de Santander). Por tal motivo, mediante la apertura de trincheras en el depósito Cuaternario localizado en La Lejía (sureste de Pamplona – Norte de Santander) se realizó un estudio geológico y geomecánico para contribuir en el desarrollo de las primeras etapas de dicha investigación.

Con la adquisición de muestras in situ del depósito de La Lejía, se efectuaron ensayos geotécnicos de consolidación, límites de Atterberg, humedad natural, así como análisis geoquímicos, además se efectuó un análisis geomorfológico y estructural de la cuenca para integrar dicha información y establecer su relación con evidencias de actividad neotectónica en este sector. Se llegó a la conclusión de que la cuenca se formó gracias a una etapa de compresión, que produjo fallas inversas cuya distribución espacial favoreció el espacio de acomodación para que sedimentos provenientes de rocas cristalinas y sedimentarias ricas en sílice y aluminosilicatos, mezclados con restos de la paleoflora, dieran lugar a un depósito de histosoles tipo hemist y fibríst con notable contenido de cuarzo, caolinita, muscovita y anatasa, cuyas características geotécnicas no involucran factores de cizallamiento que permitan deducir la ocurrencia de eventos tectónicos recientes. Por el contrario, se trata de suelos que experimentaron sobreconsolidación debido al avance y retroceso glacial en el Pleistoceno Superior que sumado a factores climáticos propios de la región generaron continuas variaciones en los niveles piezométricos y produjeron cargas y descargas sobre el suelo.

---

\*Proyecto de Grado

\*\*Facultad de Ciencias Físicoquímicas, Escuela de Geología. Director: Francisco A. Velandia,  
Codirector: Jaime A. Romero



## SUMMARY

### GEOLOGICAL AND GEOMECHANICAL ANALYSIS OF THE QUATERNARY DEPOSIT OF LA LEJÍA (NORTE DE SANTANDER), ASSOCIATED WITH THE CHITAGÁ FAULT AND ITS POSSIBLE NEOTECTONIC ACTIVITY\*.

JORGE LEONARDO CHAPARRO CORDÓN\*\*  
WILLIAM FERNANDO DUARTE DELGADO\*\*

**Key Words:** Neotectonic, consolidation, compression, histosol, glaciation.

The Colombian Geological Survey makes studies of Paleoseismology in the Chitagá fault (Norte de Santander). Therefore, by trenching in the Quaternary deposit of La Lejía (southeast of Pamplona-Norte de Santander) was performed a geological and geomechanical study to contribute to the development of the early stages of this investigation.

With the acquisition of samples in situ of La Lejía deposit, geotechnical tests were made, like consolidation, Atterberg limits, natural wet, well as geochemical analysis, also performed and geomorphological and structural analysis of the basin to integrate this information and establish its relationship with evidence of neotectonic activity in this sector. It concluded that the basin was formed by a compression stage, that produced thrust faults whose spatial distribution favored accommodation space for sediment from crystalline and sedimentary rocks rich in silica and aluminosilicates, mixed with traces of paleoflora, giving rise to a type hemist and fibrist histosols with remarkable content of quartz, kaolinite, muscovite and anatase, whose geotechnical characteristics doesn't involve shear factors to infer the occurrence of recent tectonic events. By contrast, this soils was experimented overconsolidation due to the glacial advance and backward in the Upper Pleistocene that added to climatic factors of the region, it generated continuous variations in the piezometric levels and it produced charges and uncharges on the soil.

---

\*Undergraduate thesis

\*\*Faculty of Physic-Chemistry Engineering. Director: Francisco A. Velandia, Codirector: Jaime A. Romero



## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los grandes sismos o terremotos ocurridos en el pasado se hace a través de la neotectónica, la cual busca vincular diversas áreas como la geología estructural, sedimentología, estratigrafía, geomorfología, geotecnia, cartografía geológica detallada, geocronología y sismología, entre otras disciplinas de mayor especialización, con el fin de localizar y correlacionar rasgos geológicos que denoten la presencia de algún evento deformacional, como los paleoterremotos y de esta forma interpretar la actividad sísmica de una región particular y en la ventana de tiempo que permitan las dataciones realizadas. Para llevar a cabo esta labor, la neotectónica se apoya en la paleosismología, la cual se define como el análisis de terremotos prehistóricos y se enfoca en su ubicación, tiempo y magnitud, mediante la descripción de estructuras de deformación frágil como fracturas, diaclasas y fallas (McCalpin *et al.*, 1996). La paleosismología difiere de otros estudios más generales, que determinan los movimientos lentos y rápidos de la corteza, ya que esta se basa en el análisis de la deformación casi instantánea de las geoformas terrestres, ocurridas durante los terremotos. Una de las técnicas directas de estudio que emplea la Paleosismología, se ejecuta mediante la excavación de una o varias trincheras de exploración. Para la aplicación de este método se requiere la existencia de evidencia superficial de la actividad de una fuente sismogénica. Según Audemard (2003), el diagnóstico paleosísmico por trincheras permite identificar diversos factores como: El potencial generador de terremotos de una falla, la tasa de desplazamiento promedio de la falla, tiempo transcurrido desde el último evento sísmico y probabilidad de ocurrencia del próximo.

La paleosismología a nivel mundial ha recobrado gran importancia, por su forma eficaz y directa respecto a la adquisición de información, no solo en la búsqueda



de la sismicidad histórica; también juega un papel importante en la reconstrucción de la evolución climática y ambiental de una región específica. En Suramérica, Venezuela se ha convertido en uno de los principales pioneros en aplicar la exploración paleosísmica por trincheras desde los años 60, lo que le ha permitido desarrollar la historia tectónica del sistema montañoso que va desde el estado de Táchira hasta el Golfo de Paria (Audemard, 2003).

En Colombia, la paleosismología es una disciplina de reciente aplicación, que inició a partir del Sismo de Popayán (1983), y continuó con investigaciones que se llevaron a cabo en el suroccidente del país, donde París *et al.* (1989) realizaron un análisis de la actividad neotectónica en el suroccidente colombiano. Más adelante Paris y Romero (1994) presentan un inventario de las fallas activas de Colombia, dentro del cual se menciona la falla de Chitagá (Norte de Santander) que ha sido la base para el cálculo de la edad del último movimiento telúrico en esta región, (750 Ka- 1.6 Ma).

El área de Pamplona y zonas aledañas, son actualmente objeto de análisis paleosimológicos por parte del Servicio Geológico Colombiano, donde además del reconocimiento geomorfológico y estructural para identificar rasgos de actividad neotectónica en la zona, también se ha realizado una prospección geoeléctrica que permitió identificar ciertas características de la estructura resistiva de los materiales que rellenan la cuenca. Es así que Moyano (2010), realizó ocho sondeos eléctricos verticales en el sector de la Legía (Pamplona-Norte de Santander).

El presente trabajo de grado brinda un aporte adicional mediante la caracterización geotécnica del depósito con el fin de descifrar la evolución de la cuenca desde sus etapas iniciales de formación hasta su estado actual, y así relacionarla con la historia sísmica de la región.



### 1.1. Planteamiento del problema

El Servicio Geológico Colombiano en el desempeño de su función investigativa, desarrolla actualmente una serie de estudios paleosismológicos a nivel nacional, uno de los cuales se lleva a cabo en el sector de la Lejía, al sureste de Pamplona en el departamento de Norte de Santander. El registro estratigráfico del sector de la Lejía-Pamplona incluye rocas con edades que van desde el Predevónico hasta el Cuaternario, asociadas a procesos metamórficos, ígneos y sedimentarios. Estas rocas han sido afectadas por eventos de deformación tectónica, que han dado lugar a diversos tipos de estructuras geológicas, como la falla de Chitagá, la falla de Pamplona y el sinclinal de Pamplonita.

La Lejía, fue escogida como el sitio para realizar este estudio debido a que se encuentra localizado en la zona de influencia de la falla de Chitagá. Se asume que eventos sísmicos prehistóricos están relacionados con la actividad de esta falla y han quedado registrados en los depósitos que conforman la cuenca de la Lejía.

Los estudios geológicos regionales que incluyen la Falla de Chitagá, no muestran la influencia que ésta ha ejercido en el registro estratigráfico existente en la cuenca de la Lejía, tampoco se tiene información sobre el comportamiento de los materiales geológicos allí presentes ante esfuerzos naturales y antrópicos, ni se tiene una visión concreta sobre el ambiente deposicional y los procesos que tuvieron lugar en la formación de dicha secuencia sedimentaria. En ese sentido, este trabajo de grado pretende aportar una interpretación acerca de la historia de enterramiento de la parte superior del depósito, basada en los resultados de ensayos geotécnicos y también una interpretación sedimentológica respaldada por estudios de Difracción de Rayos X, encontrando así la relación entre el depósito y su roca fuente.

Este aporte al conocimiento geológico del depósito, sirve como punto de partida para avanzar en las posteriores fases del estudio paleosismológico de la Fuente



Sismogénica Chitagá-Pamplona. Además, es un referente para futuros trabajos de investigación que se pretendan llevar a cabo en dicho sector.

## 1.2. Justificación

Esta investigación constituye una contribución a las fases iniciales de la exploración paleosismológica de la Fuente Sismogénica Chitagá-Pamplona. El análisis de las estructuras y geoformas presentes en el área de estudio permite tener un panorama más detallado del contexto geológico de la zona. Con la apertura de la trinchera de exploración se lleva a cabo un muestreo de material sedimentario, con el fin de realizar una caracterización geotécnica y sedimentológica del depósito encontrado en la Lejía, interpretando aspectos paleoambientales y la historia de enterramiento de los materiales en la parte más superficial del depósito allí presente.

A mediano plazo, los resultados del presente estudio se sumarán a los de geocronología de las muestras de paleosuelos, con el fin de interpretar la actividad prehistórica de esta región y establecer una ciclicidad sísmica de la Falla Chitagá, aspectos importantes para definir recurrencia de eventos y tomar decisiones para afinar normas en la construcción sismo resistente y prevención de desastres.

Por lo tanto, se destaca así la importancia de este proyecto investigativo, que a nivel de pregrado puede constituir una pauta para que la Escuela de Geología de la UIS asuma mayor protagonismo en el liderazgo de proyectos de neotectónica y amenazas geológicas en la región nororiental del país, donde son escasos los estudios de caracterización de fuentes sismogénicas a pesar de la presencia de estructuras destacadas en el Macizo de Santander, como la Falla de Bucaramanga.



## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GENERAL

- Realizar un análisis geológico y geomecánico de la parte más superficial del depósito Cuaternario de La Lejía para establecer los posibles factores y procesos geológicos que pudieron afectar esta parte del depósito.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Llevar a cabo un análisis geológico regional (Estratigrafía y Geología Estructural) con base en cortes geológicos.
- Actualizar el contexto geomorfológico del depósito de la Lejía.
- Realizar ensayos geotécnicos que permitan deducir el comportamiento geomecánico del suelo ante los factores y procesos geológicos que han actuado sobre la parte superior del depósito.
- Con base en la información adquirida, establecer las posibles relaciones de los elementos geológicos y geotécnicos estudiados con posibles evidencias de actividad neotectónica en el sector.



### 3. LOCALIZACIÓN

El depósito de la Lejía se encuentra en el nororiente del territorio colombiano y forma parte del flanco este de la cordillera Oriental (**FIGURA 1**). Se denominó así porque se encuentra justo en el paso de la quebrada que lleva este nombre, la cual nace en el alto El Escorial.

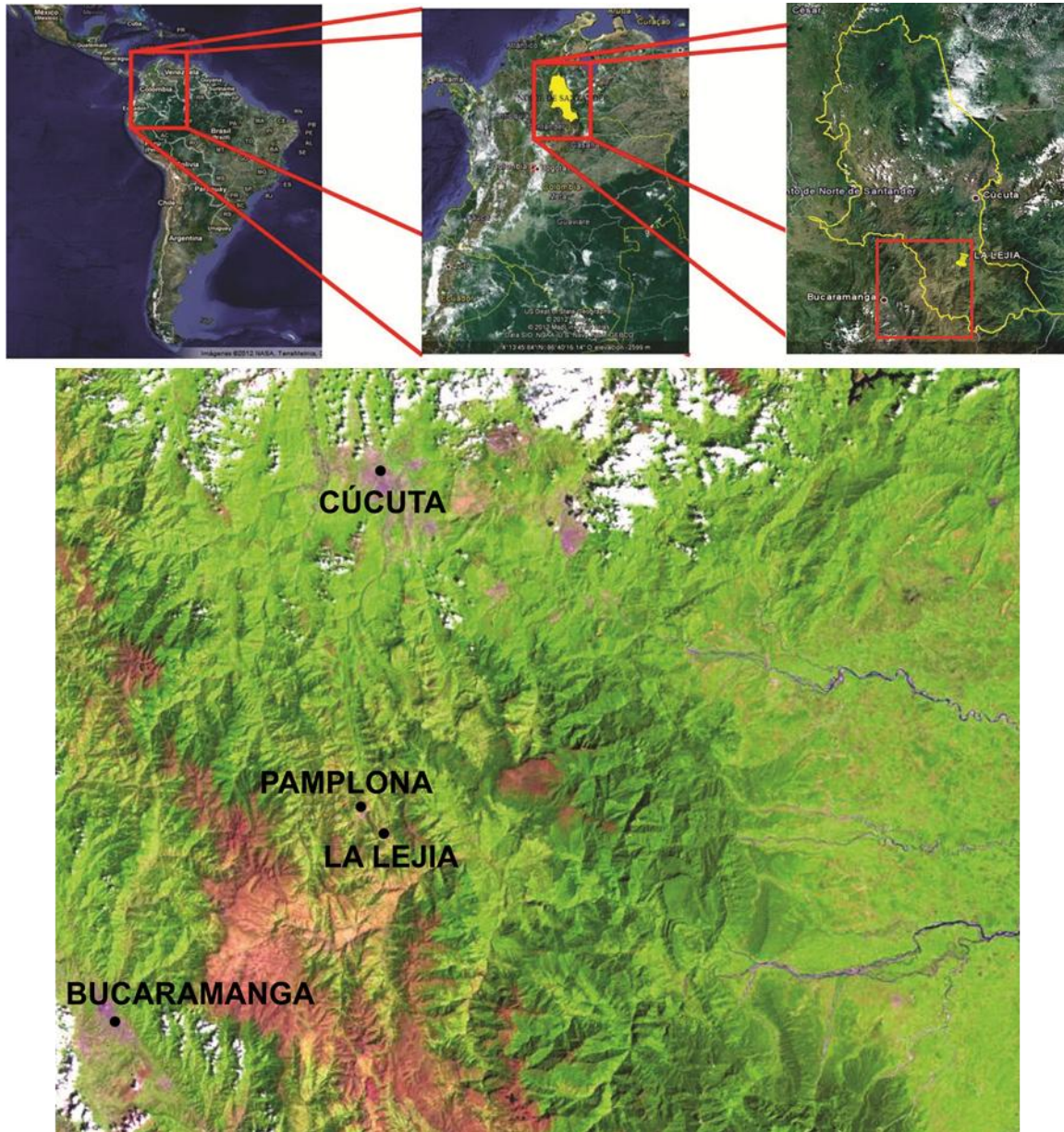
Geográficamente, se localiza a unos 9 km al sureste del municipio de Pamplona en el departamento de Norte de Santander. Se ubica en lo que se conoce como la Llanura de Fontibón y hace parte de la finca Ranchería.

De acuerdo con la nomenclatura del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el depósito se ubica en la Plancha topográfica 110-II-C a escala 1:25000, (**FIGURA 2**).

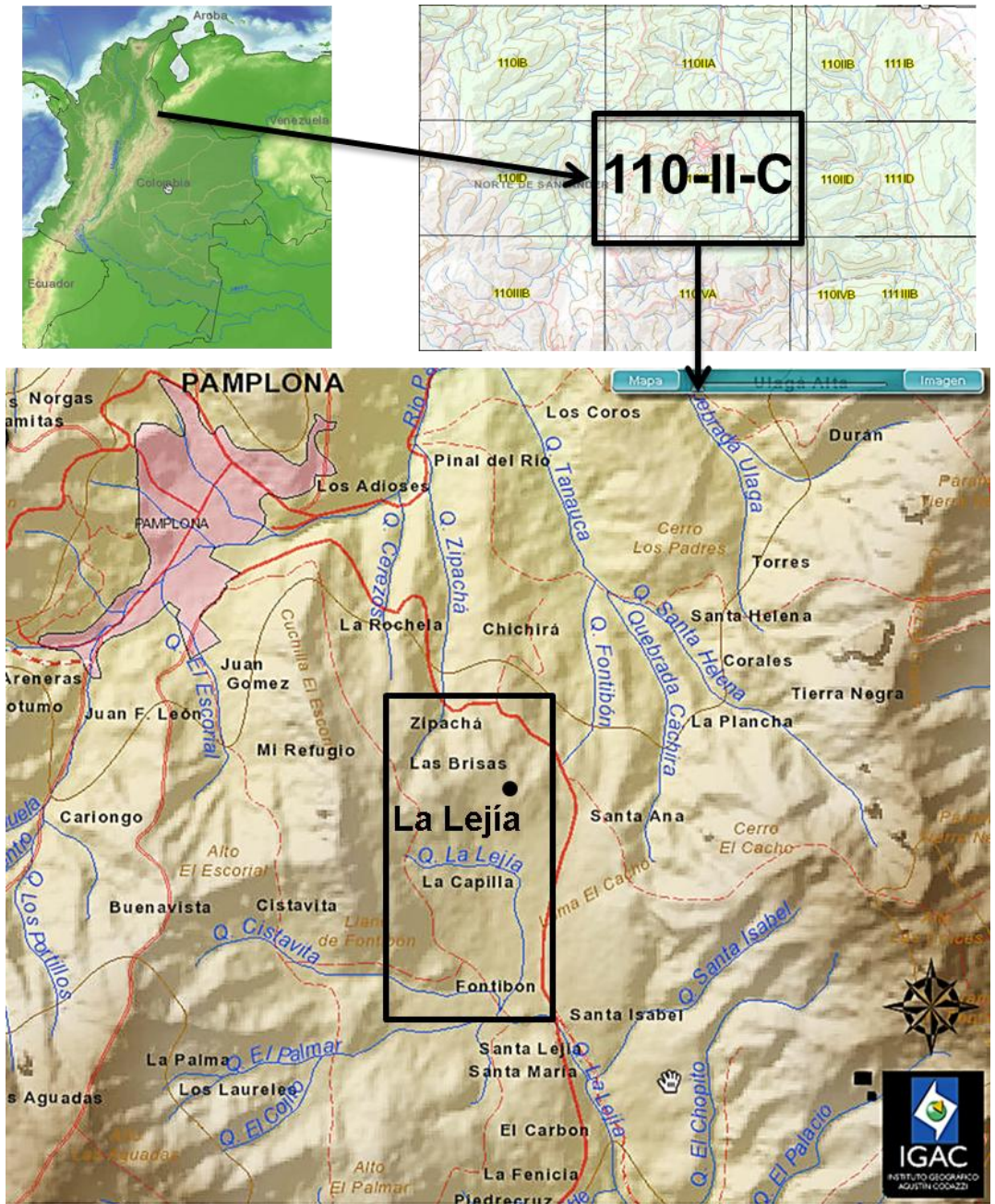
En los alrededores de la Lejía, se destacan altos topográficos como la mencionada Cuchilla El Escorial al oeste y la Loma El Cacho hacia el este del depósito.

La corriente de agua más importante de la zona corresponde al río Pamplonita, cuyo curso va en dirección norte. Los principales drenajes del sitio de interés, son la quebrada la Lejía, la quebrada Cistavita y más hacia el sur, las quebradas el Palmar y Santa Isabel, las cuales corresponden a tributarios del río Chitagá, ubicado al sur del área de estudio.





**FIGURA 1** Imágen satelital Landsat 7 en donde se ubicó la Lejía, que corresponde al área de estudio. (Tomado de <http://glovis.usgs.gov/>, con Path: 7 y Row: 55)



**FIGURA 2** Localización y delimitación (Polígono negro) del depósito de la Lejía, de acuerdo al índice de planchas del IGAC. (Tomado del sitio web: <http://geoportal.igac.gov.co/ssig/2.0/visor/galeria.req?mapald=19>)



## 4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

El desarrollo de este proyecto de investigación, consta de varias fases: Compilación y análisis de información existente, trabajo de campo, ensayos y análisis de laboratorio, interpretación de resultados de los respectivos ensayos y presentación final del estudio.

### 4.1. Fase I: Compilación y análisis de la información existente

La documentación preliminar al trabajo de campo es la etapa inicial en la cual se consulta información relacionada con el tema general del trabajo y con la zona de estudio. Por lo tanto, es necesario recurrir a diferentes fuentes, ya sean físicas o electrónicas, para conseguir antecedentes sobre el estado de la Paleosismología en Colombia, así como estudios geológicos anteriores, relacionados con la geomorfología y geología estructural en el sitio de interés.

Para este proyecto de investigación se obtuvo información de diferentes fuentes, como artículos publicados en revistas internacionales de geología y tectónica, el Boletín Geológico de Ingeominas, así como la memoria explicativa del Cuadrángulo H-12 y H-13 elaborada por Ingeominas, el Léxico Estratigráfico de Julivert (1968) y los trabajos relacionados con el tema del proyecto, elaborados por diferentes autores como Boinet (1985), Audemard (2003), Espinosa (2003), entre otros, los cuales reposan en las bases de datos de las Bibliotecas UIS y Servicio Geológico Colombiano. También se consideró información pertinente a los ensayos de geotecnia que se realizaron en este proyecto: ensayo de consolidación unidimensional de suelos y ensayo de límites de Atterberg; para ello, se consultó el trabajo de Mecánica de Suelos de Juárez y Rico (2005) y las memorias de clase de mecánica de suelos (inéditas), elaboradas por el



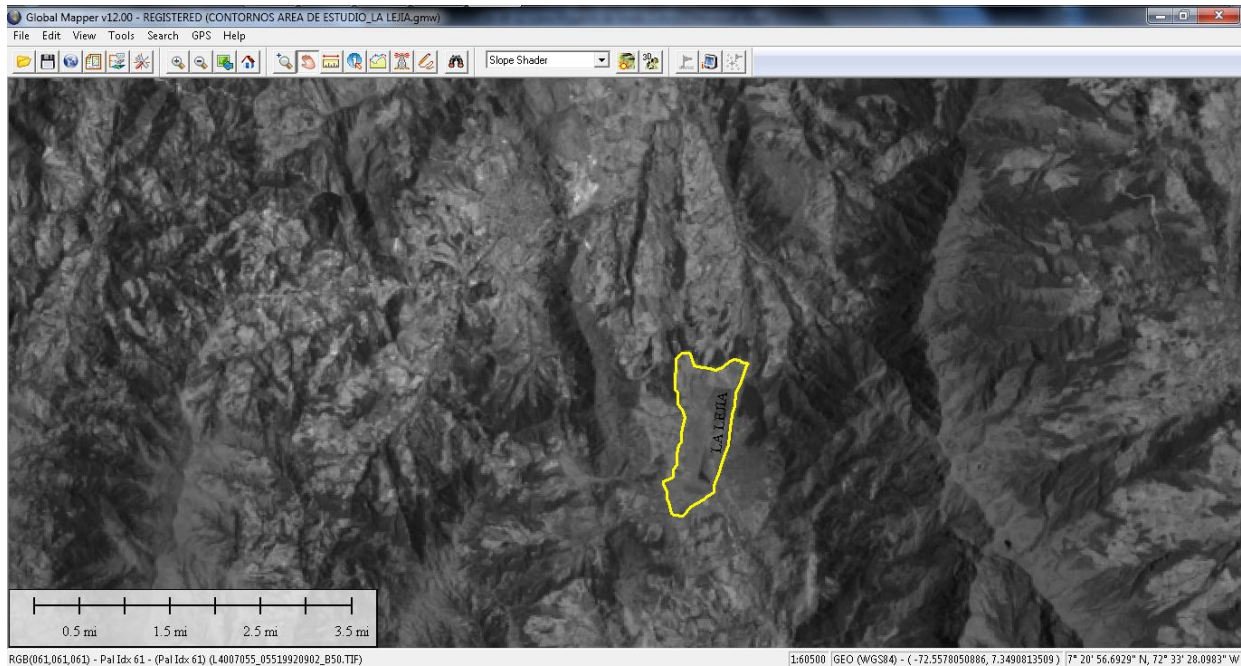
Geotecnista Vladimir Merchán de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander. La información compilada de las fuentes mencionadas se procedió a sintetizar e interpretar para extraer lo más útil en la realización de este trabajo.

Así mismo, como actividad previa a campo, se tramitó la adquisición del material cartográfico con la sede principal del Servicio Geológico Colombiano en Bogotá, entidad que proporcionó a éste proyecto valiosa información topográfica y geológica.

Dentro de la información topográfica que se adquirió, se encuentra la plancha 110-II-C a escala 1:25000 y 4 fotografías aéreas (números 77, 78, 79,80) de la zona de estudio, correspondientes al vuelo C-2498 del IGAC. Así mismo la información geológica que se recopiló incluye la plancha geológica 110 y el cuadrángulo H-13 a escala 1:100000.

Con esta base cartográfica, se realizó la respectiva georeferenciación y digitalización de la plancha topográfica y de las fotografías aéreas, para lo cual se utilizó el SIG Global Mapper 12.0, por su fácil accesibilidad y sencillo manejo (**FIGURA 3**). Así mismo se empleó el programa ArcGIS para elaborar un Modelo digital de elevación (DEM) del sitio de interés, el cual fue de gran ayuda para identificación e interpretación de elementos estructurales y geomorfológicos (**FIGURA 4**).

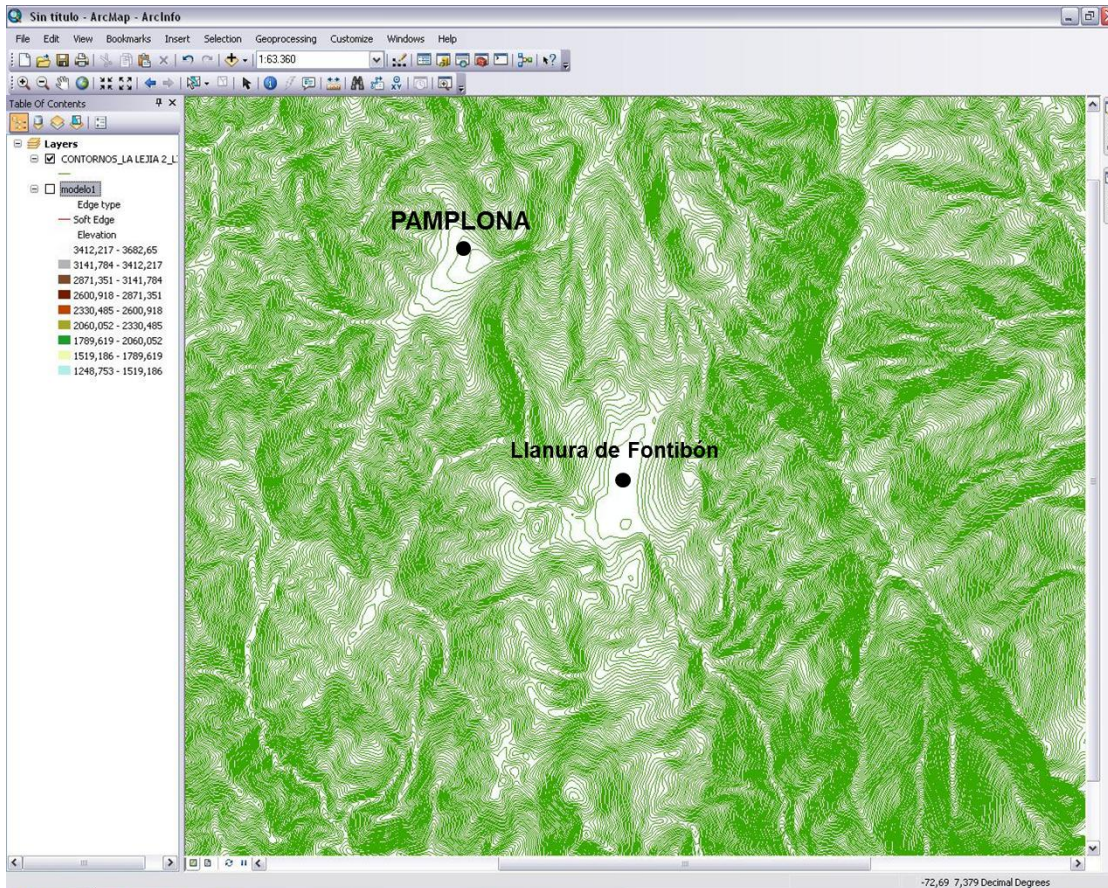




**FIGURA 3** Interface gráfica del Programa Global Mapper 12.0. Se identificó el depósito la Lejía con línea amarilla.

También se realizó una interpretación fotogeológica, la cual se efectuó con ayuda del estereoscopio de espejos, suministrado por la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Mediante la interpretación de las fotografías aéreas se pudieron identificar diferentes rasgos geomorfológicos y estructurales para su posterior comparación y contraste con el mapa geológico de la zona de estudio.





**FIGURA 4** Entorno del Programa ArcGis 10.0 en su extensión ArcMap. Se visualiza el mapa de contornos de la zona de estudio. Las zonas con menor densidad de curvas, corresponden a la cabecera municipal de Pamplona y a la Llanura de Fontibón.

Para una mejor interpretación estructural, se efectuaron tres cortes geológicos en el cuadrángulo H13 de Ingeominas, cuyo trazo en el mapa fue propuesto por el director del proyecto, geólogo Francisco Alberto Velandia Patiño, de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, con el fin de obtener un modelo de la geología regional en esta parte de la Cordillera Oriental; además para aplicar conceptos más actualizados de geología estructural con relación a los cortes geológicos que hacen parte del cuadrángulo H13.



Con base en la información adquirida, se continuó con la siguiente fase del proyecto, que corresponde a la práctica de campo.

#### **4.2. Fase II: Trabajo de Campo**

Esta etapa del proyecto consiste en un trabajo de campo que se llevó a cabo en la vereda Fontibón (sur oriente de Pamplona). En este sector, previamente seleccionado por el Servicio Geológico Colombiano, a través de la actividad “*Tectónica Cuaternaria*” de la Red Sismológica Nacional de Colombia, se han estudiado los depósitos Cuaternarios en Pamplona y alrededores, elaborado por Calderón y Romero (2009). Además dentro de esta actividad se realizó la adquisición geoelectrica efectuada por Moyano (2010). La apertura de trincheras exploratorias que permitieron efectuar el levantamiento sedimentológico de la parte más superficial del depósito sedimentario allí presente y además llevar a cabo un muestreo con dos fines primordiales: Análisis sedimentológico y ensayos geotécnicos.

##### **4.2.1. Apertura y Desarrollo de la Trinchera de Exploración Paleosismológica en el depósito La Lejía (Vereda Fontibón – Pamplona)**

La exploración paleosismológica mediante trincheras, consiste en realizar una o varias excavaciones a manera de zanja en el terreno, con dimensiones determinadas (a partir de ciertos parámetros), para identificar elementos estratigráficos y estructurales en el subsuelo, que sirvan para estudiar el registro de actividad sísmica en una región específica durante el período Cuaternario. En este caso, el principal parámetro que se tiene en cuenta para determinar las dimensiones de la excavación es: La tasa de sedimentación más aproximada para



el depósito, pues de ésta depende el lapso de tiempo cuyo registro geológico se pretenda estudiar.

Para llevar a cabo éste trabajo de campo se planteó inicialmente aplicar y/o adaptar la metodología planteada por Audemard (2003) en sus estudios paleosísmicos por trincheras en Venezuela, dado que en este país se desarrollaron un total de 45 trincheras exploratorias por parte de empresas y entidades como la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), durante un período de 32 años, lo cual refleja la experiencia venezolana en estos temas. También se consideró el trabajo realizado por Osorio *et al.* (2008), quienes efectuaron una Investigación paleosismológica de la Falla de Ibagué, para lo cual emplearon la técnica de exploración por trinchera en el sitio denominado “Los Gomos”. A continuación se presenta una síntesis de la metodología que utilizaron dichos autores en Ibagué (Dpto. del Tolima).

Como primera etapa dentro de su investigación, llevaron a cabo un estudio morfotectónico de la Falla de Ibagué, mediante la interpretación de fotografías aéreas multitemporales. A través de dicho análisis lograron observar gran variedad de rasgos de actividad neotectónica sobre el abanico de Ibagué. Así mismo efectuaron un reconocimiento de campo soportado con interpretación fotogeológica, que permitió comprobar la presencia de elementos morfotectónicos característicos de fallamiento transcurrente, como lagos de falla, lomos de presión lineales, lomos desplazados, drenajes desplazados, trincheras de falla y escarpes de falla. Con esta información realizaron la respectiva cartografía de dichas geoformas y así identificaron los sitios más favorables para efectuar el levantamiento de la trinchera paleosismológica. Luego realizaron una campaña de campo para evaluar los criterios necesarios en la excavación de una trinchera paleosismológica propuestos por Audemard (2003), de esta manera visitaron los sitios identificados previamente y analizaron todas las posibilidades en cada uno

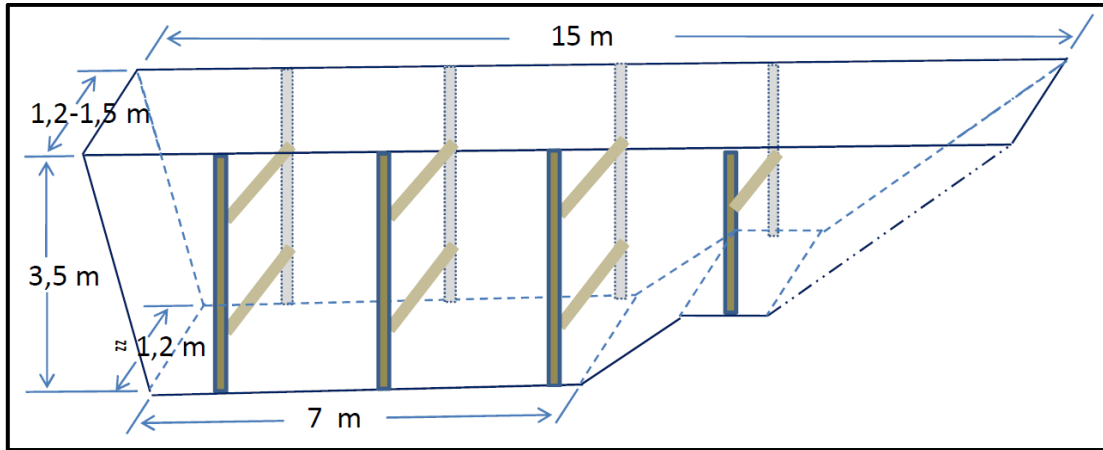


para finalmente seleccionar siete lugares potenciales para el desarrollo de la trinchera. Para cada uno de dichos sitios, elaboraron un listado de ventajas y desventajas con sus respectivas recomendaciones previas a la excavación de la trinchera con el fin de descartar o elegir con mayor seguridad el sitio final de apertura de la misma. Así tomaron la decisión de excavar la trinchera en el sitio denominado “Los Gomos”, el cual está caracterizado por presentar un conjunto de lomos y un lago de falla activo que preserva una completa columna continua de sedimentación con materiales orgánicos.

En el sitio Los Gomos, empezaron por realizar un descapote del suelo y delimitaron con estacas de madera el espacio con unas dimensiones apropiadas para la operación de la maquinaria pesada, el tránsito seguro del personal, así como para deposición del material extraído. Con la brújula controlaron que la dirección de la trinchera fuese perpendicular a la dirección de la falla estudiada. Luego, procedieron a realizar la excavación, la cual tenía un diseño pre-establecido, de tal forma que garantizara una zona de acumulación de aguas y además el espacio suficiente para el personal. Posterior a la excavación de la trinchera, limpiaron las paredes de la misma, para mejorar la visibilidad e identificación de elementos geológicos de interés. El trabajo de descripción se efectuó con ayuda de una grilla que se montó sobre las paredes de la trinchera para facilitar la ubicación de estructuras y contactos geológicos.

El plan para realizar la apertura de una trinchera en el sector Centro-Norte de la llanura de Fontibón en la Lejía, incluyó una profundidad de 3 m con base en los resultados de los sondeos realizados por Moyano (2010), los cuales demostraron que en ésta zona se tienen los mayores espesores de relleno Cuaternario (**FIGURA 5, FIGURA 6 y FIGURA 7**).



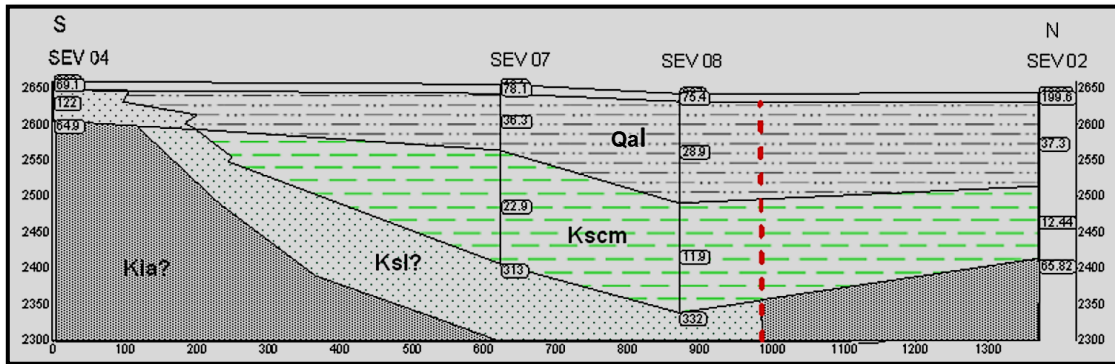


**FIGURA 5** Esquema inicial propuesto para la Trinchera de exploración paleosismológica en el sitio la Lejía (Tomado de Ingeominas, 2011).

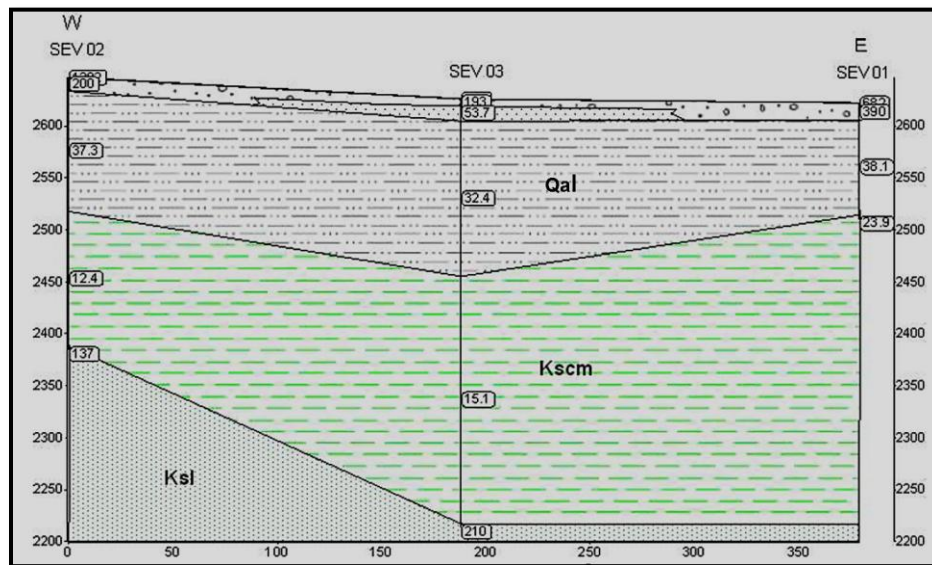
Sin embargo, en la trinchera de exploración paleosismológica del depósito La Lejía, no se logró ejecutar el mismo procedimiento de Osorio *et al.* (2008), ni tampoco se logró cumplir a cabalidad con el esquema inicial propuesto, por lo que fue necesario aplicar algunos ajustes, debido a que las condiciones de la zona de estudio eran totalmente diferentes y reunían algunas características particulares que limitaron los alcances y el desarrollo de la Trinchera:

- Las condiciones de accesibilidad de maquinaria pesada no fueron adecuadas. El ingreso y transporte de la retroexcavadora hasta el sitio de apertura de la trinchera fue bastante complicado debido a la alta saturación del suelo por las frecuentes lluvias y en consecuencia, el comportamiento plástico que adoptó. La retroexcavadora ingresó al depósito, sin embargo, sólo se pudo desplazar unos cuantos metros hasta que las llantas quedaron atascadas en el suelo, y por lo tanto la máquina debió instalarse en ese punto para abrir allí una trinchera de exploración parcial.





**FIGURA 6** Perfil geoelectrico en el que se observa un acuñamiento de la unidad Cuaternaria Qal (Tomado de Moyano, 2010)



**FIGURA 7** Perfil geoelectrico en el que se observa el mayor espesor (150 m) de la Unidad Qal hacia el centro del depósito (Tomado de Moyano, 2010)

- Las condiciones geotécnicas del material del depósito no eran aptas para llevar a cabo la apertura mecanizada de la trinchera, para el levantamiento



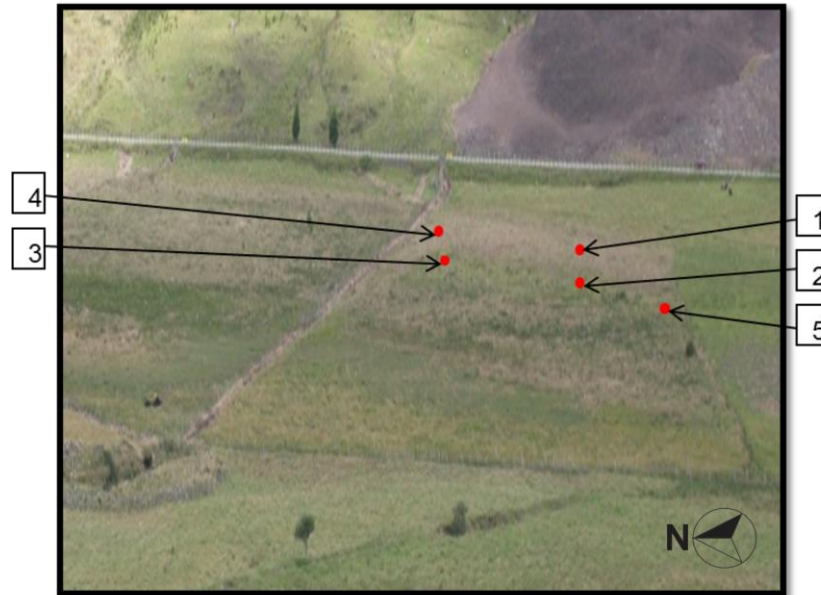
sedimentológico y el muestreo. Las vibraciones generadas sobre el terreno por la acción de la retroexcavadora, provocó el colapso de las paredes de la trinchera de exploración parcial.

- La pluviosidad y la red de drenaje del sector, actuaron como recarga natural del nivel freático. Esto provocó una rápida saturación del suelo en el momento de realizar la excavación mecanizada, por lo que la gran cantidad de agua y el comportamiento arcilloso del material proporcionaron unas condiciones no adecuadas para trabajar en el interior de las zanjas abiertas.

Debido a estas razones, se aplicó la siguiente metodología:

1. Se realizaron cinco pequeños apiques en diferentes sectores del depósito cubriendo un radio de aproximadamente 40 metros y se efectuaron mediciones manuales de profundidad del nivel freático, con el objetivo de tener puntos de control, y así encontrar el sitio más apropiado para trabajar en cuanto a condiciones de humedad. Los puntos con mayor profundidad del nivel freático, se georeferenciaron y consideraron como posibles sitios de apertura de trinchera (**FIGURA 8**).
2. Con la información de la profundidad de los niveles freáticos, se escogieron tres sitios que reunieron las condiciones favorables para trabajar. Estos puntos se marcaron con estacas pintadas con aerosol rojo para su visualización y se denominaron: Trinchera-1, Trinchera-2 y Trinchera-3 (**FIGURA 9**).
3. Como actividad previa a la apertura de las trincheras, se utilizó la brújula para controlar que el rumbo de la excavación fuese perpendicular a la estructura estudiada.





**FIGURA 8** Localización en campo de los apiques realizados para medición de nivel freático.



**FIGURA 9** Demarcación con estacas para localizar los sitios de apertura de las Trincheras.



4. En uno de los lugares previamente seleccionados, se procedió a abrir manualmente la Trinchera-1. Para abrir esta trinchera, fue necesario solicitar el apoyo de personal apto para realizar la excavación, por lo que fue importante la ayuda de miembros del cuerpo de bomberos de Pamplona y algunos empleados del predio en donde se trabajó. Se utilizaron implementos de agricultura y construcción, como azadones, paladragas, picas y palas, además de elementos de logística como estacas, tablas, cintas, plásticos de protección, sogas, entre otros. Se tomaron medidas de seguridad apuntalando las paredes de la zanja con tablas. Esta trinchera permitió tomar un par de muestras y el agua no tardó en aparecer, dificultando las condiciones de trabajo (**FIGURA 10**).



**FIGURA 10** Apertura manual de la Trinchera-1.

5. La Trinchera-2 reunió las mejores condiciones para trabajar, por lo que permitió la adquisición de varias muestras y la elaboración de un esquema de la geometría



y dimensiones finales de la excavación. La apertura de ésta trinchera se realizó manualmente y se tuvieron en cuenta aspectos como: La geometría, seguridad y el control de humedad. El diseño que se planteó para la construcción de la trinchera consideró permitir el espacio suficiente para trabajar en su interior y se garantizó también la existencia de algunos escalones para el ingreso y salida del personal (**FIGURA 5**). En cuanto a la seguridad, se fijaron tablas sobre el suelo para garantizar una circulación más segura, también se utilizaron estacas grandes de madera con tablas para entibar las paredes de la trinchera y evitar el colapso de las mismas. Para evitar que el agua de lluvia inundara la excavación, se construyó un techo con plástico para cubrir la trinchera. Así mismo, se dispuso de una motobomba suministrada por el cuerpo de Bomberos de Pamplona para retirar el agua en caso de una inevitable inundación de la trinchera, evento que se presentó en la apertura de la Trinchera-3 (

**FIGURA 11).**



(a)

(b)

**FIGURA 11** (a) Vista de la Trinchera-2 con entibado de las paredes. (b) Carpa para proteger el interior de Trinchera-2 contra la lluvia.



6. La apertura de la trinchera 3, se realizó con la retroexcavadora. En esta trinchera, se realizó un foto-mosaico de la pared este, y también se recolectaron dos muestras, para análisis geoquímicos y para datación con  $C^{14}$ . Sin embargo, el trabajo en esta trinchera se obstaculizó por la aparición del nivel freático y por las precipitaciones, lo cual produjo el colapso de dos de las paredes de la excavación a pesar de haberse apuntalado. Por lo tanto, se utilizó la motobomba para extraer el agua del interior y así poder llevar a cabo la toma de las muestras mencionadas y finalmente cerrar la trinchera (**FIGURA 12**).



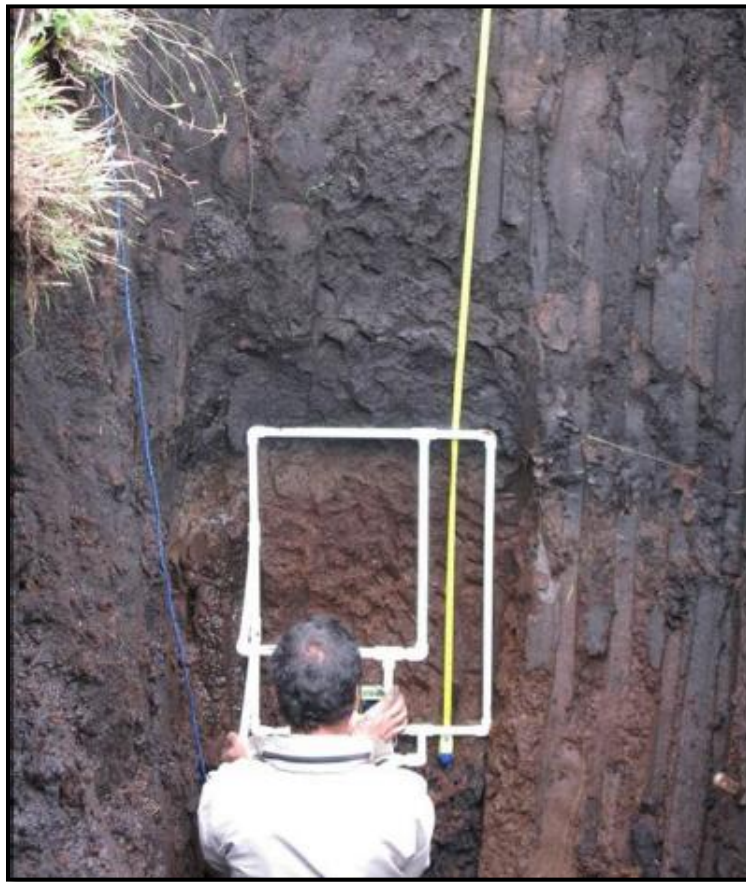
(a)

(b)

**FIGURA 12** Apertura de la Trinchera-3 con retroexcavadora (a). Nótese el nivel freático y el colapso de algunas de las paredes a pesar del apuntalado (b).

El foto-mosaico de la pared este de ésta trinchera, se realizó mediante la construcción de un aparato hecho en tubería de PVC, que se utilizó como base

para montar la cámara fotográfica y así tomar las fotografías de forma rápida y sin distorsión en los extremos de la imagen. A éste mecanismo se le llamó *Log-matic*. Este modelo cuyo análisis es mostrado en el capítulo de resultados, fue elaborado por Ingeominas quienes lo tomaron y adaptaron de Machette y Lund (1987), sin embargo, las dimensiones finales del mismo se adecuaron al tipo de cámara para capturar una mejor vista panorámica del objeto enfocado (**FIGURA 13**).



**FIGURA 13** *Log-matic* construido para elaborar el foto-mosaico de la pared este de la Trinchera-3.



#### 4.2.2. Muestreo en el interior de las Trincheras

Se efectuaron tres tipos de muestreo diferentes: Muestreo sedimentológico, muestreo para datación con  $C^{14}$  y muestreo geotécnico.

El muestreo con fines sedimentológicos se realizó con muestras de aproximadamente 500 gr de suelo, que se empacaron en papel aluminio. Dicha envoltura se enrolló con cinta de enmascarar para rotular la muestra con marcador permanente punta fina. Se cubrió la rotulación con cinta aislante transparente para evitar que el agua y la humedad removieran la tinta del marcador generando confusiones en cuanto a la identificación de cada muestra.

En el caso de las muestras para datar, se aplicó la misma metodología que en el muestreo sedimentológico, sin embargo, se utilizó adicionalmente papel film, el cual se envolvió sobre el papel aluminio para enrollar con cinta de enmascarar. Se emplearon mayores cantidades tanto de papel como de cinta y además las muestras se introdujeron en bolsas negras para evitar al máximo la exposición directa a la luz solar.

El muestreo geotécnico se realizó de dos formas: con pedestal y con tubo de PVC.

El objetivo del muestreo en pedestal fue tomar muestras con el mínimo de alteración en cuanto a esfuerzos, es decir, que las fuerzas ejercidas sobre el suelo para extraer la muestra sean mínimas de manera que no incrementen las fuerzas naturales a las que este ha sido sometido en su historia geológica. De esta manera se pueden efectuar ensayos de consolidación con mayor grado de certidumbre en los resultados. Para efectuar dicho muestreo, fue necesario excavar un peldaño sobre la superficie del terreno para extraer de allí la muestra. Entonces, se demarcó cada dimensión de la muestra con una espátula para tener un control del tamaño del cubo a extraer. Se dejaron por lo menos 4 cm de espacio en cada dimensión para el corte, y así evitar la pérdida de muestra. Para



realizar el corte, se utilizó un machete humedecido para seccionar con mayor facilidad el suelo. Finalmente, el cubo de muestra se depositó en una caja hermética de icopor, recubierta en sus paredes con papel aluminio y debidamente sellada, esto para mantener las condiciones de humedad originales de la muestra y así reducir el error en los ensayos de humedad natural. También se señaló con una flecha, apuntando hacia el techo de la muestra, para recordar la posición original de la misma en el subsuelo (**FIGURA 14**).



**FIGURA 14** Muestra en pedestal para ensayos de consolidación unidimensional de suelos.

El muestreo con tubos de PVC se efectuó como una alternativa para tomar muestras que se encontraban en situación de difícil accesibilidad para realizar el pedestal, por ejemplo en el piso de la trinchera. No obstante, estas muestras tienen cierto grado de alteración en cuanto a parámetros de esfuerzos, pues el



tubo de PVC de 3" se incrustaba a presión sobre el suelo para que la muestra ingresara en el núcleo del mismo. Para facilitar el muestreo, se afiló uno de los extremos del tubo, de manera que su borde penetrara con mayor facilidad en el suelo. Además se marcó con una flecha apuntando hacia el borde del tubo donde se encontraba el techo, para conocer la posición original en la que se tomó la muestra. Las muestras tomadas mediante este mecanismo se utilizaron en ensayos de límites de Atterberg, sin embargo, una de ellas se debió emplear en ensayo de consolidación debido a que no era posible tomar una muestra pedestal del suelo en la parte inferior de la trinchera y era necesario muestrear dicho material para realizar estos ensayos (**FIGURA 15**).



**FIGURA 15** Toma de muestras con Tubo de PVC.

Es importante anotar, que todas las muestras fueron rotuladas con la fecha, el punto de la estación GPS, número de trinchera, profundidad de la muestra y su respectivo objetivo de muestreo. Por ejemplo, una muestra para ensayos de geotecnia, tomada en el interior de la Trinchera-2, lleva por nombre: TR2-M1G, lo que significa Trinchera-2 (TR2), Muestra 1 (M1), Geotecnia (G). En el caso de muestras para análisis sedimentológico, la letra al final del rótulo es S; para datación radiométrica la letra al final es D y finalmente para Geoquímica (Difracción de Rayos X) se usan las letras RX.

Con las muestras adquiridas en campo se prosiguió a realizar los ensayos de laboratorio pertinentes a este proyecto.

Durante esta fase de campo, también se comprobaron aspectos de la geomorfología y estratigrafía que rodea al depósito la Lejía, mediante un reconocimiento de campo y adquisición de algunos datos geológicos y fotografías en esta zona.

#### **4.3. Fase III: Ensayos y análisis de laboratorio**

La fase de laboratorio consistió en: Descripción sedimentológica de muestras, Difracción de rayos X, Fluorescencia de rayos X y ensayos geotécnicos: humedad natural, consolidación unidimensional de suelos y límites de Atterberg.

