

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE SUBSUELO DE UNA ZONA
UBICADA ENTRE LAS POBLACIONES DE TUCUPIDO, MUNICIPIO JOSE
FELIX RIVAS, Y TACALITO, MUNICIPIO PEDRO ZARAZA.
CORRESPONDIENTE A UN SECTOR DEL EJE FERROVIARIO DE LOS
LLANOS, EDO. GUÁRICO. VENEZUELA**

Trabajo Especial de Grado
presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela por el Br.
Paula. Baquero C. para
optar al título de Ingeniero Geólogo

Caracas, noviembre de 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE SUBSUELO DE UNA ZONA UBICADA ENTRE LAS POBLACIONES DE TUCUPIDO, MUNICIPIO JOSE FELIX RIVAS, Y TACALITO, MUNICIPIO PEDRO ZARAZA. CORRESPONDIENTE A UN SECTOR DEL EJE FERROVIARIO DE LOS LLANOS, EDO. GUÁRICO. VENEZUELA

Tutor Académico: Ing. Feliciano De Santis
Tutor Industrial: Ing. Feliciano De Santis

Trabajo Especial de Grado
presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela por el Br.
Paula. Baquero C. para
optar al título de Ingeniero Geólogo

Caracas, noviembre de 2010

Caracas, noviembre, 2010

Los abajo firmantes, miembros del Jurado calificador, designados por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Paula. Baquero C., titulado:

**ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE SUBSUELO DE UNA ZONA
UBICADA ENTRE LAS POBLACIONES DE TUCUPIDO, MUNICIPIO JOSE
FELIX RIVAS, Y TACALITO, MUNICIPIO PEDRO ZARAZA.
CORRESPONDIENTE A UN SECTOR DEL EJE FERROVIARIO DE LOS
LLANOS, EDO. GUÁRICO. VENEZUELA**

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

Prof. Pietro De Marco
Jurado

Prof. Mónica Pereira
Jurado

Prof. Feliciano De Santis
Tutor Académico

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela y a la Escuela de Geología por enriquecerme con los conocimientos y experiencias necesarias para convertirme en una profesional íntegra.

Al Prof. Feliciano De Santis por toda la orientación y colaboración dada para la elaboración de este trabajo, así como también por darme la oportunidad de haber formado parte de Ingenieros De Santis C.A, en calidad de tesista y pasante, para complementar mi formación estudiantil.

A todo el cuerpo de trabajo de Ingenieros De Santis C.A y al personal que labora en el Laboratorio de de Suelos, Asfalto y Concreto de Ingenieros De Santis C.A.

A mi familia y amigos que siempre me apoyaron y brindaron su ayuda incondicional.

Baquero C., Paula.

**ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE SUBSUELO DE UNA ZONA
UBICADA ENTRE LAS POBLACIONES DE TUCUPIDO, MUNICIPIO JOSE
FELIX RIVAS, Y TACALITO, MUNICIPIO PEDRO ZARAZA.
CORRESPONDIENTE A UN SECTOR DEL EJE FERROVIARIO DE LOS
LLANOS,
EDO. GUÁRICO. VENEZUELA**

**Tutor Académico: Prof. Feliciano De Santis. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de
Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica.**

Año 2010, 141 p.

Palabras Claves: Arcillas, Expansión y Suelo-Cemento.

Resumen. En este trabajo se hizo un estudio geotécnico que permitió evaluar los suelos y rocas que se encuentran dispuestos a lo largo de 50 Km, que comprenden el material que conformarán los terraplenes, cajones y obras de paso del sistema ferroviario de los Llanos Centrales en el sub-tramo Chaguaramas-Zaraza Para esta labor se desarrolló un muestreo que permitió reconocer los materiales que conforman los suelos a lo largo de todo el trazado de la vía, ya que las muestras fueron sometidas a diversos ensayos normalizados de laboratorio tales como Granulometría, Hidrometría, determinación de Límites de Consistencia, determinación de Peso Específico, Expansión controlada y Consolidación Unidimensional.

Se determinó que el 57% de las muestras caracterizadas por el SUCS resultaron ser arcillas (CL), 27 % arcillas con contenido de arena, y el 88% de todas las muestras

comprenden materiales finos (arcillas o limos), dejando sólo un 11 % de materiales arenosos con alto contenido de limos y arcillas, el porcentaje de material gravoso es escaso, alcanzando solo el 2%. En la clasificación AASHTO, el porcentaje de las muestras de los materiales finos están comprendidas por suelos del tipo A-6 y A-7, comprendiendo materiales de baja calidad o pobres para la conformación de terraplenes. A su vez existe un 25% de materiales que clasifican como A-7-6. En su mayoría los materiales poseen una muy alta capacidad para expandirse, ya que un 67% de los suelos estudiados presentaron valoraciones de índices de expansión que se encuentran entre 135 y 230, generando presiones de expansión entre 2.50 y 3.50 Kg/cm².

Ante la ausencia de material idóneo para la conformación de los terraplenes, se realizó un mejoramiento del suelo, desde el punto de vista mecánico, que será empleado como material de relleno; empleando la adición de cemento portland, calculado como porcentaje óptimo al 3% en peso de mezcla, obteniendo incrementos en la resistencia a la compresión hasta el 500%, así como los índices de compresibilidad disminuyeron significativamente (entre el 70 al 90% en promedio).

El estudio mineralógico realizado a las rocas de arcilita mediante difracción de rayos X, determinó que los minerales de arcilla contenidos en las mismas predomina la montmorillonita, generando cambios de volumen con las variaciones de humedad del terreno, así como también debido a los procesos de meteorización y alteración de estas rocas se generan suelos residuales de tipo arcilloso, los cuales poseen un alto contenido de coloides, índice de plasticidad de medio a alto y propiedades expansivas importantes.

Se desarrollaron 25 mapas y perfiles geológicos a escala 1:2000, en el que sobre la base cartográfica se presenta la información geológica en la que se vació la información de campo recolectada en este trabajo, la cual comprende una litología monótona conformada por rocas sedimentarias que se intercalan entre arcilitas abigarradas y lutitas con presencia de areniscas friables de forma lenticular, cuyo tamaño de grano varía de fino a medio. La mayoría de estas areniscas poseen matriz limosa o arcillosa. Dicha litología coincide con la descripción mencionada en la bibliografía estudiada de la Formación Quiamare.

ÍNDICE

| | |
|---|----------|
| CAPÍTULO I..... | 1 |
| I.- INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1.- Objetivos..... | 2 |
| 1.1.1.- Objetivo General..... | 2 |
| 1.1.2.- Objetivos Específicos..... | 2 |
| 1.2.- Ubicación..... | 3 |
| 1.3.- Trabajos previos..... | 5 |
| 1.4.- Alcances..... | 7 |
| 1.5.- Metodología..... | 8 |
| 1.5.1.- Revisión Bibliográfica..... | 8 |
| 1.5.2.- Etapa de Campo..... | 8 |
| 1.5.2.1.- Levantamiento Geológico de Superficie..... | 8 |
| 1.5.2.2.- Muestreo Geotécnico..... | 9 |
| 1.5.2.2.1.- Método de penetración standard (S.P.T.)..... | 9 |
| 1.5.2.2.2.- Método de rotación..... | 10 |
| 1.5.3.- Etapa de Laboratorio y obtención de parámetros geomecánicos.. | 10 |
| 1.5.3.1.- Contenido de Humedad Natural..... | 12 |
| 1.5.3.2.- Granulometría por Tamizado..... | 12 |
| 1.5.3.3.- Granulometría por Lavado..... | 14 |
| 1.5.3.4.- Determinación de los Límites de Consistencia..... | 15 |
| 1.5.3.5.- Ensayo de Hidrometría..... | 17 |

| | |
|---|-----------|
| 1.5.3.6.- Determinación del Peso Especifico por Picnómetro..... | 22 |
| 1.5.3.7.- Ensayo de Compactación a esfuerzo modificado Proctor... | 23 |
| 1.5.3.8.- Ensayo de Consolidación Unidimensional | 24 |
| 1.5.3.9.- Ensayo de peso unitario para suelos cohesivos..... | 26 |
| 1.5.3.10.- Ensayo de compresión sin confinar..... | 26 |
| 1.5.3.11.- Ensayo de expansión libre y controlada..... | 27 |
| 1.5.3.12.- Ensayo de hinchamiento libre..... | 28 |
| 1.5.3.13.- Ensayo de corte directo..... | 28 |
| 1.5.3.14.- Ensayo de difracción de rayos X..... | 29 |
| 1.5.4.- Estabilización de suelos..... | 30 |
| 1.5.4.1- Dosificación de cemento..... | 30 |
| | |
| CAPÍTULO II..... | 31 |
| II. MARCO TEÓRICO..... | 31 |
| 2.1.- Geografía Física..... | 31 |
| 2.1.1.- Generalidades..... | 31 |
| 2.1.2.- Clima..... | 31 |
| 2.1.3.- Vegetación..... | 33 |
| 2.1.4.- Drenaje..... | 34 |
| 2.2.- Geología Regional..... | 35 |
| 2.2.1.- Generalidades..... | 35 |
| 2.2.2.- Formación Quiamare..... | 35 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.- Estructura molecular de las arcillas..... | 37 |
| 2.4.- Arcillas Expansivas..... | 40 |
| 2.4.1.- Grupo de las Esmectitas..... | 41 |
| 2.4.2.- Montmorilonita..... | 42 |
| 2.4.3.- Illita..... | 42 |
| 2.4.4.- Caolinita..... | 43 |
| 2.5.- Aspectos geotécnicos sobre el estudio de las arcillas expansivas..... | 44 |
| 2.5.1.- Fenómeno de hinchamiento..... | 48 |
| 2.5.2.- Propiedades índice y su relación con el grado de expansión..... | 50 |
| 2.5.2.1.- Clasificación por propiedades índice..... | 50 |
| 2.5.2.2.- Actividad y contenido de coloides..... | 51 |
| 2.5.2.3.- Índice de expansión y límite líquido..... | 51 |
| CAPÍTULO III..... | 53 |
| III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 53 |
| 3.1.1.- Sub-tramo 1: Tucupido-Las Lomas. Progresivas Km. 300+000 al al Km 340+000..... | 53 |
| 3.1.2.- Sub-tramo 2: Las Lomas-Caro de la Negra. Progresivas Km 320 +000 al Km 330+000..... | 57 |
| 3.1.3.- Sub-tramo 3: Caro de la Negra-Coco de Mono. Progresivas 330 +000 al Km 340+000..... | 60 |
| 3.1.4.- Sub-tramo 4: Coco de Mono-Los Caballos. Progresivas Km 340 +000 al Km 350+000..... | 63 |

| | |
|---|-----|
| 3.1.5.- Sub-tramo 5: Los Caballos-Tacalito. Progresivas Km 350+000 al 360+000..... | 64 |
| 3.2.- Geomorfología..... | 66 |
| 3.2.1.- Relieve bajo ondulado muy entallado..... | 70 |
| 3.2.2.- Valle aluvial..... | 70 |
| 3.3.- Geología estructural y geodinámica externa..... | 70 |
| 3.4.- Aspectos geotécnicos..... | 70 |
| 3.4.1.- Sub-Tramo 1: Progresivas Km 310+000 al Km 320+000..... | 72 |
| 3.4.1.1.- Potencial expansivo..... | 77 |
| 3.4.2.- Sub-tramo 2: Progresiva Km 320+000 al Km 330+000..... | 81 |
| 3.4.2.1.- Potencial expansivo..... | 85 |
| 3.4.3.- Sub-tramo 3: Progresiva km 330+000 al Km 340+000..... | 89 |
| 3.4.3.1.- Potencial expansivo..... | 93 |
| 3.4.4.- Sub-tramo 4: Progresiva Km 340+000 al Km 350+000..... | 96 |
| 3.4.4.1.- Potencial expansivo..... | 98 |
| 3.4.5.- Sub-tramo 5: Progresiva Km 350+000 al Km 360+000..... | 102 |
| 3.4.5.1.- Potencial expansivo..... | 106 |
| 3.5.- Correlación entre la expansión de los suelos y sus propiedades índice... | 108 |
| 3.6.- Análisis mineralógico mediante difracción de rayos X..... | 112 |
| 3.6.1.- Mineralogía Sub-tramo 1..... | 113 |
| 3.6.2.- Mineralogía Sub-tramo 2..... | 115 |
| 3.6.3.- Mineralogía Sub-tramo 3..... | 117 |

| | |
|--|------------|
| 3.6.4.- Mineralogía Sub-tramo 5..... | 119 |
| 3.7.- Materiales a ser estabilizados desde el punto de vista mecánico para ser empleados como material relleno..... | 121 |
| 3.7.1.- Propiedades originales de los materiales..... | 122 |
| 3.7.2.- Comportamiento de los materiales a diferentes dosis de Cemento..... | 124 |
| 3.7.2.1.- Variaciones de la Densidad Máxima..... | 124 |
| 3.7.2.2.- Variaciones de la Resistencia a la Compresión..... | 125 |
| 3.7.2.3.- Variaciones en los Límites de Consistencia..... | 127 |
| 3.7.2.4.- Variaciones en los Índices de variación Volumétrica y Expansibilidad..... | 128 |
| 3.7.3.- Tratamiento de arenas con cemento..... | 129 |
| IV.- CONCLUSIONES..... | 132 |
| V.- RECOMENDACIONES..... | 135 |
| VI.- BIBLIOGRAFÍA..... | 136 |
| VII.- ANEXOS..... | 142 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura N° 1.1. Ubicación Relativa de la Zona de Estudio..... | 4 |
| Figura N° 1.2. Tamices con aberturas de distintos tamaños..... | 12 |
| Figura N° 1.3. Torre de tamices..... | 14 |
| Figura N° 1.4. Ensayo de límite plástico..... | 15 |
| Figura N° 1.5. Ensayo de límite líquido..... | 16 |
| Figura N° 1.6. Carta de plasticidad de Casagrande..... | 16 |
| Figura N° 1.7. Cilindro de sedimentación..... | 17 |
| Figura N° 1.8. Hidrómetro..... | 17 |
| Figura N° 1.9. Clasificación de gravas de acuerdo al S.U.C.S Norma ASTM D-2487-0..... | 18 |
| Figura N° 1.10. Clasificación de arenas de acuerdo al S.U.C.S Norma ASTM D-2487-00..... | 18 |
| Figura N° 1.11. Clasificación de finos de baja plasticidad de acuerdo al S.U.C.S. Norma ASTM D-2487-00..... | 19 |
| Figura N° 1.12. Clasificación de finos de alta plasticidad de acuerdo al S.U.C.S. Norma ASTM D-2487-00..... | 20 |
| Figura N° 1.13. Ensayo de peso específico..... | 22 |
| Figura N° 1.14. Consolidómetro..... | 25 |
| Figura N° 1.15. Compresión sin confinar..... | 27 |
| Figura N° 1.16. Aparato empleado para el ensayo de corte directo..... | 29 |
| Figura N° 2.1. Mapa de precipitación (mm) del Estado Guárico..... | 32 |

| | |
|---|----|
| Figura N° 2.2. Mapa de temperatura (°C) del Estado Guárico..... | 33 |
| Figura N° 2.3. Esquema de la estructura cristalina de las arcillas..... | 38 |
| Figura N° 2.4. Correlación entre el % de arcilla y su actividad..... | 51 |
| Figura N° 3.1. Núcleo de lutita extraído de la perforación 311+770..... | 54 |
| Figura N° 3.2. Muestra de arenisca limosa friable, cercana a la progresiva 312+000..... | 55 |
| Figura N° 3.3. Zona de erosión concentrada, cercana a la progresiva 313+800. (Orientación S15°W)..... | 55 |
| Figura N° 3.4. Cárcava con orientación N 30° E, ubicada cercana a la progresiva 313+000..... | 55 |
| Figura N° 3.5. Arcilitas gris verdosas con manchas rojizas. Perforación 316+860..... | 56 |
| Figura N° 3.6. Arcilita con minerales de yeso..... | 56 |
| Figura N° 3.7. Arcilita abigarrada.Perforación 313+860..... | 57 |
| Figura N° 3.8. Afloramiento en corte de carretera cercano a la progresiva 320+640. Se observa contacto entre suelo residual y arcilita. (Orientación S 35° W)..... | 58 |
| Figura N° 3.9. Zona de erosión concentrada cercana a la progresiva 320+921. (Orientación N 35° E)..... | 58 |
| Figura N° 3.10. Arcilita con plano de estratificación subhorizontal y diaclasas subvertical. Perforación 326+880..... | 59 |
| Figura N° 3.11. Arcilita con plano de estratificación subhorizontal y diaclasas subvertical. Perforación 326+880..... | 59 |
| Figura N° 3.12. Arcilita extraída de la perforación 331+400. Presenta minerales de yeso, pirolusita y precipitaciones calcareas..... | 61 |
| Figura N° 3.13. Arcilita gris verdosa extraída de la perforación 336+500..... | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura N° 3.14. Suelos arcillosos susceptibles a procesos de erosión. Progresiva 335+476..... | 62 |
| Figura N° 3.15. Arenisca friable, presenta laminación paralela, extraída en la progresiva 335+200 | 64 |
| Figura N° 3.16. Arcilita altamente diaclasada, localizada en la progresiva 354+000..... | 65 |
| Figura N° 3.17. Contacto entresuelo arcilloso y la roca arcilita. Progresiva 355+600. Se puede observar la horizontalidad de las capas. (Orientación N° 20 W)..... | 66 |
| Figura N° 3.18. Paisaje ondulado formado por colinas bajas en Tucupido..... | 68 |
| Figura N° 3.19. Relieve bajo de colinas onduladas en Tucupido..... | 68 |
| Figura N° 3.20. Topografía ondulada que se mantiene monótona desde Tucupido hasta Zaraza..... | 69 |
| Figura N° 3.21. Litologías del sub-tramo 1..... | 74 |
| Figura N° 3.22. Carta de plasticidad de Casagrande..... | 76 |
| Figura N° 3.23. Correlación entre el % de arcilla y su actividad coloidal..... | 78 |
| Figura N° 3.24. Relación del % LL y la actividad coloidal..... | 78 |
| Figura N° 3.25. Relación de IP con la actividad coloidal..... | 79 |
| Figura N° 3.26. Relación entre los límites de consistencia y el % de hinchamiento libre..... | 80 |
| Figura N° 3.27. Variación del hinchamiento libre a lo largo del sub-tramo 1..... | 80 |
| Figura N° 3.28. Litologías del sub-tramo 2..... | 83 |
| Figura N° 3.29. Carta de plasticidad de Casagrande..... | 85 |
| Figura N° 3.30. Correlación entre el % de arcilla y su actividad coloidal..... | 86 |
| Figura N° 3.31. Relación del % LL y la actividad coloidal..... | 87 |
| Figura N° 3.32. Relación de IP con la actividad coloidal..... | 87 |
| Figura N° 3.33. Relación entre los límites de consistencia y el % de hinchamiento libre..... | 88 |

| | |
|---|-----|
| Figura N° 3.34. Variación del hinchamiento libre a lo largo del sub-tramo 2..... | 88 |
| Figura N° 3.35. Litologías del sub-tramo 3..... | 91 |
| Figura N° 3.36. Carta de plasticidad de Casagrande..... | 92 |
| Figura N° 3.37. Correlación entre el % de arcilla y su actividad coloidal..... | 93 |
| Figura N° 3.38. Relación del % LL y la actividad coloidal..... | 94 |
| Figura N° 3.39. Relación del Ip y la actividad coloidal..... | 94 |
| Figura N° 3.40. Relación entre los límites de consistencia y el % de hinchamiento libre..... | 95 |
| Figura N° 3.41. Variación del hinchamiento libre a lo largo del sub-tramo 3..... | 95 |
| Figura N° 3.42. Litologías del sub-tramo 4..... | 97 |
| Figura N° 3.43. Carta de plasticidad de Casagrande..... | 98 |
| Figura N° 3.44. Correlación entre el % de arcilla y su actividad coloidal..... | 99 |
| Figura N° 3.45. Relación del % LL y la actividad coloidal..... | 100 |
| Figura N° 3.46. Relación del Ip y la actividad coloidal..... | 100 |
| Figura N° 3.47. Relación entre los límites de consistencia y el % de hinchamiento libre..... | 101 |
| Figura N° 3.48. Variación del hinchamiento libre a lo largo del sub-tramo 4..... | 101 |
| Figura N° 3.49. Litologías del sub-tramo 5..... | 103 |
| Figura N° 3.50. Carta de plasticidad de Casagrande..... | 105 |
| Figura N° 3.51. Correlación entre el % de arcilla y su actividad coloidal..... | 106 |
| Figura N° 3.52. Relación entre los límites de consistencia y el % de hinchamiento libre..... | 107 |
| Figura N° 3.53. Variación del hinchamiento libre a lo largo del sub-tramo 5..... | 108 |
| Figura N° 3.54. Relación % LL vs IE ₅₀ | 109 |
| Figura N° 3.55. Relación IP vs IE ₅₀ | 109 |

| | |
|---|-----|
| Figura N° 3.56. Relación % Humedad natural Vs IE_{50} | 110 |
| Figura N° 3.57. Relación % LL vs Presión de expansión..... | 111 |
| Figura N° 3.58. Relación IP vs Presión de expansión..... | 111 |
| Figura N° 3.59. Relación % Humedad natural vs Presión de expansión..... | 112 |
| Figura N° 3.60. Ensayo de difracción de rayos X. Muestra 317+421..... | 114 |
| Figura N° 3.61. Ensayo de difracción de rayos X. Muestra 326+880..... | 116 |
| Figura N° 3.62. Ensayo de difracción de rayos X. Muestra 338+380..... | 118 |
| Figura N° 3.63. Ensayo de difracción de rayos X. Muestra 352+560..... | 120 |
| Figura N° 3.64. Variaciones de densidad a varias dosis de cemento. Calicata 1..... | 125 |
| Figura N° 3.65. Variaciones de densidad a varias dosis de cemento. Calicata 2..... | 125 |
| Figura N° 3.66. Variaciones de la resistencia a varias dosis de cemento. Calicata 1..... | 126 |
| Figura N° 3.67. Variaciones de la resistencia a varias dosis de cemento. Calicata 2..... | 126 |
| Figura N° 3.68. Variaciones del índice de plasticidad con la dosis de cemento. Calicata 1..... | 127 |
| Figura N° 3.69. Variaciones del índice de plasticidad con la dosis de cemento. Calicata 2..... | 128 |
| Figura N° 3.70. Variaciones de los índices de variación de volumen y expansibilidad a diferentes dosis de cemento. Calicata 1..... | 128 |
| Figura N° 3.71. Variaciones de los índices de variación de volumen y expansibilidad a diferentes dosis de cemento. Calicata 2..... | 129 |
| Figura N° 3.72. Relación % cemento vs resistencia a la compresión..... | 119 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla N° 1.1. Características del suelo indicadas por el ensayo SPT..... | 10 |
| Tabla N° 1.2. Espaciamiento del diámetro de los tamices..... | 12 |
| Tabla N° 1.3. Correlación del tamaño de la partícula con el espaciamiento del diámetro de los tamices según la norma ASTM (1935)..... | 13 |
| Tabla N° 1.4. Clasificación de los suelos por método AASHTO..... | 21 |
| Tabla N° 1.5. Condiciones granulométricas para el ensayo de compactación..... | 23 |
| Tabla N° 1.6. Parámetros empleados para el ensayo de Proctor..... | 24 |
| Tabla N° 1.7. Estimación del grado de expansión. | 28 |
| Tabla N° 1.8. Minerales de arcilla y su grado de expansión..... | 30 |
| Tabla N° 1.9. Dosificación de cemento..... | 30 |
| Tabla N° 2.1. Grupo de la esmectita..... | 42 |
| Tabla N° 2.2. Relación entre el índice de plasticidad y el potencial expansivo..... | 50 |
| Tabla N° 3.1. Sondeos exploratorios realizados en el sub-tramo 1..... | 73 |
| Tabla N° 3.2. Litología del sub-tramo 1 y sus propiedades físicas..... | 75 |
| Tabla N° 3.3. Ensayos de compresión simple..... | 77 |
| Tabla N° 3.4. % Hinchamientos libres..... | 79 |
| Tabla N° 3.5. Índice de expansión..... | 81 |
| Tabla N° 3.6. Sondeos exploratorios realizados en el sub-tramo 2..... | 82 |
| Tabla N° 3.7. Litología del sub-tramo 2 y sus propiedades físicas..... | 84 |

| | |
|--|-----|
| Tabla N° 3.8. Ensayos de compresión simple..... | 85 |
| Tabla N° 3.9. % Hinchamientos libres..... | 87 |
| Tabla N° 3.10. Índice de expansión..... | 89 |
| Tabla N° 3.11. Sondeos exploratorios realizados en el sub-tramo 3..... | 90 |
| Tabla N° 3.12. Litología del sub-tramo 3 y sus propiedades físicas..... | 91 |
| Tabla N° 3.13. Ensayos de compresión simple..... | 92 |
| Tabla N° 3.14. % Hinchamientos libres..... | 94 |
| Tabla N° 3.15. Sondeos exploratorios realizados en el sub-tramo 4..... | 96 |
| Tabla N° 3.16. Litología del sub-tramo 4 y sus propiedades físicas..... | 97 |
| Tabla N° 3.17. % Hinchamientos libres..... | 100 |
| Tabla N° 3.18. Índice de expansión..... | 102 |
| Tabla N° 3.19. Sondeos exploratorios realizados en el sub-tramo 5..... | 103 |
| Tabla N° 3.20. Litología del sub-tramo 5 y sus propiedades físicas..... | 104 |
| Tabla N° 3.21. Ensayos de compresión simple..... | 105 |
| Tabla N° 3.22. % Hinchamientos libres..... | 107 |
| Tabla N° 3.23. Índice de expansión y propiedades físicas..... | 108 |
| Tabla N° 3.24. Fracción de arcilla contenido en las muestras..... | 113 |
| Tabla N° 3.25. Mineralogía de la muestra 317+460..... | 113 |
| Tabla N° 3.26. Propiedades físicas del suelo. Muestra 317+460..... | 115 |
| Tabla N° 3.27. Mineralogía de la muestra 326+880..... | 115 |
| Tabla N° 3.28. Propiedades físicas del suelo. Muestra 326+880..... | 117 |
| Tabla N° 3.29. Mineralogía de la muestra 338+380..... | 117 |

| | |
|---|-----|
| Tabla N° 3.30. Propiedades físicas del suelo. Muestra 338+380..... | 119 |
| Tabla N° 3.31. Mineralogía de la muestra 352+560..... | 119 |
| Tabla N° 3.32. Propiedades físicas del suelo. Muestra 352+560..... | 121 |
| Tabla N° 3.33. Ubicación de Calicatas..... | 122 |
| Tabla N° 3.34. Propiedades físicas originales de los materiales..... | 123 |
| Tabla N° 3.35. Parámetros obtenidos a diferentes proporciones de suelo-cemento..... | 124 |
| Tabla N° 3.36. Parámetros de la muestra original y los obtenidos a diferentes dosis de suelo-cemento..... | 130 |

Lista de Anexos

ANEXO 1. Planillas de Ensayos Geotécnicos

ANEXO 1.1. Planillas de Granulometría

ANEXO 1.2. Planillas de Hidrometría

ANEXO 1.3. Planillas de Límites de Consistencia

ANEXO 1.4. Planillas de Peso Específico por Picnómetro

ANEXO 1.5. Planillas de Peso Unitario

ANEXO 1.6. Planillas de Compresión simple

ANEXO 1.7. Planillas de Expansión controlada

ANEXO 1.8. Planillas de hinchamiento libre

ANEXO 1.9. Planillas de % Humedad Natural

ANEXO 2. Mapas Geológicos de superficie e interpretación del subsuelo

CAPÍTULO I.- INTRODUCCIÓN

El gobierno de Venezuela a través del Instituto de Ferrocarriles del Estado (IFE), están llevando a cabo la construcción del sistema ferroviario de los Llanos Centrales en el tramo Tinaco-Anaco, el cual se despliega en 468 Km abarcando los estados Cojedes, Aragua, Guárico y Anzoátegui. El tramo poseerá 10 estaciones (Tinaco - El Pao - Dos Caminos - El Sombrero – Chaguaramas - Valle de la Pascua – Tucupido – Zaraza - Aragua de Barcelona y Anaco); siendo nuestra área de estudio la comprendida en el sub-tramo Chaguaramas-Zaraza, donde actualmente se realizan obras de deforestación, apertura de cajones, obras de paso y conformación de terraplenes. El sistema ferroviario integrará las regiones Centro-Occidental con el Oriente del país.

El presente estudio contempla principalmente un análisis geológico-geotécnico basado en un levantamiento geológico de superficie y una campaña de perforaciones con obtención de muestras a las que se les realizaron ensayos de caracterización geotécnica y ensayos especiales para evaluar la inestabilidad interna de los suelos y/o rocas y su resistencia al corte a lo largo del eje ferroviario de Los Llanos Centrales, en un tramo comprendido entre las poblaciones de Tucupido, Municipio José Félix Rivas y Tacalito, Municipio Pedro Zaraza, Estado Guárico, con la finalidad de conocer las características del suelo y subsuelo donde se apoyaran los terraplenes y obras de paso tales como puentes y cajones. Se establecerán las limitaciones derivadas del comportamiento mecánico de los suelos y las unidades rocosas pertenecientes a la Formación Quiamare.

1.1.- Objetivos

1.1.1.- Objetivo General

Realizar la caracterización geológica-geotécnica del suelo y subsuelo a través de descripciones visuales, mineralógicas y geomecánicas, por medio de un levantamiento de geología de superficie, complementado con información proveniente de 226 sondeos geotécnicos, realizados a lo largo de la franja en estudio, con sus correspondientes ensayos de caracterización.

1.1.2.- Objetivos Específicos

- Cartografiar de las unidades geológicas de superficie y aquellos rasgos de la geomecánica, a escala 1:2000.
- Evaluar los problemas de inestabilidad interna de los suelos y/o rocas, asociados a la presencia de minerales expansivos.
- Caracterizar geomecánicamente el macizo rocoso perteneciente a la Formación Quiamare, con la finalidad de evaluarlo como suelo de soporte para la súper estructura ferroviaria mediante diversos ensayos estipulados por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas.
- Evaluar la influencia de las mezclas de los materiales areno-arcillosos con cemento para el mejoramiento de la compresibilidad y la inestabilidad interna, las cuales serán empleadas como material de relleno para la construcción de los terraplenes.
- Establecer correlaciones entre la expansión de los suelos y/o rocas con las propiedades de las mismas.

1.2.- Ubicación

El área de estudio, se encuentra ubicada al Nor-Este del Estado Guárico, entre las poblaciones de Tucupido y Tacalito pertenecientes a los municipios José Félix Rivas y Pedro Zaraza respectivamente. La zona de estudio corresponde a una franja de 50 Km de longitud y 2 Km de ancho, ubicada geográficamente de la siguiente manera:

Coordenadas geográficas:

Desde la población de Tucupido N 1.128.000, E 196.836

Hasta la población Tacalito N 1.036.000, E 240.000

Figura N°1.1. Imagen extraída y modificada de las hojas # 7042, 7043, 7144 y 7143 del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar

1.3.- Trabajos Previos

- **KRUM-HOLA, A. (1943)** Fue el autor del nombre "Quiamare" como miembro de la "formación o grupo Santa Inés" en un informe privado llamado Venezuelan Atlantic Refining Company.
- **GONZALEZ DE JUANA. (1946)** Realizo la primera referencia publicada de la Formación Las Piedras en 1946.
- **HEDBERG. (1950)** Definió que la base de la Formación Quiamare es concordante y generalmente transicional sobre las formaciones Quebradón y Capiricual.
- **HEDBERG, H.D. (1950)** Explica en un boletín de la sociedad americana de geología información referente a la geología de la cuenca oriental de Venezuela.
- **DE SISTO. (1960)** Estableció las correlaciones entre la nomenclatura informal de la Formación Quiamare en el campo Quiamare.
- **DE SISTO, J. (1961)** Presenta en un boletín informativo de la Asociación Venezolana de Geología, Minería y Petróleo un artículo referente a los sedimentos de la Formación Mesa y el Grupo Sacacual en el oriente de Venezuela.
- **STALHUTH (1965)** En su trabajo de investigación sobre las arcillas expansivas comenta generalidades acerca de la expansión de los suelos y dos teorías sobre la expansión: la Teoría Mecánica y la Teoría Electrónica.

- **PEIRSON (1965)** Sugiere la edad de la Formación Quiamare es MIOCENO TEMPRANO debido a los foraminíferos planctónicos reportados.
- **MIKALAISKAS (1966)** Propone como mejor medio para identificar arcillas expansivas las normas ASTM. Recomienda la identificación clara de los minerales de arcilla para asociar el tipo de arcilla con el comportamiento mecánico del suelo.
- **BRUZUAL, JESUS (1976)** Realiza un trabajo sobre el comportamiento mecánico de los diferentes suelos, en su mayoría acillas, existentes en el canal B4-D del sistema de riego de Río Guárico, Estado Guárico.
- **BARBIERO (1999)** En su trabajo especial de de grado utiliza difracción de rayos X para determinar la mineralogía presente en las arcillas para luego comparar con los estudios geotécnicos y calcular el potencial de expansión de la montmorillonita. Utiliza ensayos químicos y mineralógicos para identificar arcillas expansivas.
- **HERNANDEZ (2006)** Realiza un estudio mineralógico en su trabajo especial de grado para identificar y ubicar de manera precisa los tipos de arcillas expansivas.
- **MARTINEZ WILMER Y ZURBARAN LUÍS (2007)** Trabajan en la geología y geomecánica del macizo rocoso San Juan de los Morros-Los Flores, para la construcción del túnel San Juan. Sistema ferroviario San Juan de los Morros- San Fernando de Apure (Tramo D-1), Estado Guárico. En esta investigación los autores elaboran estudios geológicos – geotécnicos que permiten estimar con un grado de incertidumbre aceptable, el comportamiento

geomecánico del medio. La caracterización geomecánica se basó en la cuantificación de las propiedades físicas y mecánicas del macizo mediante clasificaciones geomecánicas como la RMR y GSI.

- **SINDE, V. RAQUEL Y TORRES. C, CESAR (2008)** Elaboran una investigación referente a la caracterización geológica-geotécnica en el “proyecto integral autopista de los llanos centrales” progresiva 0+000Km al 32+100Km. Los autores desarrollan una caracterización geológica-geotécnica para el proyecto de la autopista y para tal fin elaboran un estudio geológico de superficie la cual es complementada con datos de información de perforaciones a percusión realizadas previamente y analizadas de manera integral.

