

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“EVALUACIÓN DE USOS POTENCIALES DE UN
YACIMIENTO DE MINERALES NO METÁLICOS”**

PRESENTADO POR:

MARIO ERNESTO BRACAMONTE GÓMEZ

KARLA ELIZABETH CALVO MARTÍNEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 2009

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ

SECRETARIO GENERAL :

LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIO :

ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

DIRECTOR :

ING. FERNANDO TEODORO RAMÍREZ ZELAYA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:
INGENIERO QUÍMICO

Título :

**“EVALUACIÓN DE USOS POTENCIALES DE UN YACIMIENTO
DE MINERALES NO METÁLICOS”**

Presentado por :

**MARIO ERNESTO BRACAMONTE GÓMEZ
KARLA ELIZABETH CALVO MARTÍNEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

**LICDA. AÍDA SANTANA DE ZAMORA
ING. FERNANDO TEODORO RAMÍREZ ZELAYA**

San Salvador, Marzo de 2009

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores:

LICDA. AÍDA SANTANA DE ZAMORA

ING. FERNANDO TEODORO RAMÍREZ ZELAYA

AGRADECIMIENTOS

A nuestros **Docentes Directores:** *Licda. Aída Santana de Zamora* del CIAN, por su colaboración en la caracterización mineralógica de la diatomita e *Ing. Fernando Teodoro Ramírez Zelaya*, gracias a ambos por su valiosa colaboración a lo largo de la investigación, su orientación y su amistad.

A nuestros **Asesores Externos:** *Lic. Nelsón Gómez Cedillos*, Docente de la Escuela de Física de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, por su ayuda para realizar la investigación de campo y el análisis de los datos; *Lic. José Alfredo Díaz*, Director de la Escuela de Química, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, por su ayuda en el desarrollo de las pruebas para la columna de adsorción y la prueba de Giles.

A la *Inga. María Soledad de Carranza* del Ministerio de Economía por proporcionarnos el tema del trabajo de graduación y antecedentes del mismo.

Queremos agradecer especialmente a la *Familia Bolaños*, por brindarnos su amistad, por recibirnos cordialmente en su hogar y por todas sus atenciones, facilitándonos el desarrollo de la investigación de campo.

A nuestros Maestros de la Escuela de Ingeniería Química, por sus consejos, sus enseñanzas y ayuda en nuestra formación profesional.

A la *Licda. Isabel de Alarcón* de CENSALUD, por su colaboración en la determinación de la gravedad específica de la diatomita.

A la *Dra. Vianney de Ábrego* de CENSALUD y *David Servellón*, por su ayuda en el análisis de superficie de la diatomita.

Al *Ing. Ramón Portillo* del CIAN, por su colaboración para el análisis químico de la diatomita.

Al *Ing. Edwin Alvarenga, Gerente de la Planta de Adhesivos de ADOC*, por facilitarnos el equipo para realizar las pruebas reológicas de la diatomita.

A la *Inga. Ana Cecilia Díaz de Flamenco*, por facilitarnos el uso de la Planta Piloto de la Escuela de Ingeniería Química y por su asesoría para realizar las marchas de laboratorio.

Al *Sr. Morán y Sr. Padilla*, por proporcionarnos el material, equipo y asesoría para realizar las diferentes pruebas de laboratorio en la Planta Piloto.

Y además, a *Lupita*, por su amable ayuda para gestionar la colaboración de otros departamentos y afinar detalles para las defensas de este trabajo de graduación.

EL GRUPO

DEDICATORIA

A **DIOS TODOPODEROSO**: por darme la vida, la fortaleza para poder enfrentarme a nuevos retos, por iluminar mis pasos y por permitirme estar rodeada de personas que me ayudan a ser mejor cada día.

A mis **Padres**: *Benjamín Calvo y Lucy de Calvo*, no tengo palabras para expresar lo agradecida que estoy de ser su hija porque *Dios* me ha dado la mejor familia del mundo; gracias por su apoyo incondicional, comprensión, cariño y sus consejos, espero que se sientan orgullosos de mí.

A mis **Hermanos**: *Laura y Benjamín Calvo* por ser los mejores hermanos del mundo, por sus bromas, su apoyo y su cariño; los quiero muchísimo.

A *Edwin Alvarenga*, gracias por estar conmigo cada vez que necesito tu ayuda, por creer en mí desde el principio y por tu cariño.

A *Mario Bracamonte*, por confiar en mí para enfrentar esta última prueba, me siento muy contenta de haber trabajado contigo y quiero agradecerle a tu *Familia* por su hospitalidad y sus atenciones.

A *Roberto Rivera*, por tu amistad, tu cariño, por ayudarme a mejorar en los estudios y por enseñarme a ver los pequeños detalles de las cosas.

A mis **Compañeros**: *Karen, Silvia, Alejandra, Aurely, Jennifer, Rocío, Mónica, Gabriela, Carolina, Jonathan, Mario Cordero, Carlos Castillo, Javier, Emerson, Luis Franco, Marvin, David, Daniel, Osmani, Guillermo, Mario Argueta* y a mis **Amigos**: *Aída y Moisés* por estar conmigo en los mejores momentos de mi vida universitaria y por ayudarme a mejorar en los estudios, espero que tengan muchos éxitos en sus vidas.

Finalmente, quiero agradecer a mis *Familiares* y demás personas que estuvieron cerca de mí, apoyándome y animándome para seguir adelante.

Karla Calvo

DEDICATORIA

Este trabajo de graduación está dedicado para mi **Madre**, *María Emma Gómez*, por su amor, comprensión y por haberme fortalecido y guardado en cada momento de mi vida, por haber construido en mí el espíritu de progreso con responsabilidad y buenos principios morales.

A mi **Familia**, deseo expresar mi profundo agradecimiento por la confianza y sus consejos.

Gracias a *Verenys*, por estar a mi lado, en las buenas y en las malas.

Gracias a mis **Amigos**, por *mantenerme a flote* en el mar de estrés.

A mis **Compañeros y Compañeras**, por su amistad, sus consejos, su confianza y por todo lo aprendido a lo largo de esta carrera, son invaluable.

A mis **Profesores**, gracias por haberme guiado por el sendero del conocimiento, por haber cultivado la semilla de la curiosidad, por su confianza y gracias por su amistad.

A mi compañera de tesis, *Karla Elizabeth Calvo*, gracias, muy buen trabajo.

Mario Bracamonte

INDICE

RESUMEN.....	i
INTRODUCCIÓN.....	ii
OBJETIVOS.....	iv

CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.2.1 ESTRATIGRAFÍA Y MORFOLOGÍA.....	2
1.2.2 CLIMA.....	2
1.2.3 ROCAS.....	3
1.2.4 SUELOS.....	3
1.2.5 MINERALOGÍA.....	3
1.3 CONCEPTOS GENERALES DE LOS MINERALES NO METÁLICOS.....	3
1.3.1 ORIGEN DE LOS MIENRALES NO METÁLICOS QUE CONFORMAN LAS ROCAS.....	3
1.3.2 CICLO DE FORMACIÓN DE LAS ROCAS.....	5
1.3.3 ORIGEN DE LAS TIERRAS DIATOMÁCEAS.....	8
1.4 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV).....	10
1.4.1 RESISTIVIDAD DE LOS MATERIALES NATURALES.....	11
1.4.2 RESISTIVIDAD APARENTE.....	12
1.4.3 DISPOSITIVOS ELECTRÓDICOS.....	15
1.4.4 SONDEOS ELÉCTRICOS Y CALICATAS ELÉCTRICAS.....	16
1.5 DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	17
1.5.1 PROCEDIMIENTO PARA ANÁLISIS DE DIFRACTOGRAMAS E IDENTIFICACION DE SUSTANCIAS CRISTALINAS.....	17

1.6	ADSORCIÓN DE MATERIALES	19
1.6.1	INTRODUCCIÓN A LOS PROCESOS DE ADSORCIÓN	19
1.6.2	PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ADSORBENTES	19
1.6.3	TIPOS DE ADSORCIÓN	20
1.6.4	ISOTERMAS DE ADSORCIÓN	22
1.7	REOLOGÍA DE FLUIDOS	23
1.7.1	REOLOGÍA DE FLUIDOS PARA PERFORACIÓN	27
1.7.2	REOLOGIA DE SÓLIDOS	28

CAPITULO 2: SELECCIÓN DE LAS METODOLOGÍAS PARA LA INVESTIGACIÓN

2.1	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	30
2.2	EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL MATERIAL.....	32
2.2.1	GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	32
2.2.2	RESISTENCIA A ALTAS TEMPERATURAS.....	33
2.2.3	ANÁLISIS DE SUPERFICIE	33
2.3	EVALUACIÓN DE LA MINERALOGÍA Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL.	34
2.3.1	ANÁLISIS MINERALÓGICO	34
2.3.2	ANÁLISIS QUÍMICO	35
2.4	METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	36
2.5	METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE REACTIVIDAD	37
2.6	METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE ADSORCIÓN	37
2.7	METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE REOMETRÍA.....	39

CAPITULO 3: INVESTIGACIÓN DE CAMPO

3.1	CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO.	41
-----	---	----

3.1.1	RECONOCIMIENTO DEL ÁREA EN ESTUDIO PARA LA RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.	42
3.1.2	OBSERVACIONES DE CAMPO	44
3.1.3	DELIMITACIÓN DEL ÁREA CON ABUNDANCIA DE MINERAL.....	45
3.2	RECOPIACIÓN DE DATOS DE LA ETAPA DE MUESTREO	48
3.2.1	PUNTOS DE MUESTREO	48
3.3	APLICACIÓN DE LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA E INTERPRETACIÓN DE DATOS	59
3.3.1	EQUIPAMIENTO Y METODOLOGÍAS APLICADAS PARA REALIZAR LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA	60
3.3.2	RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES	61
3.3.3	RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES DIPOLO – DIPOLO.....	68
3.3.4	CONSTRUCCIÓN DE LA CUENCA	76

CAPITULO 4: RESULTADOS DE LABORATORIO

4.1	PRUEBAS SOBRE LA COMPOSICIÓN DE LA DIATOMITA	83
4.1.1	ANÁLISIS MINERALÓGICO A PARTIR DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X	83
4.1.2	ANÁLISIS QUÍMICO POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X.....	94
4.2	PRUEBAS PARA EVALUAR LAS PROPIEDADES FISICAS DE LA DIATOMITA.....	96
4.2.1	DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA	96
4.2.2	COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL FRENTE A ALTAS TEMPERATURAS.....	99
4.2.3	ANÁLISIS DE SUPERFICIE	103
4.3	METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE REACTIVIDAD DE LA DIATOMITA.....	111
4.3.1	PRUEBAS DE OLOR Y SABOR SOBRE UNA MUESTRA DE VINO.	111
4.3.2	MEDIDA DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO	112

4.3.3	DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS DISUELTOS EN ÁCIDOS DILUIDOS.....	113
4.4	METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE ADSORCIÓN DE LA DIATOMITA	116
4.4.1	CARACTERIZACIÓN DEL EQUILIBRIO DE ADSORCIÓN	117
4.4.2	DETERMINACIÓN DEL ÁREA ESPECÍFICA DEL MATERIAL.....	118
4.4.3	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA COLUMNA DE ADSORCIÓN	128
4.5	METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE REOLOGÍA DE LA DIATOMITA	133
4.5.1	ELABORACIÓN DE CURVA DE VISCOSIDAD CONTRA CONCENTRACIÓN	134
4.5.2	VISCOSIDAD DEL MATERIAL EN EL PUNTO DE SATURACIÓN	139
 CAPITULO 5: PROPUESTAS DE USO Y BALANCE COMERCIAL DE LA DIATOMITA		
5.1	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	142
5.2	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO	143
5.3	REACTIVIDAD DE LA DIATOMITA	145
5.4	EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS.....	146
5.5	ANALISIS COMERCIAL DE LA DIATOMITA EN EL SALVADOR	148
5.5.1	CONSUMO NACIONAL APARENTE	148
5.6	PROPUESTA PARA USOS INDUSTRIALES DE LAS TIERRAS DIATOMÁCEAS EN BASE A SUS PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DETERMINADAS	151
5.6.1	USOS AGRÍCOLAS DE LAS TIERRAS DIATOMÁCEAS EN EL SALVADOR.....	151
5.6.2	USOS DE LAS TIERRAS DIATOMÁCEAS EN PROCESOS INDUSTRIALES	152
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		155

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Casquete semiesférico formado por una corriente I, en un punto A.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 1.2 Diferencia de potencial en el punto M</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1.3 Diferencia de potencial en los puntos M y N.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1.4 Medida de la reactividad aparente con los cuatro electrodos dispuestos de modo aleatorio.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 1.5 Dispositivos electródicos: a) Schlumberger; b) Wenner</i>	<i>15</i>
<i>Figura 1.6 Esquema simplificado de un sondeo eléctrico vertical.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 1.7 Esquema simplificado de una calicata eléctrica.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 1.8 Formas típicas de isothermas de adsorción</i>	<i>22</i>
<i>Figura 1.9 Diagrama de definiciones reológicas básicas.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 1.10 Perfiles ideales de viscosidad.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 1.12 Efectos del tiempo sobre la viscosidad</i>	<i>27</i>
<i>Figura 1.11 Clasificación de los Fluidos no Newtonianos</i>	<i>26</i>
<i>Figura 1.13 Perfil de viscosidad ideal de un fluido en circulación</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.1 Aplicaciones Generales de Diatomitas</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.1 Algunos instrumentos para realizar el reconocimiento del área y la toma de muestras: a) Tabla sujeta papeles; b) Martillo con punta de pico; c) Brújula de Brunton con clinómetro.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.2 Afloramientos biselados que presentan falsos buzamientos</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.3 Perfil estratigráfico del punto DM1.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3.4 Perfil estratigráfico del punto DM3.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 3.5 Perfil estratigráfico del punto DM4.....</i>	<i>56</i>

<i>Figura 3.7 Conjunto de perfiles para el arreglo dipolo – dipolo</i>	<i>69</i>
<i>Figura 3.6 Dispositivo electródico de Wenner para el arreglo dipolo-dipolo</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.1 Distribución de las muestras en DM1 para difracción de rayos X.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4.2 Arreglo típico de un aparato para pretratamiento de materiales de intercambio iónico.....</i>	<i>128</i>

INDICE DE GRAFICAS

<i>Gráfica 3.1 Resistividad del terreno contra AB/2 para DM1 a partir de los SEV.....</i>	<i>63</i>
<i>Gráfica 3.2 Resistividad del terreno contra AB/2 para DM2</i>	<i>64</i>
<i>Gráfica 3.3 Resistividad del terreno contra AB/2 para DM5</i>	<i>65</i>
<i>Gráfica 3.4 Estratificación aproximada en el área de influencia DM1 a partir de los SEVDD.....</i>	<i>72</i>
<i>Gráfica 3.5 Estratificación aproximada en el área de influencia DM2 a partir de los SEVDD.....</i>	<i>73</i>
<i>Gráfica 3.6 Estratificación aproximada en el área de influencia DM5 a partir de los SEVDD.....</i>	<i>75</i>
<i>Gráfica 3.7 Vectores de dirección del flujo de agua precipitada</i>	<i>79</i>
<i>Gráfica 3.8 Representación de la cuenca en tres dimensiones: a) Se detallan las curvas de nivel; b) Se detalla la resistividad con colores.....</i>	<i>80</i>
<i>Gráfica 3.9 Panorama en tres dimensiones de las múltiples capas que conforman la cuenca</i>	<i>81</i>
<i>Gráfica 4.1 Espectro de difracción de rayos X para DM1-1</i>	<i>85</i>
<i>Gráfica 4.2 Espectro de difracción de rayos X para DM1-2.....</i>	<i>86</i>
<i>Gráfica 4.3 Espectro de difracción de rayos X para DM1-3.....</i>	<i>86</i>

<i>Gráfica 4.4 Espectro de difracción de rayos X para DM1-4.....</i>	<i>87</i>
<i>Gráfica 4.5 Espectro de difracción de rayos X para DM1-5.....</i>	<i>87</i>
<i>Gráfica 4.6 Conjunto de espectros de difracción de rayos X para DM1</i>	<i>88</i>
<i>Gráfica 4.7 Espectro de difracción de rayos X para DM2</i>	<i>89</i>
<i>Gráfica 4.8 Espectro de difracción de rayos X para DM3-1.....</i>	<i>90</i>
<i>Gráfica 4.9 Espectro de difracción de rayos X para DM3-2.....</i>	<i>90</i>
<i>Gráfica 4.10 Conjunto de espectros de difracción de rayos X para DM3</i>	<i>91</i>
<i>Gráfica 4.11 Espectro de difracción de rayos X para DM4.....</i>	<i>92</i>
<i>Gráfica 4.12 Espectro de difracción de rayos X para DM5.....</i>	<i>93</i>
<i>Gráfica 4.13 Espectro de difracción de rayos X para DM6.....</i>	<i>93</i>
<i>Gráfica 4.14 Espectro de fluorescencia de rayos x para determinar silicio en DM1</i>	<i>95</i>
<i>Gráfica 4.15 Espectro de fluorescencia de rayos x para determinar hierro en DM1.....</i>	<i>95</i>
<i>Gráfica 4.16 Comparación de los ensayos de las pruebas térmicas.....</i>	<i>101</i>
<i>Gráfica 4.17 Pesos promedio de la diatomita contra la temperatura</i>	<i>102</i>
<i>Gráfica 4.18 Curva de calibración del azul de metileno para espectrofotometría.....</i>	<i>122</i>
<i>Gráfica 4.19 Masa de diatomita en equilibrio con la solución de azul de metileno.....</i>	<i>125</i>
<i>Gráfica 4.20 Masa de diatomita saturada de azul de metileno.....</i>	<i>126</i>
<i>Gráfica 4.21 Isoterma de adsorción para diatomita y azul de metileno a 25°C.....</i>	<i>127</i>
<i>Gráfica 4.22 Comportamiento de la viscosidad de diatomita DM1 contra la concentración.....</i>	<i>135</i>
<i>Gráfica 4.23 Comportamiento de la viscosidad de diatomita DM1 contra la concentración para la primera etapa del experimento</i>	<i>136</i>
<i>Gráfica 4.24 Comportamiento de la viscosidad de diatomita DM1 contra la concentración para la segunda etapa del experimento</i>	<i>137</i>

<i>Gráfica 4.25 Comportamiento de la viscosidad de diatomita DM1 contra la concentración para la tercera etapa del experimento.....</i>	<i>138</i>
<i>Gráfica 5.1 Balanza comercial de tierras diatomáceas en miles de dólares entre 1999 Y 2008.....</i>	<i>148</i>
<i>Gráfica 5.2 Balance comercial de tierras diatomáceas en miles de kilogramos entre 1999 y 2008.....</i>	<i>149</i>
<i>Gráfica 5.3 Importaciones de Tierras diatomáceas en dólares US\$ en el periodo de 1999 hasta 2008.....</i>	<i>149</i>
<i>Gráfica 5.4 Importación de Tierras diatomáceas en kilogramos en el periodo de 1999 hasta 2008.....</i>	<i>150</i>

INDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1.1 Ciclo de formación de las rocas.....</i>	<i>6</i>
<i>Ilustración 2.1 Diferentes formas de esqueletos silíceos de las diatomeas.....</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 3.1 Mapa de ubicación de los puntos de muestreo y nomenclatura de puntos de referencia</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 3.2 Disposición del material en el punto de muestreo DM1: a) Estrato de diatomita; b) Interface entre diatomita y bentonita</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 3.3 Roca tomada en el punto DM2.....</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 3.4 Zona de muestreo para el punto DM3.....</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 3.5 Discontinuidad de los estratos en punto de muestreo DM4.....</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 3.6 Disposición de los estratos en punto de muestreo DM5: a) Fotografía real del punto de muestreo; b) Explicación de la formación litológica</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 3.7 Zona de muestreo para el punto DM6.....</i>	<i>59</i>

<i>Ilustración 3.8</i>	<i>Equipo para realizar prospecciones geofísicas</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 3.9</i>	<i>Ventana de diálogo del programa IPI2WIN para DM1</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 3.10</i>	<i>Ventana de diálogo del programa IPI2WIN para DM2</i>	<i>67</i>
<i>Ilustración 3.11</i>	<i>Ventana de diálogo del programa IPI2WIN para DM5</i>	<i>67</i>
<i>Ilustración 3.12</i>	<i>Curvas de nivel en el área de exploración.....</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 4.1</i>	<i>Equipo para realizar difracción de rayos X</i>	<i>83</i>
<i>Ilustración 4.2</i>	<i>Ubicación del portaobjeto para difracción de rayos X.....</i>	<i>84</i>
<i>Ilustración 4.3</i>	<i>Fuentes de excitación para fluorescencia de rayos x:.....</i>	<i>94</i>
<i>Ilustración 4.4</i>	<i>Procedimiento para determinar la gravedad específica: a) Rotulación de picnómetros; b) Llenado de picnómetro con la muestra; c) Llenado de picnómetro con agua destilada.....</i>	<i>98</i>
<i>Ilustración 4.5</i>	<i>Muestras de diatomita dentro de la mufla para la prueba térmica.....</i>	<i>99</i>
<i>Ilustración 4.6</i>	<i>Muestras de diatomita a diferentes temperaturas al finalizar la prueba térmica</i>	<i>103</i>
<i>Ilustración 4.7</i>	<i>Microscopio electrónico de barrido</i>	<i>104</i>
<i>Ilustración 4.8</i>	<i>Muestras de diatomita para realizar el análisis de superficie: a) Durante la dispersión por ultrasonido; b) Dentro del evaporador; c) Dentro del microscopio electrónico de barrido</i>	<i>104</i>
<i>Ilustración 4.9</i>	<i>Análisis de superficie para la muestra de diatomita a 25°C: a) Acercamiento exploratorio; b) Diatomea Bacillariophyceae de simetría radial; c) Diatomea Bacillariophyceae de simetría bilateral; d) Superficie de una arcilla</i>	<i>106</i>
<i>Ilustración 4.10</i>	<i>Comparación del tamaño de poro de las especies de diatomeas más representativas en la muestra DM1 a 25°C: a) Acercamiento de 10,000X; b) Acercamiento de 10,000X</i>	<i>106</i>

<i>Ilustración 4.11 Análisis de superficie para la muestra de diatomita a 500°C:</i>	
<i>a) Acercamiento exploratorio; b) Diatomea Bacillariophyceae de simetría radial;</i>	
<i>c) Diatomea Bacillariophyceae de simetría bilateral; d) Superficie de una arcilla ...</i>	107
<i>Ilustración 4.12 Comparación de las estructuras fósiles de diatomita DM1 a 500°C:</i>	
<i>a) Acercamiento de 12,000X; b) Acercamiento de 3,700X.....</i>	108
<i>Ilustración 4.13 Análisis de superficie para la muestra de diatomita a 800°C:</i>	
<i>a) Acercamiento exploratorio; b) Diatomea Bacillariophyceae de simetría radial;</i>	
<i>c) Diatomea Bacillariophyceae de simetría bilateral; d) Superficie de una arcilla ...</i>	109
<i>Ilustración 4.14 Activación del poro de las diatomeas de simetría bilateral a 800°C:</i>	
<i>a) Acercamiento de 600X; b) Acercamiento de 10,000X; c) Acercamiento de 30,000X;</i>	
<i>d) Acercamiento de 70,000X</i>	110
<i>Ilustración 4.15 Equipo para medir pH</i>	112
<i>Ilustración 4.16 Mezcla de diatomita y ácido clorhídrico: a) Antes de la ebullición;</i>	
<i>b) Después de la ebullición</i>	114
<i>Ilustración 4.17 Determinación de hierro en diatomita: a) Equipo para cuantificar hierro;</i>	
<i>b) Comparación entre el blanco, dilución 1:2 y muestra</i>	115
<i>Ilustración 4.18 Prueba de Giles: a) Tubos antes de centrifugar; b) Centrifuga de alta</i>	
<i>velocidad; c) Espectrofotómetro de doble haz.....</i>	119
<i>Ilustración 4.19 Efecto de la diatomita en azul de metileno en solución</i>	120
<i>Ilustración 4.20 Diferentes arreglos para el lecho de diatomita en la columna de</i>	
<i>adsorción: a) Soporte con gravilla multimedia; b) Soporte con fibra de vidrio;</i>	
<i>c) Lechos en serie utilizando fibra de vidrio; d) Lechos en serie utilizando gravilla</i>	
<i>multimedia y fibra de vidrio</i>	130
<i>Ilustración 4.21 Progresión del fenómeno de adsorción para una disposición de lecho</i>	
<i>móvil con flujo en contracorriente</i>	131

<i>Ilustración 4.23 Comparación de la solución de entrada y salida de la columna de adsorción</i>	132
<i>Ilustración 4.22 Equipo de laboratorio para determinar la capacidad de adsorción de la diatomita</i>	132
<i>Ilustración 4.24 Comparación del agua obtenida en diferentes tiempos durante el proceso de adsorción</i>	133
<i>Ilustración 4.25 Viscosímetro rotacional Haake</i>	134
<i>Ilustración 4.26 Determinación de viscosidad en diatomita: a) viscosímetro de Brookfield; b) tipos de agujas o spindle del viscosímetro</i>	139

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1 Perfil geológico del yacimiento</i>	4
<i>Tabla 1.2 Resistividades de algunas rocas naturales</i>	11
<i>Tabla 2.1: Clasificación IUPAC en función del diámetro del poro</i>	34
<i>Tabla 3.1 Perfil geológico del punto DM1</i>	51
<i>Tabla 3.2 Datos experimentales para los sondeos eléctricos verticales en DM1</i>	62
<i>Tabla 3.3 Datos experimentales para los sondeos eléctricos verticales en DM2</i>	63
<i>Tabla 3.4 Datos experimentales para los sondeos eléctricos verticales en DM5</i>	64
<i>Tabla 3.5 Datos obtenidos a partir de los SEVDD en DM1</i>	71
<i>Tabla 3.6 Datos obtenidos a partir de los SEVDD en DM2</i>	73
<i>Tabla 3.7 Datos obtenidos a partir de los SEVDD en DM5</i>	74
<i>Tabla 3.8 Parámetros de dimensionamiento de la cuenca por medio del programa SURFER</i>	77
<i>Tabla 4.1 Nomenclatura utilizada para análisis de muestras en difracción de rayos x</i>	85

<i>Tabla 4.2 Resultados de la composición de diatomita por fluorescencia de rayos x</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 4.3 Pesos de la diatomita y pesos del agua para calcular la gravedad específica</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 4.4 Gravedades específicas de la muestra de diatomita y diatomita industrial</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 4.5 Densidades de la muestra de diatomita y diatomita industrial en el SI</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 4.6 Pesos finales de la diatomita para la primera prueba térmica</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 4.7 Pesos finales de la diatomita para la segunda prueba térmica</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 4.8 Pesos finales de la diatomita para la tercera prueba térmica.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 4.9 Análisis estadístico para las pruebas térmicas</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 4.10 Valores de pH para la diatomita en agua.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 4.11 Pérdida de peso de la diatomita después de mezclarse con ácido.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 4.12 Datos para el espectro de absorción del azul de metileno</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 4.13 Datos para elaborar la curva de calibración de azul de metileno</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 4.14 Resultados obtenidos con el método de tinturas</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 4.15 Viscosidades para diatomita DM1 en función de la concentración</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 4.16 Viscosidad para muestras de diatomita y bentonita en condiciones de saturación con viscosímetro de Brookfield</i>	<i>140</i>

RESUMEN

El presente trabajo de graduación se deriva de los resultados obtenidos en la investigación realizada entre 1970 y 1973, por el *Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de la República Federal de Alemania*, donde se recomienda el estudio a profundidad de este yacimiento de tierras diatomáceas.

Para comenzar con el desarrollo del presente estudio, se realiza una descripción de la zona de interés en función de la estratigrafía, morfología, topografía, suelos presentes y mineralogía. Con el objetivo de caracterizar el material dentro del yacimiento, se describe el origen de los minerales no metálicos que conforman las rocas; además, se explica el ciclo de la formación de las rocas y también se describe el origen de las tierras diatomáceas.

Una vez comprendidos los conceptos básicos de los minerales no metálicos, se explican las técnicas de prospección geológica utilizadas para caracterizar las dimensiones del yacimiento, incluyendo términos como la resistividad de los suelos materiales, resistividad aparente, dispositivos electródicos, sondeos eléctricos y calicatas eléctricas.

Posteriormente, se efectúa la caracterización de las tierras diatomáceas aplicando las técnicas de difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, picnometría, termoreactividad, análisis topográfico de la superficie del material, estudio del fenómeno de adsorción aparente en el material (a través del diseño y la construcción de una columna de adsorción a escala de laboratorio y la construcción de sus respectivas isotermas); para finalizar con el estudio del cambio de las propiedades reológicas de un fluido por la influencia del material.

Los estudios realizados han permitido formar el criterio para poder advertir los usos más apropiados para el material encontrado en el yacimiento, lo cual está justificado en base a los análisis comerciales realizados, puesto que resulta factible su explotación.

INTRODUCCIÓN

En El Salvador, las actividades de minería son limitadas por regulaciones medioambientales; sin embargo, éstas son enfocadas a la explotación de recursos minerales de tipo metálico. Por otro lado, la explotación de yacimientos de tipo “no metálico” no presenta estas restricciones porque su procesamiento es más noble.

Históricamente, la identificación y evaluación de *yacimientos no metálicos* ha sido realizada por organismos extranjeros como el *Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de la República Federal de Alemania*, los cuales han identificado y clasificado los minerales a lo largo del país; sin embargo, no son conocidas las actividades económicas que permiten el aprovechamiento de estos yacimientos, a pesar de que la industria química nacional, con un desarrollo relativamente alto, debe estar interesada en un suministro local de este material.

Por su origen, las *tierras diatomáceas* son rocas silíceas sedimentarias, no clásticas o biogénicas, que se constituyen principalmente de restos fosilizados de plantas unicelulares acuáticas denominadas “*diatomeas*”, las cuales prosperan comúnmente en medios lacustres o marinos, de aguas poco profundas.

La importancia económica actual de dicho mineral ha crecido notablemente debido a su complejidad y sus múltiples aplicaciones industriales, especialmente por el tamaño de sus poros y su área superficial por unidad de masa. Por ser químicamente inertes y altamente adsorbentes, las tierras diatomáceas son una excelente alternativa para diferentes áreas industriales, donde se requieren materiales de transporte, remoción, relleno, insecticida, entre otros.

Es así como surge la necesidad de realizar una caracterización del yacimiento mediante técnicas de *prospección geofísica* para dimensionar y clasificar el tipo y la cantidad de minerales involucrados para la explotación del yacimiento; además, la evaluación de las *propiedades fisicoquímicas*, es necesaria para la selección de sus usos industriales.

Finalmente, el estudio comprende un análisis de la balanza comercial de la diatomita en el país, con datos reales obtenidos del *Banco Central de Reserva de El Salvador*, para un período de diez años, donde se determina que el material es de alto consumo y presenta un importante recurso económico.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Evaluar los usos potenciales de un yacimiento de minerales no metálicos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- a. Caracterizar la mineralogía en el área de estudio.
- b. Diseñar una *Columna de Adsorción a nivel de laboratorio* para realizar las pruebas de remoción de compuestos orgánicos en agua, empleando diatomita.
- c. Combinar la diatomita con un fluido a base de agua para medir la variación de sus *Propiedades Reológicas*.
- d. Concluir respecto a los resultados obtenidos en el desarrollo del experimento e indicar los usos industriales apropiados para la diatomita analizada.

CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES

En El Salvador se mencionan yacimientos de “*minerales silíceos*” en publicaciones, reportes y mapas; sin embargo, no son conocidos los usos industriales apropiados para el aprovechamiento de estos yacimientos, a pesar de que la industria química debe estar interesada en un suministro local de este mineral.

Entre los estudios sobre minerales silíceos en nuestro país destacan los realizados en la década de 1970 por la *Dirección de Energía, Minas e Hidrocarburos del Ministerio de Economía de El Salvador*, con la cooperación del *Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de la República Federal de Alemania*, ya que señalan los yacimientos con presencia del mineral a nivel nacional y son la base para la elaboración de los mapas geológicos de dichas zonas. Al final de dichos estudios se concluye, que es necesario realizar una investigación que permita conocer el tamaño de la reserva y la calidad del mineral que la compone y así, determinar los usos más apropiados del mineral.

Posteriormente, en los años noventa, se realiza una investigación de factibilidad económica del yacimiento en estudio, la cual incluye la delimitación del área de interés, la descripción geológica local, la estratigrafía y la morfología de la zona, proponiendo una exploración tecnificada sobre los minerales que contiene el yacimiento.

1.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE INVESTIGACIÓN

La zona de estudio está ubicada en el cuadrante cartográfico de *San Cristóbal La Frontera*, que comprende dos zonas morfológicamente diferenciadas: (Instituto Geográfico Nacional Ing. Pablo Arnoldo Guzmán, 1992)

- a) *Zona montañosa con elevaciones topográficas hasta la costa que son 1,100 metros sobre el nivel del mar, con pendientes fuertes:* está formada por terrenos abruptos con pendientes pronunciadas, sus afloramientos rocosos corresponden a la formación San

Salvador predominantemente. Las rocas representativas consisten en lavas de carácter intermedio, estructura microcristalina presentando diferentes grados de alteración.

- b) *Zona de penillanura, predominantemente plana con algunas ondulaciones y terrazas del río de influencia de la zona, elevación 640 metros sobre el nivel del mar: la nivelación de la superficie en esta zona está relacionada directamente con cambios de nivel hidrostático subsuperficial.*

1.2.1 ESTRATIGRAFÍA Y MORFOLOGÍA

La mayor parte del área estudiada yace sobre una depresión no muy profunda, relacionada con épocas geológicas de intensa actividad erosiva, con capacidad de seccionar gran parte de la *Formación Bálsamo* que constituye el nivel de basamento regional para esta localidad. (Fuentes & Ortiz, 1990)

Las condiciones estratigráficas varían un poco, de acuerdo a los cambios en el régimen de descarga y capacidad de transporte pluvial. Los ciclos de mayor pluviosidad sedimentaron materiales de granulometría gruesa y los períodos de menor pluviosidad sedimentaron materiales de granulometría fina, de tal manera que demuestran un perfil estratigráfico alterno pero con claro predominio de la diatomita que aparece en todas las excavaciones, taludes de los riachuelos y quebradas dentro de la planicie de inundaciones; los espesores en las capas diatomáceas en casi todas los sondeos tienen más de 4 metros de espesor.

Es evidente el contraste morfológico generado por la existencia actual de un valle fluvial en su etapa senil, con una topografía uniforme y predominantemente plana, que se ubica entre elevaciones antiguas al norte y aparatos volcánicos recientes.

1.2.2 CLIMA

El clima es generalmente fresco, pertenece al tipo de tierra caliente y templada. El monto pluvial anual oscila entre 1,400 y 1,800 mm. (Fuentes & Ortiz, 1990)

1.2.3 ROCAS

Predominan los tipos de lavas andesíticas y basálticas; sedimentos volcánicos detríticos, con materiales piroclásticos y corrientes de lava intercalados; corrientes de lava basáltica y aluviones, con intercalaciones de materiales piroclásticos. (Instituto Geográfico Nacional Ing. Pablo Arnoldo Guzmán, 1992)

1.2.4 SUELOS

Los tipos de suelo que se encuentran en el municipio son: Latosoles Arcillo Rojizos y Litosoles-Alfisoles (fase pedregosa superficial de onduladas a montañosa, muy accidentada), Grumosoles, Litosoles, Latosoles Arcillo-Rojizos, Vertisoles y Alfisoles (fases de nivel fuertemente alomadas). (Instituto Geográfico Nacional Ing. Pablo Arnoldo Guzmán, 1992)

1.2.5 MINERALOGÍA

En el estudio realizado por la *Misión Geológica Alemana* se muestra un diagrama de cinta (corte geológico) para representar de manera gráfica la mineralogía aproximada existente en el área de estudio propuesta. Este diagrama se ha representado en función de los minerales que lo componen por medio del *perfil geológico* (ver *tabla 1.1*), donde se observa que el estrato de tierras diatomáceas está combinado con el estrato de arcillas esmectíticas. Por esa razón, se realizará el estudio de calidad de la diatomita presente en el área de interés. (Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de la República Federal de Alemania, 1973)

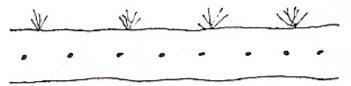
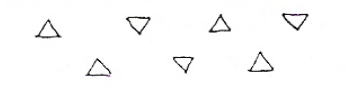

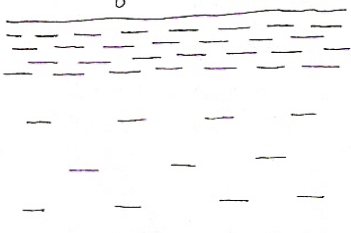


1.3 CONCEPTOS GENERALES DE LOS MINERALES NO METÁLICOS

1.3.1 ORIGEN DE LOS MIENRALES NO METÁLICOS QUE CONFORMAN LAS ROCAS

En la superficie existen numerosas sustancias inorgánicas de origen natural, que presentan una gran variedad en su composición química y su estructura. Estos minerales

no se encuentran en forma aislada o concentrada y aparecen habitualmente asociados para formar rocas. Debido a que la distribución de los minerales en la superficie no es proporcional, se presentan dos tipos de minerales: a) *minerales formadores de rocas*, que conforman mayoritariamente la composición de una roca; b) *minerales complementarios*, cuya composición es menor. Entre los principales minerales de rocas se destacan los *silicatos* y la *calcita*, ya que éstos son los principales formadores de la corteza terrestre (Longwell, 1965).

Tabla 1.1 Perfil geológico del yacimiento

PERFIL	POTENCIA	DESCRIPCIÓN
	Hasta 0,5 m	Tierra vegetal
	Hasta 1,0 m	“Cascajo”: toba de pómez
	Hasta 1,0 m	Conglomerados, Cantos Rodados
	Hasta 2,0 m	Banco Superior: Diatomita impura rica en Esmectita ✓ Parte superior: laminado ✓ Parte inferior: macizo
	1,5 m	Intercalación de Tufita endurecida de color café con abundante componente amorfo.
	> 3,5 m	Banco inferior: Diatomita impura rica en Esmectita

Las rocas se clasifican normalmente en función de su composición, por ejemplo, las *rocas monominerales*, que tienen una composición mayoritaria de un solo mineral, de los cuales destacan el yeso, la sal común, la anhidrita y la calcita; también se incluyen las diatomitas, las radiolaritas y calizas fusulínicas que se componen de esqueletos silíceos de diatomeas (algas unicelulares) y de radiolarios (protozoos microscópicos) (AULAGEA, 1999).

La manera en que las rocas se conforman en la superficie de la tierra se debe a los procesos geológicos propios de cada parte del mundo y a la manera en cómo se distribuyen sus componentes; por lo tanto, las rocas también pueden clasificarse, según su origen y aspecto, mediante dos grupos:

- a) *La mineralogía*, es decir los diferentes componentes y la cantidad relativa de cada uno de ellos.
- b) *La textura*, o sea el tamaño y ordenamiento espacial de los componentes. Estos granos o cristales, que en la mayoría de las rocas son sólo de algunos milímetros de diámetro, se describen como gruesos, cuando se los puede ver a simple vista o como finos, si ello no es posible.

1.3.2 CICLO DE FORMACIÓN DE LAS ROCAS

Las rocas que derivan su origen de la solidificación de un fluido es denominan *rocas ígneas*; las rocas que se forman por la acumulación de partículas y granos derivados de la destrucción de otra, transportados por algún medio (agua o viento) y finalmente depositados se conocen como *rocas sedimentarias*; y las rocas que se tienen su origen debido a la transformación en estado sólido de una roca preexistente (ígneas o sedimentaria) debido a condiciones extremas de temperatura y presión son llamadas *rocas metamórficas* (AULAGEA, 1999).

El *ciclo de las rocas* es una serie de procesos geológicos por medio de los cuales uno de los tres grupos antes mencionados se forma a partir de los otros dos. Este ciclo tiene su inicio en el interior de la tierra, donde las temperaturas y presiones son lo suficientemente altas

como para fundir las rocas produciendo *Magma* (manto), este es un fundido natural en el que participan principalmente ocho elementos: oxígeno, silicio, aluminio, hierro, calcio, sodio, potasio y magnesio. En la *ilustración 1.1* se esquematiza el proceso de formación de las rocas. (Kalipedia, 2008)

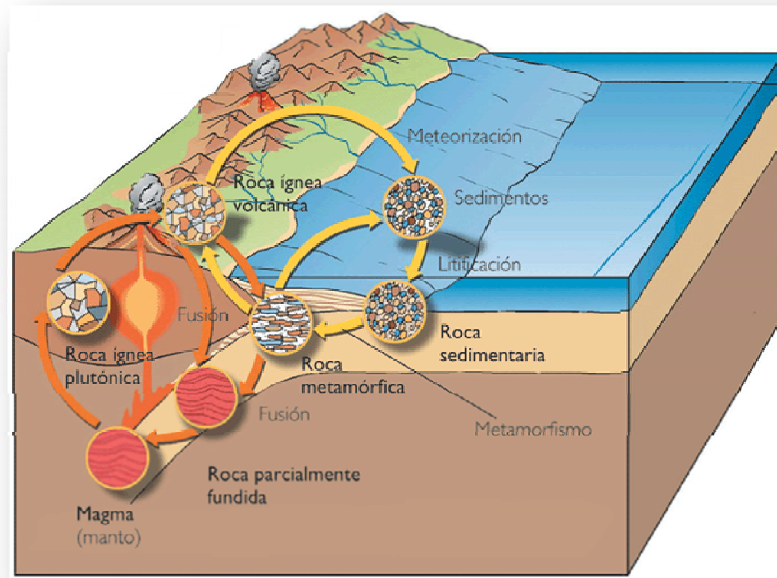


Ilustración 1.1 Ciclo de formación de las rocas

1.3.2.1 Rocas Ígneas

La cristalización del magma incluye la pérdida de calor, que favorece la formación de las *rocas ígneas* y las *rocas intrusivas*. Las *rocas ígneas* presentan diferentes texturas características, que dependen de su formación, su tamaño y la disposición de los minerales que las componen; es por eso que se pueden identificar estructuras *vítreas* (enfriamiento rápido, no hay cristales), *afaníticas* (enfriamiento rápido y grano fino), *faneríticas* (enfriamiento lento y grano grande) y *porfíricas* (enfriamiento variable y grano combinado), que se clasifican en función de la estructura cristalina formada. Por su compleja composición química, a medida disminuye la temperatura en el fundido, las rocas de origen *ígneas* forman *silicatos* de tipo *ferromagnesianos*, *plagioclasas cálcicas*, *feldespato potásico*, *moscovita* y *Cuarzo*. (Escobar, 2008)

1.3.2.2 Rocas Sedimentarias

Las *rocas sedimentarias* son formadas por los fenómenos de meteorización, erosión y transporte de los materiales que constituyen la corteza de la tierra. La *meteorización o intemperismo*, como condición previa a la erosión y al transporte, es la alteración del material rocoso expuesto al aire, la humedad o al efecto de la materia orgánica; existen dos tipos de meteorización: la *mecánica*, que alude a la desintegración del material y la *química*, que alude a su descomposición. Los productos del intemperismo son: gravas, arenas, limos, arcillas, soluciones silíceas, carbonatadas y ferruginosas, entre otras. Estos materiales explican posteriormente la evolución de los suelos de cultivo, también los suelos residuales, los suelos transportados y las rocas sedimentarias. Los diferentes tipos de rocas sedimentarias se relacionan a su vez, no sólo con los procesos de meteorización, sino también con la zona climática en que se desarrollan y con las diferentes partes del ambiente tectónico sobre las cuales pueden estar operando los procesos superficiales.

Pero la principal característica de las rocas sedimentarias es su disposición en capas o estratos, donde el conjunto de materiales muestra algunos tipos de estructuras que reflejan el ambiente de formación, clasificándose como: (Wicander & Monroe, 2000).

- a) *Clásticas*, compuestas por *detritos*, es decir, fragmentos de rocas preexistentes a través de procesos de sedimentación, compactación y cementación.
- b) *Piroclásticas*, rocas de origen *ígneo*, sedimentadas por medio de transporte aéreo de relativa magnitud y su acumulación se debe al efecto de la gravedad, el tamaño de estas rocas varía desde cenizas hasta bloques.
- c) *Rocas químicas*, son las rocas que tienen su origen en la precipitación de los iones que el agua lleva en solución. Los tipos de iones que precipitan dependen de una serie de factores ambientales. Entre las rocas de origen químico se destacan los depósitos de cloruros, boratos, carbonatos y sulfatos.

- d) *Rocas organógenas*, son rocas que provienen de la actividad de algunos organismos que viven en los sedimentos, son capaces de generar las condiciones necesarias para la precipitación de iones que el agua lleva en solución y además, pueden influir en algunas transformaciones químicas. Los organismos vivos no sólo contribuyen a la precipitación de sustancias, también tienen la capacidad de convertirse ellos mismos en material detrítico. Algunos son acumulaciones de esqueletos, y pueden dar origen a depósitos de carbonatos, sílice y fosfatos.

1.3.2.3 *Rocas Metamórficas*

Las *rocas metamórficas* se forman a partir de los cambios y transformaciones que sufren las rocas sedimentarias en su estructura y composición mineralógica, por efectos de presión y temperatura (gradiente geotérmico) y la presencia de fluidos que faciliten las reacciones químicas. A los procesos de recristalización y formación de nuevos minerales se les llama metamorfismo y es una característica propia de las rocas metamórficas.

1.3.3 ORIGEN DE LAS TIERRAS DIATOMÁCEAS

La *diatomita* es una roca que por su formación se clasifica como roca sedimentaria del tipo organogénica, ya que está constituida por restos fosilizados de plantas unicelulares acuáticas relacionadas con las algas, es decir, las "*diatomeas*". Estos organismos prosperan comúnmente en medios lacustres o marinos de aguas poco profundas (alrededor de los 40 metros), presentando contenido relativamente abundante de sílice soluble y boro.

La presencia de diatomeas es visible incluso en lagunas de aguas quietas, en la forma de una nata iridiscente en la superficie, o una película gelatinosa de color café en las rocas y vegetación acuáticas (Ballet, 1985); sin embargo, los depósitos actuales de diatomita se originaron hace unos cincuenta millones de años, durante el período terciario, y generalmente están asociados a presencia significativa de sílice debido a restos de cenizas volcánicas o a la degradación de rocas clásticas. La acumulación de sílice en ambientes

con abundante presencia de agua propició la formación de las condiciones excepcionalmente aptas para la multiplicación de las diatomeas, las que al morir se fueron depositando sobre el fondo, a manera de una persistente llovizna, perdurando sus esqueletos o frústulas hasta nuestros días.

Como mineral, la diatomita está constituida esencialmente por sílice diatomácea. Este apelativo se explica por las características de la sílice biogénica, que no son comunes a otras formas de sílice natural. En la diatomea, la sílice se encuentra en estado amorfo, hidratada, con un cierto grado de cristalinización. La determinación de la dureza del mineral es complicada, debido a la fragilidad del fósil silíceo de la diatomea (Ballet, 1985).

Las impurezas de la sílice diatomácea son esencialmente compuestos catiónicos como el aluminio y hierro, así como los detritos sedimentarios que acompañaron al mineral durante su periodo de formación. Normalmente, un depósito de tierras diatomáceas de alta pureza contiene entre 86% y 92% de dióxido de silicio (SiO_2) y se consideran excepcionalmente puros si su contenido de SiO_2 es superior al 96%. (Ballet, 1985)

En su aspecto físico, las tierras diatomáceas (o diatomita) se presentan como rocas silíceas sedimentarias de color blanco. Los afloramientos naturales de diatomitas pueden confundirse a menudo con ocurrencia de caolines, dolomita o yeso, pero su carácter único queda de manifiesto al observar el mineral en un microscopio.