##### **4.3.1. Propiedades físicas del suelo y descripción sedimentológica**

Para la descripción sedimentológica se utilizaron lupas de detalle del laboratorio sedimentológico de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Como el tamaño de grano de las muestras recolectadas no superaba



la fase arcillosa, se efectuó una descripción textural, basada en algunos aspectos definidos por Cruz y Caballero (2001), en el manual de laboratorio de sedimentología. Se consideraron aspectos como: Color, tamaño de grano, mineralogía, porosidad y contenido apreciable de materia orgánica, estos dos últimos contribuyeron de manera especial en la evaluación de las propiedades físicas de la muestra como la resistencia en estado seco, dilatancia, tenacidad y la dispersión o sedimentación.

Dicha descripción sedimentológica se complementó con análisis químicos, mediante fluorescencia de rayos x (FRX) y difracción de rayos x (DRX), como base para interpretación del origen y paleoambiente de formación de este depósito, lo cual se efectuará con mayor detalle, una vez se cuente con los resultados de las dataciones de carbono 14 por parte del Servicio Geológico Colombiano en un estudio posterior. Las DRX, se realizaron en los laboratorios de geoquímica del Servicio Geológico colombiano en Bogotá.

Las propiedades físicas del suelo se determinaron mediante ensayos manuales para determinar el grado de resistencia en estado seco, dilatancia, tenacidad y dispersión o sedimentación. Mediante la repuesta que presenta la muestra a estos análisis se puede determinar físicamente la clasificación del material. A continuación se presenta el procedimiento utilizado en la identificación de cada una de estas propiedades en dos muestras de suelo: TR2-M1S y TR2-M2S. Cada ensayo se repitió tres veces para cada muestra, con el fin de obtener resultados más confiables. La metodología aplicada en la determinación de cada propiedad está basada en el trabajo de Duque y Escobar (2002).



#### 4.3.1.1. Resistencia en estado seco

Se tomó una muestra representativa del suelo, que fue sometida a un proceso de secado en el horno. La muestra seca se golpeó con un martillo y de esta forma se midió la resistencia del suelo observando el grado de fracturamiento (**FIGURA 16**).

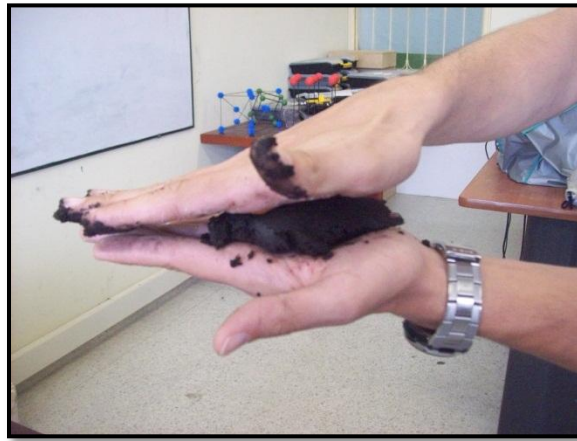


**FIGURA 16** Prueba de resistencia en estado seco.

#### 4.3.1.2. Dilatancia

También se conoce como prueba de sacudimiento. Se tomó una porción de muestra húmeda en la palma de la mano y luego se golpeó con la otra mano por debajo. La presión que ejerce la mano permitió que el agua del suelo aflorara. Por lo tanto, la dilatancia del suelo se midió considerando la cantidad de agua y la rapidez con la cual fue expulsada (**FIGURA 17**).





**FIGURA 17** Prueba de dilatancia.

#### 4.3.1.3. Tenacidad

En esta prueba se evaluó la plasticidad del suelo, formando rollitos de 1/8" o 3mm de suelo húmedo y se observó el nivel de agrietamiento de cada rollo al frotarlo contra una superficie plana (**FIGURA 18**).



**FIGURA 18** Prueba de tenacidad.



#### 4.3.1.4. Sedimentación o dispersión

Para determinar esta propiedad, se disgregó el suelo triturándolo para separar los granos; luego se realizó una suspensión en agua dentro de un recipiente de vidrio, se mezcló y se dejó reposar midiendo el tiempo que tardó la totalidad de la muestra para asentarse en el fondo del recipiente (**FIGURA 19**).



**FIGURA 19** Análisis de la sedimentación y/o dispersión.

#### 4.3.2. Ensayos de Geotecnia

Los ensayos de geotecnia se llevaron a cabo en los laboratorios de suelos de la Universidad Industrial de Santander, siguiendo la metodología propuesta en las normas técnicas colombianas: NTC-1493, NTC-1494, NTC-1495, NTC-1967.

#### 4.3.2.1. Humedad Natural

Se utilizó una estufa de secado, recipientes de aluminio y una espátula. Para calcular el peso de la muestra se empleó una balanza analítica de sensibilidad 0.1mg. Se pesó el recipiente en el cual se introdujo la muestra de suelo. Una pequeña cantidad de suelo fue extraída de las cajas de icopor, y luego se llevó al recipiente de aluminio para pesarlo junto con la muestra en la balanza analítica. Con el peso del recipiente y recipiente + muestra, se calculó el peso de la muestra saturada. La muestra se introdujo en la estufa electrónica de secado donde se dejó durante un período de 24 horas para evaporar el agua contenida en los poros de la muestra. Luego se dejó enfriar la muestra durante 30 minutos aproximadamente, para posteriormente pesarla en la balanza analítica y calcular el peso de la muestra seca. Este ensayo se llevó a cabo según Icontec (2000), en la norma técnica colombiana NTC- 1495 (**FIGURA 20**).



**FIGURA 20** Peso de la muestra en la balanza analítica para el cálculo de Humedad Natural.



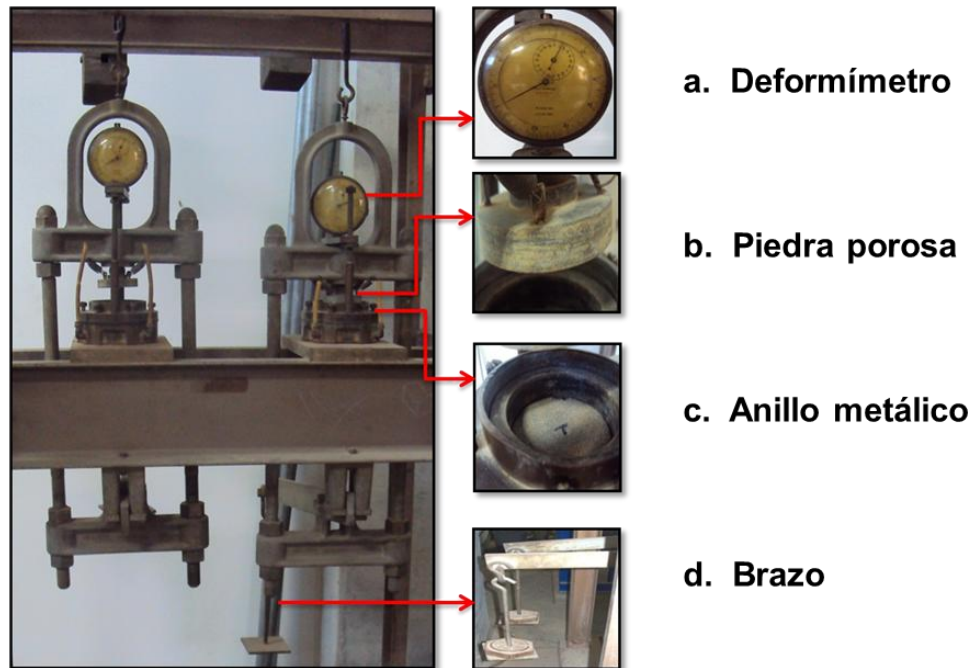
#### 4.3.2.2. Consolidación Unidimensional de Suelos

El ensayo de consolidación de suelos es una técnica que busca establecer el grado de asentamiento que percibe una muestra de suelo saturado cuando ésta es sometida a presiones de carga. Para la realización de este tipo de pruebas se requiere de una serie de parámetros que están establecidos en Icontec (2000) en la norma técnica colombiana NTC- 1967, que documenta los pasos a seguir en una prueba de consolidación unidimensional de suelos.

Este método solo permite registrar la deformación vertical que experimenta el suelo, para lo cual, la muestra debe ser limitada lateralmente y de esta manera, por efecto de la acción de carga ejercida, se libera el exceso de agua contenida en los poros. La herramienta que permite efectuar esta medición es el Consolidómetro, equipo conformado por los siguientes elementos (**FIGURA 21**):

- Anillo Metálico: Cilindro metálico hueco que impide que la muestra se deforme lateralmente. El peso del anillo es 106.6 g, y sus dimensiones son: Altura 24 mm; Diámetro externo 71 mm; Diámetro Interno 62 mm.
- Piedras porosas: Estas piedras se encargan de ejercer la presión sobre la muestra, se ubican en la parte superior e inferior del anillo y permiten el drenaje en las dos caras. El diámetro de las piedras es menor que el diámetro interno del anillo metálico.
- Brazo de carga: Palanca en la cual se aplica la carga a la cual será sometida la muestra.
- Deformímetro: Permite medir la variación en el espesor de la muestra, cuenta con una sensibilidad de 0.0025 mm.





**FIGURA 21** Partes fundamentales que conforman un Consolidómetro.

Las condiciones que se tuvieron en cuenta para llevar a cabo éste ensayo fueron:

- La muestra a utilizar en el ensayo debe ser de forma cilíndrica, de modo que encaje dentro de las dimensiones del anillo que va a contenerla.
- El brazo de carga debe mantener las cargas aplicadas durante períodos prolongados con una precisión de  $\pm 0.5$  % de la carga aplicada y permitir la aplicación de un incremento de carga, en un período de 2 segundos sin que se produzca ningún impacto significativo.
- La relación mínima del diámetro al espesor de la muestra deberá ser 2.5.
- La rigidez del anillo deberá ser tal, bajo las condiciones de la presión hidrostática de la muestra, que el cambio del diámetro del anillo no pasará del 0.3 % del diámetro bajo la mayor carga que se aplique



- En la constitución la porosidad de las piedras porosas deberá ser lo suficientemente fina para evitar la intrusión del suelo dentro de sus poros.
- El espesor de la piedra deberá ser suficiente para evitar su rotura.
- Las muestras se deben encontrar selladas de tal forma que no pierdan humedad durante el almacenamiento (**FIGURA 22**).
- Las muestras deberán prepararse en un cuarto donde el cambio de la humedad no sea mayor de 0.2 %.
- Los ensayos deberán efectuarse en un ambiente donde las fluctuaciones de la temperatura no sean mayores que  $\pm 4$  °C y donde no haya contacto directo con la luz del sol.
- Como el ensayo se realiza en una muestra inalterada saturada, bajo las condiciones del terreno, ésta se debe inundar antes de aplicar el primer incremento de carga, puesto que la muestra se hallaba originalmente por debajo del nivel freático.

El ensayo de consolidación unidimensional de suelos se ejecutó durante un periodo de 9 días. El primer día de ensayo corresponde al montaje de preconsolidación. En este día, se pesó inicialmente el anillo mediante una balanza analítica, luego se introdujo en la muestra de suelo de tal forma que ésta se adecuara a las dimensiones del anillo, medidas previamente. Posteriormente, se procedió a pesarlo junto con la muestra. Mediante cálculos teóricos y teniendo como base el peso inicial del anillo se calculó el peso de la muestra.





**FIGURA 22** Cajas herméticas donde se encuentra almacenada una de las muestras en pedestal que se utilizó en el ensayo de consolidación.

Se aplicó en el dispositivo de carga del consolidómetro una carga de asentamiento inicial de 3 kPa considerando que se trata de un suelo arcilloso. Dentro de los 10 minutos siguientes a la aplicación de ésta, se ajustó el deformímetro para la lectura de cero. En la lectura inicial se colocó una carga sobre el consolidómetro para obtener presiones sobre el suelo de 600 g. A partir del momento en que se ubicó la carga se procedió a tomar las lecturas del deformímetro en los siguientes intervalos de tiempo: 1,2, 4, 5, 8, 15, 30 (min), 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 Horas, que corresponden a tiempos estándares para registrar los datos de deformación de la muestra en el ensayo. Estos intervalos de registro de datos, son los mismos durante los 8 días siguientes al ensayo de preconsolidación. A las 24 horas de



iniciada la toma de datos se procedió a ubicar la carga de 400 g correspondiente al primer día de ensayo la cual se sumó a la carga de 600 g existente para lograr una carga total de 1000g. El segundo día se adicionaron 1000 g, por tanto, la carga total acumulada fue de 2000g. El tercer día se adicionan 2000g y así la carga acumulada fue de 4000g. El cuarto y quinto día se procede a la descarga, se retiran 2000 y 1000 g respectivamente, por lo cual la carga total pasa a 1000g. El día 6 empieza el proceso de recarga donde se le añaden 1000 g. Luego, en el día 7 se le suman 2000 g más, dejando una carga acumulada de 4000 g. Finalmente, en el día 8 se le aplicó una carga de 4000g, quedando una carga total para el último día de ensayo de 8000 g (**FIGURA 23**).



**FIGURA 23** Registro de lecturas de la deformación en el Deformímetro.

Posterior a los 8 días se proceden a elaborar los diversos cálculos de desplazamiento y variación de altura, entre otros, para realizar las gráficas de deformación y así obtener los diferentes parámetros de consolidación pertinentes



a éste proyecto. Este procedimiento es aplicable a las dos muestras en estudio por lo que el tiempo total del ensayo correspondió a 18 días (**FIGURA 24**).



**FIGURA 24** Muestras almacenadas en PVC. Se muestra la profundidad a la que fue tomada cada una.

#### 4.3.2.3. Límites de Atterberg

Este concepto permite definir a grandes rasgos los diversos estados en los que se puede encontrar el suelo, dependiendo del contenido de agua, se presentan así todos los estados de consistencia, desde un sólido frágil, pasando por un sólido elástico, hasta un líquido. (Sanz, 1975).



### Límite Líquido

El límite líquido es un ensayo que demuestra el grado de elasticidad que presenta un material mediante la relación esfuerzo-deformación la cual se encuentra influenciada por la cohesión entre las partículas que conforman un material. El principal Método utilizado para la determinación del límite líquido es descrito por Juárez y Rico (2005) y se realiza mediante la técnica que utiliza la copa de Casagrande (**FIGURA 25**).



**FIGURA 25** Copa de Casagrande manual empleada en el ensayo de límites.

Este aparato consiste en un recipiente de bronce con un taco del mismo material, el tacón y la copa giran en torno a un eje unido a la base del instrumento. Los demás materiales y equipo que se utilizó para este ensayo se detallan a continuación:



- Mortero porcelana: Una vasija de porcelana de 115 mm (4 1/2") de diámetro aproximadamente.
- Espátula: Una espátula de hoja flexible de 75 mm (3") de longitud y 20 mm (3/4") de ancho aproximadamente.
- Aparato del Límite Líquido de operación manual: Es un aparato consistente en una cazuela de bronce con sus aditamentos, construido de acuerdo con dimensiones específicas.
- Ranurador: Material que puede ser curvo para dividir la muestra en el aparato de Casagrande antes de comenzar el golpeo (**FIGURA 26**).
- Calibrador: Ya sea incorporado al ranurador o separador, de acuerdo con la dimensión crítica "d" puede ser, si fuere separada, una barra de metal de  $10.00 \pm 0.2$  mm ( $0.394 \pm 0.008$ ") de espesor y de 50 mm (2") de largo aproximadamente.
- Recipientes: Hechos de material resistente a la corrosión, y cuya masa no cambie con repetidos calentamientos y enfriamientos. Deben tener tapas que cierren bien, para evitar las pérdidas de humedad de las muestras antes de la pesada inicial y para evitar la absorción de humedad de la atmósfera tras el secado y antes de la pesada final.
- Balanza: una balanza con una sensibilidad de 0.01 gr.
- Horno: Un horno termostáticamente controlado y que pueda conservar temperaturas de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ) para secar la muestra.
- Tamiz de  $\Phi$  425 mm (No. 40): Malla que permite que solo pasen partículas de determinado tamaño.





a.

b.

**FIGURA 26 (a) Uso del ranurador para separar la muestra; (b) Muestra lista para empezar el ensayo.**

La muestra se trabajó libre de humedad, lo cual se logró colocando la muestra a una temperatura de 100°C en el horno electrónico por un día. Se trituro la muestra seca en un mortero y se tomaron aproximadamente 100 g, luego se procedió a pasarla por el tamiz de 0.425 mm (No 40). Posteriormente se colocó la muestra de suelo en la vasija de evaporación y se mezcló completamente con 20 ml de agua destilada, se agitó, amasó y tajó con una espátula en forma alternada y repetida. Se realizaron más adiciones de agua en incrementos de 1 a 3 ml. Mezclándose completamente cada incremento de agua con el suelo como se describió previamente, antes de cualquier nueva adición. Luego se colocó la muestra en un recipiente que impidió la evaporación hasta que se saturó la muestra, por un periodo de 24 horas. Con la espátula se colocó una cantidad de la muestra en la copa de Casagrande comprimiéndola hacia abajo y nivelándola hasta conseguir una profundidad de 1 cm en el punto de máximo espesor. Seguidamente se pasó el ranurador en la parte central de la muestra que se encuentra en la copa, así se dividió la muestra en dos partes iguales. Luego se golpeó la copa girando la manija a una velocidad de dos revoluciones por segundo, hasta que las dos



mitades de la pasta de suelo se pongan en contacto en el fondo de la ranura, a lo largo de una distancia de cerca de 13 mm (0.5"). Se registraron el número de golpes que se necesitaron para cerrar las dos mitades. Se sacó una tajada de suelo aproximadamente del ancho de la espátula, tomándola de uno y otro lado y en ángulo recto con la ranura e incluyendo la porción de esta en la cual se hizo contacto, y se colocó en un recipiente adecuado donde se procedió a pesar en la balanza analítica. Por último se colocó la porción del suelo en el horno a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ) hasta obtener peso constante y se volvió a pesar tan pronto como se enfrió, pero antes de que pudieran haber absorbido humedad alguna. Posteriormente se anotó este nuevo peso.

Se repitió la operación anterior en tres ensayos adicionales con el suelo restante en la vasija de porcelana, al que se le agregó agua suficiente para ponerlo en un estado de mayor fluidez. El objeto de este procedimiento fue obtener muestras de tal consistencia, que el número de golpes requeridos para cerrar la ranura del suelo, fuese el más cercano a los valores estándares que están dados por los siguientes intervalos: 25-35; 20-30; 15-25. Esta práctica se ejecutó según Icontec (2000), con la norma técnica colombiana NTC-1494.

### **Límite Plástico**

De acuerdo con Juárez y Rico (2005), el límite de plasticidad permite mediante el índice plástico, catalogar el grado de amasado que concede un determinado suelo mientras este se encuentre en su consistencia plástica. Entre los elementos utilizados para este ensayo están:

- Espátula, de hoja flexible, de unos 76.2 mm (3") de longitud por 20 mm (3/4") de ancho.
- Cápsula para evaporación, de porcelana o similar; recipiente que evite la alteración y evaporación de la muestra



- Balanza: una balanza con una sensibilidad de 0.01 gr.
- Horno: Un horno termostáticamente controlado y que pueda conservar temperaturas de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ) para secar la muestra.
- Agua destilada.
- Vidrios de reloj, o recipientes adecuados para determinación de humedades.
- Superficie lisa, para amasado y enrollamiento.- Comúnmente se utiliza un vidrio grueso esmerilado o una hoja de papel blanca limpia y totalmente seca.

Se realizó el secado previo del material en el horno a una temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$ . Se tomaron aproximadamente 20 g de la muestra que pasó por el tamiz de 425  $\mu\text{m}$  (No.40), obtenidos de acuerdo con las Normas INVE-106 o INVE-107 (Preparación en seco y en húmedo de muestras de suelo para análisis granulométrico y determinación de las constantes físicas). Se amasó con agua destilada hasta que se formó una esfera con la masa de suelo. Se tomó una porción de unos 6 g de dicha esfera como muestra para el ensayo. Se moldeó la mitad de la muestra en forma de elipsoide, y a continuación, se rodó con los dedos de la mano sobre una hoja de papel seca, formándose cilindros los cuales tienen que llegar hasta un diámetro de 3 mm, donde se desmoronaron luego de 2 intentos (**FIGURA 27**)





**FIGURA 27** Procedimiento para hallar el límite plástico, se detallan los rollitos de 3 mm de diámetro.

Aunque Atterberg no definió el diámetro de estos rollitos, Terzagui agregó la condición de que el diámetro fuese de 3 mm (1/8"). La porción obtenida se colocó en recipientes y se continuó el proceso hasta reunir unos 5 g de suelo, por último se determinó la humedad. Icontec (2000), con la norma técnica colombiana NTC-1494.

#### **4.4. Fase IV: Interpretación de Resultados**

A partir de cada uno de los ensayos y análisis de laboratorio, se obtienen resultados que son útiles para entender y comprender el origen, comportamiento y evolución de la parte superficial de este depósito, por lo cual, es importante llevar a cabo una interpretación de dichos resultados desde el punto de vista geológico. Para cumplir esta tarea fue necesario aplicar conceptos fundamentales de las diferentes ramas de la geología, donde además se contó con la orientación y la opinión de geólogos de experiencia en el tema; de ésta manera se integraron los resultados dando respuesta a la problemática planteada. Los resultados obtenidos y la interpretación se consignan más adelante en el capítulo respectivo.



## 5. ANTECEDENTES

Desde el punto de vista tectónico, Colombia se encuentra en el punto de convergencia de tres placas tectónicas. Como consecuencia de esta dinámica, se generan deformaciones tectónicas corticales, actividad volcánica y sísmica en el territorio colombiano.

La actividad sísmica en Colombia ésta asociada a cuatro zonas principales: Sismos de corteza asociados a sistemas de falla; sismos de subducción del Pacífico; sismicidad de Boyacá – Santander y Nido de Bucaramanga; Sismicidad de corteza difusa (Taboada *et al.* (1998). Desde este punto de vista, nuestro territorio está expuesto a una alta amenaza sísmica, y la población nacional es el primer elemento vulnerable ante dicha amenaza. En consecuencia, el Servicio Geológico Colombiano ha incluido en su estructura la Red Sismológica Nacional de Colombia, la cual busca realizar estudios que permitan profundizar acerca del rol que ha desempeñado en la actividad sísmica la configuración tectónica-estructural de nuestro país, tema clave en el Ordenamiento Territorial, para garantizar la seguridad e integridad de los cerca de cuarenta y siete millones de habitantes de la República de Colombia.

Es así como Taboada *et al.* (1998), en su trabajo sobre “Sismotectónica de Colombia”, presentan una compilación de información basada en datos de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSCN) y en estudios de Neotectónica realizados en el país, con el fin de conocer el estado en que se encuentra el conocimiento integrado de la sismicidad y tectónica de Colombia. En su estudio definen los sismos de magnitud mayor e igual a 7,0 en el registro de la historia sísmica de nuestro país y presentan la respectiva localización de su epicentro, así como una síntesis de los efectos y daños que produjeron los sismos más destructivos entre los siglos XIX y XX en las diferentes regiones de Colombia.



Dentro de esta información se destaca el sismo más antiguo de magnitud 7,0, que aparece en el registro, cuyo epicentro se localizó en el municipio de Herrán (Norte de Santander) y que tuvo lugar el 16 de Enero de 1644, (Espinosa, 1993). Además de este, se resalta la ocurrencia de otros tres eventos: El de Mayo 29 de 1875 con epicentro en la zona limítrofe entre la Cordillera Oriental colombiana y los Andes de Mérida (Venezuela), con una magnitud de 7,7, el cual también fue reportado por Espinosa (1993) y que causó estragos en la infraestructura de Cúcuta y Villa del Rosario; los otros dos eventos registrados en esta zona fueron los del 10 de Abril de 1911 en el límite entre Colombia-Venezuela con magnitud de 7,2, y el de Julio 9 de 1950 cuyo epicentro se localizó en el Cerro el Viejo (Norte de Santander) con una magnitud de 7,0 (Ramírez, 1975).

Otro trabajo importante fue el de Espinosa (2003), quien compiló y sintetizó los diferentes trabajos sobre sismicidad histórica de nuestro país, desde el siglo XVII hasta los aportes que se hicieron a finales del siglo XX. El autor destaca la obra de Vergara (1898), quien escribió la “Cronología Sísmica”, y considera este trabajo como la primera investigación técnica sobre sismicidad histórica en Colombia, pues afirma que se fundamentó en información contenida en toda la literatura científica e histórica sobre sismos del pasado existente hasta esa época. Es importante destacar que además de Espinosa (2003), Taboada *et al.* (1998) reportaron el evento sucedido en 1644 con epicentro en Pamplona-Mérida. Se deduce por tanto que este sismo debió causar un fuerte impacto en la población de esa época, pues ha sido registrado por varios autores que lo catalogan como uno de los más relevantes a lo largo de la historia sísmica en el Nororiente colombiano. Espinosa (2003), presenta el resumen de los trabajos de sismicidad histórica en orden cronológico, desde los más empíricos hasta los actuales estudios sistemáticos y su influencia en el desarrollo de nuevas metodologías de investigación sobre sismología. Finalmente, teniendo en cuenta la compleja actividad tectónica que presentan la región Nororiental de Colombia y el



Noroccidente de Venezuela, este autor plantea la posibilidad de un trabajo en equipo entre estos dos países para profundizar en estos temas y aplicar el conocimiento adquirido en la prevención de posibles catástrofes producidas por sismos. Espinosa *et al.* (2004), publicaron un artículo para *Annals of the Geophysics*, al que titularon “*State of the Art of the Historical Seismology in Colombia*”. En este trabajo recopilan, complementan y actualizan la evolución de los estudios e investigaciones sobre la sismicidad histórica en nuestro país, y mencionan nuevamente a la zona limítrofe entre Venezuela y Colombia como una de las regiones de mayor importancia desde el punto de vista sismotectónico.

Teniendo en cuenta la gran actividad sísmica que ha experimentado esta zona a lo largo de los años, se debe hacer mención a la que se considera como la estructura más importante en los Andes de Mérida, la Falla de Boconó, la cual representa una fuerte influencia en el comportamiento tectónico de las estructuras presentes en el macizo de Santander, en la Cordillera Oriental colombiana, pues termina en una serie de fallamientos y corrimientos en el extremo norte de esta cordillera. Estas características fueron consideradas por Alvarado *et al.* (2008) para estudiar el comportamiento sismogénico de esta falla. En su estudio, estos autores determinaron una cuenca pull-apart formada por una fuerte influencia de la falla de Boconó. Éste análisis se efectuó mediante la apertura de dos trincheras, analizando en cada una de ellas los respectivos rasgos estructurales que permitieron efectuar el análisis de dos paleoterremotos, los cuales consideran asociados a la actividad de la falla de Boconó. A partir de esto, identificaron los intervalos de tiempo en los cuales ocurrieron los dos paleoterremotos al sur de la falla de Boconó, que oscilan entre 400-450 millones de años. En relación a esta estructura, Paris *et al.* (2000) en la base de datos de fallas activas de Colombia, consideran que el sistema de fallas de Boconó presenta una extensión importante en la región de Norte de Santander representada por la falla de Chitagá, que a su vez esta asociada a las fallas de los andes Venezolanos. Kammer (1993) señala

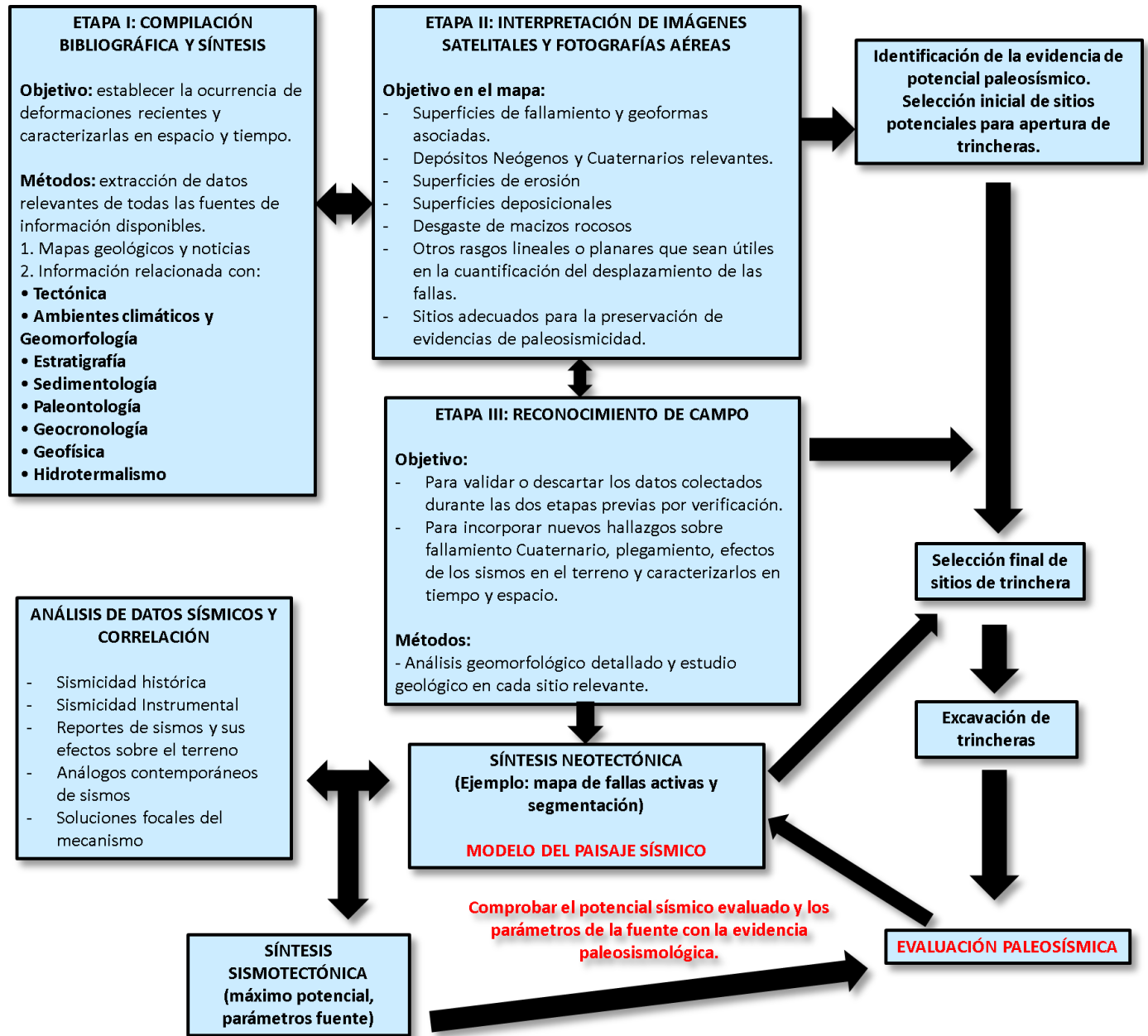


la importancia de la falla de Chitagá en el proceso de evolución de la Cordillera Oriental, pues ha participado en el levantamiento del basamento Jurásico del Macizo de Santander.

Dentro de la Neotectónica existe una rama que se dedica a estudiar la ocurrencia y origen de sismos prehistóricos con base en el registro que quedó en las rocas, ésta es la paleosismología. La principal evidencia geológica en la que se enfoca la paleosismología son las deformaciones y/o fracturas superficiales de las rocas o depósitos recientes, además integra registros morfotectónicos, estratigráficos con dataciones radiométricas para esclarecer la historia sísmica de una región en particular (McCalpin *et al.* 1996).

Michetti *et al.* (2005), destacan el estudio paleosismológico como una herramienta fundamental en el análisis de la amenaza sísmica. Además adaptan y replantean la metodología utilizada en un estudio paleosismológico que fue propuesta por Audemard (1989), en su estudio de Neotectónica en el Mediterráneo. Audemard y Singer (1997) realizaron un análisis acerca del avance de estudios paleosismológicos por trincheras en Venezuela, el cual ha permitido un progreso en la interpretación de elementos geológicos de una forma más precisa para la evaluación de amenazas sísmicas; los mismos autores plantearon que existen métodos directos e indirectos en la paleosismología, los cuales han permitido un enfoque más detallado de rasgos tectónicos, geomorfológicos y sedimentológicos presentes en el terreno; esto ha conllevado a obtener resultados que han proporcionado mayor certeza en cuanto al análisis sísmico de una región específica. Aprovechando la apertura de trincheras, en Venezuela por ejemplo, se ha determinado la presencia de elementos tectónicos que confirman la activación de sismos ocurridos en épocas anteriores. Otras excavaciones han permitido reconocer la actividad histórica de la falla de Boconó, gracias a evidencias geomorfológicas (**FIGURA 28**).





**FIGURA 28 Metodología empleada en Paleosismología para el monitoreo de la amenaza sísmica. (Tomado y adaptado de Michetti, 2005)**



En Colombia la paleosismología es muy reciente y por lo tanto no se ha realizado una cantidad considerable de estudios, sin embargo, se puede destacar el trabajo de Osorio *et al.* (2008), quienes realizaron una exploración paleosismológica en la Falla de Ibagué. Con base en la cartografía estructural y geomorfológica, definieron el sitio de apertura de la trinchera, en la cual se realizó un levantamiento estratigráfico y estructural del que se obtuvo un modelo cinemático, un modelo de ruptura y deformación asociado que permitió establecer la actividad y evolución de la falla de Ibagué. La importancia de este estudio, es que marcó una pauta importante para que el Servicio Geológico Colombiano continúe con investigaciones posteriores en otras regiones del país, y así construir y comprender la historia sismotectónica de Colombia.

En el área de Pamplona, aun no se ha llevado a cabo un estudio paleosismológico mediante trincheras de exploración. Considerando la complejidad tectónica de esta región se planteó por parte del Servicio Geológico Nacional la realización de una Investigación Paleosismológica en esta área liderada por el Geólogo Phd. Jaime Arturo Romero León, con la colaboración de la Geóloga MSc. Astrid Sandoval, el Ing. Yohan Montero Lozano y los autores del presente trabajo de grado. Para ello, se efectuaron dos trabajos preliminares en ésta región. El primero de ellos, los realizaron Calderón y Romero (2009), quienes identificaron, cartografiaron y realizaron un análisis sedimentológico de los depósitos cuaternarios en el área de Pamplona, Pamplonita y La Lejía. Este trabajo fue fundamental para la selección del depósito cuaternario en el cual se llevaría a cabo la exploración paleosismológica. Como ya se mencionó, Moyano (2010) realizó ocho sondeos eléctricos verticales con el fin de modelar la geología del subsuelo en el depósito cuaternario seleccionado para la investigación paleosismológica. Este corresponde al estudio más reciente realizado en el sector de la Lejía, y con el presente proyecto investigativo para optar por el título de



Geólogo, los autores quieren brindar un aporte al desarrollo y avance de los estudios paleosismológicos de las fuentes sismogénicas de Colombia.



## 6. MARCO GEOLÓGICO

El sureste del municipio de Pamplona, donde se ubica el depósito objeto del estudio, reúne una gran diversidad de elementos estratigráficos, estructurales y geomorfológicos, que se resumen en el presente capítulo.

### 6.1. ESTRATIGRAFÍA

El estudio geológico regional más importante que se realizó en el sector de Pamplona fue el de Ward *et al.* (1977), el cual sintetiza la cartografía de los principales elementos geológicos que conforman dicha zona. Según Etayo *et al.* (1983), geológicamente la zona de estudio se localiza en el Terreno Santander más específicamente en el denominado Macizo de Santander, que aparece definido en el léxico estratigráfico de Julivert *et al.* (1968) como un gran afloramiento de rocas ígneas y metamórficas que forman parte de lo que éste autor denominó zócalo pre-mesozoico.

La configuración geológica del área circundante a la cuenca de La Lejía muestra el basamento ígneo-metamórfico precámbrico que se encuentra cubierto parcialmente por depósitos con edades que van desde el Cretácico hasta el Cuaternario (**FIGURA 29** y **FIGURA 30**).

Hacia el Oeste, el depósito de interés se encuentra en contacto con rocas de alto grado de metamorfismo del Neis de Bucaramanga y con rocas metamórficas correspondientes al Ortoneis de Pamplona.

Más hacia el Oeste, aparecen rocas ígneas del Granito de Durania, las cuales están en contacto fallado con las dos unidades metamórficas ya mencionadas.







<b>CONVENCIONES</b>		
<p style="text-align: center;"><b>Kitm</b></p> <p><b>FORMACIÓN TIBÚ-MERCEDES</b>                      Mercedes: Caliza gris, fosilífera, arenosa; lutita y arenisca de color gris oscuro.</p> <p>Tibú: Caliza gris fosilífera, con lutita gris oscura, en la base arenisca clara cuarcítica de grano grueso a conglomerático.</p> <p style="text-align: center;"><b>Jg</b></p> <p><b>FORMACIÓN GIRÓN:</b>                      Arenisca conglomerática y conglomerado, de color gris amarillento a pardo rojizo, masivos y lenticulares; limolita parda rojiza.</p> <p style="text-align: center;"><b>JRcg</b></p> <p><b>Jrcg:</b> Cuarzomonzonita y granito, bitotítico y muscovítico, gris claro a rosa pálido, de grano medio.</p> <p style="text-align: center;"><b>dg</b></p> <p><b>GRANITO DURANIA</b>                      Blanco de grano medio a grueso muscovítico.</p> <p style="text-align: center;"><b>pDo</b></p> <p><b>pDo:</b> Neis cuarzo-monzonítico y granodirítico</p> <p style="text-align: center;"><b>Pcab</b></p> <p><b>NEIS DE BUCARAMANGA</b>                      Pcab: Paraneis y esquistos, metamorfismo de alto grado, localmente con masas pequeñas de ortoneis.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Tpb</b></p> <p><b>FORMACIÓN BARCO</b>                      Arenisca parda amarillenta a grisácea, dura, de grano fino; limolita arenosa a lutítica.</p> <p style="text-align: center;"><b>Kscm</b></p> <p><b>FORMACIÓN COLÓN-MITO JUAN</b>                      Mito Juan: Lutita gris verdosa; algunas capas limolíticas a arenosas; nódulos limoníticos.                      Colón: Lutitas gris oscura, poco calcárea con forams, nódulos y lentes limoníticos.</p> <p style="text-align: center;"><b>Ksl</b></p> <p><b>FORMACIÓN LA LUNA</b>                      Parte superior: Caliza, lutita fosilífera y chert en capas delgadas de color gris oscuro a negro con forams.                      Parte inferior: Lutita negra calcárea con concreciones.</p> <p style="text-align: center;"><b>Kic</b></p> <p><b>FORMACIÓN CAPACHO</b>                      Lutita gris oscura a negra, con caliza gris masiva y fosilífera en las partes inferior y superior.</p> <p style="text-align: center;"><b>Kia</b></p> <p><b>FORMACIÓN AGUARDIENTE</b>                      Arenisca clara, dura, de grano fino a grueso con algunas capas de limolita y lutita carbonácea.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Qal</b></p> <p><b>ALUVIÓN</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Q2t</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Q2m</b></p> <p><b>TERRAZAS ALUVIALES Y MORRENAS</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Q0c</b></p> <p><b>COLUVIÓN</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Q0l</b></p> <p><b>DEPÓSITO LAGUNAR</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Q3ab</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Q2ab</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Q1ab</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Q0ab</b></p> <p><b>ABANICOS ALUVIALES GRAVITACIONALES</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Tpic</b></p> <p><b>FORMACIÓN LOS CUERVOS</b>                      Limolita y lutita de color gris oscuro carbonáceas, con capas de arenisca de arenisca clara de grano fino, arcillosa; mantos de carbón en la parte inferior.</p>

**FIGURA 30** Leyenda del Mapa Geológico de la zona de estudio mostrado en la FIGURA 29 (Tomado y adaptado de Ward *et al.*, 1977 y Calderón y Romero, 2009).



Hacia el costado Este del depósito, aparece otra unidad que corresponde a rocas ígneas de composición félsica, que se encuentran en contacto fallado con rocas sedimentarias del Cretácico Superior y Terciario.

En general, las unidades sedimentarias que rodean al depósito de interés corresponden a rocas de las formaciones Girón, Tibú-Mercedes, Aguardiente, Capacho, la Luna, Colón-Mito Juan, Barco y un depósito aluvial del Cuaternario. Ward *et al.* (1973), presentan una compilación descriptiva de cada una de las unidades litoestratigráficas que conforman la región de Pamplona y sus alrededores, en donde utilizan la nomenclatura estratigráfica de la cuenca de Maracaibo. A continuación se realiza una breve descripción de las unidades que afloran en el sector de la Lejía y sus alrededores con base en la memoria geológica elaborada por los autores mencionados.

#### 6.1.1. Neis de Bucaramanga (pEb)

Ward *et al.* (1973) presentan esta unidad como una serie de rocas metasedimentarias y algunas zonas migmatíticas. Una de los sectores en los cuales aflora el Neis de Bucaramanga se encuentra cerca de la región de Chitagá al sur de Pamplona, donde la roca predominante es Neis de Cordierita-Sillimanita-Biotita-Cuarzo-Feldespató inyectado por pegmatita moscovítica. Las capas graníticas varían desde Neis augen a Neis aplítico y Neis granítico. Las rocas de las diferentes zonas pertenecientes al Neis de Bucaramanga se relacionan en edades correspondientes al Precámbrico.



### 6.1.2. Ortoneis de Pamplona (pDo)

La mayor parte del Ortoneis se encuentra al Sureste y Noreste de Berlín y se extiende hasta la vecindad de Chitagá y Silos que afloran en franjas falladas al Oeste de Pamplona. Se trata de rocas masivas constituidas por fibras delgadas de neis hornbléndico y anfibolita. En algunos sitios, el Ortoneis suele sufrir una transición a pegmatita como la observada al noreste de Pamplona. Las rocas presentes son básicamente de edad Predevónica. El Ortoneis que se encuentra en la parte sur de la zona es intruido por un granito más joven y cubierto por rocas sedimentarias (Ward *et al.*, 1973).

### 6.1.3. Cuarzomonzonita, Granito y Pórfido Cuarzoso (JRcg)

Esta unidad consiste de intrusiones de cuarzomonzonita, granito y pórfido cuarzoso, las cuales difieren en textura y composición. Las diferencias presentes entre las intrusiones mencionadas sugieren que todas no son de la misma edad y parecen estar relacionadas a la cuarzomonzonita de la Corcova y a la cuarzomonzonita del Batolito de Rionegro. A la cuarzomonzonita, el granito y el pórfido cuarzoso, se les asigna una edad del Triásico o posiblemente una edad más antigua correspondiente al Pérmico (Ward *et al.*, 1973).

### 6.1.4. Granito de Durania (dg)

Ward *et al.* (1973), definen este cuerpo geológico como un granito moscovítico que forma plutones e intrusiones en el área de Pamplona. La masa rocosa más grande del granito de Durania constituye el Plutón de Pamplona, localizado al sur de esta ciudad; otras masas de menor tamaño afloran en la carretera Silos-Chitagá y hacia el Noreste de Pamplona.



### 6.1.5. Formación Girón (Jg)

Esta formación ha sido correlacionada con la Formación La Quinta de Venezuela, la cual es semejante en litología. Basado en evidencias fósiles, muestra edades que van desde el carbonífero hasta el Jurásico. Igualmente esta formación hace parte de un gran sinclinal que incluye rocas del Devónico al Cretáceo superior. Ward *et al.* (1973) plantean que el contacto de la Formación Girón con las formaciones Tambor y Jordán se representa en una inconformidad. Estas unidades presenta litologías que van desde limolitas a areniscas y conglomerados. En la base de esta unidad, en algunas localidades, se encuentra un conglomerado de cantos cuya roca origen es ígnea. Durante la deposición de la Formación Girón, entre el Jurásico y Cretácico, el sector Occidental del Macizo de Santander constituía posiblemente un área deprimida, limitada al este y oeste por dos áreas umbrales, el Macizo de Santander y la Cordillera Central. (Julivert *et al.*, 1968)

### 6.1.6. Formación Tibú-Mercedes (Kitm)

Esta unidad presenta arenas guijosas, de grano grueso, sobre rocas ígneas y metamórficas. Una sección que corresponde al sector de Pamplona, en el cuadrángulo H-13, expone intercalaciones entre *shale* negro, arenisca amarillenta, *shale* gris, arenisca gris y caliza gris que corresponde a la Formación Mercedes. La Formación Tibú, presenta caliza gris oscura, arenisca gris amarillenta, caliza gris y una pequeña intrusión de granito, de grano medio a grueso, cuya edad se establece de Aptiano tardío Albiano temprano. Esta edad se asigna mediante la relación que presenta la Formación Tibú-Mercedes, respecto de la Formación Apon de Venezuela occidental (Ward *et al.*, 1973).

El espesor total del miembro Tibú varía entre 107 y 117 m, mientras el espesor del miembro Mercedes, varía entre 149 y 201 m, según datos de varios sondeos



(Julivert *et al.*, 1968).

#### 6.1.7. Formación Aguardiente (Kia)

Considerando las observaciones realizadas por Ward *et al.* (1973), en la sección expuesta al este del municipio de Pamplona, ésta unidad presenta complejidades estructurales, evidenciada en los datos de buzamiento que muestran la inversión local de las capas. Está formada principalmente por arenisca con algunas intercalaciones de shale negro. El espesor de esta unidad corresponde a 440.50 m y se le asignan edades que comprenden al Albiano temprano (Ward *et al.*, 1973) (**FIGURA 31**).

#### 6.1.8. Formación Capacho (Kic)

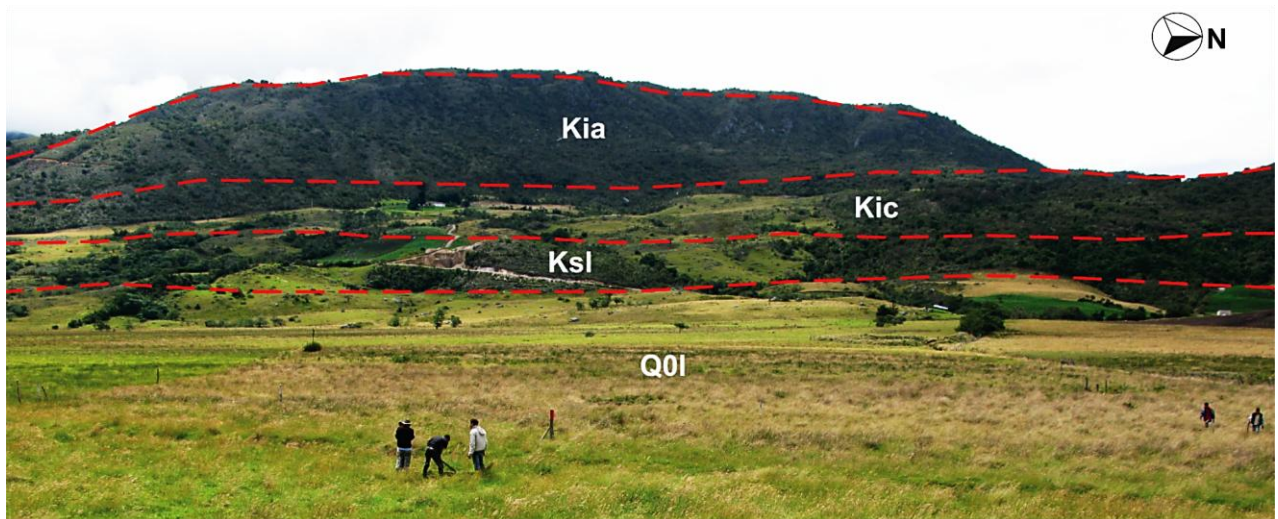
La Formación Capacho, representa el miembro superior del grupo Cogollo en Venezuela. Según Ward *et al.* (1973), esta unidad está constituida por shale negro, gris oscuro y caliza gris. Se nota un incremento en la proporción de caliza de Oeste a Este. Dicha caliza representa 10% de la sección en el flanco Este del Macizo de Santander; sube a 30 % en el área de Cúcuta y hasta un máximo de 40% más al Sureste en territorio venezolano (Julivert *et al.* 1968) (**FIGURA 31**).

#### 6.1.9. Formación La Luna (Ksl)

Esta formación fue definida en Venezuela por Sutton (1946) y subdividida en tres miembros: El miembro Salada, compuesto por shales calcáreos negros y unas capas delgadas de caliza negra, con concreciones de caliza de sección transversal elíptica; el miembro Pujama que contiene shale calcáreo y el miembro Galemba que está compuesto por shale gris, con intercalaciones de chert negro y



caliza gris, también se encuentran concreciones de caliza discoidal (**FIGURA 32**). Temporalmente esta unidad se ubica en el Turoniano temprano al Coniaciano tardío (Ward *et al.*, 1973).



**FIGURA 31** Expresión geomorfológica de la Formación Aguardiente (Kia), La Luna (Ksl), Capacho (Kic) y el depósito lagunar de La Lejía (Q0l).



**FIGURA 32** Afloramiento con alto grado de meteorización de la Formación La Luna (Ksl) al oeste del depósito La Lejía, en el cual se observan shales gris oscuro intercalado con lodolitas grises y zonas enriquecidas con materia orgánica.

#### 6.1.10. Formación Colon- Mito Juan (Kscm)

Según Julivert *et al.* (1968), la sucesión consta de lutitas oscuras ricas en pirita, margas y algunas capas de caliza. La similitud de las formaciones, en cuanto a su litología, no ha permitido determinar con exactitud un límite para las mismas, por lo que se toma como una sola unidad. La parte que se ubica en la sección de Colón, se encuentra formada por shales gris oscuro, conchoide e irregularmente fracturado y algunas capas de caliza gris. Esta formación es definida litológicamente como gradacional. De acuerdo con Ward *et al.* (1973), son frecuentes las facies calcáreas, mientras las facies lutíticas alcanzan su máxima importancia en el conjunto Colón-Mito Juan. Partiendo de estudios de microfósiles, se le asigna una edad de Campaniano-Maastrichtiano a la Formación Colón.

#### 6.1.11. Formación Barco (Tpb)

Ward *et al.* (1973), afirman que la Formación Barco está constituida por arenisca de grano fino a medio, con estratificación cruzada e intercalaciones de shale y arcillolita. Una ocurrencia común, es el crecimiento de granos de cuarzo sobre los granos de arena. Los shales y arcillolitas intercalados son parcialmente limosos, micáceos y carbonáceos. La base del Cretáceo en la Concesión Barco no la constituye como es habitual un conjunto detrítico (generalmente arenoso). A esta formación se le ha asignado una edad del Paleoceno Temprano (Ward *et al.*, 1973).



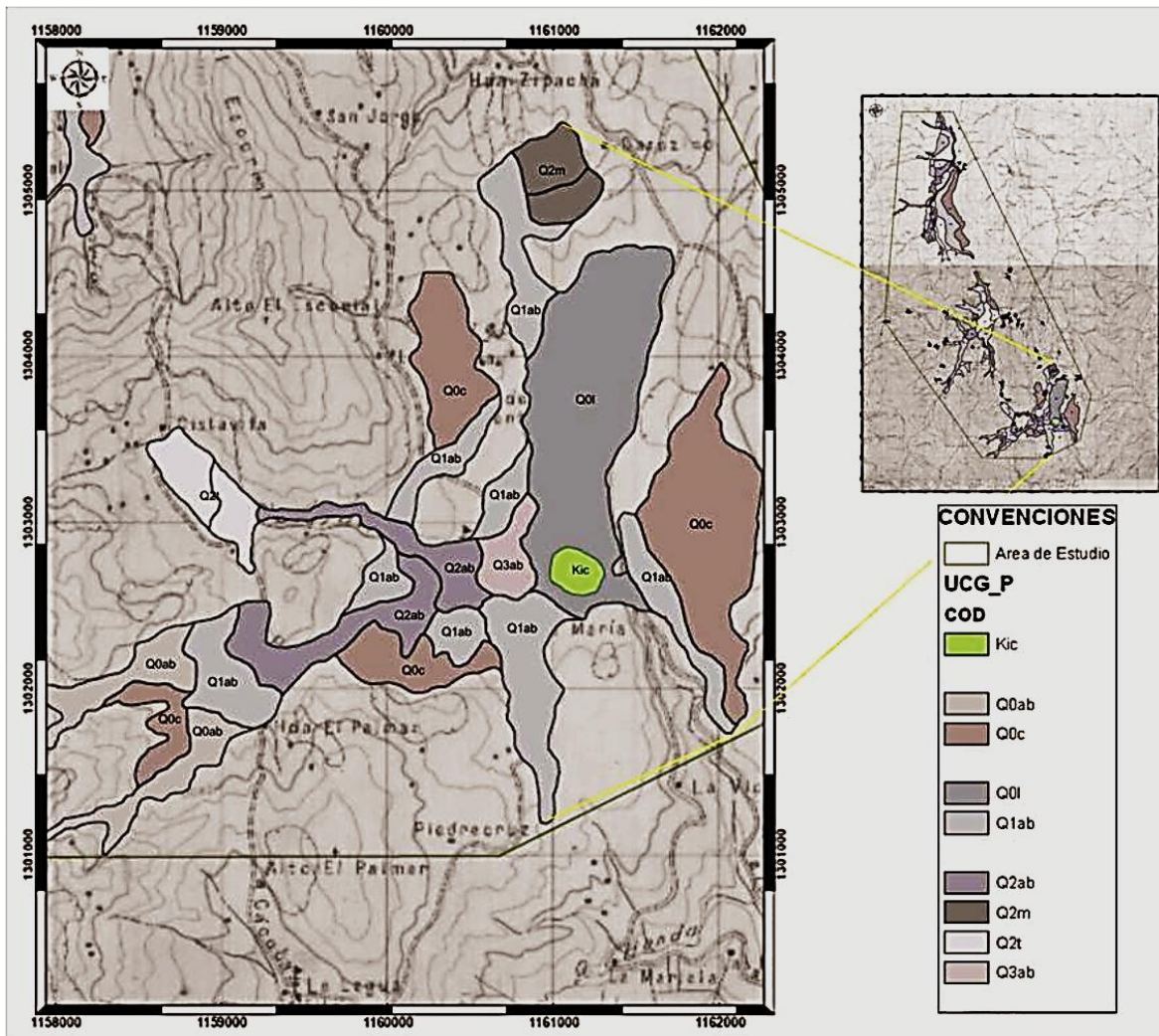
### 6.1.12. Depósitos cuaternarios (Qal)

De acuerdo al mapa geológico de Ward *et al.* (1977), en el sector este del Cuadrángulo H-13, se localizan varios depósitos cuaternarios asociados al sistema de deformación de las fallas Chitagá, Pamplona, Morronegro, Babega y Servitá. Estos fueron agrupados en las unidades: Aluvial (Qal), Coluvial, Talud y Derrumbes (Qd), Terrazas y conos de deyección (Qtf), y morrenas (Q2t). Se presentan pequeños sectores con algunos depósitos coluviales y de derrubios, los cuales están agrupados en la unidad cuaternaria más antigua (Qd), considerada de edad Pleistoceno. También se diferenció la unidad cuaternaria más joven (Qal), conformada por depósitos aluviales que están distribuidos a lo largo de los valles de las principales corrientes, como son los ríos Chitagá y Pamplona. Estos depósitos son considerados Holocénicos o muy recientes (Ward *et al.*, 1973).