1.4.- Alcances

La ejecución de este estudio geológico-geotécnico deriva de la necesidad de conocer las unidades litológicas, estructuras geológicas y la geodinámica externa del área que abarca la franja del eje ferroviario, así como las características del subsuelo donde se apoyaran los terraplenes y obras de paso tales como puentes y cajones para establecer las limitaciones derivadas del comportamiento mecánico de los suelos y las unidades rocosas pertenecientes a la Formación Quiamare.

Debido a que la Formación Quiamare está litológicamente compuesta por arcilitas intercaladas con areniscas guijarrosas, lutitas friables y lignito en capas lenticulares (González de Juana. (1980)), se podría generar un problema de estabilidad interna de los suelos y/o dichas rocas de carácter blando ya que pudieran existir materiales expansivos y/o dispersivos y para ello se realizará la evaluación geomecánica del macizo rocoso de dicha Formación.

1.5.- Metodología

A continuación se presentará la metodología realizada con la finalidad de cumplir con los objetivos propuestos de la presente investigación. Dicho esquema metodológico se estableció en 3 etapas:

1.5.1.- Revisión Bibliográfica

Esta etapa inicial del proceso de investigación fue dedicado a la revisión bibliográfica de trabajos especiales de grado previos, publicaciones en internet y textos relacionados con la geología regional de la zona de interés, el análisis geomecánico de suelos y/o rocas y el comportamiento de materiales arcillosos expansivos para recolectar la mayor cantidad de información bibliográfica y geológica que faciliten las tareas de campo; así como reunir toda la indumentaria necesaria para las labores y diseñar un plan altamente eficiente para el desarrollo de las tareas de prospección geológica.

También fueron revisados mapas topográficos y geológicos, donde las hojas utilizadas para la base cartográfica del estudio se identifican como las hojas 7042, 7043, 7044 y 7144 a escala 1:100.000 elaborados por el Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar y el mapa geológico E-9 realizado por Creole Petroleum Corporation (1962).

1.5.2.- Etapa de Campo

1.5.2.1.- Levantamiento Geológico de Superficie

En la fase de campo se realizó un levantamiento geológico de superficie del área lo cual permitió describir las unidades litológicas, unidades geomorfológicas

(aluviones, coluviones y zonas anegadizas) y geodinámica externa (deslizamientos y zonas de erosión concentrada), así determinar las evidencias geológicas que permitan estudiar los procesos tectónicos de la zona.

En el levantamiento geológico de campo en los afloramientos presentes se hizo énfasis en la descripción de tipo de suelo y/o roca, mineralogía, color meteorizado, color fresco, grado de consolidación y meteorización, escogimiento, estructura, polaridad de capas, presencia de fósiles y espesor de cada capa o paquete sedimentario. Debido a que la al bajo relieve de la topografía, los afloramientos de la zona eran muy escasos y se realizaron sondeos exploratorios a lo largo de la zona de estudio que permitió el estudio del subsuelo.

1.5.2.2.- Muestreo Geotécnico:

Se realizaron calicatas y sondeos geotécnicos exploratorios para la recuperación de núcleos que sirvieron como apoyo a la descripción del suelo y subsuelo para recolectar la mayor cantidad de data geológica y geotécnica de calidad en la zona estudiada. Los métodos de exploración del subsuelo fueron los siguientes:

1.5.2.2.1.- Método de penetración standard (S.P.T): es una prueba ideada por H.A. Mohr en 1927, mediante el cual se obtienen muestras representativas de suelo perturbado y permite cuantificar la resistencia del suelo a la penetración a diferentes profundidades en un depósito geológico. El método se realiza en tres etapas:

1. Avance: se introducen varios tubos de diámetro 2 1/2" y de 1.50 y 2.00 metros de longitud cada uno, los cuales se van acoplando a media que avanza la perforación que es provocada por el ensanchador hueco que poseen los tubos en la punta con la ayuda de la inyección de agua a

presión, la cual desplaza el material removido hacia la superficie. Se emplea para avanzar los primeros 55 cm de cada metro que se perfora.

2. Ensayo: se retira el cincel y se coloca el sacamuestras y la hinca de la misma se hace mediante un martillo de 63.5 Kg (140 libras) con una caída libre de 76.2 cm (30 pulgadas), desarrollando una energía de 4200 libras-pulgadas y se cuentan los golpes necesarios para hincar el sacamuestras 45 cm, tomando en cuenta el valor de los últimos 30 cm.

3. Muestreo: se lleva el sacamuestras a la superficie, se retira la muestra y se coloca en un frasco plástico sellado y etiquetado para luego ser ensayado en el laboratorio.

Los valores de penetración standard (N) han sido correlacionados por Terzaghi y Peck con la resistencia y compacidad de los suelos de fundación según lo muestra en la Tabla N°1.1.

| Arenas (Valor N) | | Arcillas (Valor N) | |
|---------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------|
| N (N° de golpes en 30 cm) | Densidad relativa | N (N° de golpes en 30 cm) | Consistencia relativa |
| < 4 | Muy suelta | < 2 | Muy blanda |
| 4 a 10 | Suelta | 2 a 4 | Blanda |
| 10 a 30 | Media | 4 a 8 | Medianamente rígida |
| 30 a 50 | Densa | 8 a 15 | Rígida |
| > 50 | Muy densa | 15 a 30 | Muy rígida |
| | | > 30 | Dura |

Tabla N°1.1. Características del suelo indicadas por el ensayo de SPT.

Obtenida de Ugas (1985)

1.5.2.2.2.- Método de Rotación: A través de la roca dura, el avance de la perforación y el muestreo fueron hechos por métodos rotativos, usando un sacamuestras de pared doble, diámetro BX, equipado con una corona sembrada con diamantes industriales. Para cada corrida se determinó el porcentaje de recuperación (R), como la relación entre el largo total de núcleos recuperados y la longitud de la corrida (RQD).

Las muestras obtenidas por ambos métodos fueron enumeradas y ubicadas por progresivas, es decir, un sistema de ubicación métrico utilizado en las obras de vialidad donde es conocido el punto de partida (0+000) y las distancias se cuentan referenciadas a éste a través de la línea central de la vía, en este caso, el eje ferroviario. En este método de ubicación se indica primero la distancia en kilómetros al punto de partida, seguido de un signo más (+) y luego la cantidad de metros que existen desde el punto de medición al kilómetro entero anterior. Por ejemplo una muestra 300+550, sería la recolectada a 300 Km y 550 m del punto de inicio del eje ferroviario.

A los núcleos obtenidos de los sondeos exploratorios se les realizó una descripción visual donde se hizo énfasis en el reconocimiento de la naturaleza del material (suelo o roca), tamaño de grano, su naturaleza del depósito, profundidad, espesor y composición de todos los estratos del suelo y de roca, su contenido de humedad, color, plasticidad y la orientación preferencial de planos de estratificación y de deformación como diaclasas. Dicho procedimiento se basó en un criterio geotécnico donde se seleccionaron muestras a las que se le realizaron ensayos para la determinación de las propiedades geomecánicas del material.

1.5.3.- Etapa de Laboratorio y de obtención de parámetros geomecánicos:

Las muestras de roca y suelo seleccionadas fueron ensayadas bajo las normas de la American Society for Testing Material (ASTM), en el Laboratorio de Suelos, Asfalto y Concreto de Ingenieros De Santis C.A. Los ensayos realizados son los descritos a continuación:

1.5.3.1.- Contenido de humedad natural (ASTM D-2216-98): permite determinar el porcentaje de agua contenido en la muestra. Es la relación entre el peso de agua libre más la absorbida en la muestra (W_w) y el peso de la muestra seca (W_s). Según Ugas (1985) consiste en pesar la muestra y colocarla a secar en el horno a una temperatura constante de 105 ± 5 °C durante 24 horas, luego volverla a pesar y el porcentaje de pérdida de peso corresponde al porcentaje de agua contenido en la muestra.

1.5.3.2.- Granulometría por Tamizado (ASTM C-136-96^a): consiste en separar y clasificar por tamaños las partículas que componen el material determinando el porcentaje, del peso total, la cantidad de granos de distintos tamaños a través de la utilización de un juego de tamices de malla que cumpla con las especificaciones ASTM E-11 como los mostrados en la Figura N°1.2.



Figura N°1.2. Tamices con aberturas de distintos tamaños.

El conjunto de tamices permite un espaciamiento uniforme en los puntos de la curva granulométrico, de la siguiente manera:

| | | | | | | | | | | |
|---------------|------|--------|------|------|------|------|------|------|--------|--------|
| Tamiz | 3" | 1 1/2" | 3/4" | 3/8" | N° 4 | N°10 | N°20 | N°40 | N° 100 | N° 200 |
| Abertura (mm) | 76,2 | 38,1 | 19,1 | 9,5 | 4,76 | 2 | 0,84 | 0,42 | 0,149 | 0,074 |

Tabla N°1.2. Espaciamiento del diámetro de los tamices. Extraído de Ugas (1985).

| Grava | | Arena | | | Limo | | Arcilla |
|--------------|------|--------------|-------|------|-------------|-------|----------------|
| Gruesa | Fina | Gruesa | Media | Fina | | | |
| 76,1 | 19 | 4,76 | 2 | 0,42 | 0,074 | 0,005 | 0,002 |

Tabla N°1.3 Correlación del tamaño de la partícula con el espaciamiento del diámetro de los tamices según la norma ASTM (1935). Extraído de Ugas (1985).

El procedimiento se lleva a cabo pesando la muestra seca y vertiéndola sobre una torre de tamices organizados de abajo hacia arriba con diámetros cada vez más grandes como se observa en la Figura N°1.3. Luego se agita manual o mecánicamente durante no más de 10 minutos. Finalmente el retenido en cada tamiz es pesado individualmente, donde el total del pesaje acumulado final debe ser igual o presentar menos de 0,3% de diferencia al pesaje inicial.



Figura N°1.3. Torre de tamices

1.5.3.3.- Granulometría por Lavado (ASTM C117-95): permite conocer el porcentaje de la muestra total que pase por el tamiz # 200 para conocer el porcentaje de partículas finas. Se hace tomando una porción de muestra pasante del tamiz # 10, secando y pesando la muestra, se coloca con agua y algún defloculante en un envase agitando vigorosamente con una varilla de vidrio hasta crear la suspensión de las partículas. Luego se tamiza repetidamente hasta que el agua pasante esté limpia y se determina el peso de la muestra retenido en cada tamiz. Finalmente se seca la muestra lavada y se determina la masa. El porcentaje de finos se obtiene a través de la ecuación 1.

$$\% \text{ Pasa 200} = 100 * (M1 + M2) / M1 \quad 1.$$

Donde

Pasa 200: porcentaje de material pasante del tamiz #200 o menor de 75 μ

M1: masa original seca.

M2: masa seca después del lavado.

1.5.3.4.- Determinación de los límites de consistencia (ASTM D-4318-00):

define la consistencia del suelo en función a su contenido de agua. Atterberg definió tres límites: el de retracción o consistencia que separa el estado sólido seco y el semisólido, el límite plástico que separa el estado semisólido del plástico y el límite líquido que separa el estado plástico del semilíquido.

El límite plástico se determina amasando suelo seco con poco agua y formando elipsoides, hasta llegar a un diámetro de 3 mm y 25-30 mm de longitud (Figura 1.4). Si en ese momento, los elipsoides se cuartejan en fracciones de unos 6 mm, su humedad es la del límite plástico, si no se cuartejan se vuelven a formar los elipsoides para que pierdan humedad y lleguen a cuartejarse.



Figura N°1.4. Ensayo de límite plástico

El límite líquido se determina amasando bien el suelo seco con bastante agua y extendiendo la masa sobre un molde denominado Cuchara de Casagrande como se observa en la Figura N°1.5. Se abre en el centro de la masa extendida un surco con un acanalador, formando un canal de unos 2 mm de ancho y el molde se somete a golpes controlados. El límite líquido es la humedad de la muestra cuando al dar 25 golpes se cierra el canal unos 12 mm.



Figura N°1.5. Ensayo de límite líquido

Determinados los límites líquido y plástico se puede obtener un punto representativo de cada muestra de suelo en la Carta de plasticidad de Casagrande como se muestra en la Figura N°1.6 representando la relación entre el límite líquido y el índice de plasticidad ($I_p = \text{límite líquido} - \text{límite plástico}$). Con ello se puede conocer que fracción fina predomina en la muestra. (Vallejo, 2002).

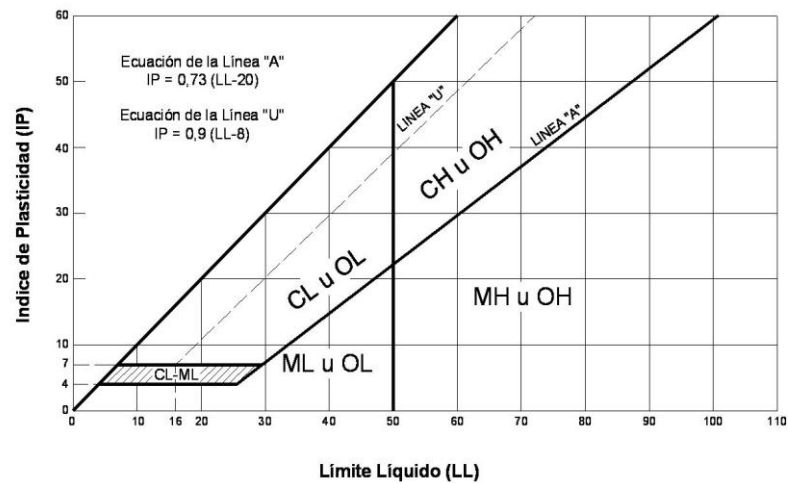


Figura N°1.6. Carta de Plasticidad acuerdo al S.U.C.S., Norma ASTM D-2487-00
 Tomado de DE SANTIS, F., 2006.

1.5.3.5.- Ensayo de Hidrometría (ASTM 422-63-98): determina el porcentaje de material tamaño limo y tamaño arcilla en un material. Se hizo en aquellas muestras que contengan importantes porcentajes de finos. Se hace tomando una porción de muestra pasante del tamiz # 10 de 50 g para un material arcilloso y 100 g para un material arenoso.

La muestra se dispersa sumergiéndola en un defloculante (Hexametafosato de sodio) removiéndola y dejándola reposar. Luego se le agrega agua destilada y desmineralizada y se agita durante 1 minuto para posteriormente verterla en un cilindro de sedimentación (Figura N°1.7) hasta alcanzar 100 ml. Luego se agita la muestra nuevamente por un minuto 60 veces aproximadamente y se comienzan las lecturas con el hidrómetro (Figura N° 1.8) y el termómetro a los 2; 5; 15; 30; 60; 250 y 1440 minutos. Finalmente se lava la muestra sobre el tamiz # 200 y se seca en la estufa para determinar el peso del suelo seco para el retenido en este tamiz.



Figura N°1.7. Cilindro de sedimentación

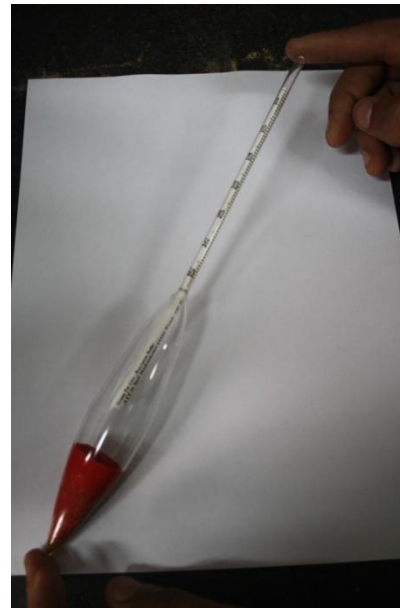


Figura N°1.8. Hidrómetro

Considerando los resultados de granulometría y de los límites de consistencia de las muestras recolectadas, fueron caracterizadas a través del sistema SUCS

(Norma ASTM 2487-00) a través de los diagramas que se observan en las Figuras N° 1.9; 1.10; 1.11 y 1.12 y dependiendo de su contenido de finos se determina su nivel de plasticidad a través de la Carta de Plasticidad mostrada en la Figura N° 1.6.

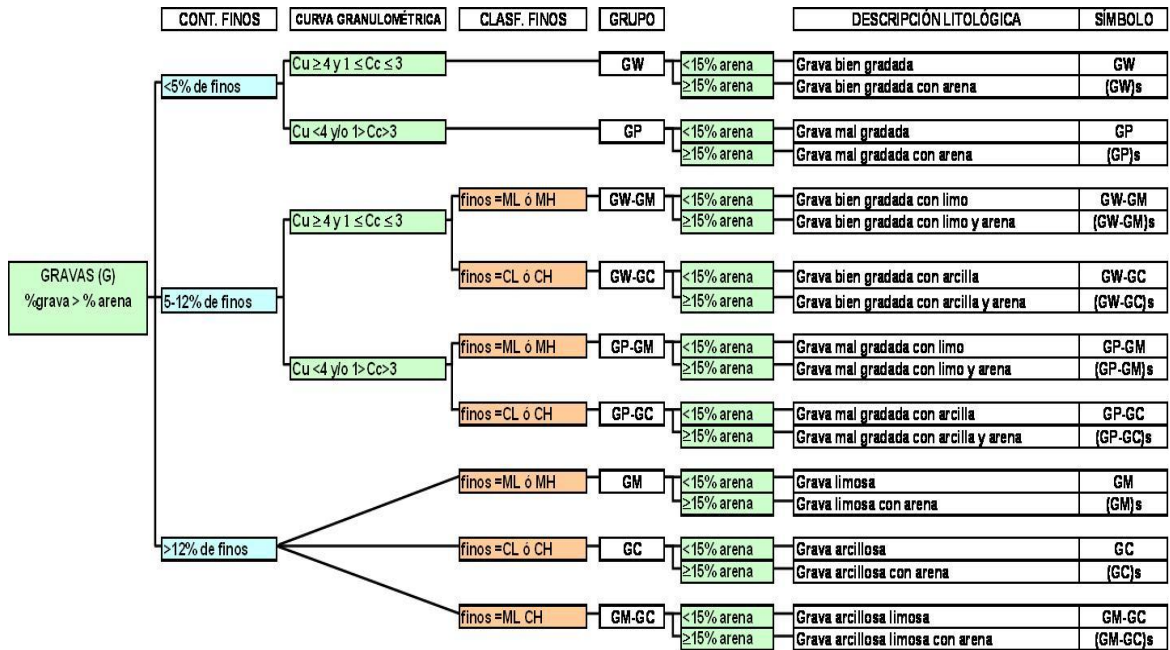


Figura N°1.9. Clasificación de las gravas de acuerdo al S.U.C.S., Norma ASTM D-2487-00
Tomado de DE SANTIS, F., 2006.

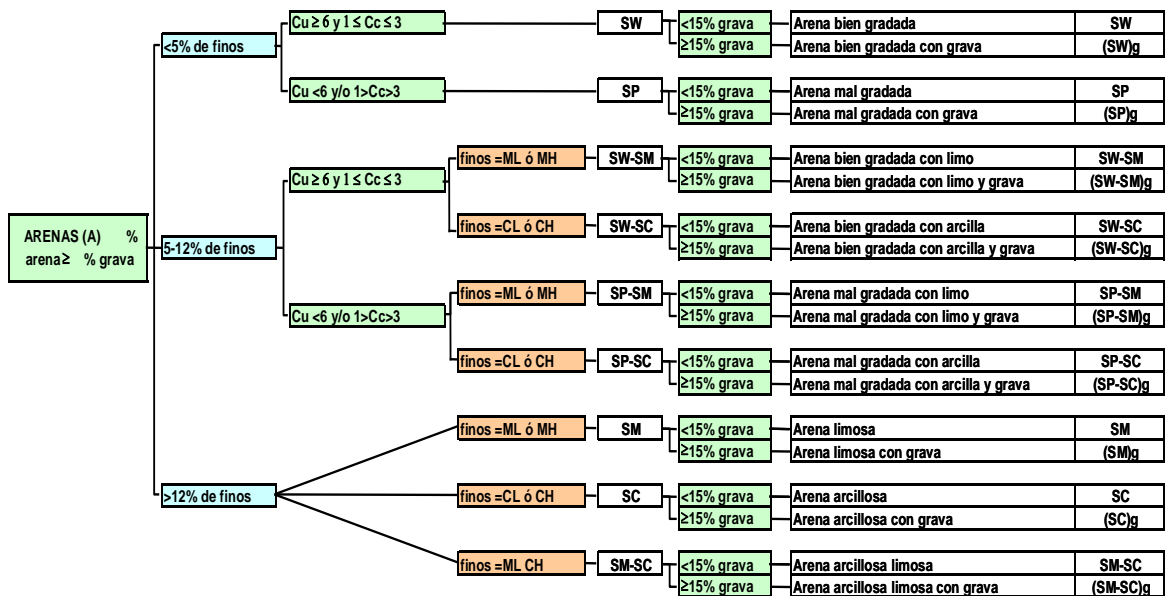


Figura N°1.10. Clasificación de las arenas de acuerdo al S.U.C.S.,
Norma ASTM D-2487-0m Tomado de DE SANTIS, F., 2006

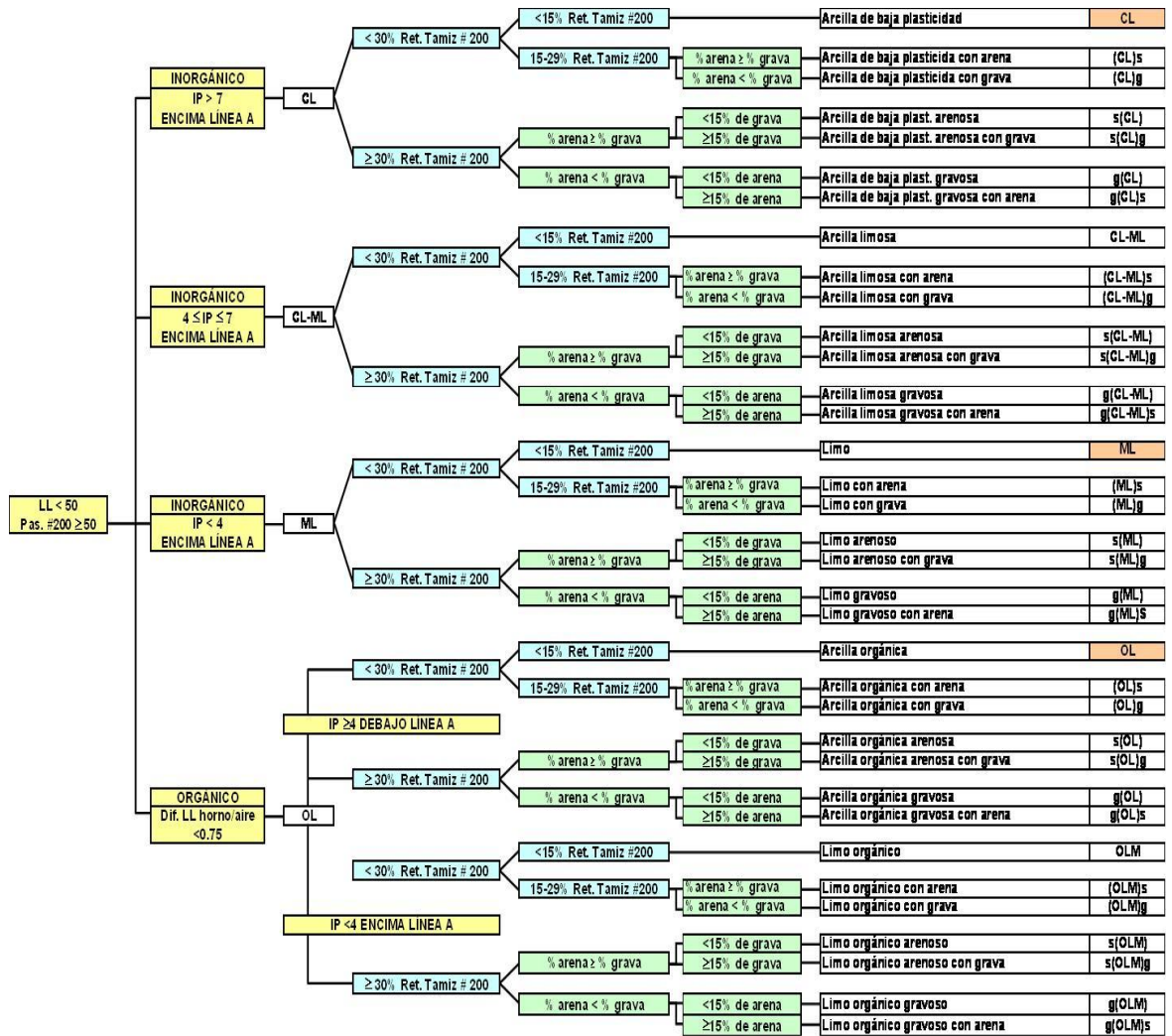


Figura N° 1.11. Clasificación de finos de baja plasticidad acuerdo al S.U.C.S., Norma ASTM D-2487-00 Tomado de DE SANTIS, F., 2006

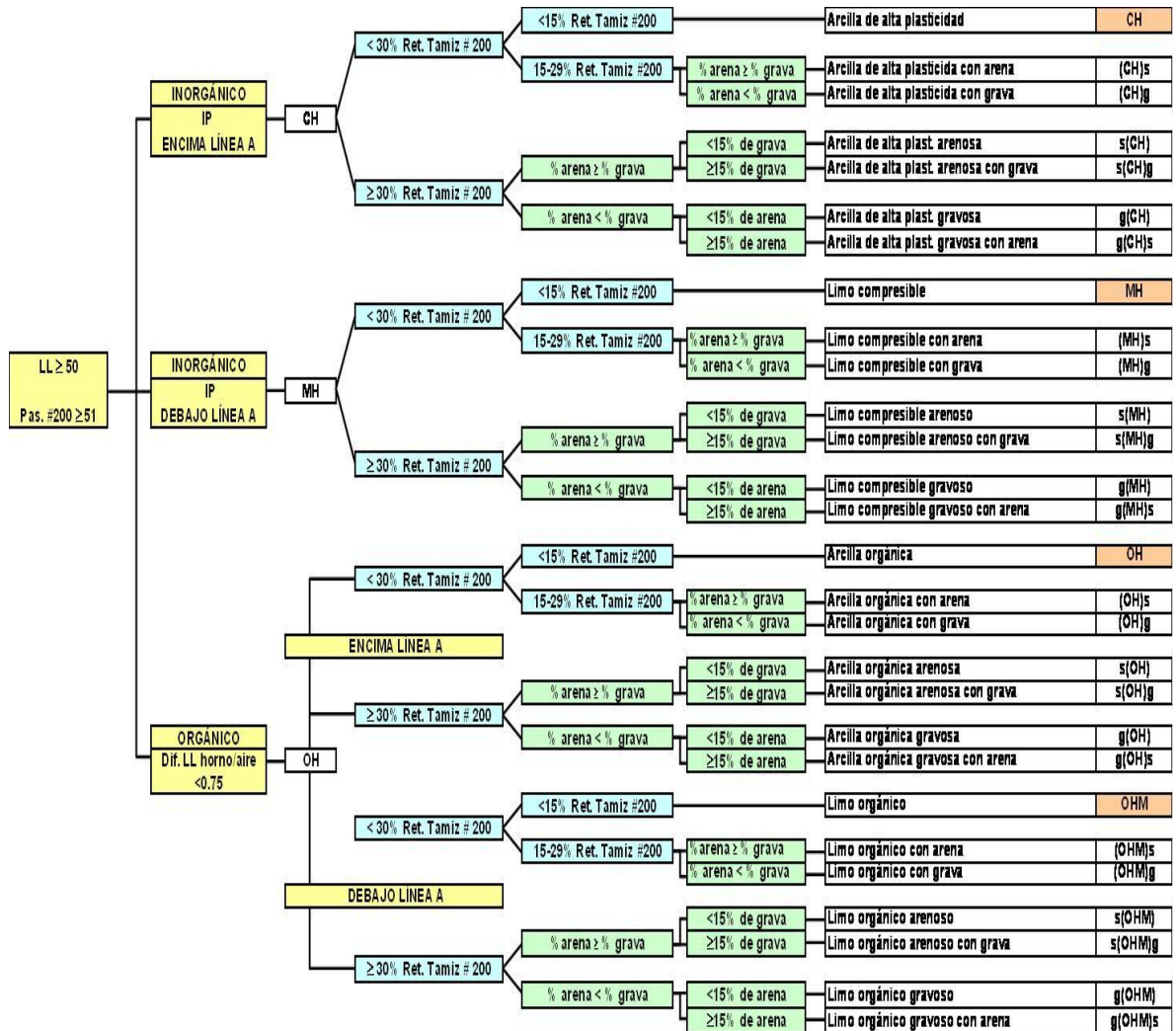


Figura N° 1.12. Clasificación de finos de alta plasticidad acuerdo al S.U.C.S., Norma ASTM D-2487-00 Tomado de DE SANTIS, F., 2006.

Las muestras obtenidas de las calicatas fueron caracterizadas por el Método HRBC (AASHTO 1945), las cuales mediante la información obtenida en los ensayos de granulometría y límites de consistencia se determina el tipo de suelo utilizando la Tabla N° 1.4.

| Clasificación general | Materiales granulares (35% o menos de la muestra total pasan por la malla N° 200) | | | | | | |
|---|--|--------|-------------|----------------------------------|----------------------------------|--------|---|
| | A-1 | | | A-3 | A-2 | | |
| Clasificación del grupo | A-1-a | A-1-b | A-3 | A-2-4 | A-2-5 | A-12-6 | A-2-7 |
| Análisis por cribas (%) | | | | | | | |
| Malla N° 10 | 50 máx | | | | | | |
| Malla N° 40 | 30 máx | 50 máx | 51 mín | | | | |
| Malla N° 200 | 15 máx | 25 máx | 10 máx | 35 máx | 35 máx | 35 máx | 35 máx |
| Para la fracción que pasa la malla N° 40 | | | | | | | |
| Límite líquido (LL) | | | | 40 máx | 41 mín | 40 máx | 41 mín |
| Índice de plasticidad (PI) | | 6 máx | No plástico | 10 máx | 10 máx | 11 mín | 11 mín |
| Tipo usual de material | Fragmentos de roca, grava y arena | | Arena fina | Grava y arena limosa o arcillosa | | | |
| Calificación de la capa | | | | Excelente a buena | | | |
| Clasificación general | Materiales de lodo y arcilla (más del 35% de la muestra total pasa por la malla N° 200) | | | | | | |
| | A-4 | | A-5 | | A-6 | | A-7 A-7.5 ^a A-7.6 ^b |
| Clasificación del grupo | | | | | | | |
| Análisis por cribas (%) | | | | | | | |
| Malla N° 10 | | | | | | | |
| Malla N° 40 | | | | | | | |
| Malla N° 200 | 36 mín | | 36 mín | | 36 mín | | 36 mín |
| Para la fracción que pasa la malla N° 40 | | | | | | | |
| Límite líquido (LL) | 40 máx | | 41 mín | | 40 máx | | 41 mín |
| Índice de plasticidad (PI) | 10 máx | | 10 máx | | 11 mín | | 11 mín |
| Tipo usual de material | Principalmente suelos limosos | | | | Principalmente suelos arcillosos | | |
| Calificación de la capa | | | | Regular a pobre | | | |
| ^a Si $PI \leq LL - 30$, es un A-7-5 | | | | | | | |
| ^b Si $PI > LL - 30$, es un A-7-6 | | | | | | | |

Tabla N° 1.4. Clasificación de suelos por método AASHTO (Tomado de DE SANTIS, F., 2006)

Para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para el levantamiento de terraplenes se desarrolló un número conocido como Índice de Grupo (IG), donde mientras mayor sea, menor será la calidad del suelo. La fórmula para obtener el IG se observa en la ecuación 2.

$$IG = (F_{200} - 35) * (0,2 + 0,005 * (LI - 40)) + 0,01 * (F_{200} - 15) * (IP - 10) \quad 2.$$

Donde:

IG: Índice de Grupo.

F₂₀₀: Porcentaje de material pasante del tamiz #200.

1.5.3.6.- Determinación del peso específico por picnómetro (ASTM D-856-93): es la relación entre el peso unitario de las partículas sólidas del suelo y el peso unitario del agua destilada a una temperatura de referencia. El ensayo se lleva a cabo tomando 20 ó 100 g para materiales cohesivos o granulares respectivamente y dejándose secar para luego colocar en el picnómetro determinando la masa total y de la muestra. Se llena de agua el envase y se deja remojar por 12 horas evitando las burbujas de agua atrapada en la solución, luego se completa el aforo con agua destilada a temperatura ambiente (Figura N° 1.13) para finalmente determinar el peso y temperatura del picnómetro con suelo y agua. El peso específico se calcula a través de la ecuación 3 para mediciones a 20°C.

$$G = \frac{M_o}{(M_o + (M_a - M_b))} \quad 3.$$

Donde

G: Peso Específico a 20°C.

M_o: peso de la muestra.

M_a: peso del frasco + agua.

M_b: peso del frasco + muestra + agua.

El peso específico (G) es un factor auxiliar que se emplea para determinar otras propiedades como porosidad y relación de vacíos. Es usado en estudios de consolidación del suelo y del cálculo del grado de saturación del mismo.