La frústula, o esqueleto silíceo de la diatomea, está formada por dos compuertas o valvas en un mismo plano, que encajan a través de un cinto (de forma análoga a como se cierra una caja de píldoras). Las compuertas poseen una rica vertebración que a su vez son soportes de cámaras y aberturas de distintos diámetros. Esta serie de estructuras imbricadas permite clasificarlas como primarias, secundarias o terciarias y la función de éstas, en la diatomea viva, es la de soporte de la membrana celular a través de la cual los nutrientes fluyen por osmosis.

Es posible clasificar a este microorganismo, caracterizando su enorme variedad de especies en función de ciertos ambientes ecológicos precisos que dieron lugar a su formación. Por ejemplo, las especies pertenecientes a la *Synedra ulna* prefieren aguas claras y frías; las *Navícula cincta* viven en ambientes turbios y las *Cyclotella meneghiniana* prefieren ambientes salobres. La importancia práctica es que, en las distintas familias residen individuos con formas y dimensiones muy particulares que le confieren al mineral formado propiedades muy distintas.

En forma generalizada, se puede considerar que en un medio ambiente de aguas salinas va a existir una población de especies grandes, lo cual entregaría una materia prima de calidad apta para elaborar ayudas filtrantes rápidas; en un medio ambiente de aguas frías, claras y dulces se desarrollarían preferentemente especies de dimensiones menores, aptas para elaborar ayudas filtrantes de gran brillantez, pero con razones de flujo menores. En este último caso la distribución granulométrica puede aumentarse mediante una calcinación adecuada de la materia prima en el proceso industrial.

De lo expuesto anteriormente, se concluye que la evaluación más útil de un yacimiento de tierras diatomáceas comprende su ubicación, el conocimiento de la distribución de sus contaminantes y además, un acucioso estudio micropaleontológico. De esta forma se pueden catalogar, con la mayor eficiencia posible, a los distintos yacimientos según su aplicabilidad tecnológica.

1.4 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV)

Todas las técnicas geofísicas intentan distinguir o reconocer las formaciones geológicas que se encuentran en profundidad mediante algún parámetro físico, por ejemplo en *sísmica*, se emplea la velocidad de transmisión de las ondas y en *prospección eléctrica*, se emplea la resistividad.

Existen diversas técnicas geofísicas eléctricas o electromagnéticas que miden ya sea la resistividad o la conductividad de los materiales. En los SEV se delimitan las capas del subsuelo, obteniendo sus espesores y resistividades aparentes. (Sánchez, 2004).

1.4.1 RESISTIVIDAD DE LOS MATERIALES NATURALES

La resistividad en los materiales naturales varía desde 10^{-8} en los metales nativos hasta 10^{15} en micas (perpendicularmente a la foliación). (Sánchez, 2004)

Los valores de la resistividad en una roca están determinados más que por su composición mineralógica, por el agua que contienen, fundamentalmente por la porosidad y por la salinidad del agua (más salinidad implica mayor conductividad).

Todo esto hace que la resistividad de cada tipo de roca presente una gran variabilidad (ver *tabla 1.2*). En general, en el campo encontraremos valores de este orden: (Sánchez, 2004)

Tabla 1.2 Resistividades de algunas rocas naturales

Rocas	Resistividad ($\Omega\text{-m}$)
Ígneas y metamórficas inalteradas	> 1,000
Ígneas y metamórficas alteradas	100 - 1,000
Calizas y areniscas	100 - 1,000
Arcillas	1 a 10
Limos	10 a 100
Arenas	100 a 1,000
Gravas	200 a más de 1,000

Es importante mencionar que en materiales detríticos la resistividad aumenta con el tamaño de grano, por lo tanto, en una investigación hidrogeológica en materiales detríticos, se buscan resistividades elevadas que indican los materiales más gruesos y con mayor permeabilidad.

1.4.2 RESISTIVIDAD APARENTE

Si se introduce una corriente de intensidad I en el suelo en un punto A (ver *figura 1.1*), y mediante la Ley de Ohm se calcula la resistencia R , que se opone al paso de esa corriente un casquete semiesférico de radio r y espesor dr , se obtiene la *ecuación (1-1)*: (Sánchez, 2004)

$$R = \text{resistividad} \frac{\text{longitud}}{\text{sección}} = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \quad \text{Ecuación 1-1}$$

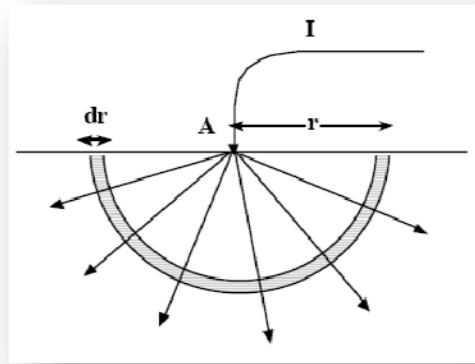


Figura 1.1 Casquete semiesférico formado por una corriente I , en un punto A

Luego se calcula la diferencia de potencial dV combinando la expresión de la intensidad $I = \Delta V/R$ con la *ecuación (1-1)*, dando como resultado la *ecuación (1-2)*:

$$-dV = R \cdot I = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \cdot I \quad \text{Ecuación 1-2}$$

Integrando la ecuación anterior se obtiene la *ecuación (1-3)*:

$$V = \rho \frac{I}{2\pi r} \quad \text{Ecuación 1-3}$$

Para introducir esa corriente, debe existir otro electrodo (*electrodo B*), por lo cual el potencial generado en el punto *M* será igual al producido por *A* menos el producido por *B* (ver *figura 1.2*), lo cual se muestra en la *ecuación (1-4)*:

$$V_M = \frac{\rho \cdot I}{2\pi AM} - \frac{\rho \cdot I}{2\pi BM} \quad \text{Ecuación 1-4}$$

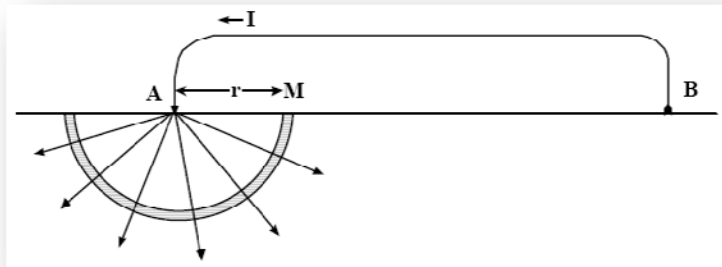


Figura 1.2 Diferencia de potencial en el punto *M*

Pero en la práctica no se mide el potencial en un punto (para eso habría que situar uno de los polos del voltímetro en el infinito) sino que se mide la diferencia de potencial entre dos puntos *M* y *N* como se muestra en la *figura 1.3*:

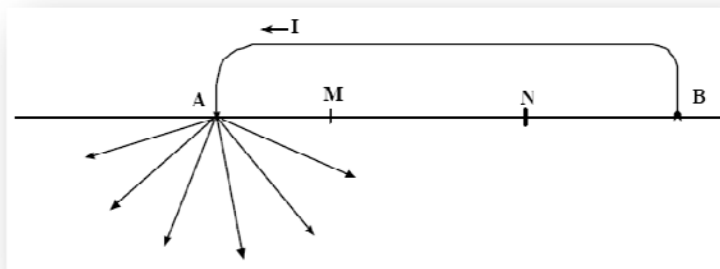


Figura 1.3 Diferencia de potencial en los puntos *M* y *N*

Aplicando la *ecuación (1-4)* al punto *N* resulta la *ecuación (1-5)*:

$$V_N = \frac{\rho \cdot I}{2\pi AN} - \frac{\rho \cdot I}{2\pi BN} \quad \text{Ecuación 1-5}$$

Por tanto, la diferencia de potencial entre M y N se obtiene de la *ecuación (1-6)*:

$$V_M - V_N = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad \text{Ecuación 1-6}$$

Despejando la resistividad ρ se obtiene la *ecuación (1-7)*:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \quad \text{Ecuación 1-7}$$

Simplificando, y llamando K a la segunda fracción, resulta la *ecuación (1-8)* que se utiliza en el campo en cada medida:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \quad \text{Ecuación 1-8}$$

La constante K se denomina *coeficiente geométrico del dispositivo*, porque depende solamente de las distancias entre los cuatro electrodos. Si se trabaja con distancias predeterminadas, los valores de K ya se pueden llevar calculados.

Para deducir la *ecuación (1-8)* no se necesita suponer que los electrodos A , B , M y N estén en una disposición especial, de modo que, para obtener la resistividad del subsuelo se colocan en cualquier posición (ver *figura 1.4*), de esta forma, simplemente hay que dividir la lectura del voltímetro por la lectura del amperímetro y multiplicar por K .

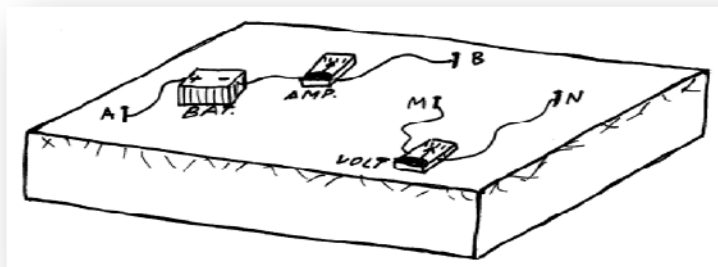


Figura 1.4 Medida de la reactividad aparente con los cuatro electrodos dispuestos de modo aleatorio

El valor de resistividad “ ρ ” obtenido sería la resistividad real del terreno si éste fuera homogéneo, pero es habitual que la ρ obtenida sea una mezcla de las resistividades de diversos materiales, por lo tanto, se denomina *resistividad aparente* (ρ_a).

1.4.3 DISPOSITIVOS ELECTRÓDICOS

En la *figura 1.5* se representan los cuatro electrodos dispuestos aleatoriamente. A pesar de ello, si se aplica la *ecuación (1-7)* obtendríamos correctamente la resistividad del terreno. En el trabajo real, los cuatro electrodos se colocan con una estructura determinada, es lo que se denomina “*dispositivo electródico*”.

Los más utilizados disponen los cuatro electrodos alineados y simétricos respecto del centro, aunque hay otros dispositivos en que no están alineados. Esto se describe mejor en la *figura 1.5*:

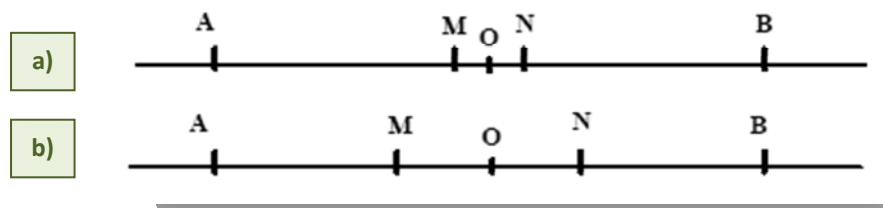


Figura 1.5 Dispositivos electródicos: a) Schlumberger; b) Wenner

En el dispositivo *Schlumberger*, la distancia MN es pequeña en relación con AB, generalmente $AB/5 > MN > AB/20$. En la práctica MN se mantiene tan pequeño como sea posible siempre que se puedan conseguir lecturas correctas del voltímetro. Es por ello que para el dispositivo *Schlumberger*, K de la *ecuación (1-8)* se simplifica a la *ecuación (1-9)*:

$$K = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN} \quad \text{Ecuación 1-9}$$

En el dispositivo *Wenner* (utilizado especialmente en países anglosajones), mantiene idénticas las tres distancias: $AM = MN = NB$, de modo que si se mueven A y B, también hay que mover M y N.

1.4.4 SONDEOS ELÉCTRICOS Y CALICATAS ELÉCTRICAS

Básicamente, existen dos estrategias para deducir la estructura del subsuelo con una serie de medidas sucesivas de ρ_a , éstas son: *sondeos eléctricos* y *calicatas eléctricas*. (Sánchez, 2004)

El *sondeo eléctrico* consiste en mantener el punto central (O) mientras se abre sucesivamente la distancia AB, y así la corriente eléctrica atravesará cada vez una mayor profundidad. Los sucesivos valores de ρ_a que se obtengan corresponderán a profundidades cada vez mayores. Además, si las mediciones se realizan mediante el dispositivo electródico de Schlumberger, la técnica se conoce como *sondeo eléctrico vertical (SEV)*.

En la *figura 1.6* se aprecia que la profundidad de investigación va aumentando según pasamos de AB a A'B' y a A''B''.

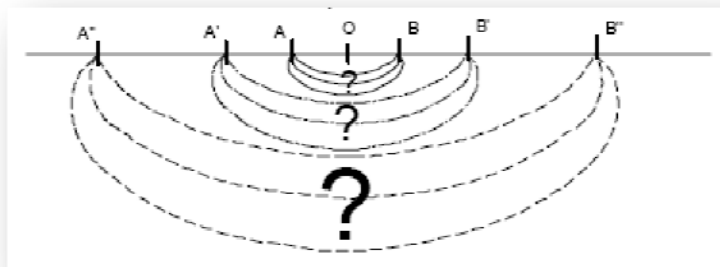


Figura 1.6 Esquema simplificado de un sondeo eléctrico vertical

La *calicata eléctrica* consiste en mantener la apertura AB y desplazar lateralmente todo el dispositivo, de tal forma que la profundidad de la investigación se mantenga

aproximadamente constante y así poder investigar las variaciones laterales del terreno, este procedimiento se describe en la *figura 1.7*:

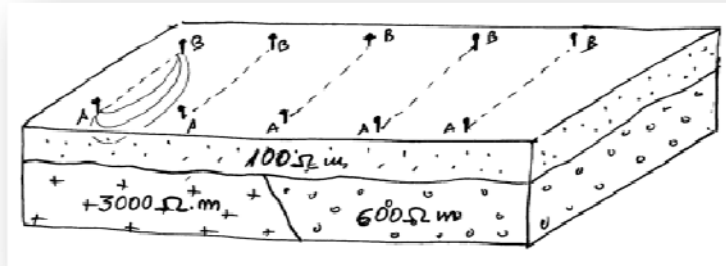


Figura 1.7 Esquema simplificado de una calicata eléctrica

1.5 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

1.5.1 PROCEDIMIENTO PARA ANÁLISIS DE DIFRACTOGRAMAS E IDENTIFICACION DE SUSTANCIAS CRISTALINAS

La identificación de minerales y otros compuestos inorgánicos en fase cristalina, analizados por *Difractometría de Rayos X*, se hace mediante el Método Hanawalt, el cual consiste esencialmente de la definición de los valores de espaciamiento "d" de cada pico que aparece en el difractograma, asignándoles un porcentaje de intensidad relativa y realizando la búsqueda de los picos en la base de datos del American Comitee for Diffraction Data (ACDD). (Universidad de El Salvador, 2003)

Para realizar la primera parte del proceso de identificación se parte del espectro de difracción del cual se obtienen los valores angulares de 2 theta correspondientes a la interferencia constructiva que encuentra el haz de rayos x al incidir sobre la red cristalográfica irradiada. Utilizando la ley de Bragg se transforman estos valores de 2 theta en los valores del espaciamiento interplanar "d" correspondiente a cada sustancia cristalina contenida en la muestra.

Una vez conocidos los valores de "d" que aparecen en la muestra, se procede a realizar una búsqueda utilizando el método Hanawalt el cual consiste en seleccionar los tres picos de mayor intensidad (I_1, I_2, I_3) y buscar sus valores en la base de datos correspondiente y ver si coincide con algún compuesto patrón. Si los tres picos mayores coinciden, se buscan los picos que siguen en intensidad y se toman los que corresponden al compuesto identificado.

En caso que los picos (I_1, I_2, I_3) no coincidan con ningún patrón se buscan nuevas combinaciones por ejemplo (I_1, I_2, I_4) o (I_1, I_3, I_4) o (I_2, I_3, I_4) y se procede de nuevo a la búsqueda hasta encontrar correspondencia con las sustancias patrón definidas en las bases de datos. Por lo general, en las muestras analizadas por difracción se encuentra más de una fase cristalina, por lo tanto, una vez identificado el primer compuesto se marcan los picos correspondientes y se procede a la identificación del siguiente compuesto tomando los picos restantes considerando siempre las intensidades de mayor a menor procediendo de la manera antes indicada y así sucesivamente.

Los patrones de difracción han sido definidos en centros de investigación como el Joint Committee for Powder Difraccion Data, el American Committee for Difraccion Data o en Laboratorios de Difracción de Rayos X en diferentes partes del mundo quienes utilizando sustancias puras de los compuestos químicos o de cristales aislados de los minerales, bajo condiciones controladas y complementados por análisis químicos, han establecido los patrones estándares.

Si se trata de un *material geológico* en el cual se requiere conocer su *composición mineralógica* se utilizan las tablas de identificación de minerales; en caso que sean sustancias cristalinas no caracterizadas como minerales, como es el caso de los productos de incrustación, corrosión o productos industriales inorgánicos, se utilizan las tablas de identificación de compuestos inorgánicos.

1.6 ADSORCIÓN DE MATERIALES

1.6.1 INTRODUCCIÓN A LOS PROCESOS DE ADSORCIÓN

En los procesos de *adsorción*, uno o más componentes de una corriente de gas o de líquido se adsorben en la superficie de un sólido y se lleva a cabo una separación. En los procesos comerciales, el adsorbente generalmente tiene la forma de partículas pequeñas en un lecho fijo, a través del cual se hace pasar un fluido para que las partículas sólidas lo adsorban. Cuando el lecho está casi saturado, el flujo se detiene y el lecho se puede regenerar térmicamente o por otros métodos, de modo que ocurre una “*desorción*”. Así se recupera el material adsorbido (adsorbato) y el adsorbente sólido queda listo para otro ciclo de adsorción. (Geankoplis, 2004)

1.6.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ADSORBENTES

Se han desarrollado muchos adsorbentes para una amplia gama de separaciones. Comúnmente, los adsorbentes tienen forma de pelotitas, pequeñas cuentas o gránulos y las partículas más grandes se usan en los lechos empacados. Una partícula de adsorbente tiene una estructura con numerosos poros muy finos, cuyo volumen alcanza hasta el 50% del volumen total de la partícula. La adsorción suele ocurrir como una monocapa sobre la superficie de los poros, pero a veces se forman varias capas. La *adsorción física* o de *Van der Waals*, por lo general sucede entre las moléculas adsorbidas y la superficie interna sólida del poro, la cual es fácilmente reversible. (Geankoplis, 2004)

El proceso de *adsorción global* inicia cuando el fluido pasa alrededor de la partícula en un lecho fijo; primero se difunde el soluto desde el volumen del fluido hacia toda la superficie exterior de la partícula; luego se difunde el soluto desde el interior del poro hasta la superficie del mismo y finalmente, el soluto se adsorbe sobre la superficie.

Existen varios adsorbentes comerciales y algunos de los principales se describen a continuación:

1. *Carbón activado*. Es un material microcristalino que proviene de la descomposición térmica de madera, cortezas vegetales, carbón, etc. Las sustancias orgánicas generalmente se adsorben con carbón activado.
2. *Gel de sílice*. Este adsorbente se fabrica tratando con ácido una solución de silicato de sodio y luego secándola. Se utiliza principalmente para deshidratar gases líquidos y para fraccionar hidrocarburos.
3. *Alúmina activada*. Para preparar este material se activa el óxido de aluminio hidratado calentándolo para extraer el agua. Se usa ante todo para secar gases y líquidos.
4. *Zeolitas tipo tamiz molecular*. Estas zeolitas son aluminosilicatos cristalinos porosos que forman una red cristalina abierta que tiene poros de uniformidad precisa, por lo tanto, el tamaño uniforme del poro es diferente al de otros tipos de adsorbentes que tienen una gama de tamaños de poro. Las zeolitas se usan para secado, separación de hidrocarburos y de mezclas y muchas otras aplicaciones.
5. *Polímeros o resinas sintéticas*. Se fabrican polimerizando dos tipos principales de monómeros: los que se generan a partir de “compuestos aromáticos” como el estireno y el divinilbenceno, que se usan para adsorber compuestos orgánicos no polares de soluciones acuosas y los que provienen de “ésteres acrílicos”, que se utilizan para solutos más polares en soluciones acuosas.

1.6.3 TIPOS DE ADSORCIÓN

Los fenómenos de adsorción pueden dividirse en:

1.6.3.1 *Fisiosorción, adsorción física o adsorción de Van der Waals*

La *adsorción física o adsorción de Van der Waals*, fenómeno fácilmente reversible, es el resultado de las fuerzas intermoleculares de atracción entre las moléculas del sólido y la sustancia adsorbida; por ejemplo, cuando las fuerzas atractivas intermoleculares entre un

sólido y un gas son mayores que las existentes entre moléculas del gas mismo, el gas se condensa sobre la superficie del sólido, aunque su presión sea menor que la presión de vapor que corresponde a la temperatura predominante. Cuando ocurre esta condensación, se desprende cierta cantidad de calor, que generalmente es mayor que el calor latente de evaporación y parecido al calor de sublimación del gas. La sustancia adsorbida no penetra dentro de la red cristalina ni se disuelve en ella, sino que permanece totalmente sobre la superficie; sin embargo, si el sólido es muy poroso y contiene muchos pequeños capilares, la sustancia adsorbida penetrará en estos intersticios si es que la sustancia humedece al sólido. La presión de vapor en el equilibrio de una superficie líquida, cóncava y de radio de curvatura muy pequeño, es menor que la presión de una gran superficie plana y por consecuencia, aumenta la extensión de la adsorción. En cualquier caso, la presión parcial de la sustancia adsorbida es igual, en el equilibrio, a la presión de la fase gaseosa en contacto; disminuyendo la presión de la fase gaseosa o aumentando la temperatura, el gas adsorbido se elimina fácilmente o se desorbe en forma invariable. Finalmente, la adsorción reversible no se concreta a los gases, también se observa en el caso de líquidos. (Treybal, 1998)

1.6.3.2 Quimisorción, adsorción química o adsorción activada

La *quimisorción o adsorción activada*, es el resultado de la interacción química entre el sólido y la sustancia adsorbida. La fuerza de la unión química puede variar considerablemente y puede suceder que no se formen compuestos químicos en el sentido usual, pero la fuerza de adhesión es generalmente mucho mayor que la observada en la adsorción física. El calor liberado durante la quimisorción es comúnmente grande, muy parecido al calor de una reacción química y el proceso frecuentemente es irreversible. En la desorción, se descubre que la sustancia original ha sufrido un cambio químico porque la misma sustancia, que en condiciones de baja temperatura sufre esencialmente sólo la adsorción física sobre un sólido, algunas veces exhibe quimisorción a temperaturas más elevadas y además, los dos fenómenos pueden ocurrir al mismo tiempo. (Treybal, 1998)

1.6.4 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

La *isoterma de adsorción* es la relación de equilibrio entre la concentración en la fase fluida y la concentración en las partículas de adsorbente a una temperatura determinada. Para el caso de *gases* la concentración viene generalmente dada como fracción molar o como presión parcial; para *líquidos* la concentración se expresa habitualmente en unidades de masa, tales como partes por millón; la concentración de adsorbato sobre el sólido viene dada como masa adsorbida por unidad de masa de adsorbente original. (McCabe & Smith, 1991)

En la *figura 1.8* se presentan algunas formas típicas de isotermas. La "*isoterma lineal*" pasa por el origen de coordenadas y la cantidad adsorbida es proporcional a la concentración en el fluido. Las isotermas que son "*convexas hacia arriba*" se denominan favorables, debido a que puede obtenerse una carga relativamente elevada del sólido para una baja concentración en el fluido.

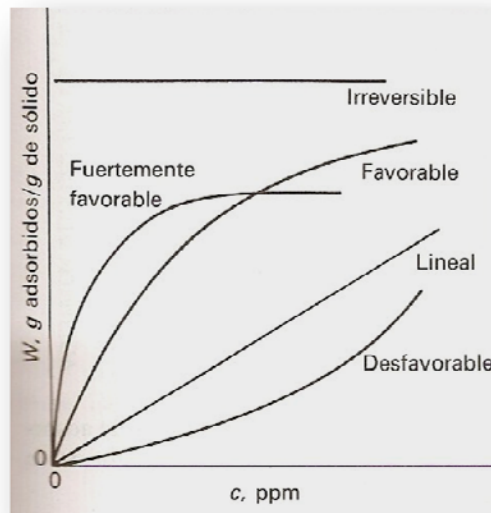


Figura 1.8 Formas típicas de isoterma de adsorción

El caso límite de una "*isoterma muy favorable*" es la adsorción irreversible, donde la cantidad adsorbida es independiente de la disminución de concentración hasta valores

muy bajos. Todos los sistemas presentan una disminución de la cantidad adsorbida al aumentar la temperatura y, por supuesto, el adsorbato puede desorberse aumentando la temperatura, aun para los casos titulados “irreversibles”; sin embargo, la desorción requiere una temperatura mucho más elevada cuando la adsorción es muy favorable o irreversible que cuando las isothermas responden a un modelo lineal.

Una isoterma que es “*cóncava hacia arriba*” recibe el nombre de desfavorable debido a que se obtienen cargas del sólido relativamente bajas y además conducen a largas zonas de transferencia de materia en el lecho. Las isothermas de esta forma son raras pero resultan interesantes para ayudar a comprender el proceso de regeneración. Si la isoterma de adsorción es favorable, la transferencia de materia desde el sólido hacia la fase fluida tiene características similares a las de la adsorción con una isoterma desfavorable.

1.7 REOLOGÍA DE FLUIDOS

La *reología* es el estudio de los principios físicos que gobiernan el movimiento de los fluidos. Las características reológicas de los materiales presentan un espectro de comportamiento continuo, cuyo rango incluye el comportamiento *perfectamente sólido elástico* en un extremo, hasta el *newtoniano* de los fluidos puramente viscosos en el otro. Entre estos dos extremos ideales se encuentra el comportamiento de los materiales reales que incluye *sólidos no-elásticos*, *fluidos no-newtonianos* y *sustancias visco-elásticas*. (Escobar, 2008)

El conocimiento de las características de los fluidos durante su movimiento presenta una ventaja, ya que permite clasificarlo para su mejor uso; por ejemplo, en la *perforación de pozos* la selección y diseño de fluidos puede ayudar a reducir las pérdidas de presión por fricción, para transmitir energía, para disminuir la erosión del agujero a perforar y mejorar la estabilidad de un fluido homogéneo.

En la industria de perforación existen muchos materiales que permiten suministrar viscosidad a los fluidos, éstos varían desde arcillas comunes, hasta polímeros. Debido a las propiedades de los materiales antes descritos, la viscosidad se produce por tres factores: *interferencia mecánica entre partículas, interferencia de la actividad electromecánica entre partículas e interferencia entre partículas y la fase acuosa.*

La manera en cómo se lleva a cabo este fenómeno sucede cuando las cadenas más largas del material tienden a entrelazarse y asociarse unas con otras, para formar sustancias con una resistencia mayor. Cuando al material se le aplica un movimiento de deformación, las cadenas se ven forzadas a desplazarse con respecto a las otras y debido a su tamaño, forma y asociación, tienden a resistir este desplazamiento, lo que da lugar a la “*viscosidad*”, es decir, la resistencia al movimiento.

En la *figura 1.9* se muestran las fuerzas actuando sobre un fluido hipotético. El líquido está limitado por dos placas de un metro cuadrado y separadas por una distancia de un metro. La placa inferior es fija y la superior se desplaza a una velocidad de un metro por segundo. La magnitud de la fuerza necesaria para mantener este movimiento se mide en Newtons [N] (unidades internacionales).

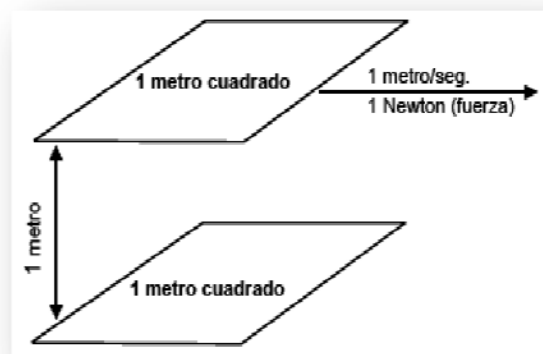


Figura 1.9 Diagrama de definiciones reológicas básicas

El “*esfuerzo cortante*”, se define como la fuerza necesaria para mover una superficie determinada de fluido. En este caso, se necesita un Newton por cada metro cuadrado de

área. Las unidades de esfuerzo cortante son Newtons por metro cuadrado $[N/m^2]$, conocida también como Pascal $[Pa]$.

La “*velocidad de corte*”, se define como la tasa de movimiento del fluido contenido entre dos superficies y se determina dividiendo la velocidad con que se mueven las superficies entre la distancia que las separa; en otras palabras, es la tasa de desplazamiento a la cual una partícula del fluido se mueve con respecto a otra, dividido por la distancia entre ellas. En este caso, se desplazan a un metro por segundo por cada metro de fluido y por lo tanto se mide en segundos recíprocos $(1/s \text{ ó } s^{-1})$.

La “*viscosidad dinámica*” se define como la proporción entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte; por lo tanto, sus unidades son Newton-segundos por metro cuadrado $[N\cdot s/m^2]$ ó Pascal-segundo $[Pa\cdot s]$. Otra unidad común de viscosidad es el Poise $[P]$.

Para la mayoría de los fluidos, la viscosidad no es constante, sino que varía con la velocidad de corte y por ello se les denomina “*fluidos dependientes del corte*”. Casi todos los viscosificantes proporcionan este tipo de fluido. Para evaluar esta dependencia, se mide la viscosidad o el esfuerzo cortante a diferentes velocidades de corte en el mismo viscosímetro; de estos resultados se pueden obtener las constantes reológicas según el “*modelo de Bingham*” o la “*ley de potencia*”. Cuando los puntos se grafican, el resultado se conoce como “*perfil de viscosidad*” como se muestra en la *figura 1.10*.

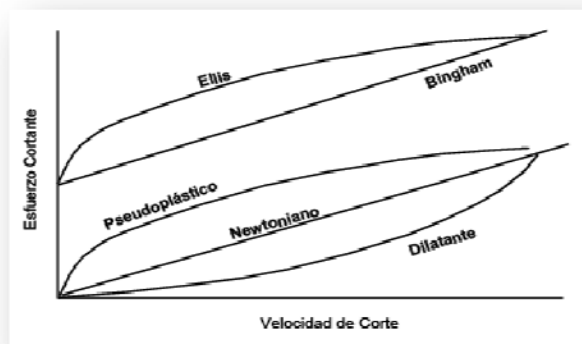


Figura 1.10 *Perfiles ideales de viscosidad*

Los “fluidos no Newtonianos”, son aquellos que no obedecen la ecuación de Newton, donde la viscosidad es una constante independiente de la velocidad cortante. En base al comportamiento de *Esfuerzo cortante/Velocidad cortante*, los fluidos no Newtonianos pueden dividirse en dos categorías principales: a) *esfuerzo cortante independiente del tiempo* y b) *esfuerzo cortante dependiente del tiempo*. Además de su comportamiento anormal en relación con el esfuerzo cortante, algunos fluidos no Newtonianos también presentan características elásticas (*fluidos viscoelásticos*). La clasificación de los fluidos puede observarse en la *figura 1.11*. (Geankoplis, 2004)

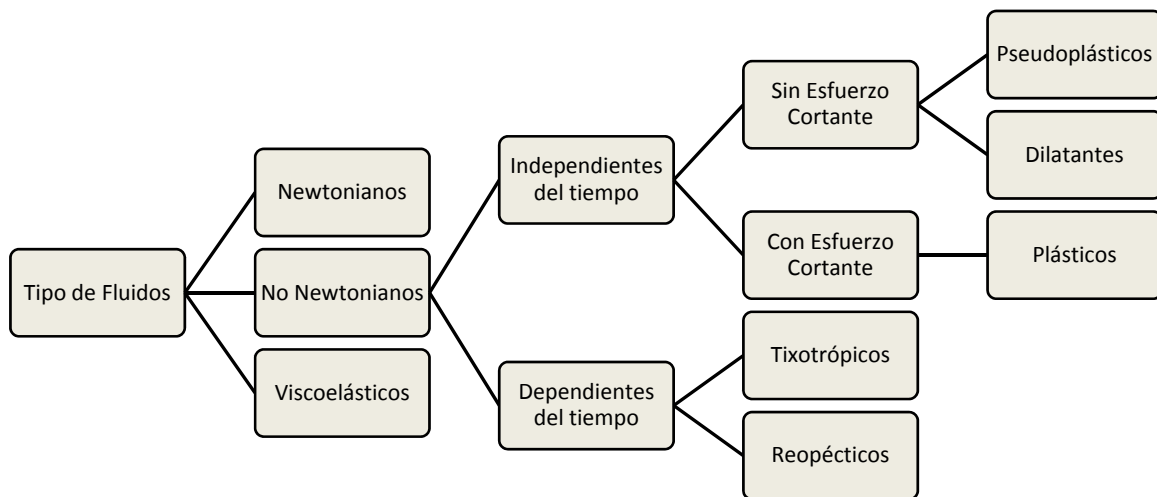


Figura 1.11 Clasificación de los Fluidos no Newtonianos

Los “fluidos independientes del tiempo” que no presentan la necesidad de un esfuerzo cortante mínimo para fluir son: *pseudoplásticos* y *dilatantes*; otros fluidos que necesitan un exceso de cierto esfuerzo constante para fluir son llamados *plásticos*. A los fluidos que presentan una disminución reversible del esfuerzo cortante con respecto al tiempo cuando es aplicada una velocidad cortante constante son llamados *tixotrópicos*, y a aquellos que presentan un aumento reversible de esfuerzo cortante cuando la velocidad de corte es constante son llamados *reopéticos* (ver *figura 1.12*).

Los “fluidos viscoelásticos”, exhiben una recuperación elástica de las deformaciones que se presentan durante el flujo, es decir que muestran propiedades viscosas como elásticas.

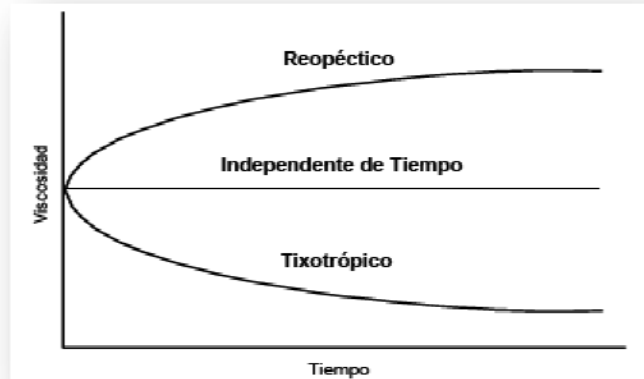


Figura 1.12 Efectos del tiempo sobre la viscosidad

1.7.1 REOLOGÍA DE FLUIDOS PARA PERFORACIÓN

La mayoría de los fluidos de perforación son pseudoplásticos y algunos casos forman suspensiones que se consideran dilatantes. (Geankoplis, 2004)

En ocasiones, un fluido presenta la necesidad de un esfuerzo cortante crítico que se debe exceder antes de que el flujo se inicie, este esfuerzo crítico se denomina “*valor de cedencia*” (*yield value*). Si el fluido de perforación tiene esencialmente características de flujo Newtonianas luego de superar el valor de cedencia, se denomina *fluido plástico de Bingham*, este tipo de fluido se ha usado extensivamente a nivel industrial.

Si un fluido tiene un valor de cedencia y también sigue el modelo pseudoplástico, se le conoce como *fluido de Ellis* y se puede describir por el modelo de Hershel- Bulkley. La *ley de potencia* y el *modelo de Hershel- Bulkley* se han usado para describir soluciones poliméricas.

Existen varios viscosímetros disponibles para medir las propiedades de un fluido. Si se desea medir la viscosidad de una muestra y obtener información sobre parámetros básicos de reología (esfuerzo cortante y velocidad de corte) se debe utilizar uno que opere usando cualquiera de los tres tipos de flujo básicos: *cono y placa*; *Colette* y *capilar*. Los viscosímetros empíricos que no se basan en estos tipos de flujo, se usan con frecuencia

pero la información que proporcionan no se puede reducir a medidas fundamentales de reología.

La aplicación de estos principios a sistemas reales de fluidos no es difícil, se debe tener conocimiento de las propiedades críticas del sistema; por ejemplo, una suspensión diseñada para mantenerse homogénea debe tener suficiente viscosidad a velocidad de corte baja para evitar el asentamiento de los sólidos.

En el caso de las “*suspensiones*”, el objetivo es evitar el asentamiento de las partículas. Las “*emulsiones*”, representan el caso contrario, en el sentido de que se trata de evitar que las gotas de aceite que son menos densas se salgan de la solución. Las espumas representan otro sistema, ya que se trata de evitar que el gas atrapado escape de la fase continua, pero los principios reológicos son los mismos para todos los casos. Sistemas coloidales comunes en la industria petrolera incluyen fluidos que se circulan en operaciones de fracturamiento, perforación, completamiento y reparación. Cada uno consiste de una fase continua (generalmente agua) y una fase dispersa (líquido, sólido o gas).

1.7.2 REOLOGIA DE SÓLIDOS

La adición de un sólido a un fluido provoca la formación de un gel o “*solución coloidal*”. En este contexto, el *gel* se refiere a un fluido que se vuelve semisólido, el cual presenta un comportamiento que cumple con las propiedades de un fluido viscoelástico, debido a la evaluación de la viscosidad del líquido que lo compone y la estructura del sólido. (Escobar, 2008)

La evaluación de las propiedades de los fluidos viscoelásticos puede llevarse a cabo a través de un *viscosímetro rotatorio de cilindro concéntrico*. Un instrumento comercial típico es el viscosímetro de Brookfield; por medio de este instrumento es posible obtener datos experimentales del momento de torsión a diferentes valores de velocidad angular para un fluido determinado, obteniendo así el índice de consistencia “*K*” y el índice de comportamiento de flujo “*n*”, para determinar los valores de esfuerzo cortante.

En la *figura 1.13* se muestra el perfil ideal de un fluido en circulación para lograr la máxima eficiencia. En la mayoría de los casos, el éxito ó fracaso de un fluido depende de su viscosidad en la región de interés. Para maximizar su rendimiento durante la perforación, un fluido debe tener viscosidad mínima dentro de la sarta y a través de la barrena; mientras que, se necesita mayor viscosidad en el espacio anular para limpieza y suspensión.

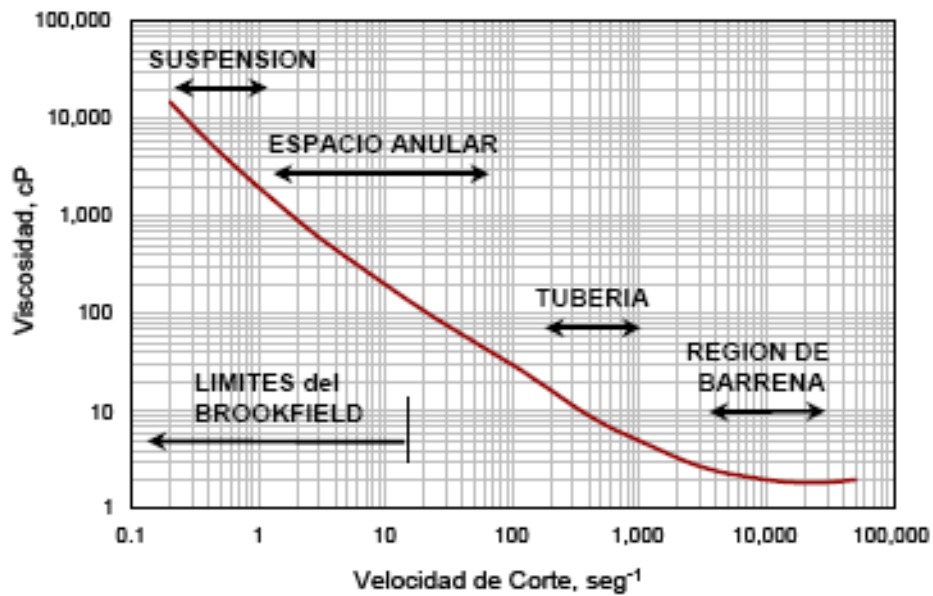


Figura 1.13 Perfil de viscosidad ideal de un fluido en circulación

CAPITULO 2: SELECCIÓN DE LAS METODOLOGÍAS PARA LA INVESTIGACIÓN

2.1 DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

La determinación de los usos industriales más apropiados para las tierras diatomáceas implica, estudiar el comportamiento del material cuando éste es sometido a una serie de pruebas o metodologías de investigación, que permitan establecer las propiedades más relevantes del mismo.

La selección de las pruebas para el material se ha llevado a cabo considerando los posibles usos industriales y las especificaciones necesarias para ser clasificado para dicho uso; por ejemplo, para el uso como *“material refractario”*, las diatomitas deben presentar un alto punto de fusión o bien una estabilidad frente a altas temperaturas; eso demuestra la importancia de determinar las propiedades más relevantes en función de las aplicaciones (ver figura 2.1).

Entre las aplicaciones industriales más sobresalientes de las tierras diatomáceas se puede mencionar su uso como ayuda filtrante, agente transmisor de la adsorción, en operaciones catalíticas, como fuente de sílice; como material abrasivo, estructural, refractario, de aislamiento térmico, acústico, de relleno y absorbente. También debe considerarse el tratamiento previo, que otorgue al material el tamaño de partícula adecuado, así como una composición más rica en sílice. (Ramos, Egüez, Ladines, & Carrión, 2004)

En esta investigación, la elección de las metodologías para determinar el uso de la diatomita contempla la caracterización de sus propiedades a través de siete análisis: a) Físico, b) Mineralógico, c) Químico, d) Granulométrico, e) de Reactividad, f) Físicoquímico de Adsorción y g) de Reometría.

El *“análisis físico”*, consiste en la identificación de las propiedades intensivas del material a partir de un *análisis cualitativo*, para determinar las características que son necesarias

antes de someterlo a pruebas más complejas. Las pruebas que se han considerado son: *composición fósil, diámetro promedio de poro, color, textura y dureza.*

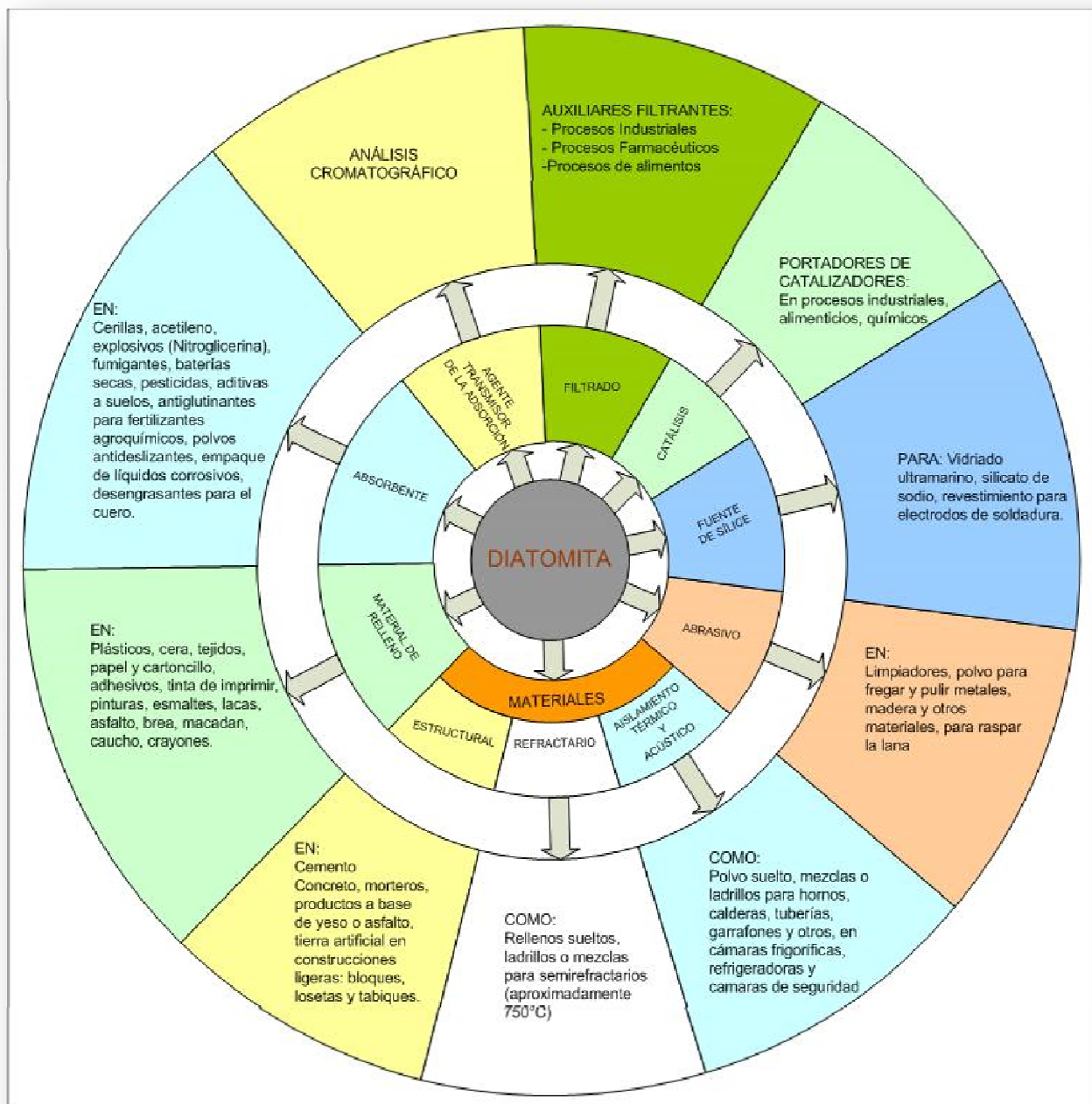


Figura 2.1 Aplicaciones Generales de Diatomitas

Con el “*análisis mineralógico*”, se identifican los minerales específicos que conforman su composición. Por otro lado, el “*análisis químico*”, cuantifica en qué proporción se encuentran los minerales presentes en la muestra. También debe contemplarse el “*análisis granulométrico*”, ya que se utiliza para determinar la distribución de los diámetros de grano del mineral y para calcular la superficie específica de una distribución seleccionada.

La evaluación de la “*reactividad del material*” frente a compuestos corrosivos, se utiliza para indicar si es apropiado su uso como *ayuda filtrante*, especialmente en el área de alimentos. El “*análisis fisicoquímico*” determina el cambio en la velocidad a la cual el material interactúa con su entorno, respecto al área superficial por unidad de volumen para conocer la capacidad de adsorción y retención de sustancias. Finalmente, se analizan las “*propiedades reológicas del material*”, a partir del cambio en la viscosidad respecto al gradiente de concentración, para predecir si el comportamiento de éstos es newtoniano o no newtoniano. (Perry & Green, 2001)

2.2 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL MATERIAL

2.2.1 GRAVEDAD ESPECÍFICA

La evaluación de las propiedades físicas de la diatomita inicia con la determinación de la *gravedad específica (o densidad específica)*. El cálculo de esta propiedad es importante para establecer los procedimientos de manipulación del material, debido a que su clasificación arancelaria se encuentra normada en función de este valor. Su uso como materia prima para la elaboración y fabricación de piezas calorífugas o insonorizantes requiere un pago especial para las harinas de origen silíceo fósil, con *densidad menor que uno*; cuando la *densidad es mayor que uno*, el material es clasificado de manera distinta, sin importar el valor de su densidad. (Secretaría de Integración Centroamericana, 2008)

A nivel industrial, los procesos de transporte de sólidos plantean velocidades de flujo para el transporte por fluidización y el cálculo de estas velocidades de fluidización demanda

conocer el valor de la *gravedad específica* del material. (Foust, Wenzel, Clump, Maus, & Andersen & Bryce, 2001)

2.2.2 RESISTENCIA A ALTAS TEMPERATURAS

Otra propiedad física de gran importancia para la industria es la *resistencia a altas temperaturas*. Debido a que la diatomita posee un alto contenido de sílice, su composición inicial se mantiene considerablemente estable, aún en condiciones de temperatura alta; además, se debe determinar la temperatura a la cual el material cambia su estado de agregación o composición química (*punto de fusión*) y la temperatura a la cual ocurren los cambios en el tamaño de poro (*punto de activación*).