Con respecto a estas unidades cuaternarias, se destaca el trabajo de Calderón y Romero (2009), quienes actualizaron la cartografía y descripciones sedimentológicas de estos depósitos en la región de Pamplona y sus alrededores. Para ello, dividieron el área de estudio en tres zonas: Sector la Laguna - Fontibón, sector Pamplona y sector Pamplona-Sabanetas. En el sector de la Laguna – Fontibón, cartografiaron abanicos aluviales gravitacionales (Q0ab, Q1ab, Q2ab y Q3ab), terrazas aluviales (Q1t, Q2t, Q3t), coluviones (Q0c), un depósito lagunar (Q0l) y depósitos de morrenas (**FIGURA 33**).

Según el trabajo de Calderón y Romero (2009), la unidad Q0l corresponde a un depósito lagunar y constituye el centro de interés para el presente proyecto de investigación paleosismológica. Estos autores consideraron que se trataba de un depósito lagunar debido principalmente a su geomorfología y por tratarse de una zona pantanosa que es atravesada por la quebrada la Lejía.





**FIGURA 33** Mapa geológico de los depósitos cuaternarios en el sector la laguna – Fontibón (Tomado de Calderón y Romero, 2009)

## 6.2. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología es una rama de la geología que analiza las diversas formas que se encuentran sobre la superficie terrestre. Este estudio incluye la interpretación morfogénica, la cual busca conocer el origen de los elementos geológicos y su morfología describiendo aspectos topográficos y geométricos de las diferentes piezas y factores que integran un entorno geológico. Carvajal *et al.* (2004), clasifican los procesos naturales como procesos morfodinámicos externos (exógenos) e internos (endógenos), los cuales integran un conjunto de sistemas dinámicos que cambian la estructura de los paisajes naturales. El nivel de intensidad con los cuales los agentes encargados de ejecutar estos procesos, actúan sobre la corteza, dan forma a los diversos elementos geológicos sobre la superficie terrestre y conforman un ambiente geológico específico. Dentro de los aspectos que estudia la geomorfología, se encuentran: La morfoclimatología, morfogénesis y morfología, morfometría, morfodinámica y morfocronología. Para el presente estudio se consideraron los primeros tres elementos de estudio de la geomorfología.

### 6.2.1. Morfoclimatología

Carvajal *et al.* (2004), describen la importancia que presenta la interacción entre factores naturales como la temperatura, pluviosidad, altitud, latitud y la topografía en el aporte para la formación y cambio en la estructura física de geoformas y tipos de vegetación. Este depósito presenta un moderado contenido de vegetación dominado en algunos sectores por frailejón, plantas que se desarrollan con las condiciones ambientales y climáticas típicas del sector. El depósito La



Lejía está dominado por clima de páramo, con temperaturas bajas, influenciado por la alta precipitación de la zona que se encuentra en 1310 mm/año y por la altitud que llega hasta los 2600 msnm en la cuenca, y que varía hasta los 3550 msnm en sectores aledaños a Pamplona (Infante *et al.*, 2008). Los sitios cercanos a la Lejía presentan una topografía con altas pendientes que permite que los altos volúmenes de precipitación desarrollen vertientes que ejercen un determinado grado de erosión principalmente en litologías de las formaciones Capacho (Kic) y Aguardiente (Kia), las cuales por su composición contribuyen a la creación de geoformas que constituyen parte del modelado paisajístico de esta zona (**FIGURA 34**).



**FIGURA 34** (a) Aspecto del clima en el depósito de La Lejía; (b) Vegetación típica del sitio en el cual se levantaron las trincheras exploratorias (Frailejón).

### 6.2.2. Morfogénesis y Morfología

La morfogénesis busca mediante el análisis de geoformas y elementos estructurales detallar el origen de un ambiente geológico determinado. Mientras



que la morfología describe aspectos topográficos y geométricos de las diferentes piezas y factores que integran un entorno geológico. De acuerdo al mecanismo y procesos involucrados (Génesis) en el modelado del relieve, las diferentes unidades morfológicas presentes en el área de trabajo pueden ser clasificadas en: unidades de origen denudacional, estructural, periglaciario y fluvial. Así mismo se tiene en cuenta el análisis de las redes de drenaje de la zona.

De acuerdo con lo observado en campo, el análisis del Modelo Digital de Elevación permitió observar las variaciones topográficas que varía entre 2000 y 4000 msnm, presentes en zonas cercanas al depósito La Lejía, y por lo tanto influyen de manera directa en la acción de agentes erosivos como el agua, que gracias a los altos gradientes, actúa con mayor fuerza en la generación de geoformas denudacionales, estructurales y periglaciares, muchas de las cuales se identificaron mediante la utilización de fotografías aéreas (**FIGURA 35**).



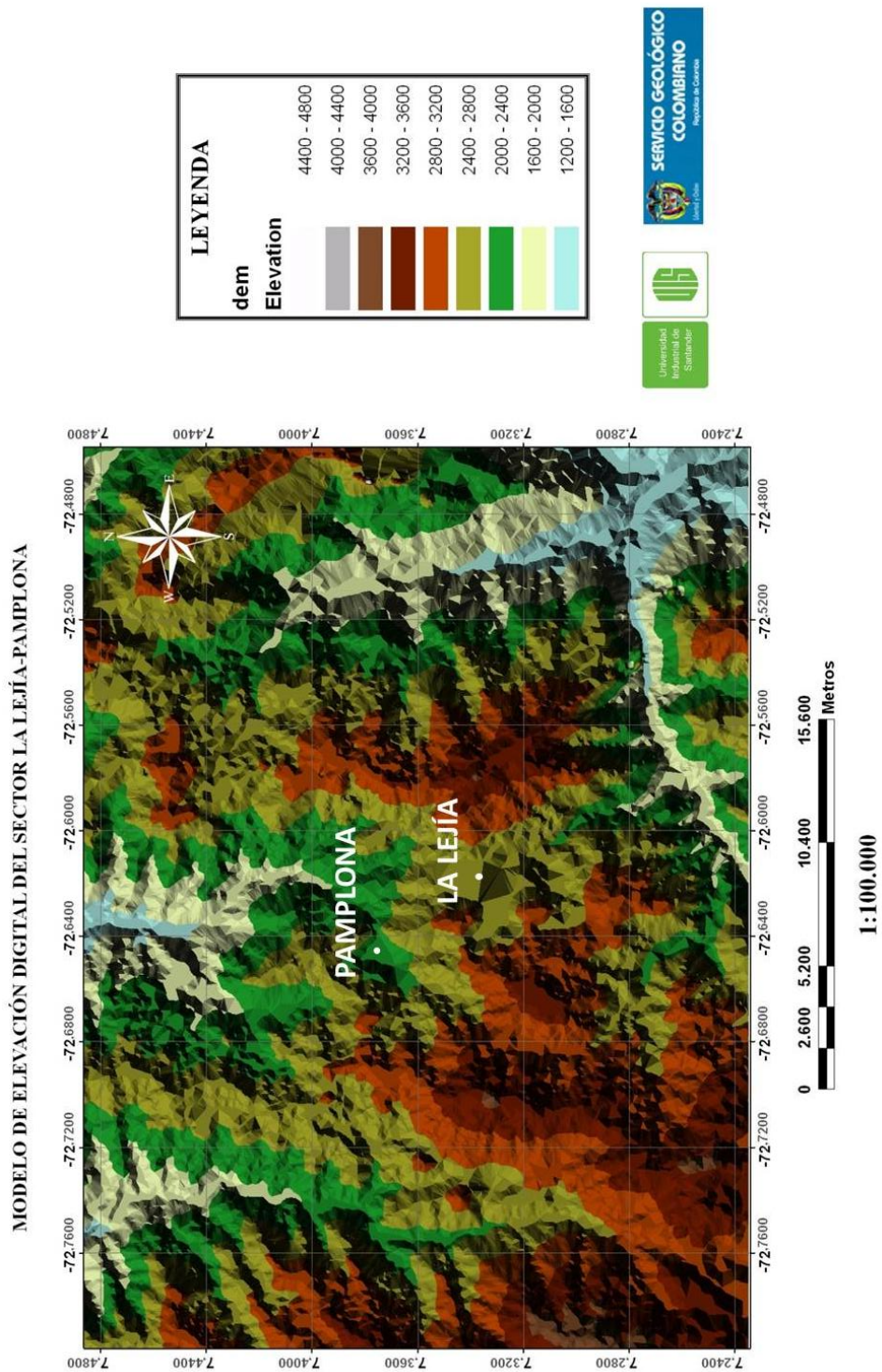


FIGURA 35 Modelo TIN (Triangulated Irregular Network) generado con ArcMap 10.0 a partir del mapa de contornos del sector de La Lejía – Pamplona.

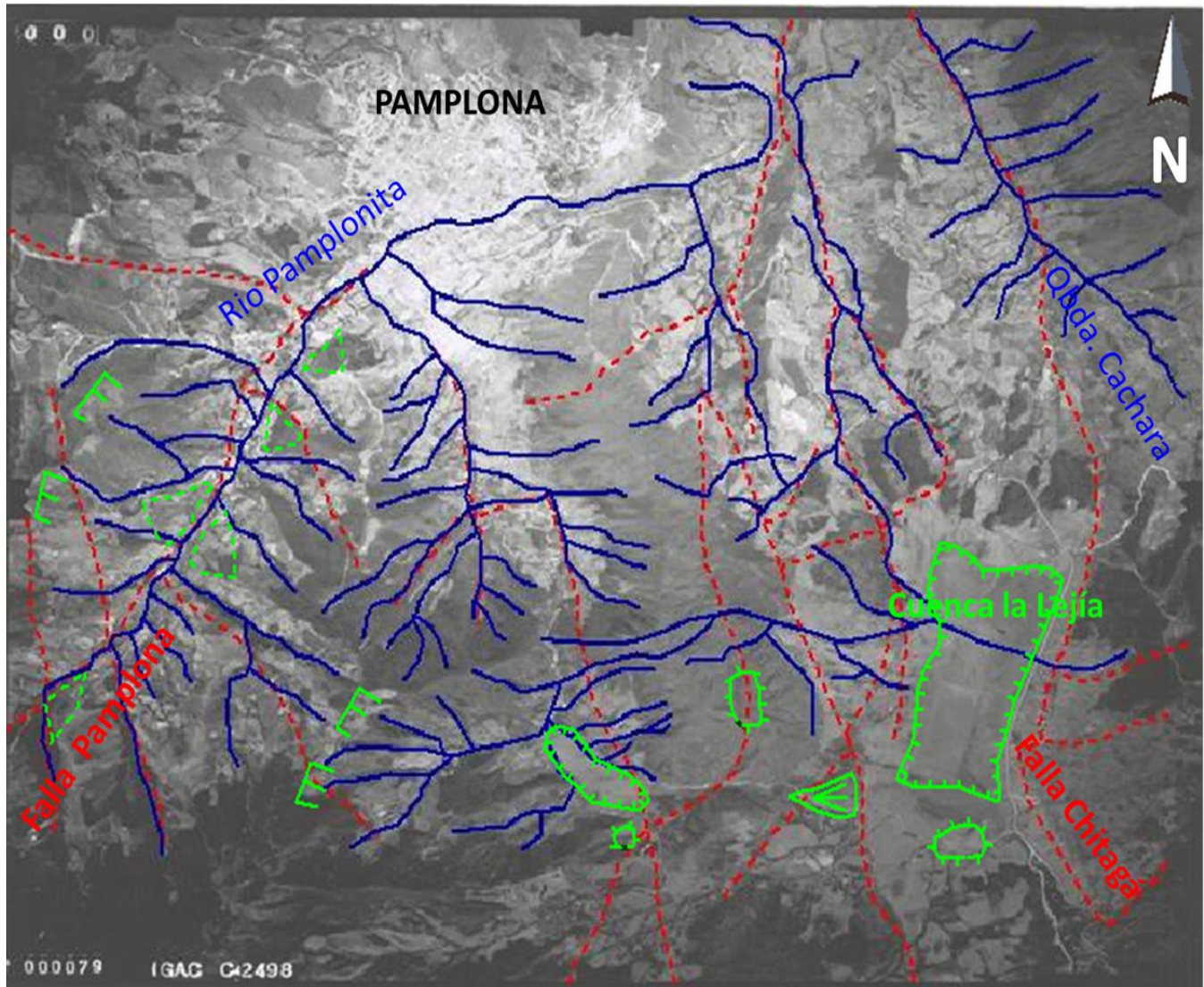


### 6.2.2.1. Red de Drenaje

Se logró identificar diversos tipos de corrientes entre intermitentes y permanentes, estas últimas con mayor predominio, esto en parte debido a la topografía y geomorfología del área de estudio que presenta un elevado número de montañas y colinas con una vegetación prominente, lo cual contribuye a que muchos de estos tributarios mantengan un caudal de agua constante y por ende terminen desembocando en las principales vertientes de la zona. Como se puede apreciar, el río Pamplonita presenta los drenajes con mayor longitud y mayor caudal, caso contrario a la quebrada Cachara afluente del río Pamplonita, a la que llegan básicamente corrientes intermitentes. La vegetación presente está asociada a colinas y montañas de pendientes medias a altas, lo que permite que los acuíferos que se ubican en estos terrenos, al saturarse en agua, ésta aflore y drene ayudada por las elevadas pendientes. Todos estos factores permiten deducir que estos drenajes generan un grado medio de erosión manifestado en geoformas como laderas erosionadas (**FIGURA 36**).

Como se mencionó anteriormente, la influencia del clima es importante, pues la alta pluviosidad y los altos gradientes en la topografía, aseguran un caudal permanente a las corrientes que drenan principalmente a los canales que se forman en las colinas y montañas.





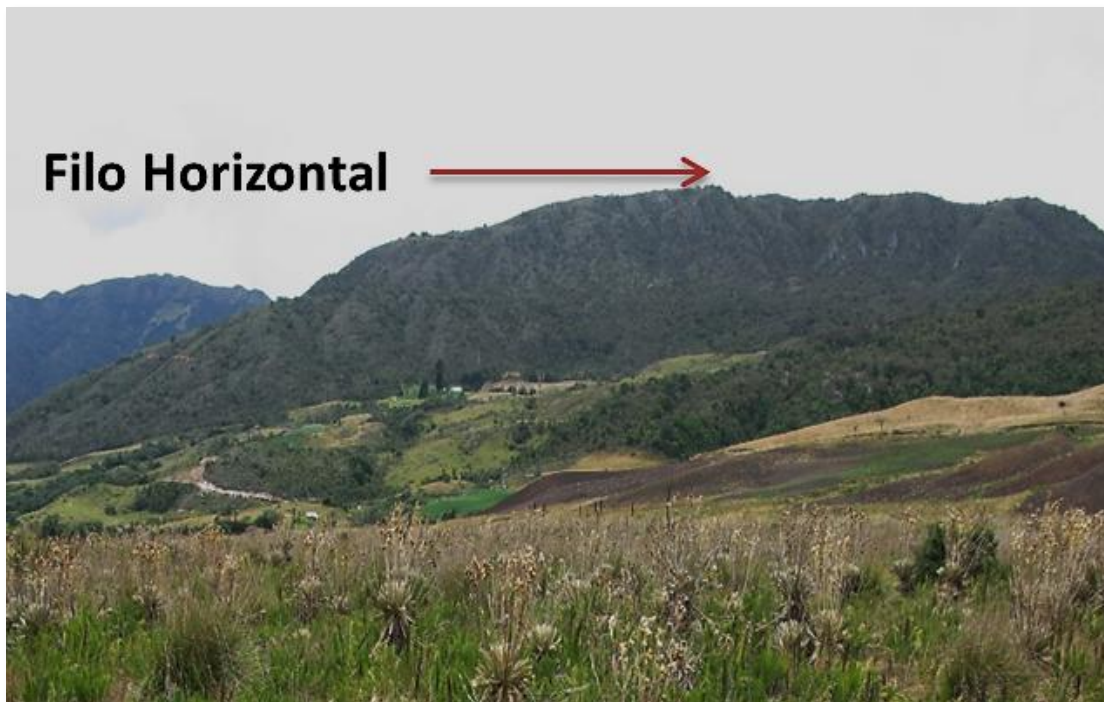
CONVENCIONES			
Drenajes		Terrazas	
Lineamentos		Cuencas	
Facetas Triangulares		Conos de deyección	
Escarpes			

FIGURA 36 Fotografía aérea de la zona de estudio, donde se muestran los principales rasgos geomorfológicos incluyendo la red de drenaje.



### 6.2.2.2. Geoformas de origen Denudacional.

Dentro de la zona de estudio se encontraron unidades de origen denudacional representadas por montañas con pendientes de alto gradiente. Parte de la morfología que se encuentra en el sector, presenta filos horizontales, que son formas alargadas de la cresta de una montaña con terminaciones sub-puntiagudas. Otra de las geoformas observadas fueron los lomos anchos, que son protuberancias levantadas muy poco sobre la superficie y actúan como divisoria de aguas, dichas geoformas se observaron al nororiente del depósito de La Lejía y se halla ubicadas sobre las formaciones Aguardiente (Kia) y Capacho (Kic), respectivamente (**FIGURA 37** y **FIGURA 38**).



**FIGURA 37** Filo horizontal con crestas sub-puntiagudas.



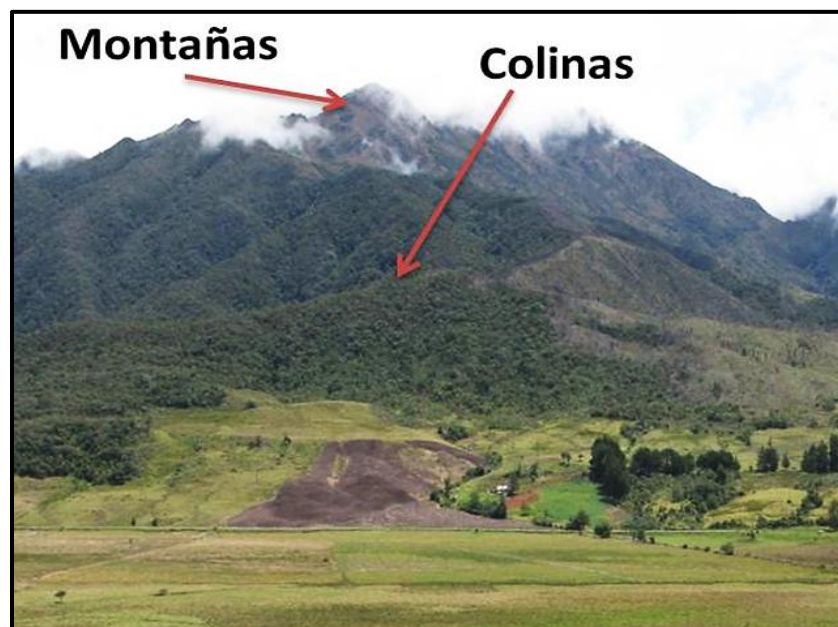
**FIGURA 38** Los lomos anchos actúan como divisoria de aguas y son útiles para crear caminos de herradura.

También se encontraron unidades morfológicas, representadas por colinas denudacionales con pendientes suaves y cimas redondeadas a sub-redondeadas, que han sufrido erosión. La inclinación de las montañas y colinas sobre la Formación La Luna (Ksl) y La Unidad de Cuarzomonzonita (JRgc) presenta variaciones apreciables en cuanto a su ángulo de inclinación, el cual varía entre los 15 y 40° aproximadamente (**FIGURA 39** y **FIGURA 40**).





**FIGURA 39** Colina Denudacional con cimas sub-redondeadas.



**FIGURA 40** Colinas y montañas con grado de inclinación variable al este del depósito.



Muchos de los agentes exógenos como el agua, el viento, grado de pluviosidad y agentes internos como la actividad tectónica, han contribuido en mayor o menor grado a la erosión de estructuras, dando paso a nuevas geoformas, como laderas erosionadas. Las laderas denudacionales erosionadas, son geoformas con grado medio de inclinación, que se hallan presentes en la Formación Aguardiente (Kia), que por su material sedimentario, la hace muy propensa a la formación de estas geoformas que presentan un alto nivel de erosión (**FIGURA 41**).

Dichos elementos geomorfológicos, también fueron observados en la zona de estudio, principalmente hacia el Este y Nororiente del depósito.

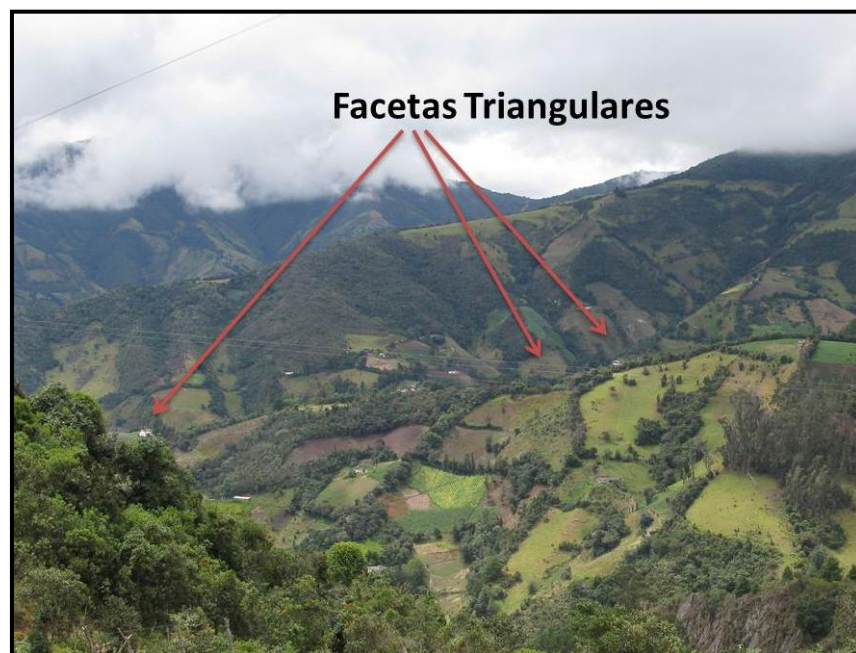


**FIGURA 41** Ladera Denudacional erodada.



### 6.2.2.3. Geoformas de origen estructural

Algunas geoformas son índices para denotar la presencia de un elemento tectónico como una falla. Un ejemplo de estos elementos morfológicos son las facetas triangulares, que son superficies inclinadas de forma trapezoidal, cuyo ápice apunta hacia arriba y su base es atravesada por una falla. Estos elementos se observaron al Nororiente del depósito, evidenciando el trazo de la Falla Chitagá que delimita la Unidad litodémica de Cuarzo monzonita (jRcg). También se encontraron laderas estructurales escalonadas que corresponden a superficies inclinadas del terreno, formadas por planos de discontinuidad y se extienden hasta las partes altas de la montaña (**FIGURA 42** y **FIGURA 43**).



**FIGURA 42** Facetas triangulares observadas al nororiente del depósito La Lejía y evidencian la presencia de la Falla Chitagá.



**FIGURA 43** Laderas escalonadas observadas en un sector al nororiente del depósito de La Lejía.

Otro de los rasgos geomorfológicos que permitió identificar la presencia de la Falla Chitagá, al Nororiente del depósito La Lejía, fueron las silletas de falla que se ubican al costado oeste del eje del sinclinal de Pamplonita, sobre la unidad litodémica de Cuarzomonzonita (JRcg). Estos elementos geomorfológicos se presentan cuando una colina está aislada en el pie de una ladera por acción de un plano de falla. Por lo tanto las geformas estructurales que rodean todo el ambiente geológico de Pamplona y La Lejía permiten indicar la actividad tectónica que ejerce en estos sectores elementos como la Falla de Chitagá y el Sinclinal de Pamplonita en el desarrollo geomorfológico de la zona (**FIGURA 44**).





**FIGURA 44** Silleta de falla asociada al trazo de la falla Chitagá. Panorámica tomada en un sector al nororiente del depósito. Ubicada sobre la Unidad De Cuarzomonzita (JRcg).

#### 6.2.2.4. Geformas Periglaciares.

El ambiente periglacial característico en la cadena montañosa de los Andes está relacionado principalmente a la influencia que presenta la topografía, la cual permite que se establezca un entorno propicio para que factores como la temperatura, circulación del aire, radiación solar, actúen de manera adecuada para el desarrollo de este ambiente. Las evidencias encontradas en este depósito para catalogarlo dentro de un ambiente periglacial, se dan por el hallazgo de fragmentos de roca de diferente tamaños, que se encuentran en dirección perpendicular hacia el depósito, que indica la presencia de bloques erráticos y morrenas, geformas típicas de este ambiente. Los bloques erráticos son fragmentos de roca relativamente grandes que fueron transportados por el hielo de los glaciares, y en la zona de estudio, se observaron como *boulders* finos a gruesos, con tamaños que van desde centímetros hasta alcanzar los 3 m



aproximadamente, cuya litología corresponde principalmente a cuarzoareniscas de la Formación Aguardiente (Kia). Las morrenas consisten en depósitos que se forman debido al arrastre de material que produce el paso de una lengua glaciar. Calderón y Romero (2009), cartografiaron morrenas terminales (Q2m) al Noroccidente del depósito La Lejía y coluviones (Q0c) sobre ambos costados (este y oeste) del mismo, que al observar su disposición en campo, se catalogaron como derrubios periglaciares correspondientes a morrenas laterales (**FIGURA 45**, **FIGURA 46** y **FIGURA 47**).



**FIGURA 45** Bloques erráticos ubicados en el costado oeste del depósito la Lejía.



FIGURA 46 Montículos de Morrenas terminales en al NNW del Depósito La Lejía (Tomado de Calderón y Romero, 2009).



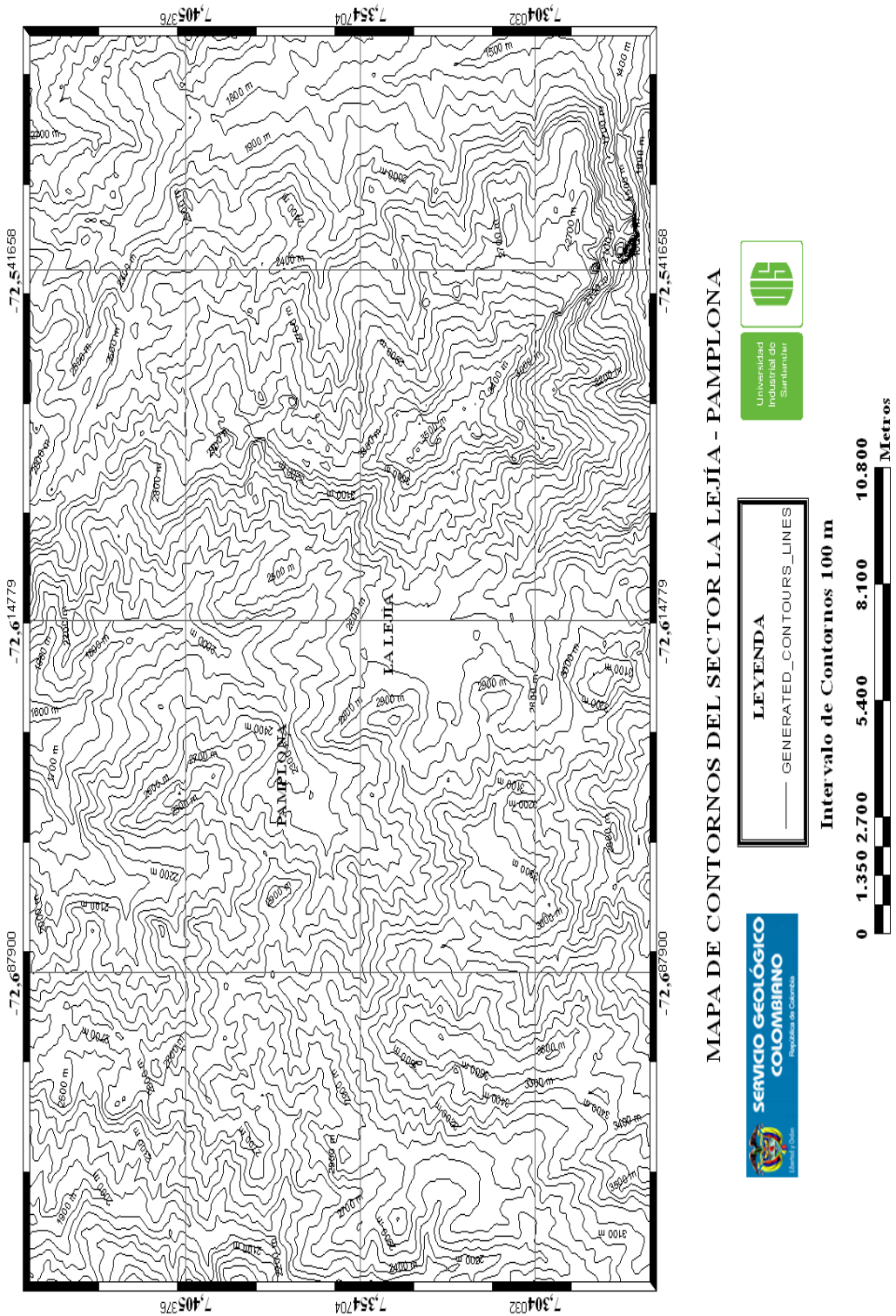
FIGURA 47 Coluviones interpretados como *tills* conformando morrenas laterales localizadas sobre el costado oeste del depósito La Lejía.

### 6.2.3. Morfometría

Dentro de la Geomorfología Cuantitativa, existe una rama que se dedica al estudio de las geoformas en términos de su altura, inclinación y longitud, ésta se conoce como *Morfometría*.

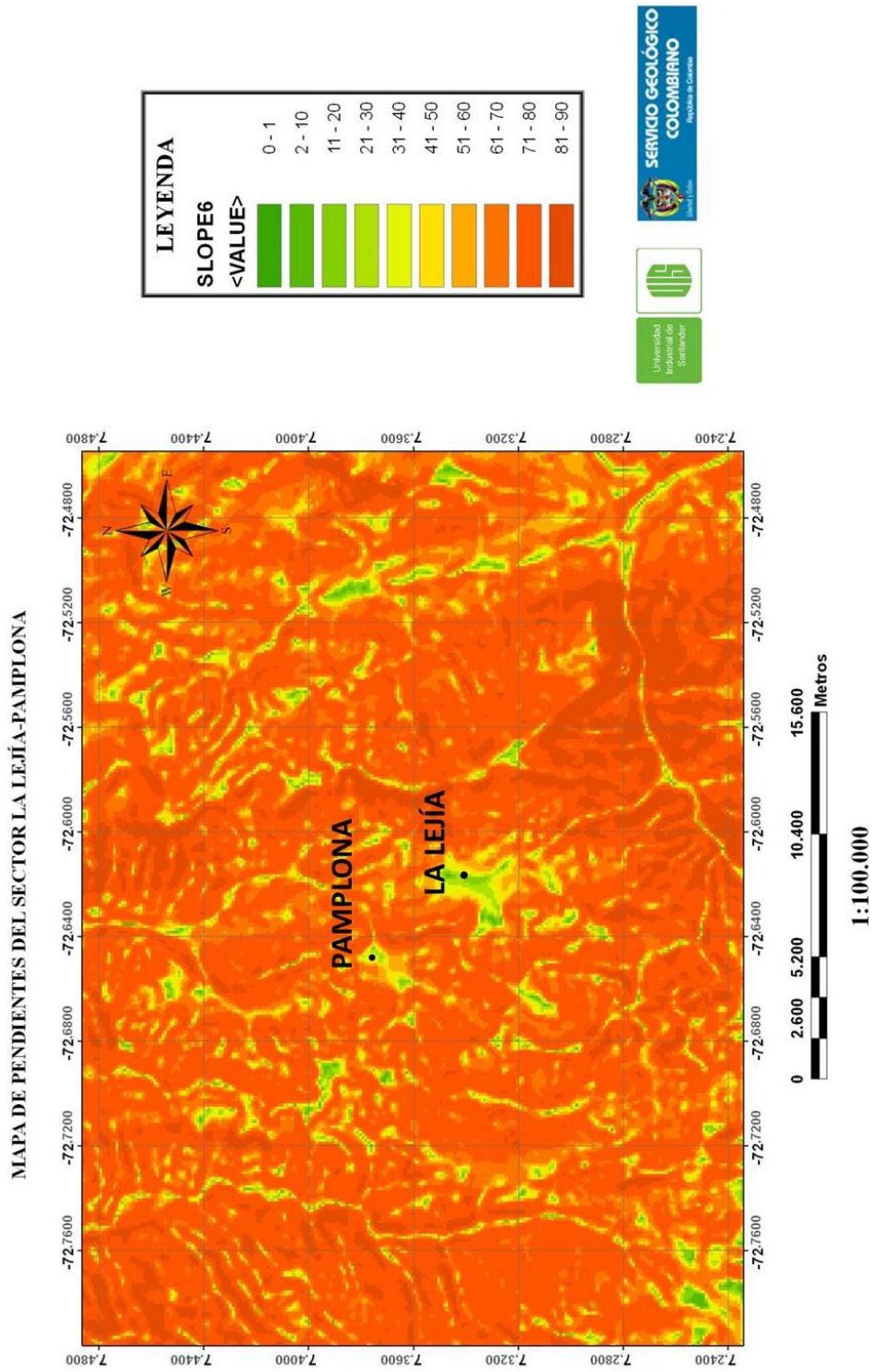
Para llevar a cabo el análisis morfométrico de la zona en la que se encuentra el depósito de La Lejía, se utilizó el mapa de contornos y el mapa de Pendientes. Con estos mapas, se identificaron y zonificaron las diferentes categorías de pendientes de acuerdo a la clasificación de Alvarado *et al*, (1982), quienes se basaron en el sistema de Klingebiel y Montgomery (1961) (**FIGURA 48 y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).





**FIGURA 48** Mapa de contornos del sector La Lejía –Pamplona elaborado con Global Mapper 12.0 a partir de la base de datos de ASTERDEM.





**FIGURA 49** Mapa de pendientes del sector La Lejía – Pamplona obtenido a partir del mapa de contornos en ArcMap 10.0.



En la

**TABLA 22**, para analizar el aspecto morfométrico se presenta la clasificación de pendientes del terreno utilizada en éste proyecto.

GRADOS	PORCENTAJE	DESCRIPCIÓN
0 – 2	0 – 3	Plano
2 – 3	3 – 6	Ligeramente ondulado
3 – 7	6 – 12	Ondulado
7 – 14	12 – 25	Muy Ondulado
14 – 22	25 – 40	Ligeramente escarpado
22 – 31	40 – 60	Escarpado
31 – 37	60 - 75	Muy Escarpado
>37	>75	Montañoso

**TABLA 22** Categorías de Pendientes en Grados y Porcentajes, según Alvarado *et al.* (1982)

Al analizar el mapa de pendientes de la zona, se encontró que hay predominio de terrenos muy escarpados, con pendientes entre el 60% – 70%, lo cual favorece el desarrollo de drenajes que contribuyen al modelado denudacional. El llano de Fontibón, donde se localiza el depósito Cuaternario, corresponde a un terreno ligeramente ondulado con pendientes entre 2% - 10%, mientras la ciudad de Pamplona se asienta sobre un terreno ondulado con pendientes entre 11% - 20%. Las pendientes con un porcentaje mayor al 60% se encuentran sobre las colinas y montañas que hacen parte de la unidad Cuarzomonzonita y la unidad Neis de



Bucaramanga (pEb), lo cual permite inferir el impacto de estas pendientes abruptas sobre las geoformas que se encuentran delimitando el costado Oeste y Sureste de la cuenca, mediante el transporte de material por parte de corrientes de agua hacia esta zona. Por lo tanto se puede argumentar que la interacción que presenta la variada topografía, el clima representado en gran parte en el alto índice de pluviosidad, que a su vez influye en el nivel de escorrentía y otros agentes erosivos, desempeña un papel importante en el aporte de sedimentos y su transporte hacia la cuenca de La Lejía. Así mismo dichos factores, facilitaron el desarrollo de las geoformas presentes en el sector de La Lejía y zonas aledañas, las cuales fueron originadas por procesos estructurales, denudacionales y glaciares, lo que da como resultado un ambiente geomorfológico de carácter mixto, bajo el cual se formó el paisaje actual de ésta zona (**FIGURA 29**).

### 6.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

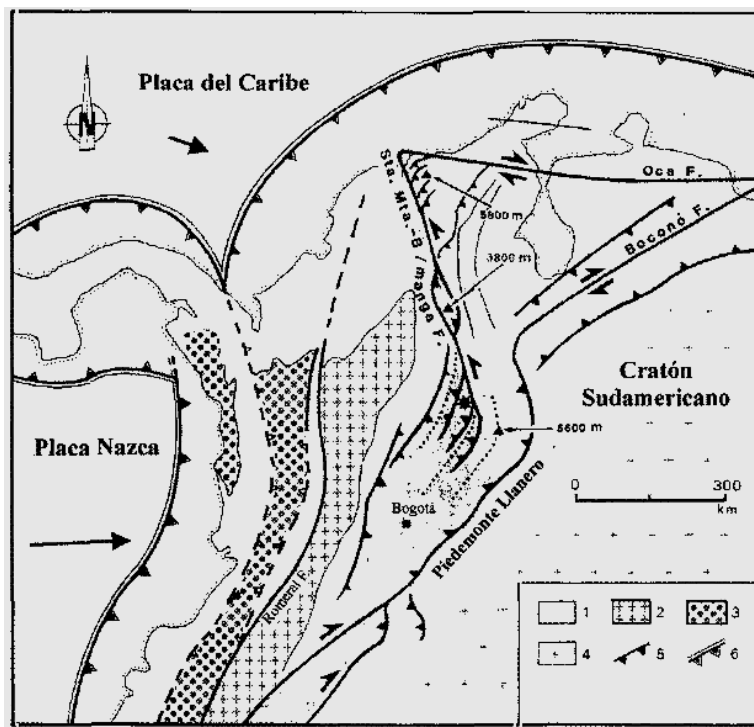
El contexto tectónico-estructural del área de interés, está definido por la colisión de las placas Nazca, Caribe y Suramericana, cuya actividad en el tiempo geológico ha modelado estructuralmente la geología presente en esta región, generando una configuración altamente compleja (

**FIGURA 50**).

Una de las investigaciones realizadas, en cuanto a geología estructural en Pamplona, es la de Boinet *et al.*, (1985), quienes se enfocaron en la región limítrofe entre la Cordillera Oriental colombiana y los Andes de Mérida. Allí plantearon la existencia de una megaestructura a la que denominaron el “Indenter o Punzón de Pamplona”, el cual se formó como resultado de la segunda etapa de compresión que experimentó el Macizo de Santander. Destacan al “punzón” como una extensión de los Sistemas de Fallas del Pilar y Boconó, cuya prominencia es evidente en el nororiente colombiano, en donde se asocia con las fallas Chucarima



y Chinácota. Igualmente, plantearon las implicaciones que tuvo la subducción de la placa Caribe sobre la placa Suramericana, en la formación de estructuras presentes en estas cadenas montañosas. Basándose en la geología local del área correspondiente al municipio de Pamplona, identificaron las unidades presentes, entre las que destacan la Unidad de Labateca y la unidad de Chinácota, localizadas al Sureste de la ciudad de Pamplona. Estas dos unidades evidencian importantes rasgos geológicos que han influido en la tectónica del área y representan una fuente importante para el análisis sismogénico, debido a las características halladas en este sector, como consecuencia de la relación tectónica entre la Cordillera Oriental y el sistema montañoso de los Andes de Mérida (Venezuela).



**FIGURA 50** Contexto Tectónico general de los Andes del Norte, donde se localizan los principales sistemas de fallas activas y potencialmente activas. 1 = Cordillera Oriental. 2 = Cordillera Central (polimetamórfica), 3 = Occidente (afinidad oceánica) - Cordillera



**Occidental y Serranía del Baudó, 4 = cratón, 5 = fallas inversas y de cabalgamiento, 6 = zonas de subducción del Pacífico y del Caribe. (Tomado de Taboada *et al.*, 1998)**

El análisis estructural realizado por Boinet *et al.* (1981), mostró rasgos tectónicos de eventos ocurridos en el post-cretáceo. Punto importante del estudio en esta parte de la cordillera Oriental, es la referencia a estructuras como las fallas de Labateca y de Duran, que permiten una mayor comprensión de la geología regional. De acuerdo con Boinet *et al.* (1981), el movimiento de estas fallas determinó una fase de distensión y otra de compresión, considerados como eventos pre cretáceos que están asociados con el cabalgamiento de la unidad de Labateca sobre la unidad de Chinácota. La dinámica de los bloques mencionados, es similar a la tectónica de otras estructuras como la falla de Boconó, que ha generado una serie de pliegues y fallas entre los que se destacan: el Sinclinal de Pamplonita, la Falla Chitagá y la Falla de Pamplona, los cuales ejercen un fuerte control estructural sobre la cuenca de La Lejía. No obstante, también se encuentra gran cantidad de fallas satélites y lineamientos con tendencia N-NW, que representan gran interés para la realización de estudios paleosismológicos (**FIGURA 51**).

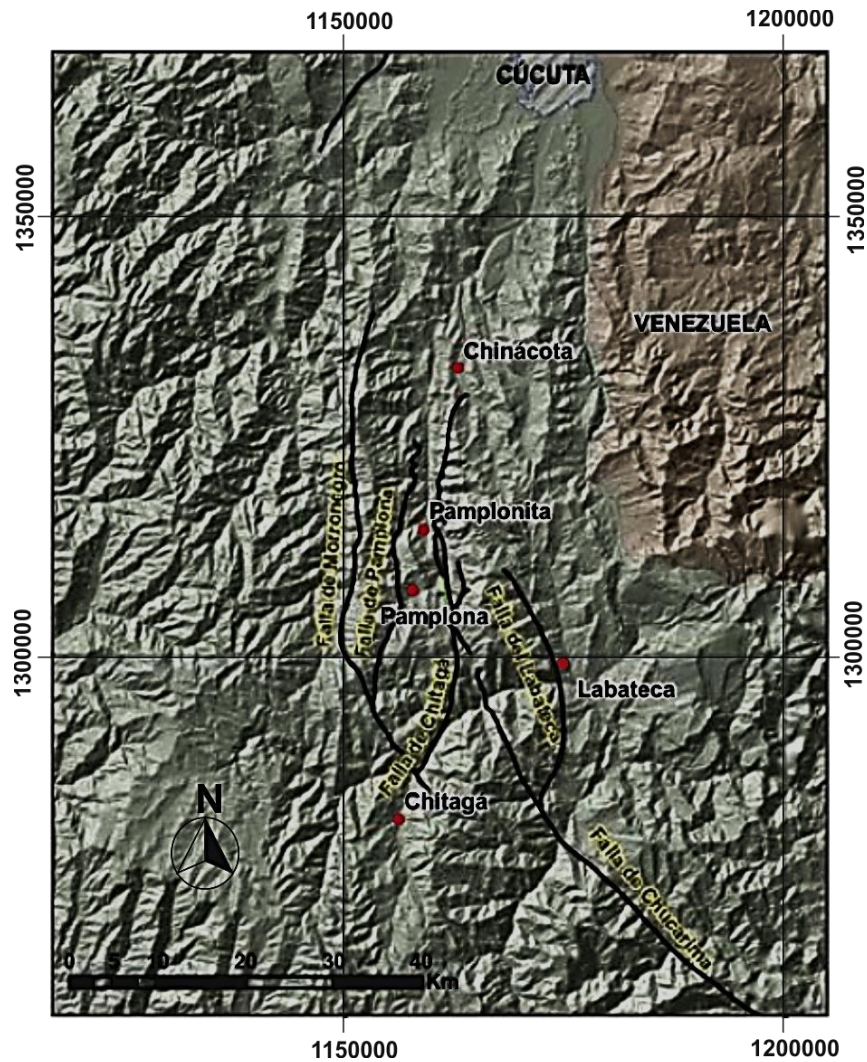
Con base en la cartografía geológica elaborada por Ward *et al.* (1977), y en cortes geológicos realizados por este estudio, se presentan las características de las estructuras más importantes de la zona. Es de aclarar que para los cortes geológicos elaborados, se incluyen conceptos estructurales más actualizados y básicamente se abandona el modelo de bloques hundidos y levantados plasmado en Ward *et al.* (1977).



### 6.3.1. Falla de Pamplona

Hacia el Norte de Pamplona, esta estructura presenta una orientación N-NE, en donde pone en contacto el Ortoneis Predevónico (pDo) con rocas sedimentarias cretácicas de la Formación Capacho (Kic). En esta zona Ward *et al.* (1973), calculan un desplazamiento de unos 2000 – 2500 m producido por esta estructura, y además infieren que de norte a sur, la falla sigue el curso de la quebrada Sabanetas, en donde es cubierta por un depósito Cuaternario de coluvión (Qd), hasta llegar al costado Oeste del casco urbano del municipio de Pamplona, en donde esta falla cambia ligeramente su orientación a N-NW. Sin embargo, hacia el Suroeste de Pamplona, vuelve a recuperar su curso normal (N-NE), allí corta al granito de Durania y luego lo pone en contacto con los esquistos pre-devónicos del Silgará. Continuando esta orientación, la falla de Pamplona termina en la Falla de Morronegro, donde aparece el núcleo del Sinclinal Carbonera (**FIGURA 51**).





**FIGURA 51** Mapa estructural regional, donde sobresalen las principales fallas de la zona de estudio (Tomado de Romero, 2011)

### 6.3.2. Falla de Chitagá

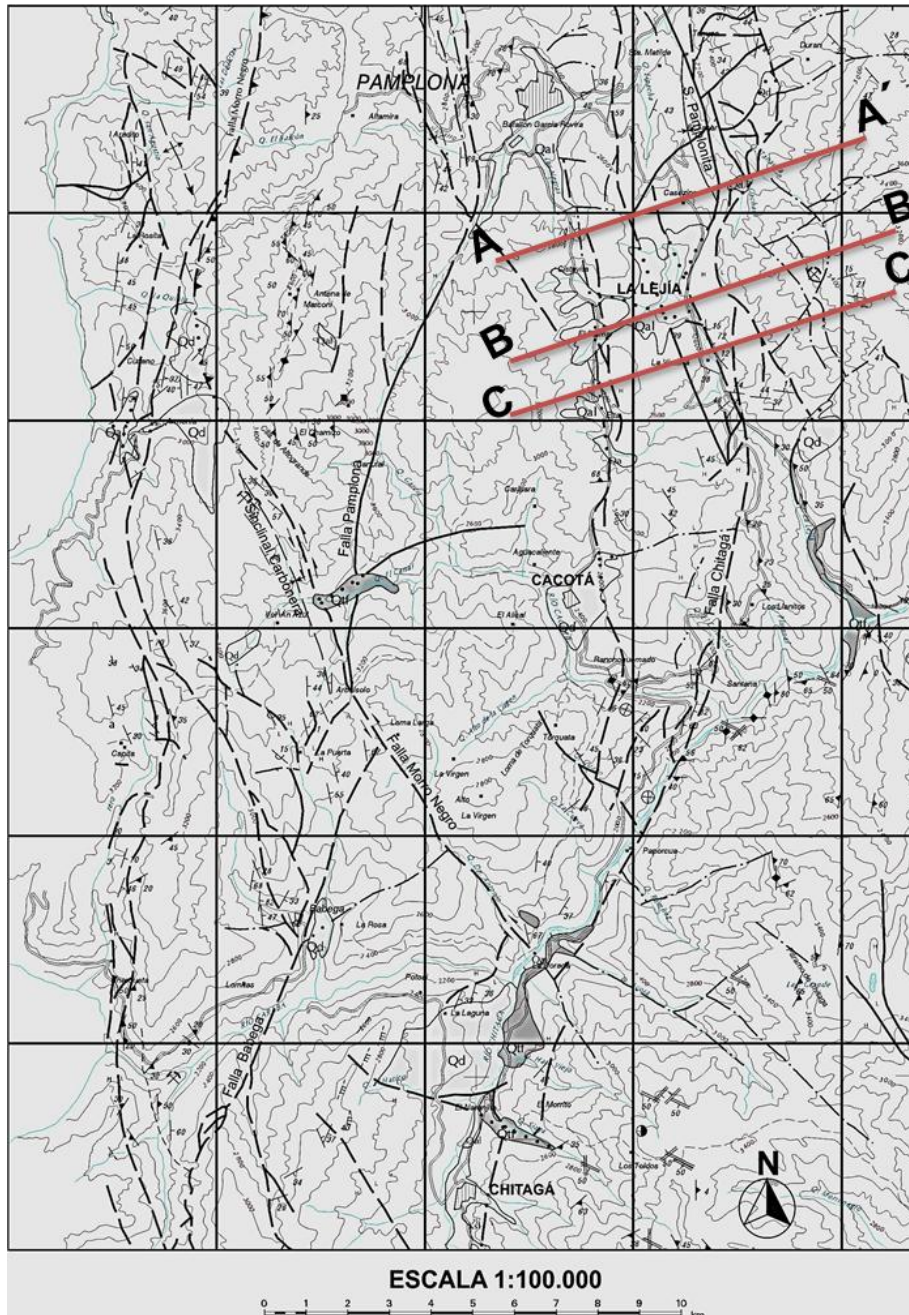
Según el trabajo de Ward *et al.* (1973), esta es la falla de mayor extensión en el flanco oriental del macizo de Santander. En cercanías a la cabecera municipal de Pamplona, en el extremo noreste, esta falla presenta una orientación sureste y bordea el sinclinal de Pamplonita, generando un desplazamiento vertical de las capas de esta zona, dejando en incertidumbre el flanco oriental de esta estructura.



Paris *et al.* (2000) ponen de manifiesto características geométricas de esta falla, como su longitud, la cual estima según estudios de campo en 192.5 km, con un rumbo promedio de N.4.8W, además detalla la similitud en el comportamiento que presenta la falla de Chitagá y el sistema de fallas de Morronegro-Las Mercedes, las cuales el autor presume son una extensión de la falla de Boconó y fallas asociadas a los Andes Venezolanos (**FIGURA 52**).

En el sitio de la cuenca La Lejía, la falla pone en contacto el relleno Cuaternario de la cuenca (Qal) con rocas del Cretácico (Kscm) y Paleógeno (Tpb), y su trazo adopta una forma cóncava hacia el Este, que es similar a la de un lineamiento que sigue el contacto entre rocas graníticas del Jurásico (JRcg) y rocas sedimentarias del Cretácico (Kscm). En esta misma zona, la falla es cortada por un lineamiento con tendencia E-W y se encuentra asociada a dos lineamientos de orientación N-NW, los cuales fueron inferidos con fotogeología y están representados en el Cuadrángulo H-13. Más hacia el sur del Sinclinal de Pamplonita, la falla de Chitagá, presenta una orientación NE controlando el curso del río Chitagá. En éste sector, la falla ha levantado el neis de Bucaramanga poniéndolo en contacto con rocas sedimentarias del Cretácico. Hacia el sur del casco urbano de Chitagá, la falla cambia su trayectoria y se orienta en dirección SE, siguiendo el curso de las Quebradas Sorotama y el Quemado. Ward *et al.* (1973), calculan el desplazamiento generado por esta falla, en unos 2300 m en el sector este del sinclinal de Pamplonita y en 2200 m, hacia el sur de Chitagá (**FIGURA 53**).





**FIGURA 52** Esquema estructural del sector de La Lejía. Se muestra el trazo de los 3 perfiles geológicos utilizados para el análisis estructural. (Tomado y adaptado de Ward et al., 1977)





**FIGURA 53** Panorámica al nororiente del depósito de la Lejía, en la cual se resalta el trazo de la Falla Chitagá.

Las zonas descritas conforman lo que Boinet *et al.* (1985), denominaron como el Indenter de Pamplona, una región de gran importancia tectónica, teniendo en cuenta la interacción de las placas Nazca, Caribe y Suramericana.

### 6.3.3. Sinclinal de Pamplonita

De acuerdo con el trabajo elaborado por Ward *et al.* (1973), las unidades sedimentarias que conforman ésta estructura son desde la más antigua a la más reciente: rocas jurásicas de la Formación Girón (Jg); del Cretáceo superior, las formaciones Tibú – Mercedes (Kitm), Aguardiente (Kia), Capacho (Kic), Luna (Ksl), Colón – Mito Juan (Kscm), y del Terciario, las unidades Barco (Tpb) y Cuervos (Tpic), ésta última constituye el núcleo del sinclinal de Pamplonita.



El núcleo del sinclinal, aflora sobre el bloque oeste de la Falla Chitagá. Es muy probable que esta falla haya sido la encargada de las discontinuidades e inversiones en la secuencia geológica del flanco Este del sinclinal de Pamplonita. Según Ward *et al.* (1973) las rocas cretácicas del bloque este de la Falla de Chitagá, están seriamente afectadas por fallas transversales, es por esta razón que dicho flanco del sinclinal no se puede identificar con certeza (**FIGURA 54**).

El flanco Oeste del sinclinal de Pamplonita, está mejor definido que el oriental, y uno de sus principales rasgos geomorfológicos, corresponde a un filo conformado por areniscas de la Formación Aguardiente, bastante prominente. En este mismo flanco, se presentan depósitos cuaternarios, a los que Ward *et al.* (1973) clasifican como de origen aluvial (Qal), y se presentan como rellenos de antiguas cuencas tectónicas. En este flanco se encuentra la cuenca de La Lejía, cuyo depósito cuaternario constituye el objeto de estudio de este trabajo.



**FIGURA 54** Panorámica al nororiente del área donde se realizó la trinchera. Sobresale la Formación Aguardiente (Kia) y se aprecia el eje del Sinclinal de Pamplonita (SP).