Figura N°1.13. Ensayo de peso específico

1.4.3.7.- Ensayo de compactación a esfuerzo modificado Proctor (ASTM D-1557-00): se obtiene la relación entre el contenido de humedad y el peso unitario seco de un suelo compactado. Es un proceso que aumenta la densidad seca de un suelo mediante medios mecánicos, generando la disminución de la cantidad de aire que se encuentra en los espacios vacíos del material, manteniendo el contenido de humedad relativamente constante. Para llevar a cabo este ensayo se debe tamizar la muestra y determinar el procedimiento a utilizar según lo indica la Tabla N° 1.5.

| Método | A | B | C |
|----------------------------------|---------------|---|--------------------------------------|
| | | > 20% Ret. # 4 y ≤ 20% P _{ετ} . | > 20% Ret. 3/8" y < 30% Ret. 3/4" |
| Requerimiento | ≤ 20% Ret. #4 | 3/8" | |
| Ø Molde | 4 | 4 | 6 |
| Material Pasante | #4 | 3/8" | 3/4" |
| Masa de la muestra de campo (kg) | 1 | 1 | 2 |

Tabla N°1.5. Condiciones granulométricas para el ensayo de compactación

La compactación en laboratorio consiste en compactar una muestra que corresponda a la masa de suelo que se desea compactar, con la humedad calculada y en un molde cilíndrico de volumen conocido y con una energía de compactación especificada como se aprecia en la Tabla N°1.6. Está basado en la compactación dinámica creada por el impacto de un martillo metálico de una masa específica que se deja caer libremente desde una altura determinada, el suelo se compacta en un número de capas iguales y cada capa recibe el mismo número de golpes.

| Método Proctor | N | Tamaño molde (cm) | Volumen molde (cm) | Pisón (kg) | Nº Capas | Altura Caída (cm) | Nº Golpes | Energía Compac/Volumen(kgxm/m3) |
|----------------|---|-------------------|--------------------|------------|----------|-------------------|-----------|---------------------------------|
| Estandar | a | 11.64 *10.16 | 943.33 | 2.49 | 3 | 30.48 | 25 | 60.500 |
| Estandar | b | 11.64*15.24 | 2123.03 | 2.49 | 3 | 30.48 | 55 | 60.500 |
| Modificado | c | 11.64*10.16 | 943.33 | 2.49 | 5 | 45.72 | 25 | 275.275 |
| Modificado | d | 11.64*15.24 | 2123.03 | 2.49 | 5 | 45.72 | 55 | 275.275 |
| 15 Golpes | e | 11.64*10.16 | 943.33 | 2.49 | 3 | 30.48 | 15 | 36.400 |

Tabla N°1.6. Parámetros empleados para el ensayo de Proctor.

Tomado de Ensayo Proctor. http://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_Proctor

Posteriormente se pesa la muestra y se determina la densidad húmeda de la muestra, luego se obtiene el porcentaje de humedad y finalmente se obtiene, a través de la expresión matemática 4 los valores para cada probeta de densidad seca.

$$\gamma_d = \gamma_h / (1 + \omega) \quad 4.$$

Donde

γ_d : Densidad seca

γ_h : Densidad húmeda

ω : Contenido de humedad en expresión decimal.

Para determinar el valor de densidad máxima seca se grafican los resultados obtenidos de cada probeta con la humedad en las abscisas y la densidad seca en las ordenadas, resultando de esta manera una curva que muestra un comportamiento parabólico, donde el ápice de la curva corresponde a la densidad máxima seca y a la humedad óptima para un 100% de compactación.

1.5.3.8.- Ensayo de consolidación unidimensional (ASTM D 2435-96):

determina la magnitud y la rata de deformación del suelo cuando es sometido a un incremento de carga. Después de compactada la muestra se talla con la forma cilíndrica del anillo de carga con una relación mínima diámetro-altura de 2,5; se mide el anillo, se pesa el conjunto anillo-muestra y se coloca el conjunto con las piedras porosas en el consolidómetro y luego en el dispositivo de cargas mostrado en la

Figura 1.14 garantizando condiciones de saturación. Las cargas se incrementan cada 24 horas comenzando con 0,5 Kg. y duplicándose en cada carga hasta alcanzar 4 Kg. para luego iniciar el decremento de carga con intervalos de tiempo menores ya que el proceso de expansión es más rápido que el de consolidación, tomando por lo menos 3 mediciones en esta etapa del procedimiento. Al final de la última descompresión se toma la muestra y se pesa antes y después de ser secada con la estufa para determinar su humedad final.



Figura N°1.14 Consolidómetro

Con resultados obtenidos por el ensayo de consolidación y con la representación gráfica de la curva “Carga Vs Relación de Vacíos” se obtiene el Índice de Compresibilidad (C_c) el cual se puede utilizar para determinar el asentamiento según la ecuación 5 de TERZAGUI & PECK (1966) para un suelo saturado.

$$S = \frac{C_c}{1 + e_0} \times H \times \text{Log}_{10} \left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \right) \quad 5.$$

Donde

S: Asentamiento en condiciones de saturación

Cc: Índice de Compresibilidad

H: Altura del espesor de suelo

p_o : Esfuerzo Vertical producido en cada estrato

Δp : Incremento de carga

e_o : Relación de vacíos inicial.

1.5.3.9.- Ensayo de peso unitario en suelos cohesivos (densidad aparente):

se basa en el proceso de Arquímedes, a través del cual el volumen de una muestra se determina por el volumen del agua que desplaza. Se pesa la muestra y para evitar la absorción del agua, se impermeabiliza con una delgada película de cera líquida o parafina sólida, luego se vuelve a pesar. Colocamos agua en un frasco graduado y se registra el volumen inicial, se sumerge la muestra en agua y se mide el volumen. Conocida la densidad de la cera y su peso, se calcula el volumen de la misma y se resta al volumen total y se obtiene el volumen de la muestra.

1.5.3.10.- Ensayo de compresión sin confinar (ASTM 2166-00):

su propósito es determinar la última resistencia a la compresión no confinada, la última resistencia al corte aproximada, el ángulo de fricción interna (ϕ) aproximado, la cohesión (C) y el módulo de elasticidad (E). El ensayo consiste en colocar una muestra cilíndrica donde su longitud de 2 a 3 veces su diámetro, en el aparato de ensayos (Figura N°1.15), con su eje vertical tan cerca del centro de la plataforma de cargas como sea posible. Se aplica la carga vertical a velocidad de deformación constante, se efectúan lecturas cada 0.01 pulgadas de deformación vertical y comprímase la muestra hasta producir la falla en forma clara y definitiva.



Figura N°1.15. Compresión sin confinar

1.5.3.11.- Ensayo de expansión libre y controlada (ASTM 4829-95): se utiliza para medir las características expansivas de un suelo, determina la presión de expansión, definida como la máxima presión vertical que es capaz de desarrollar una muestra al colocarse en condición sumergida en el consolidómetro dentro de un anillo rígido, e impedirle su expansión mediante un incremento progresivo de la carga vertical aplicada sobre la muestra.

El procedimiento consiste en tallar la muestra dentro del anillo del consolidómetro, evitando la pérdida de humedad. Se pesa el anillo y se mide mediante un vernier la altura y diámetro interior del anillo, se coloca la muestra en el anillo y es pesada para luego comenzar el proceso de consolidación aplicando una pequeña carga de aproximadamente 50 g. Se mide la deformación de la muestra y se procede a su inundación donde se cuenta el tiempo en que tarda alcanzar un incremento en el flexímetro de 10 unidades (0.1 mm), aplicando carga sobre el plato del consolidómetro a fin de evitar que se expanda. La máxima carga aplicada sobre la muestra, será en estas condiciones, su presión de expansión.

1.5.3.12.- Ensayo de hinchamiento libre (H_L): estima el grado de expansión de los materiales arcillosos (Holtz & Gibbs, 1956). El ensayo consiste en vaciar lentamente 10 cm³ de muestra secada al aire (V_0), pasante del tamiz #40, en un cilindro graduado lleno de agua destilada. Una vez alcanzado el reposo del material en el fondo del cilindro, se anota el volumen final (V). El hinchamiento viene dado por la fórmula 6 y se estima el grado de expansión según el criterio de Holtz & Gibbs (1956):

$$H_L = (V - V_0 / V_0) * 100 \quad 6.$$

| Grado de expansión | Hinchamiento Libre |
|--------------------|--------------------|
| Muy alto | > 100 |
| Alto | >100 |
| medio | 50-100 |
| Bajo | < 50 |

Tabla N°1.7. Estimación del grado de expansión

1.5.3.13.- Ensayo de corte directo (ASTM D3080-72): se determina la resistencia al corte de la muestra obteniendo los parámetros de ángulo de fricción interna (ϕ) aproximado, la cohesión (C), los cuales son de mucha importancia en los análisis de estabilidad de los materiales para prevenir el peligro de falla.



Figura N°1.16. Aparato empleado para el ensayo de corte directo

La muestra se coloca en una caja, dividida en dos partes por un plano de simetría horizontal. Las dos mitades se mantienen unidas por medio de la muestra sometida a un esfuerzo normal constante σ . La mitad inferior se mantiene fija y la mitad superior se desplaza horizontalmente aplicando un esfuerzo τ , el cual se incrementa hasta producir la ruptura. Durante el proceso se miden los desplazamientos horizontales y verticales que sufre la muestra.

1.5.3.14.- Ensayo de difracción de rayos X: determina la composición mineralógica de las arcillas. El ensayo consiste en preparar una muestra de arcilla reduciéndola a polvo fino, este se extiende uniformemente sobre la superficie de un porta-objeto usando una pequeña cantidad de adhesivo. Luego se coloca la muestra preparada en un difractómetro, en él se produce la reflexión de rayos X los cuales son registrados.

Según el criterio mineralógico expuesto por L. Slamé, 1973 (Tabla N°1.8), se puede clasificar los minerales de las arcillas por su grado de expansión.

| | |
|-----------------|------------------------|
| Minerales | Grado de expansión |
| Caolinita | Poco expansiva |
| Illita | Medianamente expansiva |
| Montmorillonita | Altamente expansiva |

Tabla N°1.8. Minerales de arcilla y su grado de expansión

1.5.4.- Estabilización de suelos

Existen dos formas o métodos para estabilizar con cemento Pórtland, una es la llamada estabilización del tipo flexible, en el cual el porcentaje de cemento varía del 1 al 4%, con esto solo se logra disminuir la plasticidad y el incremento en la resistencia resulta muy bajo. Otra forma de mejorar el suelo con cemento, se conoce como estabilización rígida, en ella el porcentaje de cemento varía del 6 al 14%, para conocer el porcentaje óptimo a emplear se determinan las propiedades físicas originales del suelos y se efectúan pruebas de laboratorio con diferentes contenidos de cemento.

1.5.4.1.- Dosificación del Cemento:

Mediante el análisis granulométrico y la determinación de los límites de Atterberg se ha procedido a la clasificación del suelo de acuerdo a la H.R.B. (Highway Research Board o Departamento de Investigación Sobre Carreteras) se puede adoptar la dosificación de cemento de la siguiente tabla:

| Tipos de Suelo | Suelo Estabilizado | Suelo-Cemento |
|---------------------|--------------------|---------------|
| A-1 y A-3 | 3-8 | 5-8 |
| Límite de A-3 y A-2 | 5-10 | 6-10 |
| Límite de A-2 y A-4 | 7-12 | 9-14 |
| A-5 y A-6 | 8-15 | No económico |
| A-7 | 10-16 | |

Tabla N° 1.9. Dosificación de cemento

CAPÍTULO II.- MARCO TEÓRICO

2.1.- Geografía Física

2.1.1.- Generalidades

Los llanos de Venezuela constituyen una provincia con extensas superficies de relieve casi plano, entre 50 m y 300 m a nivel el mar en el centro del país; entre los sistemas montañosos del Caribe y Los Andes, abarcan aproximadamente el 25% de la superficie territorial. Están constituidos por sedimentos blandos del Terciario Superior y Cuaternario, depositados en una extensa cuenca de relleno progresivo y suavemente levantada, en la cual ha habido poca erosión.

La Cuenca Oriental de Venezuela es una depresión topográfica y estructural ubicada en la región centro-este del país, con una longitud de 800 Km. de extensión aproximadamente en dirección oeste-este y 200 Km. de ancho de norte a sur, a través de los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro, llegando a extenderse hasta la Plataforma Deltana y sur de Trinidad.

2.1.2.- Clima

La región posee un clima lluvioso de sabana, con temperaturas medias anuales entre 28 y 30° C. se hacen presentes dos períodos: uno seco Noviembre a Abril, y uno lluvioso, de mayo a Octubre, con una precipitación media anual de 900 a 1.200 mm, siendo estas precipitaciones más abundantes en el mes de agosto.

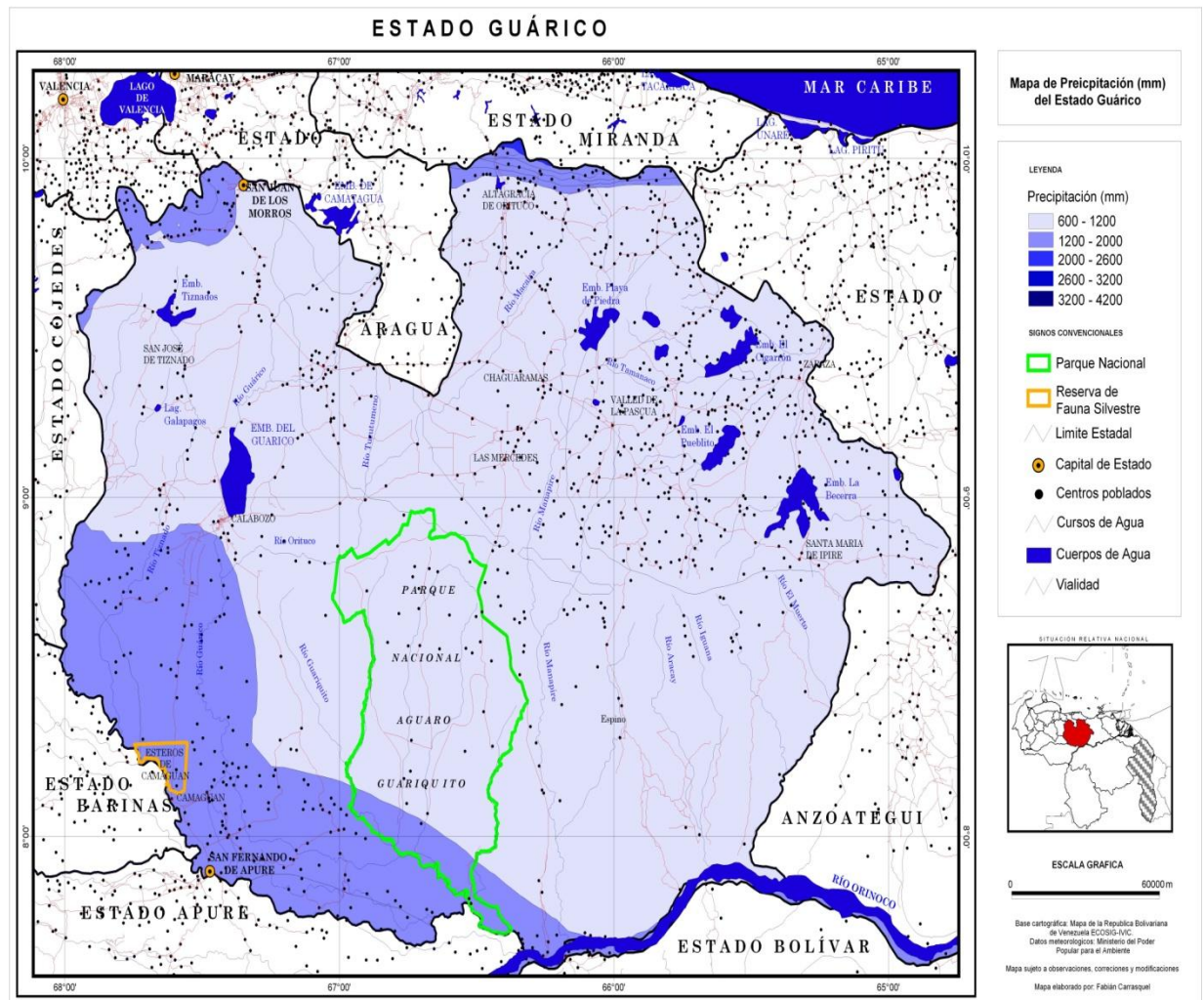


Figura N°2.1. Mapa de precipitación (mm) del Estado Guárico. Base cartográfica: Mapa de Venezuela ECOSIG-IVIC y datos meteorológicos obtenidos del Ministerio del Poder Popular del Ambiente

Vladimir Koeppen (1948), propone una clasificación climática en la que se tiene en cuenta tanto las variaciones de temperatura y humedad como las medias de los meses más cálidos o fríos, y lo más importante, hace hincapié en las consecuencias bioclimáticas. Según esta clasificación la zona climáticamente se clasifica como Aw. Clima de sabana tropical donde el promedio de precipitación oscila entre 1000-1500 mm anuales, disminuyendo de sur a norte y con temperaturas medias anuales de 26°C.

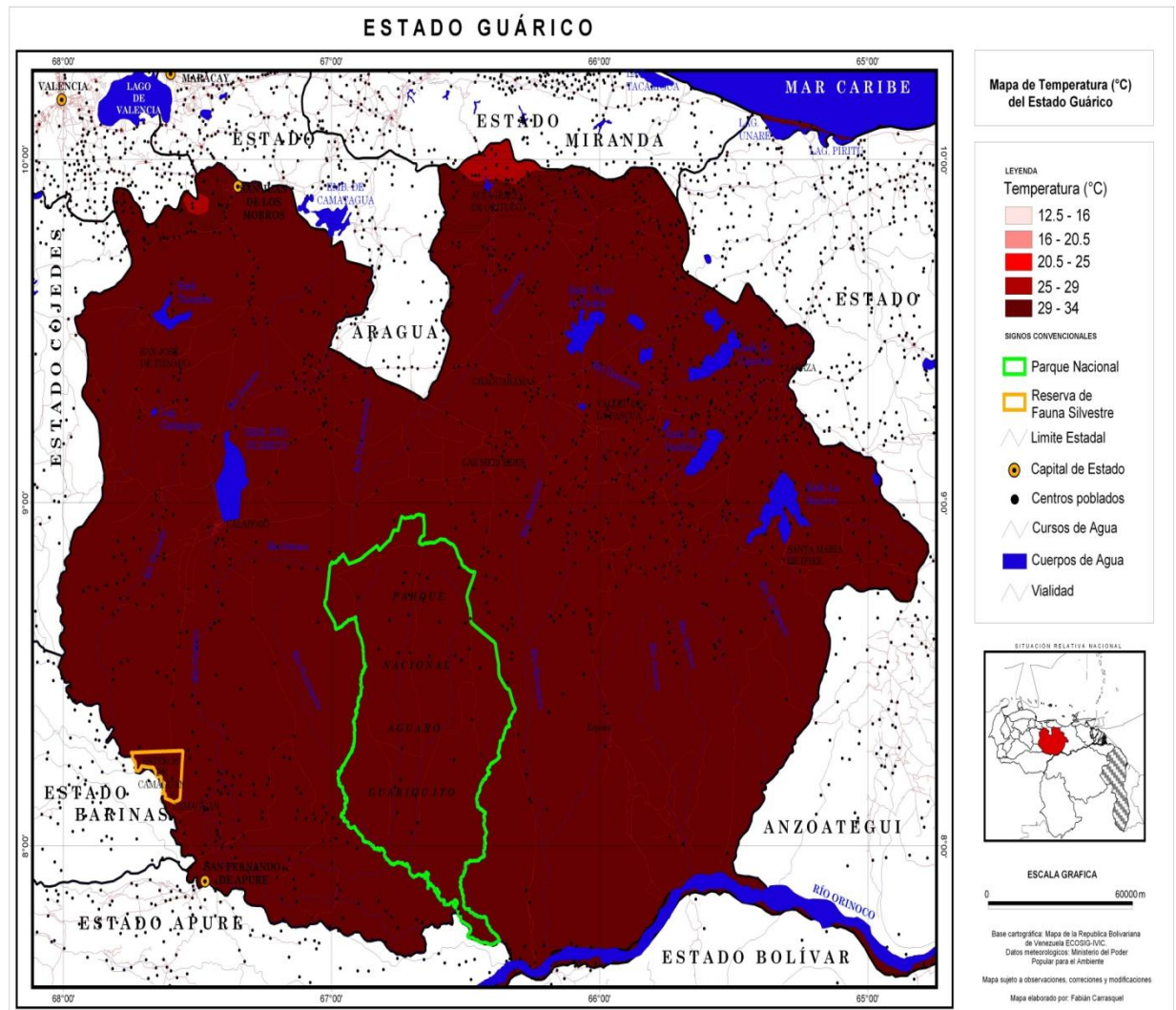


Figura N°2.2. Mapa de temperatura (°C) del Estado Guárico. Base cartográfica: Mapa de Venezuela ECOSIG-IVIC y datos meteorológicos obtenidos del Ministerio del Poder Popular del Ambiente

2.1.3.- Vegetación

La vegetación natural se corresponde con sabanas y pastizales con pocos árboles, matorrales bajos, palmas y algunos bosques de galería remanentes en las zonas de mayor humedad o cauces de ríos y quebradas, pero en general se encuentra

muy intervenida con vegetación cultivada introducida por el hombre para fines agrícolas.

2.1.4.- Drenaje

El río más importante que posee el Municipio José Félix Ribas es el Río Tamanaco, que desemboca en el río Unare. Este río está represado en los embalses de Tamanaco (El Bostero del Municipio Zaraza), aparte de eso Tucupido cuenta con riachuelos que son importantes fuentes hidrográficas para la región como son: la Quebrada Honda, Quebrada Chiquero, Río Coporo, Río Tucupido, Río Jabillal y las Represas de Coco e Mono, Jabillal y el Pueblito, los cuales son utilizados para la actividad agrícola y pecuaria. En sistemas de riegos y canales que permiten tener una agricultura intensiva. La de Jabillal está destinada para el suministro de agua potable de la población.

El río Tucupido ocupa la divisoria de aguas entre el río Tamanaco y la quebrada Jabillal afluye al Tamanaco al NE de la localidad. La quebrada Jabillal forma el embalse Tucupido situado al S de la población.

El drenaje describe un patrón dendrítico a reticular, propenso a cambiar de curso y caudal durante dos marcadas estaciones, una lluviosa y otra de sequía. Durante la época lluviosa se forman zonas anegadizas en las llanuras de inundación cuyo cauce por lo general es difuso, y en algunas zonas se forman pequeños lagos y ciénagas. Existen numerosas lagunas artificiales construidas para abrevadero del ganado.

2.2.- Geología Regional

2.2.1.- Generalidades

La cuenca Oriental de Venezuela ocupa el corredor llanero entre la Serranía del Interior de la Cordillera de la Costa y el río Orinoco, se extiende desde el Arco del Baúl hasta el este en el Golfo de Paria y el Océano Atlántico, al este y ha sido subdividida en el Golfo de Paria y dos subcuencas, denominadas Subcuenca de Maturín al este y la Subcuenca de Guárico al oeste, donde en esta última se encuentra nuestra área de estudio.

Según González de Juana (1970), la cuenca fue rellenada con sedimentos de diversos ambientes sedimentarios debido al avance de la misma hacia el sur durante el Oligoceno Superior y el Mioceno Inferior, debido a esto el subsuelo de Guárico sobre un basamento de rocas cretácicas ha sufrido diferentes ciclos de sedimentación en el Terciario Superior donde se inició un proceso transgresivo que continuó en el Oligoceno y luego en el Mioceno comenzó un ciclo de regresión con desarrollo de ambientes someros y perállicos que culmina con ambientes principalmente continentales pertenecientes a la Formación Quiamare.

Los mapas geológicos publicados, incluyendo el Mapa E-9 realizado por Creole Petroleum Corporation (1962), indican que en el área de estudio aflora exclusivamente la denominada Formación Quiamare y sedimentos aluviales en las planicies de los numerosos ríos y quebradas que atraviesan la zona.

2.2.2.- Formación Quiamare

El Léxico Estratigráfico de Venezuela, (1970) lo define litológicamente como una secuencia monótona de arcilitas gris verdosas, rojas pardas y gris-azulado, en capas plurimétricas poco definidas, con intercalación de areniscas guijarrosas, lutitas

carbonáceas y lignito en capas lenticulares, métricas. Carácter distintivo lo constituyen las secuencias arcilíticas dominantes (entre 80% y 95%) moteadas, abigarradas, monótonas. González de Juana (1980) expone que en la Formación se pueden distinguir tres miembros, de base a tope: Revoltijo, de lutitas carbonáceas, Salomón, de arcilitas moteadas y San Mateo, de areniscas calcáreas o calizas arenosas y conglomerados. Los contactos entre los miembros ha sido difícil de ubicar debido a los cambios laterales rápidos de litofacies en estos sedimentos continentales a marinos muy marginal son características de la formación. El miembro de mayor extensión lateral en sentido este-oeste es Salomón.

El Miembro Revoltijo (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1970), tiene unos 610 m de espesor y se caracteriza por su elevado contenido de lutitas y lignitos carbonáceos que ocupan una depresión topográfica en el área. El Miembro Salomón (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1970), tiene 130 m de espesor y consiste principalmente en arcilitas abigarradas oscuras, con suficientes capas duras de areniscas y conglomerados de guijarros. El Miembro San Mateo (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1970), tiene unos 135 m de espesor y se compone principalmente por limolitas calcáreas, areniscas, areniscas calcáreas y conglomerados que forman la prominente fila que divide al este de San Mateo.

Los foraminíferos planctónicos reportados por Peirson (1965) sugieren que la Formación Quiamare se atribuye al Mioceno Temprano. (L.E.V, Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1970).

De Sisto (1960) en base a un perfil eléctrico compuesto de Anzoátegui nororiental, estimó espesores de más de 1.280 m para la formación, con más de 885 m para el Miembro Salomón (erosionado en su tope) y 395 m para el Miembro Revoltijo. El Miembro San Mateo está erosionado en esa área, pero mide 15 m de espesor en su sección tipo. Vivas y Macsotay (1989) reportaron más de 4.000 m en el transecto Potocos-Caigua-San Miguel, y más de 1.500 m tectonizados entre Valle de

Guanape y El Alambre. Peirson (1965) reportó un mínimo de 2.560 m en el sector este de su afloramiento. Hacia el este, la unidad ha sufrido erosión progresivamente más intensa, y más allá del saliente de Aragua, la unidad se halla ausente.

Debido al enorme espesor de la formación y la pobreza de sus afloramientos, es difícil llegar a valores precisos para su espesor. Los valores de Peirson (1965), basados en una combinación de secciones medidas, correlaciones con fotografías aéreas y el control de pozos, dan estimados de un máximo de 6.000 m. La formación se adelgaza a unos 3.500 m hacia el este, a expensas de la Formación Capiricual.

La Formación Quiamare desde su descripción original, fue considerada como un depósito continental, piemontino, cuyos conglomerados eran de carácter orogénico (Peirson, 1965 en Campos y Osuna, 1977). Los afloramientos de Anzoátegui septentrional son interpretados como paleosuelos, con cauces fluviales, con sólo escasos horizontes marinos someros en el Miembro Salomón (Vivas y Macsotay, 1989). En los estados Guárico y Aragua, el paleoambiente es continental, piemontino, de suelos selváticos zurcados por cursos fluviales (Bell, 1968; Beck, 1977). Sus rasgos corresponden a una típica molasa post-orogénica, relacionada a la estructuración de la Serranía del Interior, tanto oriental como central (Vivas y Macsotay, 1989).

González de Juana (1980), expone que la Formación Quiamare es una unidad de ambiente continental a salobre con pronunciadas variaciones laterales. Hedberg y Pyre (1944) señalaron que es principalmente continental, aunque contiene dos o tres horizontes marinos delgados fosilíferos de aguas muy someras.

2.3.- Estructura molecular de las arcillas

Según Grim (1953), los minerales de arcilla están constituidos por agregados de silicatos de aluminio hidratados, con una estructura cristalina perteneciente al grupo de los filosilicatos. Se forman por meteorización o alteración hidrotermal de los

silicatos ricos en aluminio. El principal factor de esta alteración físico-química es el agua. La estructura cristalina de las arcillas está conformada básicamente de láminas de dos tipos: Una constituida por tetraedros de sílice y oxígeno (SiO_4), con tres átomos de oxígeno en cada tetraedro compartiendo con los tetraedros adyacentes, formando una estructura o retículo de forma hexagonal. La segunda lámina está formada por iones de Al^{3+} e iones de O^{2-} y OH^- en coordinación octaédrica como se aprecia en la Figura 2.3.

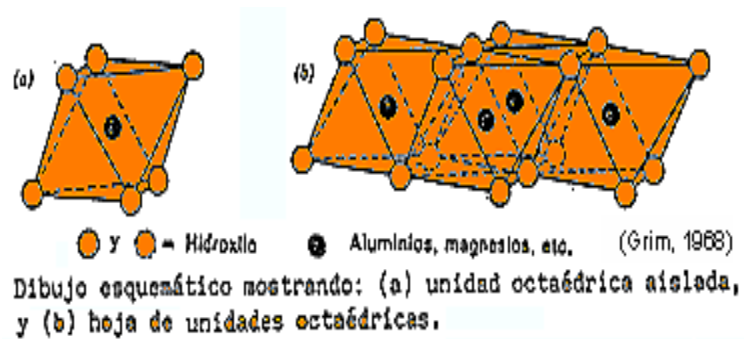


Figura N° 2.3. Esquema de la estructura cristalina de las arcillas. Extraída de Grim, 1968.

El arreglo de estas láminas junto con la sustitución de Si^{4+} y Al^{3+} por otros elementos, es lo que determina prácticamente el tipo de mineral de arcilla presente en un sedimento o roca sedimentaria.

Los minerales de arcilla son susceptibles a diferentes factores que pueden controlar sus propiedades químicas, físicas y geomecánicas. Según Grim (1953), los principales factores se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Composición de la fracción arcillosa: se refiere a la identidad y la abundancia relativa de todos los minerales de arcilla presentes. Está demostrado que pequeñas cantidades de ciertos minerales de arcilla constituyentes pueden tener una gran influencia en las propiedades físicas.

- Composición de la fracción no arcillosa: depende de la identidad de los minerales no arcillosos, sus estructuras y abundancia relativa así como la distribución del tamaño de partículas de las especies individuales. En general, los minerales no arcillosos que puedan influenciar las propiedades de las arcillas deben estar presentes en cantidades mayores a trazas pero en algunos casos hace falta solo trazas de componentes pueden influenciar significativamente las propiedades de las arcillas que se desarrollan a elevadas temperaturas. La presencia de minerales o elementos no arcillosos pueden tener gran importancia geológica para la correlación, determinación de condiciones de depositación y localización de la fuente de sedimentos.

- Material orgánico: este factor está referido a la cantidad del material orgánico contenido en el sedimento arcilloso. Puede estar presente como partículas discretas de madera, hojas, esporas, hojas, material leñoso, etc. O puede estar en moléculas orgánicas absorbidas en la superficie de las partículas de minerales de arcilla. En general, mientras más grande es el ión orgánico, mayor es la reducción en la capacidad de absorber agua.

- Iones intercambiables y sales solubles: las sales solubles en agua pueden haber entrado a la arcilla en el momento de la acumulación o pueden haberse desarrollado como una consecuencia del movimiento del agua freática, clima y

procesos de alteración. Minerales de arcilla y materiales orgánicos pueden absorber cationes y aniones los cuales pueden intercambiarse por otros iones en el medio acuoso. Las propiedades físicas de los minerales de arcilla van a depender de los iones intercambiables así como también la abundancia relativa de los iones absorbidos presentes en cualquier arcilla.

- Textura: es referido a la distribución de los tamaños, forma y orientación de las partículas constituyentes y las fuerzas que tiende a unir las entre sí. Las propiedades relacionadas con la facilidad de corte y dispersión de los minerales de arcilla será influenciada por el tamaño de los mismos.

2.4.- Arcillas Expansivas

Una arcilla expansiva es aquella arcilla susceptible a producir grandes cambios de volumen, en directa relación con los cambios en la humedad del suelo. Tienen la capacidad de absorber agua en su estructura lo cual genera un ensanchamiento o expansión de la estructura cristalina original. Las arcillas expansivas pertenecen al grupo mineralógico de los silicatos y en función de la distribución de los tetraedros SiO_4 se clasifican dentro de los filosilicatos o silicatos laminares, siendo las del grupo de las esmectitas las que tienen mayor expansividad. En función del tipo de arcilla, las moléculas de agua se emplazarán entre lámina y lámina en mayor o menor medida produciendo el hinchamiento. Cuando el catión interlaminares es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación o separación de las láminas, teniendo un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen Ca^{2+} o Mg^{2+} como cationes de cambio, su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

2.4.1.- Grupo de las Esmectitas

Fórmula General N°6: $A_{0,3}D_{2-3}[T_4O_{10}]Z_2 \cdot nH_2O$ 7.

Donde: A= Cationes inter-capas intercambiables

D= Cationes en la hoja tetraédricas

T= Cationes en las hojas octaédricas

Z= Aniones en las hojas octaédricas

nH_2O = Agua molecular inter-capas, intercambiable

Según Grim (1953), los minerales de arcilla del grupo de la Esmectita, están caracterizados por tener una estructura cristalina de tres capas (2:1), en donde una lámina con coordinación octaédrica de Al^{3+} , se encuentra entre dos láminas de coordinación tetraédrica Si^{4+} . El espaciamiento basal típico es de 14Å , pero debido a que este grupo mineralógico tiene la capacidad de absorber moléculas de agua, puede variar de $9,6\text{Å}$ (sin agua) hasta los $21,4\text{Å}$. La montmorillonita es la más común de este grupo de arcillas.

Las esmectitas tienen estructuras compuestas por hojas (t-o₂-t) de pirofilita intercaladas con capas de H_2O que contienen cationes intercambiables como Na^{2+} , K^+ y Mg^{2+} . Las moléculas de agua se disponen en patrones octaédricos alrededor de los cationes, pero el enlace es muy débil, por lo que tanto el agua como los cationes pueden salir o entrar de la estructura con gran facilidad.

Tabla N°2.1. Grupo de la esmectita

| Grupo de la esmectita | |
|-----------------------|---|
| Aliettita | $\text{Ca}_{0,2} \text{Mg}_6 (\text{Si}, \text{Al})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ |
| Beidellita | $\text{Na}_{0,5} \text{Al}_2 (\text{Si}_{3,5}, \text{Al}_{0,5}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ |
| Montmorillonita | $(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3} (\text{Al}, \text{Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ |
| Nontronita | $\text{Na}_{0,3} \text{Fe}^{3+}_2 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ |
| Saponita | $(\text{Ca}, \text{Na})_{0,3} (\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_3 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ |

2.4.2.- Montmorillonita

La montmorillonita es un filosilicato del grupo de las esmectitas con fórmula general $(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3} (\text{Al}, \text{Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, cristaliza en el sistema cristalino monoclinico y tiene una dureza entre 1 ½ - 2. La localidad tipo es Montmorillon, Vienne, Poitou-Charentes, Francia. Esta arcilla fue descubierta en 1847.

La montmorillonita sódica tiene un tamaño de 0.01μ , es de color blanco verdoso, muy expansiva, de alta plasticidad y muy baja permeabilidad. Las montmorillonitas de alto contenido en hierro se llaman nontronitas, las ricas en magnesio y poco aluminio son las saporitas, y si tienen litio se conocen como hectoritas. Las que poseen déficit de silicio y ricas en aluminio se llaman beidellita.