2.2.3 ANÁLISIS DE SUPERFICIE

El *análisis de la superficie* puede generar información morfológica y topográfica que sirve para comprender el comportamiento de las superficies. (Skoog & Holler, 2001). El análisis consiste en determinar los espacios intersticiales que el material presenta (diámetro promedio de poro) y caracterizar el tipo de fósil que conforma al material haciendo uso de un “*microscopio de barrido de electrones*”. En la *ilustración 2.1* se incluyen cuatro ejemplos de esqueletos silíceos de diatomeas.

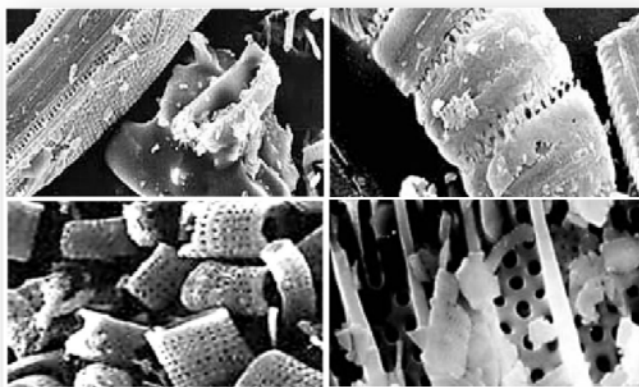


Ilustración 2.1 Diferentes formas de esqueletos silíceos de las diatomeas

La clasificación IUPAC de la *tabla 2.1* se utiliza para clasificar a los materiales en función de su diámetro de poro y se presenta a continuación:

Tabla 2.1: Clasificación IUPAC en función del diámetro del poro

Nombre IUPAC	Diámetro (nm)
<i>Microporo</i>	Inferior a 2
<i>Mesoporos</i>	Entre 2 y 50
<i>Macroporo</i>	Superior a 50

FUENTE: (PERRY'S, 2001)

La superficie fractal es la causa de numerosos efectos que condicionan el comportamiento del sólido como adsorbente; a través del análisis de barrido de electrones es posible determinar su superficie y describir el tipo de poro en función de su disposición con el medio que le rodea (poro abierto o poro cerrado); también es posible mostrar la geometría del poro (como formas cilíndricas, de rendija o hendidura, formas de gota, embudos, entre otros), ya que en base a la geometría se obtiene la información del comportamiento de adsorción esperado.

2.3 EVALUACIÓN DE LA MINERALOGÍA Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL

2.3.1 ANÁLISIS MINERALÓGICO

La diatomita pura está formada por calcita, cuarzo, feldespatos y pequeñas cantidades de componentes inorgánicos asociados como alúmina, hierro, tierras alcalinas, metales alcalinos y otros constituyentes menores como los detritos sedimentarios depositados en el mineral; pero ésta a su vez es un material geológico, que posee una composición que varía en función de los estratos sedimentarios que se formaron junto con ella, por lo tanto, la aplicación de la técnica de “*Difracción de Rayos X*” permite identificar los minerales específicos que están contenidos dentro de la muestra del material en estudio. (Ballet, 1985)

Los resultados que se obtienen después de aplicar esta técnica permiten determinar el valor de la diatomita sin tratamiento, el cual se basa principalmente en la naturaleza de las partículas diatomáceas, contenido de sílice, cuarzo y cristobalita, carbonatos, argellita o impurezas solubles y el grado de compactación del manto o estrato. Estos factores se reflejan en la *densidad aparente*, *capacidad de adsorción*, *friabilidad* y, *conformación petrográfica del manto*. (Ministerio de Energía y Minas de la República del Perú, 2004).

2.3.2 ANÁLISIS QUÍMICO

Para cuantificar la composición química del material de estudio es necesario someterlo a un análisis que proporcione la concentración de elementos puros, con un orden de magnitud que varía desde concentraciones bajas o *partes por billón (ppb)*, hasta concentraciones altas que pueden expresarse en *porcentajes*. En esta investigación, los elementos que se analicen serán aquellos que provienen de los compuestos mineralógicos obtenidos en la *sección 2.3.1*.

Debido a que el grado de aplicabilidad de la diatomita está íntimamente relacionada con la cantidad de sílice, es necesario cuantificar la composición química del material de estudio, y para ello se utiliza la técnica de "*Fluorescencia de rayos X*" que proporciona la concentración de elementos puros. Esta técnica analítica se aplica a diferentes muestras sólidas o líquidas, orgánicas o inorgánicas, tales como minerales, fragmentos de cerámica, arcillas, sedimentos, huesos, textiles, líquidos, entre otros. (Ministerio de Energía y Minas de la República del Perú, 2004) Su uso particular en el área de la geología es para determinar de manera cuantitativa elementos más pesados que el sodio en rocas y suelos. (Skoog & Holler, 2001)

Las impurezas constitutivas de la sílice diatomácea, esencialmente alúmina y hierro, así como los detritos sedimentarios que acompañan al mineral por su origen como deposición, distinguen aún más a la sílice biogénica de otras ocurrencias de minerales de sílice. (Ballet, 1985)

2.4 METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

El *análisis granulométrico* consiste en la medición del tamaño de partículas para comparar la distribución de tamaños de los productos intermedios y finales obtenidos durante el procesamiento de la diatomita (Zuleta, Grasso, & Castro, 2005); además, permite tener las bases para dimensionar operaciones unitarias como *molienda*, *secado*, *filtración*, *crystalización*, *reacciones solido-fluido* y *recolección de polvos*. (Foust, Wenzel, Clump, Maus, & Andersen & Bryce, 2001)

En *ingeniería química*, son de interés las partículas sólidas de tamaños que van desde grandes rocas hasta cenizas. El intervalo de tamaños cubierto varía desde un orden de 10^5 hasta una micra (1 micra = 1/1000 mm). Si el diámetro es muy pequeño deberá de considerarse la influencia de fuerzas de movimiento Browniano.

Dentro de estas partículas sólidas existen tres clases: (Foust, Wenzel, Clump, Maus, & Andersen & Bryce, 2001)

- a) *Partículas individuales*: cuyas propiedades más importantes son tamaño, forma volumen, área superficial y masa.
- b) *Material sólido global*: cuyas propiedades más importantes son conductividad térmica, densidad sólida, calor específico, dureza y tendencia higroscópica.
- c) *Partículas de la fase sólido-hueco de un lecho filtrante*: cuyas propiedades más importantes son fracción vacía de la masa agregada de sólidos y huecos, área superficial por pie cúbico del lecho, conductividad térmica efectiva, permeabilidad (medida de la caída de presión debida al flujo del fluido a través de la masa) y ángulo de reposo (la pendiente de los lados de una pirámide de flujo sólido).

El análisis se lleva a cabo haciendo uso de diferentes números de mallas, por medio de las cuales se puede encontrar la distribución del tamaño promedio de los diámetros del material. Aún cuando es posible realizar otras metodologías como *conteo* y *medición*

directa de partículas y por *separación por sedimentación*, el análisis de mallas es el que se encuentra disponible.

2.5 METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE REACTIVIDAD

Las diatomeas son utilizadas como *ayuda filtrante* y en su aplicación se encuentran expuestas a una gran variedad de fluidos, los cuales son en su mayoría fluidos para usos alimentarios; es por esto que se ve la necesidad de determinar la estabilidad de su composición.

En el análisis de reactividad es necesario que se determine la influencia que tiene la diatomita para modificar el pH de una sustancia, así como determinar la presencia de productos solubles a través de una solución de ácido concentrado; también se debe encontrar la presencia de sustancias como hierro, plomo, mercurio y arsénico para determinar la posibilidad de su uso en la industria de alimentos. (Organismo Internacional de la Viña y el Vino, 2005)

2.6 METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE ADSORCIÓN

La diatomita también ha sido empleada en la industria como un material para la purificación del aire y gases industriales, así como para tratamiento de aguas. Su uso se ha incrementado debido a la capacidad de regeneración que presenta en condiciones de baja temperatura y presión, lo que ha permitido que también se utilice en el área de separación de especies moleculares por adsorción, debido a su coste con respecto a otras metodologías como la destilación.

Los procesos de separación de especies químicas por adsorción son de enorme interés en las industrias y se basan en la retención selectiva de ciertos componentes de una disolución, por medio de un adsorbente que posee un sistema poroso bien desarrollado y lo suficientemente abierto que permite una difusión rápida de la especie adsorbida. En la

separación de los adsorbibles intervienen tanto *condicionamientos estéricos* como *cinéticos*.

El "*mecanismo estérico*" (separación por tamaño molecular) es característico de los adsorbentes microporosos. Este es el mecanismo predominante en procesos industriales. El "*mecanismo cinético*" (separación por diferencia entre las velocidades de difusión de las moléculas) es típico de los tamices moleculares. La *industria petroquímica* emplea métodos de separación por adsorción como alternativa a los métodos de destilación y a menudo, también emplea métodos híbridos que combinan la destilación y la adsorción, consiguiendo así ahorros energéticos del 30-50 por ciento respecto la utilización exclusiva de la destilación.

Otra aplicación importante de la adsorción es la recuperación de especies químicas volátiles, utilizadas como disolventes en un gran número de procesos industriales. El vertido a la atmósfera de esas sustancias generan problemas a la salud y peligros de incendio y explosión; estos problemas se pueden evitar reteniendo dichas especies químicas en un adsorbente adecuado y recuperándolas posteriormente.

Es por eso que, la selección de la prueba ayuda a determinar de manera cualitativa la capacidad de adsorción de una sustancia y al entendimiento de las bases microscópicas de los procesos de adsorción, a través del diseño de una *columna de adsorción a nivel de laboratorio*. Éste es el primer paso para resolver problemas en el área de la separación y purificación de especies químicas y en otras áreas que se pueden incluir bajo la denominación de *catálisis heterogénea*.

Los procesos de difusión a través de sólidos constituyen un método eficaz de separación de sustancias químicas, fundamentalmente de especies moleculares. En cuanto a la *cromatografía*, se utiliza ampliamente tanto en el laboratorio como en la industria, para la separación cuantitativa y la determinación de numerosas sustancias, especialmente por cromatografía de gases y de líquidos a presión elevada.

2.7 METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE REOMETRÍA

Finalmente, se debe realizar el estudio de las propiedades reológicas de un fluido para predecir el comportamiento del mismo en base a los cambios de *viscosidad* con respecto al *gradiente de concentración de la diatomita*, mientras se mantienen constantes los valores correspondientes de *velocidad de corte o de deformación, temperatura y presión*.

La *viscosidad* es una propiedad de los fluidos de gran importancia en múltiples procesos industriales, porque además de ser una variable de gran influencia en las mediciones de flujo de fluidos, el valor de la viscosidad se usa como punto de referencia en la formulación de nuevos productos, facilitando la reproducción de la consistencia de un lote a otro.

A nivel internacional, la referencia a partir de la cual se construye la escala de viscosidad es $1,003.4 \text{ mm}^2/\text{s}$, correspondiente a la viscosidad cinemática del agua, a una temperatura de 20°C; a partir de este valor se construye la escala de medición de viscosidad empleando la técnica conocida como de “*escalamiento sucesivo*”. (Centro Nacional de Metrología de México, 2003)

Dentro de las industrias que requieren modificar las propiedades reológicas de los fluidos están: (SUD_CHEMIE, 2008)

- a) *Industria de colores y barnices*, se utilizan sustancias tixotrópicas y espesantes para sistemas acuosos porque mejoran los colores de impresión, pegamentos, encolantes de separación, artículos cosméticos, productos de limpieza y artículos del hogar.
- b) *Industria de fundición*, las pinturas pueden ser estabilizadas para alcanzar altos espesores de recubrimiento, especialmente en las pinturas a base agua.
- c) *Industria cosmética*, se emplean aditivos reológicos para espesar y estabilizar diferentes productos cosméticos, ya sea que se encuentren en forma de geles acuosos, geles aceitosos o emulsiones, esto produce una sensación agradable en la piel.

d) *Industria de detergentes*, se utilizan agentes reológicos en detergentes líquidos para que se mantengan en suspensión como líquidos abrasivos. También se pueden formular detergentes en forma de gel para hornos eléctricos, baños, etc. que se adhieren y tienen efecto en superficies verticales.

CAPITULO 3: INVESTIGACIÓN DE CAMPO

Para dar inicio a la investigación de campo es necesario dividir el área de interés por zonas, de esta manera, se facilita el desarrollo de las siguientes actividades: (Lahee, 1970)

- a. *Reconocimiento de campo*, es la campaña de identificación de los principales afloramientos del material de interés y los puntos de explotación conocidos por los habitantes del área.
- b. *Elaboración de un perfil estratigráfico*, se debe considerar un espesor mínimo de dos metros que muestre los diferentes estratos y denote sus características principales.
- c. *Recolección de muestras*, se refiere a la búsqueda del material de interés en la zona. Cuando se encuentran afloramientos es necesario especificar su ubicación exacta por medio de un sistema de localización global (GPS) o un mapa a escala.
- d. *Elaboración de perfiles geológicos*, consiste en definir la distribución del material en el área de estudio, se utiliza el espesor de cada estrato para los diferentes puntos de muestreo, los espesores se obtienen a partir de las técnicas de prospección geofísica.
- e. *Presentación de gráficos de distribución del mineral y delimitación del yacimiento*.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO.

El estudio de la mineralogía de una región consiste en determinar el origen de los materiales que la componen y describir, en base a las observaciones durante la etapa de reconocimiento del lugar, los fenómenos geológicos que han provocado su formación litológica. Para comenzar la caracterización, es necesario delimitar el área que se debe analizar y durante las campañas de reconocimiento de la zona de interés, se deben buscar evidencias que permitan la creación de un plan de muestreo en los puntos más representativos, de esta manera, se puede implementar un estudio más detallado donde se involucren todas las herramientas de prospección geológica disponibles.

3.1.1 RECONOCIMIENTO DEL ÁREA EN ESTUDIO PARA LA RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.

El reconocimiento de una región se puede realizar a través de una *prospección geológica*, esta se define como el trabajo geológico sobre el terreno, en otras palabras, es el examen sistemático de una región para obtener información geológica. La *prospección geológica* debe considerar el objetivo del estudio (para identificar y cuantificar el mineral), el sitio de exploración (pantanos, bosques, cuencas, entre otros), así como la disponibilidad de suministros, transporte en el área, los materiales y el equipo geológico disponible para realizar el análisis como: mapas geológicos previos, equipo para realizar sondeos eléctricos y fotografías aéreas. (Lahee, 1970)

El reconocimiento del área puede facilitarse haciendo uso de mapas de ubicación de la zona. Una herramienta utilizada para este fin es el *reconocimiento aéreo*, el cual es un rápido examen de una extensión terrestre desde el aire, este tipo de reconocimiento facilita en gran medida la selección de localidades a explorar.

Otra herramienta es la *fotografía aérea*, también conocida como cartografía aérea o fotogrametría aérea, esta técnica se basa en tomar fotografías de precisión sobre la superficie terrestre y posee además, valiosas aplicaciones en ingeniería civil, industria minera, exploración de territorios, agricultura, selvicultura, control de inundaciones, arqueología, diversas ramas de la geología y geofísica. Estas fotografías pueden ser verticales y oblicuas, poseen una definición uniforme sobre la superficie entera, es decir, los objetivos se ven claramente en cualquier parte de ella.

En El Salvador, a través del Centro Nacional de Registro, se pueden adquirir fotografías aéreas en base a cuadrantes y además, mapas topográficos con resolución de 1:50,000 y 1:25,000; ambas herramientas permiten evaluar la topografía de la zona para seleccionar, de manera anticipada, algunos afloramientos potenciales para la investigación (por ejemplo en quebradas, ríos, calles, planicies, entre otras), es decir, zonas donde es probable encontrar el material expuesto a simple vista.

Es recomendable ubicar habitantes de la zona porque pueden proporcionar información del material y pueden sugerir los posibles lugares donde el material se encuentra expuesto. La identificación de dichos lugares por medio de estas personas permite agilizar la exploración a pie.

Haciendo uso de las herramientas disponibles, se ve la necesidad de realizar un *plan de trabajo geológico de campo*, que consiste en tres etapas principales: (Lahee, 1970)

- a. *Estudio e interpretación de rocas*, consiste en la clasificación de los tipos de roca en el área de estudio, la cual indica el origen geológico y su distribución en el área.
- b. *Fijar y localizar puntos o afloramientos donde se han efectuado observaciones*, lo que significa determinar la ubicación de los lugares donde hay exposición del material de interés para la recolección de muestras.
- c. *La representación de los puntos o afloramientos y otros datos geológicos de interés sobre un mapa*, esta es una herramienta para la interpretación de la distribución del mineral de interés en la zona.

Para realizar las *campañas de prospección geofísica*, es necesario elegir los puntos más representativos para la elaboración de *perfiles lineales*, perfiles a través de los cuales es posible correlacionar, sobre un mapa topográfico, la representación y distribución del mineral en la zona. Esto implica la ubicación exacta, el espesor de la capa expuesta, el ángulo de buzamiento y las altitudes de cada punto.

Los instrumentos necesarios para realizar las *campañas de muestreo* se describen a continuación (ver *figura 3.1*): un sistema de localización global (GPS), una brújula (Brunton) provista de un clinómetro, un monóculo, una cámara fotográfica, un martillo con punta de pico o cincel en un extremo, una lupa (10x mínimo), una navaja, un cuaderno de campo, una tabla sujeta papeles para facilitar la base de apoyo al tomar anotaciones, un lápiz con graduación 2H ó 3H, una regla de 6 pulgadas, cintas para la medición, bolsas de papel o de tela para guardar las muestras, así como herramientas que permitan la

limpieza del área para la extracción de muestras, y una mochila para guardar todos los equipos anteriores. (Compton, 1962)

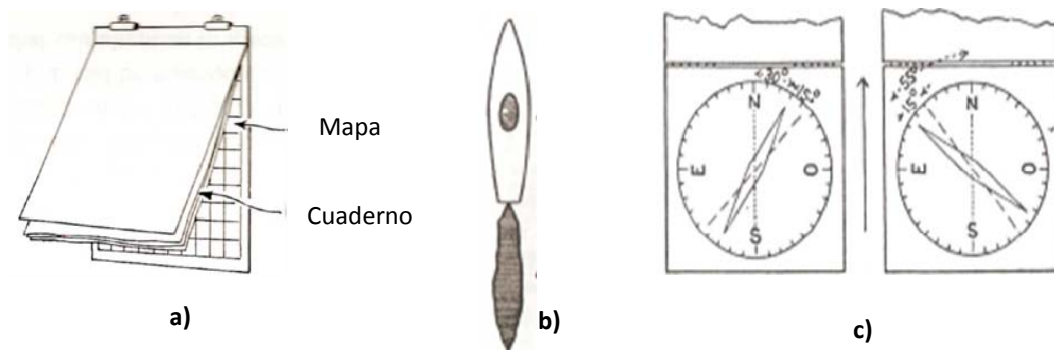


Figura 3.1 Algunos instrumentos para realizar el reconocimiento del área y la toma de muestras: a) Tabla sujeta papeles; b) Martillo con punta de pico; c) Brújula de Brunton con clinómetro

3.1.2 OBSERVACIONES DE CAMPO

Al momento de realizar las *observaciones de campo*, se necesitan ciertos datos generales para registrar, entre ellos podemos mencionar: (Lahee, 1970)

- a. *Localización*: se refiere a la posición de la zona según lo indica el GPS.
- b. *Topografía*: consiste en describir e interpretar la forma del terreno a partir del relieve, la forma, disposición de las tierras altas y bajas, alineaciones, entre otras.
- c. *Petrografía*: se refiere al tipo de rocas presente en el afloramiento, éstas pueden ser *eruptivas o ígneas, sedimentarias y metamórficas*; para cada una se requiere anotar el color, brillo, grano e irregularidades de la superficie, forma, tamaño, disposición, textura, composición mineralógica y cualquier otra característica de relevancia.
- d. *Estructura Geológica*: la cual puede pertenecer a una discordancia, un pliegue, o una falla; en este caso se deben investigar las características específicas de cada estructura debido a la marcada diferencia entre ellas.

En cuanto a las *formaciones litológicas*, es muy importante conocer previamente los aspectos siguientes: *i) Nombre, carácter y edad geológica*, tanto de las que afloran en la región, como las que se encuentran debajo. *ii) Las relaciones estructurales y genéticas*, incluye el espesor aproximado, el buzamiento normal o promedio y su respectiva dirección. *iii) Condiciones topográficas y fisiográficas*.

3.1.3 DELIMITACIÓN DEL ÁREA CON ABUNDANCIA DE MINERAL

Para realizar un perfil geológico es necesario determinar los puntos de observación más adecuados, denominados *afloramientos de roca viva*, los cuales se encuentran comúnmente en precipicios, cimas de colinas, laderas empinadas, ribazos fluviales y costeros, así como las trincheras de los ferrocarriles, carreteras y excavaciones artificiales (pozos y zanjas). (Lahee, 1970)

Una vez ubicados los lugares más adecuados debe hacerse un reconocimiento del área seleccionada, en busca de características particulares como color y división de los estratos, antes de tomar nota alguna.

Cuando la geomorfología de la zona no presenta una distribución continua de material se clasifica como "*afloramiento disperso*"; este afloramiento es muy difícil de rastrear, ya que no tiene una formación sedimentaria horizontalmente uniforme y se corre el riesgo de confundir un estrato con otro por acción de la erosión. Para evitar esto, es necesario realizar el *cartografiado de la zona*, que consiste en monitorear las capas de los estratos y los contactos entre ellos y además, debe mencionar la existencia de las especies de plantas más importantes, la distribución de masas rocosas y la dirección y cuantía del buzamiento de las formaciones sedimentarias. Los *contactos entre los estratos*, son de suma importancia para la construcción de mapas, cortes y diagramas geológicos puesto que permiten descubrir la posición de los afloramientos en el terreno y la representación en un mapa con una precisión lo más adecuada posible.

Los problemas más comunes durante el *análisis de contacto entre los estratos*, se dan en función del origen de dichos contactos, porque pueden darse entre masas sedimentarias, masas de rocas intrusivas (donde no pueda haber una superficie de discordancia) y la relación de una masa intrusiva con respecto a una masa intrusiva. La generación de esta gama de contactos se debe principalmente a la presencia de fallas, ya que al aumentar el número de fallas en la zona de interés también aumenta la superficie de discordancia entre los estratos.

La dirección y buzamiento de los estratos, sirven para determinar la manera de cómo se dispone la estratificación. El *buzamiento* se determina hallando la altitud sobre el nivel del mar o sobre un nivel conocido de puntos distanciados que se toman sobre un estrato u horizonte fijado de antemano. Las técnicas para realizar dicho cálculo dependen del grado de inclinación de los estratos; para inclinaciones menores a 3° se usan métodos barométricos o método de las planchas cuyas estructuras geológicas se representan por un mapa con curvas de nivel; cuando el buzamiento es mayor a 3° se hace uso de clinómetros.

La dirección y buzamiento de un estrato pueden ser afectadas por un cruzamiento de estratos, lo que genera una desviación del valor real, es el caso de los *afloramientos biselados* que se muestra en la *figura 3.2*. Estos afloramientos se dan en ciertas especies de rocas, especialmente en las areniscas algo blandas, la parte superior del afloramiento puede ser biselada por acción de la erosión, de modo que la posición exacta de la parte superior de la capa exterior resulte difícil de determinar.

Los asentamientos en capas producen buzamientos superficiales que no tienen relación con los buzamientos estructurales del depósito debido al deslizamiento, desplomes y asentamientos desiguales de rocas sedimentarias. Generalmente se manifiestan en rocas duras a la intemperie y provocan un buzamiento contrario al verdadero. (Lahee, 1970)

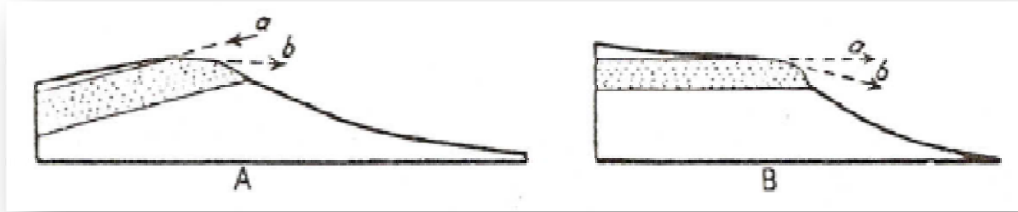


Figura 3.2 Afloramientos biselados que presentan falsos buzamientos

Muchas veces una roca puede parecer semejante a otra, en especial si los buzamientos son pequeños, por ello es importante aprender a correlacionar los afloramientos tomando como referencia, principalmente, los siguientes aspectos: *carácter litológico; expresión topográfica; naturaleza de la vegetación que crece sobre los suelos que la cubren; sucesión estratigráfica; y los fósiles que contienen.*

También es importante considerar la alineación de las capas del material al momento de examinar un afloramiento, al elaborar un mapa de reconocimiento del depósito, o al estudiar una fotografía aérea del mismo.

3.1.3.1 Toma de fotografías

La fotografía también es una herramienta muy importante porque permite registrar muchos rasgos que generalmente se descuidan al tomar las notas de campo. Dos recomendaciones para obtener los mejores resultados de una fotografía son: *capturar la superficie de las rocas en días nublados para evitar sombras en la imagen; y colocar la cámara en una posición que permita incluir objetos verticales sobresalientes como árboles o bordes de acantilados y objetos horizontales sobresalientes como la línea del horizonte.* (Lahee, 1970)

3.1.3.2 Recolección y preparación de muestras

Para complementar la investigación de campo es indispensable la recolección de muestras, las cuales deben ser recientes para evitar su descomposición antes del análisis.

Las muestras deben tener una forma rectangular plana con medidas: 10 cm x 15 cm x 3 cm, o medidas de 8 cm x 10 cm x 3 cm, se puede utilizar el martillo para lograr dichas medidas. (Compton, 1962)

El análisis detallado de una roca en el laboratorio incluye el uso del microscopio petrográfico y un análisis químico. Las muestras deben ser recolectadas en bolsas de papel o tela, para evitar el contacto entre ellas, cada bolsa debe etiquetarse identificando el nombre, número y localidad; además, la muestra debe marcarse para recordar su orientación original dentro de la masa rocosa.

3.2 RECOPIACIÓN DE DATOS DE LA ETAPA DE MUESTREO

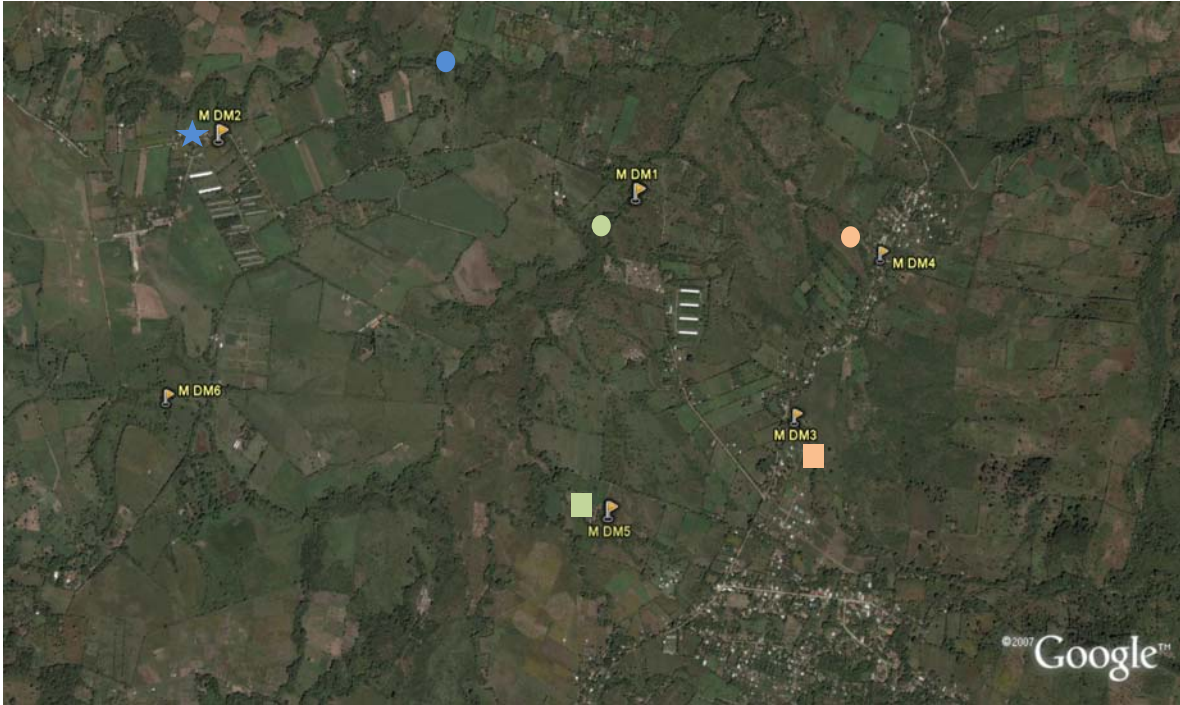
3.2.1 PUNTOS DE MUESTREO

Con la colaboración de los habitantes de la zona y con la exploración de quebradas y calles se han determinado seis puntos de muestreo que se presentan en la *ilustración 3.1*. Esta ilustración es una fotografía del yacimiento, en la cual se aprecian las formaciones geológicas como ríos, vegetación, calles, caminos, construcciones realizadas por el hombre, entre otras. Además, se identificaron los accesos más convenientes a los *afloramientos*, o lugares donde se ha encontrado el material. Cada punto fue nombrado con un código, el cual contiene su orientación, coordenadas y elevación respecto del nivel del mar haciendo uso de un GPS. También se han documentado las características principales como *topografía, petrografía y estructura geológica* de cada punto.

3.2.1.1 Punto de muestreo DM1

a. Localización

Este punto está orientado en dirección NE 43°, en las coordenadas N 14° 05'64.1" / W 89° 36'58.8" y con una elevación de 638 metros sobre el nivel del mar. En la *ilustración 3.2* se puede observar la disposición natural del material para este punto.










PUNTOS DE MUESTREO  RIO A  RIO B  RIO C 
 QUEBRADA "A"  QUEBRADA "B"  CARRETERA "A" 

Ilustración 3.1 Mapa de ubicación de los puntos de muestreo y nomenclatura de puntos de referencia

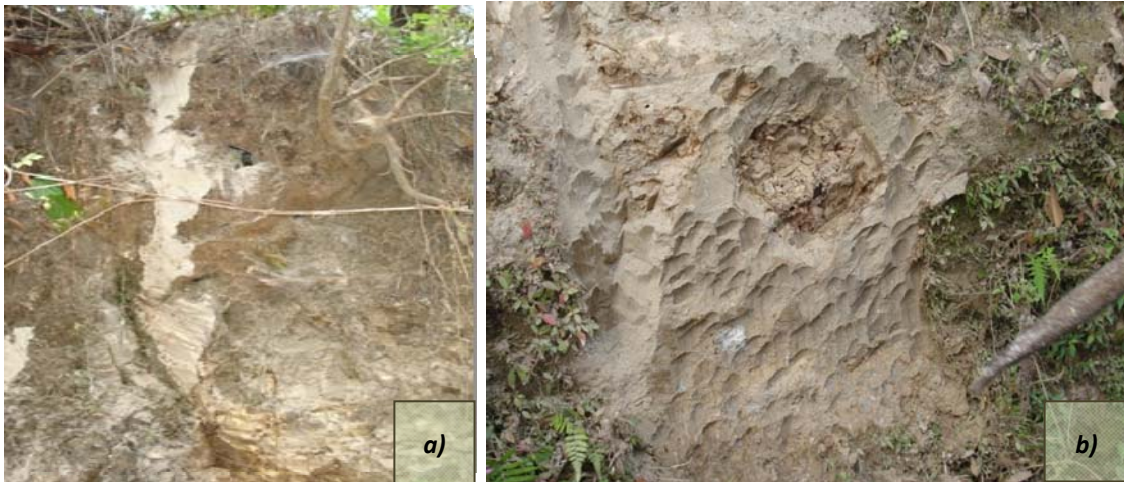


Ilustración 3.2 Disposición del material en el punto de muestreo DM1: a) Estrato de diatomita; b) Interface entre diatomita y bentonita

b. Topografía

El punto de muestreo DM1 se encuentra a 29 metros de distancia del "RIO A" y en el tramo de 19 metros desde la rivera existe una considerable caída de nivel del suelo, con una pendiente aproximada de 2 metros, la cual ha generado deslizamientos de los diferentes estratos, provocados aparentemente por la zona de erosión del río. El perfil estratigráfico de DM1 se esquematiza en la figura 3.3, donde se puede advertir que la presencia de cantos rodados indica antiguas inundaciones o cambios en el cauce del río justificando el cambio de dirección de los estratos en el área. El perfil geológico de DM1 se describe con detalle en la tabla 3.1.

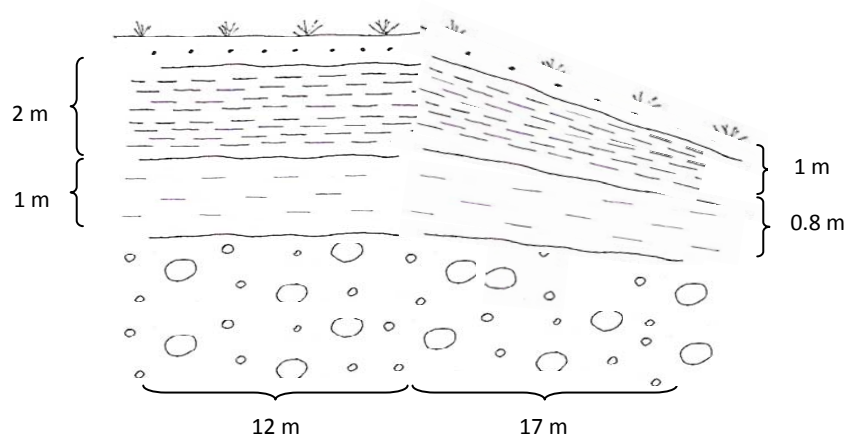


Figura 3.3 Perfil estratigráfico del punto DM1

c. Petrografía

Se identifica que el material es de origen sedimentario y sedimentario organogénico, el cual se presenta en capas, con espesores superiores a un metro y de extensión lateral no determinada, con un bajo grado de consolidación, con una disposición de diatomita en la parte superior y bentonita en la parte inferior. En la tabla 3.1 se distinguen los estratos en función de las características propias del material (color blanco característico) y de su disposición.

Tabla 3.1 Perfil geológico del punto DM1

PERFIL	POTENCIA	DESCRIPCIÓN	COLOR
	Hasta 0,5	Regolito (suelo)	Grisáceo
	Entre 2,0 y 1,0 m	Diatomita impura. A 29 m del río: Potencia de 2 m A 17 m del río: Potencia de 1 m	Blanco mate
	Hasta 1,0 m	Bentonita A 29 m del río: Potencia de 1 m A 17 m del río: Potencia de 0.8 m	Gris claro
	---	"Cascajo" Toba de pómez. No se pudo determinar la potencia m	Café, negro, blanco

La granulometría de la *diatomita* es fina, lo que permite una superficie irregular apilada en bloques de distintos tamaños debido a la vegetación y a los desplomes del material. En la interface ocurre una evidente intercalación de los estratos (lo que cambia sus propiedades), por lo tanto, la textura de la diatomita es más friable en el depósito superior que en el depósito inferior junto a la bentonita.

d. Estructuras Geológicas

En la zona se presentan discordancias debido a la desviación de la rivera del río, el cual ha generado depósitos de cantos rodados en la base de los yacimientos, provocando discontinuidad en los estratos más antiguos. Se estima que esta zona forma parte de una *cuenca antigua* debido a la disposición casi horizontal de los estratos, que tienen su origen a partir de los eventos volcánicos que produjeron una alta concentración de material clástico y permitieron la formación de estratos sedimentarios iniciales ricos en sílice (arcillas y feldespatos). Con el paso del tiempo se ha dado lugar a la formación de estratos de tipo organogénicos, de los cuales proviene la diatomita y debido a subsecuentes episodios volcánicos se presenta un alto contenido de material arcilloso en la superficie (material que se presume se ha mezclado con las diatomitas en los estratos inferiores).

3.2.1.2 Punto de muestreo DM2

a. Localización

El punto de muestreo DM2 está orientado en dirección EO 10°, en las coordenadas N 14° 05'72.5" / W 89° 37'80.4" y con una elevación de 658 metros sobre el nivel del mar. Este punto de muestreo es referenciado a un pozo, la muestra se obtuvo de los restos de su excavación. No fue posible determinar el espesor de los estratos.

b. Topografía

En la topografía del lugar se presenta un relieve llano rodeado por estructuras montañosas con un promedio de 800 a 1000 metros de altura, en la zona resalta la cercanía del "RÍO B", el cual demuestra la existencia de un leve cambio de nivel en dirección a la desembocadura del mismo. Además, este es el punto más bajo de la zona, ya que presenta una altura promedio de 647 metros sobre el nivel del mar. El punto de muestreo está rodeado por vegetación y existen diferentes estructuras realizadas por el hombre.

c. Petrografía

Debido a la poca accesibilidad al punto exacto de extracción de las muestras y a la construcción de una pared en el pozo no se pudo apreciar la disposición de los estratos, sin embargo, se pudo clasificar al material como *roca de origen sedimentario no clástica, de génesis organogénica*, en base a los restos del material de la construcción del pozo y al testimonios de los pobladores. En dicho punto se tiene una disposición en capas con espesores mayores a los dos metros en el caso de la *diatomita* con un grado de consolidación compacto, lo que ha permitido formar un suelo más sólido que en otros lugares de la zona. No hay presencia de la influencia de un río pero sí hay presencia de filtración, puesto que se han identificado grietas de color café y gris en el material. En la *ilustración 3.3* se observa una fotografía de la diatomita obtenida en este punto.



Ilustración 3.3 Roca tomada en el punto DM2

d. Estructuras Geológicas

En la zona se presentan estructuras geológicas que corresponden a la formación San Salvador (Mapa Geológico de El Salvador). El área de estudio presenta una disposición horizontal con leves depresiones.

3.2.1.3 Punto de muestreo DM3

a. Localización

El *punto de muestreo DM3* está orientado en dirección NE 43°, en las coordenadas N 14° 05'08.9" / W 89° 36'11.1" y con una elevación de 663 metros sobre el nivel del mar.

b. Topografía

En la *figura 3.4* se representa el *perfil estratigráfico de DM3* con un relieve de colinas; en este lugar se encuentra una quebrada denominada "QUEBRADA B" con una profundidad de 4 metros y la existencia de conglomerados indica el cambio de cauce de esta quebrada debido a desbordamientos, lo que permite la distribución del material en varias direcciones, formándose capas cuya composición es principalmente una mezcla del material con detritos de granulometría fina y gruesa en algunas secciones, las cuales han consolidado una estructura estable y dura, repartida en toda la rivera de la quebrada. En la *ilustración 3.4* se distingue la disposición natural de los estratos para este punto.

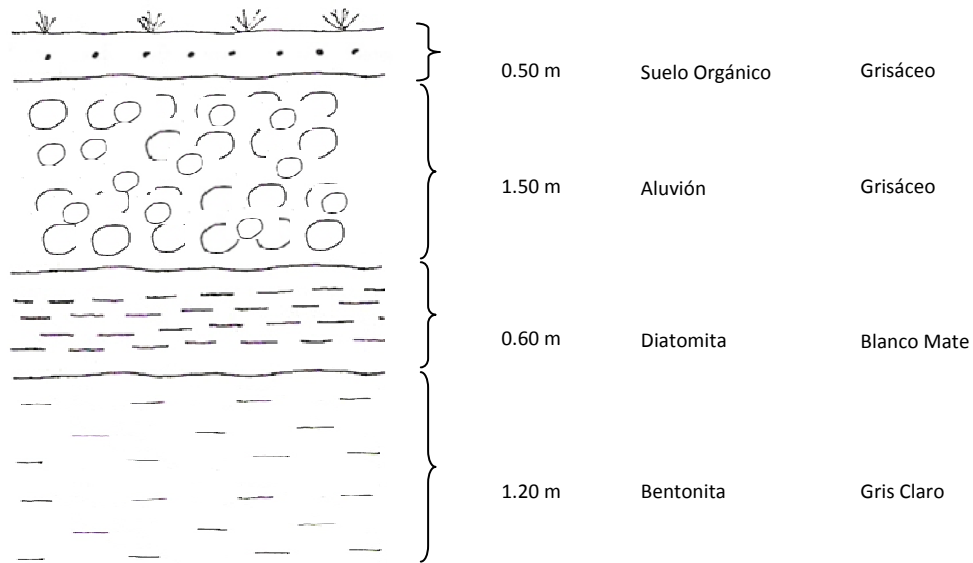


Figura 3.4 Perfil estratigráfico del punto DM3



Ilustración 3.4 Zona de muestreo para el punto DM3

c. Petrografía

A lo largo de la quebrada se encuentra material de granulometría fina mezclado con detritos de fragmentos líticos de medianos a gruesos, lo que ha permitido la formación de conglomerados de diatomita con rocas. El material se localiza en afloramientos dispersos de composiciones variables en el trayecto explorado, el grado de consolidación varía

desde material friable hasta un material más compacto y en algunos puntos se presentan dos capas de diatomita significativamente diferentes en su aspecto.

3.2.1.4 Punto de muestreo DM4

a. Localización

El punto de muestreo DM4 está orientado en dirección NO 10°, en las coordenadas N 14° 05.518' / WO 89° 35.981' y con una elevación de 659 metros sobre el nivel del mar.

b. Topografía

En la topografía del lugar resalta la cercanía del nacimiento de un río, denominado “RÍO C”, el cual se puede visualizar en la *ilustración 3.1*; además, el punto se ubica en las faldas de una loma, a 882 metros sobre el nivel del mar. En la *figura 3.5* se esquematiza la disposición de los estratos.

c. Petrografía

Se identificó el material como *roca de origen sedimentario no clástica, de génesis organogénica*, el cual se presenta en capas, con espesores inferiores a un metro y de extensión lateral no determinada debido a estratificación dispersa, con un grado de consolidación bajo, con una disposición de *diatomita* en el depósito superior y *bentonita* en el depósito inferior.

Debido a la cercanía del nacimiento del “RÍO C”, la distribución del material presenta una interdigitación entre los estratos de tierras diatomáceas y bentonita, lo cual es característico de ambientes sedimentarios próximos a un río (ver *ilustración 3.5*). La granulometría de la *diatomita* es fina, lo que permite una superficie irregular apilada en bloques de distintos tamaños debido a la vegetación y a los desplomes del material.

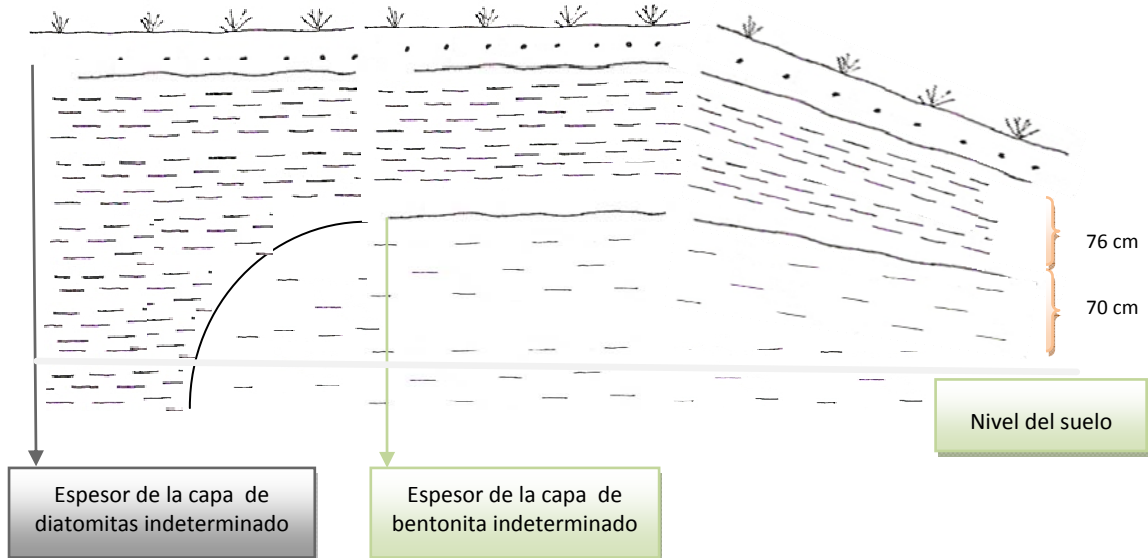


Figura 3.5 Perfil estratigráfico del punto DM4



Ilustración 3.5 Discontinuidad de los estratos en punto de muestreo DM4

d. Estructuras Geológicas

En la zona se aprecian discordancias debido a la influencia del nacimiento del "RÍO C" pero no se encuentran depósitos de cantos rodados en la base de los estratos identificados, solamente ha ocurrido una discontinuidad en los estratos de interés.

3.2.1.5 Punto de muestreo DM5

a. Localización

El punto de muestreo DM5 está orientado en dirección NE 40°, en las coordenadas N 14° 04.881' / W 0 89° 36.560' y con una elevación de 658 metros sobre el nivel del mar.

b. Topografía

En la topografía del lugar resalta la cercanía de la “QUEBRADA A”, lo cual indica la presencia de terrazas formadas por el desbordamiento de la quebrada en época de invierno; este fenómeno ha permitido estancamiento de agua y además, ha provocado infiltración del agua a través del material. En la *ilustración 3.6* se describe con detalle el perfil estratigráfico de DM5.

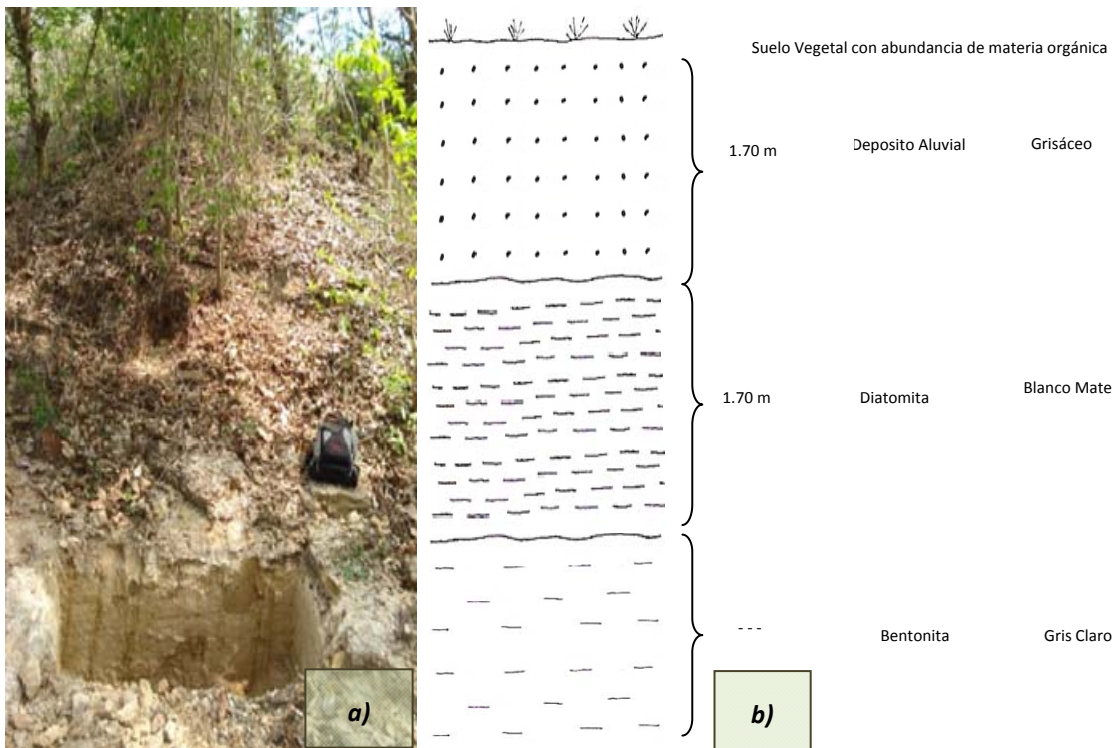


Ilustración 3.6 Disposición de los estratos en punto de muestreo DM5: a) Fotografía real del punto de muestreo; b) Explicación de la formación litológica

c. Petrografía

Las *tierras diatomáceas* encontradas en DM5 se clasifican como de origen sedimentario, de génesis organogénica, las cuales forman capas con espesores superiores a un metro, su

extensión lateral no está determinada y su grado de consolidación es bajo. Debido a la infiltración de agua, el material ubicado en el estrato inferior presenta acumulación de minerales arcillosos, este fenómeno ha producido un cambio de color de la *diatomita* de blanco mate a una tonalidad amarilla.