#### 6.3.4. Análisis estructural mediante cortes geológicos

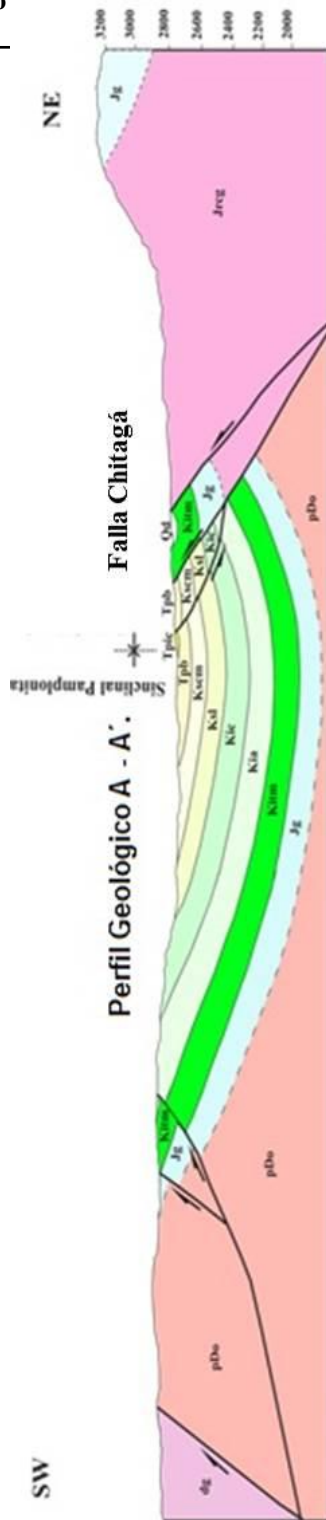
Como mecanismo para efectuar el análisis de las estructuras mencionadas, se realizaron tres cortes geológicos sobre el cuadrángulo H-13, cuya localización se muestra en la **FIGURA 29** y **FIGURA 52**. Dichos perfiles geológicos se elaboraron a escala 1:20.000 y tienen la misma orientación en los tres casos, SW – NE, debido a que se consideró que de esta manera se lograría cortar la mayoría de las estructuras geológicas presentes. Se realizaron tres cortes en diferentes posiciones, el A – A´ se localiza al Norte del depósito La Lejía, el B – B´ atraviesa el depósito de interés y el C – C´ se encuentra en el sur de éste mismo depósito. La relación entre la escala vertical y horizontal utilizada en cada corte fue 1H:1V.

El corte A-A´ refleja eventos tectónicos originados por un régimen de esfuerzos principalmente de tipo compresivo. Uno de los rasgos estructurales que pueden dar un argumento para confirmar el anterior planteamiento es la presencia del Sinclinal de Pamplonita y las fallas inversas de la zona. Por lo tanto, se observa el plegamiento de capas que van desde el Jurásico, con la Formación Girón que descansa en contacto discordante sobre el basamento cristalino constituido por el Ortoneis de Pamplona, hasta afectar rocas del Paleógeno pertenecientes a la Formación Cuervos (Tpic), que constituye el núcleo de esta estructura. Así mismo, se observan fallas inversas que afectan principalmente unidades del Jurásico. Un ejemplo corresponde a un lineamiento asociado a la falla de Chitagá, cuyo efecto directo no es tan notorio en este sector, pues afecta a rocas del Paleógeno poniendo en contacto a la Formación Cuervos con la Formación Barco. La Falla Chitagá generó una consecuencia importante que fue el levantamiento de un bloque ígneo correspondiente a la Unidad Cuarzomonzonita (JRcg) sobre capas de la Formación Tibú - Mercedes (Kitm), produciendo así la erosión de la mayor parte del flanco este del Sinclinal de Pamplonita. La Falla Chitagá que Ward *et al.*



(1977) interpretaron como inferida, se encuentra afectando al costado este de un depósito Cuaternario de derrubios (Qd). Lo anterior hace pensar que este depósito, aunque no tiene un tamaño considerable, puede estar sufriendo los efectos de la actividad de las fallas satélites asociadas a la Falla Chitagá. Así mismo, una de estas fallas afectó parte del flanco este del Sinclinal de Pamplonita que no alcanzó a ser erosionado, lo que se evidencia en el hecho de que las sedimentitas de la Formación Tibú – Mercedes (Kitm), fueron sobrepuestas sobre areniscas de la Formación Barco (Tpb) (**FIGURA 55**).





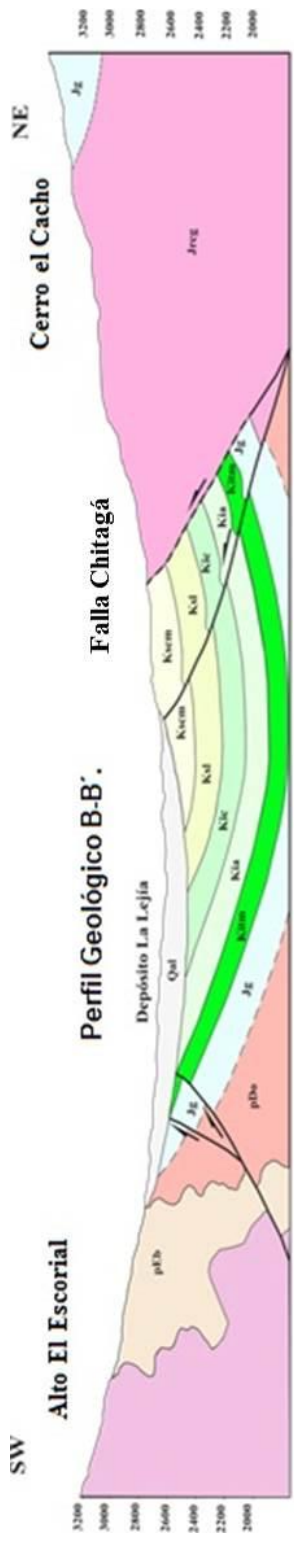
**FIGURA 55 Perfil Geológico A - A'.**



El corte B-B' atraviesa el depósito Cuaternario (Qal) de La Lejía. Uno de los rasgos más característicos en este perfil, es que dicho depósito suprayace a las rocas cretácicas que afloran en el flanco Oeste del Sinclinal de Pamplonita en contacto discordante de tipo angular. Así mismo, este depósito se presenta como un relleno sedimentario que se depositó en una cuenca delimitada al Este y Oeste por fallas inversas que levantaron bloques antiguos de rocas cristalinas del Neis de Bucaramanga (pEb) y de la Unidad Cuarzomonzonita (JRcg). Se observa la presencia de fallas satélites inversas que afectan a unidades cretácicas, pero por tratarse de fallas cubiertas, se asume que no están afectando al depósito Cuaternario de La Lejía. Es importante mencionar que Ward *et al.* (1977) también interpretaron que la Falla Chitagá está cubierta en éste sector y por lo tanto no afecta al depósito de La Lejía, razón por la cual, las evidencias de actividad neotectónica no se pueden asegurar en este sitio. No obstante, todo lo anterior representa una interpretación basada en las observaciones del mapa geológico H-13 y por lo tanto está sujeto a comprobación con datos de campo y ensayos de laboratorio pertinentes (

**FIGURA 56).**





### FIGURA 56 Perfil Geológico B-B´.

Con el corte C – C´ se comprueba el predominio del régimen compresivo de la tectónica del sector de La Lejía – Pamplona, pues al igual que en los perfiles A - A´ y B – B´, se presentan los mismos elementos estructurales correspondientes a fallas satélites de las fallas Chitagá y Pamplona, que han generado el levantamiento de unidades antiguas del Predevónico y Jurásico, sobre unidades del Cretácico. Se destaca la presencia de un depósito Cuaternario aluvial (Qal) que bordea una falla satélite de la Falla Pamplona, y a su vez dicho depósito está en contacto con el Neis de Bucaramanga (pEb) y la Formación Girón (Jg) (

**FIGURA 57).**

La descripción y análisis de los elementos estructurales presentes en el sector de La Lejía, permiten argumentar que la fase de compresión fue clave en la formación de la cuenca, lo cual se produjo cuando fallas inversas generadas en esta etapa brindaron el espacio de acomodación que posteriormente se convirtió en la cuenca La Lejía. Así mismo las relaciones estructurales interpretadas a partir de los cortes geológicos, no permiten descartar ni afirmar la existencia de actividad neotectónica por parte de las fallas satélites que Ward *et al.* (1977) consideran como cubiertas en el depósito de La Lejía (**FIGURA 58**).



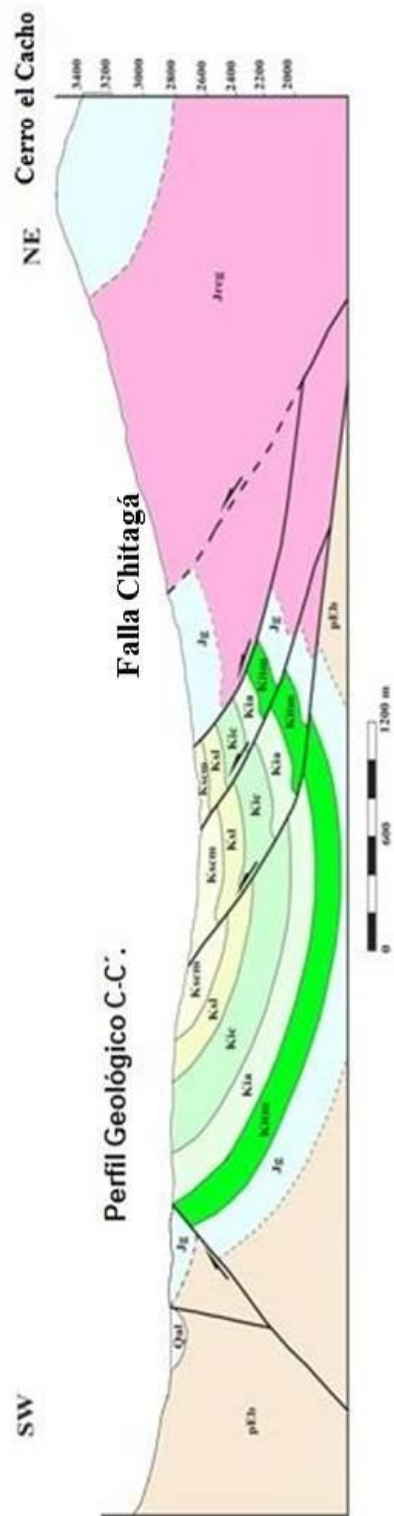
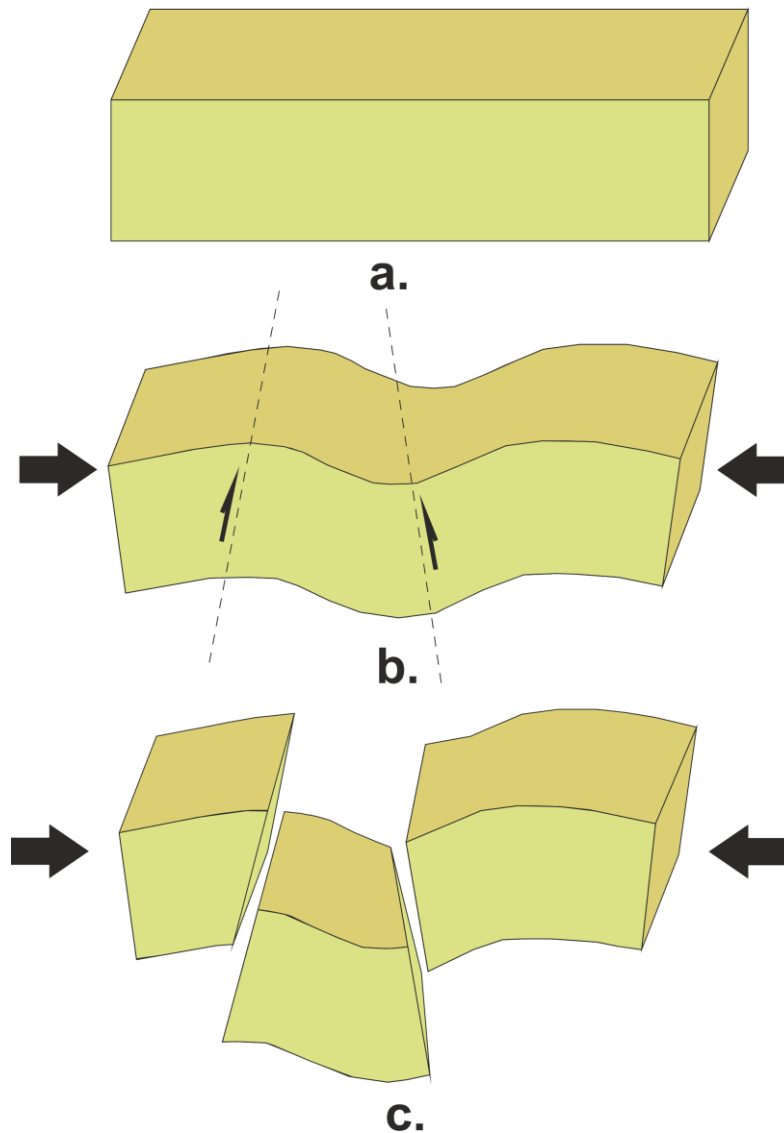


FIGURA 57 Perfil Geológico C-C´



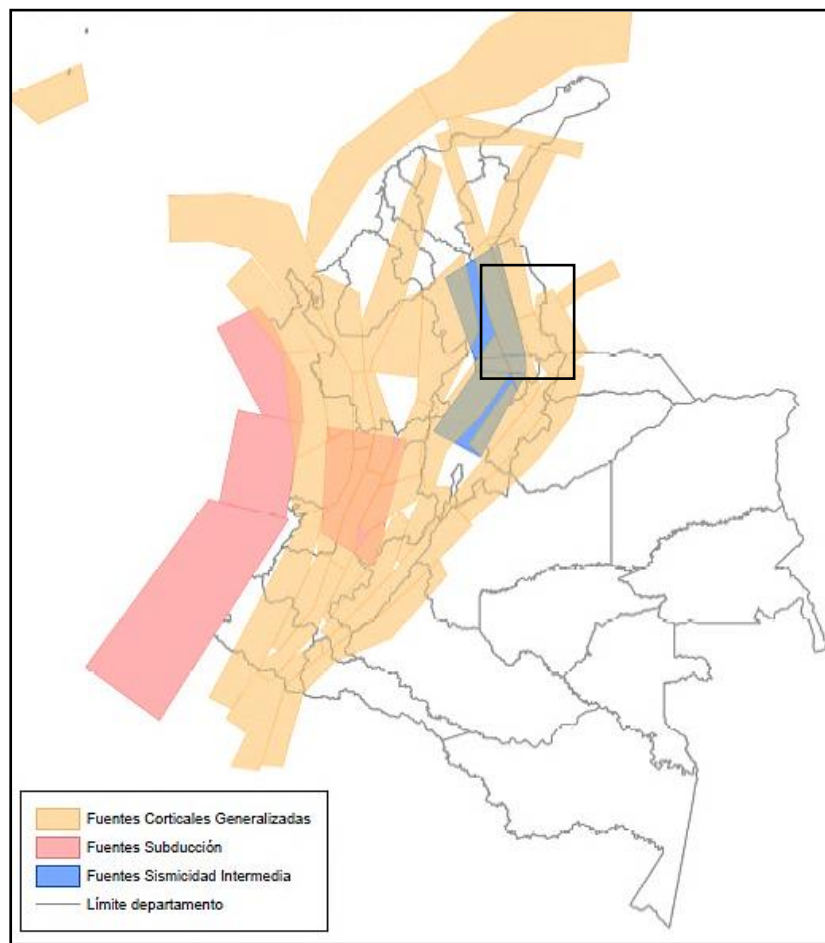


**FIGURA 58** Modelo que sintetiza la etapa de compresión que afectó al sector de La Lejía-Pamplona: (a) Etapa inicial previa a la deformación; (b) Esfuerzos de carácter compresivo que generaron plegamientos y fallas inversas (Sinclinal de Pamplonita y Falla Chitagá); (c) Bloque hundido en el centro por acción de las fallas inversas, que generó el espacio de acomodación para formar la cuenca de La Lejía.



### 6.3.5. Sismicidad

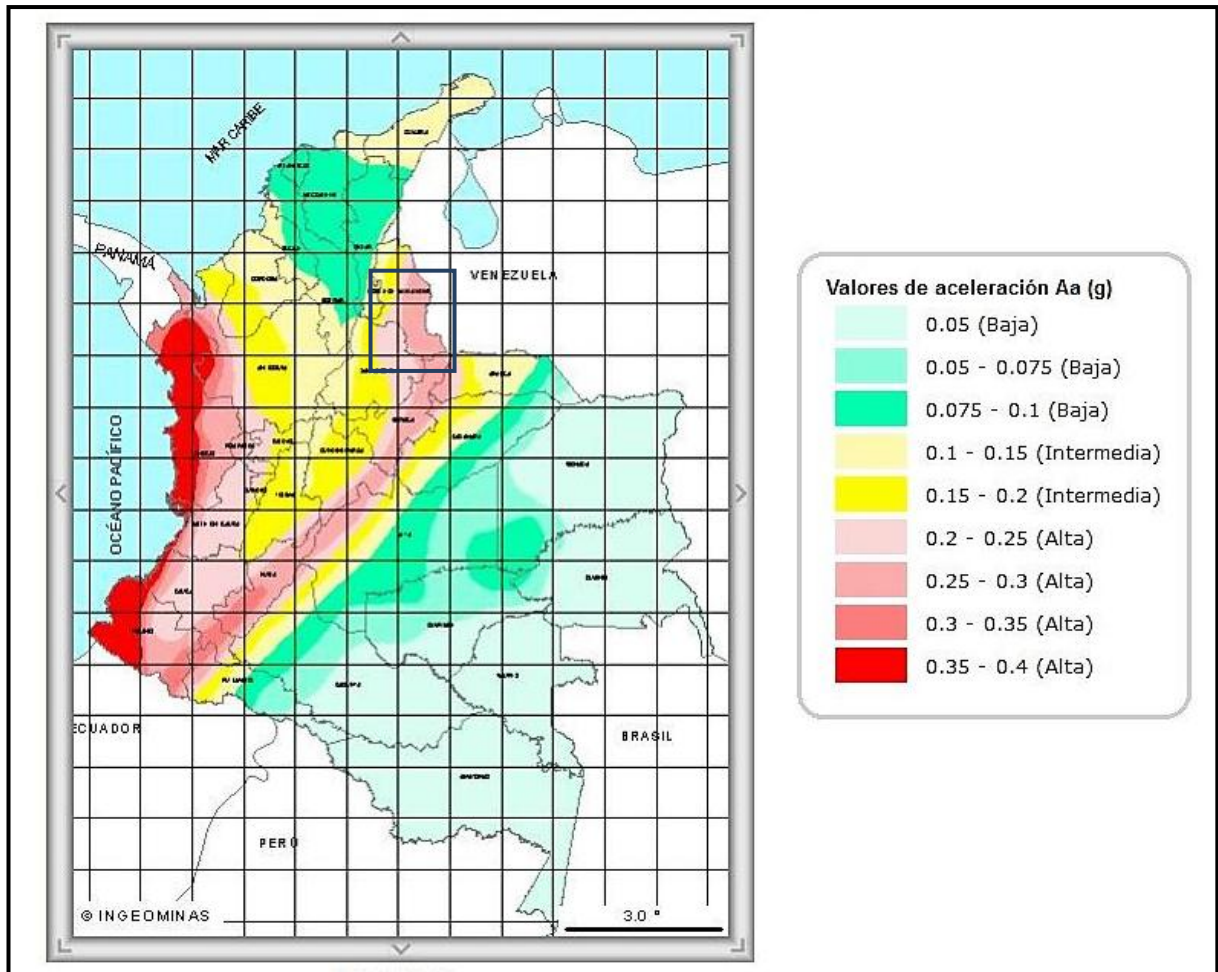
El municipio de Pamplona está catalogado como una región de grado alto en lo que respecta al nivel de amenaza sísmica, que la Red Sismológica Nacional ha clasificado en bajo, medio y alto. Según el mapa de fuentes sismogénicas de Colombia, el municipio de Pamplona se encuentra en una zona de sismicidad intermedia y una zona con fuentes de tipo cortical, representada por la interacción de las placas Caribe, Nazca y suramericana (**FIGURA 59**).



**FIGURA 59** Mapa generalizado de fuentes sismogénicas en Colombia (Tomado de Ingeominas y UNAL., 2010).



La historia sísmica de Colombia permite identificar los principales sismos según su ubicación geográfica. En Colombia, la Cordillera Oriental y la Costa Pacífica, son zonas que registran eventos sísmicos con altas tasas de aceleración (**FIGURA 60**).



**FIGURA 60** Mapa de Actividad sísmica en Colombia presentado en el estudio General de Amenaza Sísmica para Colombia (Tomado de Ingeominas *et al.*, 1996)

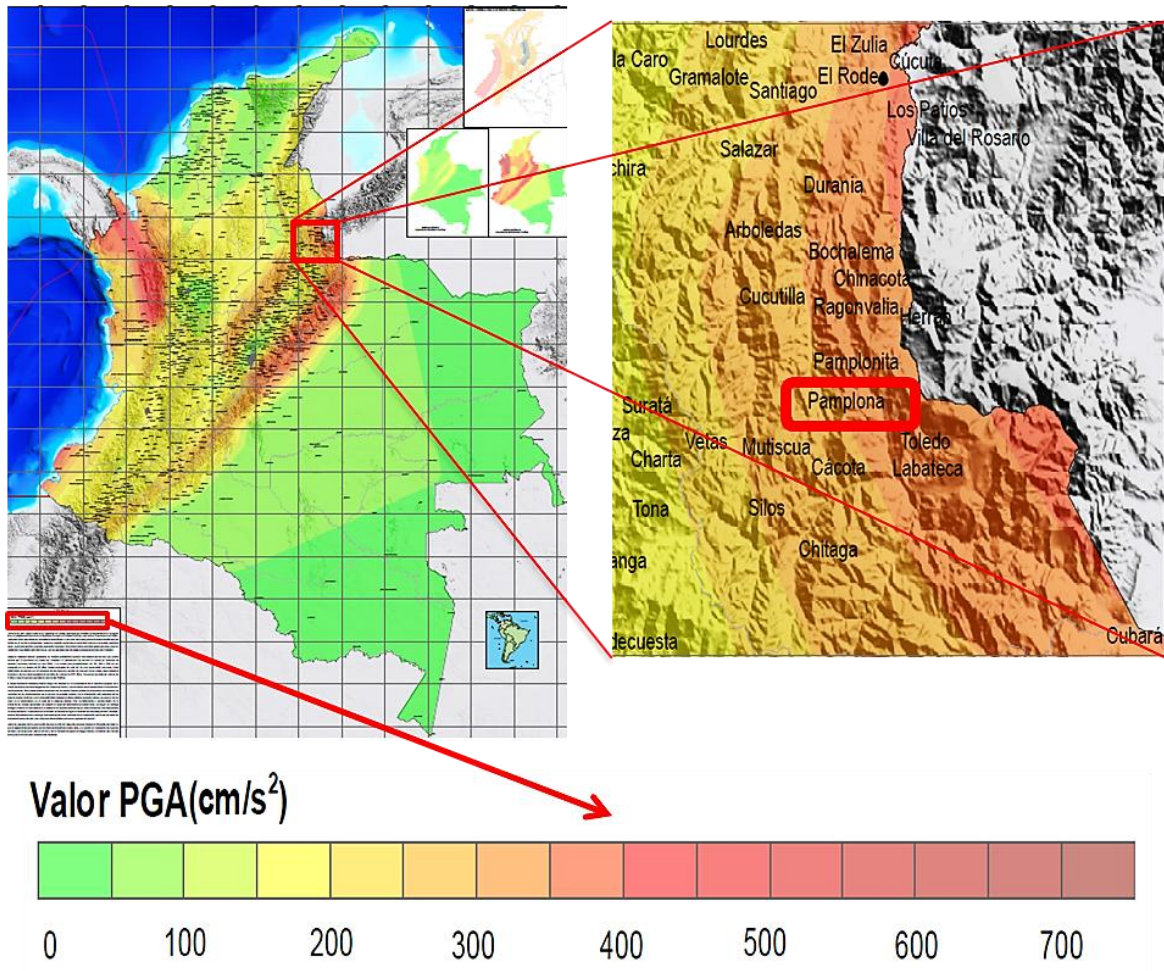
El mapa de amenaza sísmica representa un modelo probabilístico para el movimiento del terreno que podría esperarse por la ocurrencia de sismos en



Colombia. El movimiento del terreno se calcula en términos de aceleración horizontal máxima en roca (PGA), y se estima para probabilidades del 2%, 10% o 50% de ser sobrepasado en un tiempo de 50 años, tiempo estimado de vida útil de una construcción corriente. Ingeominas y UNAL (2010), elaboraron un mapa donde asociaron estas probabilidades con la frecuencia de ocurrencia de los sismos potencialmente destructores de ocurrencia frecuente (período de retorno de 475 años). Según este reporte, en el municipio de Pamplona y zonas aledañas (incluyendo los municipios de Pamplonita, Cacotá, Chitagá, Mutiscua, Silos y Toledo) la probabilidad de retorno es alta para un evento con aceleración horizontal de 400 – 500 PGA (**FIGURA 61**).

En el **Anexo12.1** se presenta un registro de los sismos ocurridos entre el periodo correspondiente 1993 – 2012, en donde se encontró un total de 147 eventos sísmicos, de los cuales uno ocurrió en Pamplona en el año 2011 con una magnitud local (MI) de 0.8 a una profundidad de 3.1 km. En Chitagá sucedieron 31 eventos, de los cuales el de mayor magnitud ocurrió en el año 2009, con 3.7 MI y fue superficial. En Cacota en este período han sucedido 6 eventos, siendo el del 11 de febrero de 2004, el de mayor magnitud con 2.8 MI a una profundidad de 169 km. Pero de todas las localidades mencionadas que rodean al área de estudio, es el municipio de Toledo el que ha tenido la mayor actividad sísmica, pues se han registrado 55 eventos, con magnitudes locales que varían entre 1.1 a 4.5. Aunque no se tienen reportes de pérdidas materiales, ni humanas por la ocurrencia de estos eventos en dichas regiones, es claro que esta zona es un foco de actividad sísmica y es por ello que el Servicio Geológico Colombiano estableció allí la fuente sismogénica Chitagá-Pamplona.

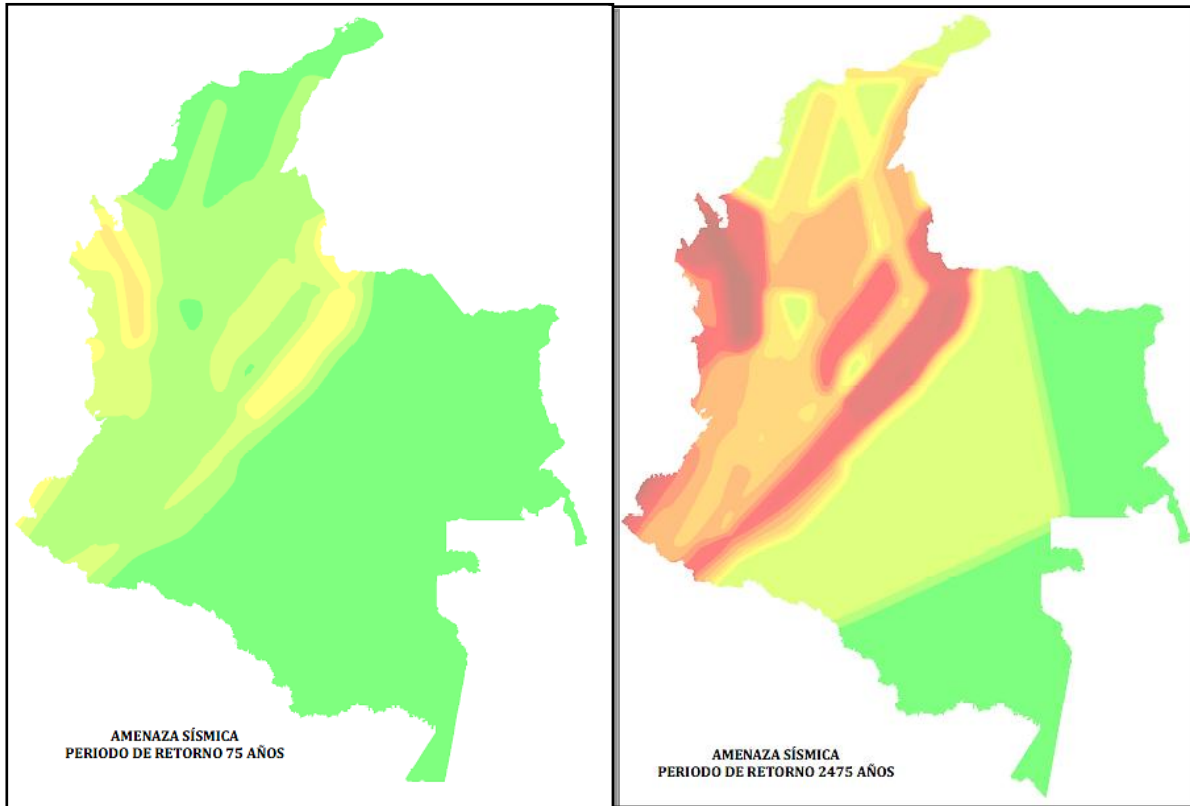




**FIGURA 61.** Mapa de amenaza sísmica para probabilidades de retorno de 475 años (Tomado de Ingeominas y UNAL., 2010).

En la **FIGURA 62** se presentan los mapas de amenaza sísmica de Colombia para períodos de retorno correspondientes a 75 años y 2475 años. De acuerdo con estos mapas, el sector de La Lejía-Pamplona, tiene una amenaza sísmica media-baja para eventos de ocurrencia frecuente (retorno de 75 años), y la amenaza es alta para eventos sísmicos de ocurrencia excepcional (retorno de 2475 años) con aceleraciones de 150 PGA y 600 PGA respectivamente.





**FIGURA 62** Mapas de Amenaza sísmica de Colombia. (a) Período de retorno de 75 años; (b) Período de retorno de 2475 años (Tomado de Ingeominas y UNAL., 2010)

Como la probabilidad de ocurrencia de sismos con aceleraciones horizontales es elevada para períodos de retorno de 475 y 2475 años, y considerando que esta región cuenta con aproximadamente 94000 habitantes (Dane, 2005), se deduce que el sector de La Lejía-Pamplona tiene un alto riesgo por amenaza sísmica.

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Resultados del levantamiento de las trincheras paleosismológicas de La Lejía.

Como actividad previa a la apertura de las trincheras, se llevó a cabo la medición de la profundidad de niveles piezométricos para 5 apiques en diferentes sectores del depósito (**FIGURA 8**) cuyos resultados se muestran en la **TABLA 23**.

Numero de Apique	Profundidad nivel freático (cm)
1	34
2	32
3	50
4	30
5	30

**TABLA 23** Resultados de la medición manual de niveles freáticos.

Aunque en las mediciones efectuadas la mayor profundidad no superó los 50 cm, en el caso de la trinchera-2 el nivel freático superó los 2.30 m, por lo cual se evidencia que en éste sector existe una variación notable de la piezometría (**FIGURA 63**).

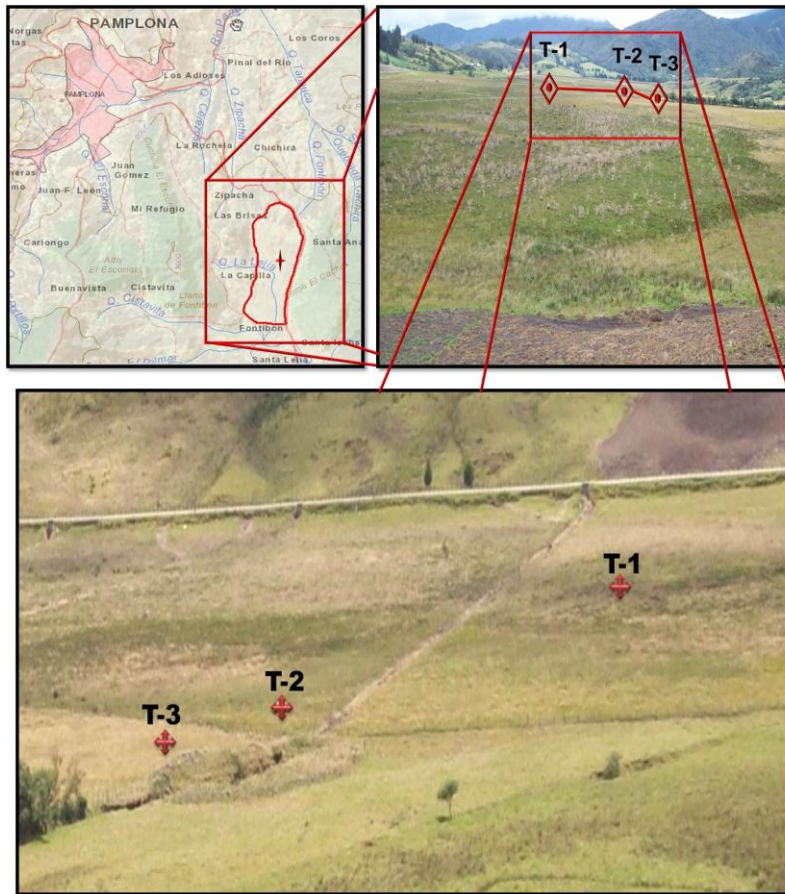




**FIGURA 63** Apique en el cual el nivel freático alcanzó una profundidad de 50 cm (longitud máxima de la regla).

El desarrollo de la exploración paleosismológica de La Lejía, se llevó a cabo mediante tres excavaciones que se denominaron: Trinchera-1, Trinchera-2 y Trinchera-3 (**FIGURA 64**), cuyas coordenadas se presentan en la **TABLA 24**.





**FIGURA 64** Localización de las trincheras de exploración paleosismológica en el sector de La Lejía. Trinchera 1 (T-1), trinchera 2 (T-2), trinchera 3 (T-3).

TRINCHERA	LONGITUD	LATITUD
Trinchera 1	72°36'55.4	7°20'35.9
Trinchera 2	72°37'00.6	7°20'38.2
Trinchera 3	72°37'01.3	7°20'38.8

**TABLA 24** Coordenadas geográficas (Magna SIRGAS) adquiridas con GPS, de las tres Trincheras exploratorias abiertas para la investigación paleosismológica.



### 7.1.1. TRINCHERA-1

La trinchera 1 se orientó con un rumbo N62W y sus dimensiones finales aproximadas fueron: 3m de longitud, 1.10m de ancho y 0.8m de profundidad (**FIGURA 65a**).

En general, el material que quedó expuesto al realizar la excavación era de color negro, de textura arcillosa muy dúctil, con una elevada saturación de agua y por lo tanto un alto contenido de humedad natural. A pesar de su comportamiento dúctil, este suelo presenta buena cohesividad. Cabe anotar, que el color tan oscuro, es una clara evidencia de su alto contenido de materia orgánica. A pesar de que no había diferencias evidentes en cuanto a coloración, se pudieron distinguir tres zonas en esta excavación, con otro tipo de características.

La primera zona, alcanzó los 25 cm de profundidad y el material era arcilloso, tenía una plasticidad moderada y su principal característica es su alto contenido de raíces muy finas y alargadas de la vegetación actual en superficie.

La segunda zona, va desde los 25 cm hasta los 40 cm, caracterizándose por la homogeneidad del suelo en cuanto a su textura arcillosa, su elevada plasticidad y la ausencia de raíces y demás restos vegetales.

La tercera zona está comprendida entre los 40 cm y 80 cm de profundidad, y aunque el material es físicamente muy similar al anterior, se diferencia claramente por su contenido de restos vegetales leñosos, como tallos y raíces, distribuidos heterogéneamente.

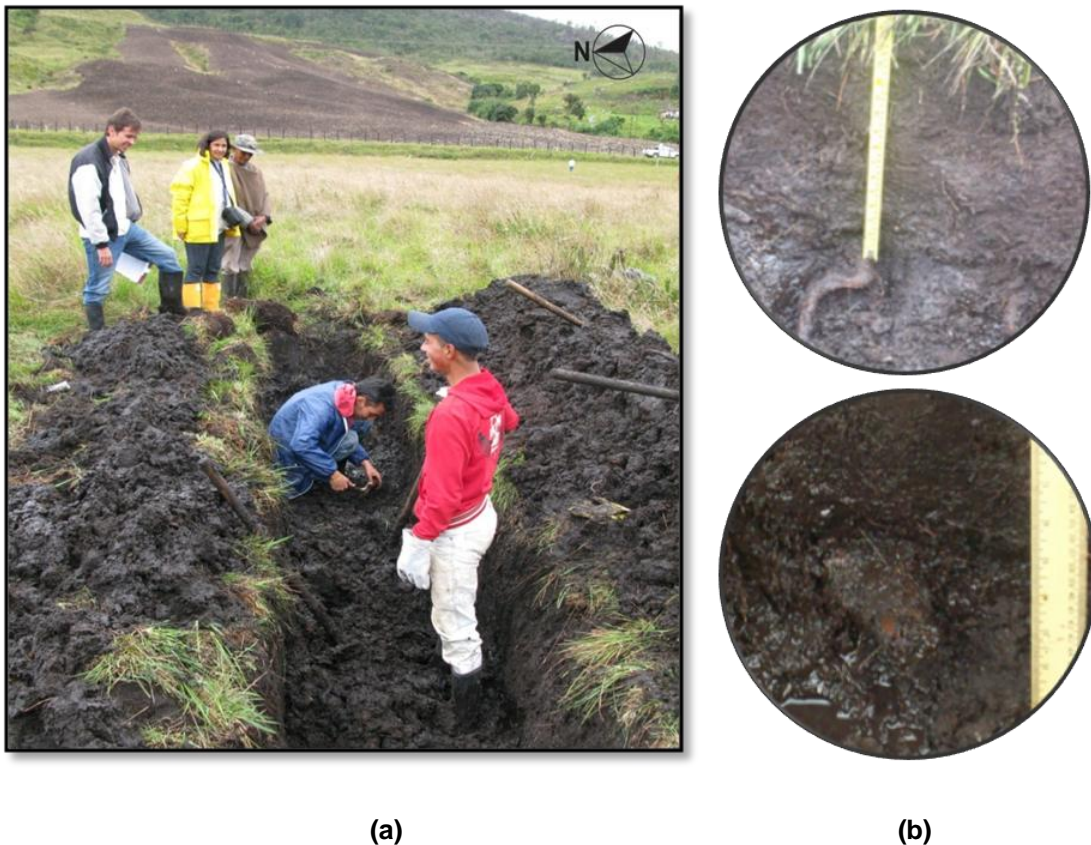
Los restos de tallos hallados en la tercera zona, se encontraban en posición horizontal, muy bien conservados, por lo que aún tenían cierta rigidez y presentaban algunos vasos conductores en su estructura. La longitud máxima de los tallos fue de aproximadamente 10 cm. Las raíces eran finas, alargadas,



algunas de ellas con terminaciones en forma de bulbo y se encontraron en posición sub-horizontal. No obstante, las observaciones de campo no fueron suficientes para establecer si dichos restos vegetales fueron sepultados en posición de vida o si fueron removidos o alterados antes de su enterramiento (**FIGURA 65b**).

También se observaron pequeñas acumulaciones de hojas en diferentes sectores del subsuelo y a la misma profundidad de los restos vegetales en la tercera zona.

Algunas de las raíces encontradas eran relativamente gruesas por lo cual se infirió que posiblemente correspondían a una vegetación leñosa.



**FIGURA 65** Trinchera-1: (a) Panorámica de la excavación y (b) Detalle de los restos vegetales encontrados.

## Muestras

En la trinchera-3 se adquirió la muestra TR1-M1D, la cual se tomó a 40 cm de profundidad, en la pared norte de la trinchera y su objetivo fue datación con  $C^{14}$ .

### 7.1.2. TRINCHERA-2

Al igual que la Trinchera-1, ésta excavación se realizó manualmente. La orientación que tuvo esta trinchera fue paralela al rumbo de Trinchera-1, y sus dimensiones finales fueron: 2.50 m de profundidad, 0.9 m de ancho y 4.80 m de longitud. Gracias a las dimensiones alcanzadas con esta excavación, se logró observar un contacto transicional entre dos capas de suelo, a las que se denominó A y B respectivamente (**FIGURA 66**).

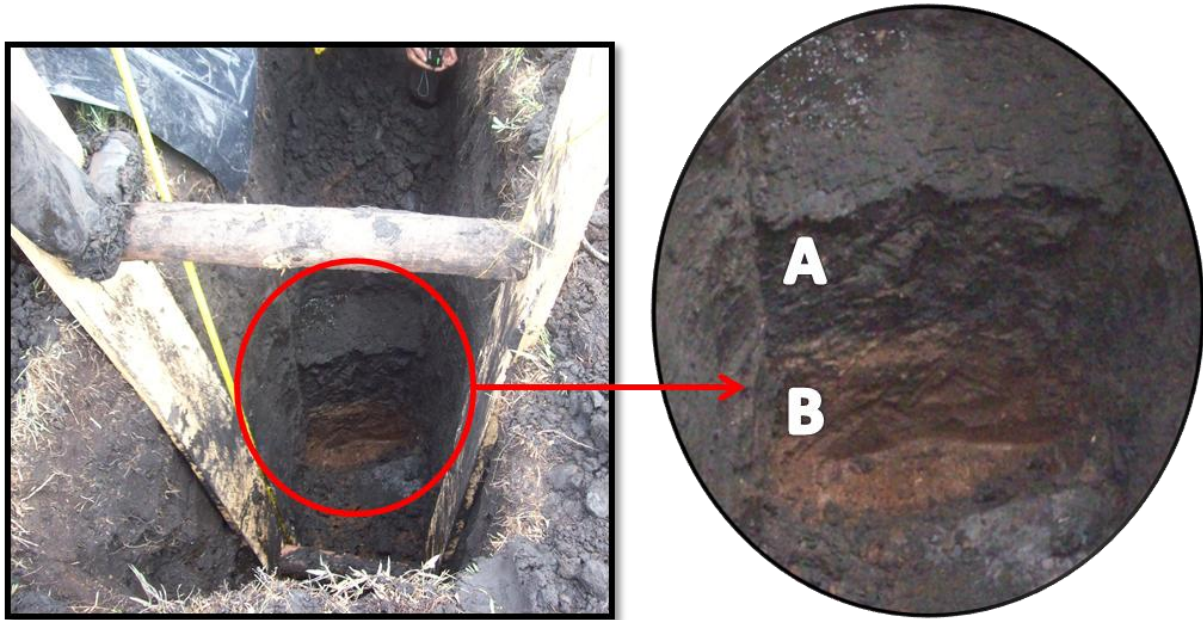


**FIGURA 66** Panorámica de Trinchera-2, donde se muestra el entibado de las paredes.

La capa de suelo A, era muy similar al material encontrado en la trinchera-1, de color negro, textura arcillosa, muy plástico, aunque en este caso, no había un contenido apreciable de restos vegetales. La profundidad que alcanzó este material, fue de aproximadamente 1.90 m. A partir de esta profundidad, se observó una porción de suelo sin restos vegetales, de coloración gris, que al avanzar en profundidad cambiaba levemente a un color café hasta alcanzar los 2.10 m, donde el color y la textura, ya correspondían a la capa inferior B. Por lo tanto, este intervalo desde los 1.90 – 2.10 m, se consideró como una zona de contacto transicional entre las dos capa mencionadas (**FIGURA 67**).

La capa de suelo B que se encontró a partir de los 2.10 m, estaba conformada por un material arcilloso de color café, con menor plasticidad que el horizonte superior A. La principal característica de este material fue su elevado contenido de restos vegetales bien conservados, entre los que se identificaron restos de hojas, restos de ramas y pequeños tallos. Las hojas correspondían a una vegetación herbácea, muy similar al pasto de la superficie. Las ramas y tallos por su estructura y tamaño, evidenciaban la existencia de una paleovegetación de arbustos y hierbas que fue enterrada (**FIGURA 67**).

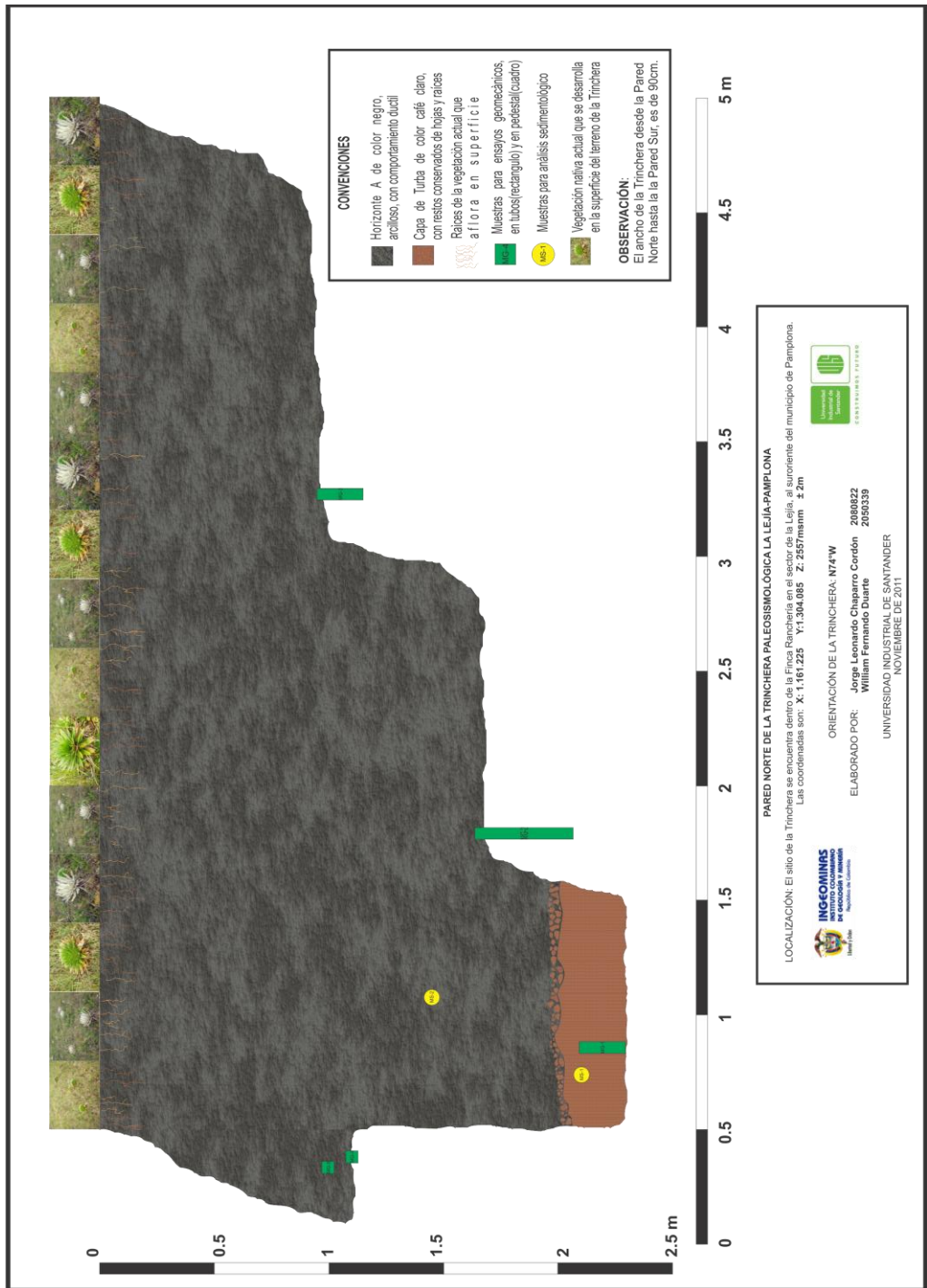




**FIGURA 67** Detalle de las dos capas de Suelo A y B, encontradas en Trinchera-2.

Se elaboró un modelo en 2D que representa la geometría y dimensiones finales de la trinchera-2. También se muestran los puntos de extracción de las muestras (**FIGURA 68**).





**FIGURA 68** Modelo en 2 Dimensiones, que representa la geometría, dimensiones finales y puntos de muestreo en la Pared Norte de laTrincherera-2.



## Muestras

En esta trinchera se tomaron cinco muestras, dos en pedestal y tres con tubo de PVC. Las muestras tomadas en pedestal fueron: TR2-M1G, TR2-M2G, que se tomaron de la pared W de la trinchera y corresponden a la capa superior (Horizonte A). Las muestras tomadas con tubo de PVC fueron: TR2-M3G, TR2-M4G, TR2-M5G, las cuales se tomaron del piso de la trinchera y corresponden a la capa inferior (B) y a la zona transicional entre A y B. También se adquirieron dos muestras para realizar la descripción sedimentológica: TR2-M1S y TR2-M2S las cuales corresponden a las capas A (superior) y B (inferior), respectivamente.

### 7.1.3. TRINCHERA-3

Esta trinchera alcanzó los 3 m de profundidad con 5 m de longitud y 1 m de ancho, en su interior se encontró un material altamente saturado en agua. Se ubicó una rampa de acceso hacia el costado este de la trinchera. Posteriormente se procedió a la toma de 2 muestras representativas para datarlas con  $C^{14}$ , la primera muestra se tomó a una profundidad de 2.55 m y corresponde a una capa de turba de color marrón claro con presencia de restos de vegetación. La segunda muestra se tomó de la pared este de la trinchera a una profundidad de 1.70m y representa un contacto transicional entre el horizonte A (nivel superior) y la capa de Turba mencionada (nivel inferior). Además se realizó la extracción de tres muestras adicionales, dos de ellas a 0.6 m y la otra a 0.8m, para análisis geoquímicos y dataciones con  $C^{14}$  (**FIGURA 69**).



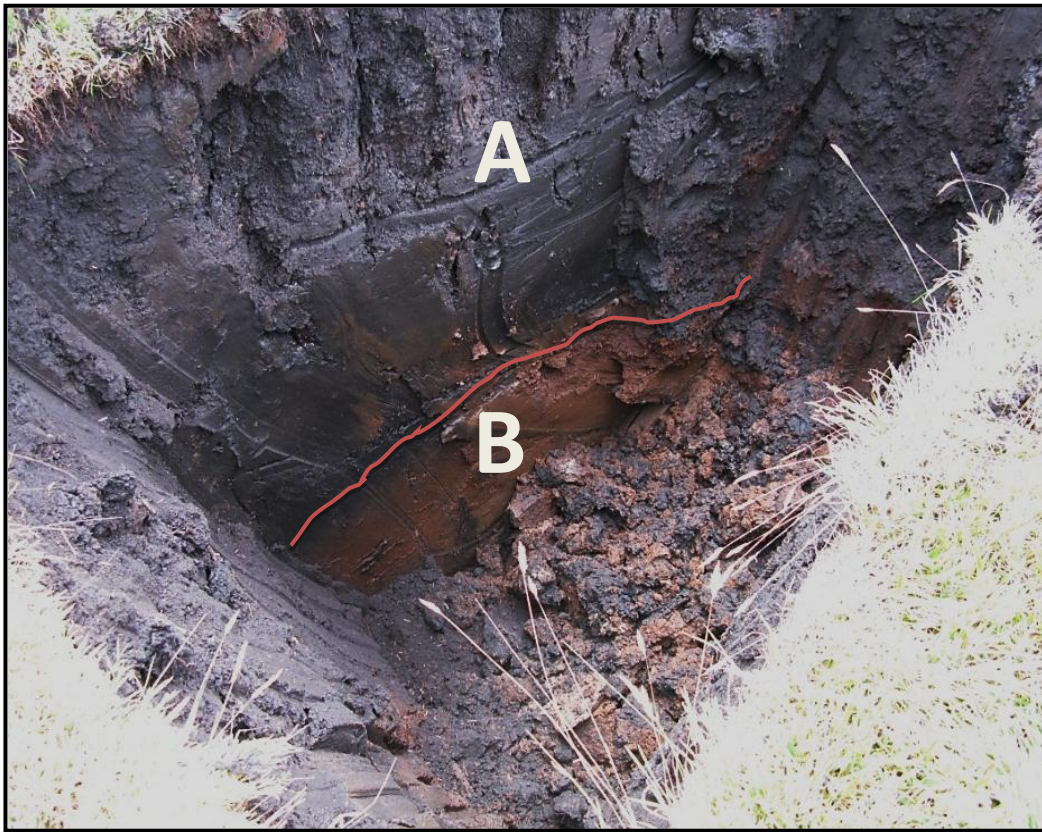


**FIGURA 69** Las dos paredes Este (E) y Oeste (W), que conforman la rampa de acceso a la Trinchera de Exploración número 3. Al fondo en la pared Sur (S), se observa el proceso de profundización de la Trinchera con la máquina. Se resalta con un delineado color rojo, el borde o contorno de la Trinchera.

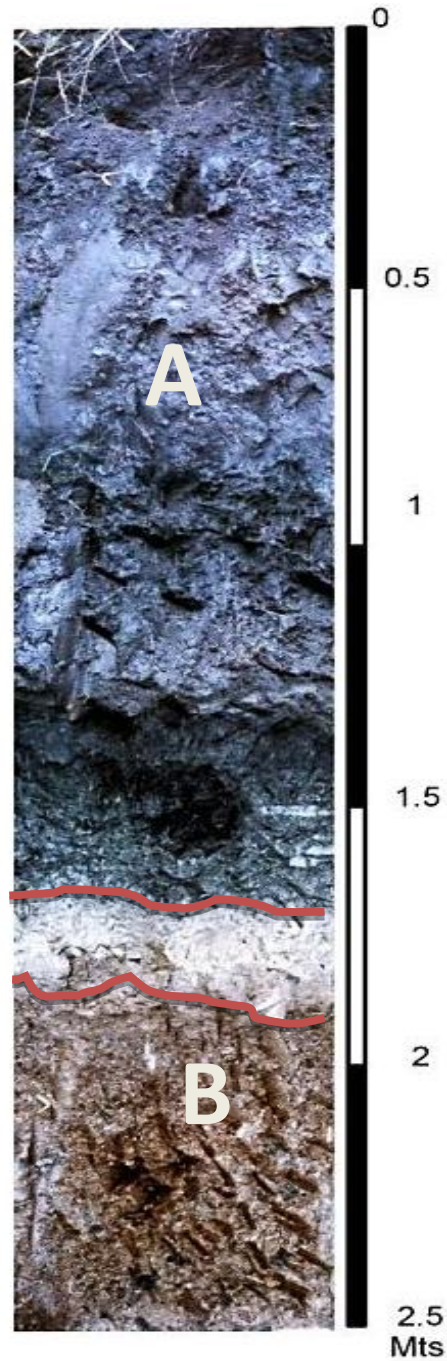
Se realizó una excavación adjunta a la primera apertura de la trinchera-3, donde se logró apreciar con mayor detalle los dos horizontes existentes en el socavón anterior (**FIGURA 70**). Allí, el material ubicado en el nivel inferior B, corresponde a una capa de color café claro, con restos de raíces, con un diámetro aproximado de 2 cm y restos de pasto aún conservado. Este material es predominantemente arcilloso, con un comportamiento dúctil. Se encuentra en contacto transicional con un nivel superior A, consta de un material de color negro que evidentemente demuestra un elevado contenido de materia orgánica, muy arcilloso, con comportamiento plástico. La zona de contacto entre estas dos capas presenta una variación de color a un tono grisáceo oscuro. El nivel freático no se logró



determinar con exactitud, puesto que cuando se procedió a realizar una segunda evaluación de la trinchera el día siguiente a su apertura, ésta se encontró completamente inundada (**FIGURA 71**).