2.4.3.- Illita

La illita es un filosilicato del grupo de las micas que viene en capas en relación 2:1 con fórmula general $\text{K}_{0,65} [\text{Al}_{0,65} \text{Si}_{3,35} \text{O}_{10}] (\text{OH})_2$. Su sistema cristalino es monoclinico y sus cristales no son distinguibles. Esta arcilla es típicamente encontrada como masas de grano muy fino de colores blancuzcos o grisáceos y en una amplia variedad de ambientes. Los materiales de esta serie se forman por meteorización o alteración hidrotermal de la moscovita-fengita, pero algunos son

autigénicos o pueden variar de la alteración de feldespatos potásicos o recristalización de esmectitas. Poseen reacción lenta con la cal, inhibición total en presencia de SiO_3^- . Es encontrada de forma natural combinada con la montmorillonita.

El tamaño de los cristales es de $0,1\mu$, de color beige y gris verdoso, su raya es blanca, es un mineral expansivo, con plasticidad media y baja permeabilidad. Si es sódica tiene disolución rápidamente en agua, al efervecer con ácido indica que es illita cálcica o magnésica. Posee poca cantidad de uniones con cationes intercambiables por lo que posee menos capacidad de intercambio y expansividad que la montmorillonita.

Es un mineral de grano fino presente en arcillas sedimentarias y asociada con la montmorillonita y caolinita.

2.4.4.- Caolinita

El caolín es una sustancia mineral producida por alteraciones debidas a oxidaciones directas o indirectas causadas por la meteorización y por la infiltración de aguas atmosféricas superficiales, que ocasionaron la descomposición de los feldespatos alcalinos contenidos en rocas ígneas originales como pegmatitas y granitos en las que la moscovita aparece asociada con el cuarzo y otros silicatos, por lo que los residuos de dichos minerales que resistieron a la acción de la meteorización durante la descomposición de los feldespatos, acompañan al caolín como impurezas.

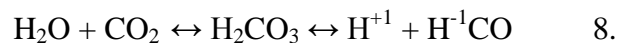
La caolinita es el principal integrante del grupo de los caolines, en un silicato de aluminio hidratado de color blanco con una dureza de $2 - 2 \frac{1}{2}$, el tamaño de los cristales es de 1μ aproximadamente; no es expansiva, tiene baja plasticidad, baja cohesión y es de difícil dispersión incluso al ser atacada con ácido. Posee un sistema cristalino triclinico y su estructura consiste en dos unidades laminares, una octaédrica

y otra tetraédrica. La totalidad del cristal es mantenido unido por puentes de hidrógeno que se mantienen en contacto con agua, dando como resultado poca expansividad y mediana plasticidad.

2.5.- Aspectos geotécnicos sobre el estudio de las arcillas expansivas

Una arcilla expansiva es aquella arcilla susceptible de producir grandes cambios de volumen, en directa relación con los cambios en la humedad del suelo. La mitigación de los efectos de una arcilla expansiva en las estructuras realizadas en las áreas con arcillas expansivas es el mayor desafío en la ingeniería geotécnica. Los factores que afectan la formación de arcillas expansivas son:

- Intemperismo Químico: los minerales en las rocas ígneas y metamórficas formadas a alta presión y temperatura son químicamente inestables cuando son expuestas a las capas más superficiales de la corteza terrestre. Los principales agentes del intemperismo químico se presentan en regiones de alta temperatura y precipitación donde las reacciones químicas son más fáciles. Un ejemplo muy común se produce cuando el agua de lluvia cae a través de la atmósfera y disuelve pequeña cantidad de dióxido de carbono produciendo ácido carbónico. Este ácido ligero se mueve en el suelo hacia abajo y lateralmente, adicionalmente existe ácido carbónico en el suelo por la putrefacción de la materia orgánica, el efecto de estos es la ionización del ácido carbónico en forma de iones de hidrógeno e iones de bicarbonato. Los iones de hidrógeno pueden entrar por su tamaño en la estructura cristalina y reemplazar otros iones provocando el cambio en la composición química de la roca como se muestra en la ecuación 8.



Donde:

H_2O = agua

CO_2 = dióxido de carbono

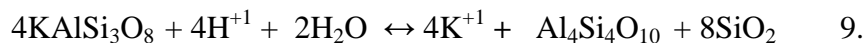
H_2CO_3 = ácido carbónico

H^{+1} = hidrógeno

H^{-1}CO = bicarbonato

- Hidrólisis: este proceso se presenta con mayor intensidad cuando vemos lo efectivo que es Ion H^{+1} en la descomposición del feldespato potásico, éste Ión reemplaza al Ión potásico la estructura cristalina quedando que el K^{+1} en solución, el esquema se muestra en la ecuación N° 9:

Hidrólisis del feldespato potásico



Donde:

KAlSi_3O_8 = Feldespato potásico

H^{+1} = Ión de Hidrógeno

H_2O = Agua

K^{+1} = Cation Potasio

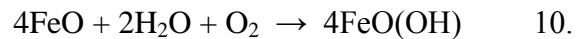
$\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}$ = Caolinita

SiO_2 = Sílice

- Lixiviación: es otro de los procesos comunes del intemperismo químico y se produce por la continua remoción de materia soluble de los tratos rocosos de la corteza. La sílice es removida lentamente de las rocas por el agua donde esta permanece en solución a través de la tierra. Mucha de las sustancias producidas

por la lixiviación están presentes en el agua subterránea y en grandes concentraciones producen sabor al agua subterránea. En Venezuela las lateritas económicamente más importantes son las cuarcitas ferroginosas que son menas de hierro y la bauxita que es una mena de aluminio.

- Oxidación: el hierro es un constituyente muy común de muchas rocas y minerales como la biotita, augita, hornblenda, cuando estas rocas y minerales son atacadas por el intemperismo o meteorización química, el hierro liberado rápidamente se oxida en presencia de oxígeno pasando de Fe^{+2} a Fe^{+3} , como consecuencia de este proceso se desarrolló un mineral amarillento llamado “goetita” y que es la combinación de oxidación y hidratación con incorporación de agua dentro del estructura cristalina, el proceso químico se muestra en la ecuación N° 10:



Donde:

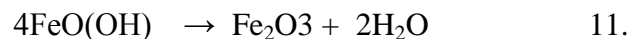
FeO = Óxido de hierro

H_2O = Agua

O_2 = Oxígeno

$\text{FeO}(\text{OH})$ = Goetita

La deshidratación de la goetita, producen hematitas como se muestra en la ecuación N° 11:



Donde:

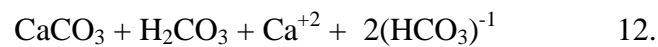
$\text{FeO}(\text{OH})$ = Goetita

Fe_2O_3 = Hematita

H_2O = Agua

- Disolución: los minerales constituidos por carbonato de calcio, tales como la calcita o las calizas, son ligeramente solubles en agua, sin embargo en presencia del ácido carbónico, los iones de calcio y bicarbonato se separan, este proceso es llamado disolución.

La ecuación N° 12 muestra el proceso se muestra a continuación:



Donde:

CaCO_3 = Carbonato de Calcio

H_2CO_3 = Ácido Carbónico

Ca^{+2} = ión calcio

$(\text{HCO}_3)^{-1}$ = ión Bicarbonato

En general, para la determinación de la expansividad de un suelo, los ensayos a realizar son:

- Granulometría: permitirá determinar el porcentaje de finos que contiene y clasificarlo según los criterios de Casagrande.
- Límites de Atterberg: para determinar los límites líquido, plástico y el índice de plasticidad.
- Hinchamiento libre: obteniéndose el cambio de volumen potencial y el índice de hinchamiento.
- Humedad natural: cantidad de agua contenida en el suelo de forma natural.
- Consolidación: determina la presión de hinchamiento.

2.5.1.- Fenómeno de hinchamiento

Los suelos expansivos sufren fenómenos de hinchamiento de magnitud considerable con las variaciones de su humedad, provocando en el proceso de humedecimiento un aumento del volumen manteniendo constante el estado de tensiones en el exterior.

Cuando un suelo no saturado es humedecido por medio de la absorción de agua entre sus partículas, aumenta su volumen relajando las tensiones intergranulares aumentando el grado de saturación y un proceso de hinchamiento. En general dicho proceso está asociado a terrenos arcillosos plásticos con densidades secas altas y presiones exteriores bajas.

Lambe & Whitman (1959) se refiere a los minerales arcillosos expansivos como la illita, caolinita y la montmorillonita poseen un potencial de hinchamiento alto debido a los siguientes factores: estructura de los cristales, estructura del grupo de cristales y la capacidad de intercambio catiónico.

Los mecanismos que producen el hinchamiento están relacionados con las propiedades y características de las partículas arcillosas. Delgado (1986), hace referencia sobre los mecanismos micro estructurales fundamentales que producen el hinchamiento:

- Hidratación de las partículas de arcilla: las partículas de arcilla, con cargas negativas, son rodeadas por moléculas de agua que a su vez atraen a otras moléculas de agua al quedar desbalanceada su carga eléctrica. El equilibrio eléctrico puede ser satisfecho también por cationes, formándose así cadenas de partículas-agua-cación-agua-partícula lo que genera un aumento de volumen.

- Hidratación de cationes: los cationes absorbidos en la capa doble difusa son rodeados por moléculas de agua produciendo aumento de volumen.
- Repulsión osmótica: la concentración de cationes en la capa doble difusa decrece al alejarse de la partícula arcillosa, lo cual puede provocar una migración de las moléculas de agua hacia el interior por ósmosis si se pone en contacto con agua pura o con un agua con una concentración más baja de cationes.

El proceso de hinchamiento se ve afectado por diversos factores expuestos por Barrera (2002):

- Tipo y cantidad de minerales: cuanto más expansivos sean los minerales presentes en el suelo, mayor será el hinchamiento que se producirá cuando el suelo se inunde.
- Densidad: para el mismo suelo con la misma humedad inicial, el hinchamiento será mayor cuando mayor sea la densidad seca del mismo.
- Estado de tensión: la magnitud del hinchamiento es tanto menor cuanto mayor es la presión aplicada al suelo pudiendo llegar a anularlo por completo.
- Estructura del suelo: los suelos que han experimentado cementaciones tienen menor tendencia a hinchar. Las estructuras floculadas tienen mayor tendencia a hinchar que las dispersas, en cambio la retracción es mucho menor que las primeras.
- Tiempo: dado que los suelos arcillosos expansivos son muy poco permeables, el proceso de absorción de agua de los mismos puede durar semanas, incluso años dependiendo de las condiciones de infiltración y del espesor del estrato.

- Fluidos intersticiales: la presencia de sales disueltas en el agua que ocupan los poros del suelo influye en los fenómenos de formación de la capa doble. Una elevada concentración de sales y un pH alto favorecen la disociación de éstas y por lo tanto aumenta la cantidad de cationes presentes en el agua libre. Esto produce una menor absorción de cationes y que por lo tanto el hinchamiento sea menor.
- Humedad: la humedad del suelo influye también en la magnitud del hinchamiento. Cuanto menor es la humedad, mayor es la expansión potencial por cuando el suelo es capaz de absorber mayor cantidad de agua.

2.5.2.- Propiedades índice y su relación con el grado de expansión

Las muestras luego de ser ensayadas en el laboratorio fueron clasificadas mediante el sistema SUCS (Norma ASTM 2487-00) a través de los diagramas que se observan en las Figuras N° 1.9; 1.10; 1.11 y 1.12, adicionalmente se analizaron las propiedades expansivas de las mismas de acuerdo a sus propiedades índice.

2.5.2.1.- Clasificación por propiedades índice

Los valores de índice de plasticidad nos permitieron estimar el potencial expansivo de las arcillas mediante la relación obtenida por el National House-Bulding Council England, que se presenta a continuación:

| Índice de plasticidad | Potencial expansivo |
|------------------------------|----------------------------|
| 0-20 | Bajo |
| 20-40 | Medio |
| 40-60 | Alto |
| > 60 | Muy alto |

Tabla N°2.2. Relación entre el índice de plasticidad y el potencial expansivo

2.5.2.2.- Actividad y contenido de coloides

Con los resultados obtenidos en los ensayos hidrométricos se determinó el contenido de coloides y con este valor se calculó la actividad de cada una de las arcillas mediante la fórmula propuesta por Skempton (1.953), la cual relaciona el índice de plasticidad con el contenido de coloides, mediante la siguiente relación 13:

$$\text{Actividad} = \frac{\text{Índice de Plasticidad}}{\% \text{ de Coloides}} \quad 13.$$

Usando este valor se pudo estimar el potencial expansivo de cada muestra, mediante la utilización de la correlación propuesta por Seed, Woodward y Lundgren (1.962), utilizando la gráfica que se inserta a continuación:

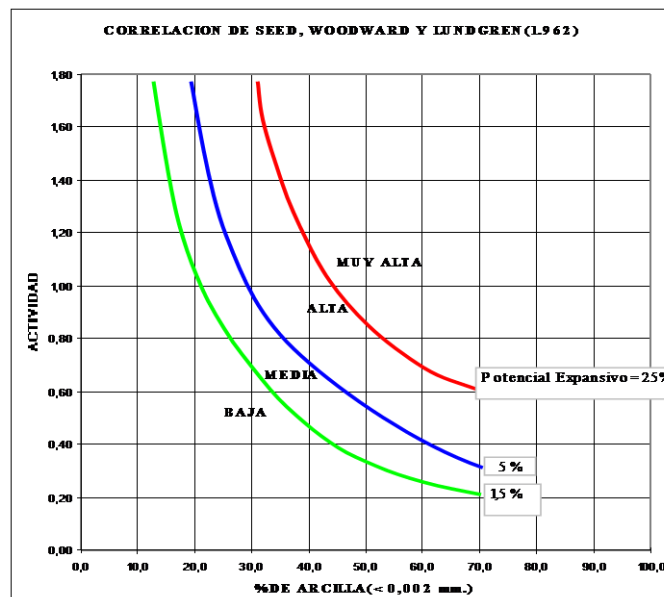


Figura N°2.4. Correlación entre el % de arcilla y su actividad

2.5.2.3.- Índice de expansión y límite líquido

Otra forma de clasificar las arcillas desde el punto de vista de su expansividad, es la propuesta por Vijayvergiya y Ghazzaly, correlacionando el índice de expansividad (I_s) con el límite líquido. Con los valores obtenidos de humedad natural

y límite líquido, se pudo estimar el Índice de Expansión (Is) definido por la siguiente fórmula 14:

$$\text{Índice de expansión (Is)} = \% w_{\text{natural}} / \text{Límite Líquido} \quad 14.$$

A partir del índice de expansión (Is) se estimaron las presiones de expansión y la expansión libre de cada una de las muestras, mediante las correlaciones propuestas por Vijayvergiya y Ghazzaly (1.973).

Utilizando esta metodología, cada vez que fue posible se determinó, en términos relativos, la plasticidad y el potencial expansivo, clasificándose de Bajo, Medio y Alto.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1.- Geología Local

Debido a la topografía de la zona y a los escasos afloramientos, la caracterización geológica se complementó con la descripción de núcleos de suelo y roca extraídos de los sondeos exploratorios realizados a lo largo del área de estudio. Con los datos recolectados durante este levantamiento se realizaron los mapas y perfiles geológicos a escala 1:2000 los cuales se pueden observar en el Anexo 2.

A lo largo del área de estudio, se presenta una litología de origen sedimentario con desarrollos extensos de arcilitas abigarradas con intercalaciones de areniscas lenticulares friables, lutitas carbonáceas y conglomerados. La secuencia muestra una pronunciada variación lateral con un bajo grado de litificación, planos de estratificación mal desarrollados con buzamientos bajos (5° a 10°), y la ausencia de fallas geológicas, que puedan ser detectadas con observaciones superficiales.

Las descripciones para efectos de la identificación en este capítulo son desarrolladas en función de la localidad donde fueron realizados los sondeos, para los cuales se especifica el rango aproximado en progresivas que ocupa esta localidad. Es importante resaltar que estos límites son informales cuya utilidad se limita a identificar los puntos de observación descritos para este capítulo, para lo cual se dividió el área en cinco (5) subtramos de 10 Km lineales por 2 Km de ancho cada uno.

3.1.1.- Sub-tramo 1: Tucupido-Las Lomas. Progresivas Km 310+000 al Km 320+000.

Al inicio del sub-tramo 1, específicamente donde está ubicada la progresiva Km 310+300, superficialmente se caracteriza por la presencia de suelos residuales

arcillosos producto de la alteración de la subyacente arcilita de color gris verdoso con planos de diaclasas verticales y planos de estratificación mal desarrollados con buzamiento sub-horizontal, la litología se mantiene similar hasta la progresiva 311+800. En esta zona, se localiza la Quebrada Jabillal, que ocasiona inundaciones de carácter estacionario que afectará la construcción de los terraplenes previstos en el área.



Figura N° 3.1. Núcleo de lutita extraído de la perforación 311+770.

Luego en la zona de Cují Negro donde se localiza la progresiva Km 311+880, existen suelos residuales arcillosos con espesores de hasta 2 m, manteniéndose hasta el Km 312+000 donde el material del suelo residual es arenoso y afloran areniscas limosas friables de grano medio de color ocre (Figura N° 3.2.), con una extensión de aproximadamente 1 Km de longitud, presentando material gravoso en la superficie. A partir de la progresiva 313+440, los suelos son más arcillosos con plasticidad entre mediana y alta, donde subyacen arcilitas con manchas de óxido de hierro algo micáceas. En la superficie encontramos zonas de erosión concentrada formando cárcavas como se observa en las figuras N° 3.3 y 3.4, también hay presencia de lagunas naturales generando zonas posiblemente inundables en épocas de intensas lluvias.



Figura N° 3.2. Muestra de arenisca limosa friable, cercana a la progresiva 312+000



Figura N° 3.3. Zona de erosión concentrada cercana la progresiva 313+800. (Orientación S 15° W)



Figura N° 3.4. Cárcava con orientación N 30° E
Ubicada cercana a la progresiva 313+000

Dicha litología aflora a lo largo del sub-tramo hasta el Km 313+700, manteniendo una litología donde predominan arcilitas de mediana y alta plasticidad con minerales de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) hasta la progresiva 315+935 donde la litología es más consolidada conformada por lutitas de color gris verdoso con manchas rojizas de más de 15 m de espesor con la presencia de lentes de arenisca friable de hasta 7 m localizados en las progresivas 316+360 y 316+460.



Figura N° 3.5. Arcilitas gris verdosas con manchas rojizas de yeso.

Perforación 315+460



Figura N° 3.6. Arcilita con minerales de yeso.
Perforación 313+860

En la zona cercana a la población de Tucupido se encuentran suelos residuales de espesores considerables de material arcilloso y arenas limosas que alcanzan un kilómetro de longitud sobre rocas de arcilitas abigarradas (Figura N° 3.7). Luego dicha capa de suelo se adelgaza hasta alcanzar los 0.5 m de espesor y manteniendo la misma litología anterior en el subsuelo.



Figura N° 3.7. Arcilita abigarrada. Perforación 313+860.

En los últimos kilómetros de este sub-tramo se encuentran lutitas limosas de color gris con manchas rojizas y nódulos de hierro, formando una capa de suelo arcilloso limoso de máximo un metro de espesor.

3.1.2.- Sub-tramo 2: Las Lomas-Caro de la Negra. Progresivas Km 320+000 al Km 330+000.

El primer kilómetro del sub-tramo 2, específicamente en la zona de Cerro Blanco, el subsuelo está constituido por lutitas limosas color gris con manchas rojizas de óxido de hierro (FeO), sobre esta roca se encuentra una capa de suelo residual de material arcilloso de hasta un metro de espesor (Figura N° 3.8.), que se prolonga longitudinalmente hasta la progresiva 321+000 donde se encuentra el Distribuidor Tucupido, donde el suelo aumenta progresivamente de espesor hasta alcanzar los 3 m producto de un depósito aluvial de material arenoso arcilloso de 200 m de longitud.



Figura N° 3.8. Afloramiento en corte de carretera cercano a la progresiva 320+640. Se observa contacto entre suelo residual y la arcilita. (Orientación S 35° W).

Desde la progresiva Km 320+800 hasta la Km 321+200, se mantiene la litología anterior pero en superficie se encuentra una zona anegadiza donde pueden producirse problemas de inundación en época de intensas lluvias y áreas de erosión concentrada como se observan en la figura N° 3.9.



Figura N° 3.9. Zona de erosión concentrada cercana a la progresiva 320+921. (Orientación N° 35 E.)

Entre el Km 321+980 y el Km 322+200 el subsuelo está conformado por una secuencia de intercalaciones de lutitas y areniscas de grano fino a medio, friables con matriz arcillosa. Luego en el Km 323+200 se encuentra una arenisca de color pardo, micácea con más de 15 de espesor con una capa suelo residual del tipo CL de hasta 1,5 m de espesor que luego va aumentando progresivamente hasta los 5 m producto de la meteorización de las arcilitas y lutitas subyacentes.

A partir de la progresiva 323+300 la litología predominante esta constituida por areniscas friables de color pardo con matriz arcillosa sobre lutitas de color gris con manchas de óxido de hierro, que se extiende hasta el Km 324+000, a partir de ésta progresiva se encuentra en superficie una capa de suelo arcilloso de origen residual de 0,5 m de espesor suprayacente a lutitas de color gris verdosas. En la zona existen cárcavas producto de la erosión y lagunas naturales que generan zonas anegadizas en épocas lluviosas. Dicha litología se extiende hasta el Km 326+560 donde se presentan intercalaciones de arcilitas y lutitas.



Figuras N° 3.10. y 3.11. Arcilita con plano de estratificación subhorizontal y diaclasas subvertical.

Perforación 326+880

En la progresiva 327+000 se observa un suelo de 1,5 m de espesor del tipo arcilloso residuo de la descomposición de las rocas del subsuelo conformado por

lutitas con lentes de areniscas con espesores entre 3 y 5 m de espesor. A partir del Km 327+500 hasta culminar el subtramo, la litología se mantiene constante predominando en el subsuelo lutitas de color verdoso y en superficie un suelo residual arcilloso de 0,5 y 1 metro d espesor.

3.1.3.- Sub-tramo 3: El Caro de la Negra-Coco de Mono. Progresivas Km 330+000 al Km 340+000.

Al inicio del sub-tramo 3 (Km 330+000), la litología principalmente está compuesta en superficie, por un suelo residual de material arcilloso de máximo 3 m de espesor, siendo areno arcilloso y de casi 8 m de espesor entre las progresivas 330+720 y 330+980. Dicho suelo se encuentra sobre rocas conformadas por lutitas de color gris y en ocasiones arcilitas de color gris con manchas rojas, precipitados calcáreos, minerales de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y pirolusita (MnO_2), cuyas rocas pertenecen a la Formación Quiamare (Ver Figura N° 3.12. Esta litología se extiende a lo largo de este subtramo.



Figura N° 3.12. Arcilita extraída de la perforación 331+400. Presenta minerales de yeso, pirolusita y precipitaciones calcáreas



Figura N° 3.13. Arcilita gris verdosa extraída de la perforación 336+500

A lo largo del sub-tramo se atraviesa en varias ocasiones por dos quebradas importantes de la zona como son Quebrada Jabillal, localizada específicamente en las progresivas 332+830, 333+590; posteriormente en los Km 336+400 y 336+700 y la Quebrada De Gorrín en la progresiva 334+700. La presencia de estos importantes drenajes podría generar zonas de inundación, incrementando los procesos erosivos que afectan los suelos y rocas presentes en el área.



Figura N°3.14. Suelos arcillosos susceptibles a procesos de erosión. Progresiva 335+476.

Orientación N 75° W.

En la progresiva Km 335+150 se encuentra un suelo de origen aluvial de considerable espesor (10 m), de material arcillo arenoso. Luego se mantiene constante la litología hasta el final del tramo en la zona de La Esconsonera, predominando un suelo residual entre 0,5 y 1 m de espesor sobre rocas de lutitas y arcilitas de descripción igual a la anterior.

3.1.4.- Sub-tramo 4: Coco de Mono-Los Caballos. Progresivas Km 340+000 al Km 350+000.

La litología encontrada es similar a la del sub-tramo 3 variando el espesor del suelo arcilloso y arcilloso limoso entre 1 a 3.5 m sobre un subsuelo de lutitas color pardo a gris perteneciente a la Formación Quiamare, lo cual se mantiene constante hasta la progresiva Km 341+800, donde afloran areniscas muy friables de color pardo y grano de medio a fino, sobre lutitas con descripción igual a la anterior. Dicha secuencia se prolonga casi un Km de longitud.

A partir del Km 342+400, comienza una capa de origen residual de 2 m de espesor suprayacente a rocas de arcilitas de color pardo rojizos con presencia de precipitaciones calcáreas, que se extiende hasta la progresiva 348+300 donde varía la litología del subsuelo se compone por una secuencia de arenisca friable de color pardo y grano fino y arcilita. Dicha secuencia se extiende a lo largo de 500 m lineales. Este sector es atravesado por el Río Los Tejos, el cual en épocas de lluvias intensas pueda causar zonas de inundación.

Los últimos 2 km del sub-tramo se caracterizan por una capa de suelo arcilloso, formado por el residuo de la meteorización y descomposición de las arcilitas de la Formación Quiamare.

A lo largo del sub-tramo 4, se encuentran drenajes dentríticos y lagunas naturales y artificiales que contribuyen a crear problemas de inundación de las zonas aledañas y áreas de erosión concentrada.

3.1.5.- Sub-tramo 5: Los Caballos-Tacalito. Progresivas Km 350+000 al Km 360+000.

La litología se mantiene constante como el sub-tramo anterior pero los espesores de la capa de suelo residual de material arcilloso tiende a aumentar hasta alcanzar casi 8 m y en ocasiones el material es arenoso arcilloso debido a la meteorización de areniscas friables de grano fino encontradas en el subsuelo sobre arcilitas varicoloreadas, (Ver figuras N° 3.15 y 3.16.), específicamente en las progresivas 353+800, 354+500, 357+100 y 358+900.



Figura N° 3.15. Arenisca friable, presenta laminación paralela, extraída en la progresiva 355+200



Figura N° 3.16. Arcilita altamente diaclasada, localizada en la progresiva 354+000.
(Orientación S 39° E).

El resto del sub-tramo se caracteriza en superficie por una capa de suelo arcilloso sobre arcilitas varicoloreadas pertenecientes a la Formación Quiamare.



Figura N° 3.17. Contacto entre el suelo arcilloso y la roca de arcilita. Progresiva 355+600. Se puede observar la horizontalidad de las capas. (Orientación N 20° W).

Esta área posee abundantes drenajes que ocasionan problemas de inundación en las épocas de lluvia de la zona, así como también el material arcilloso del suelo es fácilmente erosionado formando cárcavas y tubificaciones.

3.2.- Geomorfología

El área de estudio está dominada en gran parte por litologías que responden desfavorablemente a los procesos morfodinámicos en el sentido de poder ser degradados con mucha facilidad por los procesos de escurrimiento concentrado, lo cual quiere decir que a pesar de ser una formación que puede ser excavada con equipos livianos, no pueden dejarse taludes expuestos al intemperismo porque se generarían cárcavas y zanjas en poco tiempo, aunado al hecho de que las lluvias en

toda la región tienen promedio anual de más de 1000 mm, lo cual quiere decir que a los procesos de escorrentía podrían sumárseles los procesos de saturación de agua que darían como resultado focos de desprendimiento tipo golpe de cuchara por humedecimiento de las secciones arcillosas y percolación muy rápida de las secciones arenáceas.

El relieve es monótono por tratarse de una morfología de paisaje ondulado (Figura N°3.18) cuyo desarrollo se debe a lo friable de los materiales que en gran parte son de textura arcillosa, de fácil excavación y bastante impermeables que hace que en las áreas cóncavas se puedan producir encharcamientos en época de lluvias. Es difícil apreciar con detalle los procesos de laderas del relieve conformado por colinas bajas, pero ya los tipos de litología y el patrón de drenaje que predomina en toda la región hace suponer el encontrar muchos taludes naturales revelando problemas de degradación asociados exclusivamente a la litología característica de la Formación Quiamare, la cual está constituida por arcilitas intercaladas con areniscas friables y lutitas carbonáceas.



Figura N° 3.18. Paisaje ondulado formado por colinas bajas en Tucupido. (Orientación N 35° W)



Figura N°3.19. Relieve bajo de colinas onduladas en Tucupido. (Orientación N 25° W)

Desde Valle de la Pascua hasta Tucupido se observa un relieve bajo pero muy irregular posiblemente debido a la exposición en el tope de estratos de areniscas

mucho más resistentes a la erosión (Figura N°3.19), ya se sabe de antemano que la alternancia de las areniscas, lutitas y arcilitas de la Formación Quiamare tienen un comportamiento típico donde éstas últimas se degradan con mucha facilidad mientras las areniscas se degradan con mayor dificultad aunque pueden fallar por los planos de fracturas y diaclasas.

Desde Tucupido en vía a Zaraza la topografía se mantiene monótona con un paisaje ondulado, especialmente entre Las Filipinas-Zaraza y El Limón-La Fragua donde los entalles son muy pronunciados y se desarrolla un drenaje dendrítico lo cual revela la gran capacidad de socavación del agua en la sección arcillosa de la Formación Quiamare.



Figura N° 3.20. Topografía ondulada que se mantiene monótona desde Tucupido hasta Zaraza.
(Orientación N 15° W)

Las unidades morfológicas que fueron identificadas fueron las siguientes:

3.2.1.- Relieve bajo ondulado muy entallado: presenta una morfología muy monótona de relieve bajo construido sobre las arcilitas de la Formación Quiamare, donde la escorrentía se ha encargado de disecar toda la región. Esto se refleja en la densa red de drenaje que conforma la región debido a lo impermeable del material y a lo erosionable que este es. Esto significa que todo corte que se haga para cualquier tipo de construcción, va a generar fácilmente un escurrimiento concentrado en zanjas y cárcavas debido a lo erosionable que es esta formación. La única ventaja es que el relieve es muy bajo y cualquier talud que se haga va a tener poca altura.

3.2.2.- Valle aluvial: constituida por valles de origen aluvial que se encuentran en Sabana Larga al suroeste de Tucupido, Jabillal, Las Lomas al este de Tucupido y el Caro de la Negra al este de Taguapire, los cuales serán cortados por la línea del ferrocarril.

3.3.- Geología estructural y geodinámica externa

La zona no presenta elementos tectónicos importantes, eventualmente se observan algunos fracturamientos y algunas fallas de relajación gravitacionales. Las capas son bastantes subhorizontales con buzamientos por debajo de 5 grados.

Es común, en algunos casos, la presencia de inestabilidad superficial ligada a la formación de surcos y cárcavas asociadas a la reacción de la escorrentía con los suelos arcillosos.

3.4.- Aspectos geotécnicos.

Las rocas estudiadas en el área, presentan un bajo grado de litificación, donde de manera general, los procesos de meteorización que transforman una roca

sedimentaria en suelo residual son graduales y disminuyen con la profundidad. En este estudio tanto en superficie como en el subsuelo, fue complicado definir con exactitud el contacto entre los suelos de origen aluvial o residual y los sedimentos de la Formación Quiamare, por ello se emplearon los siguientes criterios:

1. En la práctica, el contacto entre arcilitas y arcillas, o en otros términos, entre sedimentos arcillosos de la Formación Quiamare y suelos residuales, ha sido colocado donde desaparecen los indicios de litificación y los materiales son blandos con valores de N inferiores a 30 golpes. Las arcilitas en el área de estudio son muy duras con $SPT \geq 30$ golpes, y de forma esporádica solo recuperable en los sondeos mediante rotación.
2. El término de lutita ha sido utilizado para los sedimentos arcillosos que presentan un apreciable grado de litificación con buen desarrollo de planos de estratificación y diaclasas claramente definidos.
3. Conceptos parecidos a los descritos se han utilizado para definir el contacto entre limolitas y limos (ML) y entre areniscas y arenas en las cuales el grado de compactación y la presencia de planos de estratificación han servido para diferenciar suelos de rocas.

Para describir las características de los suelos y/o rocas a lo largo de los 50 Km lineales del tramo estudiado (progresivas Km 310+000 al Km 360+000), a modo de facilitar su comprensión, el área ha sido subdividida en cinco (5) sub-tramos de 10 Km de longitud y 2 Km de ancho cada uno, indicando la siguiente información:

- Resultados del levantamiento geológico de superficie, representado en 25 planos a escala 1:2.000 (véase Anexo 2).

- Resultados de la exploración del subsuelo mediante sondeos a máquina y apertura de calicatas. Para cada sub-tramo se incluye una tabla con los sondeos realizados, las coordenadas y la profundidad alcanzada.
- Tablas resumidas con los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a las diversas muestras obtenidas, así como la definición de su grado expansivo.
- Definición del carácter expansivo mediante métodos directos e indirectos, utilizados para definir si el potencial es bajo, medio, alto o muy alto.

Con los resultados de las actividades anteriores se interpretaron las características geológicas-geotécnicas del subsuelo mediante perfiles longitudinales a escala 1:2.000.