La granulometría de la *diatomita* es fina, con un grado de compactación moderado en la parte superior del estrato y un grado de cohesión mayor en la parte inferior del estrato. La interface con el mineral *bentonita* no es apreciable (es decir, no aflora).

d. Estructuras Geológicas

La zona de muestreo es una planicie disectada por múltiples quebradas (entre ellas la "QUEBRADA A"), con una leve inclinación debido a que se encuentra muy cerca de las faldas de cerros que presentan una altura promedio de 1000 metros sobre el nivel del mar.

3.2.1.6 Punto de muestreo DM6

a. Localización

El *punto de muestreo DM6* está orientado en dirección N 010°, en las coordenadas N 14° 05.252' / WO 89° 37.756' y en una elevación de 666 metros sobre el nivel del mar.

b. Topografía

En la topografía del lugar se encuentra un relieve llano con abundante vegetación; la zona es dedicada a explotación agrícola y piscícola; la naturaleza del suelo superficial es quebradiza en época seca (formando grietas de desecación) y fangosa en la época húmeda debido a la rica presencia de arcilla; durante todo el año la zona se ve favorecida con la presencia de agua superficial y el agua subterránea emerge a pocos metros de la superficie. En la *ilustración 3.7* se observa la disposición natural del afloramiento.



Ilustración 3.7 Zona de muestreo para el punto DM6

c. Petrografía

Se puede afirmar la existencia de depósitos de arcillas, tierras diatomáceas y bentonitas como depósitos más superficiales; sin embargo, debido a la abundante cantidad de agua superficial no fue posible visualizar el perfil estratigráfico. En la zona se puede advertir un estrato de tierras diatomáceas impuras con un espesor inferior a los dos metros (como consecuencia de la excavación de un pozo y el testimonio del excavador).

3.3 APLICACIÓN DE LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA E INTERPRETACIÓN DE DATOS

Para complementar la caracterización de la zona de estudio es necesario determinar las zonas con mayor concentración del mineral de interés haciendo uso de *técnicas de prospección geofísica* que permitan determinar el espesor de los estratos en los puntos seleccionados utilizando métodos como *sondeos eléctricos verticales (SEV)* y *sondeos eléctricos verticales dipolo-dipolo (SEVDD)*.

A través de la medición de las resistividades es posible generar curvas de prospección llamadas "*curvas patrón*" que por superposición permiten representar las capas que componen el subsuelo del terreno. La curva está compuesta por puntos correspondientes

a cada estación de sondeo individual; estos puntos forman líneas continuas de distancia *MN* llamadas *escalones*, dichos escalones deben suavizarse adecuadamente para poder realizar la interpretación. (Cantos Figueroa, 1974)

Antes de realizar las campañas de prospección geofísica (SEV y SEVDD) se deben considerar dos factores que influyen los resultados:

- a. *Características del terreno*: el terreno debe presentar un comportamiento tal que las discontinuidades en el subsuelo sean horizontales; tampoco deben existir variaciones laterales de resistividad y si es necesario, se deben dibujar las curvas del terreno para tomar en cuenta las posibles desviaciones en los datos a causa de las discontinuidades laterales, fugas de la corriente eléctrica y mal contacto de los electrodos.
- b. *Equipo para efectuar las mediciones*: la ubicación exacta de los puntos de muestreo se obtiene con un sistema GPS; la inducción de una diferencia de potencial se mide con un voltímetro; los cambios de resistividad al paso de la corriente se leen con un miliamperímetro; la inyección de la carga eléctrica se realiza utilizando electrodos de un material homogéneo que permita obtener lecturas uniformes y finalmente, se debe contar con un suministro de energía y una bobina con suficiente cableado.

3.3.1 EQUIPAMIENTO Y METODOLOGÍAS APLICADAS PARA REALIZAR LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

El equipo a utilizar para realizar las campañas SEV consiste en un vehículo todo terreno que permita transportar como mínimo 5 personas (necesarias para manipular el equipo); un equipo *ABEM Terrameter System* (ver *ilustración 3.10*) que incorpora un voltímetro y un miliamperímetro; dieciséis electrodos de cobre y cuatro de acero inoxidable; cableado con protección plástica; una carretilla equipada con una fuente de poder de 12 voltios; un sistema GPS; cintas métricas; radios de banda corta; un téster; almaganas; binoculares y hojas de campo para la recolección de datos.



Ilustración 3.8 Equipo para realizar prospecciones geofísicas

El equipo se utiliza según el tipo de sondeo a realizar (SEV o SEVDD), la diferencia es el tipo de arreglo de electrodos durante la inyección de corriente.

Para la recolección de datos en las *campañas SEV* se requieren hojas de campo que contengan la siguiente información: unidad o departamento, fecha de realización, ubicación, proyecto, responsable, código del sondeo, orientación del sondeo, coordenadas, elevación, número de la lectura efectuada, distancia media entre los puntos de inyección de corriente ($AB/2$), distancia media entre los puntos de diferencia de potencial ($MN/2$), coeficiente geométrico del dispositivo (K) y resistividad aparente (ρ).

Las hojas de campo para la recolección de datos en las *campañas SEVDD* deben contener la siguiente información: unidad o departamento, fecha de realización, ubicación, proyecto, responsable, código del sondeo, orientación del sondeo, coordenadas, elevación, posición del punto de medición para cada perfil, posición del primer punto de inyección de corriente para cada perfil (C_1), posición del segundo punto de inyección de corriente para cada perfil (C_2), posición del primer punto de diferencia de potencial para cada perfil (P_1), posición del segundo punto de diferencia de potencial para cada perfil (P_2), y resistividad aparente (ρ).

3.3.2 RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

Para caracterizar el terreno se realizaron tres *sondeos eléctricos verticales* en el área de interés. El *primer SEV*, se realizó en las cercanías del punto DM1, en dirección paralela a la

rivera del “RÍO A”. El *segundo SEV* se realizó sobre una llanura cercana del punto DM2 y el “RÍO B”. El *tercer SEV* se realizó en las cercanías de la “QUEBRADA A” del punto DM5 (ver *ilustración 3.1*). Los SEV se realizaron sobre terrenos planos, con una inclinación menor a 10°, donde se sabe que la variación de la resistividad se da en dirección lineal, sin variaciones laterales.

Los datos recolectados en las campañas SEV se analizan haciendo uso del programa *IPI2WIN*, un software especializado para la interpretación de datos geofísicos del *Laboratorio de Prospección Eléctrica de Superficies Cercanas, Facultad de Geología de la Universidad Estatal De Moscú*.

A continuación se presentan las tablas de datos de las campañas SEV y sus respectivas *curvas patrón*¹, de las cuales se obtienen los espesores de las capas que componen el subsuelo.

La *tabla 3.2* contiene los datos de los SEV realizados en el punto de muestreo DM1, para distancias entre 1 y 250 metros.

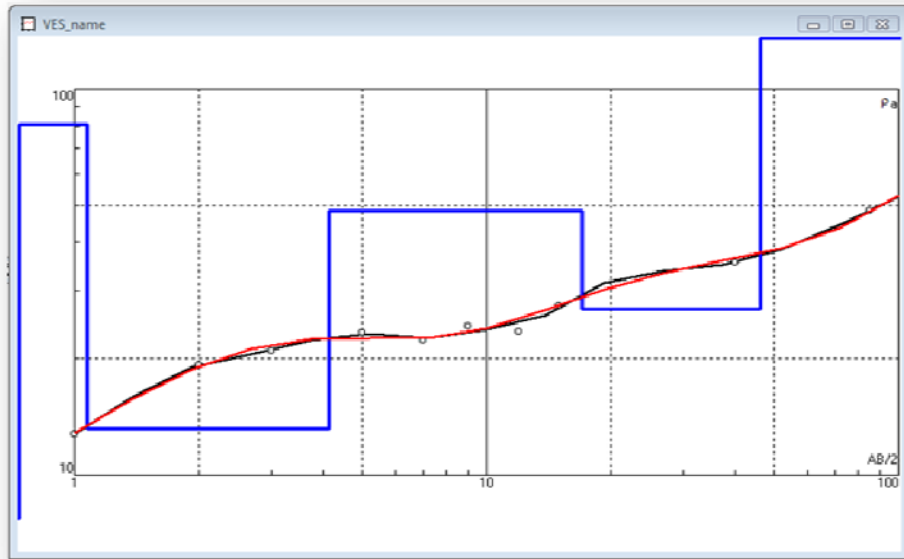
Tabla 3.2 Datos experimentales para los sondeos eléctricos verticales en DM1

AB/2	MN/2	K	ρ (Ω -m)	AB/2	MN/2	K	ρ (Ω -m)
1	0.5	2.36	12.781	60	2.5	2258.03	61.041
2	0.5	11.78	19.231	75	2.5	3530.37	28.957
3	0.5	27.49	20.994	75	10	867.87	27.37
5	0.5	77.75	23.316	85	10	1119.2	48.404
7	0.5	153.15	21.412	95	10	1401.94	18.699
9	0.5	253.68	24.236	110	10	1884.96	240.95
12	0.5	451.61	15.355	130	10	2638.94	37.461
12	2.5	86.55	23.532	150	10	3518.59	134.37
15	2.5	137.45	27.526	150	20	1735.73	74.449
20	2.5	247.4	15.931	175	20	2373.87	220.77
30	2.5	561.56	37.901	200	20	3110.18	572.82
40	2.5	1001.39	35.509	250	20	4877.33	495.43
50	2.5	1566.87	18.152				

¹ Los datos experimentales se representan con color negro.

La *gráfica 3.1* se elabora con los datos de la *tabla 3.2*, dicha gráfica corresponde a las curvas de *resistividad del terreno* contra $AB/2$ para DM1.

Gráfica 3.1 Resistividad del terreno contra $AB/2$ para DM1 a partir de los SEV



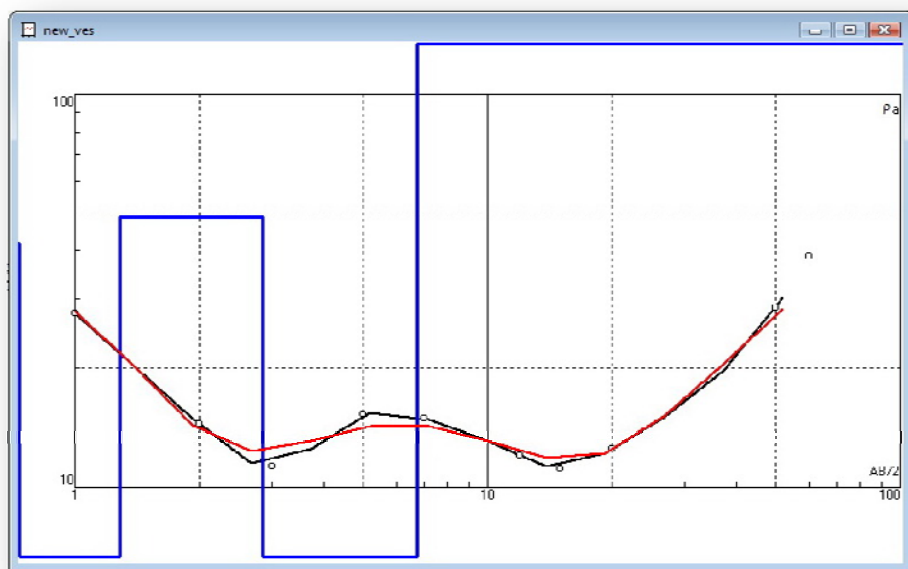
Los datos de los *SEV* tomados en DM2 para distancias entre 1 y 300 metros se muestran en la *tabla 3.3*.

Tabla 3.3 Datos experimentales para los sondeos eléctricos verticales en DM2

AB/2	MN/2	K	ρ (Ω -m)	AB/2	MN/2	K	ρ (Ω -m)
1	0.5	2.36	44.88	60	2.5	2258.03	38.569
2	0.5	11.78	23.41	75	2.5	3530.37	60.81
3	0.5	27.49	18.26	75	10	867.87	32.284
5	0.5	77.75	24.73	85	10	1119.2	7.4358
7	0.5	153.15	24.083	95	10	1401.94	52.983
9	0.5	253.68	8.1906	110	10	1884.96	18.595
12	0.5	451.61	19.563	130	10	2638.94	28.818
12	2.5	86.55	12.08	150	10	3518.59	60.859
15	2.5	137.45	11.135	150	20	1735.73	59.605
20	2.5	247.4	12.499	175	20	2373.87	36.375
30	2.5	561.56	50.478	200	20	3110.18	33.244
40	2.5	1001.39	40.871	250	20	4877.33	28.7
50	2.5	1566.87	28.594	300	20	7037.18	97.033

Las curvas de *resistividad del terreno* contra $AB/2$ para DM2 se presentan en la *gráfica 3.2*, la cual se construye con los datos de la *tabla 3.3*.

Gráfica 3.2 Resistividad del terreno contra $AB/2$ para DM2



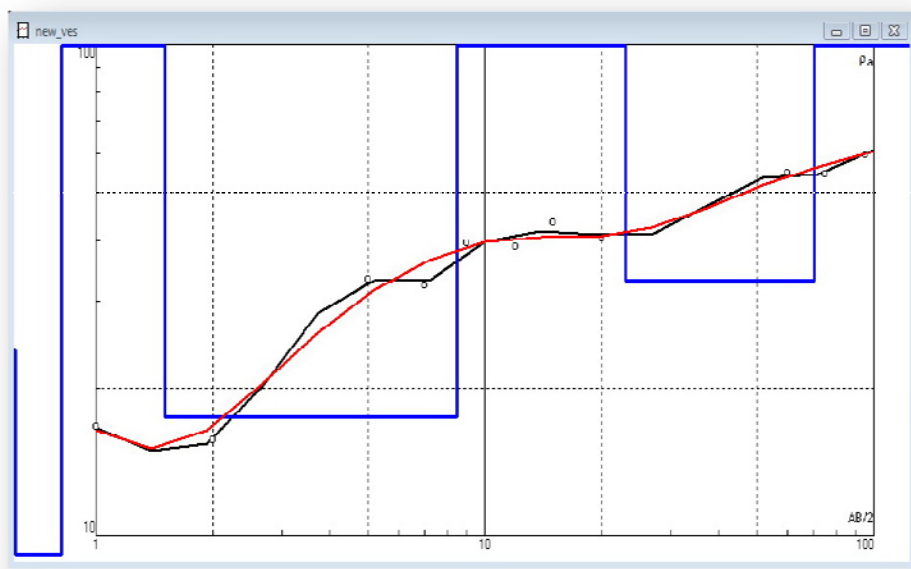
En la *tabla 3.4* se incluyen los datos de los *SEV* efectuados en DM5, para distancias entre 1 y 300 metros.

Tabla 3.4 Datos experimentales para los sondeos eléctricos verticales en DM5

AB/2	MN/2	K	ρ (Ω -m)	AB/2	MN/2	K	ρ (Ω -m)
1	0.5	2.36	12.54	60	2.5	2258.03	48.22
2	0.5	11.78	11.82	75	2.5	3530.37	41.42
3	0.5	27.49	8.85	75	10	867.87	41.2
5	0.5	77.75	25.05	85	10	1119.2	54.6
7	0.5	153.15	24.45	95	10	1401.94	75.99
9	0.5	253.68	29.8	110	10	1884.96	59.75
12	0.5	451.61	30	130	10	2638.94	125.94
12	2.5	86.55	30	150	10	3518.59	65.02
15	2.5	137.45	29.35	150	20	1735.73	54.9
20	2.5	247.4	32.71	175	20	2373.87	17.5
30	2.5	561.56	30.501	200	20	3110.18	437.41
40	2.5	1001.39	33.7	250	20	4877.33	211.28
50	2.5	1566.87	71.74	300	20	7037.18	180.29

En la *gráfica 3.3* se observan las curvas de *resistividad del terreno* contra $AB/2$ para DM5, construidas a partir de los datos de la *tabla 3.4*.

Gráfica 3.3 Resistividad del terreno contra $AB/2$ para DM5



3.3.2.1 Interpretación de datos de las campañas SEV en los puntos DM1, DM2 y DM5

El comportamiento de las resistividades en DM1 de la *gráfica 3.1* muestra varios puntos de inflexión, de los cuales se construyen seis escalones, cuyo origen corresponde a estos puntos; cada uno de los escalones representa de manera gráfica las diferentes composiciones en el subsuelo debido a los cambios en las resistividades. La ventana de diálogo del programa *IPI2WIN* calcula, en base al ajuste de datos sobre el gráfico, los valores respectivos del espesor de los estratos a partir de la superficie (ver *ilustración 3.9*). La simbología de las columnas se describe a continuación: “ ρ ” es la resistividad del estrato, “ h ” es el espesor individual de cada estrato, “ d ” es la distancia relativa a la superficie de la interface del estrato y “ alt ” es la altura relativa a la superficie (profundidad).

N	ρ	h	d	Alt
1	7.749	0.5036	0.5036	-0.5036
2	80.75	0.5672	1.071	-1.0708
3	13.21	3.084	4.155	-4.1549
4	48.25	12.92	17.07	-17.074
5	26.98	29.27	46.34	-46.343
6	270.8			

Ilustración 3.9 Ventana de diálogo del programa IPI2WIN para DM1

Los resultados de los espesores obtenidos de los SEV en DM1 indican que el *estrato superficial primario* es de 0.50 m; el *estrato secundario* es de 0.60 m (un tipo de suelo más compacto), sin embargo, es posible catalogarlo como parte del estrato superficial; el *estrato terciario* que se interpreta como *diatomita*², tiene 3.084 m; y el último estrato identificado como *bentonita*, tiene 12.9 m.

El comportamiento de las resistividades en la *gráfica 3.2* evidencia una significativa fluctuación en la regresión de los datos, que afecta los valores correspondientes a profundidades superiores a 20 m, en cambio los datos con profundidades menores a 20 m presentan una correlación con menor grado de fluctuación y con puntos de inflexión bien definidos, lo que permite interpretar cinco estratos en la *ilustración 3.10*.

Los resultados de los espesores obtenidos de los SEV en DM2 indican que el *estrato superficial primario* es de 0.60 m, lo que implica un grado de compactación más alto que en DM1 debido a que el sondeo se ha realizado sobre una carretera donde transitan vehículos (se espera que las capas subsecuentes cercanas a la superficie presenten un grado de compactación menor); el *estrato secundario* es de 0.6 m y una resistividad de 4.03 Ω -m, que corresponde a materiales de origen sedimentario; el *estrato terciario* que se interpreta como *diatomita*, tiene 3.9 m y su grado de compactación es mayor en

² El espesor obtenido corresponde al valor máximo mencionado en el estudio de la *misión geológica alemana*, que denota un valor de 4 m para este mineral.

comparación al estrato de diatomita analizado en DM1; el último estrato identificado como *bentonita*, tiene un espesor de 10 m.

N	ρ	h	d	Alt
1	41.6	0.623	0.623	-0.6233
2	4.03	0.664	1.29	-1.287
3	48.7	1.57	2.86	-2.859
4	2.46	3.9	6.76	-6.76
5	2143	10.2	17	-16.97
6	2143			

Ilustración 3.10 Ventana de diálogo del programa IPI2WIN para DM2

En la *gráfica 3.3* se observa una correlación bien definida para los valores de resistividad más cercanos a 50 m de profundidad, además, se puede identificar la presencia de abundante agua subterránea; finalmente, en la ventana de diálogo de la *ilustración 3.11* se aprecian siete estratos, generados a partir del análisis de sus respectivos espesores, de los cuales cinco son los más significativos.

N	ρ	h	d	Alt
1	23.9	0.5	0.5	-0.5
2	3.39	0.316	0.816	-0.8161
3	416	0.688	1.5	-1.504
4	17.4	6.97	8.47	-8.473
5	136	14.6	23.1	-23.06
6	33	47.2	70.3	-70.26
7	415			

Ilustración 3.11 Ventana de diálogo del programa IPI2WIN para DM5

Los resultados de los espesores obtenidos de los SEV en DM5 indican que el *primer estrato* posee una resistividad de 23.9 Ω -m y un espesor de 0.50 m, además, se mantiene seco y desquebrajado debido a la cantidad de arcillas presentes (su composición no está determinada); el *segundo estrato* tiene un espesor de 0.30 m y su conductividad de 3.39 Ω -m debido al contenido de humedad, ya que el agua subterránea modifica las propiedades de conducción eléctrica del suelo y disminuye la resistencia al flujo de corriente; el *tercer estrato* corresponde a un depósito conformado principalmente por cantos rodados en una matriz de granulometría fina, su grado de humedad es más bajo debido al grado de compactación de sus componentes, su resistividad es de 416 Ω -m y su espesor es de 0.7 metros; el *cuarto estrato* se identifica como *diatomita* y presenta una humedad mayor, lo cual ha provocado una disminución en la resistividad hasta un valor de 17.4 Ω -m, su espesor es de 7 m; en el *quinto estrato* se encuentra una clase de arcilla con espesor de 14.6 m. La fluctuación general de los datos se adjudica a diferentes episodios de erosión periódica, detectados a través de los SEVDD que se explican más adelante.

3.3.3 RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES DIPOLO – DIPOLO

Los *sondeos eléctricos verticales dipolo – dipolo (SEVDD)* difieren respecto a los *sondeos eléctricos verticales* practicados en la sección anterior, y esta diferencia consiste en el tipo de arreglo de los electrodos, el cual genera dos polos de cargas contrarias. El arreglo *dipolo – dipolo* también utiliza la resistividad del subsuelo y emplea un dispositivo electródico de Wenner, tal como se mostró en la *figura 1.5-b*.

El arreglo dipolo – dipolo se ejemplifica en la *figura 3.6*, donde se muestra que los electrodos C_1 y C_2 se utilizan para inyectar corriente, éstos deben ser ubicados en la superficie y conectados a una fuente de energía. La intensidad de corriente se mide con un amperímetro conectado en serie. La medida de las diferencias de potencial se lleva a cabo mediante electrodos independientes P_1 y P_2 ubicados también en la superficie y

conectados a un voltímetro. El equipo que se muestra en la *ilustración 3.1* también se utiliza para realizar las campañas SEVDD. (Cáceres & Vera, 2005)

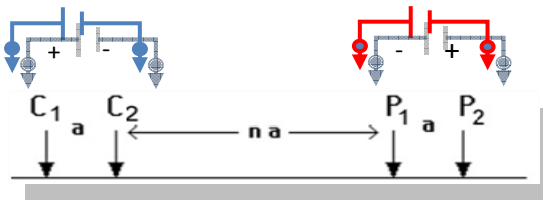


Figura 3.6 Dispositivo eléctrico de Wenner para el arreglo dipolo-dipolo

La distribución de los estratos del suelo en el terreno utilizando arreglos dipolo – dipolo se obtiene a partir de un conjunto de *perfiles de resistividad* (ver *figura 3.7*). Cada perfil puede construirse realizando un SEV equiespaciado y finalmente, los resultados se muestran en dos dimensiones relacionando cada uno de los SEV con los datos de profundidad obtenidos en el campo, correspondientes a los espesores de los estratos y su respectiva resistividad.

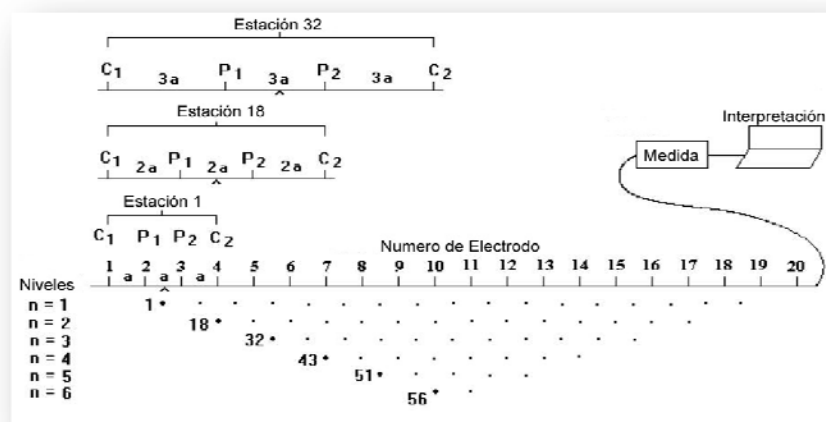


Figura 3.7 Conjunto de perfiles para el arreglo dipolo – dipolo

3.3.3.1 Interpretación de datos de las campañas SEVDD en los puntos DM1, DM2 y DM5

Para describir cualitativamente la distribución de los materiales en los principales estratos que componen el subsuelo del yacimiento, es necesario realizar tres *sondeos eléctricos verticales dipolo - dipolo* en el área próxima a las zonas de muestreo DM1, DM2 y DM5, ya que en estos lugares se realizaron los *sondeos eléctricos verticales* (ver *sección 3.3.2*).

Los datos recolectados en las campañas SEVDD se analizan por medio del programa SURFER, otro software especializado para la prospección de datos geofísicos como IPI2WIN. Para efectuar una mejor interpretación de la solución de este problema se debe aplicar la “*técnica de inversión de datos*”, el procedimiento implica resolver el *problema geofísico inverso* y luego el *problema geológico*; por lo tanto, la solución detallada está fuera del alcance de este documento porque constituye un problema geofísico que debe ser resuelto por expertos en el área.

En las *tablas 3.5, 3.6 y 3.7* se presentan los datos de las campañas SEVDD, en las cuales se incluyen las distancias de los electrodos C_1 , C_2 , P_1 y P_2 junto a las resistividades obtenidas para elaborar las gráficas de *distribución estratigráfica aproximada* de los tres puntos de muestreo.

Los colores en las *gráficas 3.4, 3.5 y 3.6* simbolizan un valor cero de resistividad cuando los círculos son azules y un valor máximo de resistividad cuando los círculos son blancos. La tendencia de los colores aumenta a medida se aumenta la profundidad y la cercanía con la quebrada.

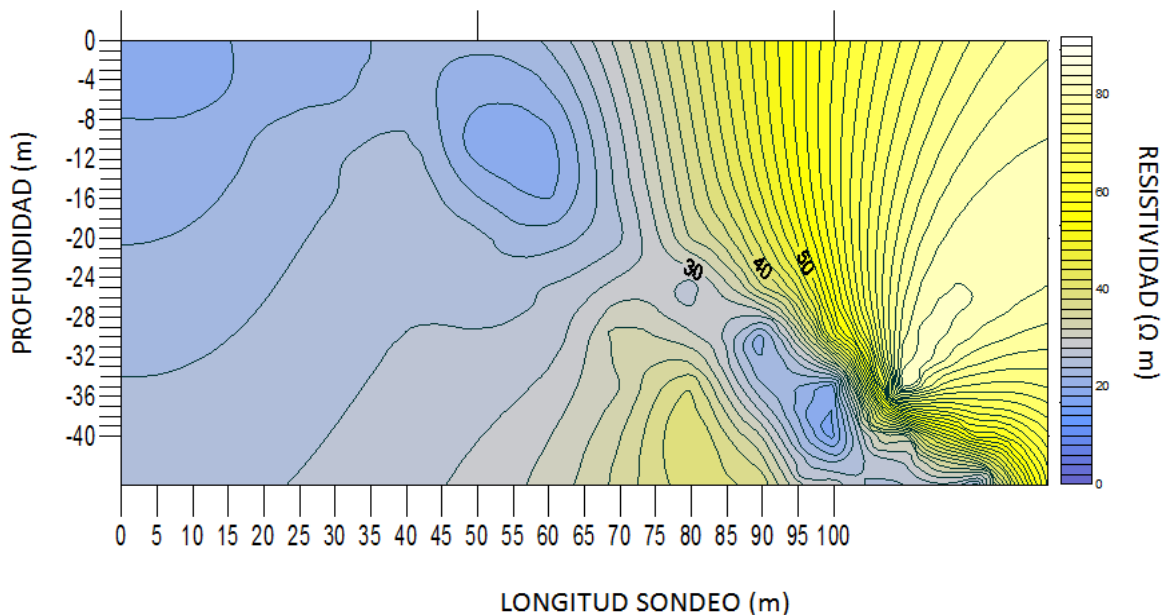
Los estratos analizados en la *gráfica 3.4* presentan un comportamiento en capas bien definido desde el inicio del sondeo hasta los primeros 55 metros de potencia (profundidad), y a partir de los 55 metros en adelante se encuentra una quebrada (ver *tabla 3.5*); también se observa una serie de círculos azules que interfieren con el comportamiento horizontal constante de los estratos, estos círculos representan una posible formación de conglomerados debido a cantos rodados, es decir, una combinación de partículas sólidas muy grandes con granos finos (los conglomerados se depositan en las riveras de ríos o quebradas debido a la velocidad del agua), estas litologías son testigos de sucesos antiguos que describen la formación de esta quebrada de manera gradual; finalmente, las discontinuidades en los estratos de DM1 se pueden interpretar como una interrupción en el área del sondeo debido a la acción de la erosión, o como un fenómeno producido por fallas superficiales que han modificado la topografía del lugar. Es muy

probable asegurar que las discontinuidades se deben a las fallas superficiales, ya que la zona tiene un volcán antiguo extinto.

Tabla 3.5 Datos obtenidos a partir de los SEVDD en DM1

C ₁ (m)	C ₂ (m)	P ₁ (m)	P ₂ (m)	ρ -a (Ω m)	C ₁ (m)	C ₂ (m)	P ₁ (m)	P ₂ (m)	ρ -a (Ω m)
0	5	10	15	19.6	40	45	50	55	21
0	10	20	30	22.4	40	50	60	70	19.3
0	10	30	40	23.8	40	50	70	80	26.8
0	10	40	50	25.7	40	50	80	90	34.5
0	10	50	60	25.2	40	50	90	100	38.2
0	10	60	70	26.8	40	50	100	110	50.1
0	10	70	80	31.7	40	50	110	120	85.1
0	10	80	90	40	40	50	120	130	57
0	10	90	100	37.6	40	50	130	140	60.5
5	10	15	20	19.9	50	60	70	80	17.3
10	20	30	40	23.8	50	60	80	90	13.6
10	20	40	50	25.9	50	60	90	100	17.2
10	20	50	60	24.8	50	60	100	110	9.9
10	20	60	70	26.3	50	60	110	120	13.6
10	20	70	80	33.3	50	60	120	130	28.5
10	20	80	90	38.1	50	60	130	140	28.1
10	20	90	100	31.9	50	60	140	150	6.3
10	20	100	110	29.7	60	65	70	75	15.6
20	25	30	35	21.3	60	70	80	90	25.5
20	30	40	50	24.3	60	70	90	100	25.6
20	30	50	60	21.5	60	70	100	110	30.7
20	30	60	70	23.1	60	70	110	120	51.3
20	30	70	80	28.9	60	70	120	130	7.6
20	30	80	90	30.5	60	70	130	140	3.2
20	30	90	100	24	60	70	140	150	-27.8
20	30	100	110	17.1	60	70	150	160	-34.9
20	30	110	120	26.1	70	80	90	100	23.9
30	40	50	60	18.5	70	80	100	110	28.2
30	40	60	70	19.2	70	80	110	120	48.5
30	40	70	80	25.5	70	80	120	130	12.3
30	40	80	90	26.5	70	80	130	140	-113
30	40	90	100	20.4					
30	40	100	110	18.4					
30	40	110	120	32.5					
30	40	120	130	22.7					

Gráfica 3.4 Estratificación aproximada en el área de influencia DM1 a partir de los SEVDD

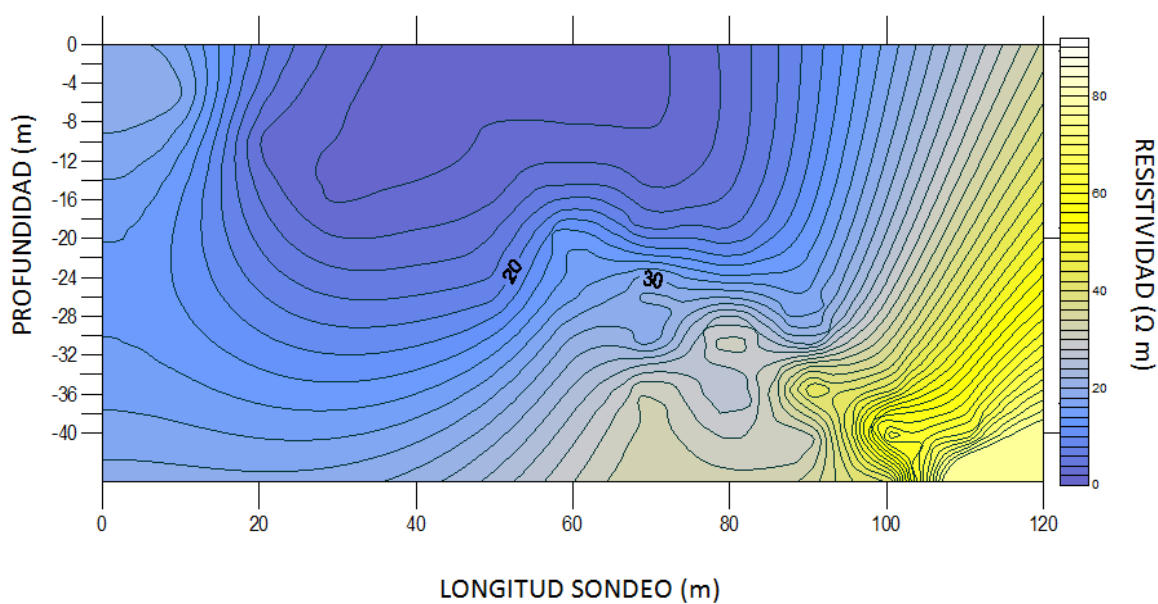


En la gráfica 3.5, elaborada utilizando los datos de la tabla 3.6, se presentan múltiples estratos; sin embargo, la distribución de la resistividad es muy similar al sondeo en DM1 a medida que aumenta la profundidad. Cuando se analizan las resistividades de las profundidades comprendidas entre 0 y 24 metros, se aprecia la influencia del grado de compactación proporcionado por una carretera y la cercanías de una zona urbanizada, también se puede evidenciar que las resistividades de algunas capas superficiales son mayores que las resistividades de capas más profundas, especialmente, cuando se observan las coloraciones claras a profundidades cercanas a la superficie (zonas compactas de mayor resistencia). Para una profundidad mayor de 24 metros, los estratos muestran un comportamiento en capas (característico en estratos de origen sedimentario) desde el inicio del sondeo hasta aproximadamente 60 metros de longitud transversal (eje horizontal), después de los primeros 60 metros del sondeo se generan algunas perturbaciones provocadas posiblemente por fallas en la zona.

Tabla 3.6 Datos obtenidos a partir de los SEVDD en DM2

C1 (m)	C2 (m)	P1 (m)	P2 (m)	$\rho -a (\Omega m)$	C1 (m)	C2 (m)	P1 (m)	P2 (m)	$\rho -a (\Omega m)$
0	5	10	15	30.9	20	30	50	60	13.2
0	10	20	30	13.6	20	30	60	70	26.6
0	10	30	40	11.3	20	30	70	80	34.1
0	10	40	50	14.5	20	30	80	90	45.7
0	10	50	60	18.6	20	30	90	100	58.6
0	10	60	70	32.2	20	30	100	110	79.2
0	10	70	80	44.8	20	30	110	120	106.1
0	10	80	90	41.6	30	40	50	60	12.6
0	10	90	100	46.9	30	40	60	70	16.3
10	20	30	40	12	30	40	70	80	18.6
10	20	40	50	12.3	30	40	80	90	28.3
10	20	50	60	16.4	30	40	90	100	30
10	20	60	70	26.7	30	40	100	110	53.6
10	20	70	80	28.3	30	40	110	120	76.3
10	20	80	90	36.4	30	40	120	130	102.5
10	20	90	100	41.4	40	50	60	70	12.6
10	20	100	110	50.6	40	50	70	80	13.9
20	30	40	50	11.1	40	50	80	90	18.5

Gráfica 3.5 Estratificación aproximada en el área de influencia DM2 a partir de los SEVDD



La *gráfica 3.6* se construye con los valores de la *tabla 3.7*, en ella se distinguen múltiples estratos bien definidos, lo que indica una formación sedimentaria de los mismos. Cuando se examina el comportamiento de la resistividad para profundidades comprendidas entre 0 y 36 metros, se ve la influencia de la cantidad de agua que hay en la zona porque la capa superficial tiene una resistividad más alta que las resistividades que presentan las capas más profundas del sondeo. La superficie presenta grietas en la época seca; sin embargo, se ha encontrado material húmedo en el fondo de una quebrada, ubicada sobre la superficie a 130 metros desde el inicio del sondeo (en época seca). Para una profundidad de 60 metros, los estratos se comportan en capas desde el inicio del sondeo hasta aproximadamente 130 metros (eje horizontal).

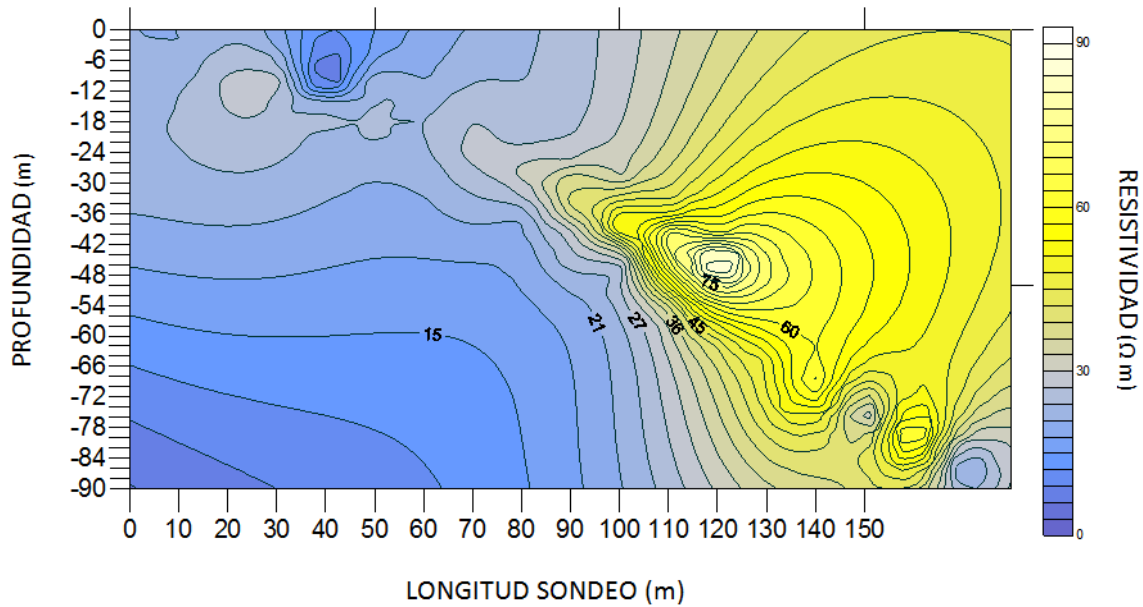
Tabla 3.7 Datos obtenidos a partir de los SEVDD en DM5

C1 (m)	C2 (m)	P1 (m)	P2 (m)	$\rho -a (\Omega m)$	C1 (m)	C2 (m)	P1 (m)	P2 (m)	$\rho -a (\Omega m)$
0	5	10	15	21.1	20	30	100	110	51.7
0	10	20	30	27.8	20	30	110	120	67.8
0	10	30	40	25.9	30	40	50	60	23.7
0	10	40	50	22.8	30	40	60	70	23.5
0	10	50	60	21.8	30	40	70	80	27.6
0	10	60	70	21.5	30	40	80	90	29.8
0	10	70	80	22.8	30	40	90	100	39.8
0	10	80	90	20	30	40	100	110	50.8
0	10	90	100	26.3	30	40	110	120	71.5
10	20	30	40	28.9	30	40	120	130	95.4
10	20	40	50	27.4	40	45	50	55	16.3
10	20	50	60	25.1	40	50	60	70	20.8
10	20	60	70	23.2	40	50	70	80	26.1
10	20	70	80	25	40	50	80	90	24.1
10	20	80	90	22.5	40	50	90	100	28.7
10	20	90	100	27.7	40	50	100	110	33.6
10	20	100	110	24	40	50	110	120	45.6
20	30	40	50	1.81	40	50	120	130	60.2
20	30	50	60	24.2	40	50	130	140	69.1
20	30	60	70	23.9	50	60	70	80	24.2
20	30	70	80	28.1	50	60	80	90	23.7
20	30	80	90	30.7	50	60	90	100	26
20	30	90	100	39.2	50	60	100	110	26.5

Tabla 3.7 (Continuación) Datos obtenidos a partir de los SEVDD en DM5

C1 (m)	C2 (m)	P1 (m)	P2 (m)	ρ -a (Ω m)	C1 (m)	C2 (m)	P1 (m)	P2 (m)	ρ -a (Ω m)
50	60	110	120	35	70	80	140	150	44.3
50	60	70	80	24.2	70	80	150	160	54.3
50	60	80	90	23.7	70	80	160	170	69.9
50	60	120	130	45.1	80	85	90	95	9.89
50	60	130	140	48.3	80	90	100	110	10.9
50	60	140	150	65.1	80	90	110	120	14.1
60	65	70	75	15.79	80	90	120	130	17.9
60	70	80	90	19.4	80	90	130	140	14.9
60	70	90	100	20.5	80	90	160	170	15.8
60	70	100	110	19.3	80	90	170	180	18
60	70	110	120	22	90	95	100	105	9.9
60	70	120	130	26.3	90	100	110	120	11.9
60	70	130	140	23.2	90	100	120	130	16.1
60	70	140	150	27.8	90	100	130	140	5.5
60	70	150	160	27.8	90	100	140	150	7.9
70	80	90	100	15.2	90	100	150	160	9.2
70	80	100	110	17	90	100	160	170	12.2
70	80	110	120	22.1	90	100	170	180	14.1
70	80	120	130	30.2	90	100	180	190	30.7
70	80	130	140	33.1					

Gráfica 3.6 Estratificación aproximada en el área de influencia DM5 a partir de los SEVDD



3.3.4 CONSTRUCCIÓN DE LA CUENCA

La construcción de la *cuenca* se ha llevado a cabo mediante el uso de las curvas de nivel correspondientes a los mapas topográficos de la zona (a través de esta información fue posible determinar los puntos más bajos), además, se ha hecho uso de las alturas calculadas para los diferentes estratos en las campañas SEV y también se utilizaron los resultados de los SEVDD para determinar si en realidad se trataba de yacimientos de origen sedimentario y así evidenciar la continuidad de los estratos.

En la *ilustración 3.12* se muestra un mapa de la zona de interés junto a las curvas de nivel, generadas por medio del programa *SURFER* tomando como base *perfiles lineales* trazados sobre mapas de la zona. La ilustración permite apreciar que la cuenca está formada por círculos concéntricos que se desvanecen a medida se alejan de las zonas más altas; dentro del área de influencia de la cuenca se observan dos círculos bien definidos, estos círculos pueden representar *dos sub-cuencas menores* que se encuentran a 643 y 645 metros sobre el nivel del mar, respectivamente. Haciendo uso de la *ilustración 3.5* también es posible asumir que el diámetro del edificio principal de la cuenca ronda los 4 kilómetros de longitud; se define como *cuenca principal* porque en esta área se ha logrado identificar el material. Probablemente el depósito abarque hasta una distancia de 5 o 6 kilómetros desde el punto más bajo encontrado en el área, aunque no se ha determinado ningún depósito del material a estas distancias a pesar de haber realizado una exploración en quebradas y ríos; por lo tanto, la extensión territorial que se analiza en este documento se limita a 4 kilómetros, porque no se puede afirmar que el fenómeno de sedimentación de la diatomita haya ocurrido a distancias superiores.

El análisis del depósito y su contenido aproximado de material se ha calculado haciendo uso del programa *SURFER*; para ello, se ha considerado que los estratos presentan continuidad lineal (característica de los depósitos sedimentarios) y que los límites de la cuenca se encuentran a lo largo del edificio sedimentario en la zona de influencia determinada. Los resultados correspondientes al área superficial y volumen de cada una de las capas se muestran en la *tabla 3.8*.

Tabla 3.8 Parámetros de dimensionamiento de la cuenca por medio del programa SURFER

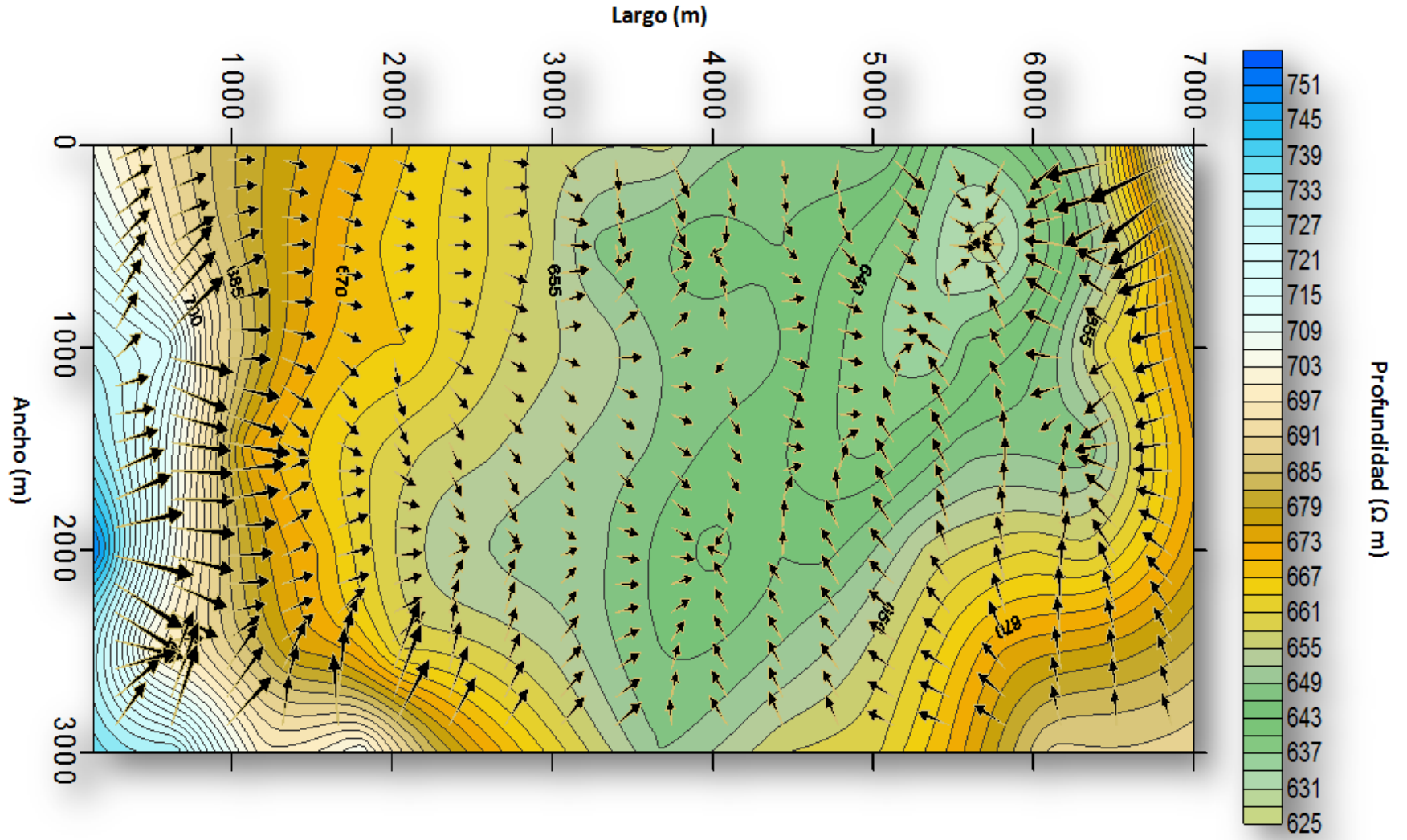
CAPA	Área Superficial	Volumen	Volumen Total
Capa de Suelo superficial	11,850,000 m ²	6,298,793 m ³	6,298,793 m ³
Capa de Suelo secundario	11,850,000 m ²	5,563,202 m ³	11,861,995 m ³
Capa de Mineral diatomita	11,850,000 m ²	38,789,715 m ³	50,651,710 m ³
Capa de Mineral Bentonita	11,850,000 m ²	139,046,694 m ³	189,698,404m ³

Cuando se realiza un análisis de las pendientes de la cuenca es posible determinar cómo se da el flujo de agua a través de todo el edificio sedimentario que la compone. Con ayuda del programa *SURFER* se ha elaborado la *gráfica 3.7*, en la cual se incluyen los vectores de dirección del flujo de agua precipitada. Al comparar esta gráfica con la *ilustración 3.12* se observa que los vectores apuntan hacia la trayectoria de los actuales ríos, esto demuestra sin lugar a duda la presencia de una antigua laguna de sedimentación.