**FIGURA 70** Se observa el contraste en color entre los dos niveles encontrados: El nivel marrón denominado nivel inferior A y el nivel negro que es el nivel superior B con mayor presencia de turba.



**FIGURA 71** *Fotolog* de la pared este. Se observan los 2 horizontes en la trinchera diferenciados por su color característico. El nivel superior A color negro, el nivel inferior B color marrón claro y el nivel de transición con un color gris, que se ubica entre los dos horizontes de suelo predominantes.



En la

**TABLA 25** se reúnen los datos de todas las muestras recolectadas en campo para el desarrollo de este trabajo.

MUESTRA	TRINCHERA	COORDENADAS		PROFUNDIDAD	OBJETIVO
		Longitud	Latitud		
TR1-M1D	T-1 PARED N	72°36'55.4	7°20'35.9	0.40 m	Datación C <sup>14</sup>
TR2-M1S	T-2 PARED N	72°37'00.6	7°20'38.2	1.50 m	Sedimentología
TR2-M2S	T-2 PISO	72°37'00.6	7°20'38.2	2.10 m	Sedimentología
TR2-M1G	T-2 PISO	72°37'00.6	7°20'38.2	1.00 m	Consolidación
TR2-M2G	T-2 PISO	72°37'00.6	7°20'38.2	1.23 m	Consolidación
TR2-M3G	T-2 PISO	72°37'00.6	7°20'38.2	1.70 m	Humedad
TR2-M4G	T-2 PISO	72°37'00.6	7°20'38.2	2.10 m	Consolidación / Límites
TR2-M5G	T-2 PISO	72°37'00.6	7°20'38.2	1.00 m	Límites
TR2-M1RX	T-2 PARED N	72°37'00.6	7°20'38.2	1.70 m	Geoquímica
TR2-M2RX	T-2 PISO	72°37'00.6	7°20'38.2	2.40 m	Geoquímica
TR3-M1D	T-3 PARED E	72°37'01.3	7°20'38.8	2.55 m	Datación C <sup>14</sup>
TR3-M2D	T-3 PARED E	72°37'01.3	7°20'38.8	1.70 m	Datación C <sup>14</sup>
TR3-M3D	T-3 PARED E	72°37'01.3	7°20'38.8	0.60 m	Datación C <sup>14</sup>
TR3-M1RX	T-3 PARED E	72°37'01.3	7°20'38.8	0.60 m	Geoquímica
TR3-M2RX	T-3 PARED E	72°37'01.3	7°20'38.8	0.80 m	Geoquímica

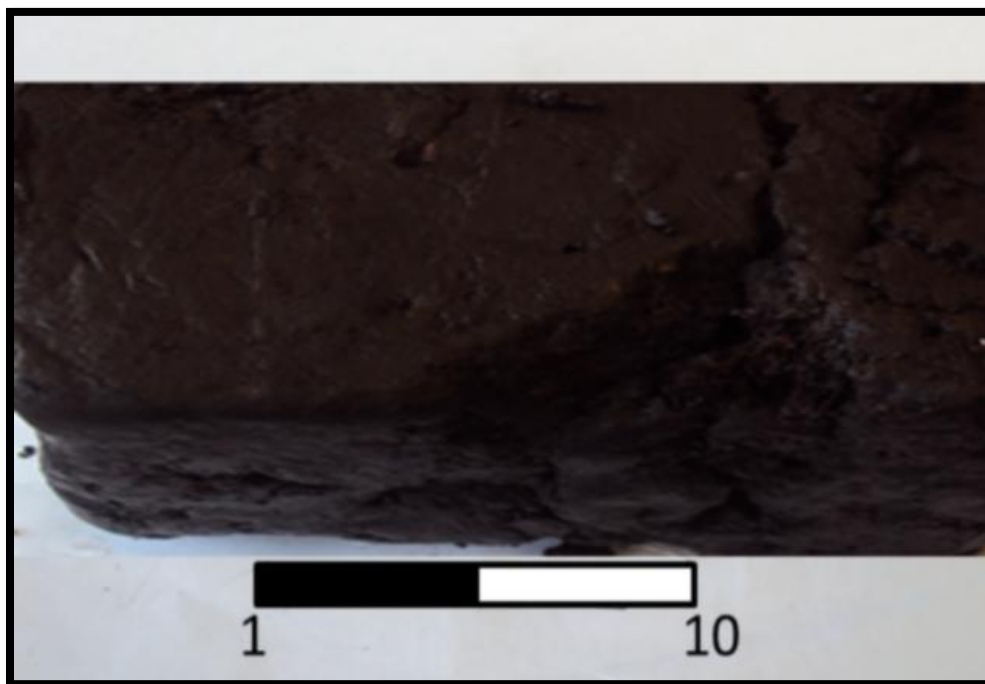


**TABLA 25** Resumen de las muestras recolectadas en campo.

## 7.2. Resultados de la descripción sedimentológica y las propiedades físicas de las muestras

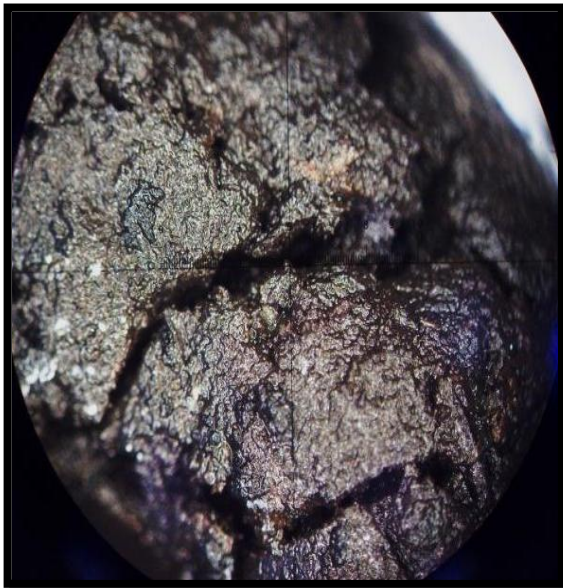
### 7.2.1. MUESTRA TR2-M1S

Esta muestra corresponde al nivel superior de suelo y se caracteriza porque presenta un color negro oscuro. Presenta alto contenido de materia orgánica, principalmente hojas, restos de tallos y raíces finas de color café claro. Su grado de porosidad es alto y su tenacidad es alta.

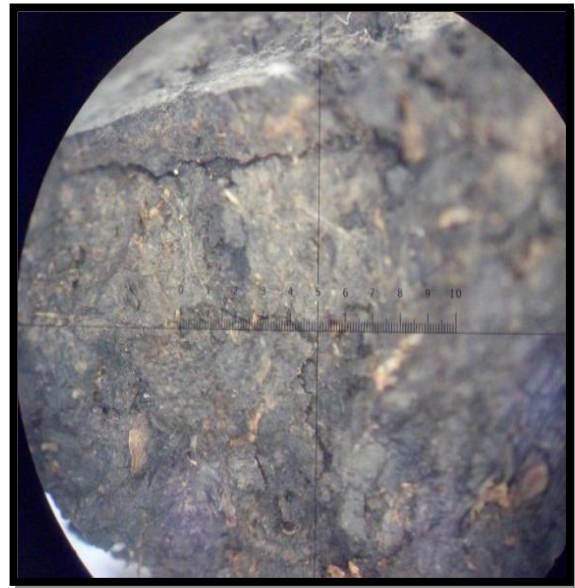


**FIGURA 72** Aspecto de la muestra TR2-M1S (escala en cm)

Al observar la muestra con lupa, se observaron cristales hojosos a manera de láminas menores a 1mm, de color blanco muy brillante que corresponden a Muscovita, algunas veces asociada con cristales muy finos de Cuarzo blanco (FIGURA 73).



(a)



(b)

**FIGURA 73 TR2-M1S: (a) Presencia de cristales de Muscovita, el brillo que presenta la muestra se debe a su alto contenido de agua. (b) Se observa elevada proporción de materia orgánica, constituida en gran parte por restos de tallos.**

### 7.2.2. MUESTRA TR2-M2S

Esta muestra corresponde al nivel inferior, el cual comienza exactamente a los 2.10 m de profundidad. La zona de transición entre el nivel superior e inferior, se encuentra a partir de los 1.90 m de profundidad (FIGURA 74).





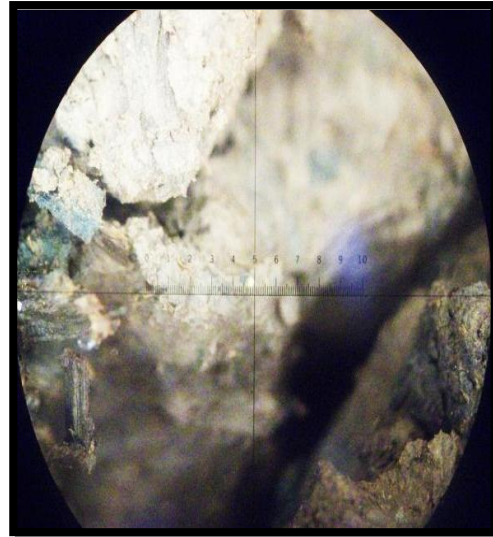
**FIGURA 74** Detalle de la variación de color en la zona de transición: S: Nivel superior color negro (TR2-M1S); I: Nivel inferior color café (TR2-M2S)

En la **FIGURA 75**, se detalla el aspecto de la muestra TR2-M2S al ser observada con lupa. Se caracteriza por su color café, grano muy fino (imperceptible a simple vista), tamaño arcilla y además porque presenta abundantes restos leñosos (tallos y raíces) de tamaños variados, así como restos de hojas y pasto bien conservados. También se observó buena porosidad y fracturamiento en esta muestra.





(a)

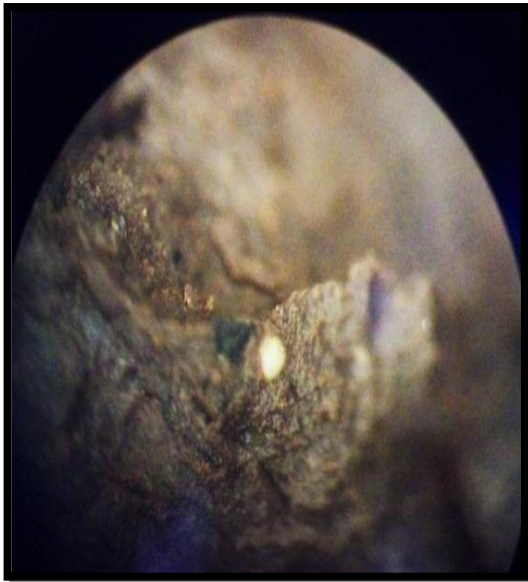


(b)

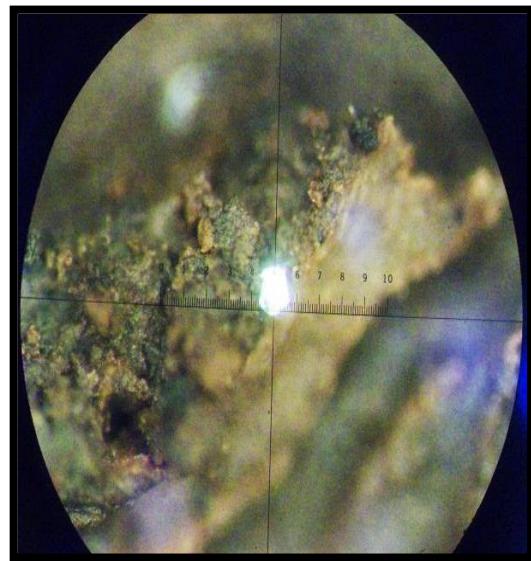
**FIGURA 75 TR2-M2S: (a) y (b) Se observan rastros de materia orgánica (raíces).**

En la **FIGURA 76**, se observa en ampliación, cristales de Cuarzo y Muscovita que fueron encontrados en la muestra TR2-M2S. El Cuarzo es de color blanco-amarillento, subredondeado y subesférico. La Muscovita aparece como láminas muy finas, de color blanco, con brillo metálico.





(a)



(b)

**FIGURA 76 TR2-M2S: (a) Presencia de cristales de cuarzo (b) Cristales de Moscovita.**

Cabe anotar que la proporción de minerales que fueron visibles con la lupa, fue relativamente baja, ya que tanto la muestra TR2-M1S como la TR2-M2S, tenían un claro predominio de la fracción arcillosa en su armazón.

Para llevar a cabo la identificación y clasificación del tipo de suelo fino, al que corresponden las muestras analizadas de acuerdo con sus propiedades físicas, se utilizó la **TABLA 26** que fue tomada de Duque y Escobar (2002).



Suelo Fino	Resistencia en estado seco	Dilatancia	Tenacidad	Tiempo de asentamiento
<b>Limo arenoso</b>	Muy baja	Rápida	Débil a fiable	30seg –60min
<b>Limo</b>	Muy baja	Rápida	Débil a fiable	15min–60min
<b>Limo arcilloso</b>	Baja a media	Rápida a lenta	Media	15min - varias horas
<b>Arcilla Arenosa</b>	Baja a alta	Lenta a nada	Media	30seg- varias horas
<b>Arcilla limosa</b>	Media a alta	Lenta a nada	Media	15min -varias horas
<b>Arcilla</b>	Alta a muy alta	Ninguna	Alta	Varias horas a días
<b>Limo orgánico</b>	Baja a muy alta	Lenta a ninguna	Débil a fiable	15min -varias horas
<b>Arcilla Orgánica</b>	Media a muy alta	Ninguna	Alta	Varias horas a días

**TABLA 26** Clasificación de suelos finos según propiedades físicas (Tomado de Duque y Escobar, 2002).

En la **TABLA 27** se presentan los resultados finales de la descripción sedimentológica y de las propiedades físicas de las muestras TR2-M1S y TR2-M2S. Como se puede observar, ambas muestras son similares, pues tienen contenidos de materia orgánica elevados, así como una composición en la que se encontraron minerales del grupo de los tectosilicatos (Cuarzo) y aluminosilicatos (Muscovita). Tienen alta resistencia en estado seco, dilatancia lenta a nula y alta



tenacidad. Sin embargo, la diferencia más evidente es el color, pues en la muestra TR2-M1S, el color es negro oscuro debido a su elevado contenido de materia orgánica descompuesta, lo que le da a esta muestra el aspecto de una turba. Mientras la muestra TR2-M2S, presenta un color café oscuro y un elevado contenido de materia orgánica bien conservada, pues se pueden observar restos de raíces, tallos y pasto, que en campo, se comprobó su semejanza con la vegetación actual de la superficie del depósito.

<b>Sedimentología</b>	<b>Muestra TR2-M2S</b>	<b>Muestra TR2-M1S</b>
<b>Contenido M.O.</b>	Muy Alto	Alto
<b>Tamaño de grano</b>	Muy fino (no se observa)	Muy fino (no se observa)
<b>Mineralogía</b>	Moscovita	Cuarzo, Moscovita
<b>Color</b>	Negro Oscuro	Café Oscuro
<b>Porosidad</b>	Media a Alta	Media
<b>Propiedades Físicas</b>	<b>Muestra TR2-M2S</b>	<b>Muestra TR2-M1S</b>
<b>Resistencia en estado seco</b>	Alta	Media a muy alta
<b>Dilatancia</b>	Ninguna	Lenta a nula
<b>Tenacidad</b>	Alta	Alta
<b>Sedimentación o dispersión</b>	1 día	1 día
<b>Clasificación</b>	Arcilla Orgánica	Arcilla Orgánica

**TABLA 27** Resumen de las propiedades sedimentológicas y físicas observadas en las muestras de mano del nivel superior (TR2-M2S) e inferior (TR2-M1S) del depósito La Lejía.



Como se puede observar en la **TABLA 27**, las dos capas corresponden a arcillas orgánicas de acuerdo a las propiedades físicas que presentan, sin embargo, para discriminar entre los dos tipos de materiales, se empleó la clasificación planteada por Gisbert (2002), quien se basó en los establecido por la Soil Taxonomy, para clasificar histosoles, que son suelos caracterizados por sus elevados contenidos de materia orgánica. Así, Gisbert (2002) definió cuatro subórdenes que se presentan en la **TABLA 28**.

	Condiciones de Humedad	Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Contenido de Fibras	Grado de Descomposición del material orgánico
<b>Folist</b>	Moderada	—	Total	Nulo
<b>Fibrist</b>	Alta	0.1	>2/3	Bajo
<b>Hemist</b>	Alta	0.1 – 0.2	2/3 – 1/6	Moderado
<b>Saprist</b>	Alta	0.2	1/6	Alto

**TABLA 28** Subórdenes de clasificación para histosoles basado en la Soil Taxonomy  
(Tomado y adaptado de Gisbert, 2002)

De acuerdo con esta clasificación y con base en las características sedimentológicas anteriormente descritas, la muestra TR2-M1G (nivel superior A), corresponde a un histosol de tipo Hemist, mientras la muestra TR2-M4G (nivel inferior B), se cataloga como un histosol de tipo Fibrist.



### 7.3. Resultados de análisis químicos

Los análisis químicos fueron realizados por parte del Servicio Geológico Colombiano, mediante la solicitud 175 de 2011-11-09 en el laboratorio de minerales de la ciudad de Bogotá (Colombia). Estos análisis aplicados a materiales arcillosos, permiten identificar las diferentes fases mineralógicas presentes para definir el tipo de suelo al que corresponden. Con esta información, se puede deducir las condiciones de formación del suelo, como fundamento para plantear una interpretación paleoambiental del depósito en estudio.

Para la caracterización química de este tipo de suelo, se utilizaron dos técnicas: Fluorescencia de rayos x y difracción de rayos x.

#### 7.3.1. Fluorescencia de rayos x

De acuerdo con Zicarelli *et al.* (2012), el principal objetivo de aplicar el método de Fluorescencia de rayos x a un material, es realizar un análisis químico cualitativo y cuantitativo de los elementos químicos, entre el grupo del flúor (F) y el uranio (U) que se presentan como óxidos en muestras sólidas (filtros, metales, rocas, muestras en polvo, tejidos, entre otros) y líquidas. Se excluyen de este método el H, Li y los isótopos  $^{61}\text{Pm}$ ,  $^{43}\text{Tc}$ ,  $^{84}\text{Po}$ ,  $^{85}\text{At}$ , así como los gases nobles (excepto el argón) y los actínidos del  $^{89}\text{Ac}$  al  $^{103}\text{Lr}$  (excepto  $^{90}\text{Th}$  y  $^{92}\text{U}$ ).

Esta técnica se basa en la detección de los elementos químicos presentes en la muestra, los cuales, mediante un software adecuado, se presentan en la forma molecular más probable presente en el compuesto (Zicarelli, *et al.*, 2012).

Este análisis se aplicó a las muestras: TR2-M1RX, TR2-M2RX y TR3-M1RX.



El procedimiento consiste en secar la muestra. Luego se determina la humedad por calcinación, primero a 105°C durante dos horas, luego a 1000° C para eliminar volátiles, materia orgánica y dejar sólo los elementos mayores. Finalmente se elaboran perlas donde está la muestra homogéneamente distribuida y se montan en el equipo de fluorescencia para realizar la prueba (Romero, 2011).

Los resultados de la fluorescencia aplicada a las muestras mencionadas, se resume en la



TABLA 29.

El análisis se efectuó para identificar la presencia de 21 elementos químicos. Los resultados evidencian un elevado contenido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en las tres muestras analizadas. En la trinchera 2, la mayor proporción de  $\text{SiO}_2$  se encontró en la muestra TR2-M1RX (Nivel superior), mientras la muestra TR2-M2RX (Nivel inferior), presentó mayor porcentaje en peso de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , en relación a la muestra anterior. En la trinchera 3, la muestra TR3-M1RX, presentó el contenido más alto de  $\text{SiO}_2$  y también la mayor proporción de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

La composición mineralógica encontrada con la descripción de las muestras de mano, correspondientes a las dos capas que conforman la parte más superficial del depósito de La Lejía, fue comprobada con los resultados obtenidos de la fluorescencia de rayos x, pues la presencia de Cuarzo y Muscovita es concordante con el alto porcentaje de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en estos suelos.

Al considerar la estratigrafía local y su distribución en los alrededores del depósito de La Lejía, se encuentra que las unidades litológicas más próximas, con disposición topográfica apropiada y cuya composición mineralógica se ajusta a la de las capas de suelo encontradas en el depósito, corresponden en el Oeste a cuarzoareniscas de la Formación Aguardiente (Kia) que afloran en el Alto el Escorial, *shales* de la Formación Capacho (Kic) y lodolitas intercaladas con *cherts* de la Formación La Luna (Ksl) que están expuestas en el pie de ladera del Alto el Escorial. Hacia el Suroeste del depósito en la cima del Alto el Palmar, aflora nuevamente la Formación Aguardiente, mientras que en el costado este del depósito, sobre la Loma el Cacho, aparecen rocas ígneas félsicas de la unidad



Cuarzomonzonita (JRcg). De esta manera, los altos topográficos mencionados con sus litologías asociadas, están expuestos a la acción de procesos de meteorización físico-química y erosión, permitiendo la generación de sedimentos que gracias a la topografía de la zona y por acción de la gravedad, se depositan en la cuenca, dando lugar al depósito Cuaternario de La Lejía (**FIGURA 29**).

ID muestra		TR2- M1RX	TR2- M2RX	TR3- M1RX	
Profundidad (m)		1,7	2,4	0,6	
Elemento	Unidades	Resultados en Base Seca			Método
<b>Silicio</b>	% de SiO <sub>2</sub>	31,86	22,30	42,79	FRX
<b>Titanio</b>	% de TiO <sub>2</sub>	0,53	0,58	0,57	FRX
<b>Aluminio</b>	% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,78	9,58	13,75	FRX
<b>Hierro Total</b>	% de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,68	0,51	0,65	FRX
<b>Manganeso</b>	% de Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,01	FRX
<b>Magnesio</b>	% de MgO	0,21	0,18	0,31	FRX
<b>Calcio</b>	% de CaO	0,44	0,18	0,12	FRX
<b>Sodio</b>	% de Na <sub>2</sub> O	≤ 0,01	≤ 0,01	0,12	FRX
<b>Potasio</b>	% de K <sub>2</sub> O	0,46	0,40	0,73	FRX
<b>Fósforo</b>	% de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,27	0,46	0,33	FRX
<b>Azufre</b>	% de SO <sub>3</sub>	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,01	FRX



ID muestra		TR2- M1RX	TR2- M2RX	TR3- M1RX	Método
Profundidad (m)		1,7	2,4	0,6	
Elemento	Unidades	Resultados en base seca			Método
<b>Vanadio</b>	% de V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	≤ 0,01	≤ 0,01	0,02	FRX
<b>Cromo</b>	% de Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,01	FRX
<b>Estroncio</b>	% SrO	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,01	FRX
<b>Zirconio</b>	% de ZrO <sub>2</sub>	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,01	FRX
<b>Bario</b>	% BaO	≤ 0,01	≤ 0,01	0,02	FRX
<b>Níquel</b>	% NiO	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,01	FRX
<b>Cobre</b>	% CuO	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,01	FRX
<b>Zinc</b>	%ZnO	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,01	FRX
<b>Plomo</b>	% de PbO	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,01	FRX
<b>Hafnio</b>	% de HfO <sub>2</sub>	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,01	FRX
<b>Humedad a 105 °C</b>	%	7,72	7,99	6,54	Gravimetría
<b>Pérdidas por calcinación de 105 °C a 1000 °C</b>	%	56,73	66,01	40,58	Gravimetría
<b>% = porcentaje en peso</b>					
<b>FRX = Fluorescencia de Rayos X, perla, programa WROXI nuevo</b>					

**TABLA 29** Resultados de la fluorescencia de rayos x (FRX) en muestras tomadas de las trincheras 2 y 3.



### 7.3.2. Difracción de rayos x

De acuerdo con Muñoz *et al.* (2007), la Difracción de Rayos X (DRX), es una técnica que permite la identificación cualitativa de las fases cristalinas presentes en un material.

Según Romero (2011), los Rayos X se difractan al pasar a través de una muestra de arcilla, donde cada trayectoria de difracción es una imagen de distintos planos atómicos. De esta manera, se obtiene la estructura interna del material analizado. La interpretación de estos difractogramas consiste en tomar la medición y las curvas obtenidas en el registro, comparandolas con curvas estándar, para establecer las fases cristalinas presentes en la muestra. Los difractogramas de las muestras sólidas fueron obtenidos con un equipo X'PERT PRO (PaNalytical), cuyas condiciones de trabajo se muestran en la **TABLA 30**.

DIFRACTÓMETRO	X'PERT PRO
CONFIGURACIÓN	ALPHA (Con Monocromador)
ÁNGULO INICIAL (°2 $\theta$ )	5
ÁNGULO FINAL (°2 $\theta$ )	70
PASO ( °2 $\theta$ )	0.0167
TIEMPO DE MEDICIÓN POR PASO (S)	82
TIPO DE MEDIDA	Continua
FUENTE DE RAYOS X	Cu

**TABLA 30** Condiciones generales de medida de las muestras analizadas con difracción de rayos x.

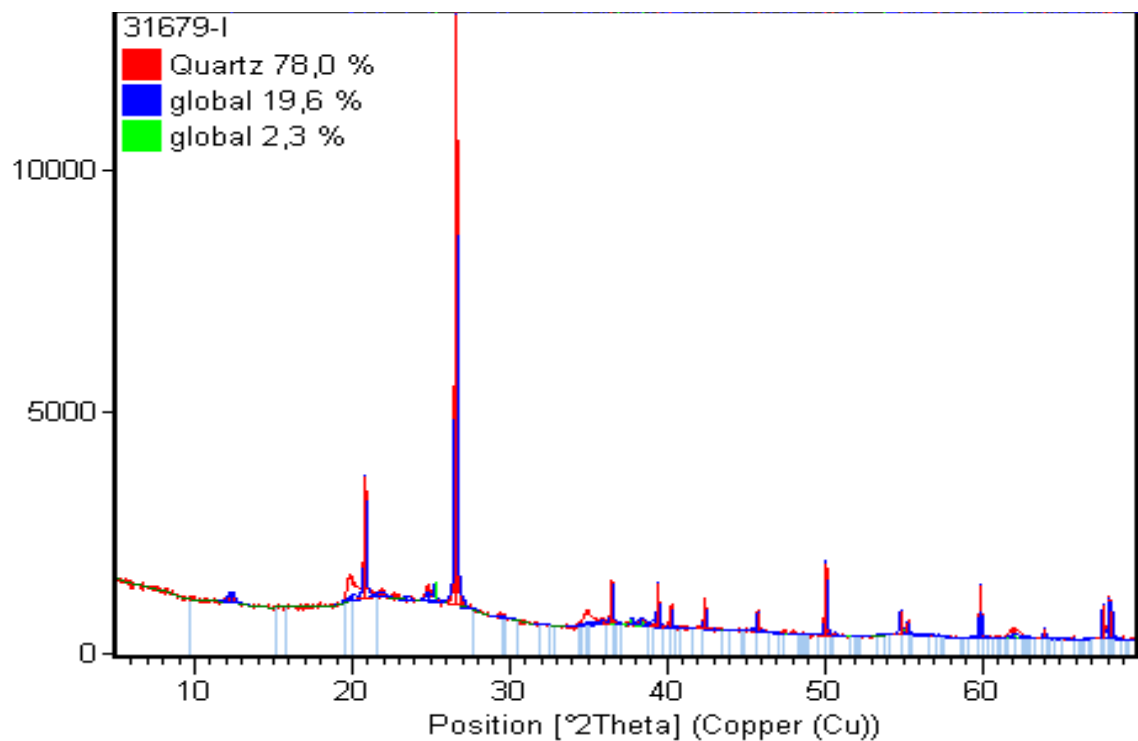


Debido a la estructura tipo laminar que presentan los minerales arcillosos (aluminio-silicatos), el análisis con difracción de rayos x se llevó a cabo en agregado desorientado, es decir, sin favorecer la orientación de dicha estructura laminar.

A continuación se resumen los resultados obtenidos para cada muestra analizada con difracción de rayos x.

### Muestra TR2-M1RX

Esta muestra se tomó en la trinchera 2 a 1,7 m de profundidad, correspondiendo al nivel superior del depósito. El difractograma obtenido se muestra en la **FIGURA 77**.



**FIGURA 77** Difractograma de la muestra TR2-M1RX.



El análisis de los difractogramas se realizó utilizando como patrón de referencia la base de datos del Software X'PERT High score plus (PaNalytical).

Para la muestra TR2-M1RX, el patrón de comparación obtenido se muestra en la **FIGURA 78**.

Ref. Code	Compound ...	Chemical Formula
01-075-0443	$\alpha$ -Si O2	Si O2
00-001-0527	Kaolinite	Al2 Si2 O5 ( O H )4
01-071-1167	Anatase	Ti O2

**FIGURA 78** Patrón de comparación obtenido para la identificación de la muestra TR2-M1RX.

Considerando la ubicación de los picos, se pudo determinar la presencia de las siguientes fases mayoritarias: Cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), Caolinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) y Anatasa ( $\text{TiO}_2$ ). Los porcentajes en peso de cada fase, se resumen en la **TABLA 31**.

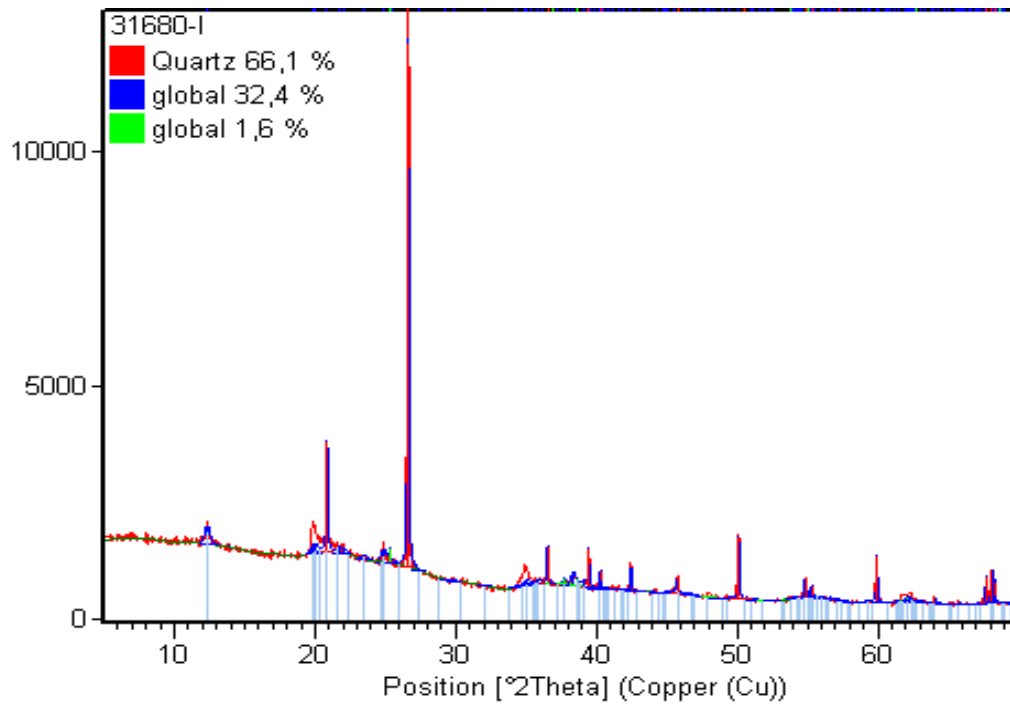
Fase mineralógica presente	Fórmula	Abundancia (%) en peso
<b>Cuarzo</b>	$\text{SiO}_2$	78.0± 10
<b>Caolinita</b>	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	19.6± 5
<b>Anatasa</b>	$\text{TiO}_2$	2.3± 1

**TABLA 31** Resumen de los resultados de difracción de rayos X para la muestra TR2-M1RX.



### MUESTRA TR2-M2RX

Esta muestra fue extraída en la trinchera 2, a una profundidad de 2.4 m y corresponde al nivel inferior del depósito. El difractograma obtenido se muestra en la **FIGURA 79**.



**FIGURA 79** Difractograma de la muestra TR2-M2RX

Para la muestra TR2-M2RX, el patrón de comparación obtenido se muestra en la **FIGURA 80**.



Ref. Code	Compound N...	Chemical Formula
01-085-0796	Quartz, syn	Si O <sub>2</sub>
00-001-0527	Kaolinite	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( O H ) <sub>4</sub>
01-071-1166	Anatase	Ti O <sub>2</sub>

**FIGURA 80** Patrón de comparación obtenido para la identificación de la muestra TR2-M2RX.

Al igual que en la muestra TR2-M1RX, las fases mayoritarias identificadas en esta muestra fueron: Cuarzo (SiO<sub>2</sub>) el mineral de mayor proporción, Caolinita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) y Anatasa (TiO<sub>2</sub>), que se encuentra en una cantidad relativamente baja. Los porcentajes en peso de cada fase, se resumen en la **TABLA 32**.

Fase mineralógica presente	Fórmula	Abundancia (%) en peso
<b>Cuarzo</b>	SiO <sub>2</sub>	66.1 ± 10
<b>Caolinita</b>	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	32.4 ± 5
<b>Anatasa</b>	TiO <sub>2</sub>	1.6 ± 1

**TABLA 32** Resumen de los resultados de difracción de rayos X para la muestra TR2-M2RX.

### Muestra TR3-M1RX

Esta muestra fue extraída en la trinchera 3, a una profundidad de 0.6 m y corresponde al nivel superior del depósito. El difractograma obtenido se muestra en la **FIGURA 81**.



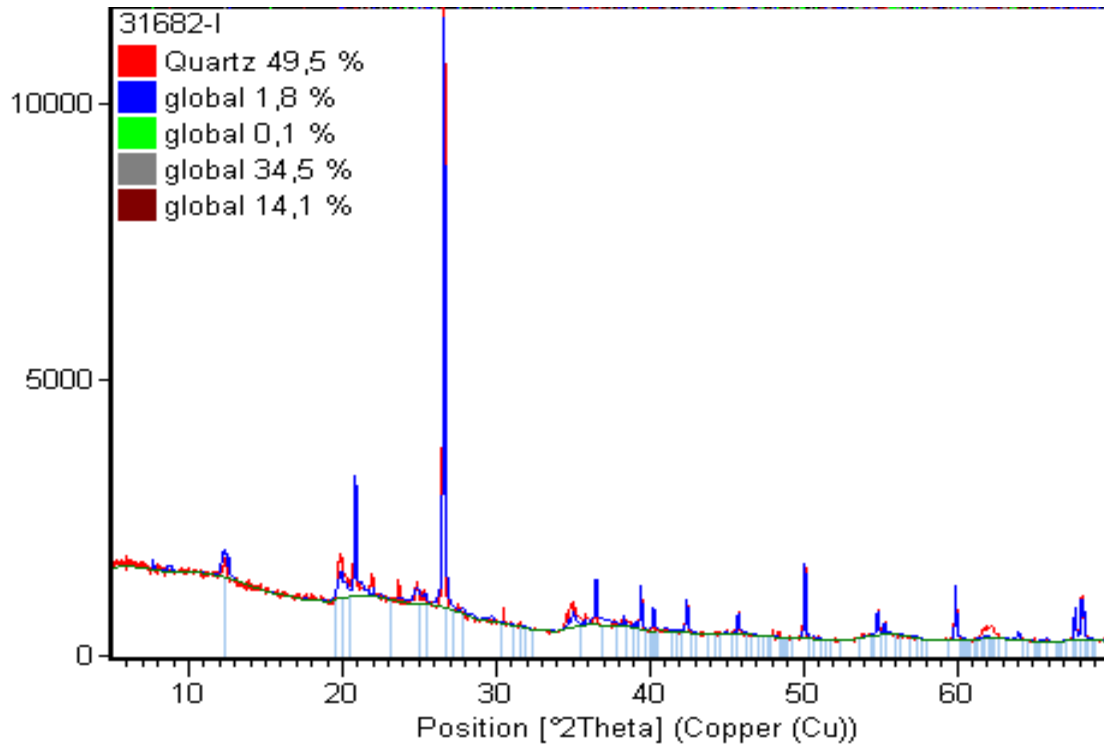


FIGURA 81 Difractograma de la muestra TR3-M1RX

Para la muestra TR3-M1RX, el patrón de comparación obtenido se muestra en la FIGURA 82.

Ref. Code	Compound N...	Chemical Formula
01-085-0504	Quartz	Si O2
00-001-0527	Kaolinite	Al2 Si2 O5 ( O H )4
01-071-1166	Anatase	Ti O2
00-034-0170	Nacrite-2M2	Al2 Si2 O5 ( O H )4
01-070-3754	Muscovite-2M1	K ( Al4 Si2 O9 ( O H )3 )

FIGURA 82 Patrón de comparación obtenido para la identificación de la muestra TR3-M1RX.



Al igual que las muestras tomadas de la trinchera 2, la principal fase mineralógica mayoritaria presente corresponde a Cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), seguido por Nacrita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), Muscovita ( $\text{H}_2\text{KAl}_3(\text{SiO}_4)_3$ ), Caolinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) y Anatasa ( $\text{TiO}_2$ ). La abundancia de cada fase mineral se presenta en la **TABLA 33**.

Fase mineralógica presente	Fórmula	Abundancia (%) en peso
<b>Cuarzo</b>	$\text{SiO}_2$	49.5± 5
<b>Nacrita</b>	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	34.5± 5
<b>Muscovita</b>	$\text{H}_2\text{KAl}_3(\text{SiO}_4)_3$	14.1± 5
<b>Caolinita</b>	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	1.8± 5
<b>Anatasa</b>	$\text{TiO}_2$	Trazas

**TABLA 33** Resumen de los resultados de difracción de rayos X para la muestra TR3-M1RX.

Al igual que los datos de la fluorescencia de rayos x y la descripción sedimentológica, la difracción de rayos x permite comprobar que en efecto los minerales principales que forman parte de la composición de los suelos que rellenan la cuenca de La Lejía, corresponden a Cuarzo, Muscovita y aluminosilicatos del grupo de la Caolinita (algunos hidratados como la Nacrita). Por tanto, se confirma el planteamiento de que las Formaciones Aguardiente (Kia), Capacho (Kic), La Luna (Ksl) y el cuerpo intrusivo de Cuarzomonzonita (JRcg), constituyen las principales fuentes de aporte de los sedimentos que conforman el depósito de La Lejía. Con estas evidencias se podría pensar que el Cuarzo fue proporcionado por todas las formaciones, pero en mayor medida por la Formación Aguardiente (cuarzoareniscas) y el cuerpo intrusivo (granito, cuarzomonzonita, pórfido cuarzoso), mientras los minerales del grupo de la Caolinita pudieron



generarse a partir de fases arcillosas presentes en los *shales* de la Formación Capacho, en los shales y cherts de la Formación La Luna, así como también pueden estar asociados a procesos de meteorización físico-química de Feldespatos, presentes en las rocas intrusivas ya mencionadas.

#### 7.4. Resultados de los ensayos geotécnicos

A continuación se sintetizan los resultados de los ensayos de Humedad Natural, Consolidación Unidimensional de Suelos y Límites de Atterberg, puesto que son aplicables al suelo, que en este caso corresponde con la cubierta más superficial del depósito Cuaternario de La Lejía.

El suelo se considera en Ingeniería Geológica, como un conjunto de diferentes minerales conectados por fuerzas relativamente débiles, que permiten su separación por mecanismos que emplean poca energía. Es por esto, que surgió la necesidad de analizar ciertas características del suelo, por ejemplo, su deformabilidad ante la acción de cargas externas, así como la influencia que ejerce el agua contenida en dicho material sobre la respuesta del mismo ante deformaciones inducidas. Dichos factores, permiten interpretar y definir el tipo de suelo y su comportamiento geomecánico, elementos de importancia en un estudio paleosismológico, ya que proporcionan parámetros geotécnicos que ayudan a comprender aspectos de la historia de enterramiento.



#### 7.4.1. Resultados de Humedad natural Inicial y Final

De acuerdo con González *et al.* (2002), la humedad de un suelo corresponde a la relación que existe entre el peso del agua que éste contiene y el peso de las partículas sólidas que se encuentran en el mismo. Esta propiedad física puede ser analizada a través de métodos prácticos como el ensayo de humedad natural de suelos, cuya ejecución se definió paso a paso en el capítulo de metodología. De lo anterior se deduce que la humedad natural de un suelo corresponde a un valor que suele expresarse como porcentaje del volumen total del material. De acuerdo a los antecedentes de estos ensayos, para suelos granulares, por lo general la humedad varía entre el 5 – 8%, en suelos arcillosos está comprendida entre 60 – 70%, mientras que en el caso de suelos orgánicos puede llegar hasta 300 – 400%. La ecuación que determina la humedad de un suelo, está dada por la ecuación (1):

$$W(\%) = (W_w / W_s) * 100 \quad (1)$$

De donde **W (%)**: Porcentaje de Humedad Natural del suelo; **W<sub>w</sub>**: Peso del agua contenida en la muestra (Peso de muestra Húmeda – Peso de muestra Seca); **W<sub>s</sub>**: Peso de la muestra seca.

Las muestras seleccionadas para aplicar este ensayo, fueron las mismas que se utilizaron para llevar a cabo el ensayo de consolidación, las cuales corresponden a: TR2-M1G y TR2-M4G. En este caso, se realizaron dos ensayos de humedad inicial previo al de consolidación y se promediaron los resultados para obtener la humedad inicial de cada muestra. Así mismo, se llevó a cabo un ensayo de humedad final para cada muestra, después de finalizada la consolidación.

Los resultados de la humedad natural inicial de las muestras, se resumen en la **TABLA 34.**



DATOS	TR2-M1G		TR2-M4G	
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2
Peso recipiente(g)	6.7	6.8	8.6	8.4
Peso muestra húm. + recipiente (g)	45.8	53.2	42.8	46.8
Peso muestra húmeda (g)	39.1	46.4	34.2	38.4
Peso muestra seca + recipiente (g)	19.5	16.3	16.2	16.8
Peso muestra seca (g)	12.8	9.5	7.6	8.4
Peso agua contenida muestra (g)	26.3	36.9	26.6	30
Humedad (%)	205.468	388.421	350	357.142
Humedad Inicial Promedio (%)	296.944		353.571	

**TABLA 34** Datos iniciales y Resultados de Humedad Natural Inicial.

Se encontró que la muestra TR2-M4G, presenta un mayor contenido de humedad, pues su porcentaje supera en un 60% a la humedad de la muestra TR2-M1G. De ambas muestras, se puede concluir que presentan una humedad extremadamente alta, que se encuentra dentro del rango de 300 – 350%, lo que indica que evidentemente corresponden a suelos orgánicos.

Los datos y resultados de la humedad natural final de las dos muestras, se aprecian en la **TABLA 35**.

El cálculo de la humedad inicial y final de las muestras, sirvió como marco de referencia para denotar los cambios de humedad que las muestras sufrieron cuando fueron sometidas a esfuerzos en el ensayo de consolidación unidimensional.



DATOS	TR2-M1G	TR2-M4G
Peso recipiente(g)	6.6	8.6
Peso muestra húm. + recipiente (g)	29.5	31.65
Peso muestra húmeda (g)	22.9	23.05
Peso muestra seca + recipiente (g)	12.60	14.62
Peso muestra seca (g)	6	6.02
Peso agua contenida muestra (g)	16.9	17.03
Humedad Final (%)	281.66	282.890

**TABLA 35 Datos y Resultados del Ensayo de Humedad Final.**

Como se puede apreciar en los resultados de la **TABLA 35**, los suelos que conforman el depósito de La Lejía, tienen un contenido de humedad muy elevado lo que deja ver que corresponden a materiales que retienen gran cantidad de agua, lo cual resulta desfavorable para la construcción de obras civiles en este terreno, debido a que es más propenso a experimentar el fenómeno de consolidación dando lugar a la subsidencia.

#### **7.4.2. Resultados de Limites de Atterberg**

Juárez y Rico (2005), muestra la relación esfuerzo-deformación en un suelo cuando sobre éste actúan tensiones que afectan la compresibilidad y cohesión del material. Estos resultados se evidencian en el estudio límite de plasticidad, que muestra una frontera que marca los extremos entre una arcilla en estado seco con



ninguna propiedad elástica y una arcilla con un gran contenido de humedad, con un elevado índice de plasticidad. De esta manera un suelo puede pasar por cualquiera de los siguientes estados de consistencia:

- ✓ Estado líquido
- ✓ Estado semilíquido
- ✓ Estado Plástico
- ✓ Estado semisólido
- ✓ Estado sólido

Al no encontrarse exactamente el punto en el que una arcilla cambia de fase, Atterberg definió unos límites convencionales que determinan los dos estados generales por los que pasa una muestra, la primera frontera se encuentra entre los estados semilíquido y semiplástico y fue definida como límite líquido, mientras que la frontera entre los estados plástico y semisólido fue llamada como el límite plástico.

Las muestras analizadas presentan un cambio gradual en el tono de coloración, tal como se observó en las muestras TR2-M5G (Superior) y TR2-M4G (Inferior), éstas son características típicas de otros límites de consistencia definidos, como el límite de contracción que define la frontera entre los estados de consistencia sólido y semisólido. Es allí donde la muestra presenta un contenido de agua, tal que el volumen del suelo, no disminuye mientras ésta se encuentra en el proceso de secado (Juárez y Rico, 2005).

### **Límite líquido: muestra TR2-M5G (Nivel superior)**

Casagrande (1932), en Juárez y Rico (2005), determinó que el límite líquido es una medida de resistencia al corte del suelo ante cierto contenido de humedad y



que cada golpe necesario para cerrar el surco trazado, corresponde a un esfuerzo cortante cercano a 1gr/cm.

La fuerza que se opone a la deformación irreversible de los lados de la ranura en una muestra contenida en el aparato de Casagrande, representa la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, que es determinada por factores como la cohesión, la cual es una medida de la adherencia entre las partículas de suelo (Suárez, 2008). Un punto importante para analizar el origen de las arcillas, es la interpretación de la gráfica límite líquido vs índice plástico desarrollado por Atterberg. En este diagrama se correlacionan algunas características de la plasticidad de los suelos, se muestran resultados de suelos secados al horno y suelos tomados en su estado natural. Atterberg concluyó a partir de ésta gráfica, que en las arcillas inorgánicas que no sean de origen volcánico, es poco probable un límite líquido mayor de 100, mientras que en arcillas volcánicas y orgánicas, es muy factible encontrar valores por encima de este número.

Mediante el cálculo del límite líquido realizado por el aparato de Casagrande, se determinó la humedad para cada ensayo y el número de golpes necesarios para que las dos mitades de suelo contenidas en la copa de Casagrande se unieran (**TABLA 36**). Estos resultados se documentaron en una gráfica de humedad vs Número de Golpes, a partir de la cual se calcula una recta que muestra la tendencia para el número de golpes. Atterberg definió mediante pruebas experimentales, que cuando la muestra llega a los 25 golpes, se define el contenido de agua correspondiente al límite líquido y la recta que marca la tendencia en la gráfica denominada curva de fluidez, es una recta que pasa cerca de la frontera que marca el límite líquido. Se desplaza y se ubica en las abscisas el valor correspondiente al golpe número 25, para llevarlo hasta la recta de tendencia y trasladarlo hacia las ordenadas, para obtener de esta forma el valor de

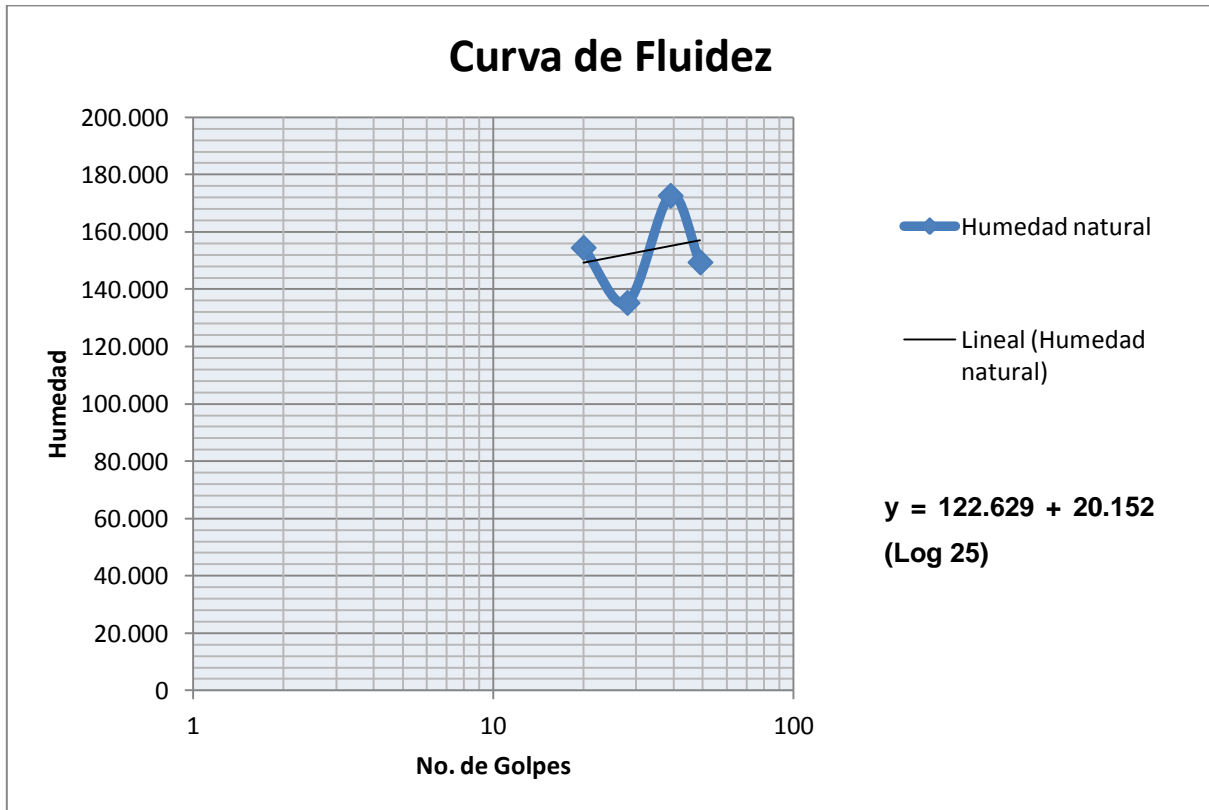


humedad del límite líquido. El valor representa coherencia respecto a los resultados obtenido por la humedad promedio de los ensayos (**FIGURA 83**).

PARÁMETROS	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
Peso copa	8.62	8.75	7.35	6.75
Peso Muestra Húmeda + Copa (g)	22.29	20.94	19.54	18.23
No. De Golpes	49	39	28	20
Peso Muestra Húmeda (g)	13.67	12.19	12.19	11.48
Peso Muestra Seca + Copa (g)	14.1	13.22	12.53	11.26
Peso Muestra Seca (g)	5.48	4.47	5.18	4.51
Peso Agua Contenida en la Muestra (g)	8.19	7.72	7.01	6.97
Humedad (%)	149.452	172.706	135.328	154.545
Humedad Límite Líquido Promedio %	153.00775			

**TABLA 36** Resumen de los parámetros y resultados del ensayo de límite plástico para la muestra TR2-M5G.





**FIGURA 83** Curva de fluidez obtenida para la muestra TR2-M5G.

Al obtener la regresión lineal de la curva de fluidez, se tiene una ecuación de la forma:

$$y = (a) x + b \quad (2)$$

En donde, **y**= Contenido de agua y/o límite líquido; **a**= Índice de Fluidez (Pendiente de la curva de fluidez); **x**= log Número de Golpes; **b**= Constante que representa la ordenada en la abscisa de 1 golpe.

Los valores obtenidos de la regresión para la Muestra TR2-M5G fueron:

$$a= 20.152; b= 122.629;$$

Los anteriores valores fueron reemplazados en la ecuación (2), así:

$$y = 122.629 + 20.152(\text{Log } 25)$$



Entonces se obtiene para el Límite Líquido (L.L) un valor de **150.80 %**, el cual se utilizará junto al Índice plástico en un apartado posterior, para clasificar el suelo mediante la carta de plasticidad.

### Limite plástico: Muestra TR2-M5G (Superior)

La resistencia en el límite plástico es de variación constante y es definido como la cantidad agua en el suelo para que este pase a un estado sólido o semisólido. El método manual utilizado para realizar este experimento es debido a la alta tenacidad que presentan las arcillas en el límite plástico. El límite plástico es afectado en gran parte por el contenido de materia orgánica en el suelo, puesto que eleva su valor sin aumentar el valor del límite líquido. En la **TABLA 37** se muestran los parámetros y resultados obtenidos en el ensayo de límite plástico para la muestra TR2-M5G.

MUESTRA TR2-M5G (Profundidad 1.00 m)		
PARAMETROS	Ensayo 1	Ensayo 2
Peso copa(g)	6.75	8.4
Peso Muestra Húmeda + Copa (g)	11.74	13.54
Peso Muestra Húmeda(g)	4.99	5.18
Peso Muestra Seca + Copa (g)	8.75	10.33
Peso Muestra Seca(g)	2	1.93
Peso Agua Contendida en la Muestra (g)	2.99	3.25
Humedad (%)	149.5	168.393
Humedad Límite Plástico Promedio (%)	158.9468	

**TABLA 37** Parámetros y resultados obtenidos para en el ensayo de límite plástico aplicado a la muestra TR2-M5G.



## Índice plástico (I.P)

El índice de plasticidad es definido como el porcentaje del peso en la muestra seca del suelo, e indica el rango de humedad a través del cual los suelos con cohesión tienen propiedades de un material plástico. El índice plástico depende en gran parte de la cantidad de arcilla que se tenga, y muestra de igual forma, la capacidad del suelo para cambiar su distribución sin alterar su volumen. Un nivel alto de Índice de plasticidad muestra una abundancia de coloides en el suelo. Siempre que el límite plástico sea superior o igual al límite líquido, su valor será cero. Otro factor importante que muestra el IP es la compresibilidad, la cual aumenta cuando aumenta el IP. El cálculo del IP se realiza mediante la diferencia entre el LL y LP.

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

Al remplazar en esta ecuación los valores resultantes de los ensayos, tenemos:

$$IP = 150.80 - 58.9468$$

Por lo tanto, el valor del índice de plasticidad es **IP = 91.8532**.

Crespo (2004), muestra la clasificación realizada por Atterberg para determinar el grado de plasticidad de un suelo con base en el valor calculado del IP en un suelo arcilloso; cuando un suelo tiene un índice plástico igual a cero no es plástico, cuando el índice es menor que 7 el suelo presenta baja plasticidad, cuando está comprendido entre 7 y 17 se dice que es medianamente plástico y cuando su valor se halla por encima de 17 el suelo es altamente plástico, con estas consideraciones el IP para las muestras de esta investigación, muestra una plasticidad elevada, resultado concordante con las propiedades físicas que presenta la muestra, la cual la hacen un arcilla maleable, en parte por su gran contenido de humedad.