3.4.1.- Sub-tramo 1: Progresiva Km 310+000 al Km 320+000

El sub-tramo 1 abarca un área de 10 Km lineales por 2 Km de ancho, iniciando en el poblado de Tucupido hasta el sector Las Lomas, donde fueron ejecutados 53 sondeos exploratorios, los cuales se pueden observar discriminados en las tablas N° 3.1. Estos sondeos poseen profundidades variables entre 10 y 20m. Los resultados del trabajo de geología de superficie e interpretación del subsuelo se encuentran representados gráficamente en los planos incluidos en el Anexo N° 2.

| Sondeo | Coordenadas | | Prof. Final (m) | Sondeo | Coordenadas | | Prof. Final (m) |
|-----------|-------------|--------|--------------------|-----------|-------------|--------|--------------------|
| | N | E | | | N | E | |
| P-310+020 | 1019841 | 188328 | 10 | P-315+240 | 1022306 | 192931 | 10 |
| P-310+270 | 1019939 | 188558 | 10 | P-315+460 | 1022416 | 193122 | 10 |
| P-310+500 | 1020033 | 188768 | 10 | P-315+600 | 1022442 | 193159 | 10 |
| P-310+700 | 1020120 | 188949 | 10 | P-315+650 | 1022513 | 193286 | 10 |
| P-310+950 | 1020232 | 189172 | 10 | P-315+935 | 1022659 | 193531 | 10 |
| P-311+180 | 1020341 | 189375 | 15 | P-316+145 | 1022766 | 193711 | 10 |
| P-311+400 | 1020447 | 189568 | 12 | P-316+360 | 1022876 | 193896 | 10 |
| P-311+600 | 1020544 | 189743 | 10 | P-316+460 | 1022927 | 193982 | 20 |
| P-311+660 | 1020578 | 189746 | 10 | P-316+570 | 1022983 | 194077 | 10 |
| P-311+770 | 1020627 | 189892 | 10 | P-316+760 | 1023080 | 194241 | 15 |
| P-312+080 | 1020777 | 190163 | 15 | P-317+000 | 1023203 | 194447 | 10 |
| P-312+200 | 1020840 | 190265 | 10 | P-317+260 | 1023336 | 194671 | 10 |
| P-312+330 | 1020898 | 190382 | 10 | P-317+450 | 1023433 | 194834 | 10 |
| P-312+550 | 1021004 | 190575 | 10 | P-317+460 | 1023446 | 194840 | 10 |
| P-312+750 | 1021101 | 190750 | 10 | P-317+750 | 102.586 | 195092 | 10 |
| P-313+000 | 1021222 | 190969 | 10 | P-317+950 | 1023689 | 195264 | 10 |
| P-313+215 | 1021326 | 191158 | 10 | P-318+210 | 1023821 | 195488 | 10 |
| P-313+445 | 1021437 | 191359 | 10 | P-318+420 | 1023929 | 195669 | 10 |
| P-313+650 | 1021536 | 191539 | 10 | P-318+520 | 1023980 | 195743 | 10 |
| P-313+800 | 1021620 | 191682 | 10 | P-318+665 | 1024054 | 195880 | 10 |
| P-313+880 | 1021648 | 191740 | 10 | P-318+750 | 1024097 | 195953 | 10 |
| P-314+020 | 1021715 | 191863 | 10 | P-318+970 | 1024210 | 196142 | 10 |
| P-314+195 | 1021800 | 192016 | 10 | P-319+320 | 1024392 | 196441 | 10 |
| P-314+490 | 1021943 | 192274 | 10 | P-319+600 | 1024553 | 196670 | 10 |
| P-314+680 | 1022035 | 192441 | 10 | P-319+700 | 1024614 | 196750 | 10 |
| P-314+850 | 1022117 | 192590 | 10 | P-319+900 | 1024743 | 196903 | 15 |
| P-315+050 | 1022214 | 192765 | 10 | | | | |

Tabla N° 3.1. Sondeos exploratorios realizados en el sub-tramo 1.

A continuación se presenta un gráfico que representa los porcentajes de las litologías encontradas en el sub-tramo 1:

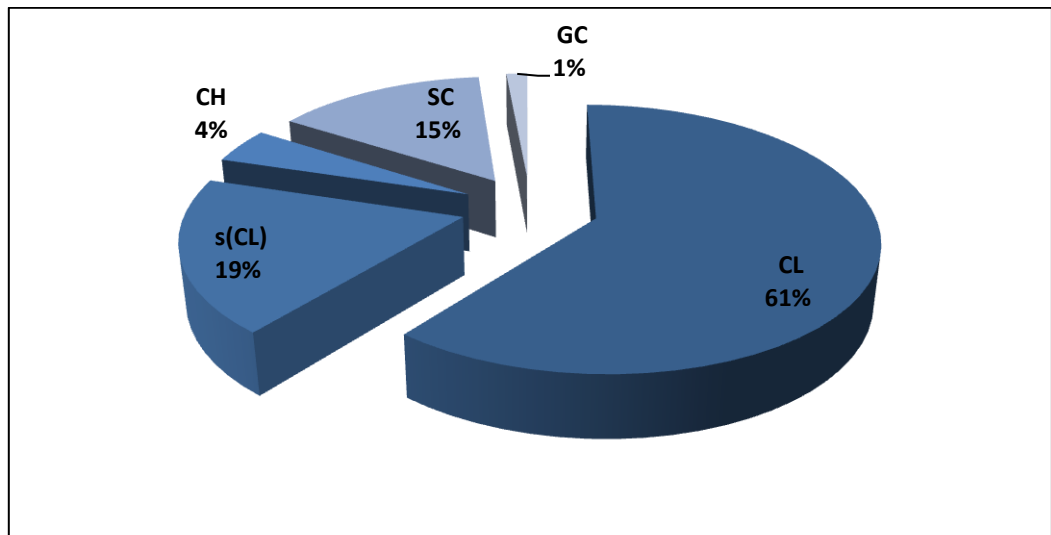


Figura N° 3.21. Litologías sub-tramo 1

De los núcleos extraídos de los sondeos exploratorios se tomaron muestras de suelo y roca las cuales fueron ensayadas en el laboratorio permitiendo su caracterización mediante el método del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) regido por la Norma ASTM. Para utilizar este sistema de clasificación se realizaron los ensayos de distribución granulométrica, hidrometría y determinación de los límites de Atterberg o de consistencia, cuyas planillas de ensayos se muestran en el anexo 1. Empleando los resultados de dichos ensayos se realizó la tabla N° 3.2 indicando los promedios de las propiedades físicas de las muestras:

| Litología | ω_{nat} (%) | P.U (Kg/cm ³) | Límite Líquido (%) | Índice de Plasticidad (%) | Gs |
|--|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|------------|
| Arcillas de baja a mediana plasticidad (CL), | 12,42±4,37 | 2,24±0,04 | 42,13±4,75 | 21,73± 4,07 | 2,65± 0,03 |
| Arcillas de alta plasticidad (CH), | 17,64 ±8,66 | 2,08 ±0,17 | 52,91± 2,63 | 31,15 ±2,52 | 2,68 ±0,01 |
| Arcillas de baja a mediana plasticidad arenosas (s(CL), (CL)s) | 10,40± 5,64 | ..... | 35,82 2,89 | 17,65 ±1,44 | ..... |
| Arenas y areniscas arcillosas (SC) | 9,10 ±12,09 | ..... | ..... | ..... | ..... |
| Gravas arcillosas (GC) | 5,83± 0,01 | ..... | ..... | ..... | ..... |

Tabla N° 3.2. Litología del sub-tramo 1 y sus propiedades físicas.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio y reflejados en la tabla anterior, se pudo identificar que el 60,87 % de los suelos están representados por arcillas.

El segundo grupo litológico, con el 18,84% arcillas arenosas, el 14,49 son arenas arcillosas (SC), el 4,35 % de arcillas de alta plasticidad (CH) y mayor contenido de humedad; el restante 1,49 % gravas arcillosas de bajo porcentaje de humedad.

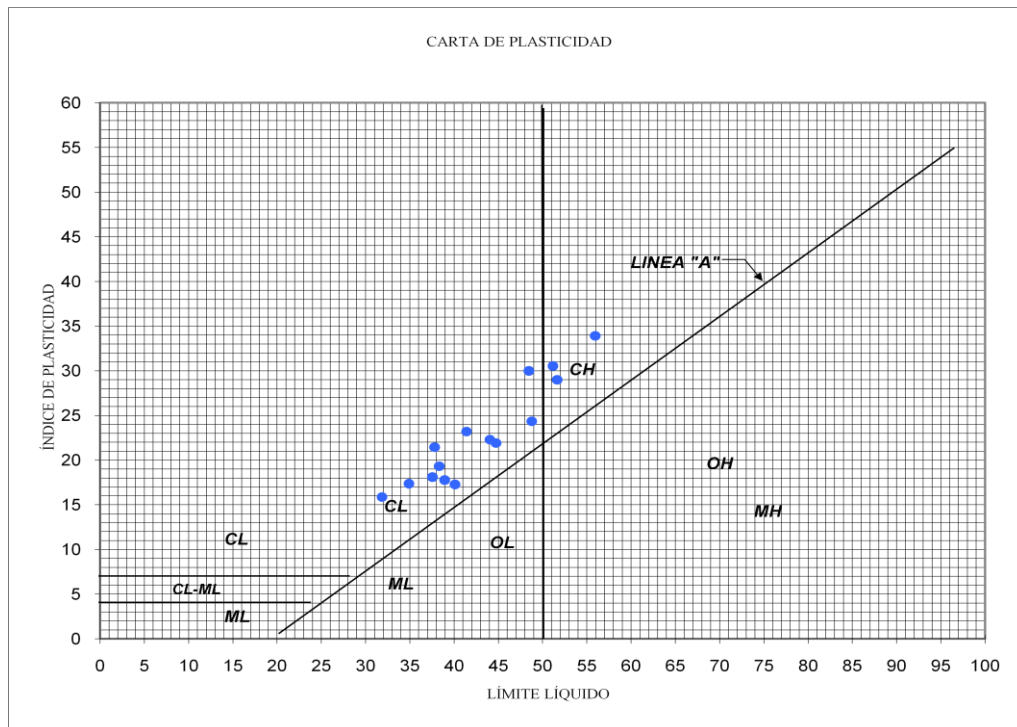


Figura N° 3.22. Carta de plasticidad de Casagrande

La plasticidad de las muestras se mantienen por encima de la “Línea A”, distribuyéndose uniformemente dentro del rango de las arcillas de mediana plasticidad, con una menor densidad de muestras representativas de las arcillas de alta plasticidad.

Adicionalmente se realizaron ensayos especiales que permitieron obtener sus propiedades de resistencia, los resultados se expresan en la siguiente tabla:

| Tipo de material | C (Kg/cm²) | qu (Kg/cm²) |
|---|----------------------------------|-----------------------------------|
| Arcillas y de baja a mediana plasticidad (CL) | 6,91 | 13,83 |
| Arcillas de alta plasticidad (CH) | 2,62 | 5,24 |

Tabla N°3.3. Ensayos de compresión simple.

De la tabla anterior se puede inferir que los resultados obtenidos de cohesión y compresión uniaxial (qu) están representando el estado preconsolidado de los sedimentos de la Formación Quiamare.

Las arcillas de alta plasticidad poseen menor resistencia a la compresión y menor cohesión que las arcillas de baja a mediana plasticidad.

3.4.1.1.- Potencial expansivo.

Para evaluar el potencial expansivo de las arcillas presentes a lo largo de este sub-tramo 1, se correlacionó el porcentaje de arcilla contenido en la muestra con la actividad coloidal de la misma, según Seed, Woodward y Ludgrend (1962), como se muestra en la gráfica que se inserta a continuación:

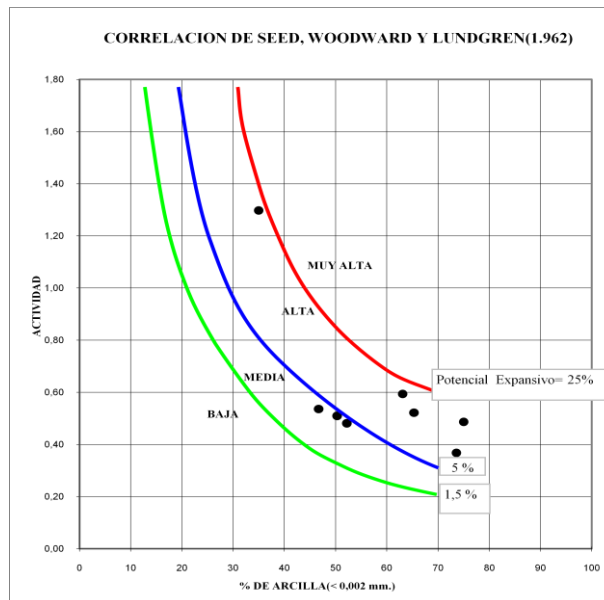


Figura N° 3.23. Correlación entre el % de arcilla y su actividad coloidal.

Como resultado de esta correlación se obtiene que el 62.5% de arcillas de las muestras ensayadas poseen un potencial expansivo Medio y un 37.5 % de potencial expansivo Alto.

La actividad de las arcillas se relacionada con sus propiedades físicas principalmente con el porcentaje del límite líquido y su índice de plasticidad, como se muestra en las siguientes gráficas:

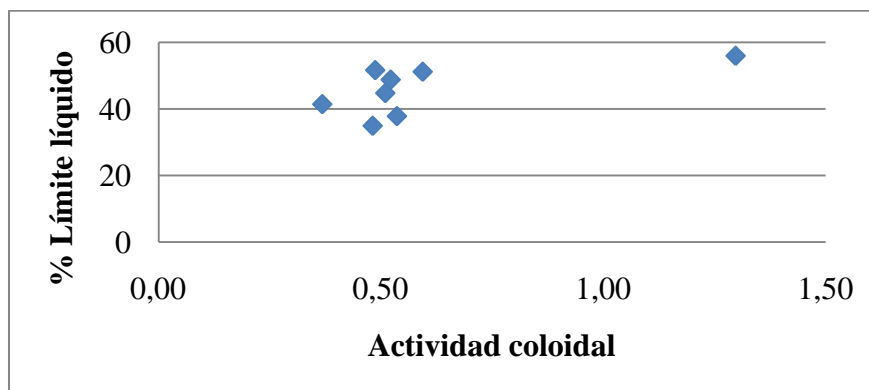


Figura N°3.24. Relación del % LL y su actividad coloidal.

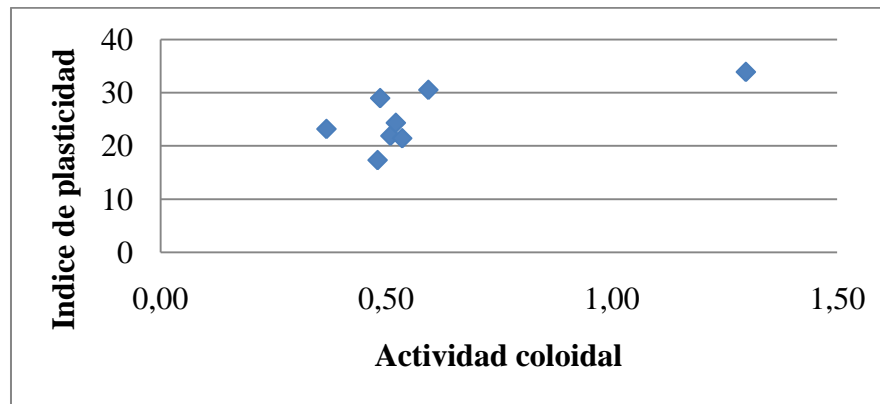


Figura N° 3.25. Relación del IP con su actividad coloidal.

Para medir el porcentaje de hinchamiento del suelo libre de carga, a las arcillas se realizó el ensayo de hinchamiento libre.

| Muestra | % Hinchamiento Libre |
|----------------|-----------------------------|
| 311+600 | 200 |
| 312+200 | 70 |
| 313+800 | 70 |
| 315+600 | 30 |
| 317+460 | 30 |
| 318+520 | 50 |

Tabla N°3.4. % Hinchamientos libres

Posteriormente se determinó la influencia de los límites de consistencia en el porcentaje del hinchamiento libre de dichas muestras, cuyos resultados se indican en el siguiente gráfico:

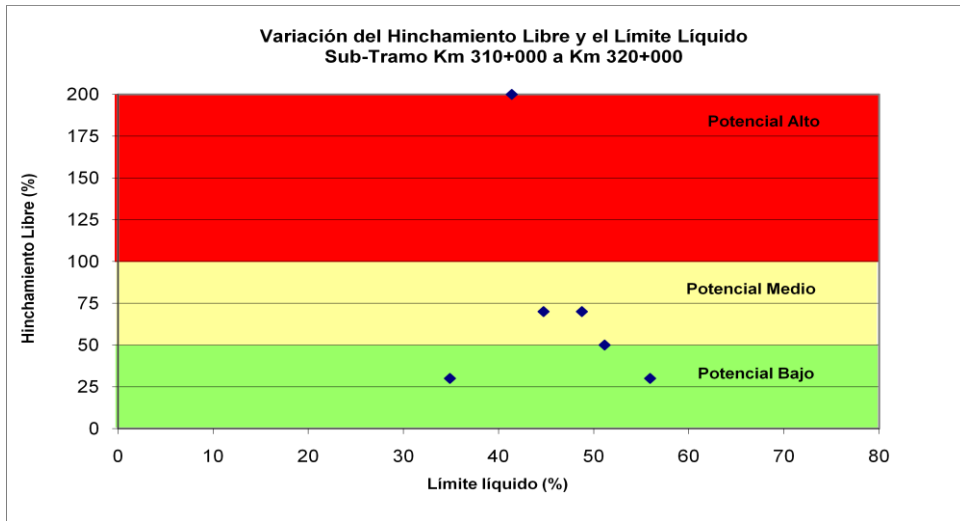


Figura N° 3.26. Relación entre los límites de consistencia y el % de hinchamiento libre.

Del total de las muestras ensayadas el porcentaje mayor está caracterizado por arcillas con un potencial expansivo bajo representando el 37.50 % y un 25 % de potencial expansivo medio y con sólo una muestra posee un potencial expansivo alto representando el 12.50 %.

Habiendo determinado el porcentaje de hinchamiento libre de las muestras obtenidas a lo largo del sub-tramo, se procede a mostrar la ubicación de las mismas:

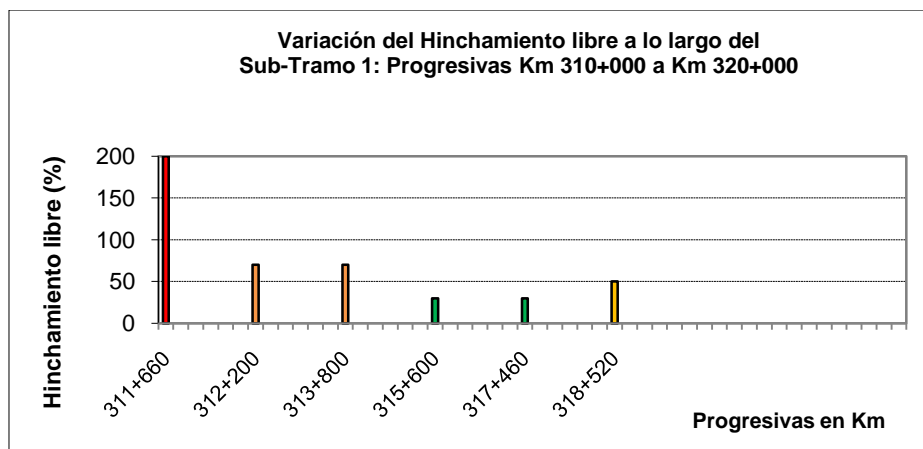


Figura N° 3.27. Variación del hinchamiento libre a lo largo del sub-tramo 1.

A las muestras de arcilla se les determinó el índice de expansión regido por la Norma ASTM 4829-95 y se obtuvo su presión de expansión, como se indica en la tabla N° 5. Los valores expansión reflejan un alto potencial expansivo y la muestra 318+520 posee potencial expansivo muy alto y las presiones de expansión se encuentran entre 2.50 y 2.80 Kg/cm², lo que concuerda con lo reflejado en el ensayo de hinchamiento libre.

| Muestra | Índice de expansión IE _m | Índice de expansión IE ₅₀ | Presión de expansión Kg/cm ² | % Hinchamiento libre |
|---------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|----------------------|
| 312+200 | 121,80 | 104,20 | 2,80 | 70 |
| 313+800 | 121,15 | 135,60 | 2,55 | 70 |
| 318+520 | 154,25 | 238,60 | 2,80 | 50 |

Tabla N° 3.5. Índice de expansión

3.4.2.- Sub-tramo 2: Progresivas Km 320+000 al Km 330+000

Este sub-tramo abarca desde el sector Las Lomas hasta El Caro de la Negra, con una extensión de 10 Lm de longitud y 2 Km de ancho. Se ejecutaron 45 sondeos exploratorios con profundidades entre 10 y 35 m, los cuales se encuentran anexados en la siguiente tabla con su respectiva ubicación espacial:

| Sondeo | Coordenadas | | Prof. Final (m) | Sondeo | Coordenadas | | Prof. Final (m) |
|-----------|-------------|--------|--------------------|-----------|-------------|--------|-----------------------|
| | N | E | | | N | E | |
| P-320+221 | 1024957 | 197144 | 10 | P-325+148 | 1026261 | 201738 | 10 |
| P-320+500 | 1025140 | 197355 | 10 | P-325+300 | 1026258 | 201890 | 10 |
| P-320+751 | 1025294 | 197552 | 10 | P-325+600 | 1026252 | 202190 | 10 |
| P-321+000 | 1025438 | 197756 | 10 | P-325+945 | 1026245 | 202535 | 10 |
| P-321+100 | 1025450 | 197700 | 10 | P-326+200 | 1026240 | 202790 | 10 |
| P-321+208 | 1025550 | 197931 | 10 | P-326+440 | 1026235 | 203030 | 10 |
| P-321+500 | 1025695 | 198185 | 10 | P-326+700 | 1026230 | 203291 | 10 |
| P-321+825 | 1025839 | 198476 | 10 | P-326+880 | 1026213 | 203473 | 10 |
| P-322+070 | 1025935 | 198702 | 10 | P-327+011 | 1026227 | 203602 | 35 |
| P-322+380 | 1026040 | 198994 | 13 | P-327+100 | 1026228 | 203691 | 35 |
| P-322+600 | 1026103 | 199205 | 12 | P-327+190 | 1026228 | 203781 | 35 |
| P-322+800 | 1026153 | 199399 | 10 | P-327+480 | 1026231 | 204071 | 12 |
| P-322+900 | 1026261 | 199495 | 10 | P-327+700 | 1026232 | 204291 | 10 |
| P-323+016 | 1026197 | 199610 | 10 | P-328+000 | 1026231 | 204591 | 10 |
| P-323+227 | 1026232 | 199818 | 10 | P-328+300 | 1026217 | 204891 | 10 |
| P-323+495 | 1026264 | 200085 | 10 | P-328+600 | 1026187 | 205190 | 10 |
| P-323+785 | 1026282 | 200374 | 10 | P-328+754 | 1026166 | 205343 | 10 |
| P-324+000 | 1026284 | 200589 | 10 | P-328+900 | 1026156 | 205485 | 10 |
| P-324+125 | 1026282 | 200714 | 10 | P-329+175 | 1026102 | 205759 | 10 |
| P-324+420 | 1026276 | 201010 | 10 | P-329+420 | 1026067 | 206002 | 10 |
| P-324+700 | 1026270 | 201290 | 10 | P-329+600 | 1026047 | 206181 | 10 |
| P-324+925 | 1026266 | 201515 | 10 | P-329+800 | 1026035 | 206380 | 10 |
| P-325+120 | 1026261 | 201715 | 10 | | | | |

Tabla N° 3.6. Sondeos exploratorios realizados en el sub-tramo 2.

En la figura N° 3.31 se puede apreciar la distribución de los grupos litológicos presentes en el sub-tramo 2:

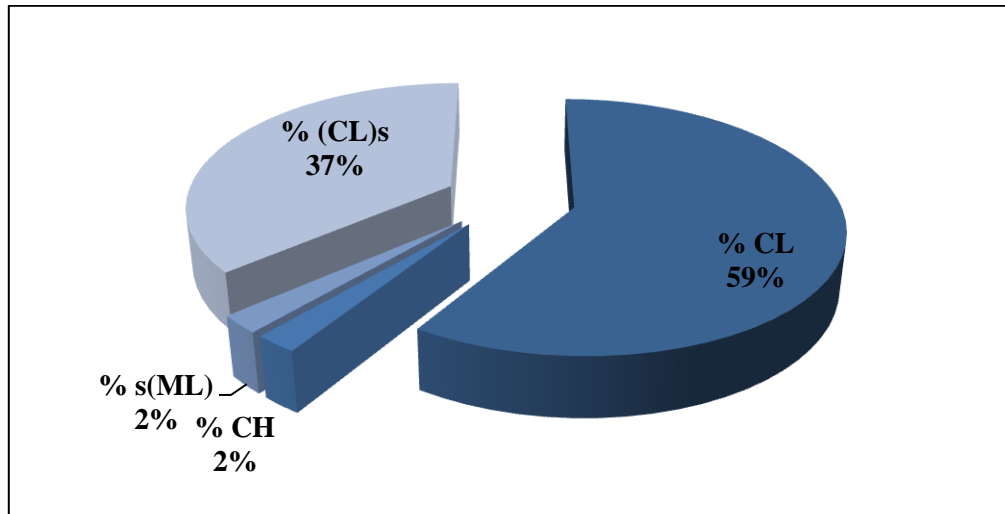


Figura N° 3.28. Litologías sub-tramo 2.

Las muestras obtenidas fueron ensayadas y clasificadas mediante el método el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) regido por la Norma ASTM mediante los resultados de los ensayos de granulométrica, hidrometría y determinación de los límites de Atterberg o de consistencia . A continuación se muestra el gráfico de Casagrande (Figura 3.29) y la tabla N° 3.9 que indica las propiedades físicas obtenidas:

| Litología | ω_{nat} (%) | P.U (Kg/cm ³) | Límite Líquido (%) | Índice de Plasticidad (%) | Gs |
|--|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|------------|
| Arcillas de baja a mediana plasticidad (CL), | 11,76±3,41 | 2,20±0,03 | 39,69±5,77 | 20,85± 5,84 | 2,65± 0,02 |
| Arcillas de alta plasticidad (CH), | 12,09±0,01 | 2,24±0,01 | 68,81±0,01 | 44,74±0,01 | 2,64 ±0,01 |
| Arcillas de baja a mediana plasticidad arenosas (s(CL), (CL)s) | 9,79±0,01 | ..... | 19,98±3,92 | 9,73±0,01 | ..... |
| Limo arenoso (s(ML)) | 7,15±,0,01 | ..... | 17,92±0,01 | ..... | 2,69±0,01 |

Tabla N° 3.7. Litología del sub-tramo 2 y sus propiedades físicas

La litología en este sector está dominada por arcillas con un 59 % con 11,76 % de humedad, seguido del grupo litológico de las arcillas arenosas con 37 %. Solo posee un 2% de arcillas de alta plasticidad con el porcentaje más alto de humedad de 12,09 % y el resto está representado por limos y arcillas arenosas.

Estos resultados se ilustran también en la carta de plasticidad que se inserta a continuación, donde claramente se observa que los suelos de grano fino son, en su mayoría, arcillas de mediana plasticidad, manteniéndose por encima de la Línea A.

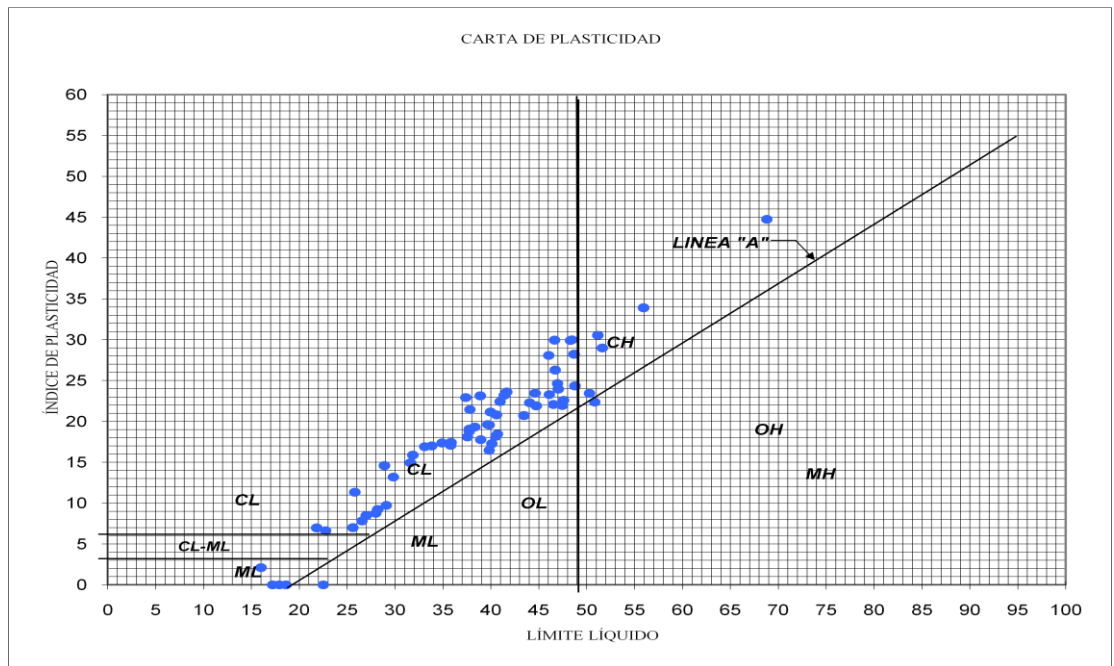


Figura N° 3.29. Carta de plasticidad de Casagrande

Con la finalidad de conocer compresión de las muestras de arcilla, se realizaron los ensayos compresión simple:

| Tipo de material | C (Kg/cm ²) | qu (Kg/cm ²) |
|---|-------------------------|--------------------------|
| Arcillas de baja a mediana plasticidad (CL) | 2,91 | 13,83 |

Tabla N° 3.8. Ensayo de compresión simple

3.4.2.1.- Potencial expansivo

Para evaluar el potencial expansivo de las arcillas presentes a lo largo de este sub-tramo, se correlacionó el porcentaje de arcilla con la actividad coloidal, como se muestra en la gráfica que se inserta a continuación:

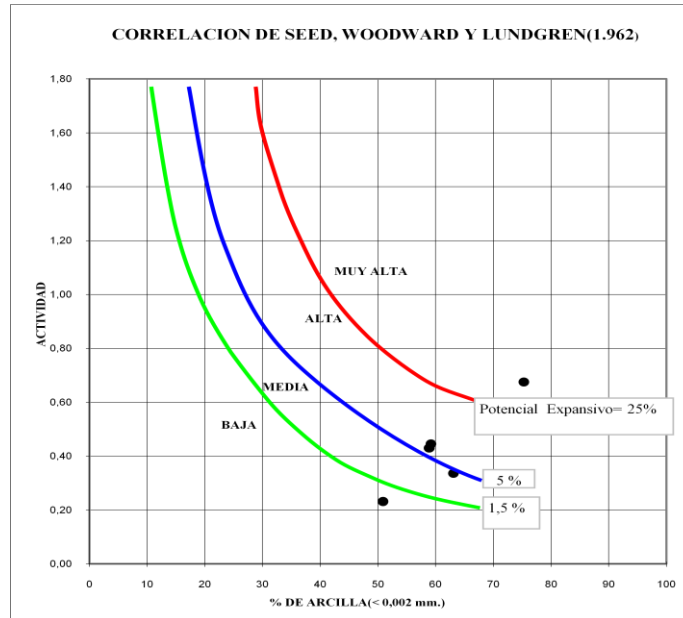


Figura N° 3.30. Correlación entre el % de arcilla y su actividad coloidal

Mediante la correlación anterior se determinó que predominan arcillas de potencial expansivo alto con un 40%, mientras que solo el 20% posee potencial expansivo muy alto y el resto de las muestras son de bajo a medio potencial expansivo.

La actividad de las arcillas se relacionó con el porcentaje de límite líquido y su índice de plasticidad, obteniendo que su actividad coloidal aumente al incrementarse ambas propiedades como se observa en las figuras N° 3.3 y 3.32:

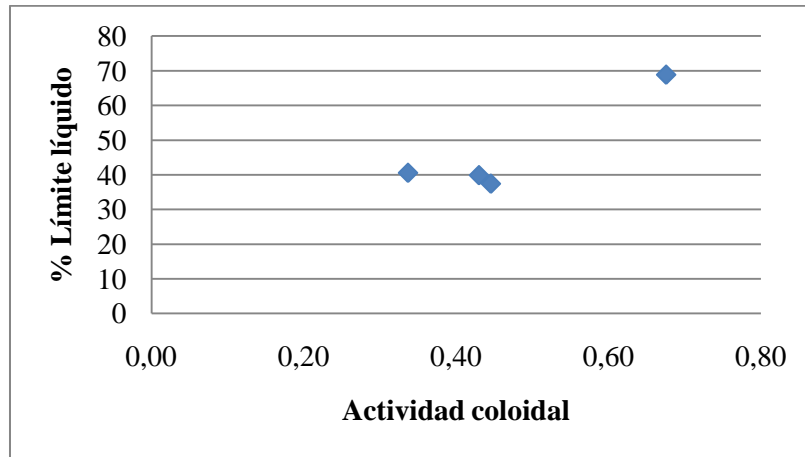


Figura N° 3.31. Relación del % LL con su actividad coloidal.

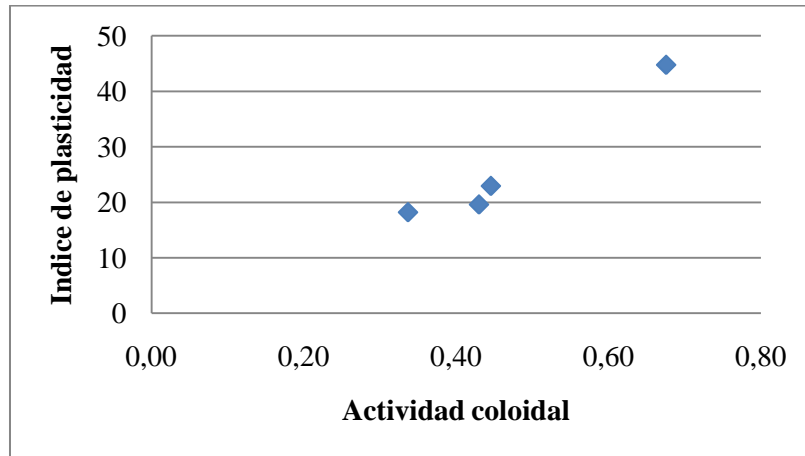


Figura N° 3.32. Relación del IP con su actividad coloidal

Se determinó el porcentaje de hinchamiento libre y se correlacionó con el límite líquido, obtenido una estimación del potencial expansivo de las muestras. Ver Figura N° 3.33.

| Muestra | % Hinchamiento Libre |
|----------------|-----------------------------|
| 322+900 | 200 |
| 325+120 | 70 |
| 326+880 | 70 |

Tabla N° 3.9. Hinchamiento libre

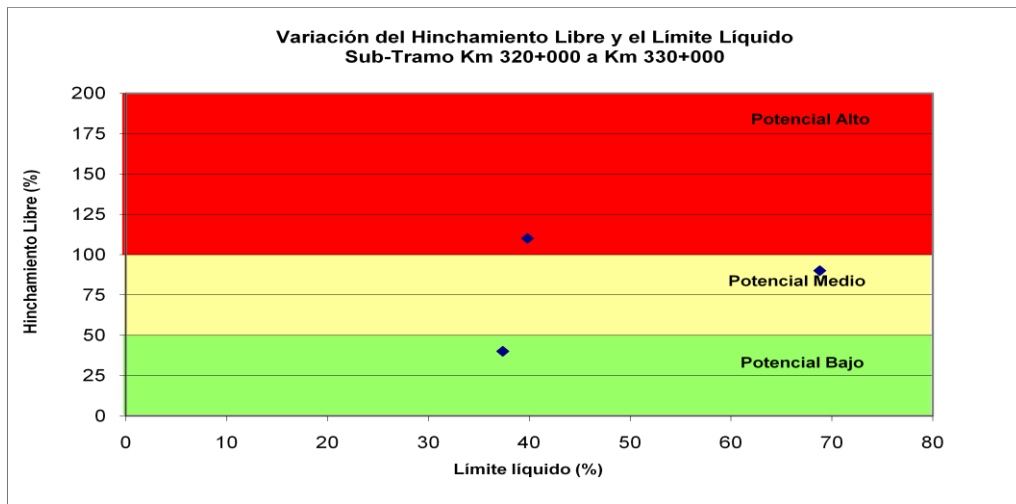


Figura N° 3.33. Variación del hinchamiento libre y el límite líquido

La ubicación de las muestras a lo largo del sub-tramo 2 se observa en la figura 3.34.