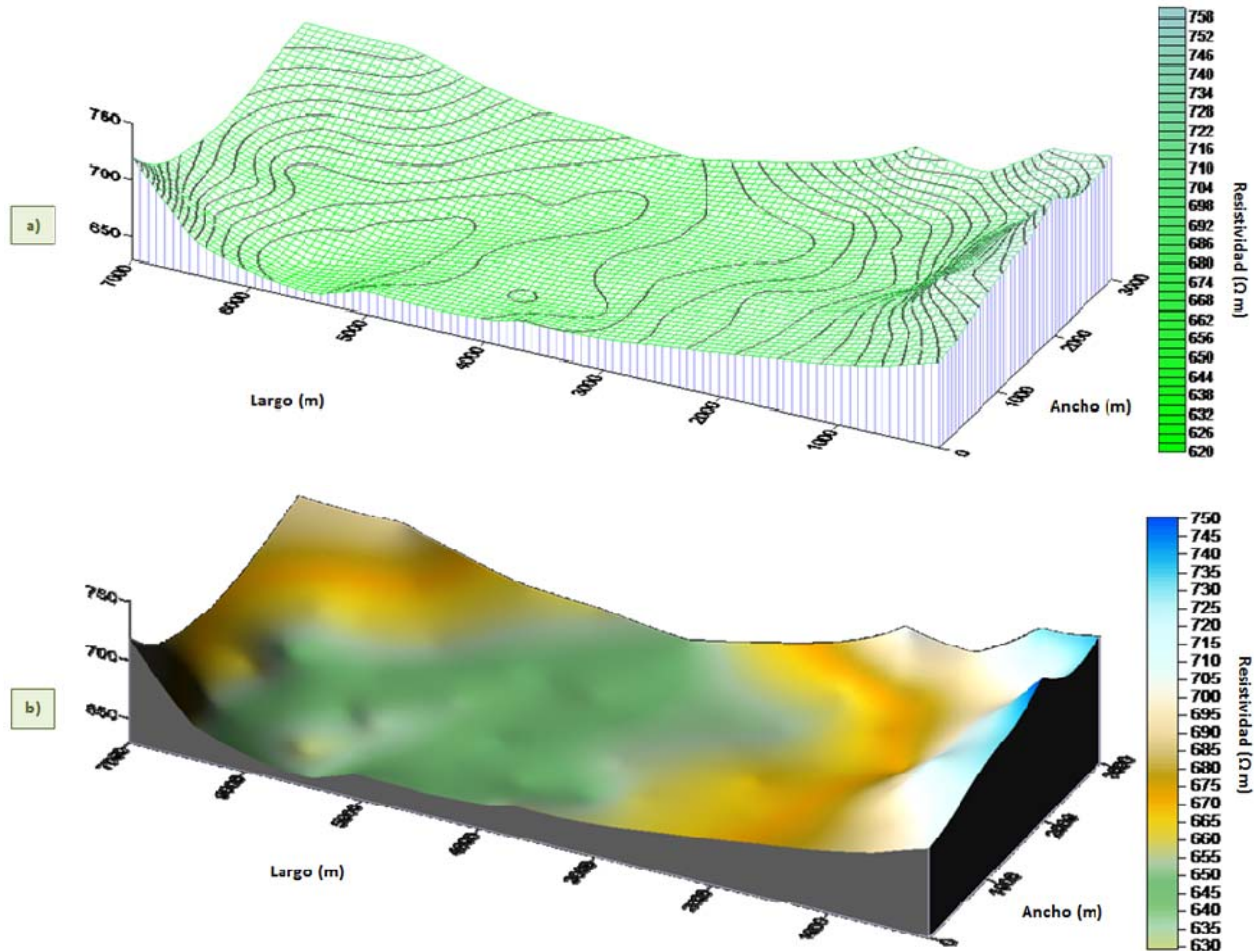
Una vez definida la extensión de la cuenca y su cubicación (volumen) se debe generar el edificio sedimentario en tres dimensiones. Con ayuda del programa *SURFER* se ha elaborado la *ilustración 3.7* y además, se distinguen las curvas de nivel presentadas anteriormente en la *ilustración 3.12* y la *gráfica 3.6* (ver *gráfica 3.8-a*); también se incluye la *gráfica 3.8-b* que indica el grado de profundidad con colores.

Para comprender de mejor manera el tipo de formación sedimentaria encontrada en la zona se han esquematizado las capas que componen la cuenca en función de las alturas determinadas por medio de los SEV. La *gráfica 3.9* se ha construido mediante el uso del programa *SURFER* y contiene una serie de planos que representan cada una de las interfaces de mineral en las capas de mineral. La *primera capa*, se refiere al suelo o superficie expuesta al aire; *la segunda capa*, es la interface entre el suelo con influencia de la vegetación (en algunos lugares hay abundante arcilla); *la tercera capa*, es la interface del suelo con el mineral diatomita y *la cuarta capa*, representa la interface entre la bentonita y el otro material no determinado.

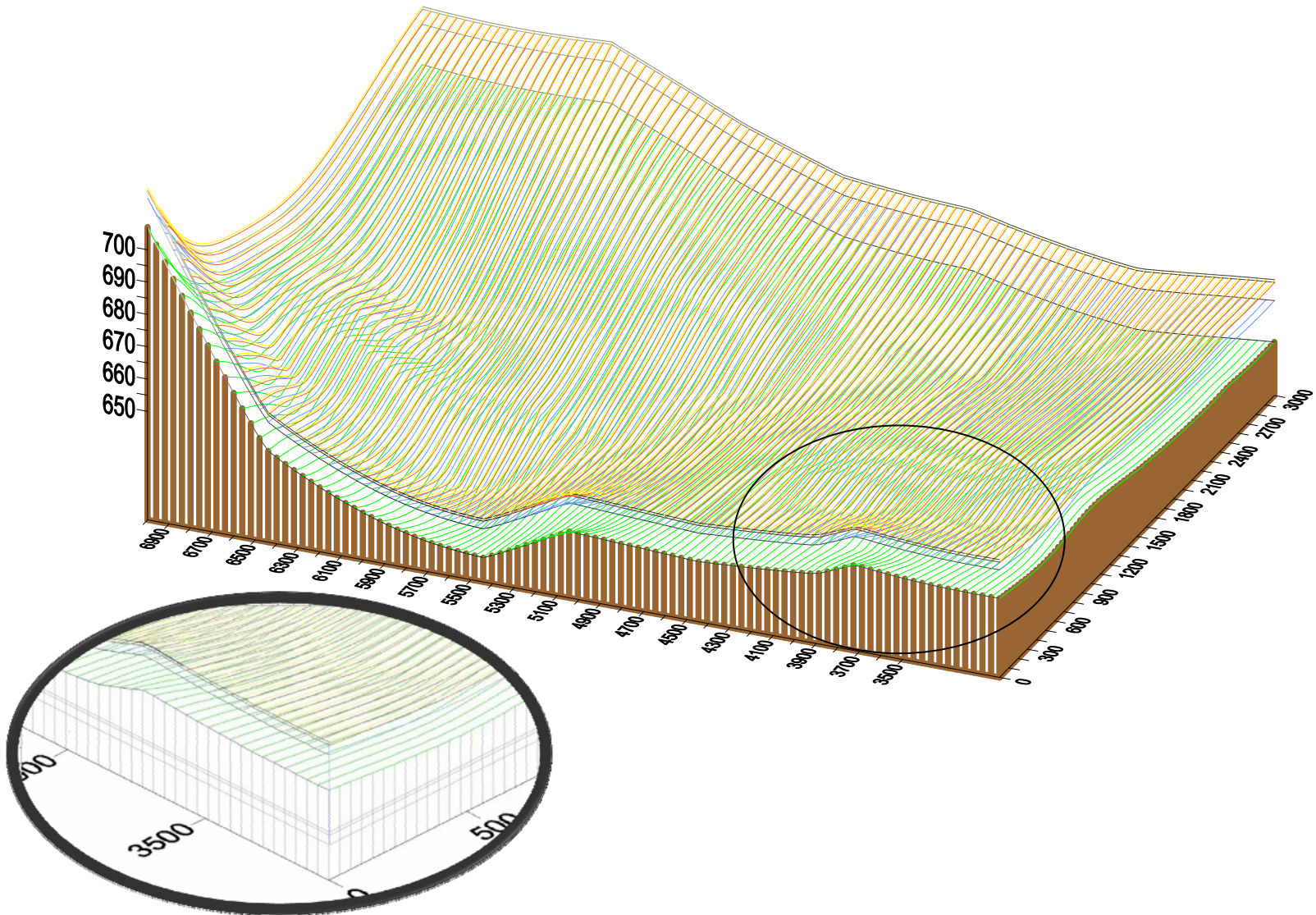
Gráfica 3.7 Vectores de dirección del flujo de agua precipitada



Gráfica 3.8 Representación de la cuenca en tres dimensiones:
a) Se detallan las curvas de nivel; b) Se detalla la resistividad con colores



Gráfica 3.9 Panorama en tres dimensiones de las múltiples capas que conforman la cuenca



CAPITULO 4: RESULTADOS DE LABORATORIO

Para determinar los usos más apropiados de la diatomita se debe someter el material a una serie de pruebas de laboratorio, las cuales deben proporcionar los parámetros de calidad y el comportamiento necesario para establecer las aplicaciones industriales para su explotación.

Las propiedades que se analizan en este capítulo se basan en la “*selección de las metodologías de investigación*”. A través de estas metodologías se pretende determinar las sustancias que componen la diatomita en estudio, clasificarla en función de su *origen geológico* y su *composición mineralógica* y finalmente, evaluar sus propiedades físicas y químicas. Para obtener estos resultados se necesitan las metodologías descritas en el *capítulo 2* (algunas metodologías se limitan a su referencia bibliográfica debido a la falta de equipo adecuado) y otras metodologías estandarizadas que permitan cuantificar propiedades tales como: *gravedad específica, resistencia a la temperatura y estructura fósil presente*.

Existen además dos aplicaciones esenciales para describir el comportamiento de la diatomita a nivel industrial; *primero*, se debe considerar el uso del material como *medio filtrante o floculante*, ya que debe ser capaz de adsorber y retener sustancias disueltas en agua; *segundo*, se debe medir la capacidad del material para modificar las propiedades reológicas de un fluido.

El contenido de este capítulo contempla tres etapas principales:

1. Desplegar y analizar los datos obtenidos a través de las pruebas fisicoquímicas.
2. Implementar los resultados obtenidos en la primera etapa para realizar el diseño, a escala de laboratorio, de las pruebas apropiadas para los usos industriales del material.
3. Elaborar tablas de los datos obtenidos y describir, a partir de gráficos, su capacidad para llevar a cabo los fenómenos seleccionados.

4.1 PRUEBAS SOBRE LA COMPOSICIÓN DE LA DIATOMITA

4.1.1 ANÁLISIS MINERALÓGICO A PARTIR DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Para efectuar la técnica de *difracción de rayos X (DRX)* se han empleado las muestras recolectadas en el área de estudio. Se ha recolectado al menos, una muestra por cada afloramiento donde se identifico la presencia del material³.

La *DRX* se lleva a cabo en el equipo que se presenta en la *ilustración 4.1*. El uso de esta técnica se justifica por tres razones: *primero*, porque es una herramienta que permite determinar, por medio de sus resultados, si el material encontrado contiene los componentes básicos que conforman la estructura mineralógica de la diatomita; *segundo*, se utiliza para valorar la pureza del material y la presencia de otros minerales como arcillas y plagioclasas; *tercero*, en base a su mineralogía, se puede escoger cuál es la muestra más adecuada para realizar las siguientes pruebas de laboratorio.



Ilustración 4.1 Equipo para realizar difracción de rayos X

Antes de realizar la *DRX* es necesario seguir el procedimiento para la preparación de las muestras, que inicia secando la diatomita en un horno, exponiéndola a una temperatura de 105 °C, luego se pulveriza el material hasta obtener polvo fino y si es necesario, se puede continuar pulverizando una cantidad de material inferior a un gramo. Finalmente, con la

³ Los seis afloramientos o puntos de muestreo son los descritos en la sección 3.2, Ilustración 3.1.

ayuda del pistilo, se vierte una parte de la pasta sobre un portaobjeto para ser analizada en el difractor. En la *ilustración 4.2* se observa la forma en que la muestra se coloca dentro del equipo.

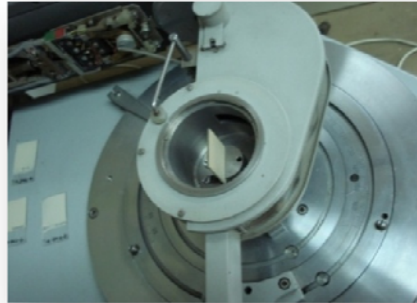


Ilustración 4.2 Ubicación del portaobjeto para difracción de rayos X

A continuación se interpretan los espectros obtenidos por medio de DRX, generados a partir de las muestras representativas de los seis afloramientos del área.

4.1.1.1 Resultados obtenidos para el punto de muestreo DM1

El punto de muestreo DM1 es muy importante, porque sólo en este lugar es posible apreciar claramente la disposición natural del afloramiento y los diferentes materiales sedimentarios que lo componen, es decir, se aprecian las interfaces de los estratos (ver *figura 4.1*).

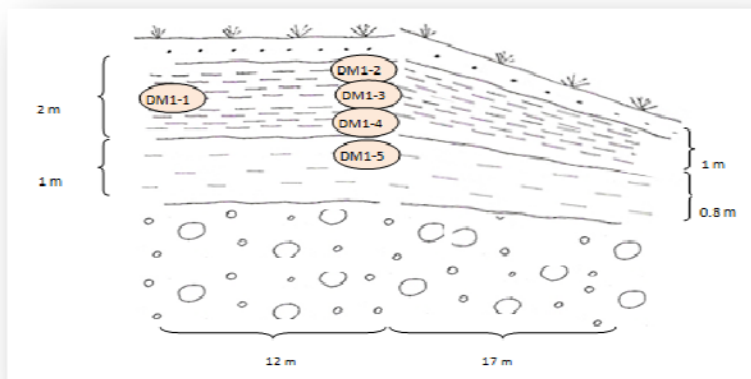


Figura 4.1 Distribución de las muestras en DM1 para difracción de rayos X

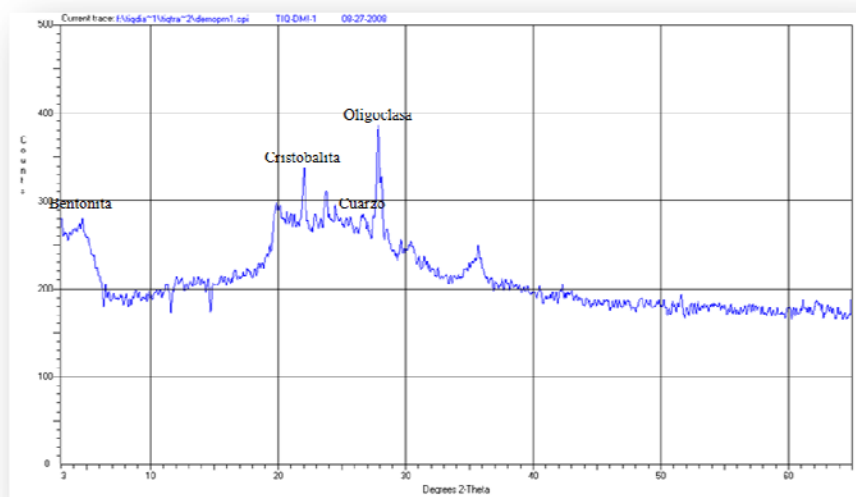
Debido a esta situación se pueden tomar suficientes muestras (en la interface superior e inferior del material y el centro del estrato), para determinar si su composición varía a lo largo del proceso de formación sedimentaria. En la *tabla 4.1* se detalla la nomenclatura utilizada para cada muestra.

Tabla 4.1 Nomenclatura utilizada para análisis de muestras en difracción de rayos x

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
DM1-1	Muestra de diatomita obtenida (Punto de Referencia 0 m)
DM1-2	Muestra de diatomita obtenida en la interface superior, con la tierra superficial.
DM1-3	Muestra de diatomita obtenida del centro del estrato.
DM1-4	Muestra de diatomita obtenida de la interface inferior con la bentonita.
DM1-5	Muestra de bentonita obtenida cerca de la interface superior del estrato.

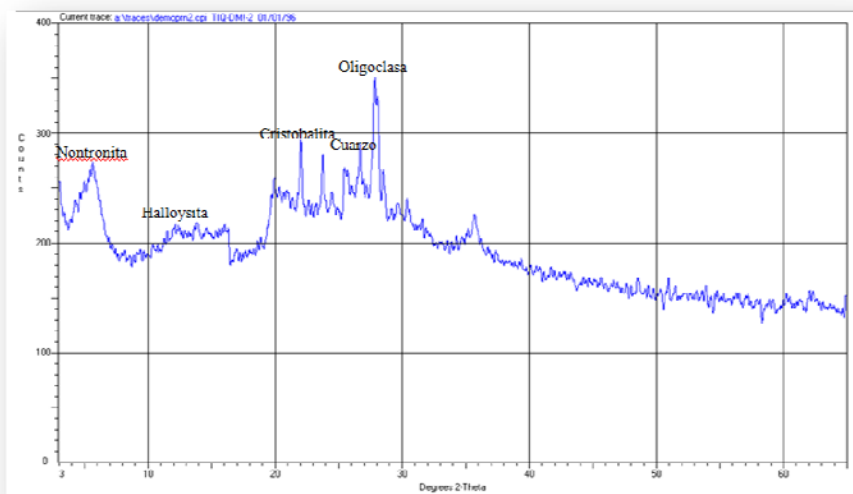
Los difractogramas obtenidos a partir de las muestras descritas en la *tabla 4.1* se presentan desde la *gráfica 4.1* hasta la *gráfica 4.6*. La *gráfica 4.1* corresponde al espectro de DRX de la muestra DM1-1, en ella se indica la presencia de minerales como bentonita, cristobalita, cuarzo y oligoclasa. El contenido de *cristobalita* y *cuarzo* en esta muestra confirma la existencia de *tierras diatomáceas*, mientras que la bentonita pertenece al grupo de las arcillas esmectíticas.

Gráfica 4.1 Espectro de difracción de rayos X para DM1-1



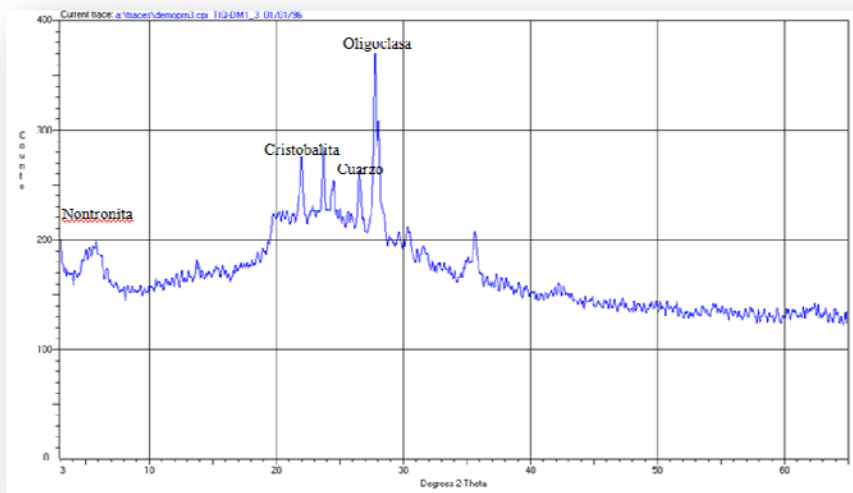
El espectro de DRX obtenido para la muestra DM1-2 se presenta en la *gráfica 4.2*, de la cual se observa que los minerales que componen esta muestra son nontronita, halloysita, cristobalita, cuarzo y oligoclasa. Por lo tanto, se puede concluir que esta muestra también contiene *tierras diatomáceas*.

Gráfica 4.2 Espectro de difracción de rayos X para DM1-2



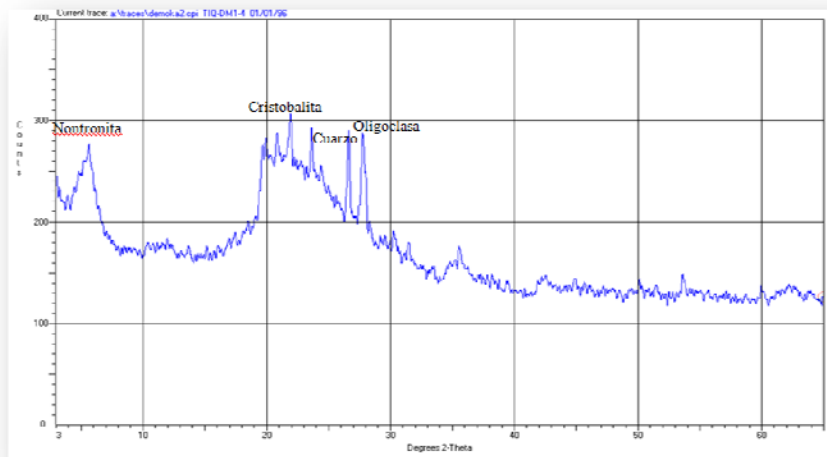
En la *gráfica 4.3* que corresponde a DM1-3, se confirma la presencia de los minerales nontronita, cristobalita, cuarzo y oligoclasa.

Gráfica 4.3 Espectro de difracción de rayos X para DM1-3



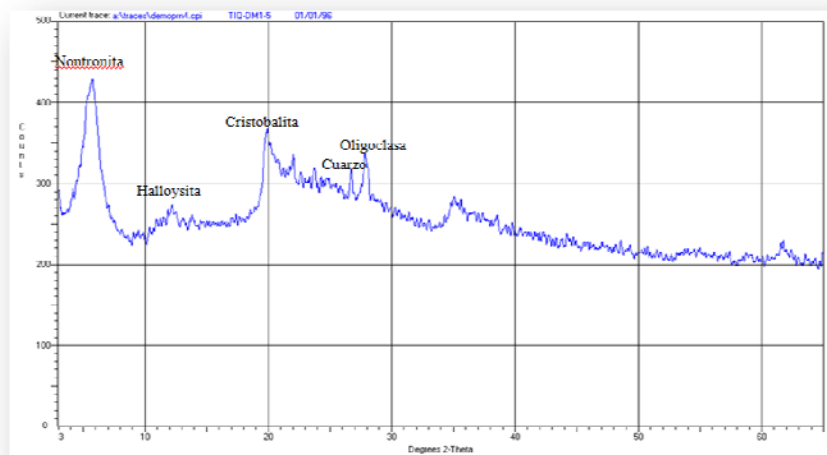
Para la muestra DM1-4 se ha obtenido el espectro de DRX de la *gráfica 4.4*, en el cual se ha identificado la presencia de nontronita, cristobalita, cuarzo y oligoclasa. La muestra tiene una composición muy similar a las anteriores.

Gráfica 4.4 Espectro de difracción de rayos X para DM1-4



El espectro de DRX de la muestra DM1-5 se observa en la *gráfica 4.5* e indica la existencia de los mismos minerales de la muestra DM1-2. Sin embargo, los picos característicos de la nontronita son más grandes y definidos en esta gráfica que en las anteriores, debido a que la muestra pertenece al estrato de arcilla.

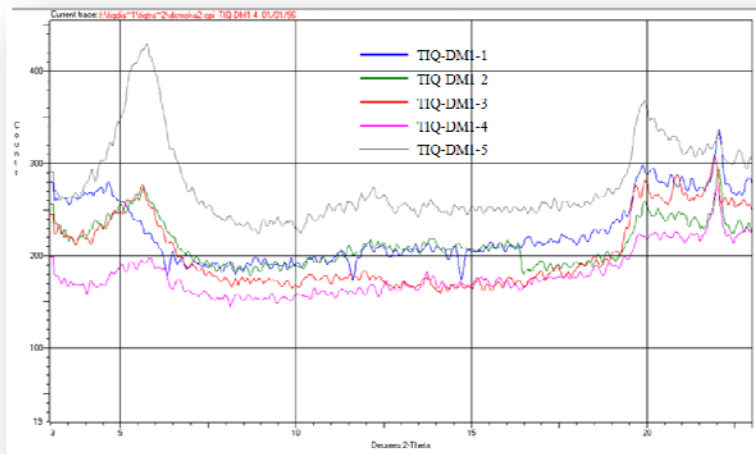
Gráfica 4.5 Espectro de difracción de rayos X para DM1-5



Los tipos de minerales contenidos en las cinco muestras analizadas para DM1 indican que la composición en el estrato no cambia de manera lateral sobre el mismo (prueba de una sedimentación tranquila) y que sólo existen cambios leves en secciones verticales debido a la presencia relativa de nontronita (que aumenta con la profundidad).

En la *gráfica 4.6* se comparan los cinco espectros de las distintas muestras en DM1. Entre los resultados más importantes se destaca la forma del pico correspondiente a la *nontronita* para la muestra DM1-5 (estrato de arcilla), ya que éste va disminuyendo en las muestras más cercanas a la superficie; además, se observa que los picos característicos correspondientes a cuarzo, cristobalita y oligoclasa están menos definidos en los espectros de las muestras más cercanas a DM1-5.

Gráfica 4.6 Conjunto de espectros de difracción de rayos X para DM1



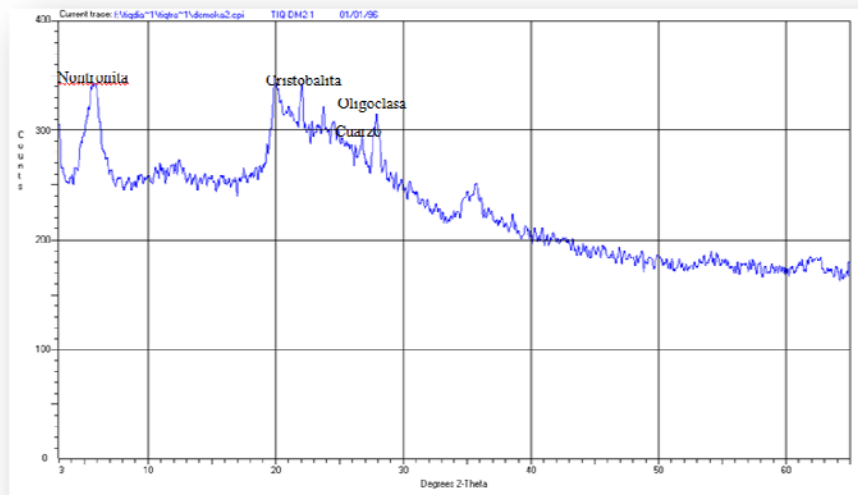
De acuerdo a lo descrito anteriormente, se puede concluir que *DM1-1* es la muestra con mayor presencia de diatomita (lo que significa que la nontronita es el componente contaminante de esta muestra); y además, *DM1-5* es la muestra con mayor presencia de nontronita, que al igual que la bentonita, se clasifica mineralógicamente como un filossilicato de tipo trilaminar y dioctaédrico, del grupo de las esmectitas (o montmorillonitas).

4.1.1.2 Resultados obtenidos para el punto de muestreo DM2

Este punto de muestreo es referenciado a un pozo construido manualmente. Durante la campaña fue posible obtener sólo una muestra, ya que no se puede determinar la ubicación de los restos de su construcción con su respectivo estrato.

El espectro de DRX obtenido para la muestra DM2 se presenta en la *gráfica 4.7*, de la cual se observa que los minerales que componen esta muestra son nontronita, cristobalita, cuarzo y oligoclasa. Por lo tanto, se puede concluir que esta muestra también contiene *tierras diatomáceas*.

Gráfica 4.7 Espectro de difracción de rayos X para DM2

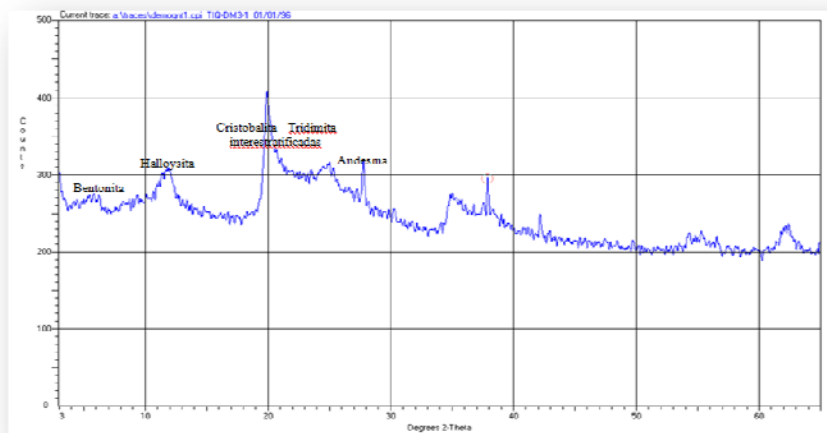


4.1.1.3 Resultados obtenidos para el punto de muestreo DM3

Este punto de muestreo es referenciado a una quebrada seca, la cual ha cambiando su cauce en varias ocasiones debido a diferentes episodios de desbordamiento. Es por esta razón que en ella que presentan múltiples estratos, incluyendo uno de cantos rodados en el fondo. Los difractogramas que se presentan en las *gráficas 4.8* y *4.9* corresponden a las dos muestras analizadas en DM3. Se ha considerado una muestra para el estrato de diatomita (DM3-1) y otra para el estrato de arcilla (DM3-2), ubicado a 10 metros de distancia de DM3-1.

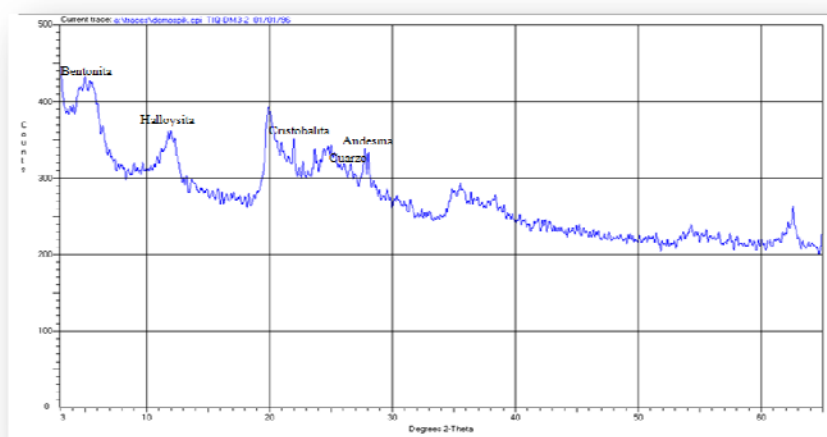
En la *gráfica 4.8*, correspondiente a la muestra DM3-1, existen estructuras cristalinas como la bentonita, halloysita, cristobalita-tridimita inter-estratificada y andesina. La ausencia de cristobalita y cuarzo indica que la cantidad de diatomeas en la muestra es muy baja o no existe.

Gráfica 4.8 Espectro de difracción de rayos X para DM3-1



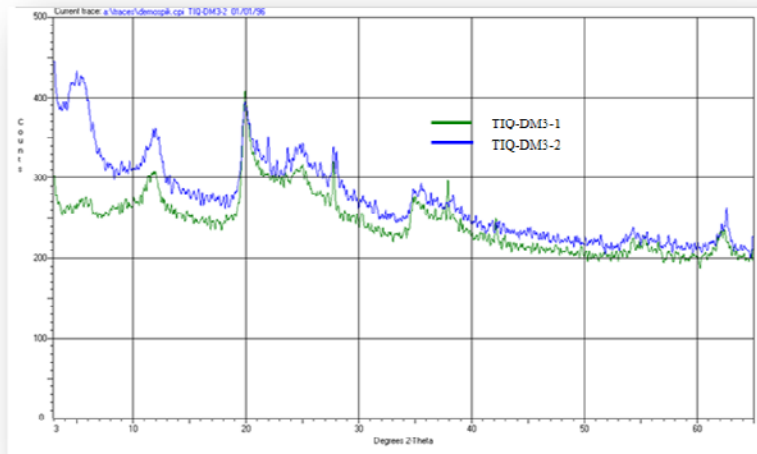
El espectro de DRX que corresponde a la muestra DM3-2, se presenta en la *gráfica 4.9* de la cual se observa que los minerales más abundantes son bentonita, halloysita, cristobalita, cuarzo y andesina. En este caso, la muestra si contiene *tierras diatomáceas*, debido a la presencia de cuarzo y cristobalita.

Gráfica 4.9 Espectro de difracción de rayos X para DM3-2



En la *gráfica 4.10* se presenta el conjunto de espectros correspondientes a las muestras DM3-1 y DM3-2, en ella se hace la comparación de las composiciones mineralógicas de cada una, obteniéndose una mejor definición del pico característico de la cristobalita y cuarzo en la muestra DM3-2, y además, una marcada presencia de bentonita.

Gráfica 4.10 Conjunto de espectros de difracción de rayos X para DM3



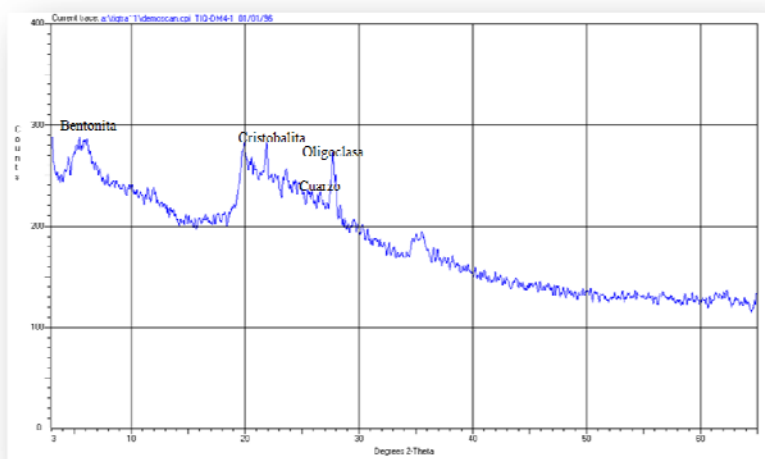
En base a estos resultados, se puede concluir que los depósitos de los distintos minerales se llevaron a cabo en tiempos diferentes, o bien, fueron afectados gravemente en su formación debido a los sucesos geológicos como la erosión. Debido a esto, existe la posibilidad de que varíe su composición de manera lateral a corta distancia, esto se estima por lo menos bajo la zona de influencia de la quebrada donde fueron tomadas las muestras DM3-1 y DM3-2.

4.1.1.4 Resultados obtenidos para el punto de muestreo DM4

El afloramiento se ubica a lo largo de una calle, donde se muestra expuesta la diatomita, la formación de los estratos está bien definida y la presencia del material es abundante, sin embargo, debido a la erosión en la interface superior de diatomita, se ha generado una combinación de los minerales.

El espectro de DRX obtenido para DM4 se presenta en la *gráfica 4.11* y los minerales que componen esta muestra son bentonita, cristobalita, cuarzo y oligoclasa, lo que confirma la presencia de diatomitas fosilizadas en el lugar de muestreo. La cantidad presente de diatomita es mayor que la cantidad de bentonita; esto se deduce de la buena definición de los picos correspondientes al cuarzo y cristobalita.

Gráfica 4.11 Espectro de difracción de rayos X para DM4

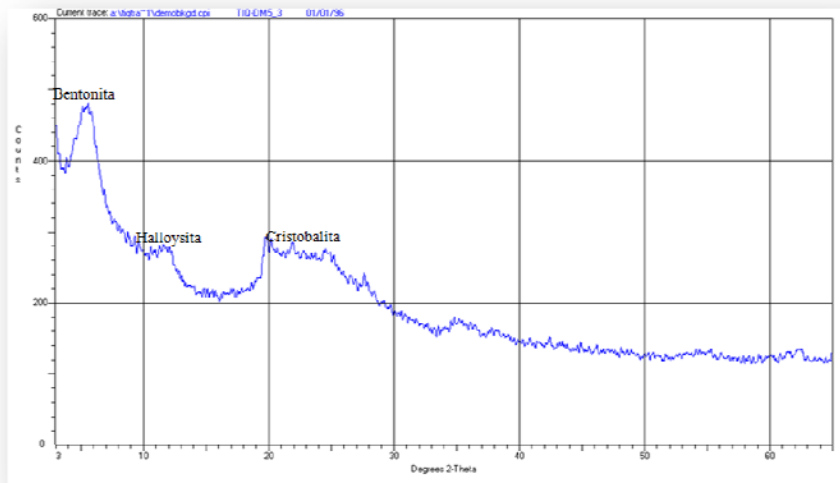


4.1.1.5 Resultados obtenidos para el punto de muestreo DM5

Este punto de muestreo se encuentra en las cercanías de una quebrada seca, donde se ha formado una serie de terrazas que permiten el estancamiento de agua y a la vez, provocan infiltración a través de la diatomita, cuya tonalidad es amarilla. En este punto, se ha encontrado que la cantidad de bentonita es mayor debido a las propiedades del material, a una consistencia más sólida y a un color diferente de las muestras comparadas con las que se han sido tomadas en otros sitios.

Al analizar el espectro de DRX de la *gráfica 4.12*, se puede apreciar que los minerales más abundantes son bentonita, cristobalita y halloysita, de los cuales, los picos característicos de la bentonita están mejor definidos que los de la cristobalita. Por lo tanto, se considera que la muestra contiene más arcillas que *tierras diatomáceas*.

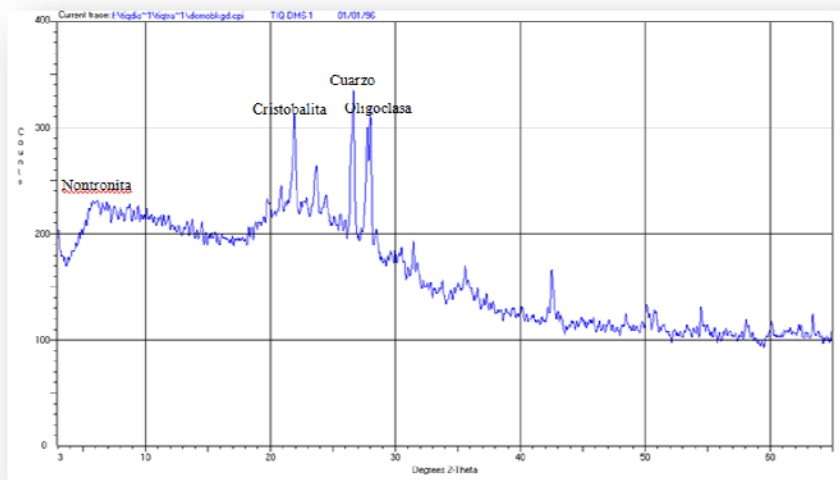
Gráfica 4.12 Espectro de difracción de rayos X para DM5



4.1.1.6 Resultados obtenidos para el punto de muestreo DM6

La muestra DM6 fue obtenida en uno de los puntos más lejanos de la cuenca, entre los restos de construcción de unos estanques para contener peces. El resultado más importante del espectro de DRX de la *gráfica 4.13* es que el contenido de diatomita es más significativo, debido a que los picos correspondientes a cristobalita y cuarzo están mejor marcados que los picos de nontronita y oligoclasa.

Gráfica 4.13 Espectro de difracción de rayos X para DM6



4.1.2 ANÁLISIS QUÍMICO POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Para la realización del análisis químico por *fluorescencia de rayos X (FRX)* se ha empleado, como parámetro de referencia, una muestra de diatomita industrial de composición conocida. El objetivo de esta prueba es cuantificar elementos como hierro, potasio, sodio, calcio, entre otros, porque éstos contribuyen directamente en la formación de las estructuras cristalinas características de los minerales analizados en la *sección 4.1.1*.

La diatomita utilizada para FRX es de grado alimenticio y su ficha técnica incluye los siguientes elementos: 3% de hierro como Fe_2O_3 ; 5% de aluminio como Al_2O_3 y 88% de silicio como SiO_2 .

En la *ilustración 4.3* se observan las *fuentes de excitación* de *cadmio 100 ($^{109}_{48}\text{Cd}$)* y *hierro 55 ($^{55}_{26}\text{Fe}$)* que se utilizan para generar los espectros de FRX. La fuente de excitación de *hierro 55* genera un tipo de radiación monoenergética que produce una línea K_α del Manganeseo resultante a aproximadamente 2.1 Å, así es posible determinar con una energía equivalente a 5.9 keV la presencia de los elementos que corresponden desde magnesio (Mg) hasta silicio (Si) en orden descendente en la tabla periódica.

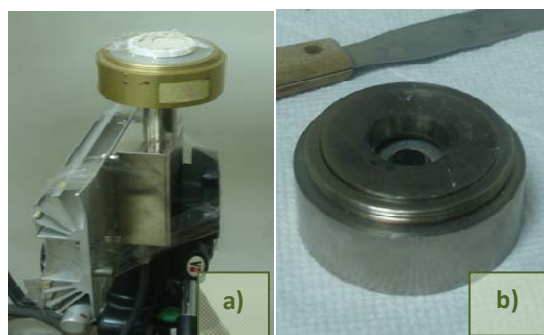
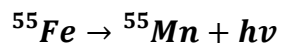


Ilustración 4.3 Fuentes de excitación para fluorescencia de rayos x:
a) Cadmio 100; b) Hierro 55

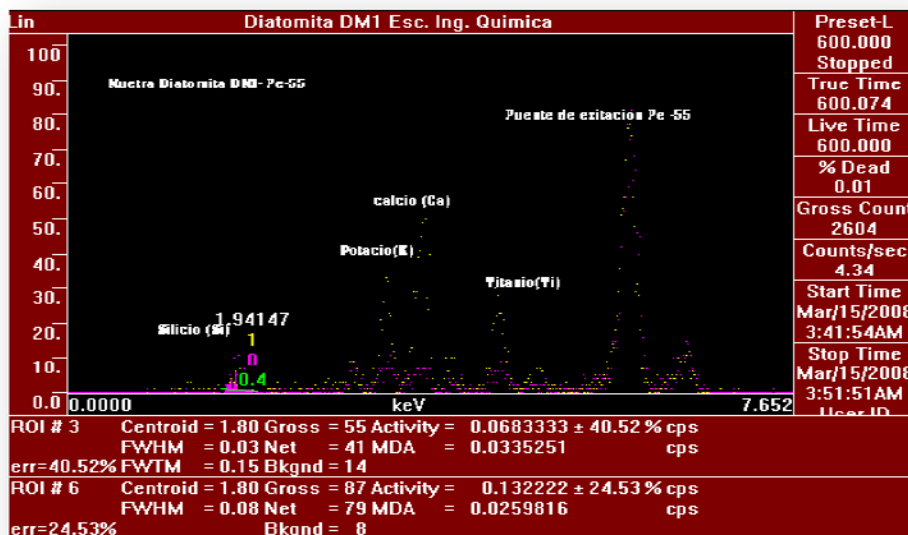
Debido a limitaciones del equipo, sólo se han determinado dos elementos de interés para clasificar a la diatomita en su composición, éstos son *hierro* (Fe_2O_3) y *silicio* (SiO_2). En la *ecuación 4-1* se describe el fenómeno de excitación que sufre el hierro 55 durante la FRX.



Ecuación 4-1

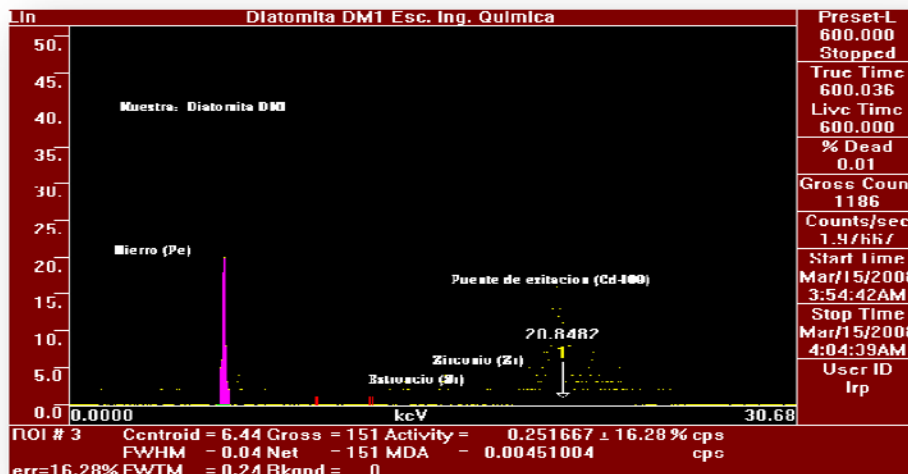
La *gráfica 4.14* muestra el espectro de FRX obtenido con la fuente de excitación *Hierro 55* (${}^{55}\text{Fe}$) para la muestra DM1, el elemento que se pretende cuantificar es el *silicio*.

Gráfica 4.14 Espectro de fluorescencia de rayos x para determinar silicio en DM1



La *gráfica 4.15* muestra el espectro obtenido con la fuente de excitación *Cadmio-109* (${}^{109}\text{Cd}$) que se utiliza para determinar elementos que van desde plata hasta hierro en orden descendente en la tabla periódica.

Gráfica 4.15 Espectro de fluorescencia de rayos x para determinar hierro en DM1



El resultado obtenido se expresa en *cuentas por segundo (cps)* y finalmente se calcula el porcentaje del elemento de interés haciendo uso del material de referencia. Así entonces la concentración porcentual para el silicio y el hierro es calculada por medio de la *ecuación 4-2*. En la *tabla 4.2* se resumen los valores obtenidos por medio de esta técnica; la abundancia de SiO₂ confirma la presencia de diatomita que se indica en el análisis de *difracción de rayos X*.

$$\% \text{ Elemento en Muestra} = \frac{\text{cps muestra referencia}}{\text{cps muestra de análisis}} * \% \text{ Elemento en referencia} \quad \text{Ecuación 4-2}$$

Tabla 4.2 Resultados de la composición de diatomita por fluorescencia de rayos x

Elemento	% Referencia	CPS Muestra	CPS Referencia	% en Muestra
Silicio (SiO ₂).	88%	0.1322	0.06833	45.5%
Hierro (Fe ₂ O ₃)	3%	0.0694834	0.251667	10.9%

4.2 PRUEBAS PARA EVALUAR LAS PROPIEDADES FISICAS DE LA DIATOMITA

4.2.1 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA

La forma de calcular la gravedad específica de un suelo (G_s) difiere según el tipo y tamaño de sus partículas. Para la realización de esta prueba se emplearon tres muestras de diatomita y se ha efectuado la metodología indicada en la norma ASTM C-128 apartado 9.2, que se refiere a la medición de la gravedad específica y absorción de agregados gruesos.