### Consistencia relativa (C.R)

La consistencia relativa en suelos se define como las expresiones de las fuerzas de cohesión actuando en el suelo con variados contenidos de humedad, por lo tanto la CR se encuentra en función de los límites de consistencia y se define mediante la ecuación (4):

$$C.R = (L.L - W_n) / I.P \quad (4)$$

Donde, **C.R**= Consistencia relativa de suelos; **L.L** = Limite Líquido; **W<sub>n</sub>**= Humedad natural; **I.P**= Índice de plasticidad.

Al introducir los datos obtenidos con el ensayo en la ecuación (4), se obtuvo un valor de **C.R = - 2.2075**.

Crespo (2004), establece una serie de criterios para determinar el significado de los valores que otorga el cálculo de la consistencia relativa. Si la C.R es negativa, es decir, cuando la humedad del suelo es mayor que la de su límite líquido, el suelo se transforma en un barro viscoso. C.R cercanas a cero muestran un suelo con esfuerzo a ruptura entre 0.25 y 1 kg/cm<sup>2</sup>. Si C.R es igual a 1 los valores del esfuerzo a ruptura varían entre 1 y 5 kg/cm<sup>2</sup>.

### Índice de liquidez (I.L)

De acuerdo con Crespo (2004), en suelos con alta plasticidad este índice representa otro indicativo de la historia de los esfuerzos a los cuales ha sido sometido el suelo, ya que el estudio de consolidación unidimensional de suelos maneja parámetros similares para obtener el resultado que brinda el Índice de



Liquidez (I.L). Si el valor del índice de liquidez es cercano a cero, se considera preconsolidado, y si éste es cercano a uno, se le considera un suelo normalmente consolidado. La ecuación (5) permite obtener este índice:

$$I.L = (W_n - L.P) / L.L \quad (5)$$

Donde, **I.L**= Índice de Liquidez; **W<sub>n</sub>** corresponde a la humedad calculada en el ensayo de humedad natural; **L.P**= Límite plástico; **L.L**= Límite líquido.

Al remplazar los valores obtenidos, se tiene:

$$I.L = (296.944 - 158.9468) / 150.80$$

De esta manera se obtiene un I.L de **0.902**.

Los resultados de todos los parámetros calculados a partir del ensayo de límites en la muestra TR2-M5G, se resumen en la **TABLA 38**.

TABLA DE RESULTADOS ENSAYOS DE LÍMITES	
Limite Líquido LL	150.80 %
Límite Plástico LP	158.9468 %
Índice de Plasticidad IP	91.8532
Consistencia Relativa CR	-2.2075
Índice de Liquidez IL	0.902

**TABLA 38** Resumen de los resultados de los ensayos de límites de Atterberg para la muestra TR2-M5G.

### Clasificación de suelos mediante la Carta de Plasticidad

Según Juárez y Rico (2005), esta clasificación está basada en el sistema de aeropuertos, denominado así porque se utilizaba para este tipo de obras



anteriormente, pero que ahora se conoce como Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Este método utiliza las propiedades hidráulicas y mecánicas para suelos muy finos: Deformación, resistencia, permeabilidad y compresibilidad, esta última con mayor importancia ya que aumenta con el valor del límite líquido sin que afecte las demás variables. El Sistema Unificado definió una clasificación particular para suelos finos, tres grupos con base en su valor de límite líquido:

- a. Limos orgánicos, con símbolo genérico M.
- b. Arcillas inorgánicas con símbolo genérico C.
- c. Limos y arcillas orgánicas con símbolo genérico O.

Si son suelos con Límite > 50% (compresibilidad alta) se añade el símbolo L, mientras que para aquellos materiales con Limite < 50% (compresibilidad baja) se agrega al grupo correspondiente el símbolo H. Así mismo, para suelos con alto contenido de materia orgánica se añade el símbolo Pt (Crespo, 2004). Los demás símbolos utilizados para denotar los diferentes tipos de suelo se presentan en la

**TABLA 39.**

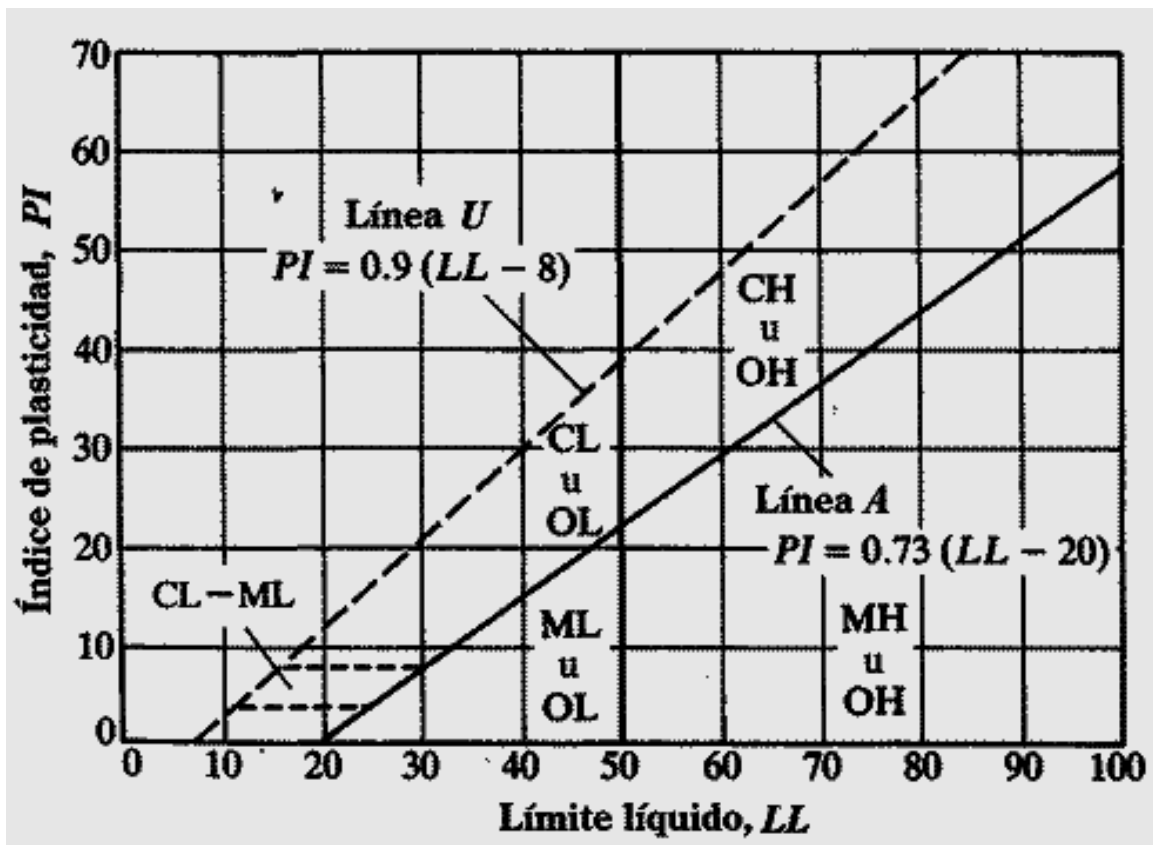
Símbolo	G	S	M	C	O	Pt	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos orgánicos y arcilla	Turba y suelos altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduados	Mal graduados

**TABLA 39** Símbolos para clasificar los suelos utilizado por el Sistema de Clasificación de Suelos Unificado (Tomado de páginas web: H, Edd, 2010)



Para ubicar la muestra en sus grupos respectivos, se consideran el límite líquido (L.L) y el índice de plasticidad (I.P), los cuales conforman los ejes de carta de plasticidad para clasificación de suelos (**FIGURA 84**).

El I.P con valor de 91.85 % y el L.L con valor de 150.80%, permite ubicar a este suelo entre los grupos OH, MH y Pt. Ya que el grupo Pt, consiste en suelos con alto contenido de turba, los valores de límites se encuentran por encima del 200 % y cercanos o mayores al 100 % para el I.P. Por lo tanto solo es válido ubicar este suelo para el grupo Pt que representa arcillas orgánicas de media a alta plasticidad y cuyos valores coinciden dentro del rango presentado por el I.P y el L.L. en las muestras analizadas.



**FIGURA 84** Carta de Plasticidad para la clasificación de suelos en partículas finas, (Tomado páginas web: H, Edd, 2010).



### 7.4.3. Resultados de consolidación unidimensional de suelos.

Cualquier objeto que es sometido a un esfuerzo experimenta deformación, la cual se traduce en cambios de volumen del material. Un ejemplo de este fenómeno es la consolidación, la cual consiste en la disminución de volumen que experimenta un material durante un lapso de tiempo, cuando se incrementa la carga que se encuentra sobre éste. De acuerdo con Juárez y Rico (2005), la consolidación de un suelo puede ser unidireccional o unidimensional, cuando la posición de las partículas sólidas del material en el plano horizontal permanece constante, es decir sólo se produce desplazamiento vertical. Un ejemplo claro de la consolidación unidimensional de suelos, es el caso de la depositación de sedimentos en un ambiente lacustre, pues a medida que se van asentando las partículas, la capa de suelo va reduciendo el volumen que ocupa debido al aumento de la carga (por la depositación de más sedimentos) y la compresión que esto produce. Este proceso se puede simular en el laboratorio mediante la realización de un ensayo de consolidación unidimensional de suelos, también conocido como ensayo de compresión simple. Para efectuar dicho experimento, se utiliza el consolidómetro, cuyo manejo se explicó en el capítulo de metodología, así como el procedimiento que se debe seguir en el ensayo. La importancia de este ensayo, radica en los parámetros que se pueden calcular, los cuales proporcionan información sobre los esfuerzos a los que estuvo sometido el suelo en su historia geológica. En la

**TABLA 40** se muestran los datos necesarios para efectuar el ensayo y también para el cálculo de los parámetros de consolidación. Estos datos son los mismos tanto para la muestra TR2-M1G y TR2-M4G, pues corresponden a magnitudes medibles con valores constantes del equipo y material utilizado para el ensayo de consolidación.



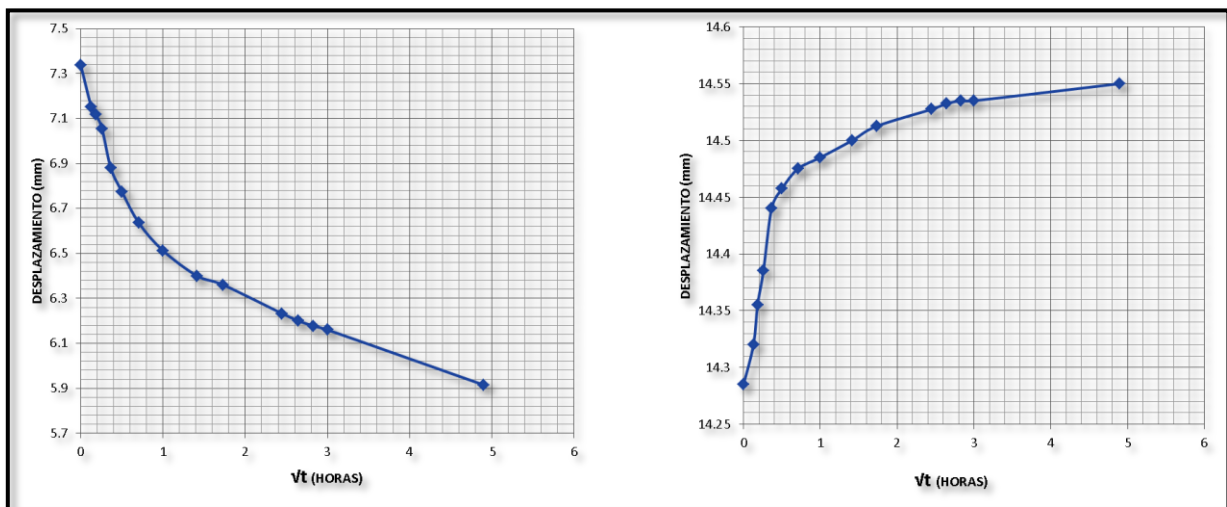
<b>DATOS DE LAS MUESTRAS Y ANILLOS</b>	
<b>Diámetro externo anillo(mm)</b>	<b>71</b>
<b>Diámetro interno anillo(mm)</b>	<b>62</b>
<b>Diámetro Muestra(mm)</b>	<b>62</b>
<b>Altura anillo(mm)</b>	<b>24</b>
<b>Altura Inicial Muestra(mm)</b>	<b>24</b>
<b>Peso anillo(g)</b>	<b>106</b>
<b>Peso anillo + muestra(g)</b>	<b>189</b>
<b>Peso Muestra(g)</b>	<b>82.4</b>
<b>Área muestra(cm<sup>2</sup>)</b>	<b>30.1907</b>
<b>Constante carga del brazo</b>	<b>9.5</b>
<b>Peso específico del agua (Kg Fuerza/m<sup>3</sup>)</b>	<b>999.32</b>

**TABLA 40** Datos Iniciales de las muestras para el ensayo de Consolidación.

Mediante las lecturas tomadas en el deformímetro, se logró establecer un valor para la variación del espesor de la muestra en determinados intervalos de tiempo. En el análisis de estos datos, los incrementos de carga, se relacionaron con la raíz del tiempo tomado en cada aumento de carga, esta relación permitió encontrar como dato principal, el coeficiente de consolidación, que brinda el tiempo aproximado en el cual se realiza el proceso de consolidación. Otras variables que se lograron obtener fueron el esfuerzo vertical ( $\sigma_v$ ) y el índice de oquedad ( $e_o$ ), este último que determina la relación entre el volumen de los



vacíos y el de los sólidos del suelo, estos cálculos permitieron graficar la denominada curva de compresibilidad, graficada en escala natural mediante el método Casagrande descrito por Juárez y Rico (2005), en la cual los valores que corresponden a la relación de vacíos y al esfuerzo vertical, se encuentran ubicados en el eje de las ordenadas y las abscisas, respectivamente (**FIGURA 85**).



(a)

(b)

**FIGURA 85** Grafica que muestra la relación entre la variación de altura respecto a la raíz del tiempo, para la muestra TR2-M1G. a. Día de ensayo 1, se inicia el proceso de carga. b. Día de ensayo 4, se inicia la descarga de la muestra.

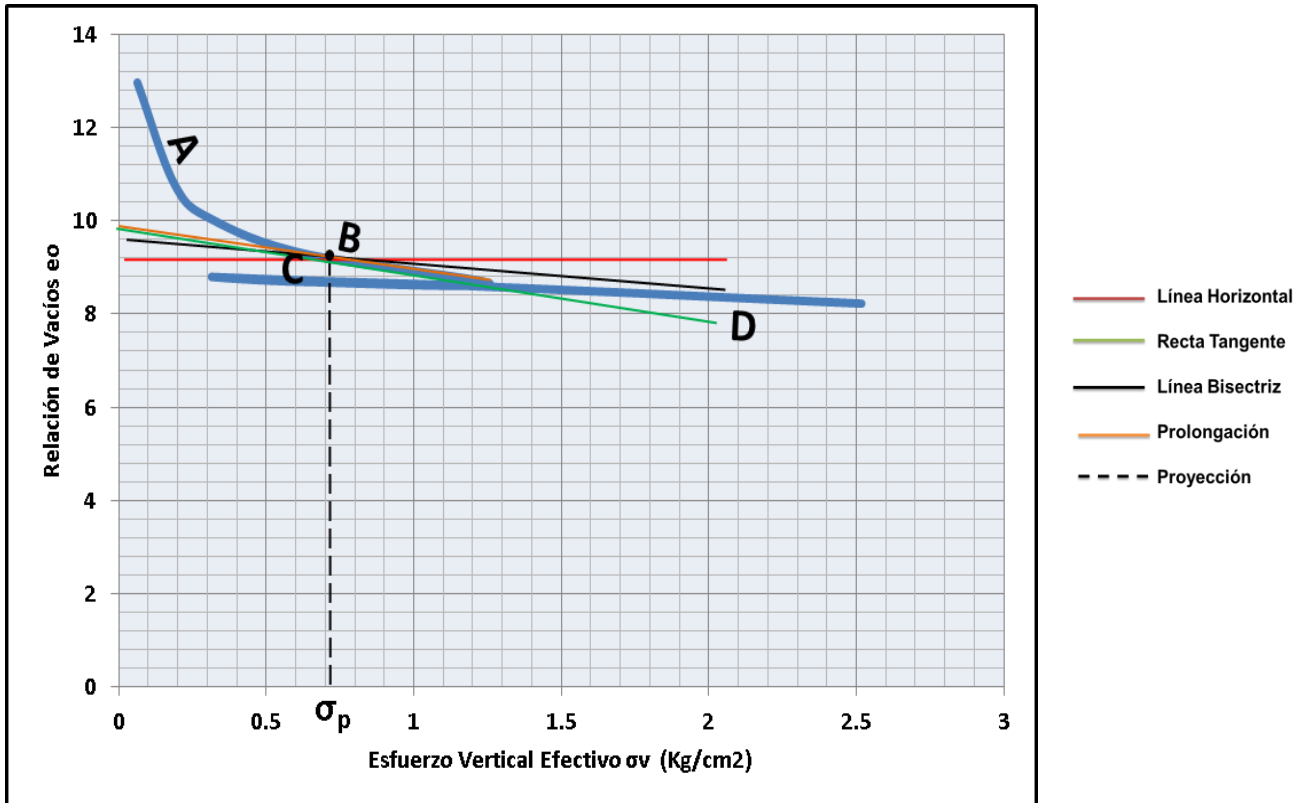
La grafica de compresibilidad presenta diversos tramos que muestran los períodos de carga y descarga, los cuales se analizan según la pendiente que define cada trayecto. El tramo A, llamado tramo de recompresión, representa las presiones similares a las cuales ha sido sometido el suelo en su historia geológica. El tramo B llamado tramo virgen, representa la etapa en la cual la muestra ha presentado su mayor compresión al efectuarse allí la mayor carga. En el tramo C se realizó el



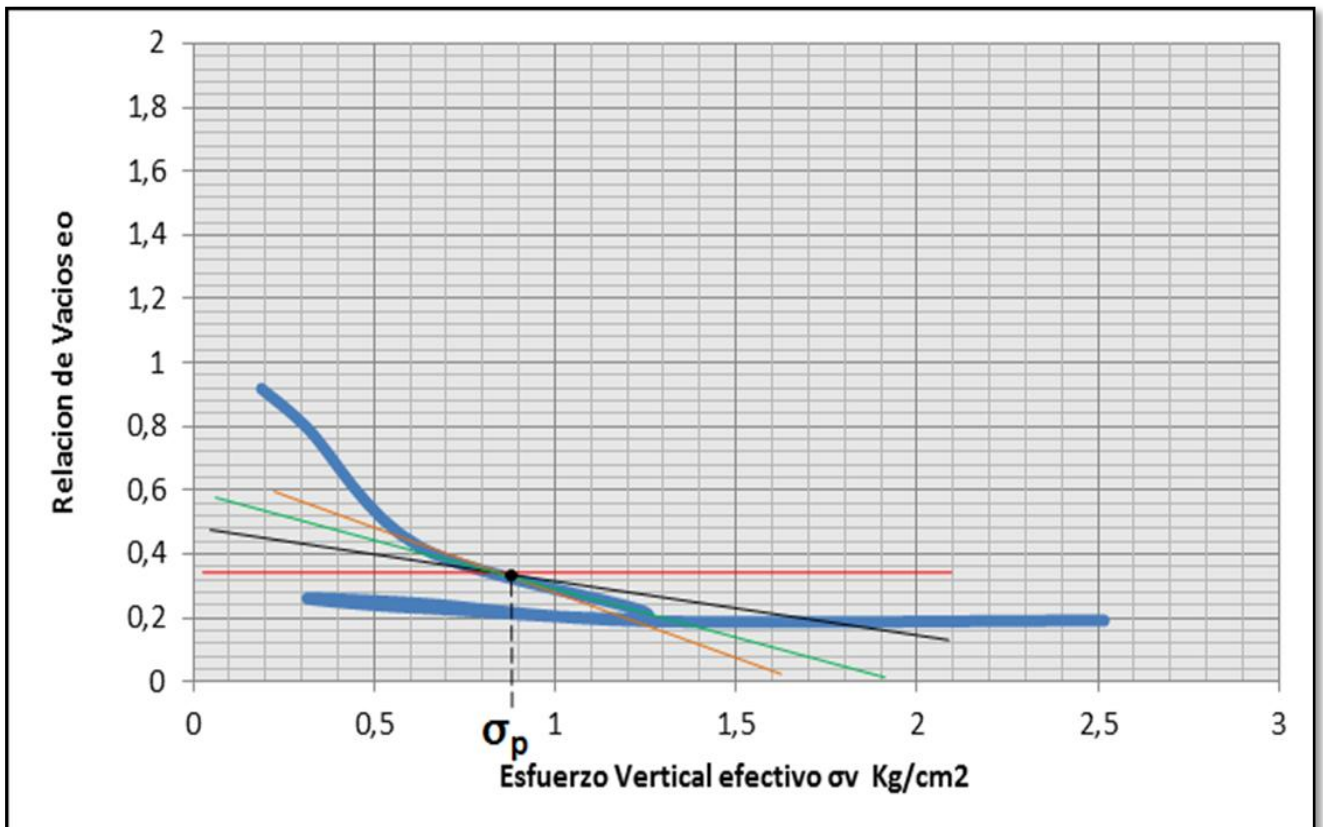
proceso de descarga donde se ha retirado parte de la carga, por lo que la muestra ha recuperado parte de la deformación sufrida. Por último en el tramo D, se recargó nuevamente la muestra hasta conseguir una compresión similar a la obtenida en la parte B (**FIGURA 86**).

El punto correspondiente al límite entre el tramo de recompresión y tramo virgen corresponde a la carga de preconsolidación, por lo que es en este punto donde se realizó el método propuesto por Casagrande para determinar la carga de preconsolidación de la muestra en su historia geológica. Aplicando este método en el punto de mayor curvatura, en la sección B de la gráfica, se trazaron dos rectas una horizontal y una tangente a dicho punto y se proyectó la bisectriz del ángulo formado por las rectas mencionadas. Luego se trazó una línea para prolongar el tramo de curva seleccionado y se halló el punto de intersección entre dicha línea de prolongación y la bisectriz. Por último, se proyectó sobre el eje horizontal que representa el esfuerzo vertical, para obtener el valor de la carga de preconsolidación. Este proceso se efectuó para cada una de las muestras, tanto TR2-M1G como TR2-M4G (**FIGURA 86** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).





**FIGURA 86** Curva de Compresibilidad de la Muestra TR2-M1G, en la cual se ha hallado por el método Casagrande la carga de preconsolidación ( $\sigma_p$ ). Con el valor de  $\sigma_v$ , ya es posible calcular RSC.



**FIGURA 87** Curva de Compresibilidad de la muestra TR2-M4G, en la cual se ha calculado por el método Casagrande la carga de preconsolidación ( $\sigma_p$ ).

Los valores de  $\sigma_p$  (esfuerzo de preconsolidación) hallados gráficamente por el método Casagrande fueron: 0.75 para la muestra TR2-M1G y 0.89 para la muestra TR2-M4G.

Luego se realizó el cálculo del esfuerzo vertical efectivo ( $\sigma_v$ ), para lo cual se utilizó la ecuación (6):

$$\sigma_v = (\sum_i \gamma_i * z_i) - (\gamma_w * z_w) \quad (6)$$



De donde,  $\gamma_i$  es el peso específico de las capas de suelo que están sobre la muestra analizada;  $z_i$  es la profundidad a la que se encuentra la muestra;  $\gamma_w$  es el peso específico del agua y  $z_w$  es la profundidad de la tabla de agua. Estos dos últimos valores se aplican cuando hay nivel freático.

Los valores de  $\sigma_v$  calculados para cada muestra fueron: Para TR2-M1G es 0.1178 Kg/cm<sup>2</sup> y para la muestra TR2-M4G es 0.21997 Kg/cm<sup>2</sup>. Estos valores se utilizaron para determinar la relación de sobreconsolidación (RSC) y de esta forma catalogar el nivel de consolidación del suelo.

Con el esfuerzo de preconsolidación ( $\sigma_p$ ) y el esfuerzo vertical efectivo ( $\sigma_v$ ), se calculó la relación de sobreconsolidación (RSC), la cual se expresa en la ecuación (7):

$$RSC = \sigma_p / \sigma_v \quad (7)$$

Por lo tanto, al remplazar los valores de  $\sigma_v$  y  $\sigma_p$  en la ecuación (7), se obtienen los valores de RSC. Para la muestra TR2-M1G es **RSC= 6.366** y para la muestra TR2-M4G es **RSC= 4.046**.

Los resultados finales de los parámetros calculados, se presentan en la **TABLA 41**. En nuestro caso, para calcular el esfuerzo vertical efectivo, no se tuvo en cuenta el nivel freático, ya que éste no apareció en el sitio de excavación de la trinchera-2.



PARÁMETROS FINALES DE CONSOLIDACION	TR2-M1G	TR2-M4G
Altura Muestra Final (mm)	17.655	11.8124
Esfuerzo vertical efectivo (Kg/cm <sup>2</sup> )	0.1178	0.21997
Esfuerzo preconsolidación (Kg/cm <sup>2</sup> )	0.75	0.89
Relación de Sobreconsolidación (RSC)	6.3667	4.0460

**TABLA 41** Resultados de los parámetros de consolidación calculados a partir de los datos iniciales y de la gráfica de compresibilidad para cada una de las muestras analizadas.

La **TABLA 42** presenta los intervalos para los valores de RSC en suelos. De acuerdo con los resultados obtenidos para las muestras TR2-M1G y TR2-M4G correspondientes a las dos capas más superficiales del depósito de La Lejía, estos materiales se clasifican como suelos altamente sobreconsolidados ya que tienen un RSC > 3.0.

RELACIÓN DE SOBRECONSOLIDACIÓN	TIPO DE SUELO
RSC = 1.0	Normalmente consolidado
1.0 < RSC < 3.0	Ligeramente sobreconsolidado
RSC > 3.0	Altamente sobreconsolidado

**TABLA 42** Valores estándar para la clasificación del suelo en base a la Relación de sobreconsolidación (Tomado de Merchán, 2011).



## 8. DISCUSIÓN

Mediante el análisis estructural con base en los cortes geológicos, se dedujo que el depósito sedimentario de La Lejía o del Llano Fontibón (Unidad de depósito lagunar Q0I, de acuerdo con la cartografía de Calderón y Romero, 2009) está relleno de una cuenca que se generó sobre un sector del flanco Oeste del sinclinal de Pamplonita, cubriendo parte del afloramiento de las formaciones Colón – Mito Juan (Kitm), La Luna (Ksl) y Aguardiente (Kia), tal como se mostró en la

**FIGURA 56.** La presencia de fallas inversas (una de ellas la Falla Chitagá) sobre los costados Este y Oeste del Llano Fontibón, pone de manifiesto que la tectónica desempeñó un papel importante en la formación de dicha cuenca, pues estas estructuras levantaron bloques de basamento correspondientes a las unidades: Cuarzomonzonita (JRcg), Ortoneis de Pamplona (pDo) y el Neis de Bucaramanga (pEb), y de esta manera, se generó el espacio de acomodación suficiente para que dichos cuerpos ígneo-metamórficos quedaran expuestos al intemperismo, se erosionaran y el material resultante se depositara. Lo anterior fue corroborado con los resultados de análisis geoquímicos por fluorescencia y difracción de rayos x, efectuados en las dos capas de suelo que conforman la parte más superficial del depósito, que mostraron un claro predominio de fases minerales con afinidad félsica, pues se encontró que las muestras TR2-M1RX (1.7 m), TR2-M2RX (2.4 m) presentaron elevados contenidos de: Cuarzo (66% - 78%); Caolinita (20% - 33%), que constituye un grupo de minerales arcillosos que se forman a partir de la alteración físico-química de Feldespatos; Muscovita (14%) y en menores proporciones minerales arcillosos como la Anatasa. Lo anterior es una evidencia



de que probablemente la fuente principal de aporte de los sedimentos que conforman el depósito, corresponde a las unidades cristalinas ya mencionadas así como a unidades sedimentarias aledañas de las formaciones Aguardiente, Capacho y la Luna. La razón principal es que todas las anteriores unidades presentan rocas en cuya composición predominan granitos, cuarzomonzonitas, pórfidos cuarzosos, neises hornbléndicos y graníticos, así como cuarzoareniscas, cherts y lodolitas (Ward, *et al.*, 1973).

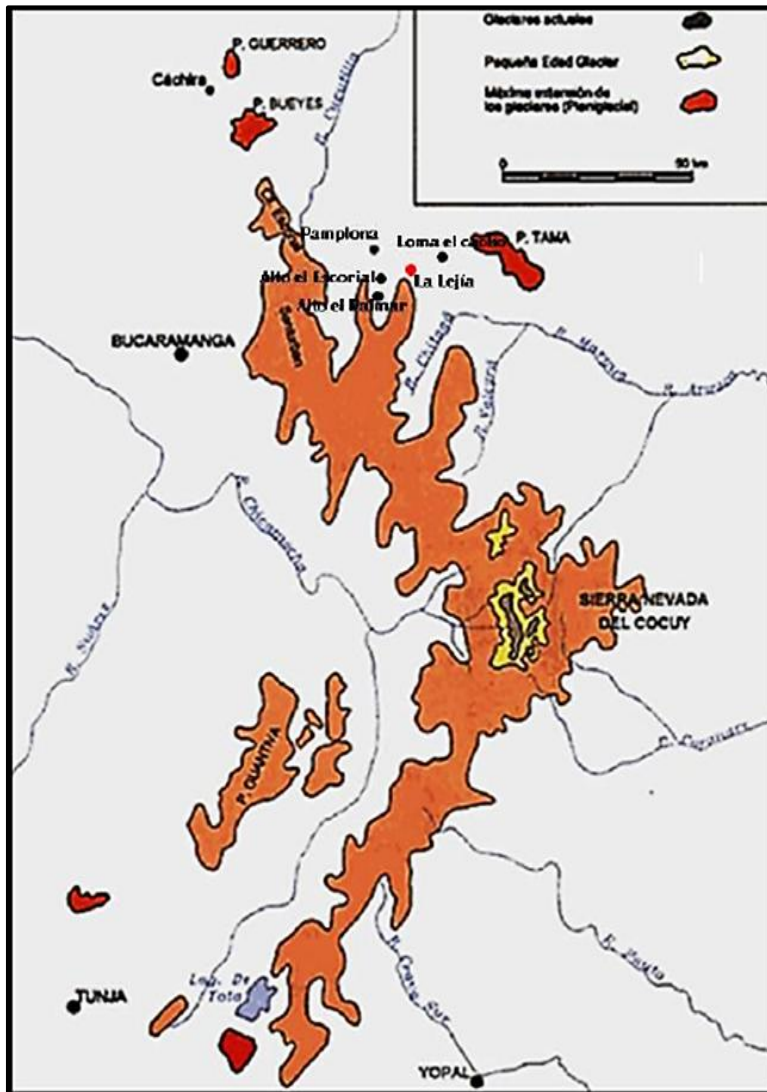
Se interpretó que en esta zona existe un fuerte control estructural generado por compresión, pero no se puede descartar la gran influencia que tienen los procesos geomorfológicos y el clima en el modelado del paisaje, pues según Flórez (2003), son los cambios climáticos los que más han incidido en la conformación del relieve en los períodos más recientes de la historia de la Tierra. Este autor afirma que los cambios climáticos cuaternarios han afectado a todo el espacio colombiano y que hace 116.000 años comenzó el último período glacial para Colombia, en donde los nevados actuales empezaron a formarse hace unos 70.000 años (Pleistoceno tardío). Según Flórez (2003), durante este período que se conoce también con el nombre de Pleniglacial, en las montañas colombianas el hielo alcanzó a cubrir zonas con altura de 3.000 m  $\pm$  100 m y ocasionalmente descendió un poco más.

De acuerdo con el mapa de extensión glacial para la Sierra Nevada del Cocuy que presenta Flórez (2003), el hielo alcanzó a llegar hasta sectores relativamente cercanos al sureste de Pamplona, en donde se ubica el depósito de La Lejía. Sin embargo, Ingeominas (2011), asumieron tasas de sedimentación entre 0,6 mm/año hasta 1 mm/año para el sector de La Lejía y encontraron que a estas velocidades de depositación se tendría un registro de los últimos 6000 – 3000 años para un espesor de suelo de unos 3.5 m (**FIGURA 88**).



Como ya se mencionó, las muestras que se recolectaron en las trincheras excavadas en La Lejía y que fueron sometidas a ensayos geotécnicos, se tomaron a profundidades que están entre 1 m – 2.10 m. Por lo tanto, se deduce que estas muestras corresponden a capas de suelo cuya edad relativa no debería ser mayor al Holoceno tardío (5000 años). Aunque es claro que la época Pleniglacial es anterior a la formación de las capas superficiales del relleno sedimentario de la cuenca La Lejía, y que por lo tanto, la glaciación que se presentó en este período no afectó a dichas capas, Flórez (2003) establece la ocurrencia de un avance glacial (estadial) entre 7400 – 6050 años que se postula como el evento que pudo haber afectado éste depósito.





**FIGURA 88** Mapa de extensión glaciaria durante el Pleistoceno Superior en la Sierra Nevada del Cocuy (Tomado de Flórez, 2003)

Es por esto que con la evidencia que encontraron Calderón y Romero (2009), quienes cartografiaron morrenas terminales (Q2m) al noroeste de la cuenca La Lejía, y con las geoformas de origen glaciario (morrenas laterales y bloques erráticos) identificadas sobre el costado Oeste del depósito, durante la fase de campo del presente estudio, se propone que esta cuenca no sólo es de origen estructural, sino que también involucró procesos geomorfológicos de modelado

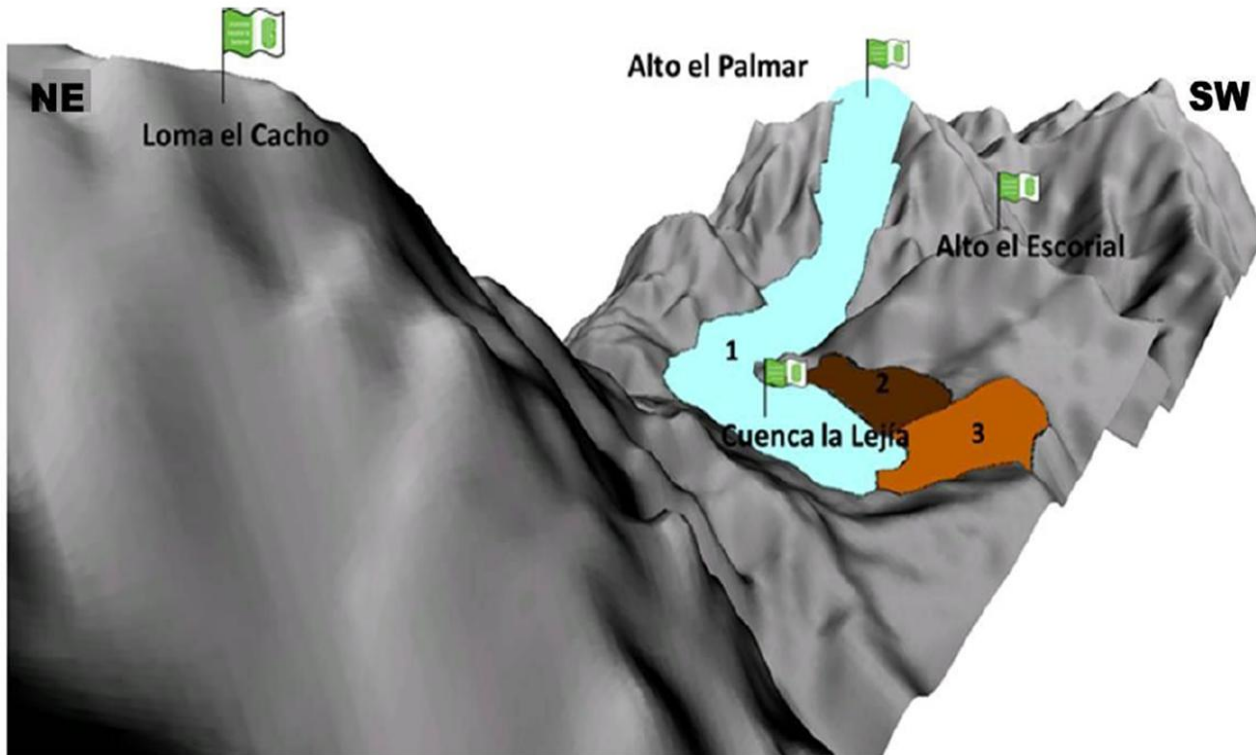


glaciar y además estuvo seriamente influenciada por los cambios climáticos que se presentaron en el Cuaternario (variaciones en el nivel del mar y por consiguiente de los niveles piezométricos).

A partir de estas deducciones, se elaboró un modelo hipotético en 3D para el probable avance glaciar ocurrido en el sector de La Lejía, Pamplona. Se consideró la topografía como principal elemento que favoreció el avance de la lengua glaciar, probablemente desde el Alto el Palmar (3200 m) hasta la cuenca La Lejía (2600 m), dejando a su paso morrenas laterales y morrenas frontales (**FIGURA 89**).

Aunque se trata de un modelo idealizado, los ensayos de geotecnia y en particular el de consolidación unidimensional de suelos, que fue aplicado a las dos capas de suelo más superficiales del depósito sedimentario de La Lejía, mostraron ciertos parámetros que sirven como evidencia para afianzar la probabilidad del avance, y posterior retroceso, de un glaciar en ésta cuenca durante el Holoceno superior.





**FIGURA 89** Modelo del avance glaciar, elaborado con base en el modelo de elevación digital de la zona, con Global Mapper 10.0: (1) Lengua glaciar; (2) Morrena lateral; (3) Morrena terminal.

El ensayo de consolidación aplicado a las muestras TR2-M1G y TR2-M4G, arrojó valores de relación de sobreconsolidación (RSC) de 6.33 y 4.04, respectivamente, por lo cual se catalogan como suelos altamente sobreconsolidados. Con este dato se deduce que el suelo estuvo sometido a tensiones efectivas mayores a las actualmente existentes sobre él. Según Sagaseta *et al.* (2007), las principales causas de la sobreconsolidación del terreno natural in situ son: Eliminación de cargas existentes sobre el terreno, variaciones en la posición del nivel freático, sobreconsolidación por envejecimiento y sobreconsolidación por precarga.

En cuanto a la eliminación de cargas existentes en el terreno, el autor explica que es un factor importante que produce sobreconsolidación en el terreno ya que éste



se encuentra en su actual situación a tensiones verticales efectivas menores a las que tenía antes de la reducción de la carga. Entre las circunstancias naturales que producen este efecto en el terreno, se encuentran principalmente fenómenos de erosión y retiro de una determinada capa de hielo en zonas con glaciares. Por tal razón, se comprueba desde el punto de vista geotécnico, la existencia de hielo en la etapa más reciente de la evolución geológica del sector de La Lejía.

Este resultado de sobreconsolidación fue verificado con el índice de liquidez que mostró valores típicos de suelos sobreconsolidados. Así mismo, los límites de Atterberg mostraron el buen grado de resistencia que presentan estos suelos frente a esfuerzos que pueden producir ruptura del material, ya que tanto el Límite Líquido como el Límite Plástico arrojaron valores de 150.80 y 158.98, respectivamente para la muestra TR2-M5G (nivel superior o capa A). Estos valores reflejan un grado alto de plasticidad y por ende, una fuerte resistencia a deformaciones que se asocian al elevado contenido de agua en la muestra y a la cohesión entre las partículas constituyentes del suelo. El Índice plástico permitió corroborar el grado de plasticidad de esta capa de suelo, el cual se sitúa en 91.85, un valor que solo corresponde a suelos altamente maleables. De manera similar al índice plástico, el coeficiente de consistencia relativa mostró valores negativos que deben corresponder según Crespo (2004) a suelos con una gran plasticidad, por lo que se presentan como arcillas con aspecto de barro viscoso. Los parámetros calculados a partir de los límites de Atterberg permitieron brindar una clasificación del tipo de suelo con base en el examen detallado de algunas propiedades geomecánicas relacionadas con la respuesta del material ante esfuerzos aplicados, y así se determinó que en la trinchera-2, la capa superior corresponde a arcilla orgánica plástica (entre 0m – 1.90m de profundidad) y la capa inferior (desde los 2.10 m de profundidad) se catalogó como una turba parduzca, pues no tiene plasticidad y su elevado contenido orgánico está bien conservado. Este



último factor contribuyó de manera primordial a que el suelo presente una mayor consistencia, ya que los restos de materia orgánica permiten una mayor integración de partículas susceptibles a ruptura (**FIGURA 67**).

Es claro que el contenido de humedad participa en gran medida en el comportamiento plástico que presentan las muestras. Esta humedad en el suelo es controlada por los parámetros de la piezometría que fue registrada con los datos del nivel freático tomados en campo, los cuales permitieron deducir que la topografía y las condiciones climáticas del lugar, influyen drásticamente en la variación de la profundidad en la que se ubican estos niveles. Es por esto que el nivel freático no se encuentra a una profundidad constante en los diferentes sectores del depósito, lo que se comprobó con medidas de profundidad que fluctuaron entre los 30 cm hasta más de 2.3 m, éste último dato presentado en la trinchera-2. Lo anterior también se verificó con los ensayos de humedad natural, pues aunque el contenido de agua de la muestra TR2-MG1 (capa superior A) es alto, no supera los valores de humedad de la muestra de TR2-M4G (capa inferior B) la cual se ubica a una profundidad superior a los 2.10 m, con valores de humedad por encima de 250 %. Por lo tanto, se confirma lo planteado por Sagaseta *et al.* (2007), quien afirma que el descenso del nivel freático hace que las tensiones efectivas en el terreno aumenten y el posterior ascenso tiene como consecuencia una disminución de las tensiones efectivas, resultando que el terreno se encuentra con un nivel tensional inferior al máximo alcanzado a lo largo de su historia.

Todos estos parámetros geotécnicos, permitieron mostrar la influencia que representa el grado de cohesión del suelo y los factores que influyen para que las partículas que integran estos materiales se encuentren unidas, de tal forma que



pese a los esfuerzos a los que sean sometidos no involucren factores de cizallamiento que fracturen el suelo.

Ya se han mencionado los factores que modelaron el paisaje actual, que se observa en el depósito, y también los aspectos que describen el comportamiento geomecánico del suelo que conforma la parte superficial del mismo, pero surge una pregunta muy importante, ¿cuál es el origen de los elevados contenidos de materia orgánica encontrados en las muestras analizadas que conforman el relleno sedimentario de la cuenca La Lejía?

Para responder a este cuestionamiento es importante remitirse a la apertura de las trincheras exploratorias, pues a través de éstas, se logró determinar las propiedades físicas y algunas características sedimentológicas de dichas capas de suelo. El nivel más superficial que fue registrado en la muestra TR2-M1S (capa superior A), corresponde a un material arcilloso altamente orgánico cuyo color negro oscuro permite inferir que se formó en un ambiente reductor (anaeróbico), con abundante desarrollo de vegetación. El tamaño de grano y la disposición horizontal de ésta capa de suelo, es un buen indicador de un ambiente de baja energía, con depositación por suspensión de sedimentos, lo que permitió la formación de dicho horizonte de arcilla orgánica con un espesor de 1.90 m. El buen contenido de restos vegetales, con moderado grado de deterioro, evidencia una paleofauna dominada por vegetación propia de zonas lacustres de alta montaña, cuyo desarrollo se vio favorecido por las condiciones climáticas caracterizadas por elevados niveles de precipitación. Esto propició el crecimiento de arbustos, hierba, frailejones y vegetación arbórea, que al descomponerse en su ciclo de vida, se depositaron junto con los sedimentos suministrados por las fuentes de aporte de la zona, dando lugar a la formación de esta capa de arcilla orgánica.



Así mismo, la muestra TR2-M2S, cuyo techo aparece a los 2.10 m, presentó un color marrón oscuro, con buen contenido de materia orgánica conservada, pues los restos de hojas, raíces y finos tallos, aún preservaban su estructura y características físicas originales, lo que permitió inferir que corresponde a una capa de turba. Lo anterior, evidencia una variación en las condiciones ambientales con respecto a la capa superior (TR2-M1S), ya que la formación de turbas, según Guerrero *et al.* (1988), requiere de ciertas condiciones geomorfológicas, de humedad y temperatura. Por ejemplo, en climas fríos y húmedos, se retrasa la descomposición de la materia orgánica brindando la posibilidad de generar suelos con restos orgánicos bien conservados. Así mismo, la geomorfología es importante, pues se requieren zonas de deposición donde el agua quede retenida o estancada, es decir, depresiones topográficas, cuencas y zonas llanas. Por lo tanto, al considerar dichas condiciones en el área de estudio, se deduce que es un ambiente propicio para dar lugar a la formación de turbas. Gisbert (2002), plantea que gracias a la acumulación de materiales orgánicos en lugares de drenaje restringido, las condiciones anaerobias permiten su conservación dando lugar a la turba, que posteriormente a través de procesos pedogenéticos (físicos, químicos y biológicos), se transforma en suelo orgánico, es decir, un histosol. Con las observaciones sedimentológicas de los dos horizontes encontrados en las trincheras de exploración, se determinó que por las propiedades que presentaron estos materiales, corresponden a histosoles de tipo hemist (capa superior A) y fibrist (capa inferior B), por lo cual se dedujo que la elevada proporción de materia orgánica presente en estos suelos es producto de la interacción de las condiciones ambientales planteadas anteriormente (**FIGURA 67**).

La integración de todos los elementos geológicos analizados en el presente estudio (geomorfología, geología estructural, sedimentología, geotecnia),



proporcionó criterios fundamentales mediante los cuales se planteó el proceso de evolución geológica que dio origen al depósito Cuaternario del sector de La Lejía.

El contexto tectónico fue clave en la evolución de la cuenca La Lejía, mientras que los procesos geomorfológicos que actuaron sobre la estratigrafía local, desempeñaron un papel fundamental para la conformación actual del depósito sedimentario. Así mismo el comportamiento geomecánico del suelo refleja la acción de procesos glaciares y la influencia del clima, pero no permite evidenciar rasgos de actividad neotectónica sobre el depósito.



## 9. CONCLUSIONES

- ✓ La observación del contenido de materia orgánica en los suelos encontrados en el depósito de La Lejía, permitió caracterizar como histosoles de tipo Hemist a la capa superior y Fibríst a la capa inferior.
- ✓ El contenido de materia orgánica que presenta la capa de Fibríst, está en mejores condiciones de preservación, en comparación con la capa superior de Hemist. Esto se debe a que la capa de Fibríst, se formó en un ambiente muy frío y húmedo, lo cual permitió que el proceso de descomposición de los restos vegetales fuese más lento.
- ✓ El análisis geoquímico y sedimentológico de las muestras de suelo, junto con la geomorfología del sector, permitieron postular a las siguientes formaciones como fuente de aporte de sedimentos para el depósito: Cuarzoareniscas de la Formación Aguardiente (Kia) que afloran en el Alto el Escorial en el oeste, *shales* de la Formación Capacho (Kic) y lodolitas intercaladas con cherts de la Formación La Luna (Ksl) que están expuestas en el pie de ladera del Alto el Escorial; hacia el Suroeste del depósito, en la cima del Alto el Palmar, nuevamente la Formación Aguardiente, mientras que en el costado Este del depósito sobre la Loma el Cacho, las rocas ígneas félsicas de la unidad Cuarzomonzonita (JRcg).
- ✓ El Límite Líquido, evidenció la alta humedad presente en la muestra que coincide con el valor mostrado por la curva de fluidez, la cual cataloga a la muestra en una etapa semilíquida, y refleja la respuesta negativa que debió presentar la muestra ante posibles esfuerzos cortantes. Igualmente el ensayo de límite plástico, manifestó una clara similitud con los resultados del Límite



Líquido, lo que permitió inferir que cuando el material intentó pasar a un estado semisólido, la pérdida de agua no influyó para que disminuyera la capacidad de cimentación del suelo. Estos análisis fueron corroborados por los índices de plasticidad y consistencia relativa, que permitieron verificar el alto grado de plasticidad que debió presentar la muestra en su pasado geológico, para comportarse dúctilmente ante fuerzas externas y así ocultar evidencias de elementos de cizallamiento que hubieran podido fracturar el material.

- ✓ Los suelos sobreconsolidados encontrados en el depósito de La Lejía, dan clara muestra de los esfuerzos verticales a los que fueron sometidos a lo largo de su historia geológica, los cuales han desempeñado un papel fundamental en las presiones que se ha ejercido sobre el material que se sedimentó posteriormente a la formación de la cuenca. Estos resultados, determinaron que estas presiones se han ejercido principalmente por sobrecargas del mismo material, que se iba adicionando al depósito y otros elementos geológicos que contribuyeron a que se presentaran fases de compresión y descompresión, lo que permitió identificar la sobreconsolidación en ambos horizontes de suelo. Lo anterior permite deducir que el depósito ha sido afectado en sus etapas más recientes por procesos geológicos que han involucrado la adición y retiro de grandes cantidades de material (avance y retiro de capas de hielo, variación de niveles piezométricos).
- ✓ Los resultados de sobreconsolidación encontrados en las muestras de suelo y los elementos geomorfológicos de la zona, evidenciaron que este depósito estuvo seriamente afectado por procesos de modelado glaciar, producto de la última glaciación registrada en el territorio colombiano durante el Holoceno, la cual brindó las condiciones de temperatura y humedad necesarias para la



formación de los histosoles que conforman el relleno sedimentario más superficial de la cuenca La Lejía.

- ✓ Las evidencias geomorfológicas de modelado heredado de origen glaciario, la confirmación geotécnica del carácter sobreconsolidado de los suelos junto con la carencia de evidencias estructurales de campo, no corroboran ni niegan la posibilidad de actividad neotectónica presente en el depósito de La Lejía ya que las propiedades geotécnicas del suelo no muestran los efectos de cizallamiento que hubiesen podido afectar a dicho depósito.



## 10. RECOMENDACIONES

- ✓ Llevar a cabo un estudio palinológico con el fin de profundizar el conocimiento acerca de la evolución paleoambiental y paleoclimática que tuvo lugar en el setor de La Lejía –Pamplona.
- ✓ Se recomienda evitar al máximo realizar actividades en este terreno que impliquen la desecación del suelo, pues su elevado contenido de materia orgánica hace que estos materiales sean más susceptibles a la combustión y por ende, aumentan el riesgo de incendios en este sector.
- ✓ No se recomienda utilizar el suelo presente en el depósito de La Lejía para la construcción de obras civiles, pues existe el riesgo de desplazamientos causados por el fenómeno de subsidencia, asociado a la desecación y consolidación.
- ✓ Desarrollar estudios morfotectónicos detallados en los depósitos Cuaternarios de origen aluvial (Qal) y derrubios (Qd) que se localizan al Suroeste y Noreste del depósito de La Lejía, pues se encuentran en contacto directo con fallas satélites y con las estructuras principales de la zona: Falla Chitagá y Falla Pamplona.
- ✓ Realizar la actualización del contexto geológico a nivel regional del área de Pamplona y municipios aledaños, mediante la adquisición de datos estructurales, estratigráficos y geomorfológicos, como etapa previa a los estudios morfotectónicos de los depósitos Cuaternarios ya mencionados.



- ✓ Hacer estudios de microestructural, en un futuro en la región aledaña al depósito de La Lejía, para determinar el tensor de deformación y evaluar el tensor de esfuerzos tanto local, como regional.
- ✓ Seleccionar más sitios de exploración paleosismológica para futuros estudios en la zona.



## 11. BIBLIOGRAFÍA

- ✓ ALVARADO, A., GLOVER, N., OBANDO, O. 1982. Reconocimiento de los suelos de Puriscal-Salitrales y Tabarcia - San Ignacio de Acosta, Costa Rica. CATIE, Turrialba (Costa Rica).
- ✓ ALVARADO, M., AUDEMARD, F., LAFAILLE, J., et al. 2008. Paleoseismic investigation on the Boconó fault between Las González and Estanques, Mérida Andes, Venezuela. 7th International Symposium on Andean Geodynamics. Niza, Francia, Extended Abstracts, pp. 37 – 40.
- ✓ AUDEMARD, F. 1989. Néotectonique du Languedoc Méditerranéen: examen critique et synthèse des données existantes. D.E.A. Memoir, Université Montpellier II (U.S.T.L.), 60pp+ 26 tab + synthesis map.
- ✓ AUDEMARD, F., SINGER, A. 1997. Aportes de FUNVISIS al desarrollo de la geología de fallas activas y de la paleosismología para los estudios de amenaza y riesgo sísmico. Academia de Ciencias Físicas Matemáticas y Naturales, Caracas (Venezuela), pp. 25-38 + mapas + tab.
- ✓ AUDEMARD, F. 2003. Estudios paleosísmicos por trincheras en Venezuela: métodos, alcances, aplicaciones, limitaciones y perspectivas. Revista Geográfica Venezolana, Vol. 44(1): 11-46.
- ✓ BOINET, T., BOURGOIS, J., MENDOZA, H. 1981. Tectónica de sobrecorrimiento y sus implicaciones en el área de Pamplona - Labateca, Cordillera Oriental de Colombia. Boletín de Geología, Bucaramanga (Colombia), Vol. 15 (29): 81 – 97.



- ✓ BOINET, T., BOURGOIS, J., MENDOZA, H., VARGAS, H. 1985. Le poinçon de Pamplona (Colombie); un jalon de la frontière meridionale de la plaque caraïbe. Bulletin de la Société Géologique de France, Huitième Série, 1(3): 403-413.
- ✓ CALDERÓN, J., ROMERO, J. 2009. Cartografía y sedimentología de los depósitos cuaternarios en el área de Pamplona, Pamplonita y La Lejía. INGEOMINAS: Informe final proyecto AME09-43, Investigación y monitoreo de la actividad Sísmica, Fuente Morro Negro-Pamplona. Inédito. Bogotá (Colombia), p. 74.
- ✓ CARVAJAL, H., CORTES DEL VALLE, R., ROMERO, F., MONTERO, J., CALDERÓN, Y. 2004. Propuesta metodológica para el desarrollo de la cartografía geomorfológica para la zonificación geomecánica. INGEOMINAS: Subdirección de geología básica. Bogotá (Colombia). pp. 7-15.
- ✓ CRESPO, C. 2004. Mecánica de suelos y cimentaciones. Editorial Limusa. México. 5ª edición. pp. 69 – 95.
- ✓ CRUZ, L., CABALLERO, V. 2001. Sedimentología para Ingenieros de Petróleos: Prácticas de laboratorio. Publicaciones UIS, v. 150 p. 94.
- ✓ CUSHMAN, J., HEDBERG, H. 1941. Upper Cretaceous Foraminifera from Santander del Norte, Colombia. Ibid., vol. 17, pt 4, pp. 79-100, 1 mapa, pl. 21-22, Sharon.
- ✓ DANE. 2005. Censo General 2005: Nivel Nacional. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Bogotá (Colombia).