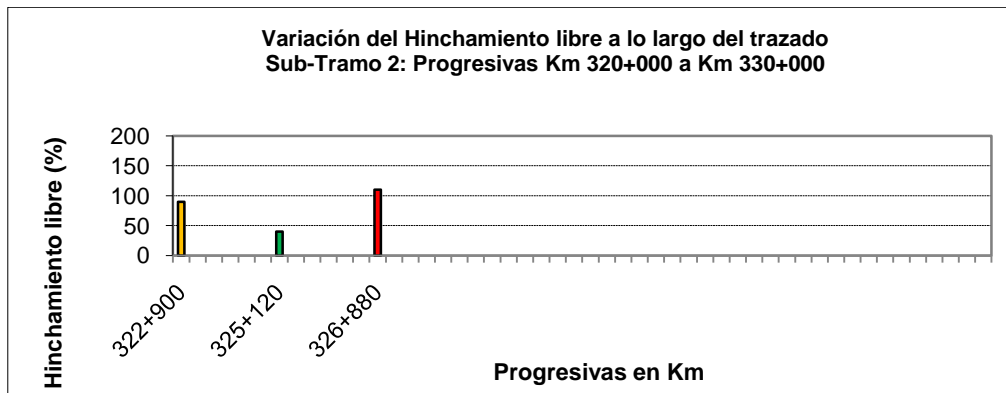


Figura 3.34. Variación del hinchamiento libre a lo largo del trazado.

A la muestra 322+900 de material arcilloso se le determinó el índice de expansión regido por la Norma ASTM 4829-95 y se obtuvo su presión de expansión como se indica en la tabla N° 3.10.

| Muestra | Índice de expansión IE _m | Índice de expansión IE ₅₀ | Presión de expansión Kg/cm ² | % Hinchamiento libre | % LL | IP |
|---------|--|---|--|----------------------|-------|-------|
| 322+900 | 143,5 | 169,8 | 3,57 | 90 | 68,81 | 44,74 |

Tabla N° 3.10. Índice expansión

3.4.3.- Sub-tramo 3: Progresivas Km 330+000 al Km 340+000

En esta área se realizaron 51 sondeos exploratorios a lo largo del eje ferroviario, con profundidades entre 10 y 35 m. La zona abarca desde El Caro de la Negra hasta Coco de Mono, con un total de 10 km de longitud y 2 km de ancho. A continuación se presenta una tabla con la ubicación de los sondeos realizados:

| Sondeo | Coordenadas | | Prof. Final (m) | Sondeo | Coordenadas | | Prof. Final (m) |
|-----------|-------------|--------|--------------------|-----------|-------------|--------|--------------------|
| | N | E | | | N | E | |
| P-330+080 | 1026031 | 206660 | 16 | P-335+150 | 1027349 | 211545 | 10 |
| P-330+300 | 1026041 | 206880 | 10 | P-335+330 | 1027401 | 211713 | 10 |
| P-330+500 | 1026059 | 207080 | 10 | P-335+476 | 1027443 | 211858 | 10 |
| P-330+725 | 1026091 | 207303 | 10 | P-335+760 | 1027511 | 212134 | 10 |
| P-330+880 | 1026103 | 207550 | 10 | P-335+980 | 1027554 | 212350 | 10 |
| P-330+980 | 1026139 | 207553 | 10 | P-336+289 | 1027611 | 212653 | 10 |
| P-331+226 | 1026199 | 207792 | 10 | P-336+403 | 1027632 | 212766 | 10 |
| P-331+400 | 1026252 | 207946 | 10 | P-336+500 | 1027413 | 211710 | 10 |
| P-331+700 | 1026333 | 208247 | 10 | P-336+702 | 1027689 | 213059 | 10 |
| P-331+926 | 1026396 | 208464 | 10 | P-337+025 | 1027764 | 213374 | 10 |
| P-332+143 | 1026457 | 208672 | 10 | P-337+216 | 1027817 | 213557 | 10 |
| P-332+320 | 1026507 | 208842 | 10 | P-337+420 | 1027879 | 213752 | 10 |
| P-332+650 | 1026600 | 209159 | 10 | P-337+660 | 1027954 | 213980 | 10 |
| P-332+750 | 1026629 | 209255 | 35 | P-337+850 | 1028013 | 214161 | 10 |
| P-332+830 | 1026651 | 209332 | 35 | P-338+020 | 1028066 | 214322 | 13 |
| P-332+910 | 1026674 | 209409 | 35 | P-338+320 | 1028160 | 214607 | 10 |
| P-332+995 | 1026698 | 209490 | 35 | P-338+380 | 1028174 | 214646 | 10 |
| P-333+260 | 1026773 | 209745 | 10 | P-338+600 | 1028248 | 214873 | 12 |
| P-333+590 | 1026866 | 210061 | 10 | P-338+735 | 1028289 | 215002 | 10 |
| P-333+705 | 1026898 | 210172 | 10 | P-338+900 | 1028339 | 215159 | 10 |
| P-333+980 | 1026980 | 210434 | 18 | P-339+160 | 1028412 | 215409 | 10 |
| P-334+200 | 1027049 | 210643 | 10 | P-339+320 | 1028458 | 215562 | 16 |
| P-334+340 | 1027094 | 210776 | 10 | P-339+600 | 1028549 | 215873 | 16 |
| P-334+613 | 1027180 | 211036 | 10 | P-339+877 | 1028627 | 216139 | 10 |
| P-334+713 | 1027211 | 211130 | 10 | P-339+985 | 1028689 | 216240 | 10 |
| P-334+900 | 1027270 | 211308 | 10 | | | | |

Tabla N° 3.11. Sondeos exploratorios realizados en el sub-tramo 3

Los porcentajes de los diferentes materiales que conforman el suelo de este sub-tramo están representados en la siguiente figura:

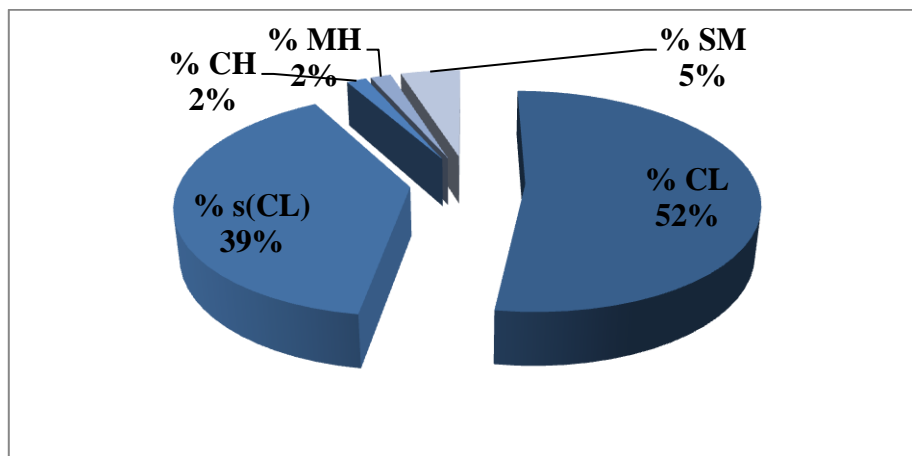


Figura N° 3.35. Litologías presentes en el sub-tramo 3.

Los materiales que predominan en este sub-tramo son de tipo arcillosos con un 52 %, arcillas con un 39 %, arenas limosas 5 % y el resto materiales de alta plasticidad entre limos y arcillas:

| Litología | ω_{nat} (%) | P.U (Kg/cm ³) | Límite Líquido (%) | Índice de Plasticidad (%) | Gs |
|--|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------|
| Arcillas de baja a mediana plasticidad (CL), | 11,54±3,17 | 2,20±0,08 | 39,84±7,98 | 20,30±6,35 | 2,64±0,02 |
| Arcillas de alta plasticidad (CH) | 10,97±0,01 | 2,19±0,01 | 50,29±0,01 | 23,43±0,01 | 2,65±0,01 |
| Limos de alta plasticidad (MH) | 10,48±0,01 | 2,14±0,01 | 50,84±0,01 | 22,37±0,01 | 2,63±0,01 |
| Arcillas de baja a mediana plasticidad arenosas (s(CL), (CL)s) | 10,60±3,25 | 2,06±0,01 | 33,22±8,27 | 15,19±6,81 | 2,68±0,01 |
| Arenas limosas (SM) | 7,07±3,71 | ..... | ..... | ..... | ..... |

Tabla N° 3.12. Litologías y sus propiedades físicas

La tabla N° 3.12 indica los promedios de las principales propiedades físicas obtenidas en las muestras de este sub-tramo.

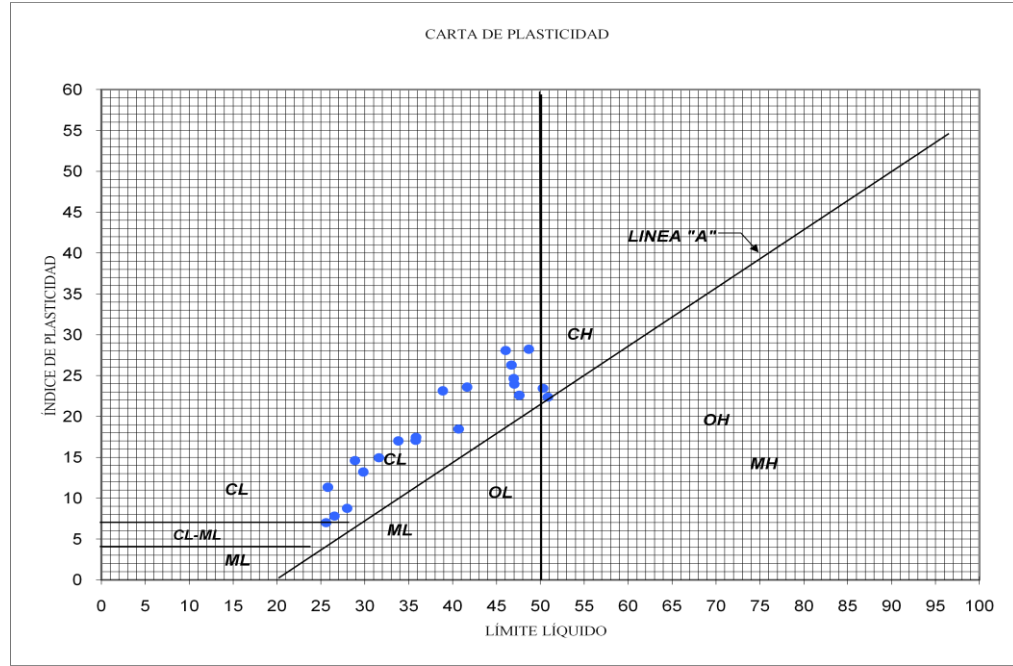


Figura N° 3.36. Carta de plasticidad de Casagrande

De acuerdo a la carta de plasticidad de Casagrande (figura 3.36), las muestras analizadas presentan un carácter plástico en su mayoría medio representando el 16 % del total ensayado y solo el 2 % de las arcillas poseen plasticidad alta.

Las muestras de arcilla se le realizaron se les determinó su resistencia a la compresión y cohesión, obteniendo en promedio el siguiente resultado:

| Tipo de material | C (Kg/cm ²) | qu (Kg/cm ²) |
|---|-------------------------|--------------------------|
| Arcillas de baja a mediana plasticidad (CL) | 3,39 | 6,26 |

Tabla N° 3.13. Ensayo de compresión

3.4.3.1.- Potencial expansivo

En relación al grado de expansión de las arcillas se correlacionó el porcentaje de arcilla y su actividad, ubicando el 50 % de las muestras como arcillas de mediano potencial expansivo, 25 % de alto y 25 % de bajo potencial expansivo.

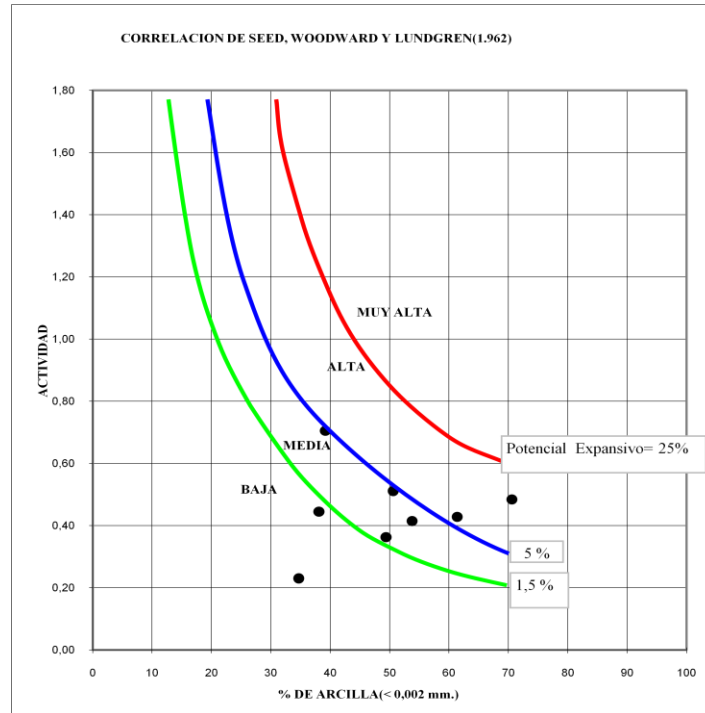


Figura N° 3.37. Correlación entre el % de arcilla y su actividad coloidal.

Su actividad coloidal se relacionó con el límite líquido y el índice de plasticidad, donde se observa que el aumento de estas propiedades genera el incremento de la actividad de las arcillas. Ver figura N° 3.38 y 3.39.

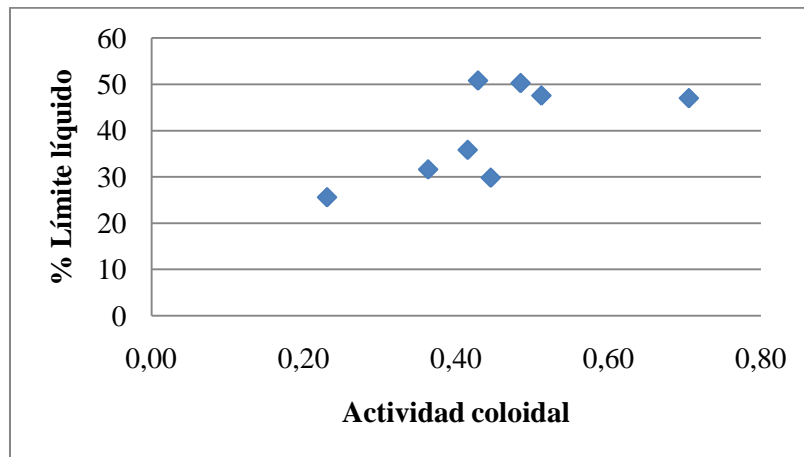


Figura N° 3.38. Relación del % LL con la actividad coloidal

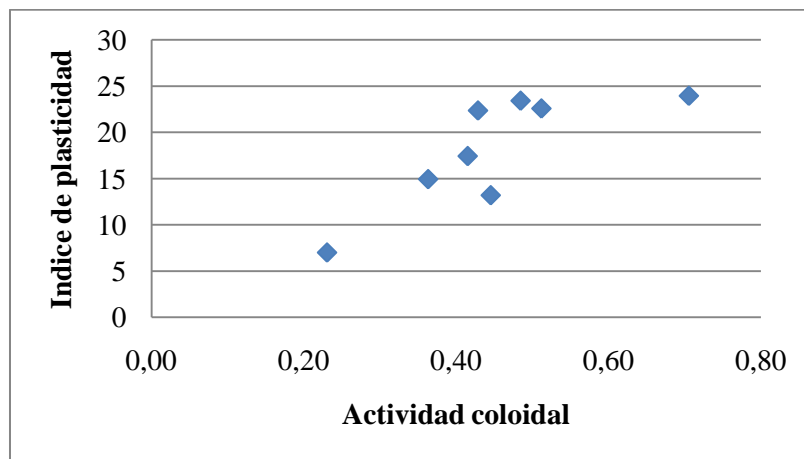


Figura N° 3.39. Relación del IP con la actividad coloidal

Se les realizó el ensayo de hinchamiento libre a las muestras de arcillas y se comparó el resultado con porcentaje del límite líquido para estimar su potencial expansivo, como se observa en la figura N° 3.40.

| Muestras | % Hinchamiento Libre |
|----------|----------------------|
| 330+880 | 10 |
| 331+400 | 30 |
| 335+330 | 25 |
| 336+500 | 80 |
| 338+380 | 50 |

Tabla N° 3.14. Hinchamientos libres

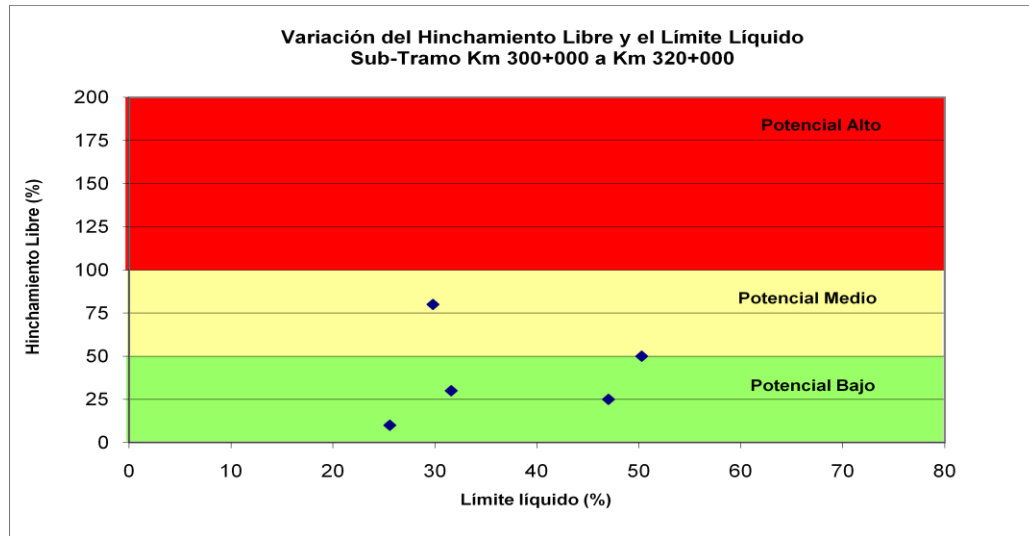


Figura N° 3.40. Variación del hinchamiento libre y el límite líquido

En la figura N° 3.41 se muestra la ubicación de las muestras de arcillas con su variación de hinchamiento, teniendo al inicio del tramo arcillas de bajo hinchamiento e incrementándose al final.

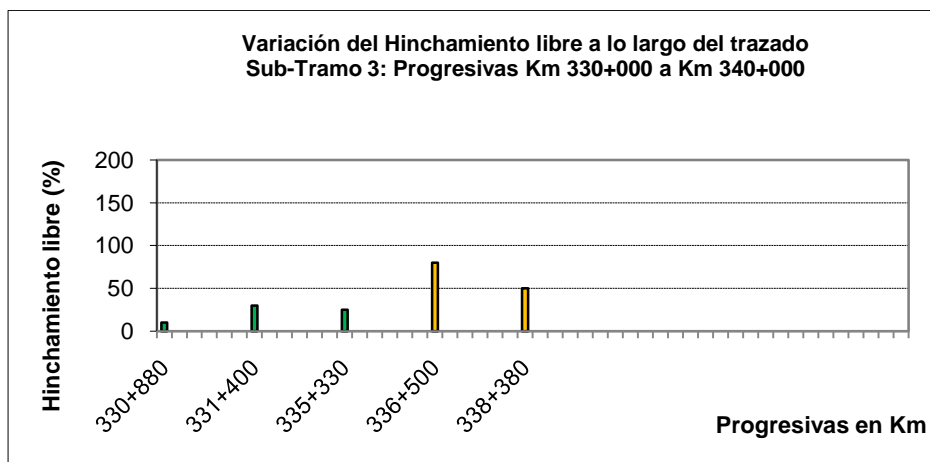


Figura N° 3.41. Variación del hinchamiento libre a lo largo del sub-tramo 3

3.4.4.- Sub-tramo 4: Progresivas Km 340+000 al Km 350+000

Este sub-tramo inicia en el sector Coco de Mono hasta Los Caballos, se realizaron 46 sondeos exploratorios con profundidades entre 10 y 15 m lo que ayuda a la descripción del suelo y subsuelo del área. La ubicación espacial de los sondeos realizados se muestra a continuación:

| Sondeo | Coordenadas | | Prof. Final (m) | Sondeo | Coordenadas | | Prof. Final (m) |
|-----------|-------------|--------|--------------------|-----------|-------------|--------|-----------------------|
| | N | E | | | N | E | |
| P-340+060 | 1028580 | 216300 | 10 | P-345+260 | 1030180 | 221303 | 10 |
| P-340+320 | 1028783 | 216562 | 10 | P-345+385 | 1030215 | 221423 | 10 |
| P-340+530 | 1028843 | 216763 | 10 | P-345+740 | 1030316 | 221764 | 15 |
| P-340+790 | 1028916 | 217013 | 10 | P-346+000 | 1030389 | 222013 | 10 |
| P-341+120 | 1029009 | 217330 | 10 | P-346+090 | 1030415 | 222100 | 10 |
| P-341+421 | 1029095 | 217619 | 10 | P-346+330 | 1030482 | 222330 | 10 |
| P-341+600 | 1029145 | 217790 | 10 | P-346+600 | 1030559 | 222589 | 10 |
| P-341+756 | 1029189 | 217940 | 10 | P-346+775 | 1030608 | 222757 | 10 |
| P-341+988 | 1029255 | 218163 | 10 | P-347+175 | 1030721 | 223141 | 10 |
| P-342+240 | 1029326 | 218405 | 10 | P-347+500 | 1030811 | 223454 | 10 |
| P-342+370 | 1029363 | 218529 | 10 | P-347+670 | 1030852 | 223619 | 10 |
| P-342+620 | 1029434 | 218769 | 10 | P-347+880 | 1030897 | 223824 | 10 |
| P-342+700 | 1029380 | 218850 | 10 | P-348+055 | 1030928 | 223996 | 10 |
| P-342+800 | 1029484 | 218942 | 10 | P-348+325 | 1030967 | 224263 | 10 |
| P-343+220 | 1029603 | 219345 | 10 | P-348+552 | 1030880 | 224450 | 10 |
| P-343+380 | 1029648 | 219499 | 10 | P-348+560 | 1030991 | 224497 | 10 |
| P-343+400 | 1029607 | 219494 | 10 | P-348+760 | 1031005 | 224697 | 12 |
| P-343+640 | 1029722 | 219748 | 10 | P-349+000 | 1031012 | 224937 | 10 |
| P-344+060 | 1029841 | 220151 | 10 | P-349+170 | 1031011 | 225107 | 10 |
| P-344+245 | 1029893 | 220329 | 10 | P-349+440 | 1031000 | 225377 | 10 |
| P-344+450 | 1029951 | 220526 | 10 | P-349+580 | 1030989 | 225517 | 10 |
| P-344+785 | 1030046 | 220847 | 10 | P-349+800 | 1030967 | 225736 | 10 |
| P-345+000 | 1030106 | 221054 | 10 | P-349+860 | 1030959 | 225797 | 10 |

Tabla N° 3.15. Sondeos exploratorios realizados a lo largo del sub-tramo 4

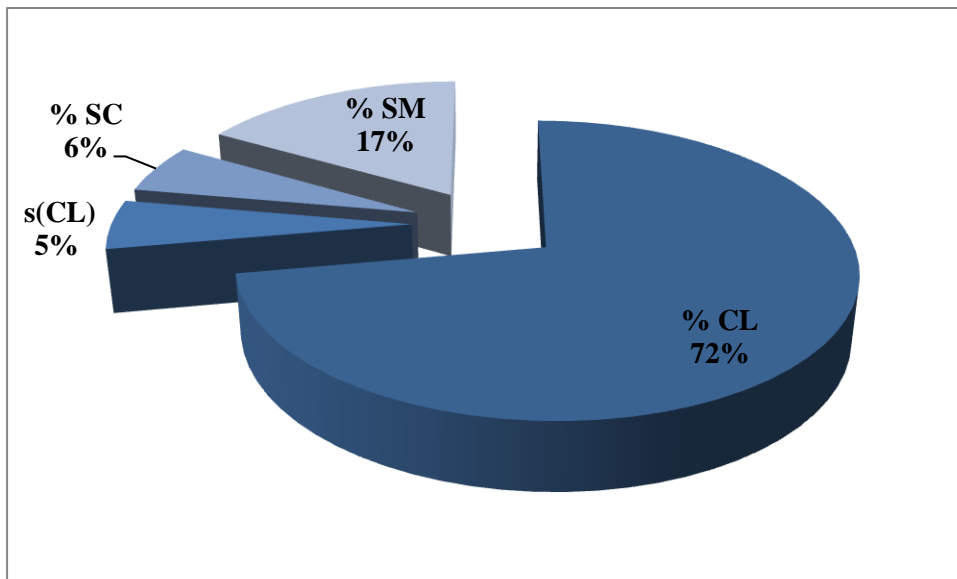


Figura N° 3.42. Litologías a lo largo del sub-tramo 4

El material más abundante en este tramo son las arcillas con 72 %, seguido de las arenas limosas y arcillosas con 17 % y 6 % respectivamente, como se indica en la figura N° 3.42.

Las muestras de los materiales obtenidos de la zona fueron analizarlos y ensayados con el fin de obtener sus propiedades físicas y caracterizarlos geotécnicamente.

| Litología | ω_{nat} (%) | P.U (Kg/cm ³) | Límite Líquido (%) | Índice de Plasticidad (%) | Gs |
|--|--------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|-----------|
| Arcillas de baja a mediana plasticidad (CL), | 8,79±3,92 | 1,22±0,08 | 23,19±6,56 | 10,69±4,93 | 1,32±0,03 |
| Arenas limosas (SM) | 4,39±0,94 | ..... | ..... | ..... | 2,61±0,01 |
| Arenas arcillosa (SC) | 7,53±0,01 | ..... | ..... | ..... | ..... |

Tabla N° 3.16. Litologías y sus propiedades físicas

Las arcillas de este tramo poseen plasticidad de baja a media con un promedio de índice de plasticidad de 10.69 % y límite líquido de 23.19 %.

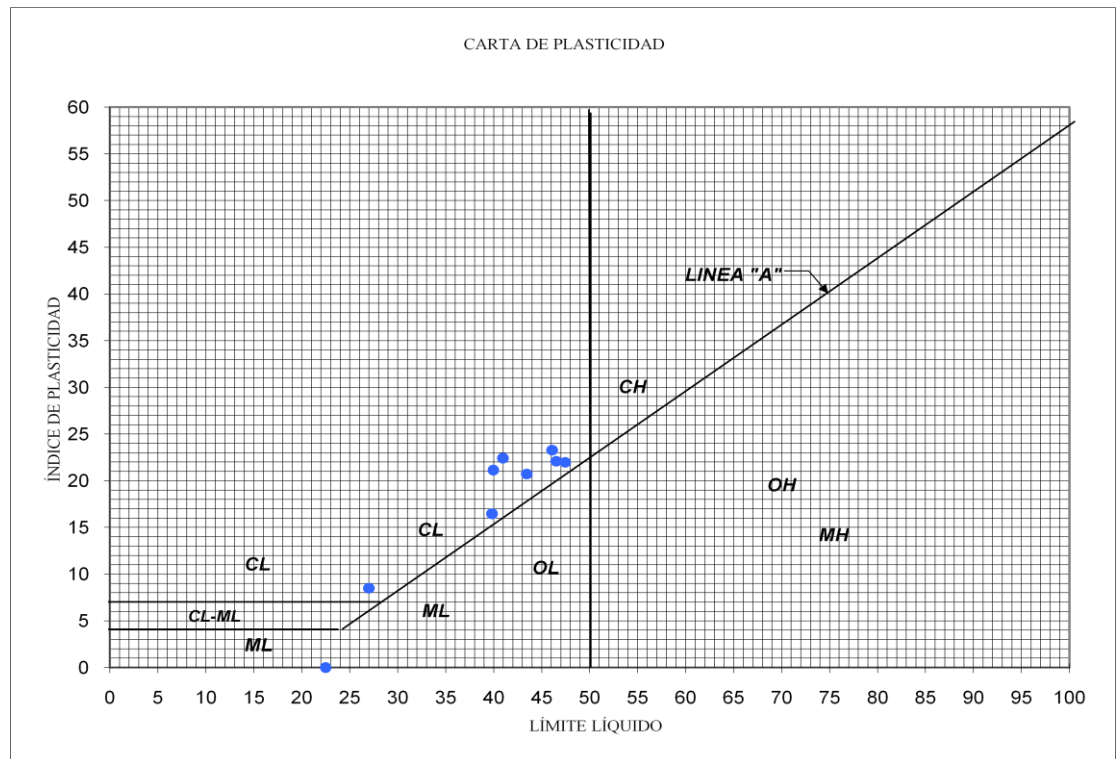


Figura N° 3.43. Carta de plasticidad de Casagrande

3.4.4.1.- Potencial expansivo

La capacidad de expansión de las arcillas se determinó mediante ensayos de expansión libre y controlada e hinchamiento libre, relacionándolas con sus propiedades índice, el contenido de partículas menor a 0,02 mm y su actividad. Dichas comparaciones arrojaron los siguientes resultados:

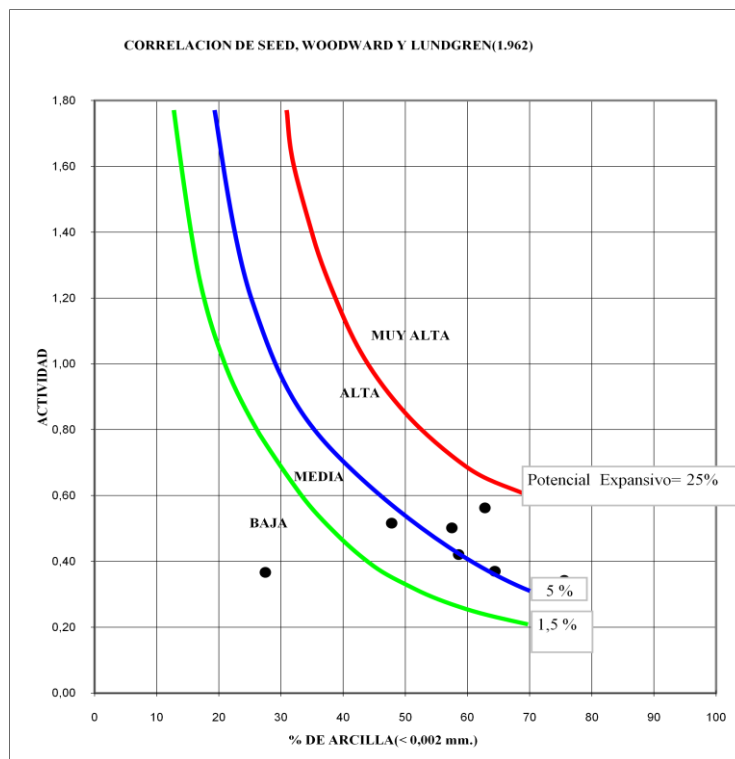


Figura N° 3.44. Correlación entre el % de arcilla y su actividad coloidal

Las arcillas de este sub-tramo 4 poseen un potencial expansivo alto del 57,14 % del total de las muestras ensayadas y el resto potencial expansivo de bajo a medio.

La relación entre la actividad y sus propiedades físicas se observa en las figuras N° 3.45 y 3.46, donde se aprecia que la actividad coloidal aumenta con el % de límite líquido y el índice de plasticidad.