Por definición, G_s es el peso unitario del material dividido por el peso unitario del agua destilada y libre de carbonatos a 20°C. La *ecuación 4-3* permite calcular el valor de G_s .

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad \text{Ecuación 4-3}$$

Donde:

γ_s = peso específico del sólido (diatomita) [g/cm³]

γ_w = peso específico del agua a 20°C [g/cm³]

En la *ecuación 4-4* se observa que la gravedad específica puede ser calculada utilizando cualquier relación de peso de la diatomita y el peso del agua, siempre y cuando se considere el mismo volumen para la diatomita y agua, así:

$$G_s = \frac{W_s/V_s}{W_w/V_w \times \gamma_w} = \frac{W_s}{W_w \times \gamma_w} \quad \text{Ecuación 4-4}$$

Donde:

W_s = Peso del sólido [g]

W_w = Peso del agua [g]

V_s = Volumen de sólido [cm³]

V_w = Volumen de agua [cm³]

La *ecuación 4-4* también puede expresarse en función del peso y la densidad, obteniéndose la *ecuación 4-5*:

$$G_s = \frac{P_{muestra} - P_{vacío}}{(P_{agua} - P_{vacío}) \times (1/\rho_{agua})} \quad \text{Ecuación 4-5}$$

Donde:

$P_{muestra}$ = Peso del picnómetro con diatomita [g]

$P_{vacío}$ = Peso del picnómetro vacío [g]

P_{agua} = Peso del picnómetro con agua destilada y libre de carbonatos [g]

ρ_{agua} = Densidad del agua a 20°C [g/cm³, kg/m³]

Para obtener un valor estadístico más representativo, la medición de los pesos se debe efectuar por triplicado y se deben rotular los picnómetros previamente (para no confundirlos). Cada picnómetro debe llenarse hasta la línea de aforo tanto para anotar el

peso conteniendo diatomita, como para anotar el peso conteniendo agua destilada y libre de carbonatos, tal como se muestra en la *ilustración 4.4*.

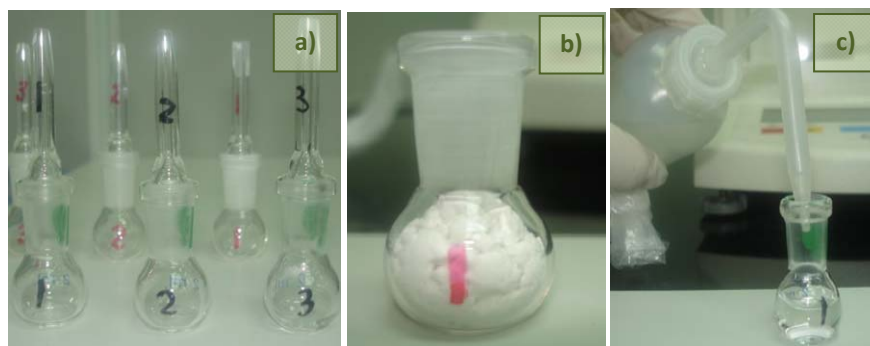


Ilustración 4.4 Procedimiento para determinar la gravedad específica: a) Rotulación de picnómetros; b) Llenado de picnómetro con la muestra; c) Llenado de picnómetro con agua destilada

En la *tabla 4.3* se presentan los resultados obtenidos en el laboratorio para las muestras de diatomita DM1 (ver especificaciones en la *sección 3.2.1.5*), hyflo super cel (macroporo) y celite 505 (microporo):

Tabla 4.3 Pesos de la diatomita y pesos del agua para calcular la gravedad específica

No.	P _{vacío} (g)	P _{agua libre de carbonatos} (g)	P _{vacío} (g)	P _{DM1} (g)	P _{vacío} (g)	P _{hyflo} (g)	P _{vacío} (g)	P _{celite} (g)
1	8.2641	11.2224	8.2450	10.2496	8.2445	8.8168	8.2447	8.7484
2	8.2702	11.3752	8.2318	10.2957	8.2319	8.8352	8.2320	8.7670
3	8.5053	11.3724	8.4769	10.4677	8.4764	9.0249	8.4771	8.9144

Sustituyendo los valores de la *tabla 4.3* en la *ecuación 4-5* se obtienen los valores de la gravedad específica que se muestran en la *tabla 4.4*:

Tabla 4.4 Gravedades específicas de la muestra de diatomita y diatomita industrial

No.	G _s DM1	G _s hyflo	G _s celite
1	0.68	0.19	0.17
2	0.66	0.19	0.17
3	0.69	0.19	0.15
Promedio	0.68	0.19	0.17

Finalmente, se multiplican los valores de la *tabla 4.4* por la densidad del agua a 20°C en las unidades del *Sistema Internacional (SI)* obteniéndose los valores de la *tabla 4.5*.

Tabla 4.5 Densidades de la muestra de diatomita y diatomita industrial en el SI

No.	ρ_{DM1} (kg/m ³)	ρ_{hyflo} (kg/m ³)	ρ_{celite} (kg/m ³)
1	677.62	193.46	170.27
2	664.70	194.30	172.30
3	694.36	191.31	152.52
Promedio	678.89	193.02	165.03

4.2.2 COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL FRENTE A ALTAS TEMPERATURAS

Es necesario realizar un estudio del comportamiento de la diatomita, en función del incremento de la temperatura, para determinar la capacidad que tiene el material de conservar su composición inicial, la variación del tamaño del poro y su punto de fusión.

El procedimiento para llevar a cabo esta prueba consiste en calentar gradualmente ocho crisoles, empleando una mufla que trabaje entre 0 y 800°C, se debe tomar como referencia 2 gramos de diatomita a 25°C en cada uno; luego se modifica la temperatura en intervalos de 100°C hasta alcanzar los 800°C (ver *ilustración 4.5*) y finalmente, se anotan los pesos de los crisoles para cada temperatura.



Ilustración 4.5 Muestras de diatomita dentro de la mufla para la prueba térmica

Debido a la variación de los pesos de las muestras, los datos experimentales se han obtenido por triplicado, ya que esto facilita el análisis estadístico del comportamiento del peso en función de la temperatura involucrada. En las *tablas 4.6, 4.7 y 4.8* se presentan los datos obtenidos antes y después del calentamiento, a diferentes temperaturas para la primera, segunda y tercera prueba térmica, respectivamente.

Tabla 4.6 Pesos finales de la diatomita para la primera prueba térmica

No.	T (°C)	P _{Crisol Vacío} (g)	P _{Crisol + Diatomita} (g)	T (°C)	P _{final crisol + diatomita} (g)	P _{final diatomita} (g)
1	25	8.0668	10.0670	100	9.9483	1.8813
2	25	7.9689	9.9672	200	9.8232	1.8560
3	25	10.0653	12.0656	300	11.8985	1.8329
4	25	8.1422	10.1428	400	9.9578	1.8150
5	25	8.1804	10.1803	500	9.9774	1.7971
6	25	10.9900	12.9899	600	12.7767	1.7868
7	25	9.3711	11.3714	700	11.1487	1.7773
8	25	9.3711	11.3714	800	11.1455	1.7741

Tabla 4.7 Pesos finales de la diatomita para la segunda prueba térmica

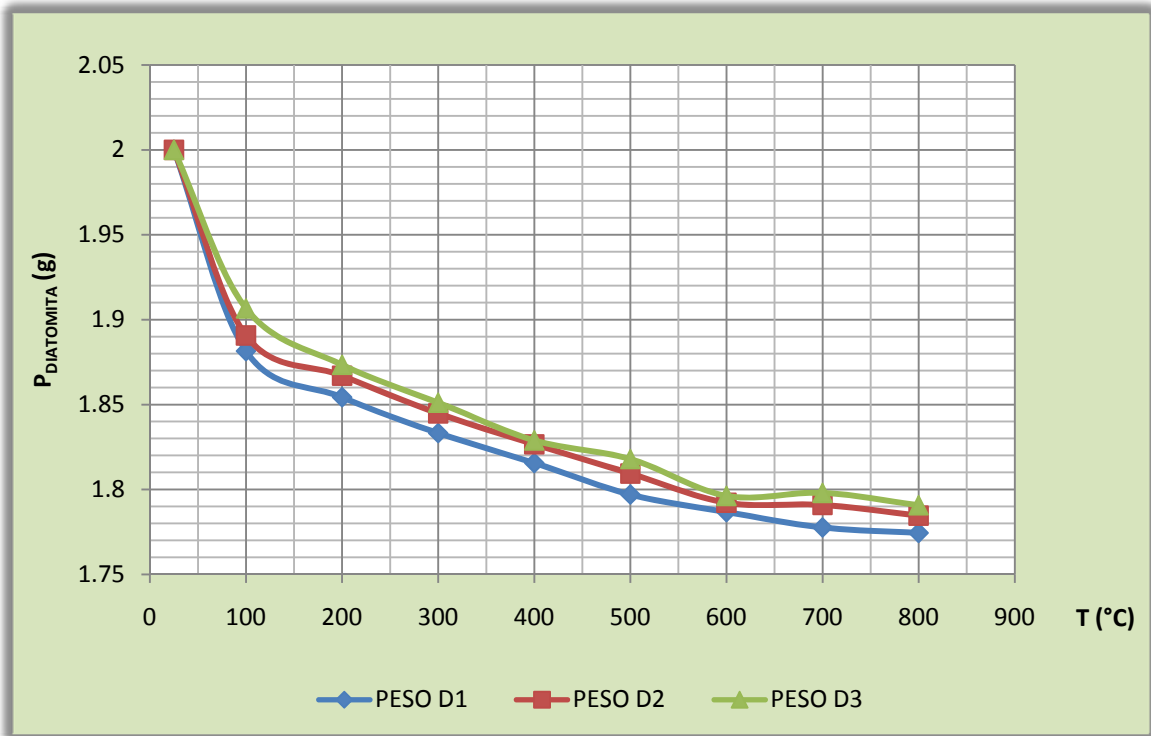
No.	T (°C)	P _{Crisol Vacío} (g)	P _{Crisol + Diatomita} (g)	T (°C)	P _{final crisol + diatomita} (g)	P _{final diatomita} (g)
1	25	8.1398	10.1395	100	8.1398	1.8910
2	25	9.9954	11.9954	200	9.9954	1.8670
3	25	10.9934	12.9934	300	10.9934	1.8448
4	25	10.0652	12.0649	400	10.0652	1.8269
5	25	8.0678	10.0674	500	8.0678	1.8098
6	25	8.1804	10.1804	600	8.1804	1.7922
7	25	9.3719	11.3713	700	9.3719	1.7915
8	25	7.9692	9.9689	800	7.9692	1.7849

Tabla 4.8 Pesos finales de la diatomita para la tercera prueba térmica

No.	T (°C)	P _{Crisol Vacío} (g)	P _{Crisol + Diatomita} (g)	T (°C)	P _{final crisol + diatomita} (g)	P _{final diatomita} (g)
1	25	8.1401	10.1402	100	10.0467	1.9065
2	25	7.9689	9.9689	200	9.8423	1.8734
3	25	10.0671	12.0671	300	11.9182	1.8511
4	25	9.9956	11.9958	400	11.8245	1.8287
5	25	8.0681	10.0681	500	9.886	1.8179
6	25	10.9920	12.9920	600	12.7882	1.7962
7	25	9.3696	11.3693	700	11.1676	1.7983
8	25	8.1797	10.1796	800	10.0467	1.7908

En la *gráfica 4.16* se comparan los resultados de las *tablas 4.6, 4.7 y 4.8*, donde se observa que la tendencia de los datos experimentales es reproducible en los tres casos, por lo tanto, el cálculo de valores promedio es aceptable para representar los datos.

Gráfica 4.16 Comparación de los ensayos de las pruebas térmicas



La *tabla 4.9* resume el *análisis estadístico* de los datos experimentales, que incluye el cálculo de la media, la desviación estándar y la covarianza.

Tabla 4.9 Análisis estadístico para las pruebas térmicas

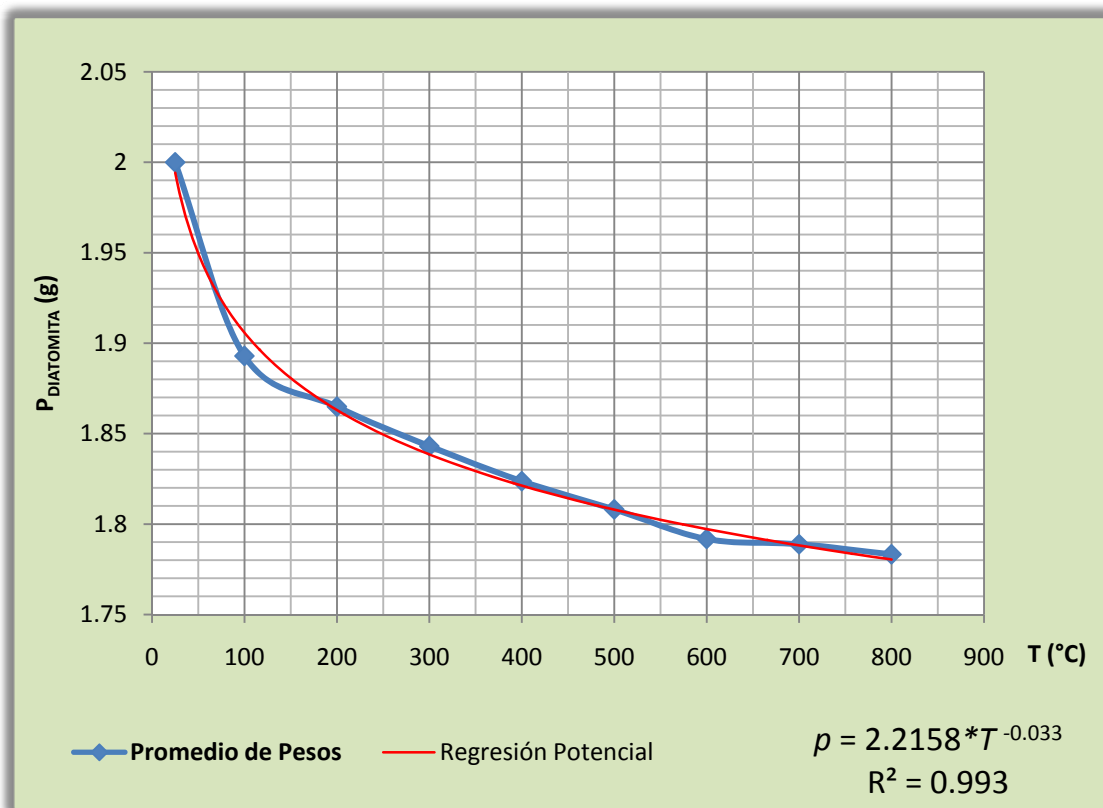
No.	T (°C)	Media	Sm	COV
1	100	1.8929	0.0126	0.6708
2	200	1.8655	0.00972	0.5212
3	300	1.8429	0.00907	0.4926
4	400	1.8235	0.00710	0.3897
5	500	1.8083	0.01051	0.5813
6	600	1.7917	0.00476	0.2662
7	700	1.7890	0.01035	0.5789
8	800	1.7833	0.00823	0.4618

Después de haber calculado los pesos promedio de la diatomita (ver *tabla 4.9*) se puede elaborar la *gráfica 4.17*, en la cual se presenta la tendencia del peso del material contra la temperatura de trabajo. En esta gráfica se incluye la regresión que describe mejor el comportamiento de los datos, la cual es una *regresión logarítmica (ecuación 4-6)*, cuyo valor de R cuadrado es 0.993.

$$p = 2.2158 * T^{-0.033}$$

Ecuación 4-6

Gráfica 4.17 Pesos promedio de la diatomita contra la temperatura



La *ilustración 4.6* corresponde a las muestras de diatomita que se utilizaron para esta prueba, las cuales están ordenadas de izquierda a derecha, en forma ascendente respecto a la temperatura. De la ilustración se puede apreciar un color grisáceo para las muestras en el intervalo de 100 y 400°C (este color es el mismo de la muestra a 25°C), pero a partir de los 500°C las muestras sufren un cambio de color, de grisáceo a café, el cual se vuelve más oscuro a medida que se incrementa la temperatura.



Ilustración 4.6 Muestras de diatomita a diferentes temperaturas al finalizar la prueba térmica

4.2.3 ANÁLISIS DE SUPERFICIE

Para obtener información topográfica de la superficie de la diatomita en estudio se ha aplicado la técnica de *microscopía electrónica de barrido*. Los resultados que se obtienen por medio de esta técnica permiten visualizar la forma y tamaño de las diatomeas. Estas características son necesarias para anticipar el comportamiento del material durante el fenómeno de adsorción y clarificación debido a la gran variedad de frústulas (caparzones) de diatomeas que existen en la naturaleza.

En la *ilustración 4.7* se muestra un *microscopio electrónico de barrido*, cuyo funcionamiento básico consiste en barrer la superficie de la muestra utilizando un haz de electrones de energía elevada para generar, posteriormente, señales de electrones secundarios. La fuente de origen de los electrones es un filamento de tungsteno que se mantiene a un potencial de 20 kV (Skoog, Holler, & Nieman, 2001).

Cuando se va a realizar un *análisis de superficie* se debe tener en cuenta que las muestras más fáciles de estudiar son aquellas que permiten que los electrones circulen libremente a tierra, esta cualidad ayuda a visualizar los problemas asociados con la acumulación de carga. Además, las muestras que son conductoras de electricidad también son buenas conductoras del calor, por lo tanto, se minimiza su degradación térmica. Si las muestras en estudio no cumplen con esta cualidad, se pueden cubrir con una capa delgada de un metal conductor utilizando la *evaporación por bombardeo* o la *evaporación al vacío*.



Ilustración 4.7 Microscopio electrónico de barrido

En el caso de las muestras de diatomita (que se analizan como material pulverizado) se deben implementar dos técnicas antes de obtener las imágenes en el microscopio. La primera técnica se denomina *dispersión por sonicado* o *dispersión por ultrasonido* (ver *ilustración 4.8-a*), esta técnica permite que la muestra pulverizada de diatomita se distribuya uniformemente sobre el portaobjetos. La segunda técnica se conoce como *evaporación al vacío* (ver *ilustración 4.8-b*) y consiste en recubrir al material con oro hasta que se forma una capa de 20 nanómetros, esto se logra utilizando *gas argón*. En la *ilustración 4.8-c* se observan las muestras de diatomita dentro del microscopio, antes de ser analizadas.

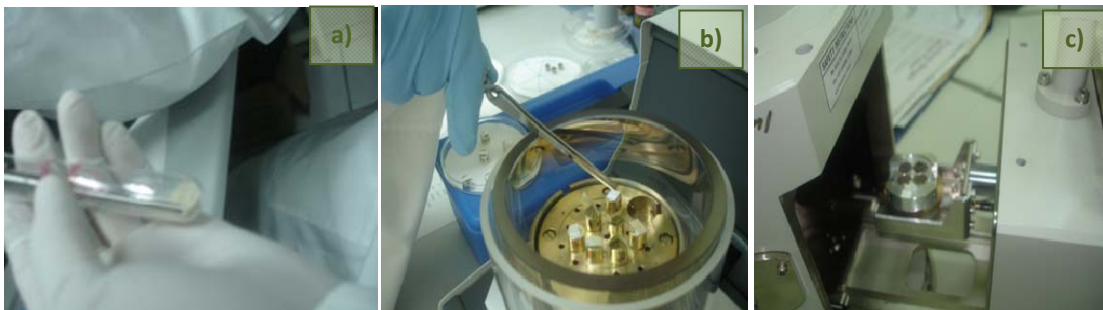


Ilustración 4.8 Muestras de diatomita para realizar el análisis de superficie: a) Durante la dispersión por ultrasonido; b) Dentro del evaporador; c) Dentro del microscopio electrónico de barrido

Con el propósito de determinar la composición fósil, el tamaño y tipo de poro y la presencia de los contaminantes o sustancias ajenas a las diatomitas, se han utilizado muestras tratadas a diferentes temperaturas. Esto permite establecer un punto de referencia para complementar el análisis térmico del material (puesto que a 25°C la diatomita presenta su estructura natural, sin influencia de gradientes de temperatura) y además, permite conocer los puntos de activación del material a través del estudio de su topografía.

Los resultados obtenidos por medio de la *microscopia electrónica de barrido* son fotografías de alta definición, de las cuales es posible interpretar la variación sufrida tanto en la estructura del fósil como en la estructura del poro, debido a la exposición del material a altas temperaturas. Las imágenes se presentan en grupos de cuatro, para mostrar un análisis exploratorio, identificar las estructuras fósiles más abundantes y realizar un acercamiento a la estructura del fósil.

4.2.3.1 *Análisis de superficie para diatomita a 25°C*

La *ilustración 4.9* contiene las imágenes de la muestra de diatomita a 25°C para su análisis de superficie. La *ilustración 4.9-a)* muestra un acercamiento inicial exploratorio de 200 veces su tamaño natural, en el cual se observa una variedad de compuestos en la muestra, pero es necesario realizar un acercamiento mayor para poder distinguir toda la topografía. La *ilustración 4.9-b)* pertenece a un fósil de las diatomeas del tipo *Bacillariophyceae*, que se clasifican en función de la estructura de la frústula y su simetría radial; posee un diámetro total de 36 μm y el diámetro promedio de poro es 0.1 μm , por lo tanto, se clasifica como *macroporo*⁴. La *ilustración 4.9-c)* corresponde a un fósil de *simetría bilateral y forma cilíndrica*, con un diámetro promedio de poro de 0.7 μm , también se clasifica como *macroporo*. La *ilustración 4.9-d)* presenta una estructura arcillosa del grupo de las *Montmorillonitas*, la cual se presume como el principal contaminante del material.

⁴ En base a Clasificación IUPAC, Microporo < 2 nm, Macroporo >50nm y Mesoporo Valor intermedio.

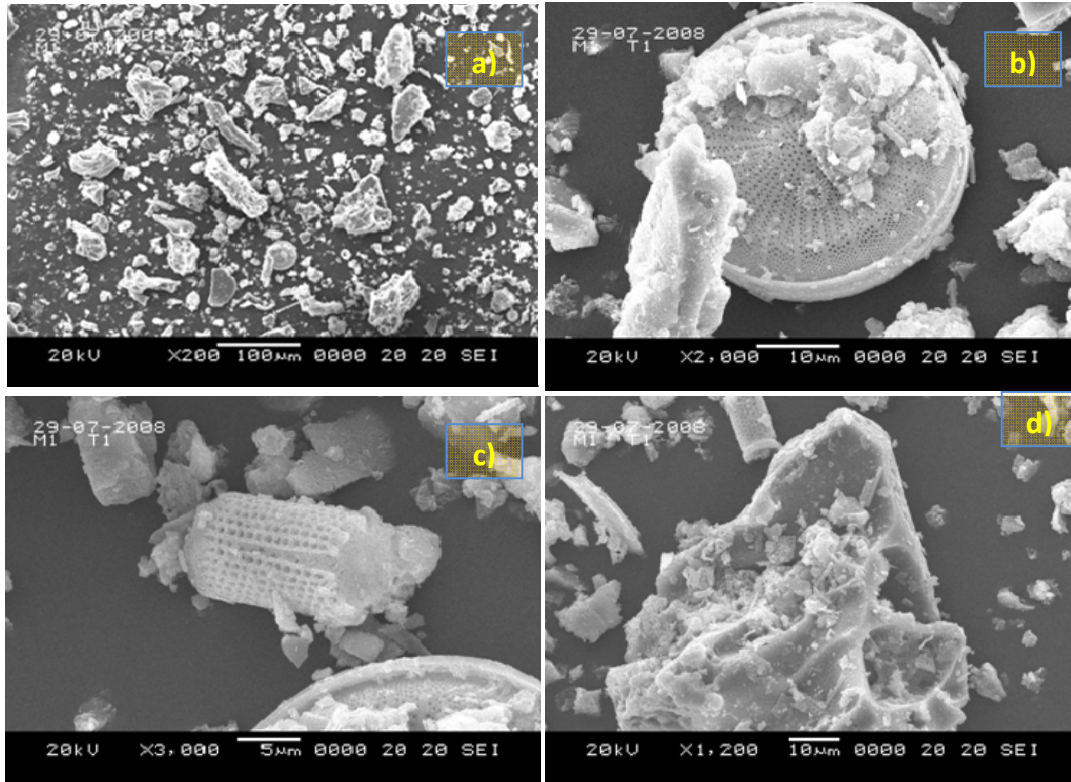


Ilustración 4.9 Análisis de superficie para la muestra de diatomita a 25°C: a) Acercamiento exploratorio; b) *Diatomea Bacillariophyceae* de simetría radial; c) *Diatomea Bacillariophyceae* de simetría bilateral; d) Superficie de una arcilla

Para caracterizar con más detalle la estructura fósil de las dos especies de diatomeas se ha realizado un aumento de 10,000 veces el tamaño natural a cada una (ver *ilustración 4.10*). Entre los resultados más importantes se puede mencionar la *porosidad uniforme* y la clasificación de macroporo en ambas especies.

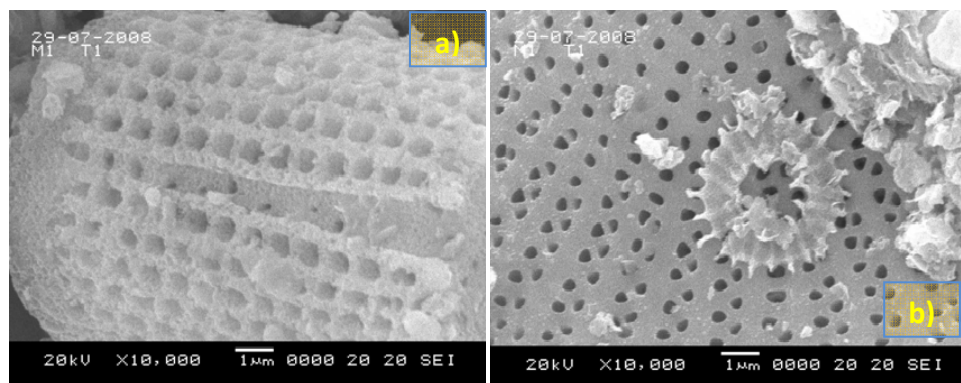


Ilustración 4.10 Comparación del tamaño de poro de las especies de diatomeas más representativas en la muestra DM1 a 25°C: a) Acercamiento de 10,000X; b) Acercamiento de 10,000X

4.2.3.2 Análisis de superficie para diatomita a 500°C

La *ilustración 4.11* contiene las imágenes de la muestra de diatomita a 500°C para su análisis de superficie, de las cuales se observa en general que el material conserva las estructuras de diatomeas y arcillas descritas anteriormente en la *ilustración 4.9*.

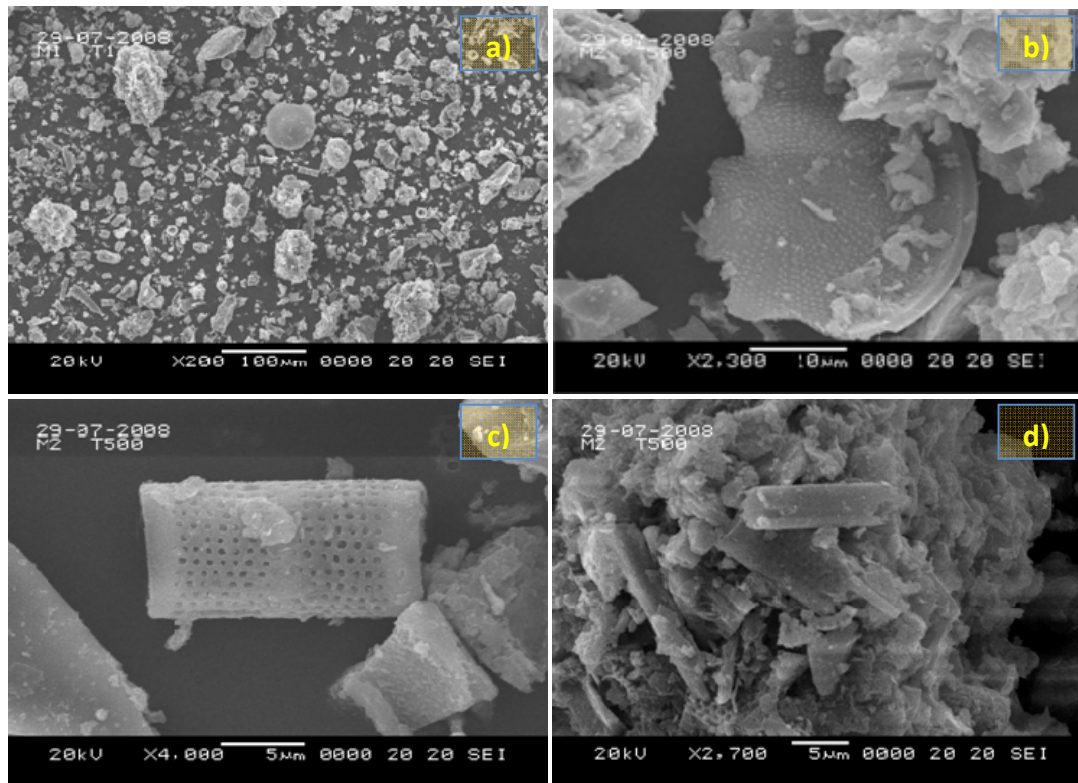
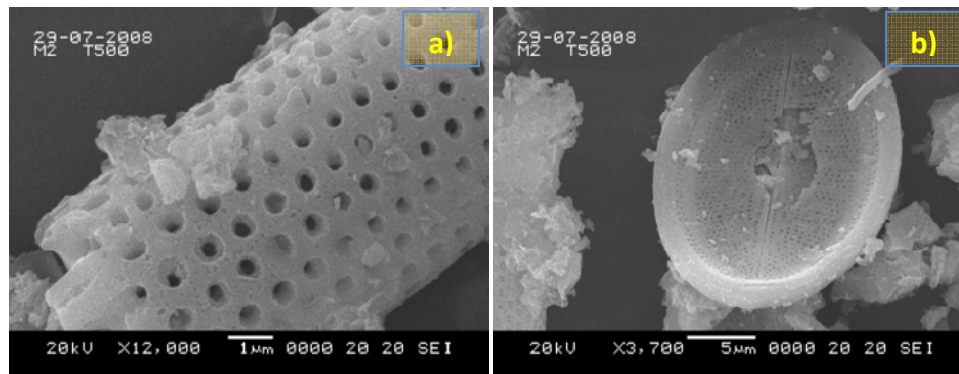


Ilustración 4.11 Análisis de superficie para la muestra de diatomita a 500°C: a) Acercamiento exploratorio; b) Diatomea Bacillariophyceae de simetría radial; c) Diatomea Bacillariophyceae de simetría bilateral; d) Superficie de una arcilla

La *ilustración 4.11-a)* muestra un acercamiento inicial exploratorio de 200 veces su tamaño natural, pero no se pueden apreciar cambios significativos en la estructura de los minerales. La *ilustración 4.11-b)* pertenece a un fósil de las diatomeas del tipo *Bacillariophyceae*; posee un diámetro total de 21.7 μm y el diámetro promedio de poro es 0.33 μm , por lo tanto, se clasifica como *macroporo*. La *ilustración 4.11-c)* corresponde a un fósil de *simetría bilateral* y *forma cilíndrica*, con un diámetro promedio de poro de 0.5 μm , también se clasifica como *macroporo*. La *ilustración 4.11-d)* presenta una estructura

arcillosa del grupo de las *Montmorillonitas*; al comparar esta ilustración con la *ilustración 4.9-d* se destaca una cohesión significativamente mayor entre las partículas del mineral.

Para visualizar con más detalle la estructura fósil de las dos especies de diatomeas expuestas a 500°C, es necesario realizar una comparación de los cambios ocurridos a partir de un acercamiento como el que se muestra en la *ilustración 4.12*. En la *ilustración 4.12-a)* se muestra una diatomea de simetría bilateral, con un aumento de 12,000 veces su tamaño natural; dicha diatomea no presenta daño en su estructura, ni en el tamaño de su poro. En la *ilustración 4.12-b)* se observa una diatomea *Bacillariophyceae*, con un aumento de 3,700 veces su tamaño natural; en esta diatomea no se ha producido ninguna modificación en el tamaño del poro, pero sí se ha producido una fractura en el centro de la frústula. Por lo tanto, se puede afirmar que la especie de simetría bilateral es más resistente al efecto de la temperatura que la especie de tipo radiolario.



**Ilustración 4.12 Comparación de las estructuras fósiles de diatomita DM1 a 500°C:
a) Acercamiento de 12,000X; b) Acercamiento de 3,700X**

4.2.3.3 Análisis de superficie para diatomita a 800°C

Es muy importante incluir los resultados obtenidos para el análisis de superficie de la diatomita a 800°C, porque es la temperatura final a la cual se expuso el material en la *sección 4.2.2* y además, se espera que los cambios sobre las estructuras de los fósiles de las diatomeas sean más evidentes. En la *ilustración 4.13* se presenta el conjunto de fotografías que corresponden a esta temperatura.

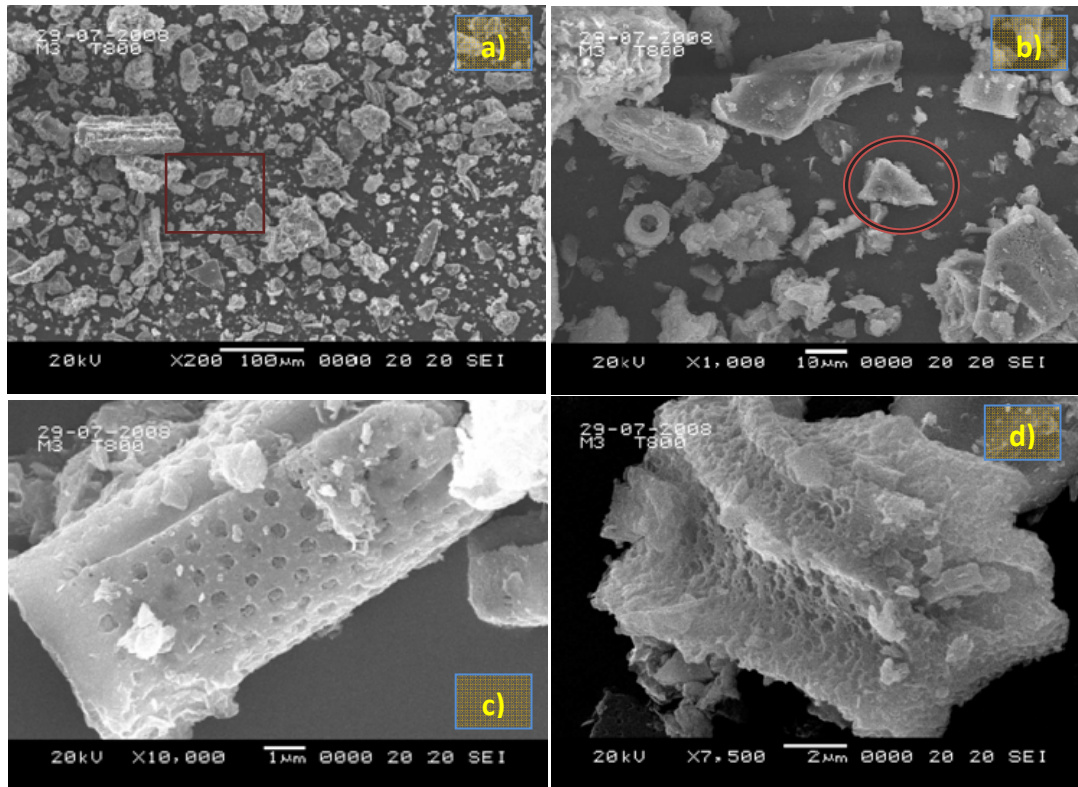


Ilustración 4.13 Análisis de superficie para la muestra de diatomita a 800°C: a) Acercamiento exploratorio; b) *Diatomea Bacillariophyceae* de simetría radial; c) *Diatomea Bacillariophyceae* de simetría bilateral; d) Superficie de una arcilla

En la *ilustración 4.13-a)* se aprecia un acercamiento inicial exploratorio de 200 veces el tamaño natural de la diatomita y al igual que en el acercamiento exploratorio a 25 y 500°C se observa una variedad de minerales, pero no se observan cambios significativos en la estructura de los mismos. La *ilustración 4.13-b)* corresponde a un aumento de 1,000 veces el tamaño natural de las especies en el material; este aumento permite visualizar un área de la muestra (encerrada en un círculo rojo) donde se encuentra el único fragmento del fósil *Bacillariophyceae*. La *ilustración 4.13-c)* muestra un fósil de *simetría bilateral* y *forma cilíndrica*, con un diámetro promedio de poro de 0.5 μm (*macroporo*) y en general, la estructura del fósil no ha sufrido modificaciones. La *ilustración 4.13-d)* pertenece a una estructura arcillosa que presenta una porosidad irregular en la superficie, con un tamaño promedio inferior a 0.1 μm ; se presume que la formación de los poros se debe al efecto de la temperatura.

Otro resultado de igual importancia a los descritos anteriormente en la *ilustración 4.13* para la temperatura de 800°C es la *activación del poro* de las diatomeas de simetría bilateral, ya que en las fotografías obtenidas a 25 y 500°C no es posible identificar este fenómeno. En la *ilustración 4.14* se incluye una secuencia de imágenes con aumentos superiores a 10,000 veces el tamaño natural del fósil, que permiten distinguir el cambio de la estructura del poro.

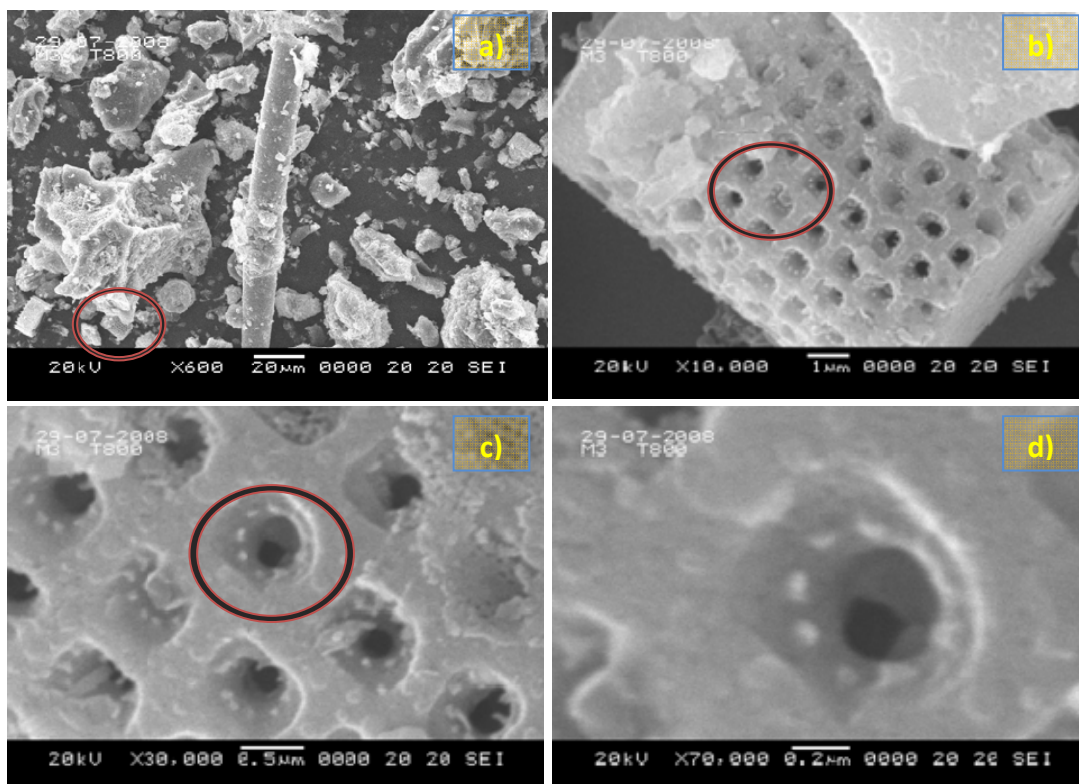


Ilustración 4.14 Activación del poro de las diatomeas de simetría bilateral a 800°C: a) Acercamiento de 600X; b) Acercamiento de 10,000X; c) Acercamiento de 30,000X; d) Acercamiento de 70,000X

En la *ilustración 4.14-a*) se observa un acercamiento exploratorio de 600 veces el tamaño real de la diatomita, sobre una pequeña sección de la *ilustración 4.13-a*, con el objetivo de incrementar la magnitud del acercamiento sobre el fósil en las siguientes fotografías. La *ilustración 4.14-b*) presenta un acercamiento de 10,000 veces el tamaño real la *ilustración 4.14-a*, en el cual se enfoca una frústula de diatomea de simetría bilateral que no presenta cambios significativos en su tamaño de poro. En la *ilustración 4.14-c*) se muestra un acercamiento de 30,000 veces el tamaño real sobre la *ilustración 4.14-a* donde se puede

ver claramente la formación de puntos pequeños en la superficie interior de los poros. La *ilustración 4.14-d*) es una acercamiento de 70,000 veces el tamaño real de la *ilustración 4.14-a* que confirma la activación del poro.

Finalmente, se puede concluir por medio de la *ilustración 4.9* hasta la *ilustración 4.14* que las estructuras de los minerales presentes en la superficie de la diatomita sufren modificaciones importantes a partir de los 500°C; sin embargo, a temperaturas cercanas a los 800°C no es posible identificar las diatomeas del tipo *Bacillariophyceae* y los fósiles de simetría bilateral presentan poros activados.

4.3 METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE REACTIVIDAD DE LA DIATOMITA

El análisis de reactividad de la diatomita se utiliza para determinar si cumple con los requerimientos de la industria de alimentos, especialmente, para clarificar *mosto y vino*, sin causar contaminación debido a la presencia de sustancias que no forman parte de la composición natural del material. En esta sección se han considerado cuatro pruebas químicas, específicas para el uso de la diatomita, estas son: *olor y sabor en vinos, medida del cambio del potencial de Hidrógeno y determinación de compuestos disueltos en ácidos diluidos*.

4.3.1 PRUEBAS DE OLOR Y SABOR SOBRE UNA MUESTRA DE VINO.

Las pruebas de olor, sabor y color en vino son pruebas cualitativas, específicas para evaluar el grado de aceptabilidad de las diatomeas⁵, las cuales se han realizado haciendo uso de las normas OIV (Organización internacional de la Viña y el Vino). Para lograr esta prueba se añade una masa conocida de diatomita (previamente expuesta a una temperatura de 550°C) en vino durante 24 horas, para evaluar los cambios que se puedan producir en las propiedades organolépticas del mismo.

⁵ Artículo 5, párrafo 4 de la *Convención Internacional de Unificación* de los métodos de análisis y de apreciación de los vinos del 13 de octubre de 1954.

Los resultados obtenidos al concluir el procedimiento experimental demuestran que el sabor y el aroma del vino no se han modificado de manera significativa; sin embargo, si se ha determinado que el material no sedimenta fácilmente debido a la naturaleza del vino y que para evaluar el cambio en el color es necesario el uso de medias filtrantes especializadas, que permitan retener la diatomita con diámetros cerca de las 5 micras.

4.3.2 MEDIDA DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO

Se pretende evaluar la influencia del *potencial de Hidrógeno (pH)* por medio de la presencia de diatomita en solventes de pH inicial conocido; para ello se vierte material calcinado previamente a 550°C en un volumen determinado de solvente, con el propósito de cuantificar el posible cambio en el valor del pH.

Para evidenciar y asegurar que el fenómeno ocurre sólo por la presencia de diatomita, es necesario emplear solventes de control como *agua destilada y agua dura*. La *ilustración 4.15* muestra el medidor de pH utilizado.



Ilustración 4.15 Equipo para medir pH

En la *tabla 4.10* se presentan los resultados obtenidos para la *medida del pH*.

Tabla 4.10 Valores de pH para la diatomita en agua

Prueba	pH Agua Destilada	pH Agua Dura
Inicial	3.88	7.01
Final Diatomita + Agua	7.61	7.59

En base a los valores de pH de la *tabla 4.10* se concluye que, al inicio del experimento el pH de cada solvente es muy diferente entre sí y los valores obtenidos al final de la prueba establecen una diferencia muy pequeña de 0.02 en el valor medido. Las especificaciones del equipo indican que el grado de exactitud es de ± 0.1 , por lo tanto, el resultado es satisfactorio ya que se encuentra en el intervalo que permite clasificar al material como *diatomita calcinada (rosada)*, por tener un pH comprendido entre 5 y 7.5. Este valor es óptimo para aplicaciones de productos alimenticios ya que se consideran valores neutros.

4.3.3 DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS DISUELTOS EN ÁCIDOS DILUIDOS

La metodología para determinar los compuestos disueltos en ácidos diluidos tiene como objetivo cuantificar la pérdida de peso de la diatomita y determinar el grado de reactividad que presenta el material luego de combinarse con una solución de HCl [20% p/p], ya que de esta manera se puede evidenciar la presencia de elementos metálicos capaces de formar enlaces con el ión Cl^- .

El experimento se lleva a cabo en dos etapas: *primero*, se observa el tipo de reacción generada por el HCl en contacto con el material; *segundo*, se determina la presencia de metales en el agua residual clarificada.

En la *primera etapa*, la solución ácida presenta un cambio de color, de cristalino a turbio (a causa de los sólidos); mientras que, la diatomita no presenta una reacción evidente y debido a su naturaleza se forman dos fases, sedimentando gran cantidad del material.

En la *segunda etapa*, se calienta la solución ácida hasta ebullición para acelerar la reacción de los metales que el material puede contener. Esto provoca un cambio de color en la fase sobresaturada del fondo (diatomita) de gris a verde musgo y el color en la solución de ácido sufre un cambio hasta tomar un color amarillo; los colores se mantienen por poco tiempo (ver *ilustración 4.16-a*) lo que indica una reacción química. Finalmente, la fase sedimentada mantiene una coloración verde musgo y el color de la fase del ácido se vuelve anaranjada. En la *ilustración 4.16-b* se muestran los colores finales de la mezcla.

A continuación se debe separar el sólido de color verde musgo denominado “fase A” de la solución de ácido clorhídrico denominado “fase B”, esto se logra filtrando la mezcla descrita anteriormente; luego, se vierte la “fase A” rica en diatomita en una cápsula de porcelana y se calienta en una mufla para luego ser pesada.

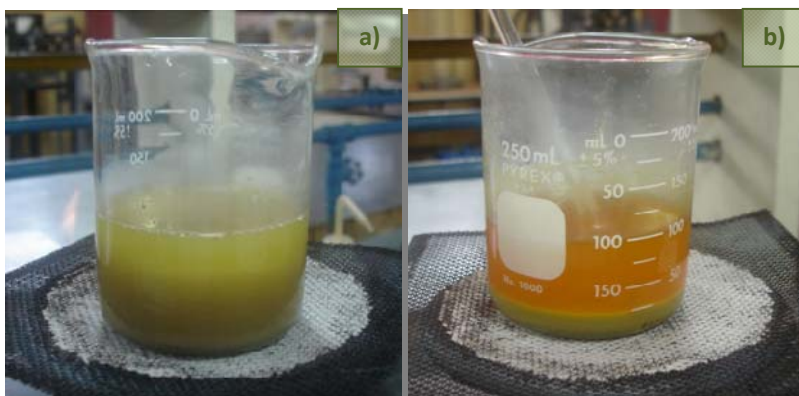


Ilustración 4.16 Mezcla de diatomita y ácido clorhídrico:
a) Antes de la ebullición; b) Después de la ebullición

En la *tabla 4.11* se presentan los datos obtenidos para esta prueba. La pérdida de peso del residuo insoluble es igual a 1.49 gramos, este resultado indica la presencia de elementos metálicos solubles en presencia de sustancias ácidas contenidas en la diatomita y al comparar los resultados de la *fluorescencia de rayos X* (ver *sección 4.1.2*) mostrados en la *tabla 4.2* con los cambios de color observados, se confirma que uno de los metales con gran presencia es el *Hierro* (Organismo Internacional de la Viña y el Vino, 2005).