- ✓ DUQUE, G., ESCOBAR, C. 2002. Mecánica De Suelos I. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Nacional, sede Manizales. p. 36.
- ✓ ESPINOSA, A. 1993. Actualización del Catálogo Colombiano de Sismicidad Histórica. Informe Interno, Ingeominas, Cali (Colombia), p. 10.
- ✓ ESPINOSA, A. 2003. La sismicidad histórica en Colombia. Revista Geográfica Venezolana, Vol. 44 (2): 271-283.
- ✓ ESPINOSA, A., CAPERA, A., SALCEDO, E. 2004. State of the art of the historical seismology in Colombia. Annals of Geophysics, Vol. 47 (2/3): 437-449.
- ✓ ETAYO, F. et al. 1983. Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia. Ingeominas – United States Geological Survey (USGS). Publicaciones especiales de Ingeominas, p. 235 + 1 mapa + 1 tab.
- ✓ FLÓREZ, A. 2003. Colombia: evolución de sus relieves y modelados. Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá (Colombia). pp. 139-161.
- ✓ GISBERT, J. M. 2002. Taxonomía de suelos: Soil Taxonomy- 99. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.
- ✓ GONZÁLEZ, F., FERRER, M., ORUÑO, L., OTEO, C. 2002. Ingeniería Geológica. Pearson Educación, Madrid (España), p. 744.
- ✓ GUERRERO E., MONSO, M. A., POLO. A., (1988). Condiciones De



Formación Y Características Del Histosol De Herbosa (Burgos). Revista Ecología, No. 2. pp. 69-78. Madrid (España).

- ✓ ICONTEC. 2000. Norma Técnica Colombiana 1967: Suelos. Método de ensayo para determinar las propiedades de consolidación unidimensional de los suelos. Bogotá (Colombia).
- ✓ ICONTEC. 2000. Norma Técnica Colombiana 1493: Suelos. Ensayo para determinar el límite plástico y el índice de plasticidad. Bogotá (Colombia).
- ✓ ICONTEC. 2000. Norma Técnica Colombiana 1494: Suelos. Ensayo para determinar el límite líquido. Bogotá (Colombia).
- ✓ ICONTEC. 2000. Norma Técnica Colombiana 1495: Suelos. Ensayo para determinar el contenido de humedad. Bogotá (Colombia).
- ✓ INFANTE, H. A., ORTIZ L. F. 2008. Ajuste Metodológico Al Índice De Escasez De Agua Propuesto Por El IDEAM En El Plan De Ordenación Y Manejo De La Cuenca Del Río Pamplonita, Norte De Santander, Colombia. Colombia Forestal, Vol. 11, No. 1. Bogotá (Colombia).
- ✓ INGEOMINAS, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES y ASOCIACIÓN DE INGENIERÍA SÍSMICA. 1996. Estudio General de Amenaza Sísmica para Colombia. Comité AIS 300 amenaza sísmica. Bogotá (Colombia).
- ✓ INGEOMINAS y UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. 2010. Mapa Nacional de Amenaza Sísmica: Período de retorno 475 años. Bogotá (Colombia).



- ✓ INGEOMINAS. 2011. Propuesta de exploración paleosismológica en la fuente Chitagá-Pamplona, Trinchera La Lejía-Pamplona. Inédito. Sub-dirección de amenazas geológicas y entorno ambiental: proyecto red sismológica nacional de Colombia (AME-043). Bogotá (Colombia). 2011.
- ✓ JULIVERT, M., BARRERO, D., BOTERO, G., DUQUE, H., et al. 1968. Léxico Estratigráfico Internacional: América Latina, Colombia. Unión Internationale Des Sciences Géologiques, París, p. 572.
- ✓ JUÁREZ, E., RICO, A. 2005. Mecánica de Suelos I: Fundamentos de la mecánica de suelos. Limusa, México, p. 644.
- ✓ KAMMER A. (1993): Steeply Dipping Basement Faults and Associated Structures of the Santander Massif, Eastern Cordillera Colombian Andes. - Geología Colombiana, No. 18. pp. 47 – 64. Bogotá (Colombia).
- ✓ KLINGEBIEL, A., MONTGOMERY, P. 1961. Land capability classification. Agr. Handbook 210. USDA, Soil ConService.
- ✓ MACHETTE, M., LUND, W. 1987. Trenching across the American Fork segment of the Wasatch fault zone, Utah: Geological Society of America, Abstracts with Programs, Vol. 19, (5), p. 317.
- ✓ McCALPIN, J. (Ed). 1996. Paleoseismology. Academic Press, Londres. p. 583.
- ✓ MERCHÁN, V. 2011. Apuntes de clase de mecánica de suelos (Inédito). Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander. p. 29.



- ✓ MICHETTI, A., AUDEMARD, F., MARCO, S. 2005. Future trends in paleoseismology: Integrated study of the seismic landscape as a vital tool in seismic hazard analyses. *Tectonophysics* 408: 3 –21.
- ✓ MOYANO, I. 2010. Adquisición e interpretación de ocho (08) sondeos eléctricos verticales en el sector de “La Legía” (Pamplona-Norte de Santander). Ingeominas-Reporte Técnico, Bogotá (Colombia), p. 11.
- ✓ MUÑOZ R. A., MUÑOZ, J. A., MANCILLA, P., RODRÍGUEZ, J. E. 2007. Caracterización fisicoquímica de arcillas del municipio de Guapi – Costa Pacífica caucana (Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*. Vol. 31 (121): 537-544.
- ✓ OSORIO, J., MONTES, N., VELANDIA, F., ACOSTA, J., ROMERO, J., AUDEMARD, F., DIEDERIX, H., NÚÑEZ, A. 2008. Paleosismología de la Falla de Ibagué. *Publicaciones Especiales de Ingeominas*. Ministerio de Minas y Energía: Ingeominas. Bogotá (Colombia).
- ✓ PARIS, G., MARIN, P., ROMERO, J., WAGNER, J. 1989. Actividad Neotectónica en el Suroccidente Colombiano. *Memorias 5° Congreso Colombiano de Geología*. Sociedad Colombiana de Geología. Bucaramanga (Colombia). pp. 193-213.
- ✓ PARIS, G., ROMERO, R. 1994. Fallas Activas en Colombia: INGEOMINAS, Bogotá (Colombia), *Boletín Geológico*, Vol. 34 (2-3): 3-26.
- ✓ PARIS, G., MACHETTE, M. N., DART, R. L., HALLER, K. M. 2000. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore



Regions, U.S Geological Survey. p. 35

- ✓ RAMÍREZ, J. 1975. Historia de los terremotos en Colombia. Segunda edición, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá (Colombia). p. 250.
- ✓ ROMERO, J. 2011. Informe técnico del estudio exploratorio de trinchera con fines paleosismológicos al suroriente de Pamplona (Norte de Santander). Informe Inédito. INGEOMINAS. Bogotá (Colombia).
- ✓ SAGASETA, C., CAÑIZAL J. y DA COSTA. 2007. Geotecnia I: Propiedades del terreno, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. de Santander. Versión online: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/geotecnia-i/material-de-clase>
- ✓ SANZ, J. 1975. Mecánica de suelos. Editores técnicos asociados. Barcelona (España). p. 36.
- ✓ TABOADA, A., DIMATÉ, C., FUENZALIDA, A. 1998. Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción. Física de la Tierra N° 10: 111-147.
- ✓ VERGARA, F. 1898. Los terremotos en Colombia. Anales de Ingeniería, Vol. X: 186-192.
- ✓ WARD, D., GOLDSMITH, R., CRUZ, J., RESTREPO, H. 1973. Geología de los Cuadrángulos H12 Bucaramanga y H13 Pamplona, Departamento de Santander. Ingeominas, Boletín Geológico, Vol. XXI (1-3)
- ✓ WARD, D., GOLDSMITH, R., CRUZ, J., JARAMILLO, L., VARGAS, R. 1977.



Geología del Cuadrángulo H13 Pamplona a escala 1:100.000. Ingeominas, Bogotá (Colombia).

- ✓ ZICARELLI, S., PARODI A., CANOSA, M., GUSSO, M. 2012. Aplicación de Fluorescencia de Rayos X en el análisis de componentes del cemento relacionados con la durabilidad. Su uso en la determinación de óxidos de sodio, potasio y de compuestos de azufre. VIII Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras. La Plata (Argentina).

#### **Páginas web:**

- ✓ SUÁREZ, J. 2008. Asignatura: Estabilidad de Taludes, Clase 3: Resistencia al Cortante. Tomado el 10 de Noviembre de 2012 del sitio web: <http://gavilan.uis.edu.co/~jsuarez/docencia/21572/MaterialClase3.html>
- ✓ H, EDD. 2010. Sistema de Clasificación de Suelos Unificado. Tomado el 10 de Noviembre de 2012 del sitio web: [http://www.ingenieriaciviltips.com/2011/05/sistema-de-clasificacion-de-suelos\\_13.html](http://www.ingenieriaciviltips.com/2011/05/sistema-de-clasificacion-de-suelos_13.html)



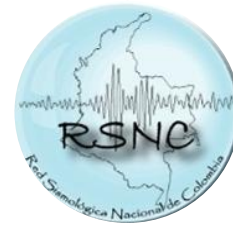
## 12. ANEXOS



### 12.1. Catálogo sísmico de Pamplona y zonas aledañas, en donde se registran los eventos ocurridos desde 1993 – 2012 (Tomado del catálogo de sismicidad de la Red Sismológica Nacional)



Parámetros de Consulta	
Fecha Inicial	01/06/1993
Fecha Final	19/11/2012
Departamento	NORTE DE SANTANDER
Municipio	PAMPLONA Y ALEDAÑOS
Total Registros	146



RED SISMOLÓGICA NACIONAL						
Fecha dd/mm/aaaa	Hora UTC hh:mm:ss	Magnitud MI	Longitud Grados	Latitud Grados	Municipio	Profundidad Km
24/04/2011	4:39:15	0.8	-72.655	7.352	PAMPLONA	3.1
13/01/1995	20:59:13	2.6	-72.538	7.007	CHITAGA	90
30/04/1995	0:52:47	2.7	-72.634	7.059	CHITAGA	6
29/09/1995	20:08:13	3.3	-72.548	7.135	CHITAGA	0
06/10/2000	15:01:18	3.5	-72.609	7.062	CHITAGA	160
29/10/2001	21:54:44	2.2	-72.603	7.06	CHITAGA	116.9
23/11/2001	0:39:01	1.8	-72.723	6.983	CHITAGA	144.2
28/01/2004	6:05:24	2.6	-72.642	7.033	CHITAGA	136.1
11/02/2004	4:37:42	2.2	-72.663	6.985	CHITAGA	8
20/02/2005	20:58:49	2.1	-72.709	7.105	CHITAGA	3.9
11/05/2006	0:13:01	2.1	-72.504	7.069	CHITAGA	17.3
01/09/2008	2:31:21	2.2	-72.73	6.989	CHITAGA	145.6
06/09/2008	1:34:09	2.2	-72.619	7.088	CHITAGA	130
12/10/2008	1:48:33	1.6	-72.713	6.982	CHITAGA	97.9
13/01/2009	23:55:49	1.6	-72.581	7.033	CHITAGA	117.1
16/01/2009	6:40:03	1.4	-72.591	7.069	CHITAGA	116
27/01/2009	5:58:48	1.2	-72.731	7.098	CHITAGA	135.5



01/06/2009	13:23:26	3.4	-72.457	6.971	CHITAGA	1.2
01/06/2009	17:35:22	3.7	-72.466	7.01	CHITAGA	0
01/06/2009	17:46:13	1.9	-72.446	6.975	CHITAGA	3.8
02/10/2009	23:26:34	1.5	-72.723	6.985	CHITAGA	111
30/10/2009	15:25:01	2.1	-72.612	7.044	CHITAGA	140
25/04/2010	3:36:39	1.3	-72.643	7.062	CHITAGA	4.3
25/06/2010	8:49:30	2.3	-72.541	7.105	CHITAGA	4
29/08/2010	6:36:47	2.3	-72.758	7.051	CHITAGA	4.2
25/03/2011	0:53:27	1.7	-72.689	7.074	CHITAGA	128.3
29/04/2011	3:10:07	1.3	-72.568	7.106	CHITAGA	22.8
25/06/2011	5:56:51	1.5	-72.716	7.11	CHITAGA	136
03/07/2011	14:30:39	1.2	-72.434	7.045	CHITAGA	66.7
08/08/2011	7:00:33	1.6	-72.737	7.041	CHITAGA	155.3
13/07/2012	0:41:04	1.2	-72.524	7.098	CHITAGA	70.6
04/10/2012	17:13:16	1.9	-72.648	7.023	CHITAGA	120
09/01/1998	3:22:51	2.1	-72.616	7.204	CACOTA	160
18/12/1998	2:52:31	2.2	-72.616	7.247	CACOTA	9.5
11/02/2004	10:12:06	2.8	-72.632	7.242	CACOTA	169
23/07/2011	19:54:04	1.9	-72.601	7.309	CACOTA	2.5
16/12/2011	2:47:26	1.6	-72.636	7.21	CACOTA	85.5
27/12/2011	2:03:34	2	-72.589	7.188	CACOTA	0
14/08/1993	2:22:00	2.7	-72.673	7.497	PAMPLONITA	166.8
29/01/1998	17:44:22	2.3	-72.598	7.469	PAMPLONITA	120
01/07/1999	13:43:32	2.5	-72.623	7.518	PAMPLONITA	91
04/11/1999	19:34:45	2.7	-72.603	7.469	PAMPLONITA	154.9
12/10/2003	23:41:56	2.5	-72.645	7.45	PAMPLONITA	175
19/02/2004	20:58:33	2.8	-72.662	7.471	PAMPLONITA	142.6
09/03/2004	9:17:07	2.3	-72.748	7.424	PAMPLONITA	127.7
16/01/2006	6:19:40	2.5	-72.648	7.467	PAMPLONITA	7.5
02/02/2008	8:24:49	1.8	-72.635	7.49	PAMPLONITA	120
08/02/2008	1:12:57	2	-72.674	7.481	PAMPLONITA	123
29/05/2011	16:14:38	1.6	-72.739	7.469	PAMPLONITA	0.7
09/04/2012	21:19:59	1.6	-72.662	7.476	PAMPLONITA	0
24/07/2012	4:20:29	1.2	-72.741	7.445	PAMPLONITA	0
31/07/2012	9:50:18	1.3	-72.698	7.416	PAMPLONITA	53.3
24/11/1997	7:18:31	2.3	-72.565	7.342	LABATECA	2.8
23/03/2001	21:01:04	2.5	-72.453	7.18	LABATECA	154.8



30/01/2002	14:53:54	2.9	-72.456	7.227	LABATECA	188
09/04/2003	17:08:48	3	-72.567	7.276	LABATECA	0
13/12/2003	16:01:08	2.1	-72.524	7.171	LABATECA	3.3
18/05/2009	14:30:14	2.5	-72.376	7.105	LABATECA	4
01/11/2009	4:07:50	1.8	-72.38	7.115	LABATECA	16.5
30/11/2009	7:13:55	1.5	-72.376	7.063	LABATECA	100.1
25/06/2010	10:12:18	1.7	-72.573	7.333	LABATECA	14.1
19/09/2010	1:42:23	1.8	-72.457	7.192	LABATECA	13.3
22/05/2011	6:32:49	2.8	-72.566	7.285	LABATECA	1.7
12/07/2011	22:39:29	1.7	-72.38	7.078	LABATECA	100
06/09/2011	14:34:53	1.4	-72.536	7.195	LABATECA	114.1
05/10/2011	21:37:11	1.7	-72.445	7.151	LABATECA	80.2
11/10/2011	5:15:58	1.5	-72.488	7.282	LABATECA	0
31/10/2011	10:04:29	1.4	-72.492	7.291	LABATECA	0.2
28/12/2011	8:33:35	1.3	-72.386	7.048	LABATECA	0
17/04/1997	9:28:18	3.6	-72733	7258	MUTISCUA	0
01/02/2002	19:28:19	3.4	-72.785	7.36	MUTISCUA	180
20/10/2003	23:17:46	2.5	-72.757	7.259	MUTISCUA	180.1
11/01/2004	20:59:06	2.2	-72.793	7.435	MUTISCUA	146.6
06/10/2009	9:10:47	1.6	-72.709	7.319	MUTISCUA	0
17/12/2009	22:27:28	2.1	-72.784	7.405	MUTISCUA	10.5
06/02/2011	22:45:51	1.8	-72.739	7.399	MUTISCUA	136
07/06/2011	0:14:53	1.4	-72.72	7.255	MUTISCUA	146.3
22/09/2011	10:03:34	1.5	-72.744	7.313	MUTISCUA	142.1
13/10/1999	22:16:03	3.1	-72.794	7.096	SILOS	173.5
12/08/2001	16:40:30	2.8	-72.775	7.189	SILOS	162.2
30/05/2002	16:15:00	2.2	-72.81	7.209	SILOS	105.7
01/03/2003	18:59:13	3.3	-72.781	7.166	SILOS	3.9
21/03/2003	6:01:50	2.3	-72.762	7.211	SILOS	109.3
26/04/2003	7:02:06	2.4	-72.804	7.15	SILOS	176
11/10/2003	7:01:18	1.7	-72.771	7.194	SILOS	140.6
27/03/2005	7:15:09	2.5	-72.778	7.229	SILOS	217
28/12/2010	8:29:17	1.4	-72.773	7.134	SILOS	142.3
07/06/2011	0:36:10	1.2	-72.789	7.196	SILOS	113.1
03/07/2011	16:46:42	1.3	-72.688	7.206	SILOS	133.3
16/07/2011	4:11:19	1.1	-72.826	7.204	SILOS	49
26/10/1993	17:34:40	3.2	-72.328	7.355	TOLEDO	0



01/03/1994	0:22:36	3.2	-72.27	7.361	TOLEDO	0
08/07/1994	20:23:36	3.3	-72.288	7.347	TOLEDO	150
03/11/1994	4:39:44	3	-72.469	7.412	TOLEDO	0
11/11/1994	16:17:53	2.8	-72.122	7.391	TOLEDO	34.3
18/11/1994	5:38:43	3	-72.118	7.399	TOLEDO	7.9
30/07/1996	9:12:03	3.5	-72.212	7.376	TOLEDO	0
20/01/1998	10:16:42	3	-72.245	7.282	TOLEDO	0
09/02/1998	2:03:02	3	-72.246	7.238	TOLEDO	0.4
14/03/2001	18:45:14	2.4	-72.337	7.168	TOLEDO	0
01/01/2003	22:53:34	2.5	-72.367	7.188	TOLEDO	0
04/08/2003	7:25:40	2.5	-72.228	7.266	TOLEDO	2
01/02/2004	1:31:40	2.3	-72.232	7.35	TOLEDO	0
23/09/2004	18:45:56	2.2	-72.143	7.414	TOLEDO	128
23/02/2006	1:44:22	3	-72.251	7.307	TOLEDO	0.4
18/04/2006	7:53:53	2.4	-72.172	7.352	TOLEDO	10.2
19/12/2006	10:55:12	2.4	-72.309	7.171	TOLEDO	16
05/04/2007	16:12:37	2.8	-72.285	7.389	TOLEDO	10.4
05/04/2007	20:08:19	2.8	-72.173	7.348	TOLEDO	8.2
29/06/2007	6:53:03	2.9	-72.303	7.169	TOLEDO	11.7
02/10/2008	3:09:56	2.9	-72.283	7.439	TOLEDO	0
02/10/2008	3:48:07	2.3	-72.313	7.32	TOLEDO	0
02/10/2008	15:11:12	3.1	-72.343	7.293	TOLEDO	0.1
03/04/2009	8:47:06	2.4	-72.176	7.399	TOLEDO	0
09/07/2009	14:05:28	2.7	-72.511	7.369	TOLEDO	0
07/01/2010	16:40:23	2.1	-72.35	7.433	TOLEDO	4
05/08/2010	4:04:46	2	-72.202	7.302	TOLEDO	4
10/12/2010	17:45:07	1.7	-72.149	7.346	TOLEDO	8
14/12/2010	15:01:24	1.5	-72.217	7.362	TOLEDO	15.7
20/02/2011	13:22:22	1.5	-72.346	7.304	TOLEDO	136
23/02/2011	17:32:01	2.2	-72.31	7.211	TOLEDO	134
23/02/2011	19:00:02	1.6	-72.474	7.343	TOLEDO	146.7
30/03/2011	1:44:43	1.1	-72.305	7.16	TOLEDO	2.4
02/04/2011	3:35:29	1.1	-72.394	7.287	TOLEDO	0
11/04/2011	14:23:52	2.5	-72.285	7.206	TOLEDO	0
13/04/2011	7:50:15	2.4	-72.257	7.25	TOLEDO	1.3
10/05/2011	2:57:23	1.6	-72.147	7.415	TOLEDO	10
29/08/2011	2:33:20	1.8	-72.111	7.392	TOLEDO	1.2



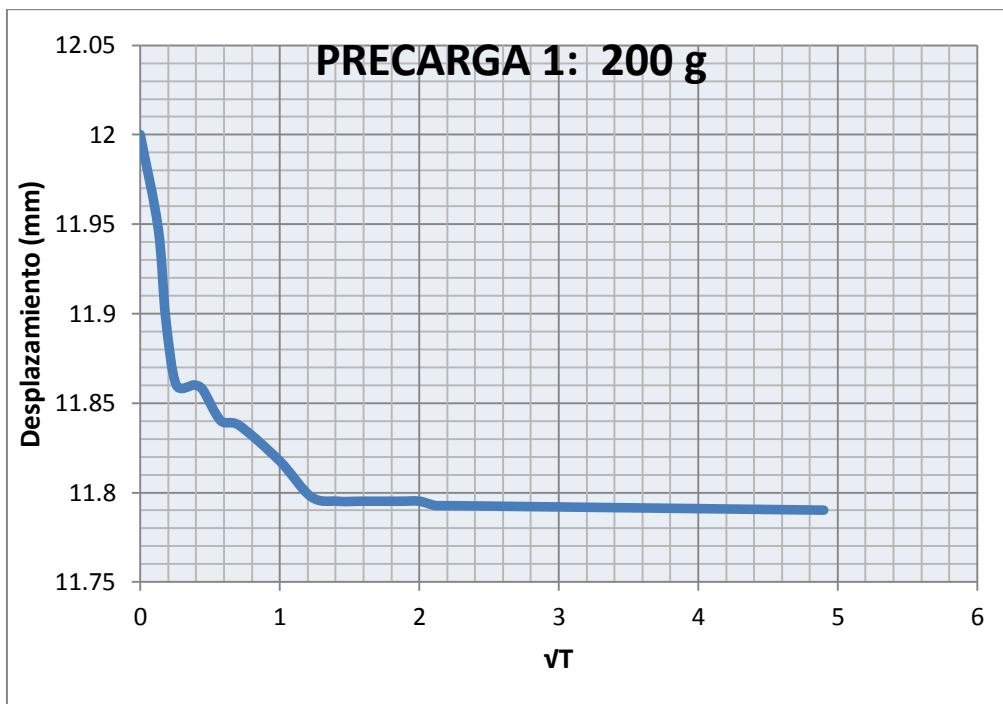
05/10/2011	16:41:44	2.4	-72.119	7.41	TOLEDO	0
05/10/2011	20:20:55	4.5	-72.251	7.374	TOLEDO	0
05/10/2011	20:46:26	2.3	-72.232	7.351	TOLEDO	0
05/10/2011	21:10:34	4.2	-72.251	7.362	TOLEDO	2
06/10/2011	1:46:42	2	-72.322	7.389	TOLEDO	11.3
06/10/2011	5:27:45	1.5	-72.257	7.428	TOLEDO	0
06/10/2011	6:37:28	2.9	-72.28	7.414	TOLEDO	0
06/10/2011	12:25:41	2	-72.228	7.404	TOLEDO	0
16/10/2011	16:00:24	1.4	-72.238	7.388	TOLEDO	0
17/10/2011	23:14:13	2.1	-72.292	7.385	TOLEDO	0
22/10/2011	5:05:54	1.5	-72.127	7.375	TOLEDO	0
31/10/2011	5:04:26	1.8	-72.302	7.395	TOLEDO	2
13/12/2011	11:49:33	1.9	-72.291	7.428	TOLEDO	0
20/12/2011	8:36:35	1.5	-72.233	7.341	TOLEDO	8.1
09/01/2012	6:56:17	1.7	-72.214	7.285	TOLEDO	0
15/03/2012	11:13:47	1.5	-72.257	7.263	TOLEDO	0
19/04/2012	2:37:02	1.4	-72.195	7.313	TOLEDO	6.1
10/08/2012	2:30:00	2.1	-72.293	7.263	TOLEDO	4
16/09/2012	6:46:11	1.4	-72.372	7.419	TOLEDO	1.1

## 12.2. Lecturas registradas y gráficas de Desplazamiento vs. Raíz del tiempo para cada día del ensayo de Consolidación para la muestra TR2-M1G

PRECARGA 1: 200 g (11/11/2011)							
VUELTA	DIVISIONES	Hora	Tiempo (Horas)	$\sqrt{t}$	VARIACIÓN ALTURA (mm)	DIFERENCIA DE ALTURA (mm)	DESPLAZAMIENTO (mm)
12	0	08:53	0	0	12	0	12
	5Y1	08:54	0.01666667	0.129099445	12.0525	0.0525	11.9475
	10Y1	08:55	0.03333333	0.182574186	12.1025	0.1025	11.8975
	10Y16	08:57	0.06666667	0.25819889	12.14	0.14	11.86

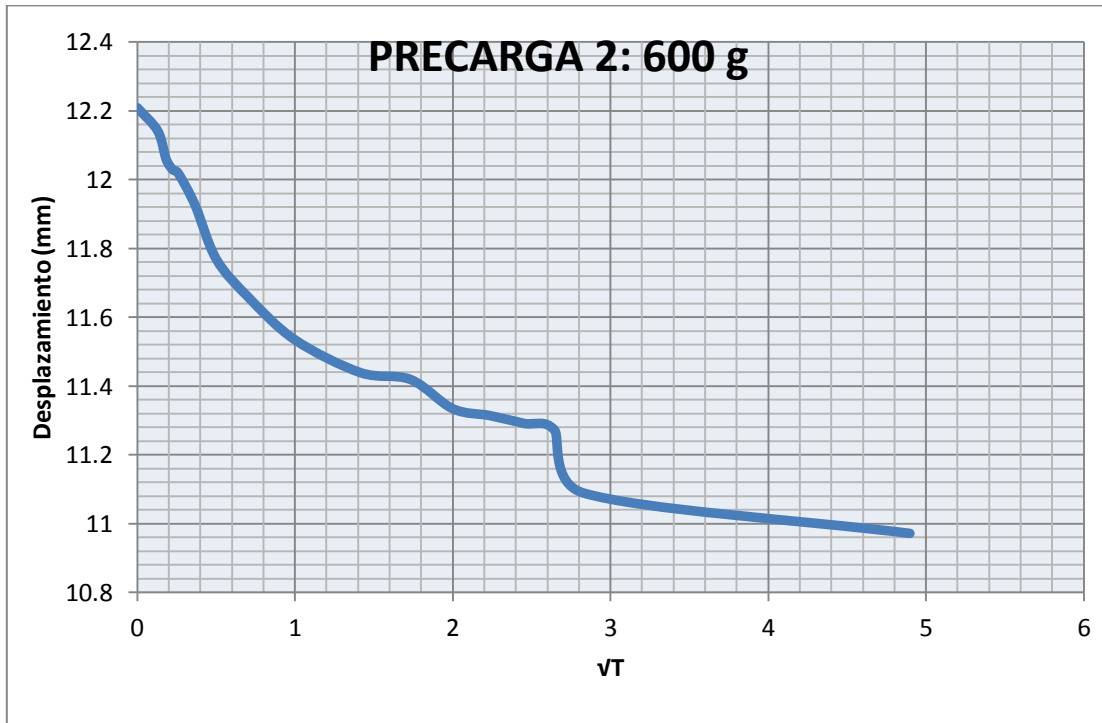


	10Y16	09:02	0.15	0.387298335	12.14	0.14	11.86
	10Y17	09:05	0.2	0.447213595	12.1425	0.1425	11.8575
	15Y4	09:13	0.333333 333	0.577350269	12.16	0.16	11.84
	15Y5	09:28	0.5	0.707106781	12.1625	0.1625	11.8375
	15Y13	09:58	1	1	12.1825	0.1825	11.8175
	20Y1	10:28	1.5	1.224744871	12.2025	0.2025	11.7975
	20Y2	10:58	2	1.414213562	12.205	0.205	11.795
	20Y2	11:28	2.5	1.58113883	12.205	0.205	11.795
	20Y2	11:58	3	1.732050808	12.205	0.205	11.795
	20Y2	12:28	3.5	1.870828693	12.205	0.205	11.795
	20Y2	12:58	4	2	<b>12.205</b>	0.205	11.795
	20Y3	13:28	4.5	2.121320344	<b>12.2075</b>	0.2075	11.7925
	20Y3	13:58	5	2.236067977	12.2075	0.2075	11.7925
13	20Y4	08:53	24	4.898979486	12.21	0.21	11.79



PRECARGA 2: 600 g (12/11/2011)							
VUEL TAS	DIVISIO NES	Hora	Tiempo (Horas)	vT	VARIACIÓN ALTURA (mm)	DIFERENCIA DE ALTURA (mm)	DESPLAZAMIENTO (mm)
13	20y4	09:10	0	0	12.21	0	12.21
	25y11	09:11	0.01666666 7	0.129099445	12.2775	0.0675	12.1425
	35y4	09:12	0.03333333 3	0.182574186	12.36	0.15	12.06
	35y16	09:13	0.05	0.223606798	12.39	0.18	12.03
	40	09:14	0.06666666 7	0.25819889	12.4	0.19	12.02
	45y17	09:18	0.13333333 3	0.365148372	12.4925	0.2825	11.9275
14	15	09:25	0.25	0.5	12.65	0.44	11.77
	25 y 5	09:40	0.5	0.707106781	12.7625	0.5525	11.6575
	35 y 14	10:10	1	1	12.885	0.675	11.535
	45 y 12	11:10	2	1.414213562	12.98	0.77	11.44
15	0	12:10	3	1.732050808	13	0.79	11.42
	5y14	13:10	4	2	13.085	0.875	11.335
	10y2	14:10	5	2.236067977	13.105	0.895	11.315
	10y11	15:10	6	2.449489743	13.1275	0.9175	11.2925
	10y19	16:10	7	2.645751311	13.1475	0.9375	11.2725
	30Y12	17:10	8	2.828427125	13.33	1.12	11.09
	40Y19	8:30:00.	24	4.898979486	13.4475	1.2375	10.9725

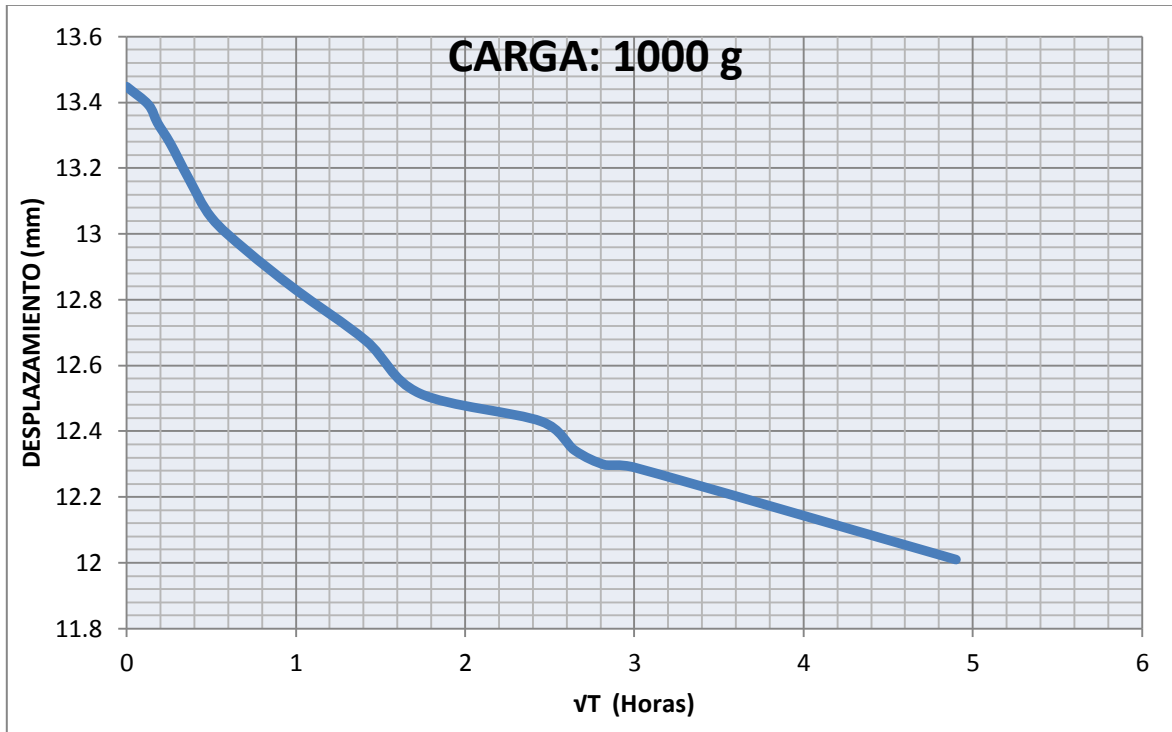




CARGA: 1000 g (15/11/2011)							
VUELTAS	DIVISIONES	Hora	Tiempo (Horas)	vT	VARIACIÓN ALTURA (mm)	DIFERENCIA DE ALTURA (mm)	DESPLAZAMIENTO (mm)
15	40Y19	8:30:00.	0	0	13.4475	0	13.4475
16	0Y1	8:31:00.	0.016666667	0.129099445	13.5025	0.055	13.3925
	5Y3	8:32:00.	0.033333333	0.182574186	13.5575	0.11	13.3375
	10Y8	8:34:00.	0.066666667	0.25819889	13.62	0.1725	13.275
	20Y10	8:38:00.	0.133333333	0.365148372	13.725	0.2775	13.17
	30Y18	8:45:00.	0.25	0.5	13.845	0.3975	13.05
	40Y18	9:00:00.	0.5	0.707106781	13.945	0.4975	12.95
17	5Y6	9:30:00.	1	1	14.065	0.6175	12.83
	20Y8	10:30:00	2	1.414213562	14.22	0.7725	12.675
	35Y12	11:30:00	3	1.732050808	14.38	0.9325	12.515
18	45Y6	2:30:00.	6	2.449489743	14.465	1.0175	12.43



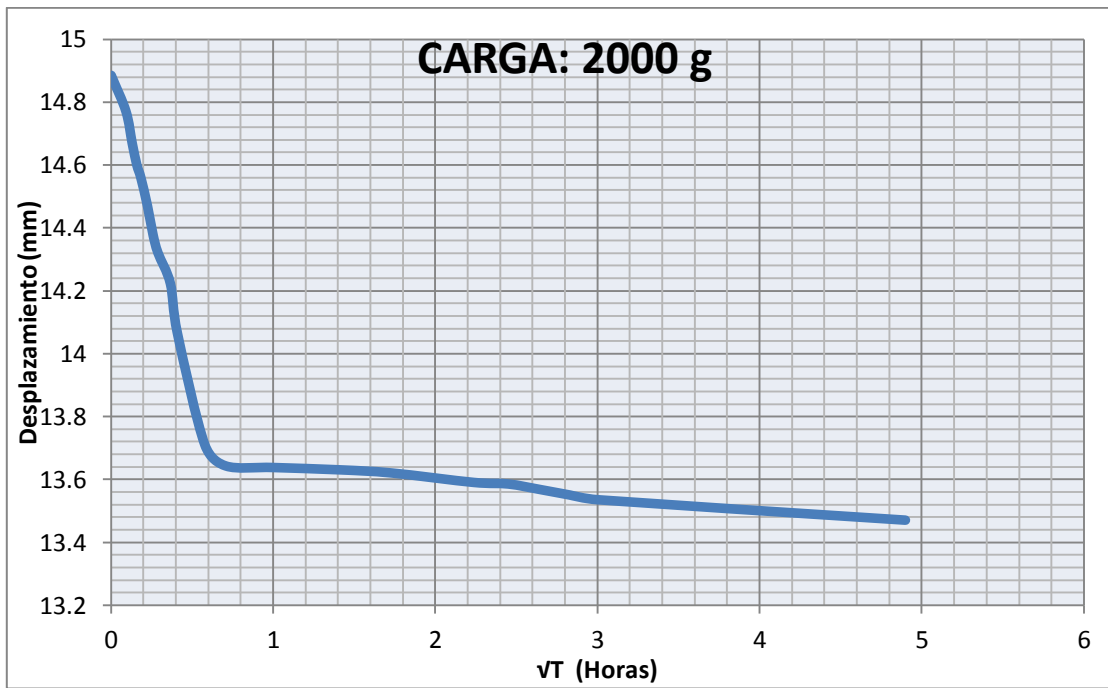
	5Y1	3:30:00.	7	2.645751311	14.5525	1.105	12.3425
	5Y19	4:30:00.	8	2.828427125	14.5975	1.15	12.2975
	10Y2	5:30:00.	9	3	14.605	1.1575	12.29
	35Y14	8:30:00.	24	4.898979486	14.885	1.4375	12.01



CARGA: 2000 g (16/11/2011)							
VUELTAS	DIVISIONES	Hora	Tiempo (Horas)	vt	VARIACIÓN ALTA (mm)	DIFERENCIA DE ALTA (mm)	DESPLAZAMIENTO (mm)
18	35y14	8:30:00.	0	0	14.885	0	14.885
19	0	8:30:30.	0.008333333	0.091287093	15	0.115	14.77
	10y0	8:31:00.	0.016666667	0.129099445	15.1	0.215	14.67
	15y8	8:31:30.	0.025	0.158113883	15.17	0.285	14.6
	20y4	8:32:00.	0.033333333	0.182574186	15.21	0.325	14.56
	30y0	8:33:00.	0.05	0.223606798	15.3	0.415	14.47
	35y17	8:34:00.	0.066666667	0.25819889	15.3925	0.5075	14.3775
	45y0	8:35:00.	0.083333333	0.288675135	15.45	0.565	14.32
0	19.5	8:38:00.	0.133333333	0.365148372	15.5475	0.6625	14.2225



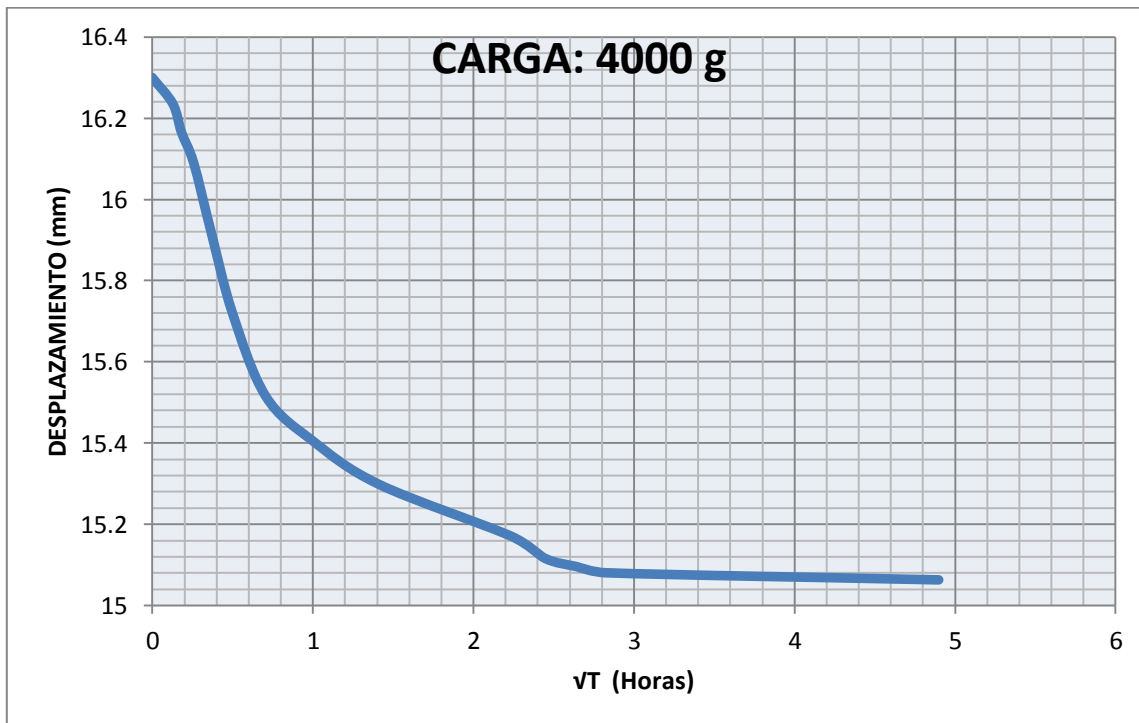
	20y22	8:40:00.	0.166666667	0.40824829	15.705	0.82	14.065
1	5y4	8:50:00.	0.333333333	0.577350269	16.06	1.175	13.71
	10y11	9:00:00.	0.5	0.707106781	16.1275	1.2425	13.6425
	10Y13	9:30:00.	1	1	16.1325	1.2475	13.6375
	10Y16	10:30:00	2	1.414213562	16.14	1.255	13.63
	10Y20	11:30:00	3	1.732050808	16.15	1.265	13.62
	15y12	2:00:00.	5	2.236067977	16.18	1.295	13.59
	15y14	2:30:00.	6	2.449489743	16.185	1.3	13.585
	20y1	3:30:00.	7	2.645751311	16.2025	1.3175	13.5675
	20Y8	04:30:00	8	2.828427125	16.22	1.335	13.55
	20Y14	05:30:00	9	3	16.235	1.35	13.535
2	30y0	09:05:00	24	4.898979486	16.3	1.415	13.47



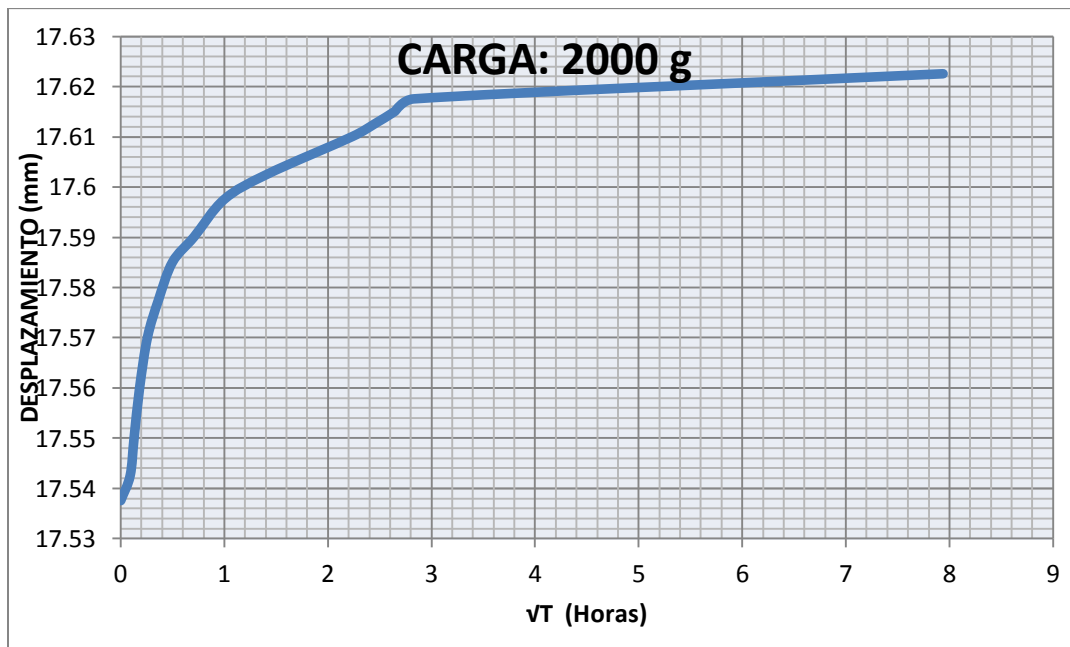
<b>CARGA: 4000 g (17/11/2011)</b>							
VUEL TAS	DIVISIO NES	Hora	Tiempo (Horas)	vT	VARIACIÓ N ALTURA	DIFERENC IA DE	DESPLAZAMIENTO (mm)



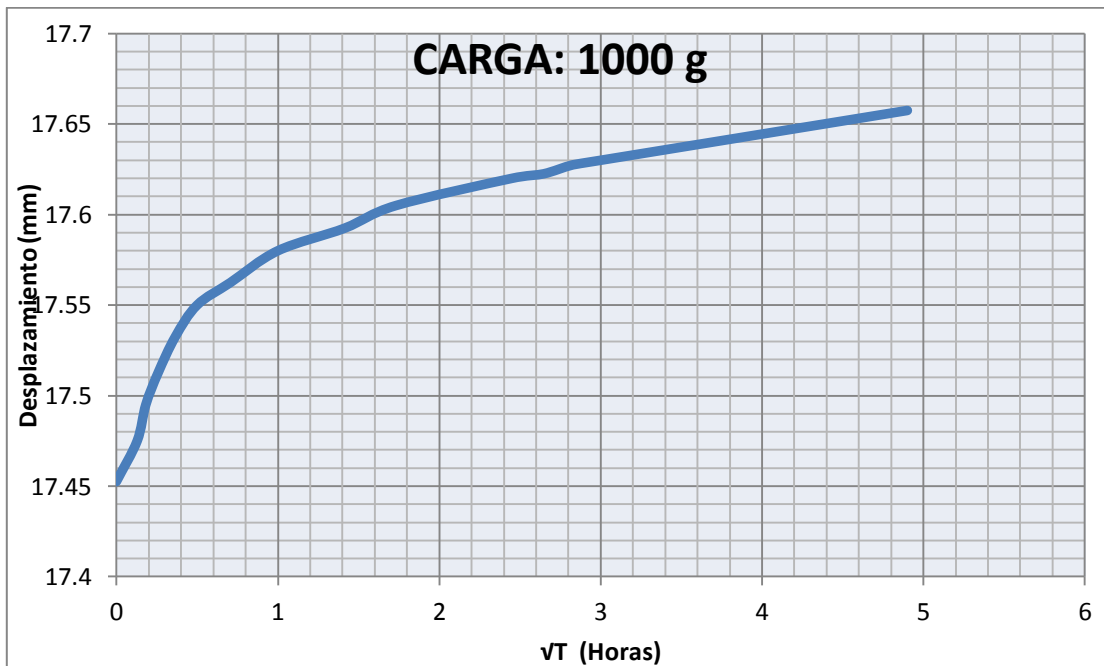
					(mm)	ALTURA (mm)	
	30y0	09:05:00	0	0	16.3	0	16.3
2	35y6	9:06:00.	0.016666667	0.129099445	16.365	0.065	16.235
	40y14	9:07:00.	0.033333333	0.182574186	16.435	0.135	16.165
3	0y4	9:09:00.	0.066666667	0.25819889	16.51	0.21	16.09
	15y11	9:13:00.	0.133333333	0.365148372	16.6775	0.3775	15.9225
	35y12	9:20:00.	0.25	0.5	16.88	0.58	15.72
4	5y14	9:35:00.	0.5	0.707106781	17.085	0.785	15.515
	15y18	10:05:00.	1	1	17.195	0.895	15.405
	30y1	11:05:00.	2	1.414213562	17.3025	1.0025	15.2975
	40y12	2:05:00.	5	2.236067977	17.43	1.13	15.17
	45y14	3:05:00.	6	2.449489743	17.485	1.185	15.115
5	0y2	4:05:00.	7	2.645751311	17.505	1.205	15.095
	0y8	5:05:00.	8	2.828427125	17.52	1.22	15.08
	0y15	9:06:00.	24	4.898979486	17.5375	1.2375	15.0625



CARGA: 2000 g (18/11/2011)							
VUELTAS	DIVISIONES	Hora	Tiempo (Horas)	√T	VARIACIÓN ALTURA (mm)	DIFERENCIA DE ALTURA (mm)	DESPLAZAMIENTO (mm)
	0y15	9:06:00.	0	0	17.5375	0	17.5375
5	0y13	9:06:30.	0.008333333	0.091287093	17.5325	-0.005	17.5425
	0y10	09:07	0.016666667	0.129099445	17.525	-0.0125	17.55
	0y6	9:08:00.	0.033333333	0.182574186	17.515	-0.0225	17.56
	0y2	9:10:00.	0.066666667	0.25819889	17.505	-0.0325	17.57
4	45y19	9:14:00.	0.133333333	0.365148372	17.4975	-0.04	17.5775
	45y16	9:21:00.	0.25	0.5	17.49	-0.0475	17.585
	45y14	9:36:00.	0.5	0.707106781	17.485	-0.0525	17.59
	45y11	10:06:00	1	1	17.4775	-0.06	17.5975
	45y9	11:06:00	2	1.414213562	17.4725	-0.065	17.6025
	45y6	2:06:00.	5	2.236067977	17.465	-0.0725	17.61
	45y5	3:06:00.	6	2.449489743	17.4625	-0.075	17.6125
	45y4	4:06:00.	7	2.645751311	17.46	-0.0775	17.615
	45y3	5:06:00.	8	2.828427125	17.4575	-0.08	17.6175
	45y1	8:30:00.	63	7.937253933	17.4525	-0.085	17.6225

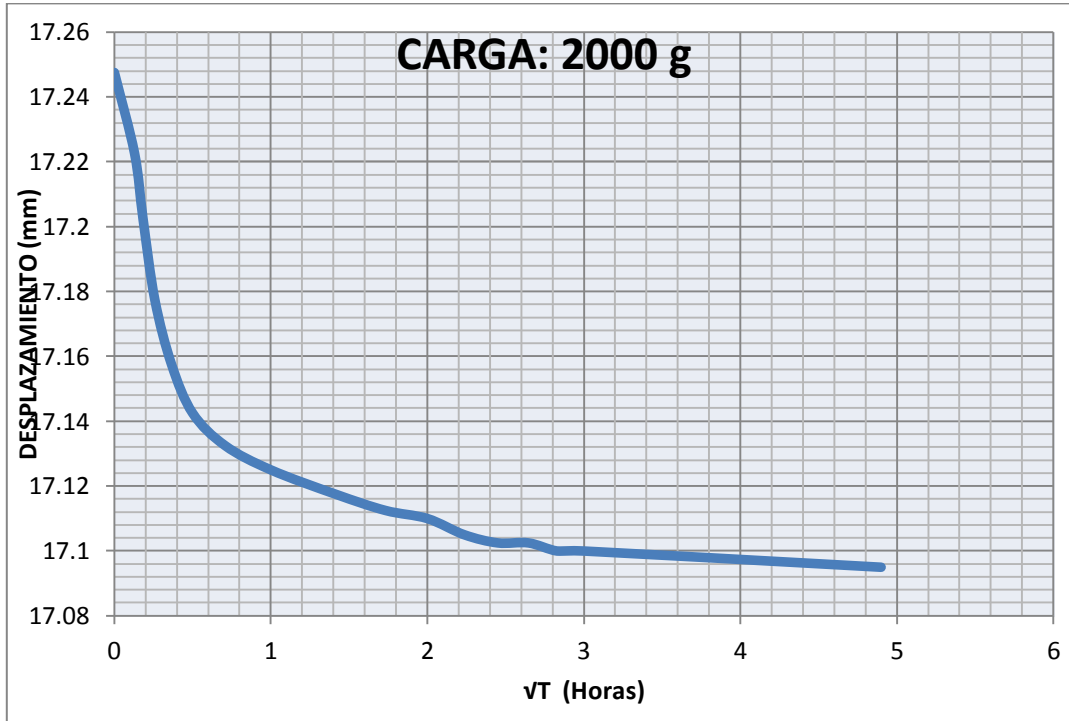


CARGA: 1000 g (21/11/2011)							
VUELTAS	DIVISIONES	Hora	Tiempo (Horas)	vT	VARIACIÓN ALTURA (mm)	DIFERENCIA DE ALTURA (mm)	DESPLAZAMIENTO (mm)
	45y1	8:30:00.	0	0	17.4525	0	17.4525
4	40y12	8:31:00.	0.016666667	0.129099445	17.43	-0.0225	17.475
	40y4	8:32:00.	0.033333333	0.182574186	17.41	-0.0425	17.495
	35y17	8:34:00.	0.066666667	0.25819889	17.3925	-0.06	17.5125
	35y9	8:38:00.	0.133333333	0.365148372	17.3725	-0.08	17.5325
	35y2	8:45:00.	0.25	0.5	17.355	-0.0975	17.55
	30y17	9:00:00.	0.5	0.707106781	17.3425	-0.11	17.5625
	30y10	9:30:00.	1	1	17.325	-0.1275	17.58
	30y5	10:30:00 .	2	1.414213562	17.3125	-0.14	17.5925
	30y0	11:30:00 .	3	1.732050808	17.3	-0.1525	17.605
	25y14	2:30:00.	6	2.449489743	17.285	-0.1675	17.62
	25y13	3:30:00.	7	2.645751311	17.2825	-0.17	17.6225
	25y11	4:30:00.	8	2.828427125	17.2775	-0.175	17.6275
	25y10	5:30:00.	9	3	17.275	-0.1775	17.63
	20y19	8:30:00.	24	4.898979486	17.2475	-0.205	17.6575



CARGA: 2000 g (22/11/2011)							
VUELTAS	DIVISIONES	Hora	Tiempo (Horas)	VT	VARIACIÓN ALTURA (mm)	DIFERENCIA DE ALTURA (mm)	DESPLAZAMIENTO (mm)
	20y19	8:30:00.	0	0	<b>17.2475</b>	0	17.2475
4	25y9	8:31:00.	0.016666667	0.129099445	17.2725	0.025	17.2225
	25y17	8:32:00.	0.033333333	0.182574186	17.2925	0.045	17.2025
	30y7	8:34:00.	0.066666667	0.25819889	17.3175	0.07	17.1775
	30y15	8:38:00.	0.133333333	0.365148372	17.3375	0.09	17.1575
	35y1	8:45:00.	0.25	0.5	17.3525	0.105	17.1425
	35y5	9:00:00.	0.5	0.707106781	17.3625	0.115	17.1325
	35Y8	9:30:00.	1	1	17.37	0.1225	17.125
	35Y11	10:30:00 .	2	1.414213562	17.3775	0.13	17.1175
	35y13	11:30:00 .	3	1.732050808	17.3825	0.135	17.1125
	35 y 14	12:30:00 .	4	2	17.385	0.1375	17.11
	35y16	1:30:00.	5	2.236067977	17.39	0.1425	17.105
	35y17	2:30:00.	6	2.449489743	17.3925	0.145	17.1025
	35Y17. 5	3:30:00.	7	2.645751311	17.3925	0.145	17.1025
	35Y18	4:30:00.	8	2.828427125	17.395	0.1475	17.1
	35y18	5:30:00.	9	3	17.395	0.1475	17.1
	40y0	8:30:00.	24	4.898979486	17.4	0.1525	17.095