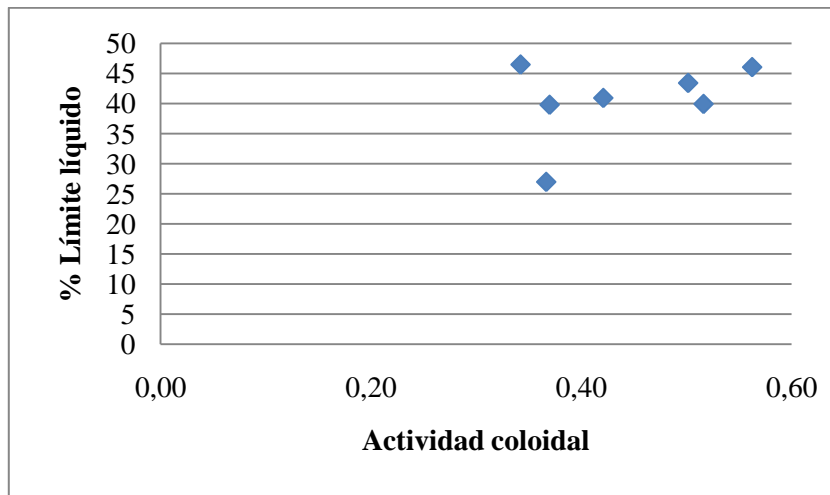


Figura N° 3.45. Relación del % LL con la actividad coloidal

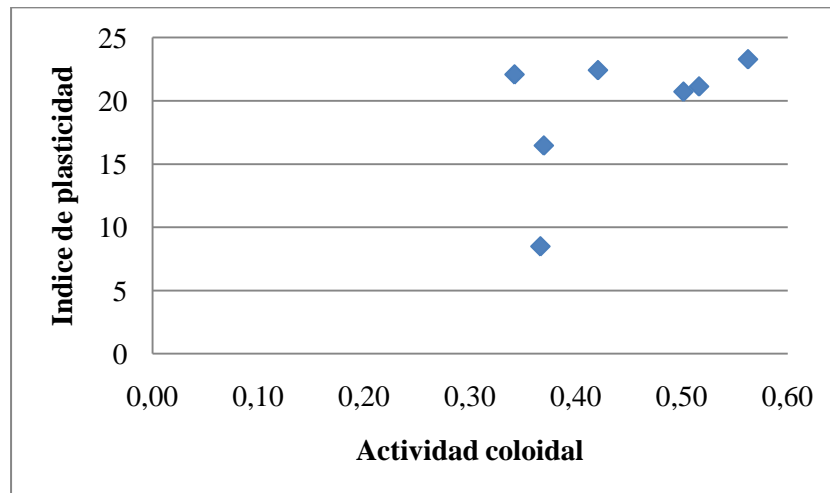


Figura N° 3.46. Relación del IP con la actividad coloidal

El ensayo de hinchamiento libre también nos ayuda a estimar el potencial expansivo de las arcillas como se observa en la Figura N° 3.47.

| Muestra | % Hinchamiento Libre |
|---------|----------------------|
| 340+060 | 60 |
| 342+700 | 150 |
| 343+400 | 50 |
| 349+860 | 50 |

Tabla N° 3.17. Hinchamientos libre

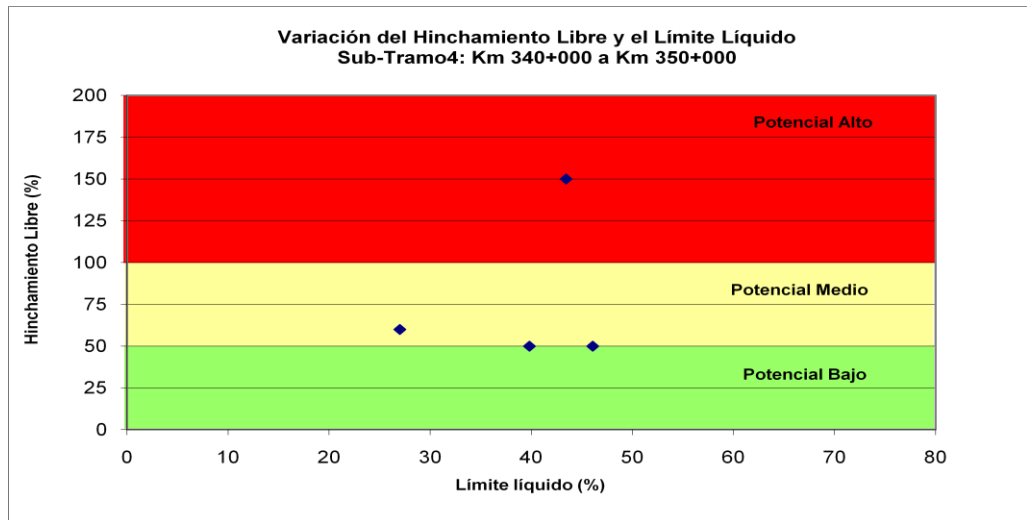


Figura N° 3.47. Variación del hinchamiento y el límite líquido

Mediante la ubicación de las muestras en el área de estudio (Figura N° 3.48), se puede apreciar que las arcillas que experimentan mayor hinchamiento se ubican a los 2 Km del sub-tramo.

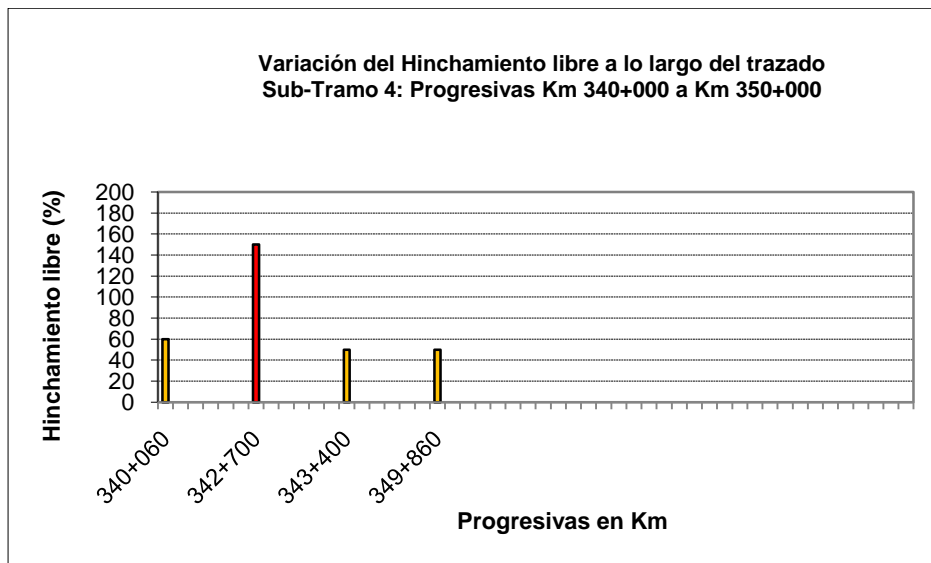


Figura N° 3.48. Variación del hinchamiento a lo largo del sub-tramo 4

Adicionalmente se obtuvo el potencial expansivo de las arcillas mediante el ensayo de expansión controlada regido bajo la Norma ASTM 4829-95 y se determinó su presión de expansión como se indica en la tabla N° 3.18. Al comparar dicho resultado con el obtenido en el ensayo del hinchamiento libre se obtuvo en ambos casos un potencial expansivo medio.

| Muestra | Índice de expansión IE_m | Índice de expansión IE_{50} | Presión de expansión Kg/cm^2 | % Hinchamiento libre |
|---------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| 340+060 | 77,5 | 82 | 2,55 | 60 |
| 349+860 | 87,55 | 138,5 | 2,29 | 50 |

Tabla N° 3.18. Presión de expansión

3.4.5.- Sub-tramo 5: Progresivas Km 350+000 al Km 360+000

El sub-tramo abarca desde el sector Los Caballos hasta el poblado de Tacalito, cubriendo un área de 20 Km^2 . Para el estudio de suelo y subsuelo se realizaron 40 sondeos exploratorios con 10 y 15 m de profundidad.

| Sondeo | Coordenadas | | Prof. Final (m) | Sondeo | Coordenadas | | Prof. Final (m) |
|-----------|-------------|--------|--------------------|-----------|-------------|--------|--------------------|
| | N | E | | | N | E | |
| P-350+100 | 1030937 | 226034 | 10 | P-354+900 | 1031735 | 230711 | 15 |
| P-350+468 | 1030899 | 226400 | 10 | P-355+228 | 1031882 | 231004 | 10 |
| P-350+810 | 1030867 | 226741 | 10 | P-355+500 | 1032025 | 231235 | 10 |
| P-350+960 | 1030858 | 226891 | 15 | P-3559735 | 1032162 | 231427 | 10 |
| P-351+270 | 1030855 | 227201 | 10 | P-3569065 | 1032362 | 231689 | 10 |
| P-351+535 | 1030868 | 227466 | 10 | P-356+200 | 1032444 | 231796 | 10 |
| P-351+900 | 1030909 | 227829 | 15 | P-356+433 | 1032586 | 231981 | 10 |
| P-352+132 | 1030948 | 228057 | 10 | P-356+720 | 1032760 | 232209 | 10 |
| P-352+317 | 1030987 | 228238 | 10 | P-357+130 | 1033018 | 232545 | 10 |
| P-352+460 | 1031022 | 228377 | 10 | P-357+140 | 1033016 | 232543 | 10 |
| P-352+560 | 1031064 | 228484 | 10 | P-357+262 | 1033090 | 232640 | 10 |
| P-352+875 | 1031137 | 228776 | 10 | P-357+600 | 1033295 | 232908 | 10 |
| P-353+150 | 1031214 | 229040 | 10 | P-357+860 | 1033451 | 233117 | 10 |
| P-353+380 | 1031278 | 229262 | 10 | P-358+175 | 1033631 | 233376 | 10 |
| P-353+488 | 1031309 | 229365 | 10 | P-358+574 | 1033844 | 233713 | 10 |
| P-353+700 | 1031368 | 229568 | 10 | P-358+920 | 1034014 | 234014 | 10 |
| P-354+000 | 1031452 | 229857 | 10 | P-359+076 | 1034089 | 234151 | 10 |
| P-354+300 | 1031536 | 230145 | 10 | P-359+400 | 1034245 | 234436 | 10 |
| P-354+500 | 1031593 | 230337 | 10 | P-359+660 | 1034379 | 234665 | 10 |
| P-354+680 | 1031652 | 230507 | 10 | P-359+785 | 1034430 | 234774 | 10 |

Tabla N° 3.19. Sondeos exploratorios realizados en el sub-tramo 5

En la siguiente figura se aprecia los porcentajes de los grupos litológicos presentes en esta área.

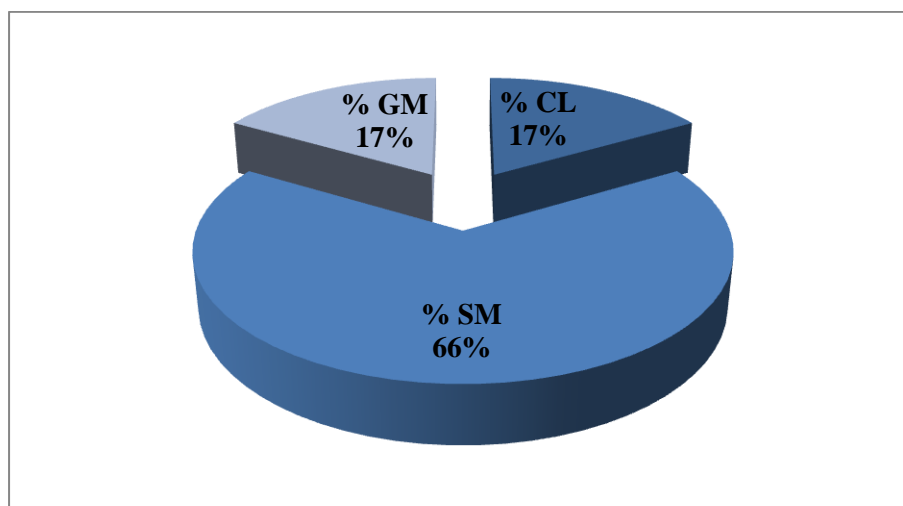


Figura N° 3.49. Litologías del sub-tramo 5

De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, fue posible elaborar una tabla resumen que permite clasificar los diferentes tipos de suelos en función de sus propiedades físicas.

| Litología | ω_{nat} (%) | P.U (Kg/cm ³) | Límite Líquido (%) | Índice de Plasticidad (%) | Gs |
|--|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------|
| Arcillas de baja a mediana plasticidad (CL), | 9,62±0,01 | 2,22±0,01 | 37,74±0,01 | 19,06±0,01 | 2,66±0,01 |
| Arenas limosas (SM) | 4,66±1,15 | 2,12±0,11 | 17,00±2,00 | 2,10±0,01 | ..... |
| Grava limosa (GM) | 3,09±0,01 | ..... | ..... | ..... | ..... |

Tabla N°3.20. Litologías y sus propiedades físicas

Según la tabla anterior, se deduce que en el área de estudio existen tres tipos litológicos producto de la sedimentación de suelos aluviales y/o la descomposición in situ de arcillitas y areniscas.

Los resultados indican que las arenas limosas (SM) representan el litotipo más abundante con 66 % de las muestras caracterizadas en este sub-tramo con porcentajes de humedad bajos. Las arcillas (CL) son predominantemente de mediana plasticidad, representando aproximadamente el 17 % del universo muestral. El resto de las muestras está compuesto por gravas limosas que se caracterizan por poseer bajos contenidos de humedad debido a su carácter permeable y a la naturaleza redondeada a sub-redondeada de las partículas que los conforman.

En la carta de plasticidad que se inserta a continuación, se muestra la distribución de los suelos de grano fino.

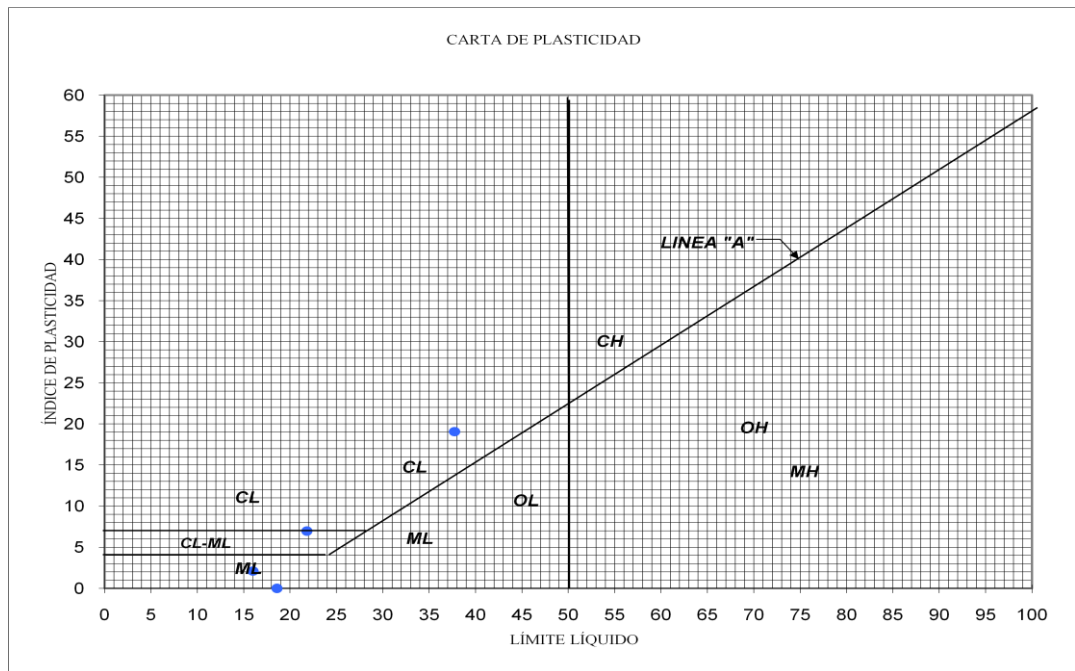


Figura N° 3.50. Carta de plasticidad de Casagrande

Se observa en la figura 3.50 que el contenido de fino en las muestras del sub-tramo posee en su mayoría plasticidad media y las arenas y areniscas limosas (SM) se caracterizan por poseer porciones finas con plasticidad baja.

Los ensayos especiales realizados en muestras provenientes de este sub-tramo, arrojaron los siguientes valores:

| Tipo de material | C (Kg/cm ²) | qu (Kg/cm ²) |
|---|-------------------------|--------------------------|
| Arcillas de baja a mediana plasticidad (CL) | 5,33 | 10,66 |

Tabla N° 3.21. Ensayos de compresión

3.4.5.1.- Potencial expansivo:

Para evaluar el potencial expansivo de las arcillas presentes a lo largo de este sub-tramo de la vía férrea, se correlacionó el % de arcilla con la actividad coloidal, como se muestra en la gráfica que se inserta a continuación:

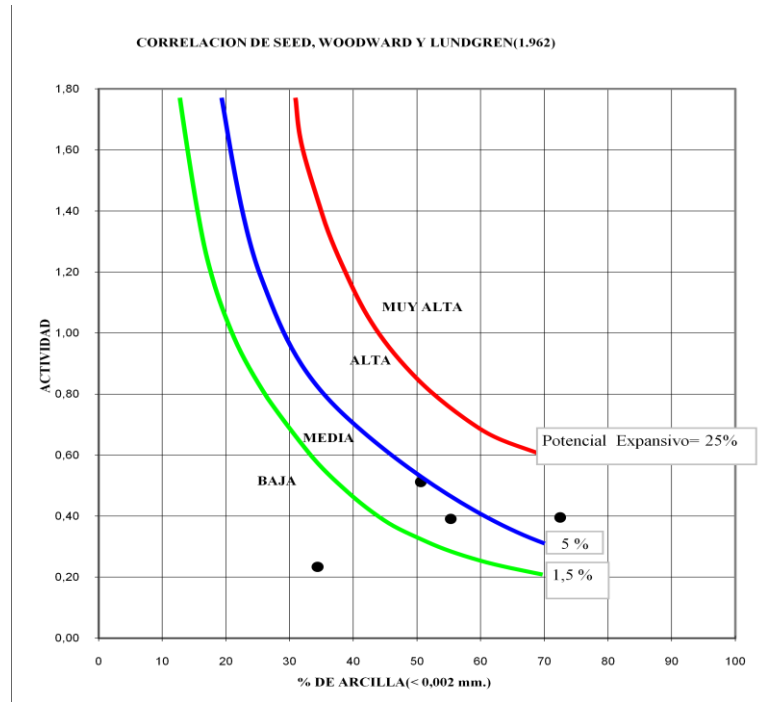


Figura N° 3.51. Correlación entre el % de arcilla y su actividad coloidal.

Del total de las muestras ensayadas el 50 % corresponde a arcillas y con potencial expansivo Medio, 25% resultó con potencial expansivo Alto y el resto Bajo.

Los ensayos de hinchamiento libre también permitieron estimar su potencial expansivo (Tabla N° 3.22), y su relación sus límites de consistencia. Respecto a los valores de hinchamiento libre obtenidos en las muestras ensayadas, se elaboró la gráfica N° 3.58.

| Muestra | % Hinchamiento libre |
|---------|----------------------|
| 352+560 | 50 |
| 357+130 | 50 |

Tabla N° 3.22. Hinchamientos libres

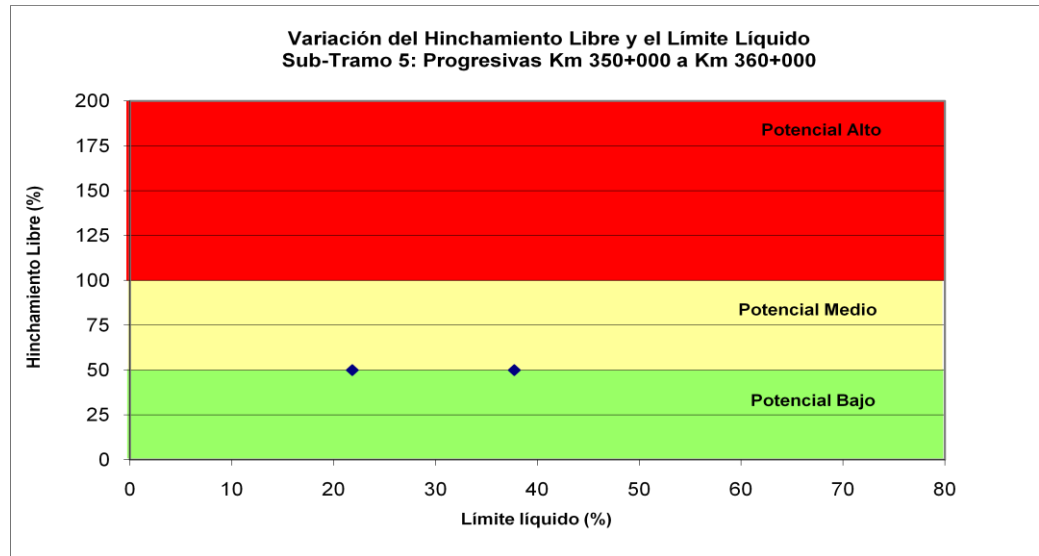


Figura N° 3.52. Relación entre el límite líquido y el hinchamiento libre

En referencia al hinchamiento libre de las muestras, en su totalidad poseen potencial expansivo medio. Mediante la figura N° 3.53 podemos ubicar dichas muestras a lo largo del sub-tramo.

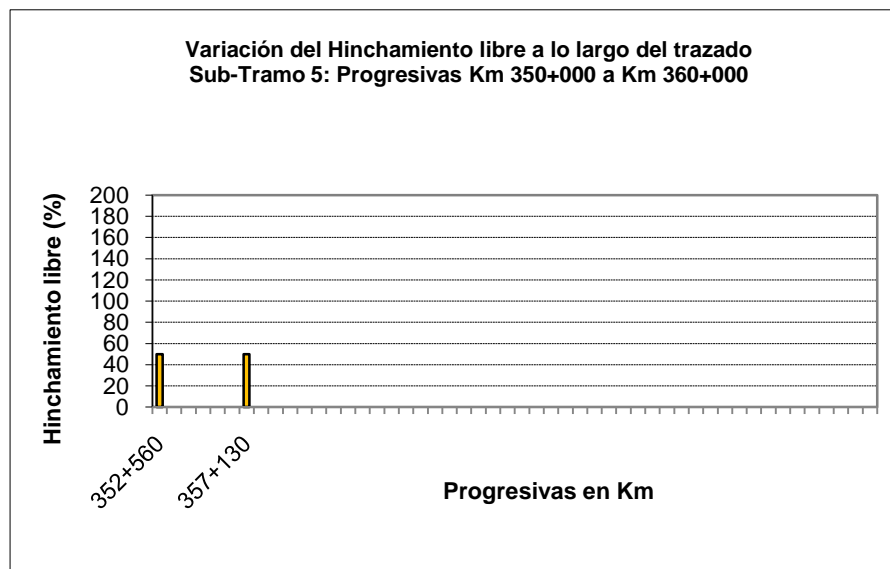


Figura N° 3.53. Variación del hinchamiento libre a lo largo del sub-tramo 5

3.5.- Correlación entre la expansión de los suelos con sus propiedades físicas.

Las muestras de suelos obtenidas a lo largo del área de estudio, se les realizó ensayos de expansión controlada regido por la norma ASTM 4829-95. Los resultados de índice de expansión y presión de expansión obtenidos se relacionaron con sus límites líquidos, su índice de plasticidad y % de humedad natural con la finalidad de determinar su influencia en el potencial de expansión de las arcillas. Figuras N° 3.54, 3,55 y 3,56.

| Muestra | Índice de expansión IE_m | Índice de expansión IE_{50} | Presión de expansión Kg/cm^2 | Potencial de expansión | % LL | IP | % W |
|---------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------|-------|-------|-------|
| 312+200 | 121,8 | 104,2 | 2,8 | Alto | 44,47 | 21,91 | 11,08 |
| 313+800 | 121,15 | 135,6 | 2,55 | Muy alto | 48,77 | 24,35 | 12,49 |
| 318+520 | 154,25 | 238,6 | 2,8 | Muy alto | 51,16 | 30,54 | 12,86 |
| 322+900 | 143,5 | 169,8 | 3,57 | Muy alto | 68,81 | 44,74 | 12,29 |
| 340+060 | 77,5 | 82 | 2,55 | Medio | 26,99 | 8,49 | 1,21 |
| 349+860 | 87,55 | 138,5 | 2,29 | Muy alto | 39,82 | 16,46 | 10,83 |

Tabla N°23. Índices de expansión y propiedades físicas

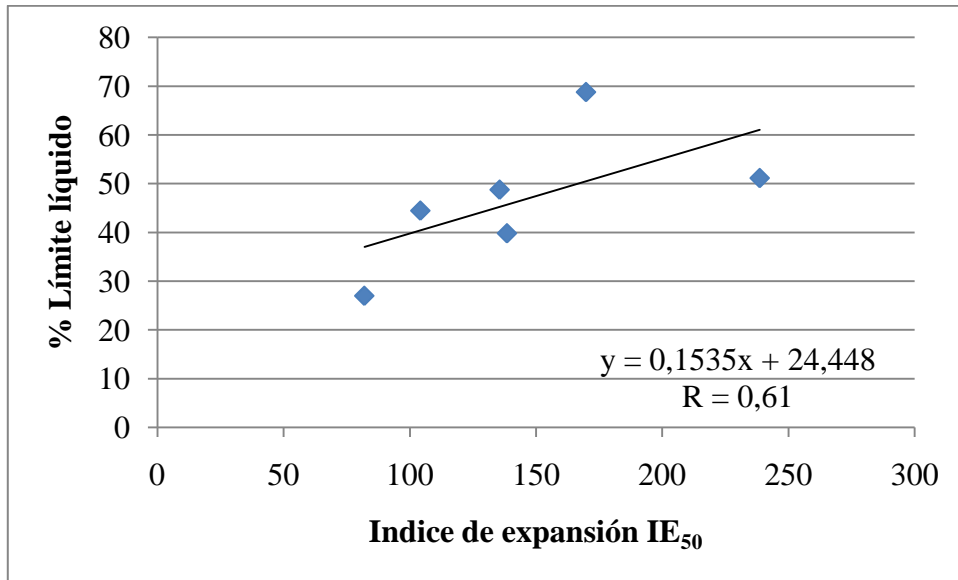


Figura N° 3.54. Relación % LL vs IE₅₀

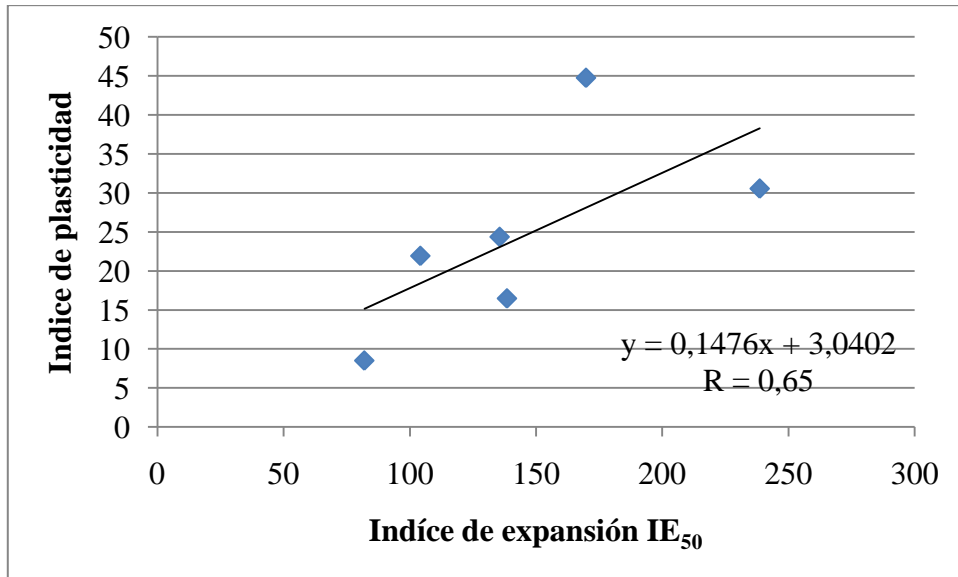


Figura N° 3.55. Relación Ip vs IE₅₀

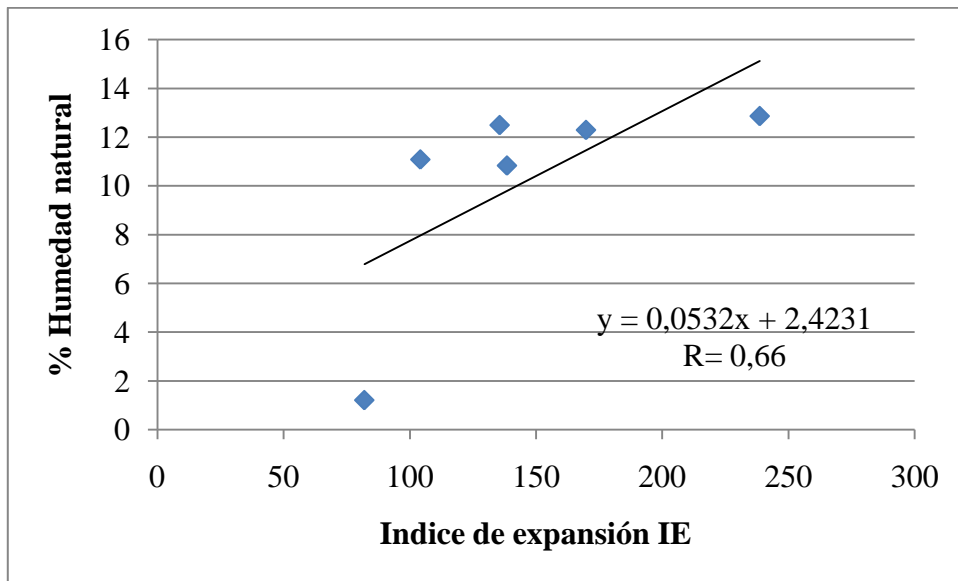


Figura N° 3.56. Relación % Humedad natural vs IE_{50}

Observando los coeficientes de correlación (R), obtenidos de las relaciones bidimensionales expuestas en los gráficos anteriores, se puede determinar que existe una correlación lineal directa pero no fuerte entre los índice de expansión de los suelos y sus propiedades físicas, donde los valores del índice de expansión tiende a aumentar al incrementarse su porcentaje de límite líquido, humedad natural e índice de plasticidad.

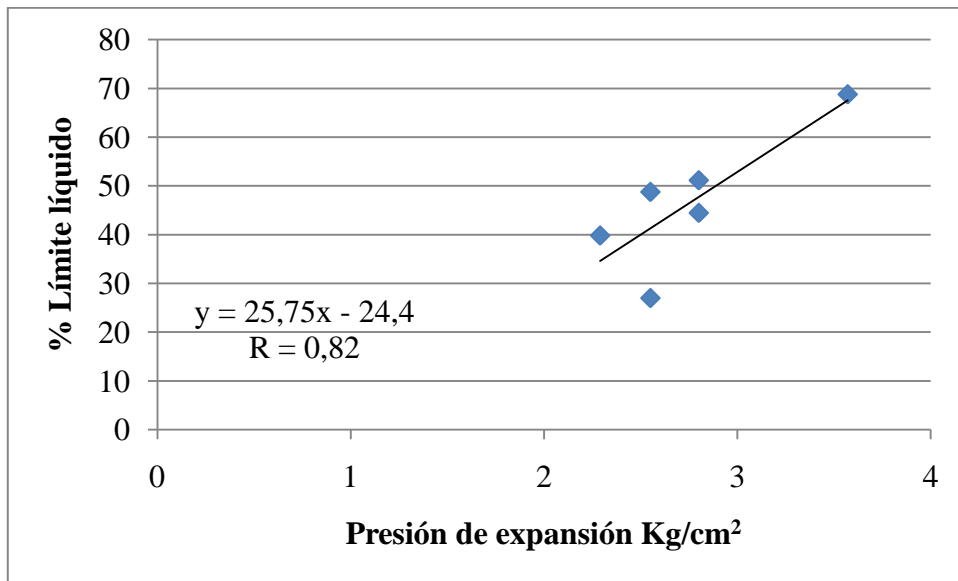


Figura N° 3.57. Relación % LL vs Presión de expansión.

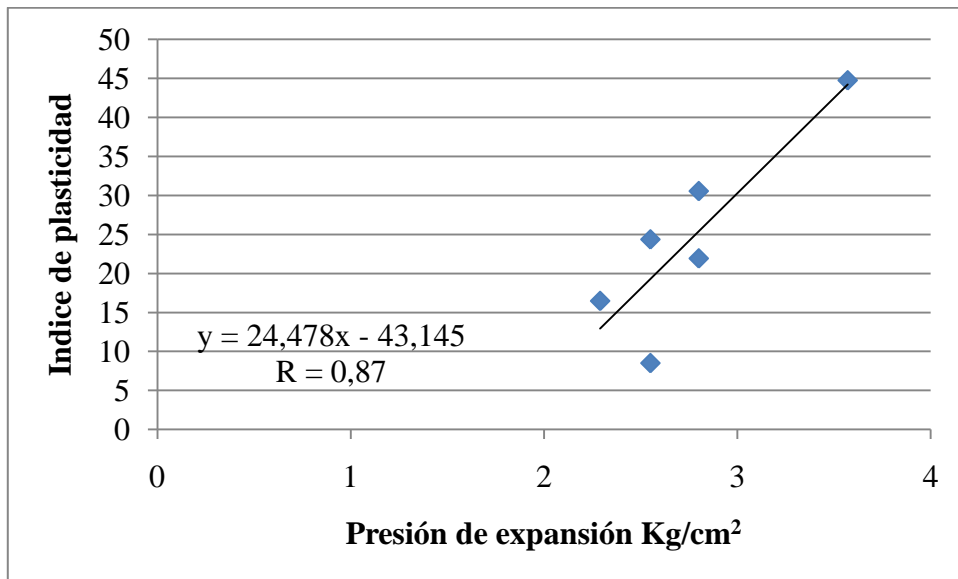


Figura N° 3.58. Relación Ip vs Presión de expansión

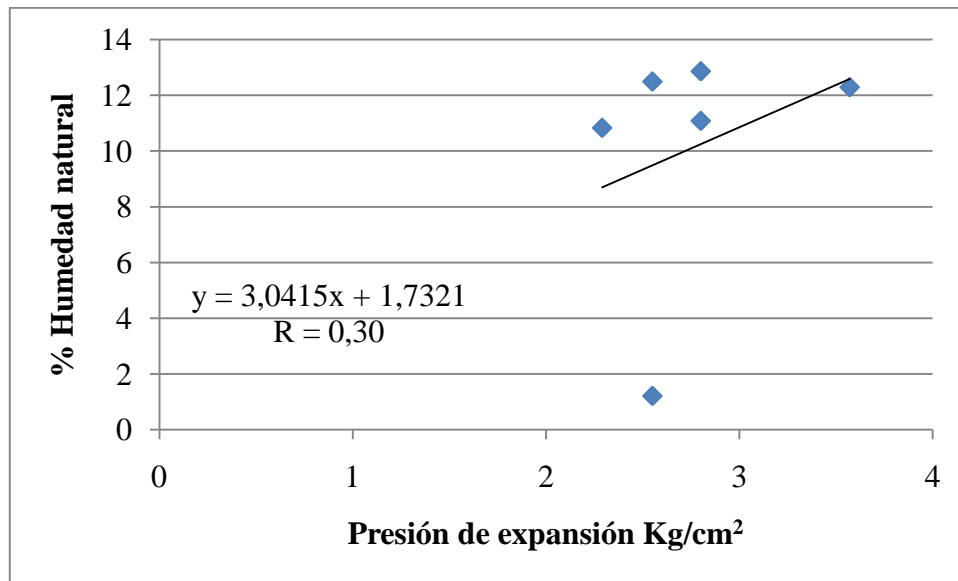


Figura N°3.59. Relación % Humedad natural vs presión de expansión

Los resultados obtenidos en los gráficos N° 3.57, 3.58 y 3.59, correlacionan de manera lineal directa y fuerte los valores de presión de expansión con sus porcentajes de límite líquido e índice de expansión, en cambio la relación es débil con la humedad natural, indicando que la presión de expansión aumenta al incrementarse sus índices de plasticidad y límite líquido, en cambio su humedad natural no sigue la misma tendencia.