Tabla 4.11 Pérdida de peso de la diatomita después de mezclarse con ácido

Masa a determinar	m (g)
M _{diatomita}	10
M _{cápsula}	60.18
M _{cápsula + diatomita}	68.69
M _{final diatomita}	8.511
M _{perdida}	1.49

4.3.3.1 Hierro soluble en ácidos diluidos.

El porcentaje de hierro disuelto total presente en la solución ácida se puede determinar utilizando un kit de análisis específico para cuantificar este metal (ver *ilustración 4.17-a*).

La técnica consiste en comparar, haciendo uso de un colorímetro portátil, una muestra del agua problema contra otra muestra mezclada con indicadores químicos que demuestran la presencia de hierro disuelto de manera cuantitativa (HACH COMPANY, 2000).

Haciendo uso de la solución obtenida en la *sección 4.3.3* denominada “fase B” y el equipo Ferrover de HACH COMPANY es posible leer directamente la concentración en *partes por millón (ppm)* en la escala del equipo.



Ilustración 4.17 Determinación de hierro en diatomita: a) Equipo para cuantificar hierro; b) Comparación entre el blanco, dilución 1:2 y muestra

Se debe preparar una dilución de 1:2 (2,5 mL de solución “fase B” en 2,5 mL de agua destilada) para poder medir la concentración de hierro en el equipo. La concentración real se calcula con la *ecuación 4-7*.

$$\text{Hierro total en ppm} = \text{valor de la escala} * \text{factor de dilución}$$

Ecuación 4-7

$$\text{ppm} = 4.6 * 2 = 9.2 \text{ ppm}$$

Según el *Organismo Internacional de la Viña y el Vino*, la concentración máxima de hierro permitida es 300 mg/kg; entonces, se debe calcular la cantidad de hierro disuelto contenido en la solución ácida de la siguiente manera:

$$\left(\frac{9.2 \text{ mg}}{1 \text{ l}}\right) \left(\frac{1 \text{ l}}{1 \text{ kg}}\right) = 9.2 \text{ mg/kg}$$

La concentración de hierro obtenida es mucho menor que la concentración máxima de la norma OIV, por lo tanto, se puede utilizar la diatomita en estudio para la clarificación de mosto y vinos. Sin embargo, la norma recomienda practicar pruebas adicionales de arsénico, plomo y mercurio para concluir sobre la inocuidad del material en el uso con alimentos.

4.4 METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE ADSORCIÓN DE LA DIATOMITA

La *adsorción* es un proceso de separación en la que uno o más componentes de una fase líquida (*adsorbato*) se transfieren hacia la superficie de un sólido (*adsorbente*). El estudio de materiales con características aptas para adsorber selectivamente ciertos compuestos es de gran importancia en la industria actual, puesto que, a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio es posible diseñar equipos que permitan implementar las propiedades del material para resolver dificultades en la industria. Es posible determinar algunas características indispensables para el diseño de equipos a través de metodologías ya establecidas que dependen del fenómeno de adsorción de interés (*fisiosorción* y *quimiosorción*). Entre las características más importantes se encuentra la *porosidad*, ya que son preferidos los adsorbentes que presentan una elevada porosidad y una gran área interna por unidad de volumen porque la acumulación por área de contacto es óptima.

Para el diseño de *sistemas de adsorción* es necesario seleccionar el material adsorbente y para ello, se debe conocer el equilibrio entre el soluto en la fase líquida y la fase

adsorbente. Después de calcular las propiedades de este equilibrio (capacidad de adsorción y selectividad en función de variables como temperatura y concentración del adsorbato), se debe entender como toma lugar la operación de adsorción para un lote determinado, en sistemas de lechos fijos y lechos móviles; este proceso incluye la realización de pruebas de carácter dinámico. En la etapa de diseño es importante evitar el *sobredimensionamiento*, el cual puede provocar el desperdicio excesivo de recursos.

Al realizar estas pruebas se debe considerar el tipo de operación en estudio y los ciclos de estado específicos para cada arreglo en función de las capacidades del adsorbente (cuando se aplique una regeneración al material); además, se deben utilizar diferentes concentraciones de adsorbato en el arreglo de material adsorbente programados en diferentes periodos de alimentación.

4.4.1 CARACTERIZACIÓN DEL EQUILIBRIO DE ADSORCIÓN

La fase de equilibrio entre un fluido y una fase adsorbente para uno o más compuestos adsorbidos es usualmente el factor más importante que afecta el desarrollo del proceso. En muchos procesos el incremento de la capacidad de transferir masa y calor se debe a la fijación de ciertas condiciones, como el cambio en la forma o el establecimiento de condiciones isotérmicas; además, la capacidad de uso de un adsorbente depende de la concentración de adsorbato en el fluido y la temperatura. Las expresiones gráficas de los equilibrios de adsorción para componentes simples están formadas usualmente por *isotermas*, las cuales se pueden clasificar como isotermas favorables y desfavorables (Perry, Robert H.; Green, Don W. & Maloney, James O. , 2001).

Entre los estadios más recomendados para los materiales que presentan alta porosidad se encuentran las *isotermas de BET*, que se llevan a cabo en condiciones controladas y pueden aplicarse en compuestos con capacidad de adsorción en monocapa y multicapa, sobre la superficie específica de contacto con el fluido.

4.4.2 DETERMINACIÓN DEL ÁREA ESPECÍFICA DEL MATERIAL

El método más utilizado para determinar el área específica superficial de contacto del material es el *método de adsorción de gas nitrógeno*. Otro método similar consiste en utilizar kriptón a temperatura de nitrógeno líquido, ya que favorece el cálculo de áreas superficiales pequeñas como la de algunos polvos. Muchos gases pueden ser utilizados como vapor de agua a temperatura ambiente y a 78°C.

Cuando se necesitan valores precisos, el cálculo más confiable se realiza tomando como primera alternativa, una metodología que presente resultados sobre materiales estandarizados y además, debe contar con una publicación de datos a diferentes condiciones; luego, se comparan los resultados obtenidos con los resultados de un ensayo de la prueba de BET a temperatura de nitrógeno líquido (si se cuenta con ella).

Si la cobertura del área es muy baja, es posible utilizar Dióxido de Carbono (CO₂), a temperatura ambiente; en este caso, la aplicación de la *ecuación de Freundlich* es lo más apropiado. El *método de permeametría* es frecuentemente utilizado para propósitos de control debido a su simplicidad.

Otras técnicas para calcular el área específica de adsorción incluyen la *adsorción por dilución*, generada a partir de las pequeñas cantidades que pueden ser adsorbidas por el material, pero presenta algunos problemas debido a su grado de exactitud. Los estudios de adsorción de este tipo han sido experimentados con ácidos grasos, polímeros, iones, tinturas y electrolitos, usando un buen número de técnicas analíticas.

Para determinar un punto individual en la isoterma de adsorción de una solución binaria se debe exponer, en un recipiente, una solución de concentración conocida con una cantidad conocida de adsorbente en condiciones de temperatura estables y luego, se agita el recipiente por muchas horas. Después de alcanzar el equilibrio, se debe tomar una alícuota del lote de solución resultante y se mide su nueva concentración.

4.4.2.1 Determinación del área superficial por adsorción de tinturas

Las tinturas han sido utilizadas por muchos investigadores para evaluar la superficie específica, aún cuando el procedimiento no ha sido completamente aceptado debido a la inconsistencia de los resultados que han sido reportados entre diferentes tinturas y la aplicación de diferentes metodologías. Las inconsistencias son atribuidas principalmente a la elección no justificada de las tinturas y el incompleto conocimiento de los procesos de adsorción.

El procedimiento experimental que se utiliza para obtener el área superficial de sólidos, se basa en un experimento de adsorción de una tintura de *azul de metileno*, planteado en 1969 por *Giles* (Scarlett, y otros, 1997), con el propósito de obtener un valor aproximado de la superficie de contacto del material poroso particulado. *Giles* estudió la orientación molecular de las tinturas sobre la superficie de grafito y concluyó que las tinturas azoicas no iónicas son adsorbidas completamente por un arreglo de monocapa sobre la superficie del material.

El experimento consiste en adicionar una cantidad determinada de material adsorbente (en este caso, diatomita) a una solución estandarizada de azul de metileno (adsorbato) dentro de diferentes tubos de ensayo (ver *ilustración 4.18-a*), luego se deben centrifugar (ver *ilustración 4.18-b*) y finalmente, se toma una alícuota de la solución resultante para ser analizada por medio de una técnica espectrofotométrica (*ilustración 4.18-c*).



Ilustración 4.18 Prueba de Giles: a) Tubos antes de centrifugar; b) Centrifuga de alta velocidad; c) Espectrofotómetro de doble haz

Después del proceso de centrifugación se puede observar a simple vista que la diatomita posee una gran capacidad para adsorber al azul de metileno en solución (ver *ilustración 4.19*). El fenómeno comienza desde el momento en que se agrega el adsorbente al adsorbato, antes de la centrifugación y la diatomita precipita el azul de metileno simplemente al encontrarse en contacto con la solución.

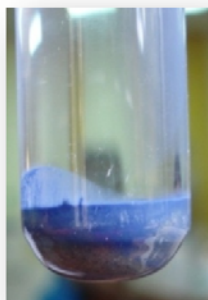


Ilustración 4.19 Efecto de la diatomita en azul de metileno en solución

Durante el desarrollo del experimento se han realizado pruebas con diferentes concentraciones de azul de metileno, de las cuales se establece que la mejor concentración para cuantificar la capacidad de adsorción es de 60 ppm y entonces se vierten diferentes cantidades de diatomita en los tubos de ensayo con la solución. Posteriormente, se toma la alícuota de la fase líquida y se lee la absorbancia por medio del espectrofotómetro; el resultado se compara con una *curva de calibración estandarizada*. La construcción de la curva de calibración se describe en la *sección 4.4.2.2*.

4.4.2.2 CURVA DE CALIBRACIÓN DEL AZUL DE METILENO

Cuando se determina espectrofotométricamente la concentración de un soluto de una disolución es imprescindible conocer la *longitud de onda* (λ) a la cual se produce la máxima absorción de energía. Si no se conoce este valor, se puede elaborar el “*espectro de absorción de una sustancia pura*”, que consiste en hacer incidir un haz de luz a diferentes longitudes de onda sobre una solución con concentración conocida de la sustancia en estudio (en este caso, una solución de azul de metileno); luego se identifica la longitud de onda a la cual se produce la máxima absorción ($\lambda_{\text{máx}}$).

Los datos obtenidos para el *espectro de azul de metileno* se muestran en la *tabla 4.12* y se indica en letra negra que la longitud de onda a la cual se observa la máxima absorbancia es 665 nm.

Tabla 4.12 Datos para el espectro de absorción del azul de metileno

C_{Azul de Metileno} = 6 ppm	
λ (nm)	Absorbancia
680	0.013
670	0.022
665	0.045
660	0.024
655	0.023
650	0.022

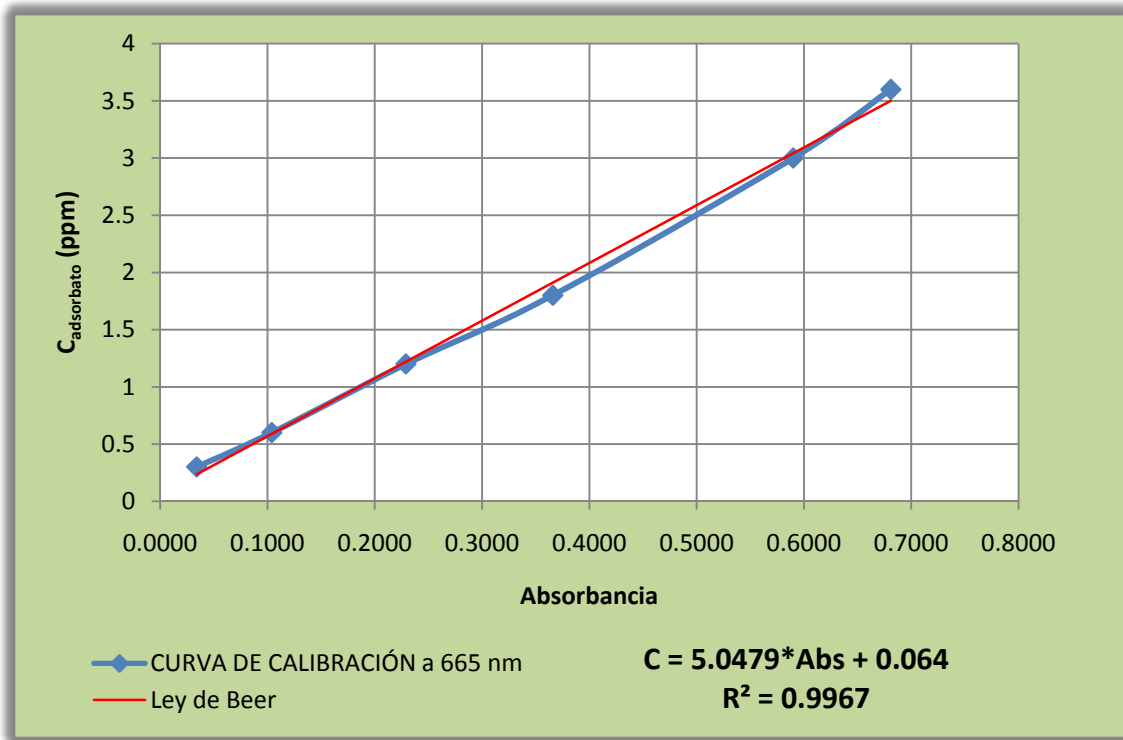
Después de definir $\lambda_{m\acute{a}x}$, se debe elaborar la “*curva de calibración del azul de metileno*” que describe la capacidad de absorción de energía de dicha sustancia a diferentes concentraciones, manteniendo una longitud de onda constante. Los datos obtenidos para elaborar dicha curva se presentan en la *tabla 4.13*.

Tabla 4.13 Datos para elaborar la curva de calibración de azul de metileno

λ = 665 nm	
C_{Azul de Metileno} (ppm)	Absorbancia
0.3	0.034
0.6	0.104
1.2	0.229
1.8	0.366
3.0	0.590
3.6	0.681

En la *gráfica 4.18* se muestra el comportamiento de los datos experimentales de la *tabla 4.13* y además, se incluye una *regresión lineal* en base a la ecuación que describe la *Ley de Beer* (ver *ecuación 4-8*) que posee un valor de R cuadrado de 0.9967.

Gráfica 4.18 Curva de calibración del azul de metileno para espectrofotometría



Para calcular la concentración remanente de azul de metileno en la fase líquida se utiliza la *ecuación 4-8*, que se obtiene de la curva calculada en la *gráfica 4.18*, la cual se muestra a continuación:

$$C_{Azul\ de\ Metileno} = 5.0479 * Absorbancia + 0.064 \quad \text{Ecuación 4-8}$$

La concentración de adsorbato sobre el sólido adsorbente se obtiene realizando el balance de masa de la *ecuación 4-9*:

$$CAM_{Equilibrio} = CAM_{Inicial} - CAM_{Adsorbido} \quad \text{Ecuación 4-9}$$

Donde *CAM* se refiere a la concentración del azul de metileno y el subíndice, su estado.

Luego, se calcula la cantidad de tinte (azul de metileno) en una cobertura de monocapa por gramo de adsorbente (Y_m), considerando σ como el área molecular⁶ de la superficie

⁶ En inglés se denomina *flat molecular area*

de la tintura, donde N es el *número de Avogadro*. El valor de la *superficie específica*⁷ (S_w) está dado por la *ecuación 4-10*:

$$S_w = \frac{Y_m \cdot N \cdot \sigma}{X} \quad \text{Ecuación 4-10}$$

Donde, el valor de σ para el azul de metileno⁸ es igual a 1.2 nm^2 y X es igual a 2.

En la *tabla 4.14* se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de análisis de espectrofotometría de las muestras sometidas a interacción con una solución de 60 ppm de azul de metileno.

Tabla 4.14 Resultados obtenidos con el método de tinturas

$m_{\text{diatomita}}$ (g)	Absorbancia	C_{FF} (ppm)	C_{FF} (mol/m ³)	C_{FA} (ppm)	M_{XR} (g)	% Adsorción	Y_M (mmol/g)	S_w (km ² /kg)
0.09000	0.09700	0.54900	0.00172	59.45100	0.00059	99.08500	0.02065	0.00746
0.08000	0.10000	0.56400	0.00176	59.43600	0.00059	99.06000	0.02323	0.00839
0.07000	0.12100	0.67000	0.00209	59.33000	0.00059	98.88333	0.02650	0.00957
0.06000	0.12700	0.70100	0.00219	59.29900	0.00059	98.83167	0.03090	0.01116
0.05500	0.15700	0.85200	0.00266	59.14800	0.00059	98.58000	0.03362	0.01215
0.05000	0.42900	2.22900	0.00697	57.77100	0.00058	96.28500	0.03612	0.01305
0.04500	1.16300	5.94300	0.01858	54.05700	0.00054	90.09500	0.03756	0.01357
0.04000	1.18300	6.04400	0.01890	53.95600	0.00054	89.92667	0.04217	0.01524

Las filas rosadas corresponden a los valores que no cumplen con la *ley de Beer* y sólo se han calculado para reflejar una tendencia aproximada.

Estos ensayos fueron ordenados de manera decreciente y las columnas de la *tabla 4.14* se describen a continuación:

- a) m_d (g): se refiere a la masa de diatomita en cada ensayo.
- b) **Absorbancia**: indica la *absorbancia promedio* obtenida para cada valor de " m_d ". los datos reflejan un comportamiento de acuerdo a la *ley de Beer* hasta el valor de 1.163 de absorbancia (correspondiente a la masa de 0.045 g de diatomita), dicho valor

⁷ Ecuación 5.14 de la referencia (Scarlett, y otros, 1997)

⁸ Tomado de la referencia 72 de (Scarlett, y otros, 1997)

promedio indica que los datos no se pueden seguir analizado por esta metodología porque sobrepasan el valor límite del instrumento de análisis que contempla concentraciones menores a 3.6 ppm (según se indica en la curva de calibración) y valores de absorbancia menores que la unidad.

- c) C_{FF} (ppm): es la concentración de azul de metileno en la fase líquida y se calcula sustituyendo los valores de la columna "**Absorbancia**" en la *ecuación 4-8*, exclusivamente para los valores que cumplen la *ley de Beer* con absorbancias menores que la unidad.
- d) C_{FF} (mol/m³): se calcula la concentración de adsorbato en unidades de mol por metro cubico; los cálculos se realizan en base al peso molecular del azul de metileno igual a 319.85 g/gmol y a los datos de la columna C_{FF} (ppm).
- e) C_{FA} (ppm): corresponde a la concentración de azul de metileno en la fase adsorbente y se calcula haciendo uso de la *ecuación 4-9* y los datos de la columna C_{FF} (mol/m³).
- f) M_{XR} (g): es la masa retenida de adsorbato en gramos, que se calcula multiplicando la concentración final retenida en el adsorbente por el volumen total de agua.
- g) % **Adsorción**: indica el porcentaje de adsorción que se obtiene mediante la relación de la masa retenida en el adsorbente y la masa total de azul de metileno en la solución inicial.
- h) Y_m (mmol/g): representa la cantidad de masa total retenida de azul de metileno en el adsorbente por gramo de adsorbente.
- i) S_w (km²/kg): es la superficie específica por masa de adsorbente que se obtiene sustituyendo los datos recopilados en las columnas anteriores en la *ecuación 4-10*.

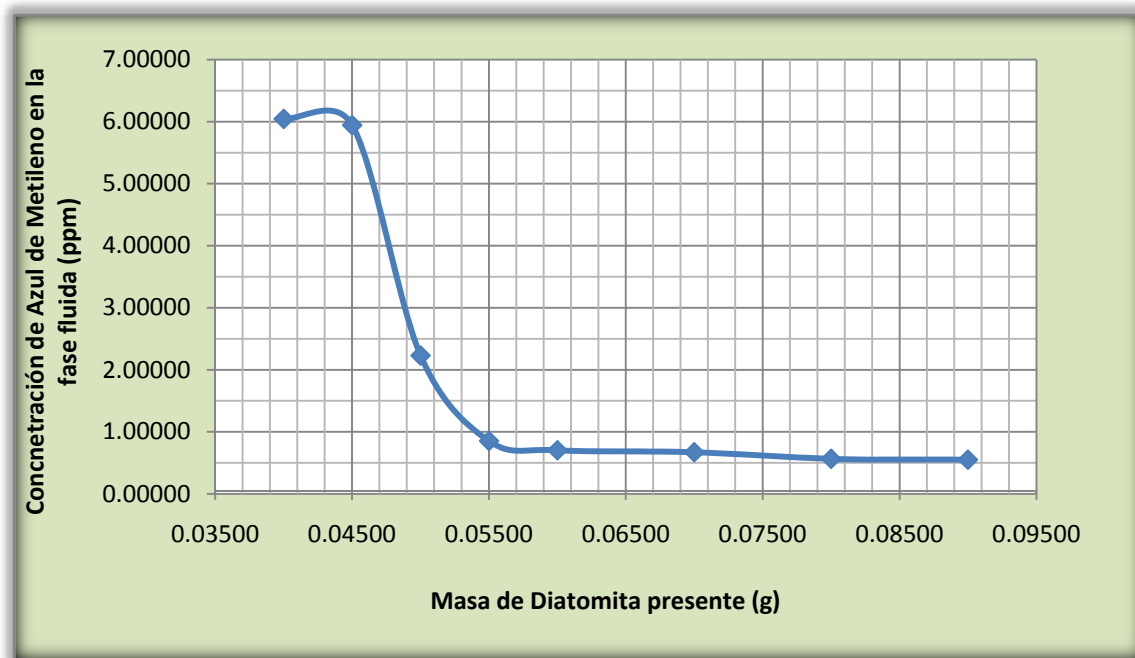
Para comprender de mejor manera los valores obtenidos durante el experimento de tinturas, es necesario que se relacionen los datos obtenidos en la *tabla 4.14*, en ese

sentido es posible interpretar a través de gráficas el comportamiento del material adsorbente frente al azul de metileno.

En la *gráfica 4.19* se expresan los puntos de equilibrio obtenidos entre la masa de adsorbente y el adsorbato, la cual presenta una relación dependiente que explica el fenómeno. Como se puede apreciar, el valor de la concentración de adsorbente disuelto en agua disminuye cuando aumenta el adsorbente activado; sin embargo, se presenta un comportamiento máximo de adsorción a lo largo de un número de ensayos. Se ha determinado que la concentración de adsorbato en la fase fluida no posee un cambio significativo para los intervalos de masa de diatomita desde 0.05 – 0.09 gramos, intervalo donde se presume se encuentra el punto de saturación del material.

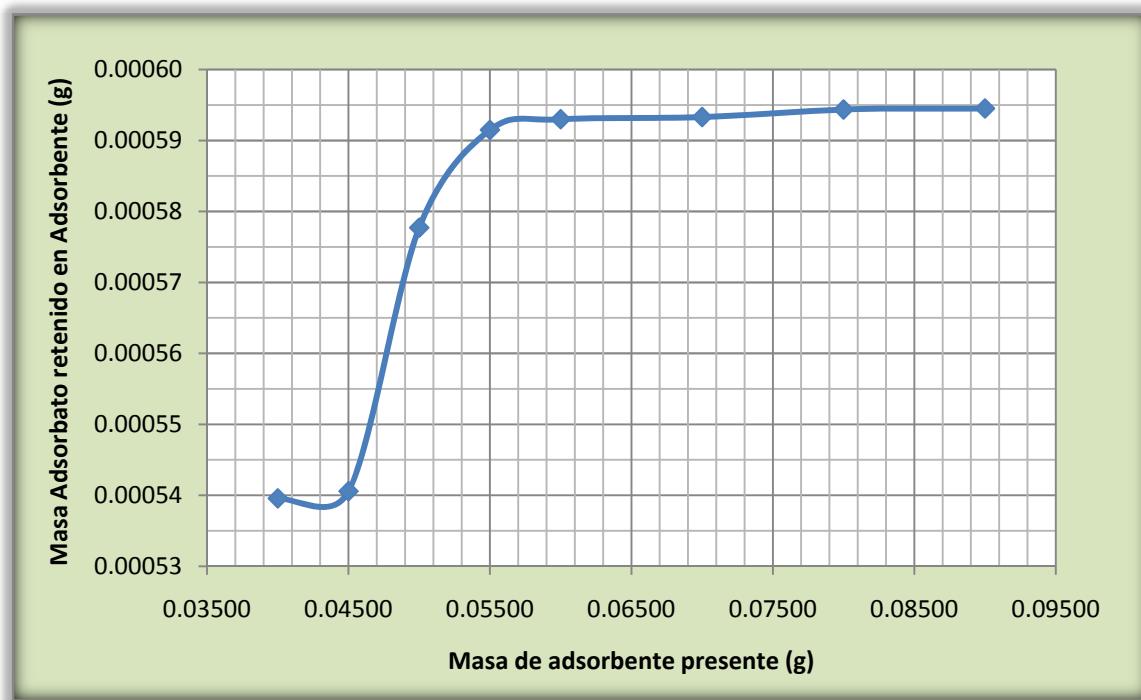
También es importante hacer referencia a la relación entre la masa total retenida (concentración total de azul de metileno retenida) con respecto a la masa de diatomita utilizada, puesto que a partir de los resultados obtenidos, es posible calcular el punto de saturación máximo del material expuesto al adsorbato.

Gráfica 4.19 Masa de diatomita en equilibrio con la solución de azul de metileno



La *gráfica 4.20* muestra la relación existente entre la masa adsorbida y el azul de metileno; al estudiar el comportamiento de los datos se determina que, al aumentar la masa de diatomita, aumenta la masa de azul de metileno retenida, generando una relación directamente proporcional y encontrando dentro del fenómeno un comportamiento constante en la masa de adsorbato retenida, comprendida en un intervalo de masas que tiene inicio en la gráfica desde el valor de 0.05 hasta 0.09 gramos de adsorbente sobre el eje de las abscisas, en este punto se indica la ruptura o sobresaturación del material. Por lo tanto, la pendiente en este rango indicará la masa máxima de adsorbente que el adsorbato podrá retener, lo que permite dimensionar la cantidad de diatomita necesaria a escalas más grandes a partir de los resultados obtenidos (los valores se incluyen en la columna Y_m de la *tabla 4.14*).

Gráfica 4.20 Masa de diatomita saturada de azul de metileno

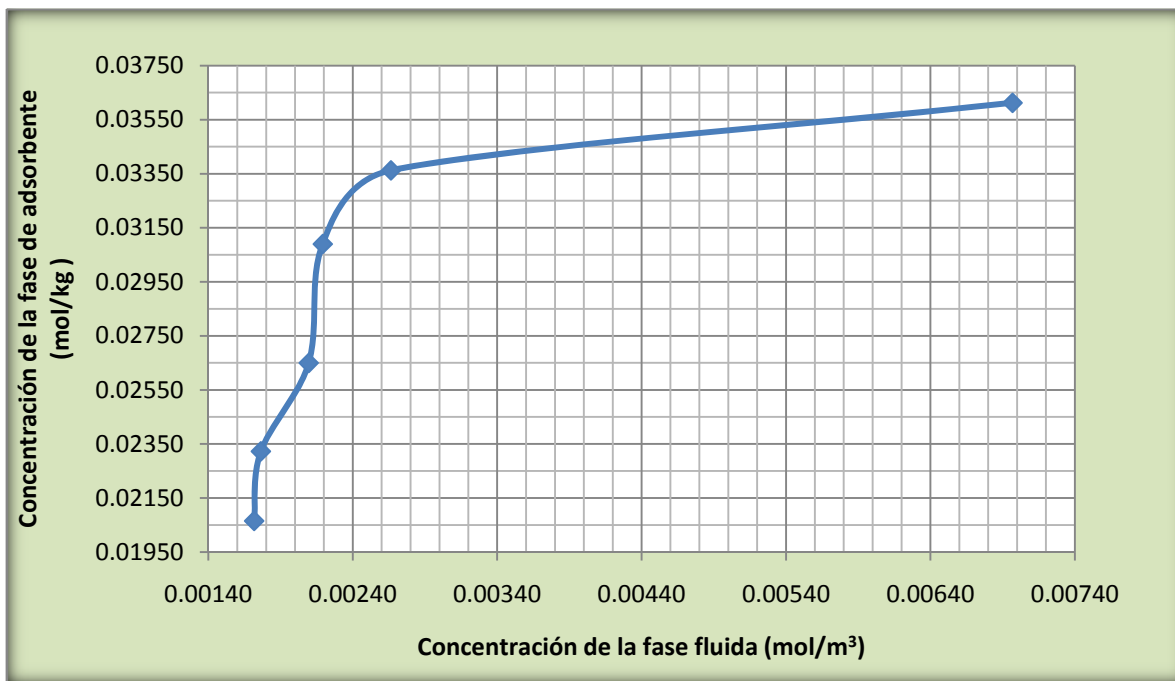


Después de analizar el comportamiento en equilibrio para la fase líquida en función de la cantidad de masa de adsorbente y el comportamiento de la cantidad de masa de adsorbato retenida por masa de adsorbente, se plantea la importancia de comparar la variación de las concentraciones de azul de metileno en cada una de las fases (fase

superior líquida y fase inferior sólida) con el propósito de determinar cómo se comporta la migración de moles de una solución acuosa hacia la superficie adsorbente de la diatomita.

En la *gráfica 4.21* se puede apreciar el comportamiento de migración de los moles de una fase a otra, es evidente que a menor cantidad de diatomita se produce una sobresaturación del material, lo que permite concentraciones más altas en la fase fluida de adsorbato y una cantidad mayor de adsorbato retenido por gramo de adsorbente con respecto a otros puntos donde la concentración de adsorbente es más alta y no ha permitido la sobresaturación del material, permitiendo así, obtener concentraciones de adsorbato en la fase líquida más bajas y por consecuencia, menos masa retenida por gramo de adsorbente. El comportamiento de los datos obtenidos en la *tabla 4.14* según Brunauer permite una clasificación del *tipo I*, es decir, de comportamiento de adsorción favorable (Perry, Robert H.; Green, Don W. & Maloney, James O. , 2001).

Gráfica 4.21 *Isoterma de adsorción para diatomita y azul de metileno a 25°C*



4.4.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA COLUMNA DE ADSORCIÓN

Después de haber calculado el área superficial de la diatomita, es necesario comprobar la capacidad de adsorción del material bajo condiciones controladas, esto es posible a partir del diseño de un experimento a escala de laboratorio. La selección del experimento se basa en un procedimiento tomado de la norma ASTM D-2187, donde se considera el modelo de una columna de adsorción a escala de laboratorio, la cual puede disponerse en flujo ascendente o descendente; se debe aclarar que el material de prueba propuesto en dicha norma es *resina de intercambio iónico* pero este material es sustituido por diatomita activada durante la prueba experimental de esta investigación⁹ (ver figura 4.2).

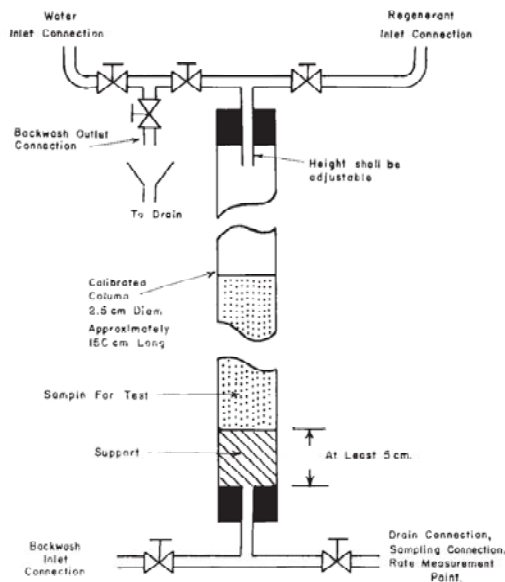


Figura 4.2 Arreglo típico de un aparato para pretratamiento de materiales de intercambio iónico

En la sección 4.4.1 se determinó la capacidad específica del material para adsorber azul de metileno y se presentaron las isotermas de adsorción, por lo tanto, el propósito de construir la columna responde a la comprobación de la capacidad del material para remover una sustancia en flujo continuo y además, determinar si cumple con la relación masa/adsorbente planteada en la sección anterior.

⁹ Tomado de norma ASTM D-2187.

4.4.3.1 *Propiedades del material de relleno*

El material presenta una consistencia friable, similar al talco, lo que permite que sea fácilmente arrastrado por un fluido, además, presenta un grado de compactación notable cuando es retenido por una malla y se aglomera provocando la difícil circulación del fluido a través de él.

Al exponer el material a fuerzas de presión para formar estructuras tales como anillos o perlas para mejorar el flujo a través del lecho, éste presenta una estabilidad muy buena al mantener su forma, sin embargo, cuando es sometido a interactuar con agua, el material pierde su cohesión y es fluidizado, formando taponamientos en los lugares donde es retenido, provocando una falla en el flujo del fluido. Se ha determinado que el estancamiento del flujo se presenta cuando se opera con una disposición de lecho fijo; por lo tanto, la mejor disposición del material para filtrar se ha obtenido cuando la compactación del material es minimizada sobre la superficie que lo retiene. Esto se puede lograr con una disposición de lecho móvil y un arreglo de flujo en contracorriente, donde el material tiene un contacto total con el adsorbato, la formación de estancamiento se reduce haciendo uso de un material inerte que es fluidizado junto con la diatomita, este material puede ser vidrio con una forma esférica uniforme.

Con el objetivo de determinar la disposición del lecho más eficiente, se deben evaluar múltiples arreglos para lechos fijos de diatomita, entre ellos, flujo en serie, con diferentes espesores de material. También se debe de evaluar el uso de materiales de retención para la diatomita, entre los materiales están fibra de vidrio, gravilla multimedia, papel filtro, tela de algodón y mallas de polietileno con tapones de hule. Los diferentes arreglos evaluados durante los ensayos se muestran en la *ilustración 4.20*. Cada uno de los materiales presentó diferente comportamiento en flujo, sin embargo, casi todos permitieron el paso de diatomitas debido a la característica de ser fácilmente fluidizable, por lo que se optó en utilizar un material que no redujera significativamente el flujo como el papel filtro Whatman No.40.

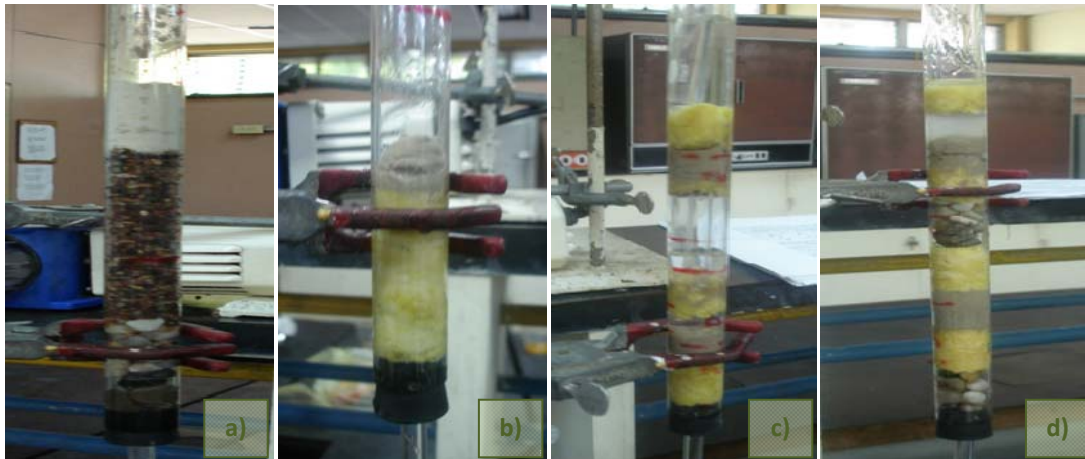


Ilustración 4.20 *Diferentes arreglos para el lecho de diatomita en la columna de adsorción: a) Soporte con gravilla multimedia; b) Soporte con fibra de vidrio; c) Lechos en serie utilizando fibra de vidrio; d) Lechos en serie utilizando gravilla multimedia y fibra de vidrio*

Una vez elegido el material de soporte se experimentó con la disposición del lecho y en base a los resultados obtenidos se determinó que la disposición de lecho fijo presentó estancamiento de flujo en casi todos los arreglos, fue necesario experimentar disponiendo del material en lecho móvil, para evitar las fuerzas de cohesión provocadas en las pruebas anteriores. La disposición del lecho móvil permitió un arreglo en la columna, tal que el flujo de solución de azul de metileno se dispuso en contra de la gravedad, con el propósito de expandir el lecho y evitar su aglomeración, esta configuración en la columna permitió obtener mejores resultados para el fenómeno de adsorción, obteniéndose concentraciones de azul de metileno en el agua filtrada muy bajas, con rendimientos de remoción de hasta el 99.9%, lo que demuestra que el material puede ser utilizado en procesos de filtración con gran eficiencia.

En la *ilustración 4.21* es posible visualizar la progresión del fenómeno de adsorción mientras se mantiene una disposición de la diatomita en lecho móvil. En la *ilustración 4.21-a)* se observa la solución de azul de metileno antes de interactuar con la diatomita; en las *ilustraciones 4.21-b) y 4.21-c)* es posible apreciar el contacto inicial de la diatomita con la solución de azul de metileno, presentando un cambio de color y distribución del

fluido casi de inmediato; la *ilustración 4.21-d)* presenta el fenómeno de adsorción completo.

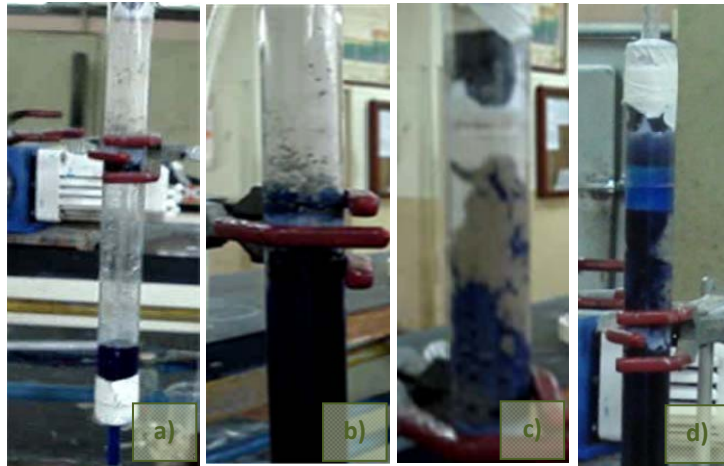


Ilustración 4.21 Progresión del fenómeno de adsorción para una disposición de lecho móvil con flujo en contracorriente

Para lograr el flujo de la solución problema a través del material ha sido necesario el diseño del sistema que se muestra en la *ilustración 4.22*, que consiste en: 1) una bomba de alta presión y de flujo constante, con una capacidad de 100 psi y 15 galones por día; 2) se aprecia la disposición de la columna en contracorriente; 3) Frasco recolector de agua filtrada; 4) Frasco de Alimentación de Una solución de azul de metileno de concentración conocida y 5) Frasco de descarte para liberar presión excedente en columna.

El proceso de filtración ha presentado la capacidad de remoción de azul de metileno es de 99.99%, este resultado se ha obtenido haciendo uso de la espectrofotometría de luz visible, con una absorbancia de 0.12 y una concentración de 0.668 ppm. Este resultado reproduce los valores obtenidos por medio del método de las tinturas, en el cual se logra evidenciar esta capacidad. La capacidad de remoción para este sistema resultó notablemente superior a lo esperado, ya que durante las pruebas se determinó que el material adsorbió todo el azul de metileno, reteniéndolo.

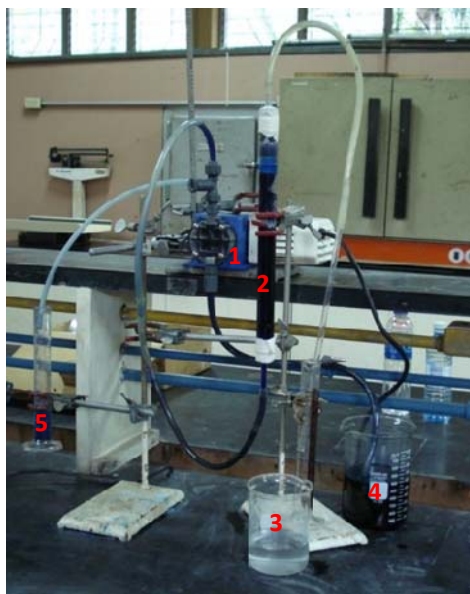


Ilustración 4.22 Equipo de laboratorio para determinar la capacidad de adsorción de la diatomita

En la *ilustración 4.23* se muestra el frasco recolector de agua y el frasco de la solución estandarizada, al comparar ambos frascos, se logra evidenciar que la remoción es casi completa.

En la *ilustración 4.24* se compara la capacidad de adsorción de la columna cuando se presentan 4 muestras tomadas en diferentes tiempos de la filtración. Se observa que el proceso de filtración inicia con una limitada agua turbia mezclada con diatomita, luego, con un volumen aproximado de 5 ml hasta estabilizarse, la etapa de filtración produjo 3 litros de agua filtrada.



Ilustración 4.23 Comparación de la solución de entrada y salida de la columna de adsorción

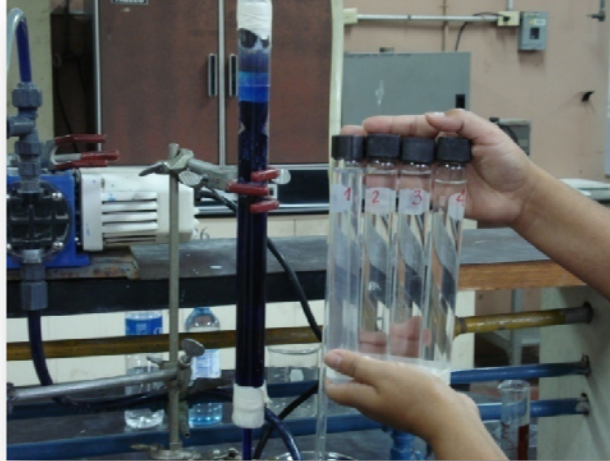


Ilustración 4.24 Comparación del agua obtenida en diferentes tiempos durante el proceso de adsorción

4.5 METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE REOLOGÍA DE LA DIATOMITA

Debido a que la diatomita posee un gran campo de aplicación como materia prima en diferentes industrias es necesario evaluar las propiedades reológicas que presenta al ser expuesta a un fluido. El agua como fluido de prueba resulta conveniente debido a que es utilizado en industrias de manufacturación de pigmentos, perforación de pozos, entre otros; además, permite mostrar el cambio de las propiedades de interés sin la interferencia de ningún agente externo.

Las metodologías de evaluación de las propiedades reológicas se han limitado con el propósito de obtener valores generales en el comportamiento, valores que puedan ayudar a identificar relaciones *masa fluido* con *propiedades reológicas* deseables; también permite encontrar valores importantes como las concentraciones de saturación y las viscosidades máximas que el material puede desarrollar, para luego tomarlo de base en el estudio de la viscosidad cuando es aumentada gradualmente la cantidad de agua, hasta llegar al punto límite donde la viscosidad encontrada no tiene aplicación industrial.

La metodología para evaluar la naturaleza reológica del material por medio de la viscosidad se realiza mediante una *curva de viscosidad contra concentración*, que se

obtiene empleando el viscosímetro rotacional Haake (ver *ilustración 4.26*), en el cual se pueden leer valores de viscosidad entre 1 y 300 centipoises (cP) a velocidad angular constante.



Ilustración 4.25 Viscosímetro rotacional Haake

4.5.1 ELABORACIÓN DE CURVA DE VISCOSIDAD CONTRA CONCENTRACIÓN

El procedimiento para elaborar la *curva de viscosidad* consiste en saturar una cantidad de diatomita con agua destilada para formar una mezcla pastosa; luego se adicionan volúmenes estequiométricos de agua lo suficientemente pequeños como para modificar la viscosidad; finalmente, se obtiene la concentración de la mezcla y su viscosidad.

Este proceso se realiza por triplicado, siendo reproducible y los valores promedio obtenidos se muestran en la *tabla 4.16*, donde:

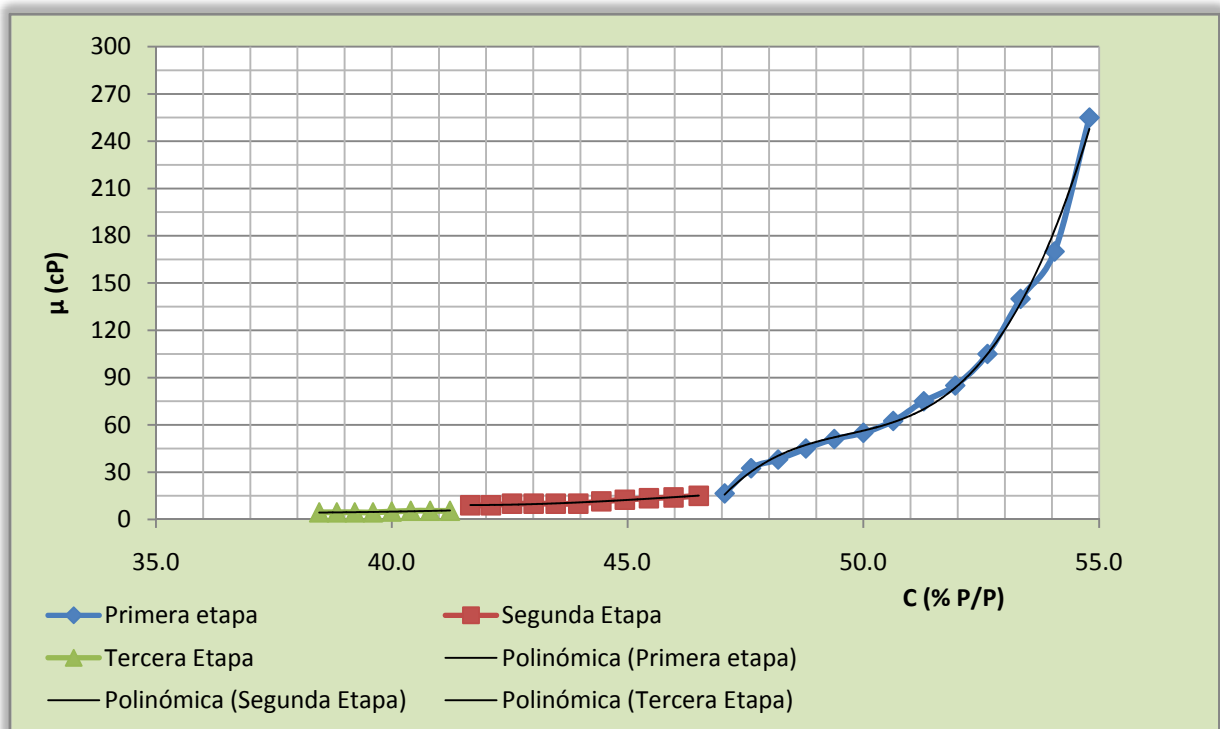
- a) m_{agua} (g): es la masa de agua en gramos, adicionada a una masa de 200 gramos de diatomita expuesta a temperatura ambiente.
- b) C (% P/P): se refiere a la masa de diatomita por masa total de la mezcla.
- c) μ (cP): indica los valores de viscosidad leídos para cada una de las concentraciones del literal b.

Tabla 4.15 Viscosidades para diatomita DM1 en función de la concentración

m _{diatomita} = 200 g a 25°C								
m _{agua} (g)	C (% P/P)	μ (cP)	m _{agua} (g)	C (% P/P)	μ (cP)	m _{agua} (g)	C (% P/P)	μ (cP)
135	59.70	> 300	215	48.19	38	275	42.11	9
160	55.56	> 300	220	47.62	32.5	280	41.67	9
165	54.79	255	225	47.06	16.5	285	41.24	5.5
170	54.05	170	230	46.51	15	290	40.82	5.5
175	53.33	140	235	45.98	14	295	40.40	5.5
180	52.63	105	240	45.45	13.5	300	40.00	5
185	51.95	85	245	44.94	12.5	305	39.60	4.5
190	51.28	75	250	44.44	11.5	310	39.22	4.5
195	50.63	62.5	255	43.96	10	315	38.83	4.5
200	50.00	55	260	43.48	10	320	38.46	4.5
205	49.38	51	265	43.01	10			
210	48.78	45	270	42.55	10			

A partir de los datos obtenidos en *tabla 4.16* se genera la *gráfica 4.22*, donde se aprecia el comportamiento de la viscosidad en función de la concentración del material.