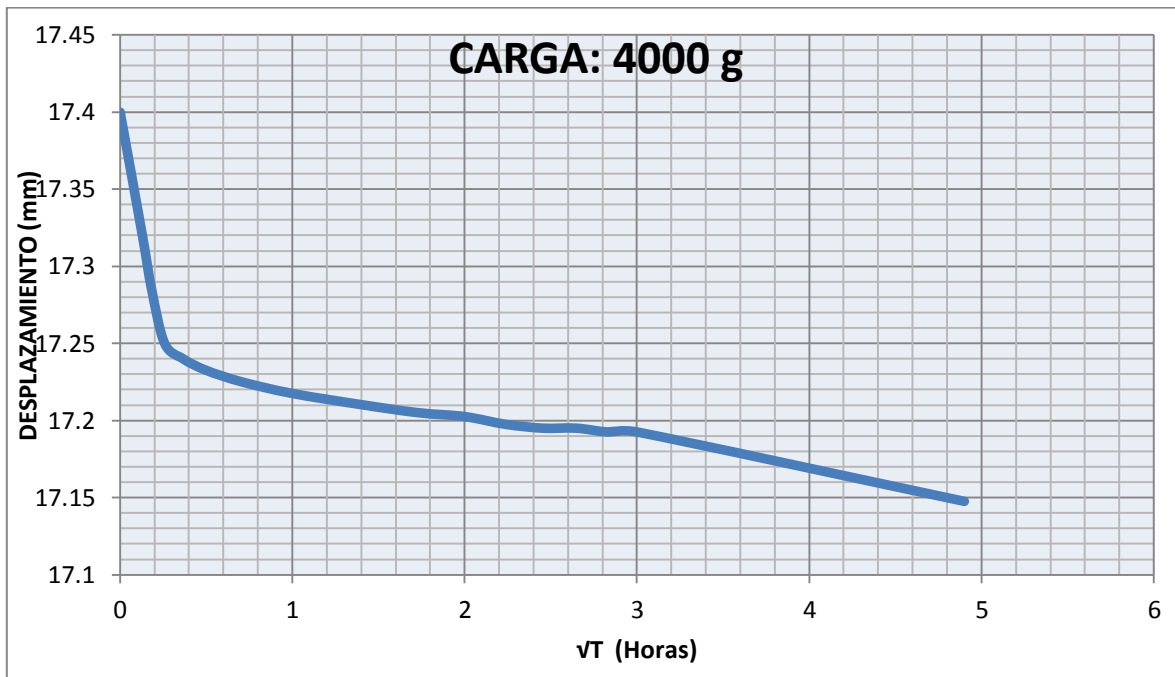




CARGA: 4000 g (23/11/2011)							
VUELTAS	DIVISIONES	Hora	Tiempo (Horas)	VT	VARIACIÓN ALTURA (mm)	DIFERENCIA DE ALTURA (mm)	DESPLAZAMIENTO (mm)
	40y0	8:30:00.	0	0	17.4	0	17.4
4	45y12	8:31:00.	0.016666667	0.129099445	<b>17.48</b>	0.08	17.32
5	0y6	8:32:00.	0.033333333	0.182574186	17.515	0.115	17.285
	5y0	8:34:00.	0.066666667	0.25819889	17.55	0.15	17.25
	5y4	8:38:00.	0.133333333	0.365148372	17.56	0.16	17.24
	5y7	8:45:00.	0.25	0.5	17.5675	0.1675	17.2325
	5y10	9:00:00.	0.5	0.707106781	17.575	0.175	17.225
	5y13	9:30:00.	1	1	17.5825	0.1825	17.2175
	5y16	10:30:00 .	2	1.414213562	17.59	0.19	17.21
	5y18	11:30:00 .	3	1.732050808	17.595	0.195	17.205
	5y19	12:30:00 .	4	2	17.5975	0.1975	17.2025



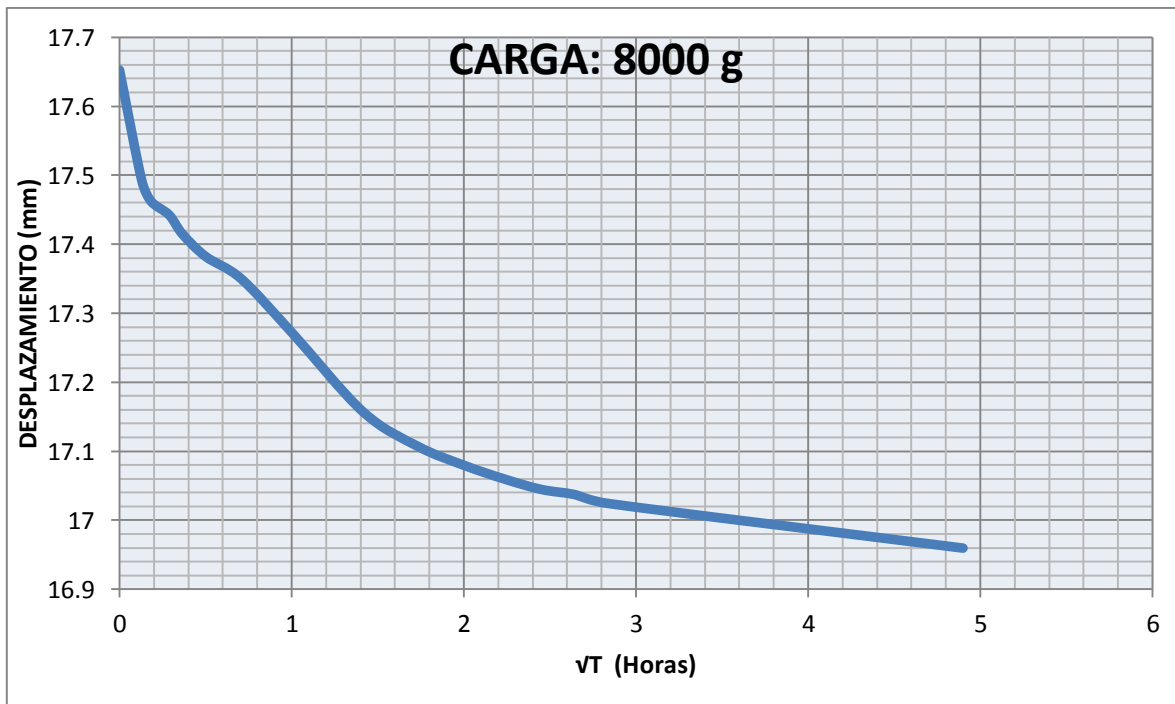
	10y1	1:30:00.	5	2.236067977	17.6025	0.2025	17.1975
	10y2	2:30:00.	6	2.449489743	17.605	0.205	17.195
	10y2	3:30:00.	7	2.645751311	17.605	0.205	17.195
	10Y3	4:30:00.	8	2.828427125	17.6075	0.2075	17.1925
	10Y3	5:30:00.	9	3	17.6075	0.2075	17.1925
	15y1	08:30:00	24	4.898979486	17.6525	0.2525	17.1475



<b>CARGA: 8000 g (24/11/2011)</b>							
VUELTAS	DIVISIONES	Hora	Tiempo (Horas)	VT	VARIACIÓN ALTURA (mm)	DIFERENCIA DE ALTURA (mm)	DESPLAZAMIENTO (mm)
	15y1	09:11:00	0	0	17.6525	0	17.6525
5	30y5	9:12:00.	0.016666667	0.129099445	17.8125	0.16	17.4925
	30y17	9:13:00.	0.033333333	0.182574186	17.8425	0.19	17.4625
	35y7	9:16:00.	0.083333333	0.288675135	17.8625	0.21	17.4425
	35y16	9:19:00.	0.133333333	0.365148372	17.89	0.2375	17.415
	40Y9	9:26:00.	0.25	0.5	17.9225	0.27	17.3825
	45Y2	9:41:00.	0.5	0.707106781	17.955	0.3025	17.35



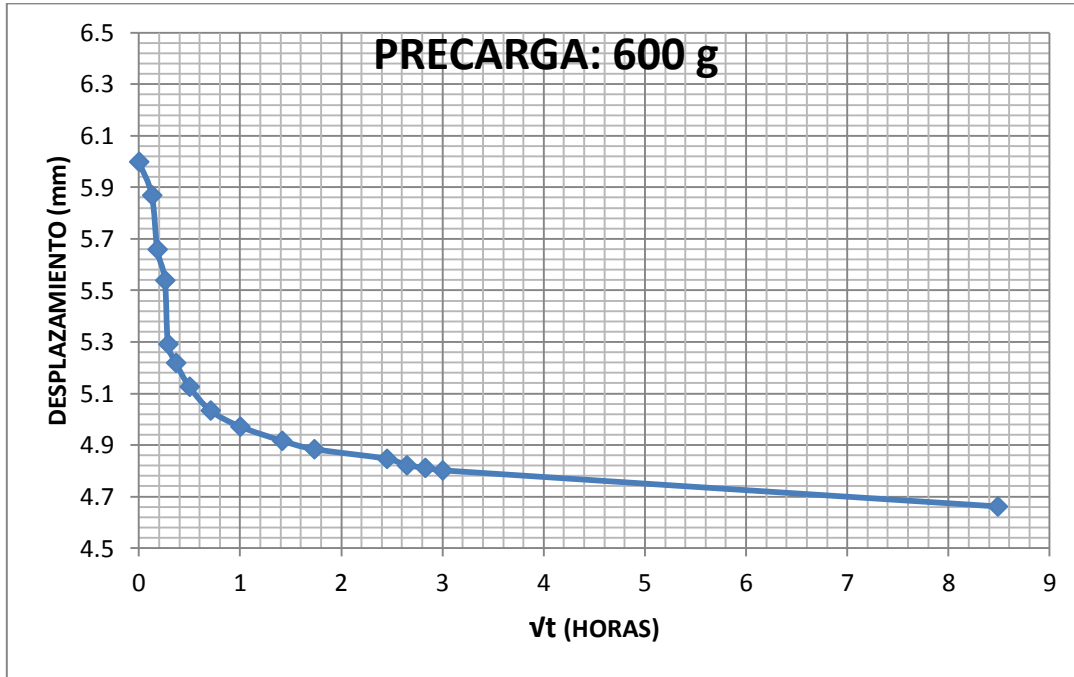
6	0y13	10:11:00	1	1	18.0325	0.38	17.2725
	10y19	11:11:00	2	1.414213562	18.1475	0.495	17.1575
	15y19	12:11:00	3	1.732050808	18.1975	0.545	17.1075
	20y10	1:11:00.	4	2	18.225	0.5725	17.08
	20y18	2:11:00.	5	2.236067977	18.245	0.5925	17.06
	25y4	3:11:00.	6	2.449489743	18.26	0.6075	17.045
	25y7	4:11:00.	7	2.645751311	18.2675	0.615	17.0375
	25y12	5:11:00.	8	2.828427125	18.28	0.6275	17.025
	30y18	9:11:00.	24	4.898979486	18.345	0.6925	16.96



### 12.3. Lecturas registradas y gráficas de desplazamiento vs. Raíz del tiempo para cada día del ensayo de Consolidación para la muestra TR2-M4G.

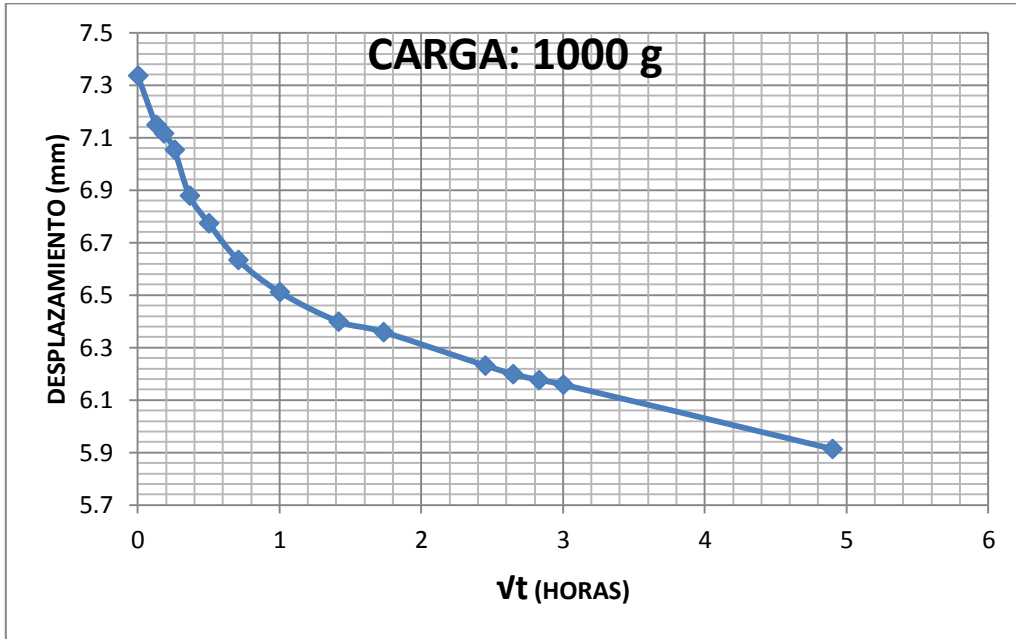
PRECARGA: 600 g (25/11/2011)							
VUELTAS	DIVISIONES	HORA	Tiempo (Horas)	$\sqrt{t}$	Variación Altura (mm)	Diferencia de altura (mm)	Desplazamiento (mm)
6	0	0:00:00.	0	0	6	0	6
	10y12	0:01:00.	0,01666	0,129073622	6,13	0,13	5,87
	30y16	0:02:00.	0,03333	0,182565057	6,34	0,34	5,66
	45y4	0:04:00.	0,06666	0,258185979	6,46	0,46	5,54
	20y4	0:05:00.	0,08333	0,288669361	6,7075	0,7075	5,2925
	25y12	0:08:00.	0,13333	0,365143807	6,78	0,78	5,22
	35y9	0:15:00.	0,25	0,5	6,8725	0,8725	5,1275
	45y6	0:30:00.	0,5	0,707106781	6,965	0,965	5,035
7	0y11	1:00:00.	1	1	7,0275	1,0275	4,9725
	5y13	2:00:00.	2	1,414213562	7,0825	1,0825	4,9175
	10y6	3:00:00.	3	1,732050808	7,115	1,115	4,885
	15y6	6:00:00.	6	2,449489743	03:39	1,1525	4,8475
	15y11	7:00:00.	7	2,645751311	7,1775	1,1775	4,8225
	15y15	8:00:00.	8	2,828427125	7,1875	1,1875	4,8125
	15y19	9:00:00.	9	3	7,1975	1,1975	4,8025
	30y15	72:00:00.	72	8,485281374	7,3375	1,3375	4,6625





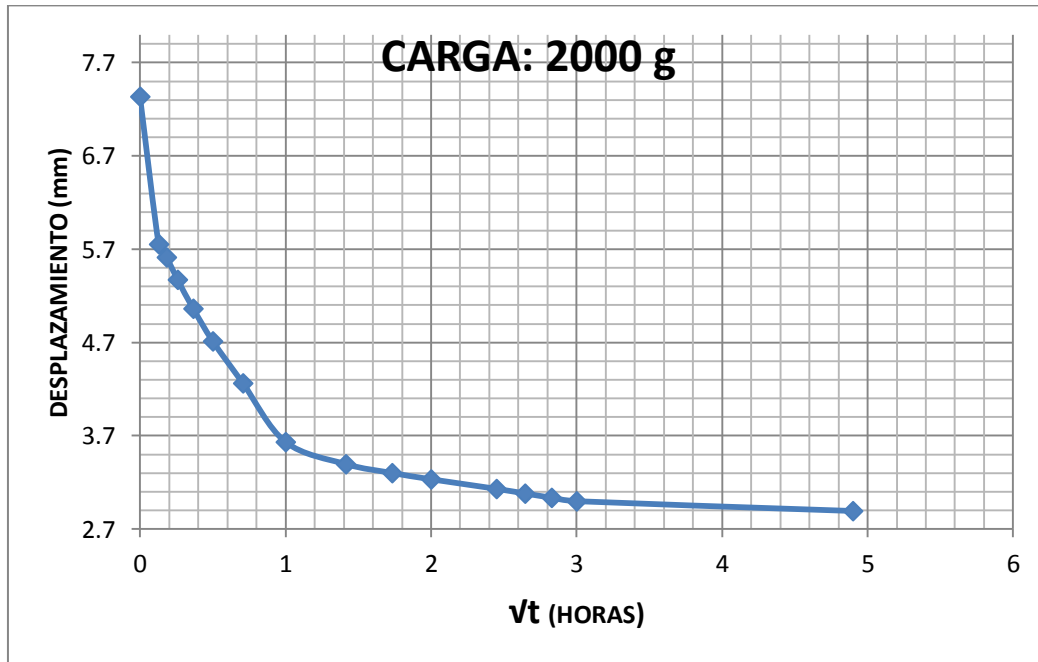
CARGA: 1000 g (28/11/2011)							
VUEL TAS	DIVISIO NES	Hora	Tiempo (Horas)	$\sqrt{t}$	Variación Altura (mm)	Diferencia de altura (mm)	Desplazamiento (mm)
7	30y15	00:00:00	0	0	7,3375	0	7,3375
	0y1	0:01:00.	0,01666	0,129073622	7,525	0,1875	7,15
	5y3	0:02:00.	0,03333	0,182565057	7,5575	0,22	7,1175
	10y8	0:04:00.	0,06666	0,258185979	7,62	0,2825	7,055
	25y18	0:08:00.	0,13333	0,365143807	7,795	0,4575	6,88
	40y0	0:15:00.	0,25	0,5	7,9	0,5625	6,775
8	0y16	0:30:00.	0,5	0,707106781	8,04	0,7025	6,635
	15y5	1:00:00.	1	1	8,1625	0,825	6,5125
	25y10	2:00:00.	2	1,414213562	8,275	0,9375	6,4
	30y6	3:00:00.	3	1,732050808	8,315	0,9775	6,36
	40y17	2:30:00.	6	2,449489743	10:37	1,105	6,2325
	45y10	3:30:00.	7	2,645751311	8,475	1,1375	6,2
	45y19	4:30:00.	8	2,828427125	8,4975	1,16	6,1775
	0y6	5:30:00.	9	3	8,515	1,1775	6,16





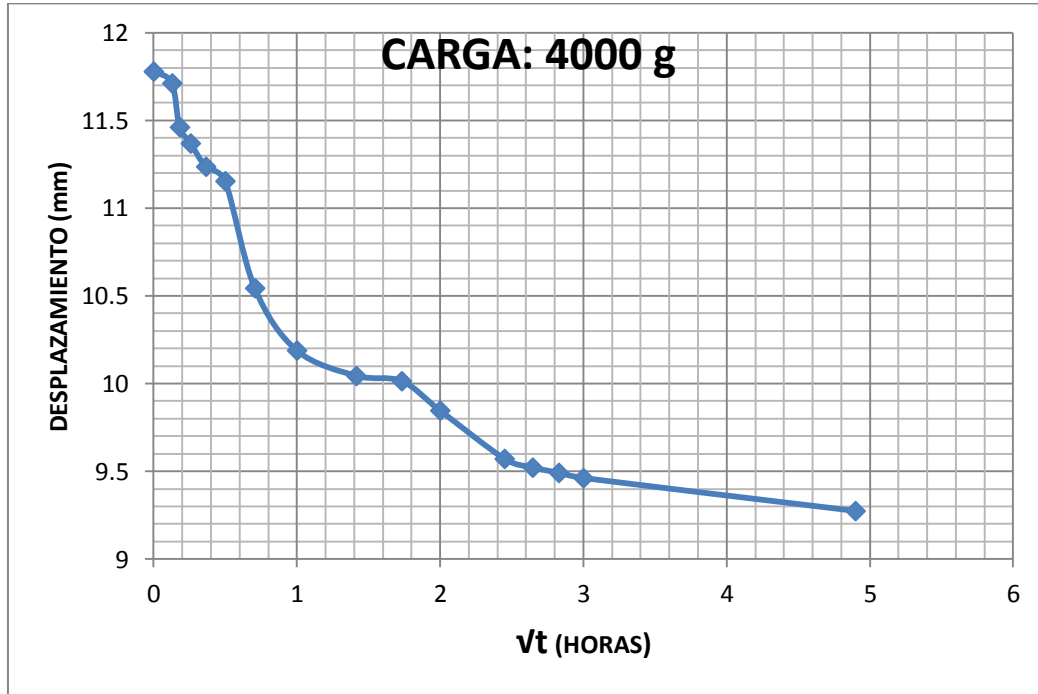
CARGA: 2000 g (29/11/2011)							
VUELTAS	DIVISIONES	Hora	Tiempo (min)	vt	Variación Altura (mm)	Diferencia de altura (mm)	Desplazamiento (mm)
7	25y4	0:00:00.	0	0	7,3375	0	7,3375
8	40y8	0:01:00.	0,01666	0,129073622	8,92	1,5825	5,755
9	5y4	0:02:00.	0,03333	0,182565057	9,06	1,7225	5,615
	30y0	0:04:00.	0,06666	0,258185979	9,3	1,9625	5,375
	10y4	0:08:00.	0,13333	0,365143807	9,61	2,2725	5,065
	45y4	0:15:00.	0,25	0,5	9,96	2,6225	4,715
10	40y4	0:30:00.	0,5	0,707106781	10,41	3,0725	4,265
11	0y16	1:00:00.	1	1	11,04	3,7025	3,635
	25y6	2:00:00.	2	1,414213562	11,2775	3,94	3,3975
	35y9	3:00:00.	3	1,732050808	11,3725	4,035	3,3025
	40y16	4:00:00.	4	2	11,44	4,1025	3,235
	0y17	6:00:00.	6	2,449489743	11,5425	4,205	3,1325
	5y17	7:00:00.	7	2,645751311	11,5925	4,255	3,0825
	10y15	8:00:00.	8	2,828427125	11,6375	4,3	3,0375
	15y10	9:00:00.	9	3	11,675	4,3375	3
	25Y12	24:00:00.	24	4,898979486	11,78	4,4425	2,895





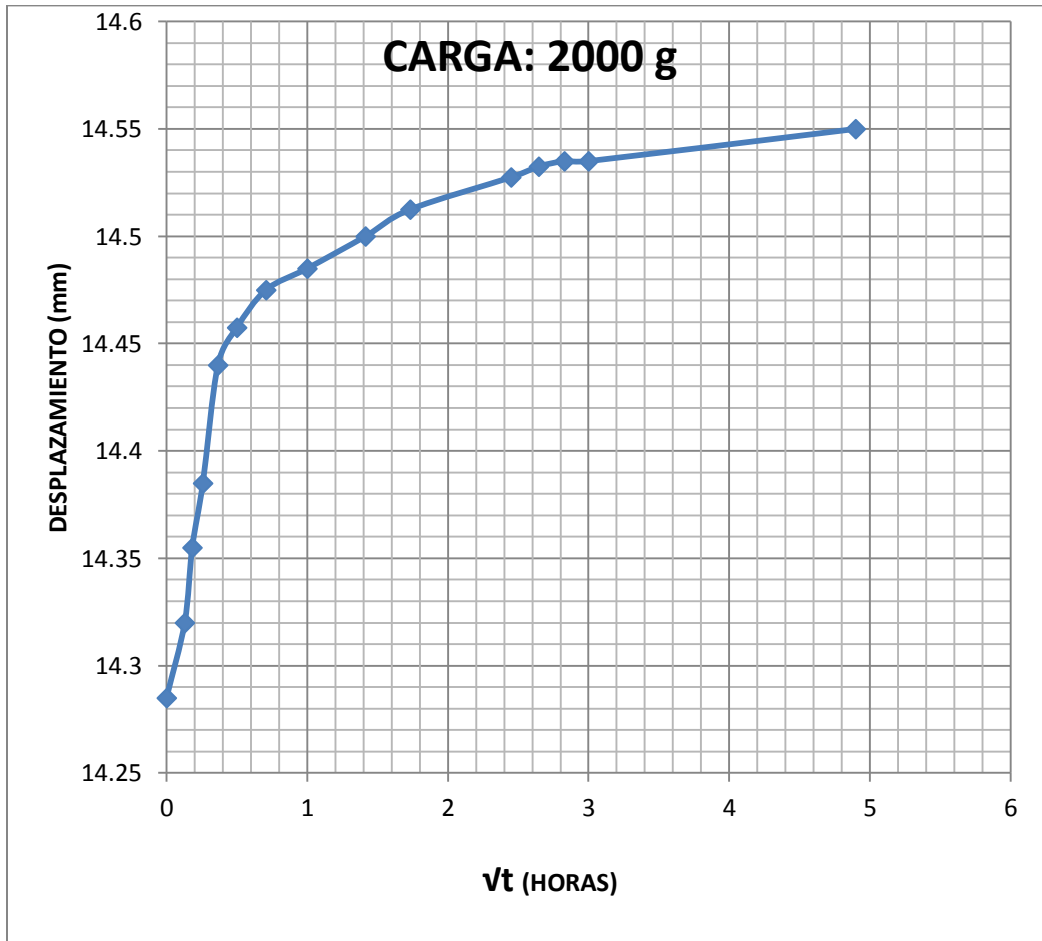
CARGA: 4000 g (30/11/2011)							
VUELTAS	DIVISIONES	Hora	Tiempo (Horas)	$\sqrt{t}$	Variación Altura (mm)	Diferencia de altura (mm)	Desplazamiento (mm)
11	25Y12	0:00:00.	0	0	11,78	0	11,78
	30y19	0:01:00.	0,01666	0,129073622	11,8475	0,0675	11,7125
12	5y19	0:02:00.	0,03333	0,182565057	12,0975	0,3175	11,4625
	15y16	0:04:00.	0,06666	0,258185979	12,19	0,41	11,37
	30y9	0:08:00.	0,13333	0,365143807	12,3225	0,5425	11,2375
	40y2	0:15:00.	0,25	0,5	12,405	0,625	11,155
13	0y6	0:30:00.	0,5	0,707106781	13,015	1,235	10,545
	35y8	1:00:00.	1	1	13,37	1,59	10,19
	0y6	2:00:00.	2	1,414213562	13,515	1,735	10,045
	0y18	3:00:00.	3	1,732050808	13,545	1,765	10,015
	20y5	4:00:00.	4	2	13,7125	1,9325	9,8475
	45y15	6:00:00.	6	2,449489743	13,9875	2,2075	9,5725
14	0y15	7:00:00.	7	2,645751311	14,0375	2,2575	9,5225
	5y7	8:00:00.	8	2,828427125	14,0675	2,2875	9,4925
	5y19	9:00:00.	9	3	14,0975	2,3175	9,4625
	25y14	24:00:00.	24	4,898979486	14,285	2,505	9,275





CARGA: 2000 g (01/12/2011)							
VUELTAS	DIVISIONES	Hora	Tiempo (Horas)	vt	Variación Altura (mm)	Diferencia de altura (mm)	Desplazamiento (mm)
14	25Y14	0:00:00.	0	0	14,285	0	14,285
	25y0	0:01:00.	0,01666	0,129073622	14,25	-0,035	14,32
	20y6	0:02:00.	0,03333	0,182565057	14,215	-0,07	14,355
	15y14	0:04:00.	0,06666	0,258185979	14,185	-0,1	14,385
	10y12	0:08:00.	0,13333	0,365143807	14,13	-0,155	14,44
	10y5	0:15:00.	0,25	0,5	14,1125	-0,1725	14,4575
	5y18	0:30:00.	0,5	0,707106781	14	-0,19	14,475
	5y14	1:00:00.	1	1	14,085	-0,2	14,485
	5y8	2:00:00.	2	1,414213562	14,07	-0,215	14,5
	5y3	3:00:00.	3	1,732050808	14,0575	-0,2275	14,5125
	0y17	6:00:00.	6	2,449489743	14,0425	-0,2425	14,5275
	0y15	7:00:00.	7	2,645751311	14,0375	-0,2475	14,5325
	0y14	8:00:00.	8	2,828427125	14,035	-0,25	14,535
	0y14	9:00:00.	9	3	14,035	-0,25	14,535
	0y8	24:00:00.	24	4,898979486	14,02	-0,265	14,55

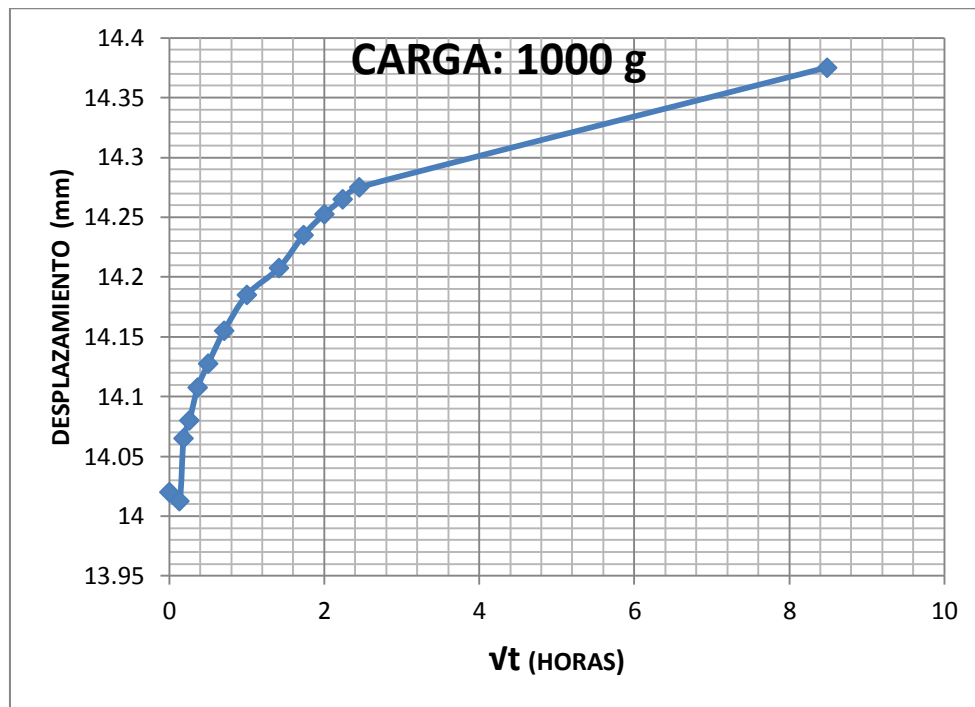




CARGA: 1000 g (02/12/2011)							
VUELTAS	DIVISIONES	Hora	Tiempo (Horas)	vt	Variación Altura (mm)	Diferencia de altura (mm)	Desplazamiento (mm)
14	0y8	0:01:00.	0	0	14,02	0	14,02
	0y11	0:01:00.	0,01666	0,129073622	14,0275	0,0075	14,0125
13	45y10	0:02:00.	0,03333	0,182565057	13,975	-0,045	14,065
	45y4	0:04:00.	0,06666	0,258185979	13,96	-0,06	14,08
	40y13	0:08:00.	0,13333	0,365143807	13,9325	-0,0875	14,1075
	40y5	0:15:00.	0,25	0,5	13,9125	-0,1075	14,1275
	35y14	0:30:00.	0,5	0,707106781	13,885	-0,135	14,155
	35y2	1:00:00.	1	1	13,855	-0,165	14,185



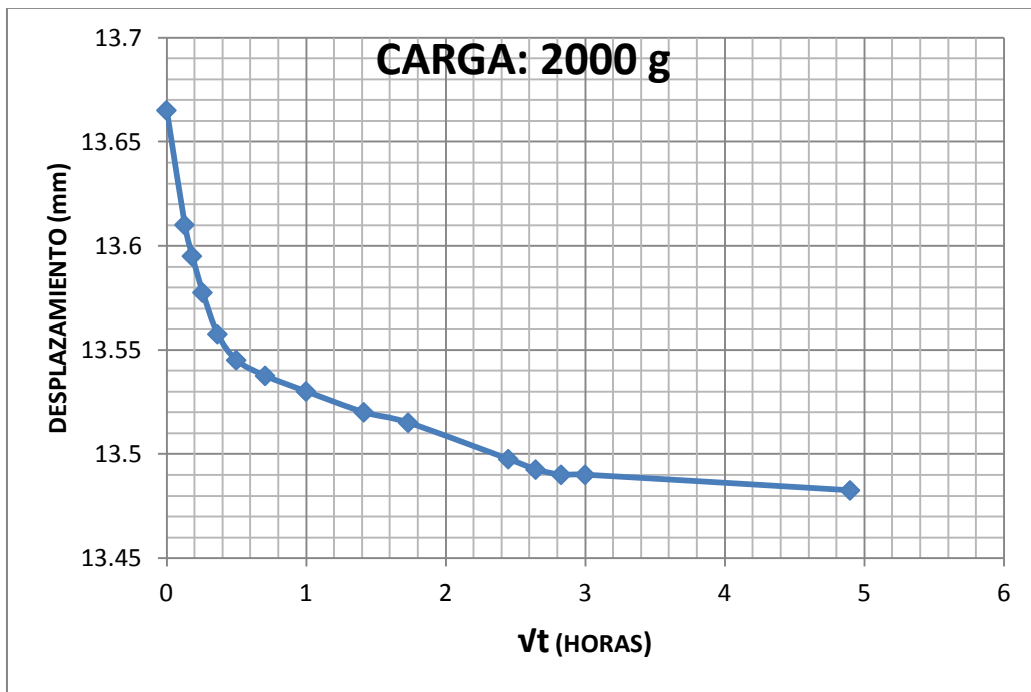
30y13	2:00:00.	2	1,414213562	13,8325	-0,1875	14,2075
30y2	3:00:00.	3	1,732050808	13,805	-0,215	14,235
25y15	4:00:00.	4	2	13,7875	-0,2325	14,2525
25y10	5:00:00.	5	2,236067977	13,775	-0,245	14,265
25y6	6:00:00.	6	2,449489743	13,765	-0,255	14,275
15y6	72:00:00.	72	8,485281374	13,665	-0,355	14,375



CARGA: 2000 g (05/12/2011)							
VUeltas	DIVISIONES	Hora	Tiempo (Horas)	$\sqrt{t}$	Variación Altura (mm)	Diferencia de altura (mm)	Desplazamiento (mm)
13	15Y6	0:00:00.	0	0	13,665	0	13,665
	20y8	0:01:00.	0,01666	0,129073622	13,72	0,055	13,61
	20y14	0:02:00.	0,03333	0,182565057	13,735	0,07	13,595
	25y1	0:04:00.	0,06666	0,258185979	13,7525	0,0875	13,5775



25y9	0:08:00.	0,13333	0,365143807	13,7725	0,1075	13,5575
25y14	0:15:00.	0,25	0,5	13,785	0,12	13,545
25y17	0:30:00.	0,5	0,707106781	13,7925	0,1275	13,5375
30y0	1:00:00.	1	1	13,8	0,135	13,53
30y4	2:00:00.	2	1,414213562	13,81	0,145	13,52
30y6	3:00:00.	3	1,732050808	13,815	0,15	13,515
30y13	6:00:00.	6	2,449489743	13,8325	0,1675	13,4975
30y15	7:00:00.	7	2,645751311	13,8375	0,1725	13,4925
30y16	8:00:00.	8	2,828427125	13,84	0,175	13,49
30y16	9:00:00.	9	3	13,84	0,175	13,49
30y19	24:00:00.	24	4,898979486	13,8475	0,1825	13,4825

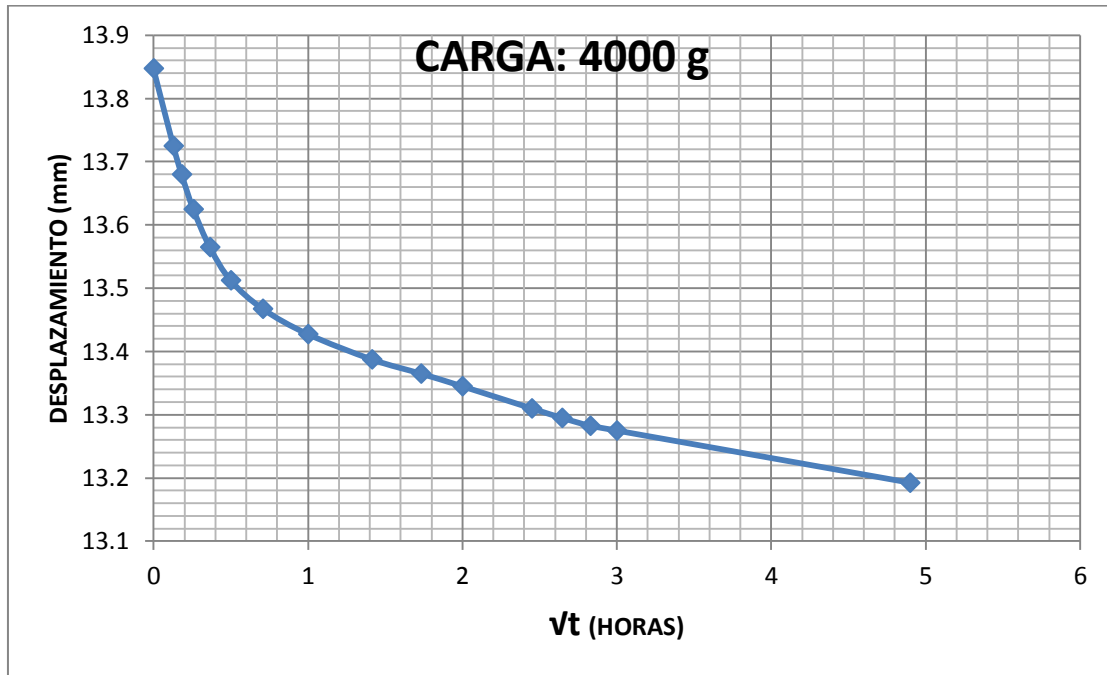


**CARGA: 4000 g (06/12/2011)**

VUeltas	DIVISIONES	Hora	Tiempo (Horas)	$\sqrt{t}$	Variación Altura (mm)	Diferencia de altura (mm)	Desplazamiento (mm)
13	30Y19	0:01:00.	0	0	13,8475	0	13,8475
	45y8	0:01:00.	0,01666	0,129073622	13,97	0,1225	13,725
14	0y6	0:02:00.	0,03333	0,182565057	14,015	0,1675	13,68



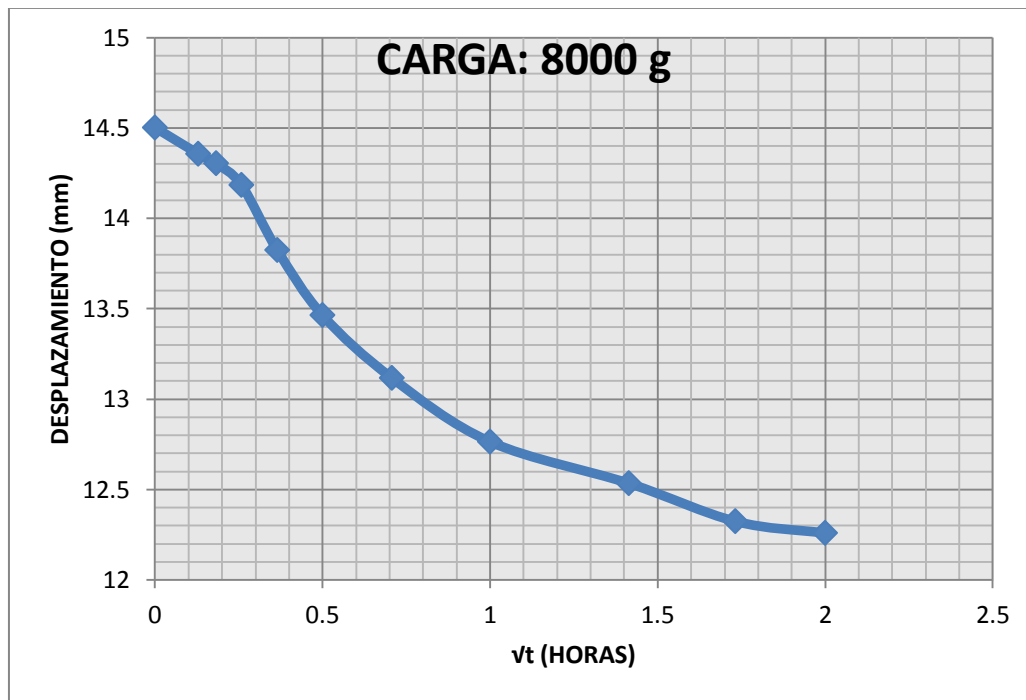
5y8	0:04:00.	0,06666	0,258185979	14,07	0,2225	13,625
10y12	0:08:00.	0,13333	0,365143807	14,13	0,2825	13,565
15y13	0:15:00.	0,25	0,5	14,1825	0,335	13,5125
20y11	0:30:00.	0,5	0,707106781	14,2275	0,38	13,4675
25y7	1:00:00.	1	1	14,2675	0,42	13,4275
30y3	2:00:00.	2	1,414213562	14,3075	0,46	13,3875
30y12	3:00:00.	3	1,732050808	14,33	0,4825	13,365
35Y0	4:00:00.	4	2	14,35	0,5025	13,345
35y14	6:00:00.	6	2,449489743	14,385	0,5375	13,31
40y0	7:00:00.	7	2,645751311	14,4	0,5525	13,295
40y5	8:00:00.	8	2,828427125	14,4125	0,565	13,2825
40y8	9:00:00.	9	3	14,42	0,5725	13,275
0y1	24:00:00.	24	4,898979486	14,5025	0,655	13,1925



CARGA: 8000 g (07/12/2012)							
VUeltas	DIVISIONES	Hora	Tiempo (min)	$\sqrt{t}$	Variación Altura (mm)	Diferencia de altura (mm)	Desplazamiento (mm)



14	0Y1	0:00:00.	0	0	14,5025	0	14,5025
	10y19	0:01:00.	0,01666	0,129073622	14,6475	0,145	14,3575
	20y0	0:02:00.	0,03333	0,182565057	14,7	0,1975	14,305
	30y8	0:04:00.	0,06666	0,258185979	14,82	0,3175	14,185
15	15y12	0:08:00.	0,13333	0,365143807	15,18	0,6775	13,825
	0y16	0:15:00.	0,25	0,5	15,54	1,0375	13,465
	35y15	0:30:00.	0,5	0,707106781	15,8875	1,385	13,1175
16	20y16	1:00:00.	1	1	16,24	1,7375	12,765
	45y8	2:00:00.	2	1,414213562	16,47	1,9675	12,535
	15y12	3:00:00.	3	1,732050808	16,68	2,1775	12,325
	20y18	4:00:00.	4	2	16,745	2,2425	12,26



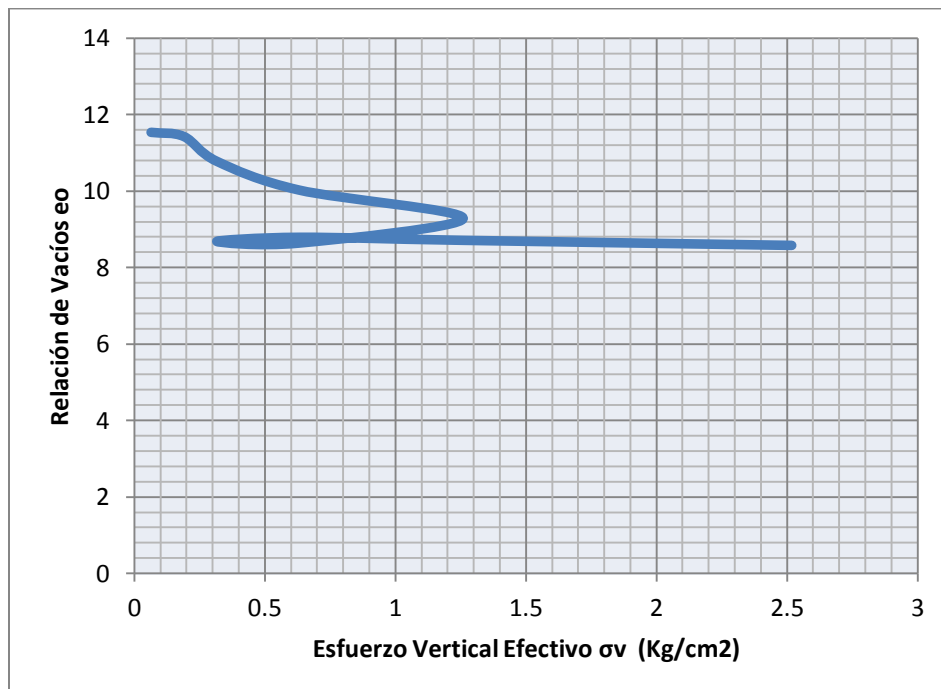
Díade ensayo	Carga (Kg)	h0 (mm)	Δh (mm)	hfo (mm)	$\sigma_v$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Oquedad (e <sub>0</sub> )
Precarga 0	0,6	24	1,3375	22,6625	0,188799862	1,031754881
1	1	22,6625	1,4425	21,22	0,314666437	0,918526875
2	2	21,24	4,4425	16,7975	0,629332874	0,79810307



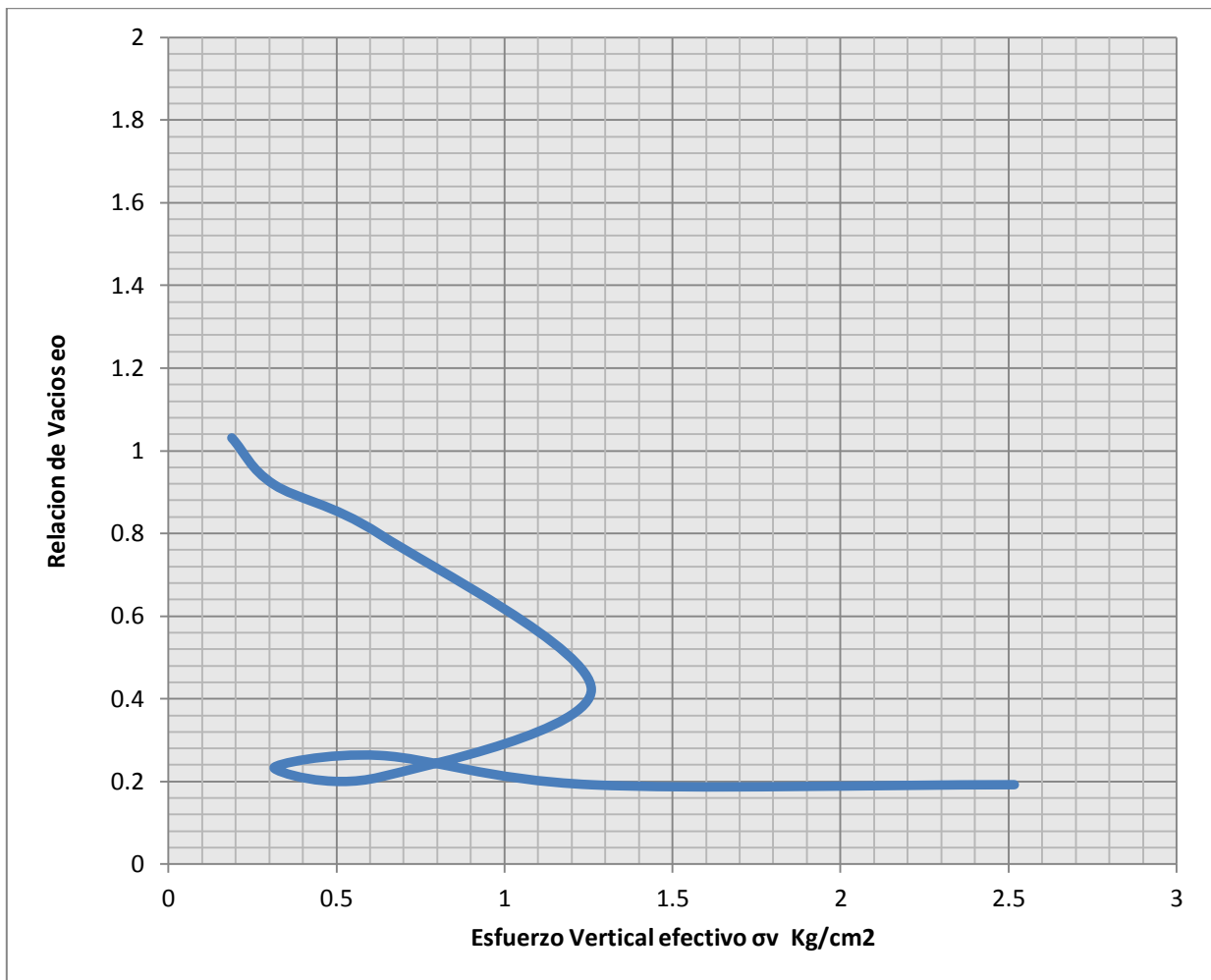
3	4	16,7975	2,505	14,2925	1,258665748	0,422016776
4	2	14,2925	-0,265	14,5575	0,629332874	0,20995236
5	1	14,5575	-0,355	14,9125	0,314666437	0,23238632
6	2	14,9125	0,1825	14,73	0,629332874	0,262439361
7	4	14,073	0,655	13,418	1,258665748	0,191370268
8	8	14,075	2,2425	11,8325	2,517331496	0,191539581

Muestra Wsat. (Kg)	0,02305
Muestra Wsec. (Kg)	0,00602
Área Muestra (cm <sup>2</sup> )	30,1907
Área Muestra (m <sup>2</sup> )	0,00301907
Peso Especifico del agua (K Fuerza/m <sup>3</sup> )	999,32
hf (m)	0,0118125
hs (mm)	11,81244855
Constante carga del brazo	9,5

**12.4. Gráfica de relación de vacíos vs esfuerzo vertical efectivo para la muestra TR2-M1G**



12.5. Gráfica de Relación de Vacíos vs Esfuerzo Vertical efectivo para la muestra TR2-M4G.



### 13. INDICE DE TÉRMINOS

actividad sísmica .....	13, 26, 58, 60, 114	La Luna .....	71, 72, 174
aluminosilicatos.....	136, 151	fuerza sismogénica .....	13, 114
Boconó falla .....	60, 61, 95, 98, 190	geoelectrica.....	14, 26
carga de preconsolidación .....	169, 171	geomorfología .....	13, 22, 40, 74, 76
Carta de Plasticidad .....	163, 165	bloques erráticos .....	88
compresibilidad.....	156, 161, 164, 168, 173	colinas denudacionales .....	83
Consistencia relativa.....	162	facetas triangulares.....	86
Consolidación Unidimensional de Suelos.....	46, 152	filos horizontales.....	82
Consolidómetro.....	46, 47	Geoformas de origen Denudacional.....	82
Cortes geológicos		Geoformas de origen estructural.....	86
corte B-B´ .....	107	Geoformas Periglaciares.....	88
cuarzomonzonita.....	69	laderas denudacionales.....	85
cuenca .....	14, 15, 60, 65, 68, 98, 100, 103, 107, 174	laderas estructurales escalonadas .....	86
Deformímetro .....	46, 50	lomos anchos.....	82, 83
depósito La Lejía.....	26, 72, 86, 87, 90, 137	Morfoclimatología .....	76
Difracción de rayos x.....	145	Morfogénesis y Morfología .....	77
Dilatancia .....	42, 136, 137	Morfometría.....	91
dispersión .....	41, 44, 137	morrenas laterales.....	88, 89
esfuerzo de preconsolidación.....	171, 172	Geotecnia .....	40
esfuerzo vertical efectivo.....	171, 172, 226	Granito de Durania .....	69
falla		Humedad Natural .....	45, 152, 153, 154
Chitaga. 13, 14, 15, 28, 58, 60, 61, 63, 86, 87, 88, 98,		Indenter .....	95, 102
99, 100, 103, 104		Índice de liquidez.....	162
Pamplona.....	100	Índice plástico.....	161
Fluorescencia de rayos x.....	139	Límite Líquido .....	53, 158, 160
Formación		<b>Límite Plástico</b> .....	160, 163
Aguardiente .....	68, 71, 72, 102, 174	<i>Log-matic</i> .....	36
Barco .....	68, 73, 102, 105	mapa de contornos.....	25, 91
Capacho.....	68, 71, 72, 98, 102	mapa de Pendientes .....	91
Colon- Mito Juan .....	73	Modelo Digital de Elevación .....	78
Depósitos cuaternarios.....	74	muestras ...	16, 33, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 48, 49, 50, 53,
Girón.....	70, 71, 72, 73, 98, 102, 103, 105	55, 56, 124, 126, 130, 135, 136, 137, 139, 140, 141,	



144, 145, 151, 153, 154, 155, 156, 161, 167, 169, 173, 174	Ortoneis de Pamplona..... 65, 69, 174
TR1-M1D..... 122, 130	paleosismología .....13, 14
TR2-M1G40, 126, 130, 153, 154, 155, 166, 168, 169, 171, 172, 173, 179, 182, 203, 226	paleosismología ..... 13, 61, 190
TR2-M1RX... 130, 139, 141, 142, 144, 146, 147, 149, 174	propiedades físicas.....41, 131, 135, 136, 161, 182
TR2-M1S ..... 41, 130, 131, 135, 136, 137	relacion de sobreconsolidación
TR2-M2G..... 126, 130	Normalmente consolidado ..... 173
TR2-M2RX.... 130, 139, 141, 142, 144, 148, 149, 174	relación de sobreconsolidación ..... 172
TR2-M2S ..... 41, 130, 132, 133, 134, 135, 136, 137	Altamente sobreconsolidado..... 173
TR2-M3G..... 126, 130	Ligeramente sobreconsolidado..... 173
TR2-M4G..... 126, 130, 153, 154, 155, 156, 166, 169, 171, 172, 173, 216, 227	Resistencia en estado seco ..... 42, 136, 137
TR2-M5G..... 126, 130, 156, 157, 158, 159, 160, 163	Sinclinal
TR3-M1RX.... 130, 139, 141, 142, 144, 149, 150, 151	Pamplonita .....98, 99, 100, 102, 104, 107
muestreo ..... 16, 26, 31, 37, 38, 40, 125	Sismicidad
Neis de Bucaramanga ..... 65, 68, 174	amenaza sísmica ..... 58, 61, 112, 113, 115, 116, 192
neotectónica ..... 13, 14, 16	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos ..... 164
	suelos finos.....136, 164
	Tenacidad ..... 43, 136, 137
	trincheras ..13, 14, 26, 27, 31, 60, 61, 63, 117, 119, 144, 182, 190