Gráfica 4.22 Comportamiento de la viscosidad de diatomita DM1 contra la concentración



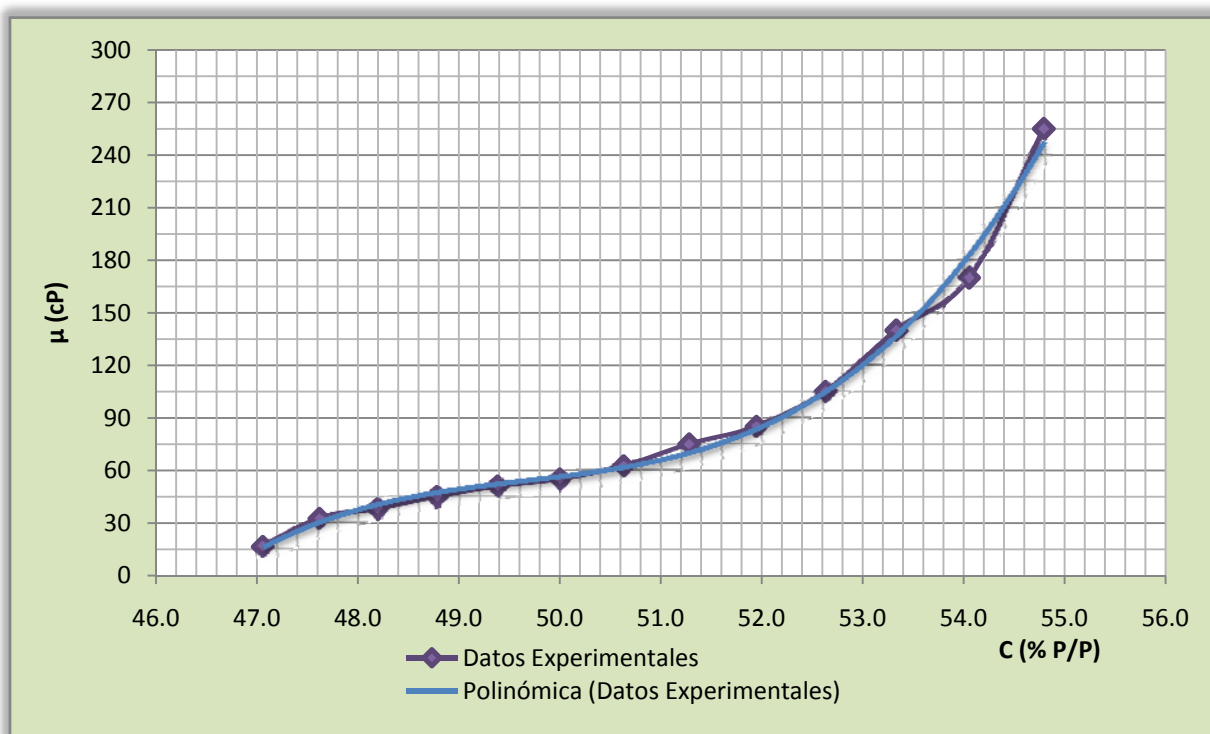
En la *gráfica 4.22* puede advertirse un comportamiento en tres etapas, durante la primera etapa se aprecia una caída en la viscosidad dramática, presentando una influencia marcada con la adición de agua, sin embargo en la segunda etapa se muestra un comportamiento relativamente estable, manteniendo valores entre 15 a 10 cp. La tercera etapa se caracteriza por presentar valores estables con viscosidades casi constantes entre 9 y 5.

La primera está comprendida entre las concentraciones desde 54.79 hasta 47.06, la ecuación que representa el comportamiento de la viscosidad es la siguiente:

$$\mu = 1.1752C^3 - 175.08C^2 + 8701C - 144206 \quad \text{Ecuación 4-11}$$

La correlación de datos obtenida a partir de los datos para la primera etapa analizada resultado de $R^2 = 0.9946$. El comportamiento de los datos junto con los datos se puede apreciar en la *gráfica 4.23*.

Gráfica 4.23 Comportamiento de la viscosidad de diatomita DM1 contra la concentración para la primera etapa del experimento

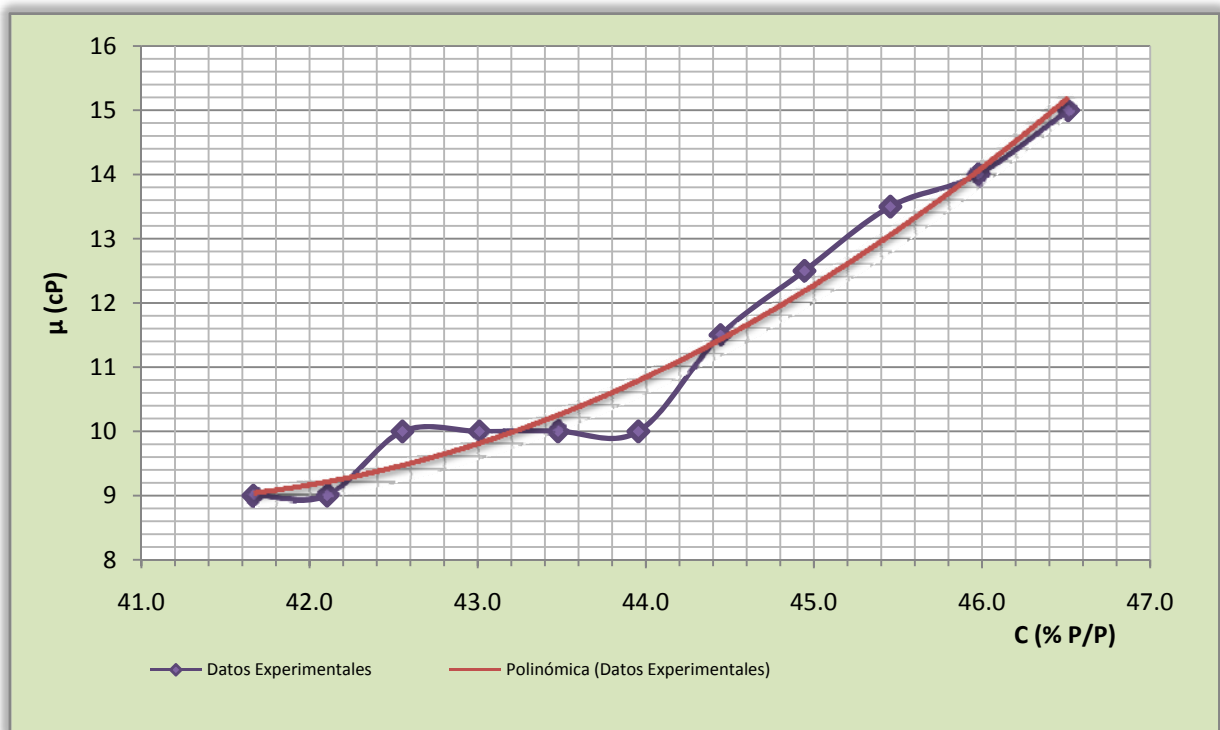


La segunda etapa presenta valores de viscosidad más baja, además se ve que el agua tiene menos influencia sobre la viscosidad, como se aprecia en la primera etapa, está delimitada en las concentraciones desde 46.51 hasta 41.67.

$$\mu = 0.19884C^2 - 16.221C + 340.47 \quad \text{Ecuación 4-12}$$

La correlación de datos obtenida a partir de los datos para la segunda etapa analizada presenta un valor de $R^2 = 0.9689$. El comportamiento de los datos se puede apreciar en la gráfica 4.24.

Gráfica 4.24 Comportamiento de la viscosidad de diatomita DM1 contra la concentración para la segunda etapa del experimento

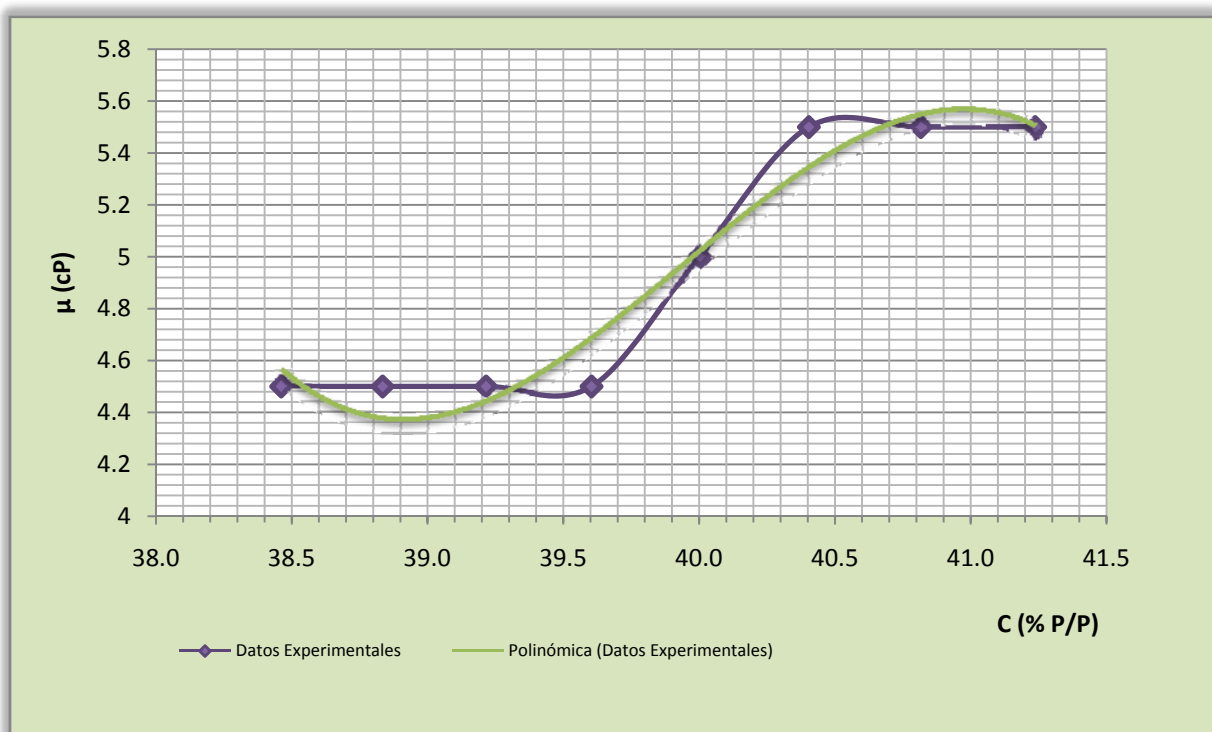


Para la tercera, etapa se aprecia que hay un comportamiento casi constante y no hay una variación significativa en la viscosidad por adición de agua, esta etapa comprende los valores que corresponden desde las concentraciones de 41.24 hasta 38.46. La ecuación que representa estos datos se presenta a continuación:

$$\mu = 0.2733C^3 + 32.747C^2 - 1307.1C + 17383 \quad \text{Ecuación 4-13}$$

La correlación de datos obtenida a partir de los datos para la segunda etapa analizada presenta un valor de $R^2 = 0.9509$. El comportamiento de los datos se puede apreciar en la gráfica 4.25.

Gráfica 4.25 Comportamiento de la viscosidad de diatomita DM1 contra la concentración para la tercera etapa del experimento



La correlación de datos fue comprobada realizando mezclas de diatomita con agua para generar pruebas de reproducibilidad, obteniendo valores de viscosidad muy parecidos a los que se expresaron por medio de la ecuación de la primera etapa, segunda etapa y tercera etapa.

La segunda y tercera etapa muestra algunos inconvenientes debido a que el material sedimenta muy rápidamente.

4.5.2 VISCOSIDAD DEL MATERIAL EN EL PUNTO DE SATURACIÓN

El *punto de saturación* para el material es de gran importancia, porque es en este punto donde puede determinarse la mayor viscosidad; por lo tanto, este valor puede servir como parámetro de comparación frente a dos sustancias minerales que forman parte de la composición mayoritaria de la diatomita en estudio (diatomita y arcilla esmectítica). Al compararlas se determina cuál de las propiedades en estos materiales tiene más influencia, comparando las viscosidades resultantes en los puntos de saturación de cada uno de los materiales: *diatomita industrial* y *bentonita industrial*.

La metodología para evaluar las viscosidades consiste en el uso de un *viscosímetro* que permita leer altas viscosidades, para ello se debe utilizar un *viscosímetro de Brookfield* o bien, un *reómetro de Fann*. La *ilustración 4.25-a* corresponde al *viscosímetro de Brookfield*, en el cual se pueden leer valores de viscosidad entre 300 y 100,000 centipoises (cP); la *ilustración 4.25-b* muestra los cuatro tipos de agujas (spindle) que se utilizan para medir cuatro escalas de viscosidad a diferentes velocidades angulares.



Ilustración 4.26 Determinación de viscosidad en diatomita: a) viscosímetro de Brookfield; b) tipos de agujas o spindle del viscosímetro

El uso del viscosímetro de Brookfield requiere preparar una muestra problema, disolviendo una masa conocida de diatomita industrial y bentonita industrial en agua destilada (solvente inerte); la concentración de referencia es la *concentración de*

saturación (específica para cada material) expresada en [% p/p] obtenida de la ficha técnica de cada una de las muestras.

En la *tabla 4.15* se detalla la muestra analizada, la concentración de saturación (% p/p), la velocidad angular (rpm), el tipo de aguja, el valor leído en la escala del equipo (0-100), el factor para multiplicar el valor de escala¹⁰ y la viscosidad (cP).

Tabla 4.16 Viscosidad para muestras de diatomita y bentonita en condiciones de saturación con viscosímetro de Brookfield

Muestra	Saturación [% P/P]	rpm	Spindle LV	Escala [0-100]	Factor	μ [cP]
Diatomita Industrial	35	6	2	1.5	50	75
		12	2	4	25	100
		12	2	4	25	100
		12	2	4	25	100
		30	2	5.25	10	52.5
Bentonita Industrial	45	60	4	La aguja excede la escala, por lo tanto la viscosidad es mayor a 100,000 cP		
DM1	59.7	12	2	45.4	25	1135
		12	2	45.4	25	1135
		12	2	45	25	1125

En base a los resultados obtenidos es posible advertir que el material presenta una influencia por las arcillas esmectíticas; sin embargo, no es tan marcada para que el material presente valores altos de viscosidad como la bentonita, esto se debe a la presencia de diatomita, la cual se presume se encuentra en mayor cantidad que la arcilla. Con fines de uso industrial se puede mencionar que la muestra DM1 (diatomita problema) posee un grado de saturación más bajo que los otros materiales, por lo que necesita más agua para saturarse.

¹⁰ El *factor* depende del tipo de aguja y la velocidad angular.

CAPITULO 5: PROPUESTAS DE USO Y BALANCE COMERCIAL DE LA DIATOMITA

En el presente capítulo se culmina el estudio por medio del cual se han evaluado los usos potenciales de las *tierras diatomáceas* y a la vez, se establece un precedente para la investigación de los recursos minerales no metálicos en nuestro país. Las conclusiones se realizaron en base a estudios específicos sobre el material y el área que las contiene. La *primera parte* contempla un análisis de la zona de influencia, utilizando los resultados obtenidos en el *capítulo 3* del presente documento, en donde se desarrolló una caracterización del yacimiento con técnicas de prospección geofísica como los *sondeos eléctricos verticales* y *sondeos eléctricos verticales dipolo-dipolo*, para finalizar con la construcción de un mapa inicial para la explotación de los minerales de interés.

Una vez identificados los lugares más ricos en mineral y realizadas las campañas de muestreo, se evaluaron las propiedades físico-químicas de las *tierras diatomáceas*. Las evaluaciones incluyeron pruebas especializadas de laboratorio para considerar el uso industrial en diferentes áreas. Las pruebas seleccionadas consideraron la composición, propiedades físicas, reactividad química y propiedades físico-químicas. Todas fueron realizadas a nivel de laboratorio, entre ellas tuvo lugar el análisis mineralógico por medio de la técnica de *difracción de rayos X*; el análisis de la composición química de las tierras diatomáceas por medio de la técnica de *fluorescencia de Rayos X*, técnicas por medio de las cuales es posible determinar la composición de la diatomita y su pureza.

Entre las propiedades físicas evaluadas, concernientes a usos industriales, se determinó *la gravedad específica del sólido, el comportamiento del material frente a la exposición de diferentes gradientes de temperatura y la topografía de la superficie en el material* implementando la *microscopía electrónica de barrido*. Las pruebas anteriores permitieron dimensionar las magnitudes físicas del material, la estabilidad del material frente a los cambios de temperatura, la presencia de elementos volátiles como carbonatos entre otros y la identificación de la estructura fósil predominante con su respectivo tamaño de poro.

La evaluación de las propiedades fisicoquímicas se realizó haciendo uso de técnicas que permitieron determinar valores claves como la *capacidad de adsorción de las tierras diatomáceas*, construyendo en base a los resultados, una isoterma de adsorción y comprobando las capacidades de adsorción por medio del diseño de una columna, con el objetivo de remover un compuesto específico con alta solubilidad en un solvente, para la evaluación de un proceso continuo a escala de laboratorio. Otra propiedad fisicoquímica evaluada es la capacidad de las tierras diatomáceas para modificar las *propiedades reológicas de un fluido* por medio de la elaboración de curvas de viscosidad contra concentración de material, realizando ensayos a nivel de laboratorio y haciendo uso de viscosímetros con diferentes escalas de viscosidad.

Como parte complementaria se realizó un estudio sobre el consumo aparente del material en el país, el cual no solo comprende el análisis del sector industrial que utiliza el material, también se determinan los volúmenes y costos de tierras diatomáceas comercializadas desde el exterior y hacia otros países, a través de un *balance comercial*.

Finalmente, se presentan otras posibilidades para el uso industrial del material en base a sus propiedades y características determinadas con las pruebas de laboratorio realizadas.

5.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

✚ Los resultados de la *Prospección Geofísica* demostraron que el yacimiento posee la forma de una *Cuenca*, cuyo origen proviene de una formación rocosa sedimentaria y además, se evidenció la existencia de tres sub-cuencas de tierras diatomáceas.

La *Cuenca Sedimentaria* tiene una altura mínima de 635 metros sobre el nivel del mar y una altura máxima de 660 metros en sus límites; además, se extiende de manera circular presentando un gradiente constante de inclinación desde el punto más bajo, lo que permitió acumular agua con una profundidad aproximada de 30 metros y generó un ambiente propicio para la reproducción de diatomeas.

Actualmente, las *tierras diatomáceas* se identifican fácilmente en afloramientos dispersos en forma de bandas o estratos, presentando composiciones variables debido a su interacción con el ambiente y la profundidad, marcando su diferencia con un grado de consolidación variada desde un material friable hasta un material más compacto.

Las tres sub-cuencas de *tierras diatomáceas* están localizadas a 647, 645 y 635 metros sobre el nivel del mar y se caracterizan por la formación de círculos concéntricos sobre la *ilustración 3.5 del capítulo 3*; por lo tanto, se espera encontrar estratos con mayor pureza y con espesores más apropiados para su explotación.

Como consecuencia de la extensión del yacimiento, la zona presenta una *topografía variada*, debido a *diferentes formaciones geológicas, episodios de actividad volcánica y procesos erosivos* que han formado depresiones y cambios en el nivel del suelo dando lugar a quebradas, ríos, llanos, entre otros; sin embargo, se estima que en base al espesor de las capas de material identificadas, se cuenta con depósitos de tierras diatomáceas distribuidos de manera dispersa, con una potencia desde 3 hasta 7 metros y una distribución de tipo sedimentaria.

- ✚ Antes de llevar a cabo la explotación de la diatomita, se recomienda realizar más campañas de prospección geofísica en el yacimiento con más puntos de muestreo, para delinear la forma de la *Cuenca* y facilitar la identificación de las zonas con mayor abundancia del mineral.
- ✚ Asimismo, debe considerarse la creación de una cooperativa debido a que el área de estudio es habitada por diferentes familias y además, el lugar es propicio para la acumulación de agua dulce y debe ser protegido de la contaminación.

5.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO

La caracterización de la diatomita se basa en la evaluación de las propiedades químicas, físicas y fisicoquímicas del material. A partir de las pruebas de laboratorio se ha podido concluir sobre su comportamiento de la siguiente manera:

- ✚ La evaluación de la composición mineralógica efectuada por *difracción de rayos X* indica la presencia de *crystalita* y *cuarzo*, que son los minerales esenciales de las tierras diatomáceas; también se encuentran presentes otros minerales como *oligoclasa*, *bentonita*, *nontronita*, *crystalita-tridimita interestratificada* y *andesina*.
- ✚ Al comparar los difractogramas de los seis puntos de muestreo se determinó que la muestra con el mayor contenido de diatomeas corresponde a DM6.
- ✚ La evaluación de la composición química efectuada por *fluorescencia de rayos X* indica que el contenido de silicio (como SiO_2) corresponde al 45.5% y el 10.9% corresponde al hierro (como Fe_2O_3). También se encuentran presentes otros compuestos ricos en calcio, magnesio y aluminio debido a la presencia de arcillas.
- ✚ La densidad aparente promedio obtenida para la diatomita en estudio es 0.68, lo que permite clasificar al material dentro de la categoría SAC-25120000 del *Sistema Arancelario Centroamericano* que se refiere a *harinas silíceas fósiles* (por ejemplo: "kieselguhr", tripolita, diatomita) y demás tierras silíceas análogas, de densidad aparente inferior o igual a uno. La densidad aparente es muy importante para determinar las masas involucradas durante el cálculo de la disponibilidad del material identificado.
- ✚ El análisis térmico de las diatomeas permitió determinar experimentalmente la cantidad de materia removible de la muestra por la exposición a diferentes gradientes de temperatura. Se estima que durante el intervalo de temperatura entre 25 y 100°C el peso de las muestras se redujo en un porcentaje de 5.3 debido a que se liberó una gran cantidad de agua y para el intervalo de temperatura entre 100 y 600°C la pérdida de peso fue de 5.8 por ciento, ya que se eliminó la mayor cantidad de carbonatos y bicarbonatos.
- ✚ El análisis de superficie efectuado por *microscopía electrónica de barrido* evidenció la presencia predominante de dos tipos de fósiles: *Diatomeas Bacillariophyceae* y

Diatomeas de simetría bilateral; su estructura fósil presentó un tamaño de poro promedio de 0.7 μm , por lo que se clasificó como un material filtrante de tipo macroporo. Las imágenes demostraron que el punto de ruptura inicial de las *Diatomeas Bacillariophyceae* se da a 500°C y el punto de activación del material se da a 800°C.

- ✚ Se recomienda realizar un análisis con más detalle en la zona cercana al punto DM6, ya que su espectro de *difracción de rayos X* presentó una pureza mayor respecto de las muestras de otros puntos. Además, es conveniente tomar muestras dentro de un perímetro equivalente a un kilómetro, con el fin de delimitar una posible área de explotación.
- ✚ Para obtener una composición más exacta de los elementos que se desprenden por acción del calor se recomienda realizar un *análisis térmico diferencial* sobre las muestras de interés.

5.3 REACTIVIDAD DE LA DIATOMITA

La diatomita es un material de gran interés en la industria de alimentos, por lo tanto, se practicaron pruebas de laboratorio basadas en el **CODEX ENOLÓGICO INTERNACIONAL** (OENO 10/2002) de la **OIV** versión 2006 para comprobar su uso como material filtrante, obteniéndose los siguientes resultados:

- ✚ La diatomita en estudio si puede utilizarse como *material filtrante*, ya que los parámetros de color y sabor de una muestra de vino no se alteraron significativamente cuando se combinó con diatomita y además, la diferencia entre el valor de pH de una muestra de agua destilada y una mezcla de agua destilada y diatomita es mínima, porque en ambos casos se obtienen valores neutros al alcanzar el equilibrio.
- ✚ Se comprobó la estabilidad reactiva de la diatomita a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, debido a que el porcentaje de pérdida de peso es menor a 1, pero cuando el material es tratado con

una solución de ácido clorhídrico [2N] se pierde una masa equivalente a 14.9% de la masa total inicial, lo que indica la presencia de sustancias con favorable reactividad.

- ✚ Con respecto a la concentración de hierro permitida por la norma OENO 10/2006 en el proceso de filtración para alimentos, se obtuvieron resultados favorables puesto que la concentración máxima permitida para este elemento es de 300 ppm y la concentración de este elemento disuelto en la solución de diatomita en estudio y ácido clorhídrico es de 9.2 ppm.
- ✚ Se recomienda cuantificar la concentración de otros elementos que puedan poner en riesgo la salud humana, por ejemplo, la norma OENO 10/2006 sugiere determinar prioritariamente la presencia de arsénico, plomo y mercurio.

5.4 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

- ✚ Se comprobó que la propiedad fisicoquímica más importante de la diatomita es su *capacidad de adsorción* y el tipo de adsorción que se identificó es la *fisiosorción*, debido a que no se detectaron cambios en la composición química del adsorbato (Azul de Metileno); es decir, se produjo una adsorción sobre la superficie debido a las fuerzas de atracción débiles del tipo dipolo-dipolo como las de London o intermoleculares como las de Van der Waals, desarrolladas sobre la superficie activa del material.
- ✚ El valor máximo obtenido para el área específica de la diatomita es de 1.305 m²/g_{diatomita} y su capacidad de adsorción sobre esta área se determinó con la prueba de *Giles* de 1969, obteniendo un valor máximo de 0.03612 mol_{adsorbato} / kg_{adsorbente}.
- ✚ Se demostró que existe una relación entre la cantidad de adsorbente y adsorbato puesto que el análisis del comportamiento de los datos tomados para la elaboración de una isoterma de adsorción indica una tendencia favorable hacia este fenómeno, logrando una clasificación *Brunauer* de *Tipo I* en base a la forma de la isoterma obtenida.

- ✚ La diatomita se puede considerar como un material óptimo para su uso en sistemas continuos, ya que se realizó un ensayo en una columna de adsorción para flujo continuo en contracorriente, dando como resultado un porcentaje de retención de 99.9% de azul de metileno de una solución de 600 ppm.

- ✚ Debido a la comprobada presencia de Bentonita, Nontronita y otras arcillas durante la determinación de la mineralogía del material, se evaluaron las propiedades reológicas del material mediante la adición de un fluido inerte (agua destilada), metodología por medio de la cual se determinó el punto de saturación óptimo en 59.7 % p/p (masa de diatomita en estudio por masa total de la solución); mientras que la muestra de *diatomita industrial* presentó un valor de 35% p/p y la de *bentonita industrial* presentó 45% p/p, esto indica que el material de estudio necesita menor cantidad de agua para saturarse.

- ✚ Después de evaluar la viscosidad máxima de las muestras de diatomita en su punto de saturación, se determinó que la *diatomita en estudio* presenta valores de viscosidad correspondientes a 1135 cp; mientras que la viscosidad en el punto de saturación para la *bentonita industrial* excedió los 100,000 cp en el viscosímetro de Brookfield y finalmente, el valor de la viscosidad de la *diatomita industrial* en el punto de saturación alcanzó una viscosidad máxima de 100 cp, por lo que se concluye que la influencia de las arcillas en las propiedades reológicas del material es levemente significativa puesto que al compáralo con la bentonita y la diatomita industrial la tendencia en el comportamiento de su viscosidad es por mucho más parecido a una diatomita de grado industrial que a una bentonita.

- ✚ Se recomienda elaborar una *isoterma de adsorción* cuando se deseen remover otras sustancias con diatomita utilizando el fenómeno de adsorción.

5.5 ANALISIS COMERCIAL DE LA DIATOMITA EN EL SALVADOR

La producción de tierras diatomáceas en El Salvador formalmente no tiene precedente, tampoco existen datos comerciales que delaten la explotación del mineral; sin embargo, el consumo nacional aparente existe, lo que implica su importación desde otros países.

5.5.1 CONSUMO NACIONAL APARENTE

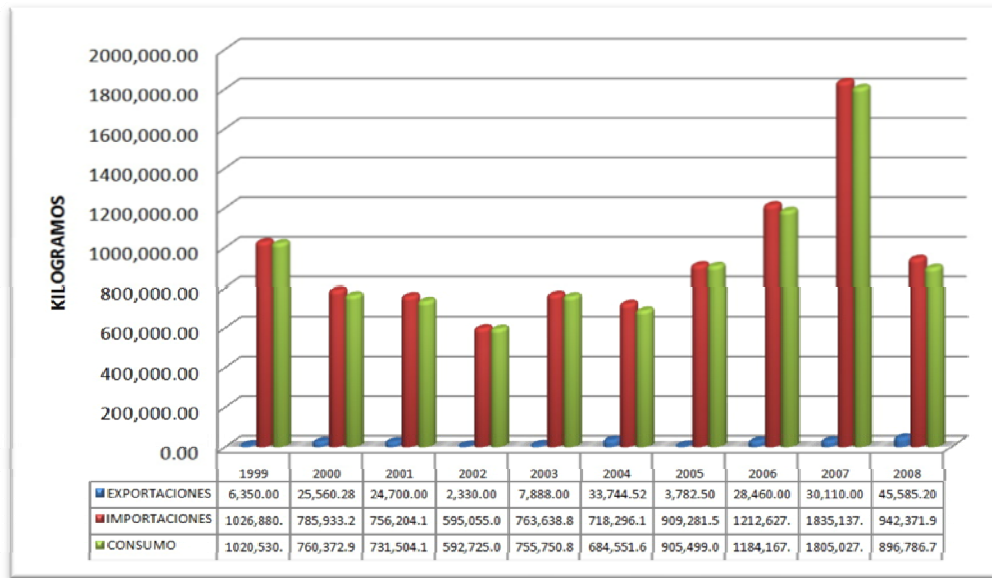
El consumo nacional aparente de tierras diatomáceas en 2008 fue de \$ 515,521.1, correspondiente a 896 Toneladas métricas, mientras que, las importaciones para el mismo año fueron de \$ 549,152.8 correspondiente a 942 Toneladas métricas, dejando una exportación cuantificada en \$ 33,631 correspondiente a 45 Toneladas métricas. Las gráficas 5.1 y 5.2 presentan los balances comerciales para el periodo entre 1999 y 2008.

Gráfica 5.1 Balanza comercial de tierras diatomáceas en miles de dólares entre 1999 Y 2008



Fuente: Departamento de Balanza de Pagos del Banco Central de Reserva

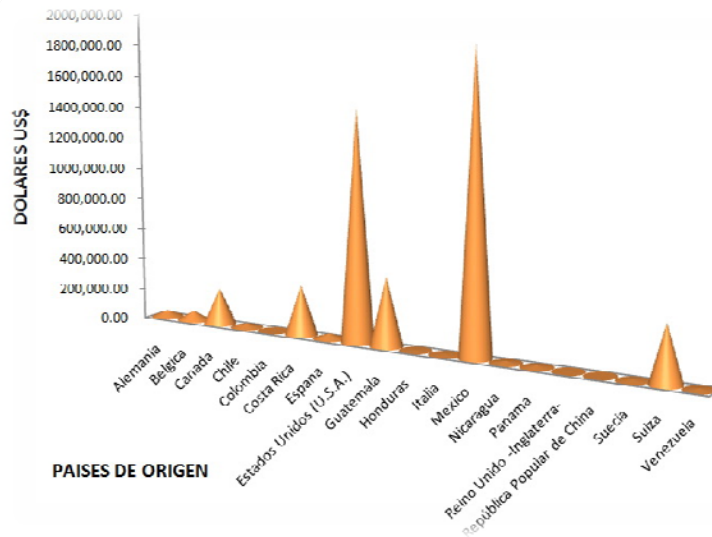
Gráfica 5.2 Balance comercial de tierras diatomáceas en miles de kilogramos entre 1999 y 2008



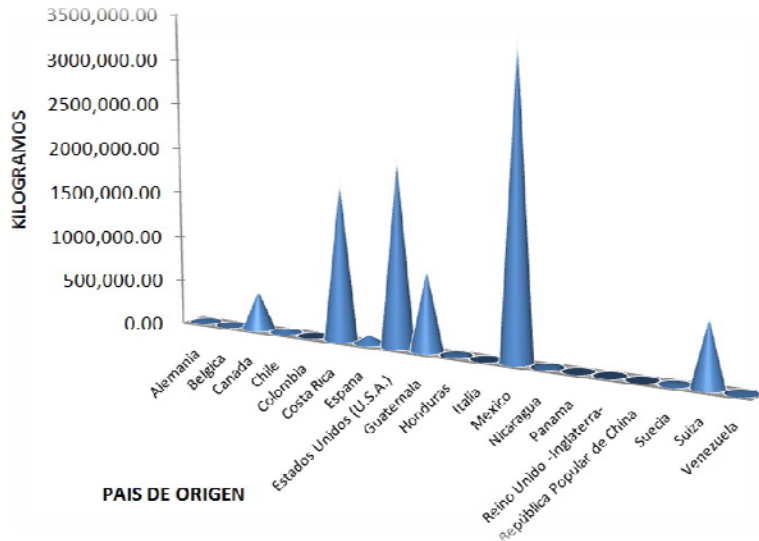
Fuente: Departamento de Balanza de Pagos del Banco Central de Reserva

Las importaciones de este material tienen su origen en varios países productores, estos productores son en su mayoría locales, siendo México el país con mayor participación, seguido por Estados Unidos (U.S.A.). La *gráfica 5.3* presenta los montos en US\$ correspondientes a las importaciones de tierras diatomáceas de los países productores para un periodo desde 1999 hasta 2008. La *gráfica 5.4* presenta las cantidades importadas en kilogramos para el mismo periodo de tiempo.

Gráfica 5.3 Importaciones de Tierras diatomáceas en dólares US\$ en el periodo de 1999 hasta 2008



Gráfica 5.4 Importación de Tierras diatomáceas en kilogramos en el periodo de 1999 hasta 2008



Fuente: Departamento de Balanza de Pagos del Banco central de reserva.

Al reunir los datos exploratorios de la *prospección geofísica* se concluye que la disponibilidad de las tierras diatomáceas es de 38,790.00 m³, con un equivalente de 26,000.00 toneladas (26,000,000 kilogramos) y los costos por kilogramo de diatomita importada se calculan en 1.74 US\$, entonces el valor comercial del yacimiento se puede estimar en 41, 000,000.00 US\$.

La oferta nacional de diatomita está dirigida mayormente a la fabricación de *filtro ayuda* en el área de alimentos y especialidades no determinadas, la cantidad restante es utilizada como carga funcional, principalmente en la *industria de la pintura y plástico*.

La mayor demanda de la diatomita como filtro ayuda se ha identificado en la industria de elaboración de bebidas en general, siendo la *industria cervecera* la mayor consumidora.

En la *industria de la pintura y plástico*, las tierras diatomáceas resultan ser eficientes reproductores de pigmentos y agentes mateantes; sin embargo, debido a su alto costo, la diatomita no es accesible para las pequeñas empresas, por lo que no se incluye en el proceso de producción; los productos son de menor calidad y están considerablemente por debajo de los precios de los productos de calidad que si la utilizan.

5.6 PROPUESTA PARA USOS INDUSTRIALES DE LAS TIERRAS DIATOMÁCEAS EN BASE A SUS PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DETERMINADAS

Las cualidades de la tierra de diatomeas son variadas ya que su uso se extiende en diferentes áreas productivas, por ejemplo, es utilizado como un agente de purificación, insecticida, filtrado, abrasivo, material aislante, material a prueba de sonido, entre otros. Estos usos son tan variados que se puede considerar como un material versátil y de gran potencial para su comercialización en El Salvador.

El área de aplicación de las tierras diatomáceas contempla varias industrias en función del aprovechamiento de sus propiedades en los procesos de producción, donde son requeridos parámetros de calidad específicos; el material también presenta otras aplicaciones donde no es necesario que cumpla con características tan rigurosas. A continuación se describen los usos potenciales para las tierras diatomáceas en diferentes ámbitos productivos del país.

5.6.1 USOS AGRÍCOLAS DE LAS TIERRAS DIATOMÁCEAS EN EL SALVADOR

Durante la etapa experimental se determinó que el material posee notables propiedades adsorbentes y la capacidad de retener en casi un 40% de su masa en agua, confiriéndole un comportamiento higroscópico, apropiado para el uso como un insecticida controlador de plagas, capaz de matar a los agentes patógenos por acción estrictamente física porque se adhiere a los insectos, perforan sus cuerpos queratinizados y les provoca deshidratación. Para este uso se debe utilizar la diatomita diluida al 1% en una solución de agua.

En los vegetales, la tierra de diatomeas cumple un doble propósito: *curar y nutrir*. Además de su efecto insecticida, las diatomeas aportan una gran riqueza en minerales y oligoelementos. Otra interesante aplicación de las diatomeas es para proteger granos y semillas de hongos, virus y bacterias; en este caso se aplica en polvo sobre los granos a

conservar, notándose en las semillas una mejor germinación posterior al momento de la siembra.

Las tierras diatomáceas presentan una alternativa eficaz, inocua y económica para combatir parásitos externos en animales domésticos mediante la aplicación directa en polvo sobre el pelo del animal. Puede aplicarse de manera preventiva en pisos, guardarropas, despensas y cualquier otro lugar que se desee proteger de insectos.

Un uso agronómico de las tierras diatomáceas es la ayuda al control de moscas, al aplicarlas en los desechos de animales y sobre el cuerpo del ganado evitando el uso de insecticidas químicos, eliminándolos sin generar autoinmunidad y puede utilizarse sin límite de tiempo.

Es de gran importancia en la cría de aves de corral, tanto en el cuidado sanitario de las aves como en el mejoramiento de su hábitat, el uso de la tierra de diatomeas resulta ser un gran beneficio económico para los criadores, al mezclarla con el alimento endurece la cáscara del huevo; también ayuda a la eliminación de parásitos internos y externos proporcionando a las aves de una mejor calidad de vida, lo que aumenta su producción. Elimina piojos y piojillos, elimina insectos transmisores de enfermedades, aporta minerales a su alimentación, reduce mortandad de la población animal, erradica moscas eliminando los ejemplares vivos y por impedimento ovación, elimina vapores amoniacales reduciendo malos olores y mejora el manejo del grano.

5.6.2 USOS DE LAS TIERRAS DIATOMÁCEAS EN PROCESOS INDUSTRIALES

Como ayuda filtrante en general, las tierras diatomáceas tienen una gran demanda en la industria, siendo la elaboración de bebidas la más demandante en nuestro país. Su función es de ayuda filtrante cuando se pretende elaborar cerveza, vino, sidra, jugos de frutas en general y jarabes, tratamientos de aguas superficiales, separación de sólidos ultramicroscópicos, procesos de fabricación de pinturas, procesos de pigmentación en plásticos, como material de soporte o relleno, como constituyente en materiales de

construcción, elaboración de materiales refractarios, material de aislamiento térmico y acústico, abrasivo para superficies metálicas, materia prima para fabricar vidrio, entre otros.

Al aplicar la técnica de tinturas fue posible determinar que el material presenta propiedades de adsorción favorables, por lo tanto, el uso de las diatomeas en el tratamiento de aguas superficiales es factible para disminuir la turbidez, color y generar un control microbiológico. También se utiliza junto con floculantes en aguas residuales como una ayuda a la filtración, generando una estructura que permita retener las partículas sólidas mientras el fluido pasa a través de ella. Es posible la aplicación de este material en pequeñas cantidades sobre el agua de desecho antes de filtrar, o en casos donde sólidos compresibles suspendidos en el agua provoquen una falla en las medias filtrantes; además de la filtración directa, la adición de estas diatomitas incrementa la porosidad del lodo, reduciendo la resistencia del cake formado en dicho filtro.

Las habilidades de la adsorción se manifiestan por la decoloración del agua a tratar; además, se utiliza para el tratamiento de grasas y aceites.

El comportamiento presentado frente a gradientes de temperatura altos y su composición rica en sílice clasifica al material para su uso como materia prima en la elaboración de material refractario, si presenta una reacción positiva con la portlandita (Hidróxido de Calcio) la reacción resultante es una interacción del hidróxido de calcio con los compuestos de las tierras diatomáceas para la formación progresiva de compuestos cristalinos hidrosilicatos e hidroaluminatos cálcicos, cuyas principales reacciones de formación producen como subproducto hidróxido de calcio y mejora la estabilidad a temperaturas mayores de 400°C.

Debido a sus propiedades adsorbentes, el material presenta gran variedad de aplicaciones en la industria de la pintura y del plástico, en donde la tierra de diatomeas es un eficiente reproductor de pigmentos y agentes mateantes. Una de las características principales de la diatomita es el efecto de matear las pinturas, debido a su gran absorción de aceite. Las

diminutas partículas de diatomita forman una estructura o armazón reforzado dentro de la película de pintura, aumentando su duración. En las pinturas de tránsito la diatomita acelera el secado y da mayor visibilidad por la noche. Se especifican dos tipos de pigmentos de diatomita silíceas para el uso de pintura: *Tipo A*, fineza estándar para uso general; *Tipo B*, extra fino para usos especiales.

El uso como material aislante puede resultar factible, puesto que presenta una baja conducción del calor y el sonido, debido a su alta composición en sílice y su constitución friable y de alta porosidad, le permite contener aire entre los poros e intersticios, limitando así su conductividad térmica y absorbiendo las vibraciones sónicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AULAGEA. (Junio de 1999). *Asistencia para la Enseñanza de las Geociencias*. Recuperado en Febrero de 2008, de Los Materiales Terrestres: <http://157.92.29.203/aula-gea/rocas.html>
2. Ballet, J. (Mayo de 1985). *Tierras de diatomeas, curiosidad natural al servicio de la industria*. Recuperado en Octubre de 2007, de Creces (Ciencia y Tecnología): <http://www.creces.cl/new/index.asp?imat=%20%20%3E%20%20%203&tc=3&nc=5&art=348>
3. Cáceres, J., & Vera, E. (Diciembre de 2005). *Proyecto MECESUP UCH 0303*. (U. d. Chile, Ed.) Recuperado en Junio de 2008, de Modernización e Integración Transversal de la Enseñanza de Pregrado en Ciencias de la Tierra: http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/geo_mod.pdf
4. Cantos Figueroa, J. (1974). *Tratado de Geofísica Aplicada*. Madrid, España: Sección de Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España.
5. Centro Nacional de Metrología de México. (Octubre de 2003). *Secretaría de Economía de México*. Recuperado el 07 de mayo de 2008, de Laboratorio de Viscosidad: <http://www.cenam.mx/fyv/viscosidad.asp>
6. Compton, R. (1962). *Manual of Field Geology*. Stanford, California, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
7. Escobar, G. (2008). *Manual de Geología para Ingenieros*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
8. Foust, A., Wenzel, L., Clump, C., Maus, L., & Andersen & Bryce, L. (2001). *Principios de Operaciones Unitarias*. Mexico: Compañía Editorial Continental.

9. Fuentes, R., & Ortiz, S. (1990). Estudio de factibilidad técnico económica para la explotación de minerales. San Salvador, El Salvador.
10. Geankoplis, C. (2004). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. Mexico: Compañía Editorial Continental.
11. HACH COMPANY. (2000). Manual de análisis de agua. En H. COMPANY, *Procedimientos seleccionados del manual de Hach sobre análisis del agua* (págs. 52-60). Loveland, Colorado, EE.UU.
12. Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de la República Federal de Alemania. (1973). Consultoría sobre la utilización de minerales no metálicos en la república de El Salvador. *Consultoría sobre la utilización de minerales no metálicos en la república de El Salvador*. San Salvador, San Salvador, El Salvador: Ministerio de Economía de la República de El Salvador.
13. Instituto Geográfico Nacional Ing. Pablo Arnoldo Guzmán. (1992). *Monografías del departamento y municipios de Santa Ana*. San Salvador: Talleres Litográficos del Instituto Geográfico Nacional.
14. Kalipedia. (2008). *El Ciclo de las Rocas*. Recuperado el Abril de 2008, de http://www.kalipedia.com/graficos/ciclo-rocas.html?x=20070417klpcnatun_61.Ees
15. Lahee. (1970). *Geología Práctica* (Tercera ed.). Barcelona, España: Ediciones OMEGA S.A.
16. Longwell, C. F. (1965). *Geología Física*. Mexico: Editorial Limusa-Wily.
17. McCabe, W., & Smith, J. &. (1991). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. España: McGraw-Hill.
18. Ministerio de Energía y Minas de la Republica del Perú. (Enero de 2004). *Ministerio de Energía y Minas*. Recuperado el Enero de 2008, de Publicaciones del Ministerio de

Energía y Minas de la República del Perú: <http://www.minem.gob.pe/archivos/dgm/publicaciones/public03/diatomitas.htm>

19. Ministerio de Energía y Minas de la República del Perú. (Enero de 2004). *Ministerio de Energía y Minas*. Recuperado en Enero de 2008, de Publicaciones del Ministerio de Energía y Minas del Perú: <http://www.minem.gob.pe/archivos/dgm/publicaciones/public03/diatomitas.htm>
20. Organismo Internacional de la Viña y el Vino. (Junio de 2005). Codex Enológico Internacional. Paris, Francia.
21. Organismo Internacional de la Viña y el Vino. (17 de Junio de 2005). CÓDEX ENÓLOGICO INTERNACIONAL. Francia, Paris, Francia.
22. Perry, R., & Green, D. (2001). *Manual del Ingeniero Químico*. Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U.
23. Perry, Robert H.; Green, Don W. & Maloney, James O. (2001). *Manual del Ingeniero Químico*. Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U.
24. Ramos, V., Egúez, H., Ladines, L., & Carrión, P. (2004). Perspectivas de la Explotación y Aplicación de Tierra de Diatomeas en la Península de Santa Elena. *Revista Tecnológica*, 17 (1), 162-169.
25. Sánchez, J. (2004). *Prospección Geofísica: Sondeos Eléctricos Verticales*. Recuperado en Enero de 2008, de <http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/SEV.pdf>
26. Scarlett, B., Jimbo, G., Arai, Y., Bernhardt, C., Heiskanen, K., Lowell, S., y otros. (1997). Particle Size Measurement Volume II, Surface area and pore size determination. En *Particle Size Measurement Volume II* (págs. 163-223). London: Chapman y Hall.
27. Secretaria de Integración Centroamericana. (Mayo de 2008). *Arancel Centroamericano de Importación -SAC- Cuarta Enmienda*. Recuperado el mayo de

2008, de SECCIÓN V: <http://www.sieca.org.gt/ArancelCA2002/Arancel.asp?Seccion=05&Capitulo=25>

28. Skoog, D., & Holler, F. &. (2001). *Análisis Instrumental*. Madrid, España: Concepción Fernández.
29. Skoog, D., Holler, F. J., & Nieman, T. A. (2001). *ANÁLISIS INSTRUMENTA*. ESPAÑA: Concepción Fernández Madrid.
30. SUD_CHEMIE. (Febrero de 2008). *Productos para el mundo*. Recuperado en Mayo de 2008, de La gama de productos SUD CHEMIE: <http://www.sud-chemie.de>
31. Treybal, R. (1998). *Operaciones de Transferencia de Masa*. México: McGraw-Hill.
32. Universidad de El Salvador. (2003). Aplicación de la técnica de difracción de rayos X. *Guía de laboratorio de la cátedra de Análisis Instrumental* . San Salvador, El Salvador: UES.
33. Wicander, R., & Monroe, J. (2000). *Fundamentos de Geología*. Mexico: International Thomson Editores.
34. Zuleta, M., Grasso, A., & Castro, L. (Octubre de 2005). *Asociación Iberoamericana de Enseñanza Superior de la Minería*. Recuperado en Abril de 2008, de Estudio de un yacimiento de Diatomitas de San Juan, orientado a la obtención de un producto apto para uso enológico: <http://aiesmin.unsl.edu.ar/REUNION%20%20PERU/Yacimiento%20%20diatomitas.pdf>