3.6.- Análisis mineralógico mediante el ensayo de difracción de rayos X.

Las muestras de arcilita obtenidas en el área de estudio fueron ensayadas con el método de difracción de rayos X, con el fin de determinar el contenido mineralógico de las mismas. En la siguiente tabla se presenta el porcentaje de las fracciones de arcilla, arena y limo de cada muestra con su respectivo porcentaje de humedad natural.

| Porcentaje (p/p) | | | | |
|------------------|-------|------|---------|-----------|
| Muestras | Arena | Limo | Arcilla | % Humedad |
| P 317 + 460 | 13,4 | 17,5 | 69,1 | 3,4 |
| P 326 + 880 | 10 | 21,8 | 68,2 | 5,0 |
| P 338 + 380 | 0,1 | 44,1 | 55,8 | 2,5 |
| P 352 + 560 | 20,8 | 38,7 | 40,5 | 2,2 |

Tabla N° 3.24. Fracción de arcilla contenido en las muestras

3.6.1.- Mineralogía sub-tramo 1

En el sub-tramo 1 se tomó una muestra de arcilita en la progresiva Km 317+460, obtenida del núcleo del sondeo exploratorio realizado en dicha progresiva. La muestra fue extraída a una profundidad de 6 m y descrita visualmente como un arcilita de color gris con manchas naranja y moradas.

| Arena | Limos | Arcillas |
|--|-------------------------------|--------------------------|
| Yeso | Cuarzo | Montmorillonita (Na, Ca) |
| Cuarzo | Albita | Illita (K) |
| Albita | Trazas de Caolinita e Illita. | Caolinita |
| Caolinita | | Cuarzo tamaño arcilla |
| Arcillas de espesor basal de $\sim 14 \text{ \AA}$ | | |

Tabla N° 3.25. Mineralogía de la muestra 317+460

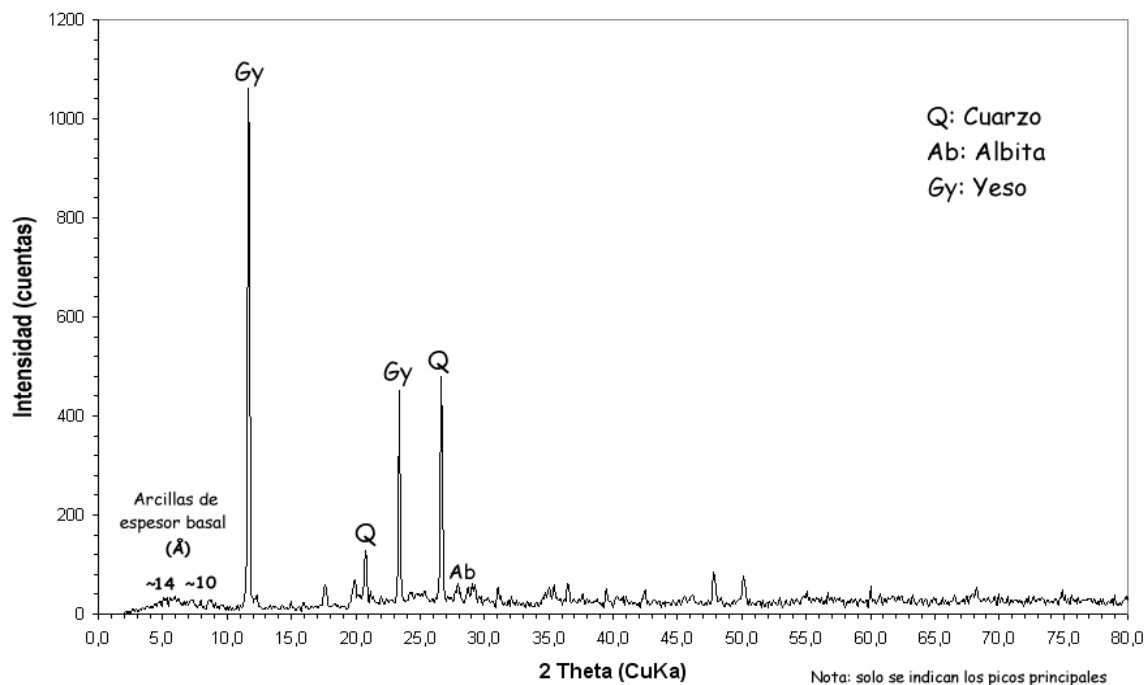


Figura N° 3.60. Ensayo de difracción de rayos X. Muestra 317+460

En la tabla N° 3.16 y figura N° 3.60, se observan los minerales encontrados en cada fracción de granos. En esta muestra el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es el mineral que se encuentra en mayor proporción en la fracción tamaño arena, seguido de cuarzo, albita, caolinita y arcillas de espesor basal de $\sim 14 \text{ \AA}$. La fracción de limo contiene cuarzo y albita en proporciones mayores con trazas de caolinita e illita y la fracción de arcillas que correspondiente al 69,1 p/p, se detectaron 3 tipos diferentes de minerales de arcilla:

- Tipo 2:1 expansiva (dioctaédrica), con plano basal $\sim 14 \text{ \AA}$ que expande hasta $\sim 17 \text{ \AA}$: Montmorillonita (Na, Ca).
- Tipo 2:1 (dioctaédrica): con plano basal $\sim 10 \text{ \AA}$ no expansiva: illita (K)
- Tipo 1:1 (dioctaédrica): con plano basal $\sim 7 \text{ \AA}$ no expansiva: caolinita

También se encuentra Cuarzo tamaño arcilla en cantidades muy bajas.

Los suelos generados por la alteración de la arcilita subyacente presentan las siguientes propiedades físicas.

| MUESTRA | PROPIÉDADES FÍSICAS DEL SUELO PARENTAL | | | | CLASIFICACIÓN SUCS |
|---------|--|-------|-------|------|--------------------|
| | % W | LL | IP | % HL | |
| 317+460 | 27,63% | 55,94 | 33,91 | 30% | CH |

Tabla N° 3.26. Propiedades físicas del suelo muestra 317+460

3.6.2.- Mineralogía sub-tramo 2

Entre las progresivas Km 320+000 al Km 330+000 se tomó una muestra de Arcilita específicamente en el Km 326+880, obtenida del núcleo del sondeo exploratorio realizado en dicha progresiva. La muestra fue extraída a una profundidad de 6 m y descrita visualmente como un Arcilita de color gris con manchas naranja y rojas.

| Arena | Limo | Arcilla |
|------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Yeso | Cuarzo | Montmorillonita (Na, Ca). |
| Cuarzo | Albita | Illita (K) |
| Albita | Trazas de Caolinita e Illita | Clorita (Fe, Mg) |
| Caolinita | | Caolinita |
| Illita | | |
| Arcillas de espesor basal de ~14 Å | | |

Tabla N° 3.27. Mineralogía de la muestra 326+880

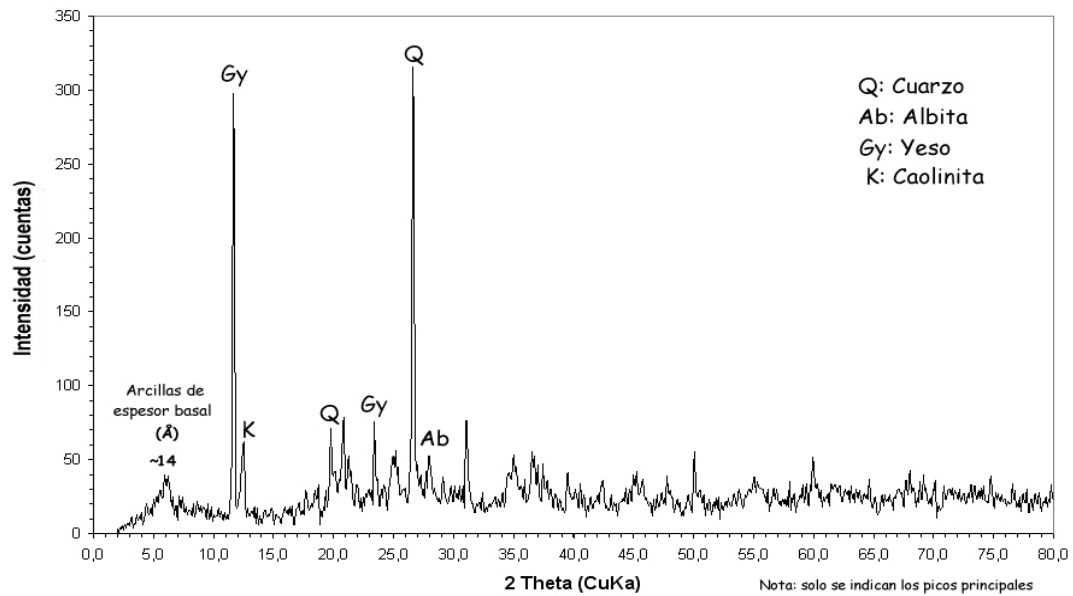


Figura N° 3.61. Ensayo de difracción de rayos X. Muestra 326+880

En la tabla N°3.28 se observa que el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es el mineral que se encuentra en mayor proporción en la fracción tamaño arena, seguido de Cuarzo, Albita, Caolinita, Illita y arcillas de espesor basal de $\sim 14,5 \text{ \AA}$. En la fracción de limo: Cuarzo y Albita en proporciones mayores con trazas de Caolinita e Illita y la fracción de arcillas (68,2 p/p), se detectaron 3 tipos diferentes de minerales de arcilla:

- Tipo 2:1 expansiva (dioctaédrica), con plano basal $\sim 14 \text{ \AA}$ que expande hasta $\sim 17 \text{ \AA}$: Montmorillonita (Na, Ca).
- Tipo 2:1 (dioctaédrica): con plano basal $\sim 10 \text{ \AA}$ no expansiva: illita (K)
- Tipo 2:1:1 (trioctaédrica) con plano basal $\sim 14 \text{ \AA}$ no expansiva: Clorita (Fe, Mg)
- Tipo 1:1 (dioctaédrica): con plano basal $\sim 7 \text{ \AA}$ no expansiva: caolinita

Los suelos de tipo arcilloso generados por la descomposición de la arcilita, presenta las siguientes propiedades físicas.

| MUESTRA | PROPÍEDADES FÍSICAS DEL SUELO PARENTAL | | | | CLASIFICACIÓN SUCS |
|---------|--|-------|-------|------|--------------------|
| | % W | LL | IP | % HL | |
| 326+880 | 11% | 39,83 | 19,57 | 110% | CL |

Tabla N° 3.28. Propiedades físicas del suelo muestra 326+880

3.6.3.- Mineralogía sub-tramo 3

En el sub-tramo 2 se tomó una muestra de Arcilita específicamente en el Km 338+380, obtenida del núcleo del sondeo exploratorio realizado en dicha progresiva. La muestra fue extraída a una profundidad de 8 m y descrita visualmente como un Arcilita de color gris con manchas naranja y rojas.

| Arena | Limo | Arcilla |
|--------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Cuarzo | Cuarzo | Montmorillonita (Na, Ca). |
| Albita | Albita | Illita (K) |
| Mica (Illita o Moscovita), Caolinita | Trazas de Caolinita e Illita | Clorita (Fe, Mg) |
| Arcillas con espesor basal ~14,5 Å | | Caolinita |
| Y eso (baja proporción) | | |

Tabla N° 3.29. Mineralogía de la muestra 338+380

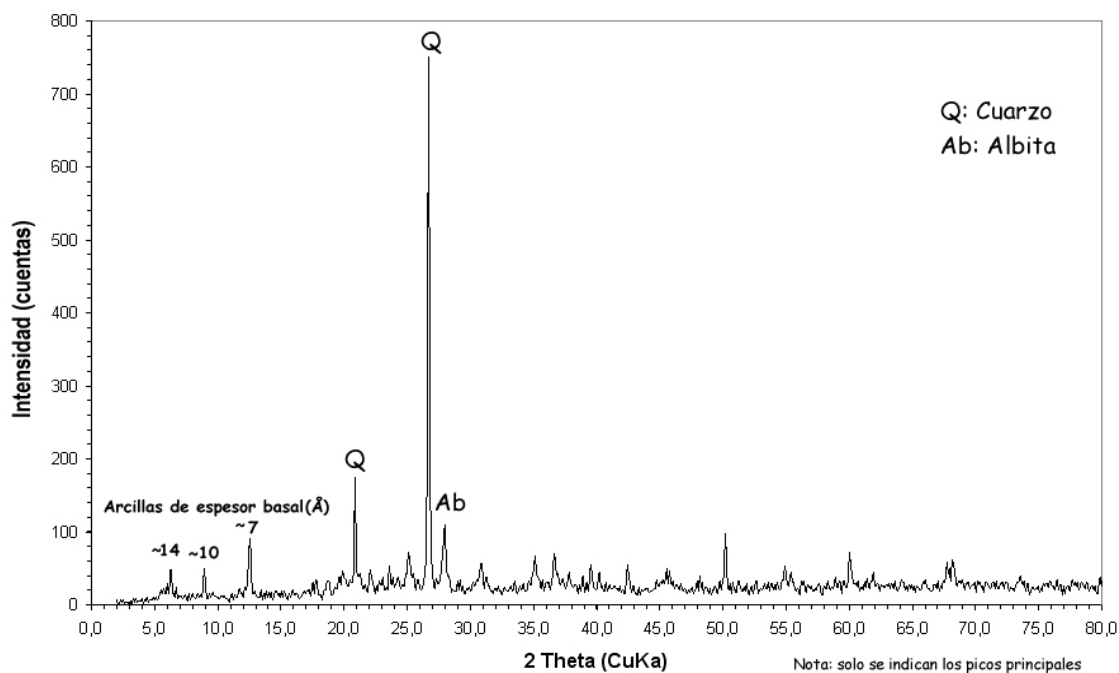


Figura N° 3.62. Ensayo de difracción de rayos X. Muestra 338+380

En la tabla N° 3.30 se muestra la mineralogía encontrada en cada fracción de partículas y según el difractograma DRX mostró la siguiente mineralogía: Cuarzo, plagioclasa sódica (Albita), mica (Illita o Moscovita), Caolinita y arcillas con espesor basal $\sim 14,5$ Å, con cantidades menores de yeso. En la fracción de limo: Cuarzo y Albita en proporciones mayores con trazas de Caolinita e Illita y en la Fracción de arcillas (55,8 p/p), se detectaron 4 tipos diferentes de minerales de arcilla:

- Tipo 2:1 expansiva (dioctaédrica), con plano basal ~ 15 Å que expande hasta ~ 18 Å: Montmorillonita (Na, Ca).
- Tipo 2:1 (dioctaédrica): con plano basal ~ 10 Å no expansiva: illita (K)
- Tipo 2:1:1 (trioctaédrica) con plano basal ~ 14 Å no expansiva: Clorita (Fe, Mg)

- Tipo 1:1 (dioctaédrica): con plano basal $\sim 7 \text{ \AA}$ no expansiva: caolinita

La arcilita al descomponerse genera suelos de tipo arcillo que presenta las siguientes propiedades físicas:

| PROPÍEDADES FÍSICAS DEL SUELO PARENTAL | | | | | |
|--|-----|-------|-------|------|--------------------|
| MUESTRA | % W | LL | IP | % HL | CLASIFICACIÓN SUCS |
| 338+380 | 11% | 50,29 | 23,43 | 50% | CH |

Tabla N° 3.30. Propiedades físicas del suelo muestra 338+380

3.6.4.- Mineralogía sub-tramo 5

Del núcleo del sondeo exploratorio realizado en la progresiva Km 352+560. La muestra fue extraída a una profundidad de 4 m y descrita visualmente como un Arcilita varicoloreada.

| Arena | Limo | Arcilla |
|--|-------------------------------|-------------------------------------|
| Cuarzo, | Cuarzo, | Montmorillonita (Na, Ca, \pm Mg), |
| Plagioclasa sódica (Albita) | Albita | Illita (K) |
| Mica (Illita o Moscovita) | Trazas de Caolinita y Clorita | Clorita (Fe, Mg) |
| Caolinita | | Caolinita |
| Arcillas de espesor basal de $\sim 14 \text{ \AA}$. | | |

Tabla N° 3.31. Mineralogía de la muestra 352+560

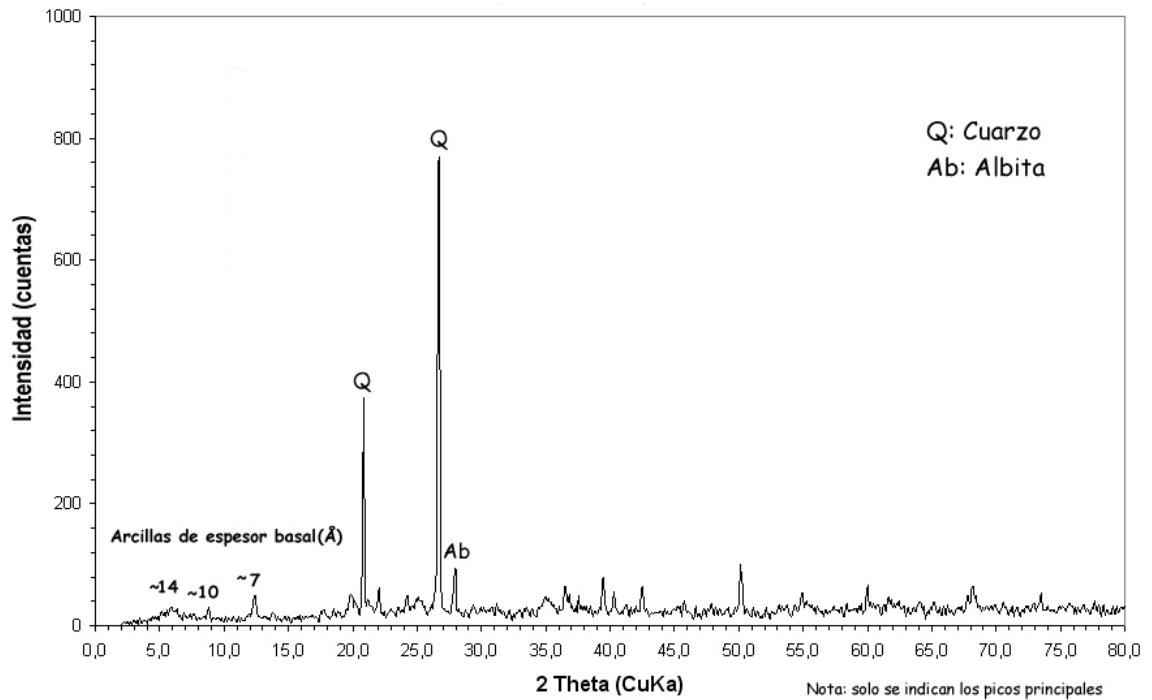


Figura N° 3.63. Ensayo de difracción de rayos X. Muestra 352+560

El difractograma DRX mostró la siguiente mineralogía: Cuarzo, plagioclasa sódica (Albita), mica (Illita o Moscovita), Caolinita y arcillas de espesor basal de ~14 Å. La Fracción de arcillas (40,5 % p/p), se detectaron 4 tipos diferentes de minerales de arcillas en proporciones similares:

- Tipo 2:1 expansiva (dioctaédrica), con plano basal ~15 Å que expande hasta ~17 Å: Montmorillonita (Na, Ca, ± Mg).
- Tipo 2:1 (dioctaédrica): con plano basal ~10 Å no expansiva: Illita (arcilla micácea potásica)
- Tipo 2:1:1 (trioctaédrica) con plano basal ~14 Å no expansiva: Clorita (Fe, Mg)

- Tipo 1:1 (dioctaédrica): con plano basal $\sim 7 \text{ \AA}$ no expansiva: Caolinita

La fracción de limo mostró que los minerales en mayor proporción son de cuarzo y albita. Se pueden observar cantidades muy pequeñas de caolinita y clorita. Estas arcillas pueden estar cementadas mediante óxidos de hierro amorfo alrededor de los granos de cuarzo.

El suelo generado por la roca de arcilita genera un suelo de tipo arcilloso con las propiedades físicas siguientes:

| PROPÍEDADES FÍSICAS DEL SUELO PARENTAL | | | | | |
|--|-------|-------|-------|------|--------------------|
| MUESTRA | % W | LL | IP | % HL | CLASIFICACIÓN SUCS |
| 352+560 | 9,62% | 37,74 | 19,06 | 50% | CL |

Tabla N° 3.32. Propiedades físicas del suelo muestra 352+560

3.7.- Materiales a ser estabilizados desde el punto de vista mecánico para ser empleado como material de relleno.

Se evaluaron 2 zonas a lo largo de la vía férrea donde las obras de corte permitirán volúmenes importantes que deben ser considerados para ser usados como materiales de relleno, si presentan las condiciones mínimas para ser tratados. El material óptimo para el levantamiento de terraplenes debe cumplir la siguiente condición: materiales que posean una naturaleza mixta, con partículas granulares y cohesivas; sin embargo, los materiales a cortar son de naturaleza fina, por lo tanto, es recomendable su mejoramiento desde el punto de vista mecánico, usando diversos

porcentajes de cemento portland. Para la toma de estas muestras se excavaron dos calicatas, cuyas progresivas se identifican a continuación:

| Calicata | Progresiva |
|-----------------|-------------------|
| Calicata 1 | 315+900 |
| Calicata 3 | 348+400 |

Tabla N° 3.33. Ubicación de Calicatas

El denominador común de estas dos calicatas representativas, es la presencia de suelos, clasificadas como arenas arcillosas o arcillas de baja plasticidad arenosa, las cuales desde el punto de vista de material para ser usado como relleno se clasifican como materiales del tipo A-4, (Clasificación AASHTO), a los cuales para su mejoramiento se les practicaron ensayos a diferentes porcentajes de cemento, a fines de determinar su compresibilidad, resistencia a la compresión, densidades y límites de consistencia.

Por último, se procedió a realizar ensayos con un material arenoso, de los tantos que abundan en la zona, particularmente en los préstamos analizados para evaluar el efecto del cemento sobre las arenas en cuanto al mejoramiento de la densidad máxima y resistencia a la compresión. En este caso se evaluó una zona con buenos depósitos de arena localizado a unos 70 Km de la ruta, al sur de Valle de La Pascua.

3.7.1. Propiedades originales de los materiales

Las 2 calicatas fueron evaluadas a fines de determinar sus propiedades originales las cuales se resumen a continuación:

| Calicata | % w _{nat} | % Grava | % Arena | % Finos | PE | % LL | %IP | g _{max} (Kg/m ³) | % w _{op} | SUCS | AASHTO |
|---------------|-----------------------|------------|------------|------------|-------|---------|-------|--|----------------------|-------|--------|
| Calicata 1 | 12,42 | 0 | 53,65 | 46,35 | 2,686 | 21,77 | 7,14 | 2030 | 9,5 | SC | A-4 |
| Calicata 2 | 12,38 | 0 | 41,74 | 58,26 | 2,684 | 25,62 | 10,12 | 1912 | 11,7 | s(CL) | A-4 |

Tabla N°3.34. Propiedades físicas originales de los materiales

Tal como se aprecia, la Calicata 1 presenta un índice de plasticidad de 7 y la Calicata 2 de 10, ambas presentan un porcentaje de finos mayor a 35%, que oscilan entre 40 al 58%. El exceso de finos, descalifica estos suelos como material para conformar terraplenes, a menos que se proceda a un mejoramiento de los mismos.

Una de las prácticas de uso más frecuente consiste en agregar cemento Portland en proporción de un 3% a un 16% en peso de mezcla, lo cual aumenta su resistencia y disminuye compresibilidad. Cabe destacar que para que se logren estos efectos, el material por mejorar debe presentar un porcentaje máximo de finos de 50%.

Los ensayos a las calicatas se realizaron preparando una muestra representativa uniendo las muestras de los estratos identificados en las calicatas. Hay que destacar que de acuerdo a las metodologías disponibles para estimar las dosis de suelo cemento, se estimó que la misma debería estar en el orden del 7% para garantizar una resistencia mínima de 19.5 Kg/cm² para el caso de las calicatas 1 de 17 Kg/cm² para la calicata 2. Sin embargo, considerando las características de los materiales, se prepararon una serie de pruebas con diferentes dosis a fin de optimizar la misma, considerando que el material en uso es de baja compresibilidad (límite líquido del material < 26 e Índice de Plasticidad < 10). Estas dosis fueron de 3%, 5% y 7%.

3.7.2.- Comportamiento de los materiales a diferentes dosis de cemento

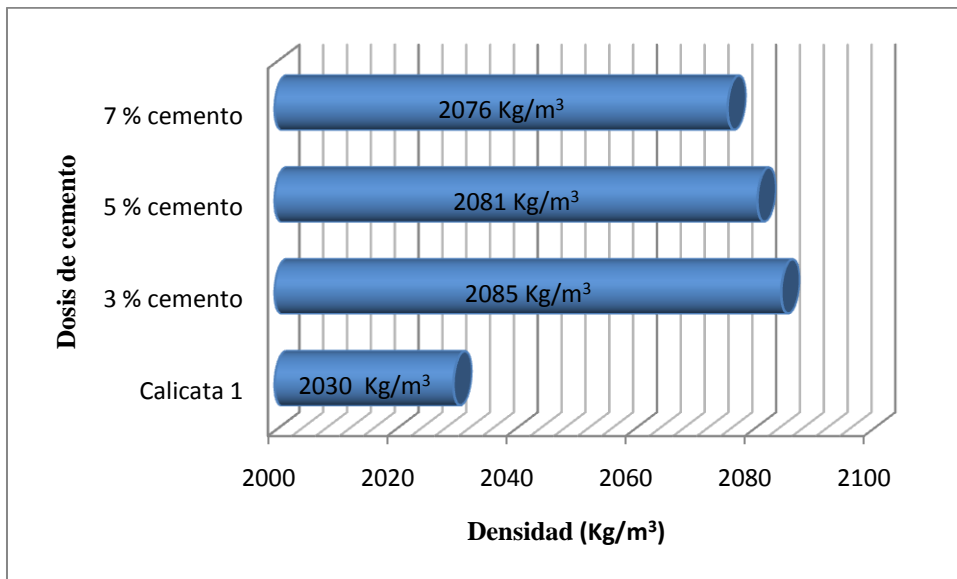
En la tabla adjunta se resumen los parámetros obtenidos a diferentes proporciones de suelo cemento por calicata. En el Anexo 1 se detallan los resultados de los ensayos de laboratorio.

| | Dosis de cemento | % w | PE | LL | LP | IP | g_{max} (Kg/m ³) | % w _{op} | Índice de Var.volu | Índice de Expans | q _u (Kgf/cm) |
|------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------------|----------------------|--------------------|------------------|----------------------------|
| Calicata 1 | 3% | 10,53 | 2,74 | 20,94 | 15,05 | 5,89 | 2085 | 8 | 0,023 | 0,004 | 21 |
| | 5% | 11,83 | 2,744 | 21,26 | 15,48 | 5,78 | 2081 | 8,75 | 0,013 | 0,002 | 24 |
| | 7% | 10,97 | 2,738 | 21,29 | 14,93 | 6,36 | 2076 | 8,85 | 0,011 | 0,004 | 29 |
| Calicata 2 | 3% | 11,94 | 2,688 | 31,67 | 20,48 | 11,19 | 1957 | 11 | 0,028 | 0,007 | 19 |
| | 5% | 14,49 | 2,689 | 31,9 | 21,69 | 10,21 | 1915 | 11,4 | 0,013 | 0,005 | 17 |
| | 7% | 13,58 | 2,696 | 31,56 | 20,77 | 10,79 | 1966 | 11,5 | 0,013 | 0,005 | 18 |

Tabla N° 3.35. Parámetros obtenidos a diferentes proporciones de suelo-cemento

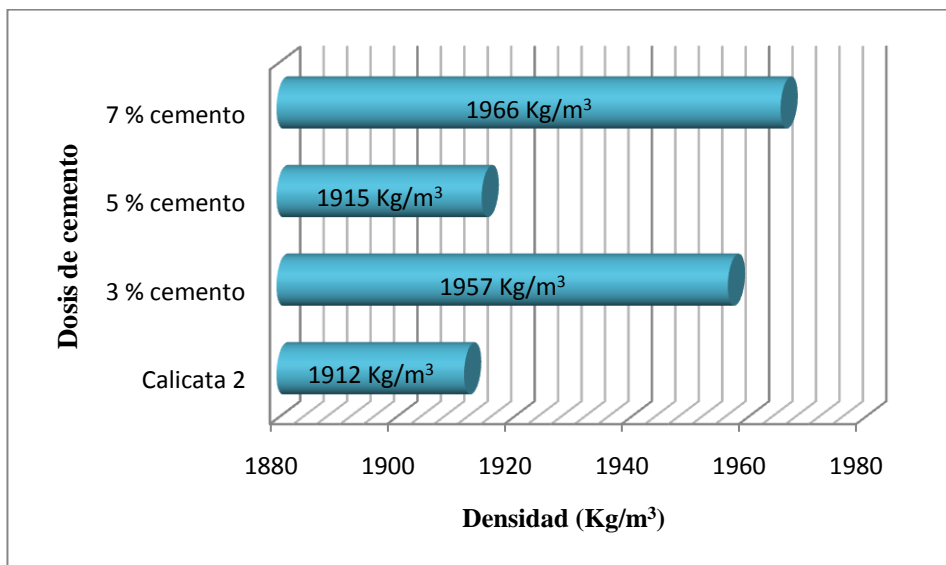
3.7.2.1.- Variaciones de la Densidad Máxima

El incremento en la densidad fue relativamente bajo a las dosis preparadas, encontrándose para el caso de la Calicata 1 los incrementos se presentan en el orden del 2.26 al 2.70% y en la Calicata 2 se nota una desviación en la dosis del 5% pero las restantes exhiben incrementos de 2.35 a 2.82% (ver figuras N° 3.64 y 3.65).



■ Densidad Máx. Kg/m³

Figura N° 3.64. Variaciones de densidad a varias dosis de cemento. Calicata 1



■ Densidad Máx. Kg/m³

Tabla N° 3.65. Variaciones de densidad a varias dosis de cemento. Calicata 2

3.7.2.2.- Variaciones de la Resistencia a la Compresión

El incremento en la resistencia a la compresión de la Calicata 1 se presentó una relación lineal proporcional a la dosis de cemento que varió entre 250 a 383%,

encontrándose una dispersión para el caso de la dosis de 7%. Para el caso de la Calicata 2 los incrementos se presentan en el orden del 31 al 46% sin poder correlacionarse estos valores a los incrementos en dosis de cemento (ver figuras).

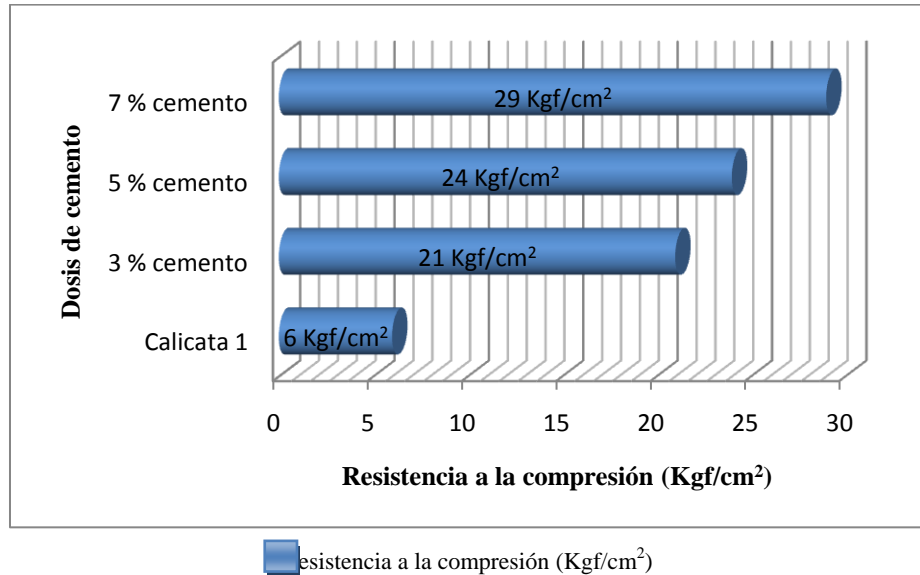


Figura N° 3.66. Variaciones de la resistencia a varias dosis de cemento. Calicata 1

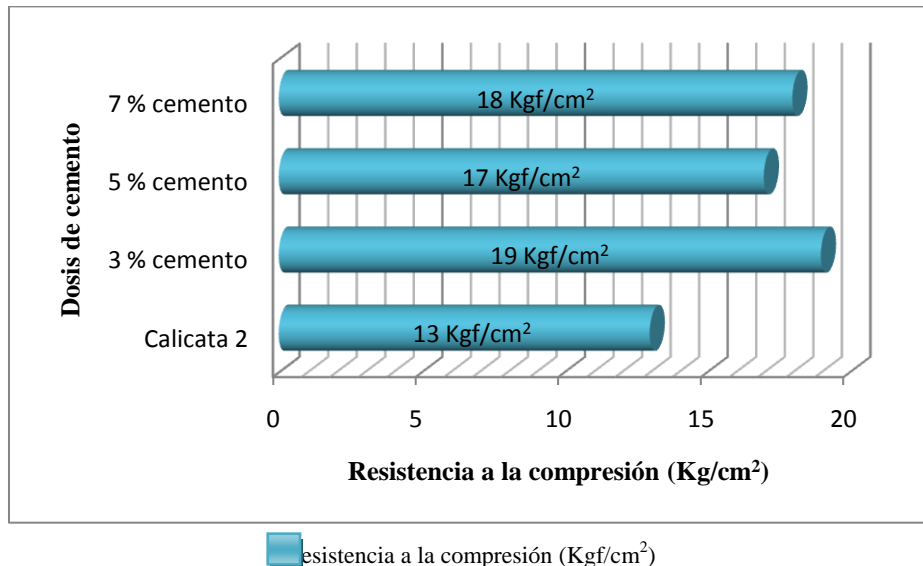


Figura N° 3.67. Variaciones de la resistencia a varias dosis de cemento. Calicata 2

3.7.2.3.- Variaciones en los Límites de Consistencia

Para el caso de la Calicata 1 se notó una disminución respecto al material original entre el 17 al 19% en las dosis de 3 y 5% respectivamente, observándose una desviación al 7% de cemento donde el índice de plasticidad disminuyó respecto a la muestra original tal solo un 10%. Para el caso de la Calicata 2 no se encontraron relaciones de ningún tipo, probablemente debido al contenido de finos original de la muestra que para estas dosis no presenta variación (ver figuras).

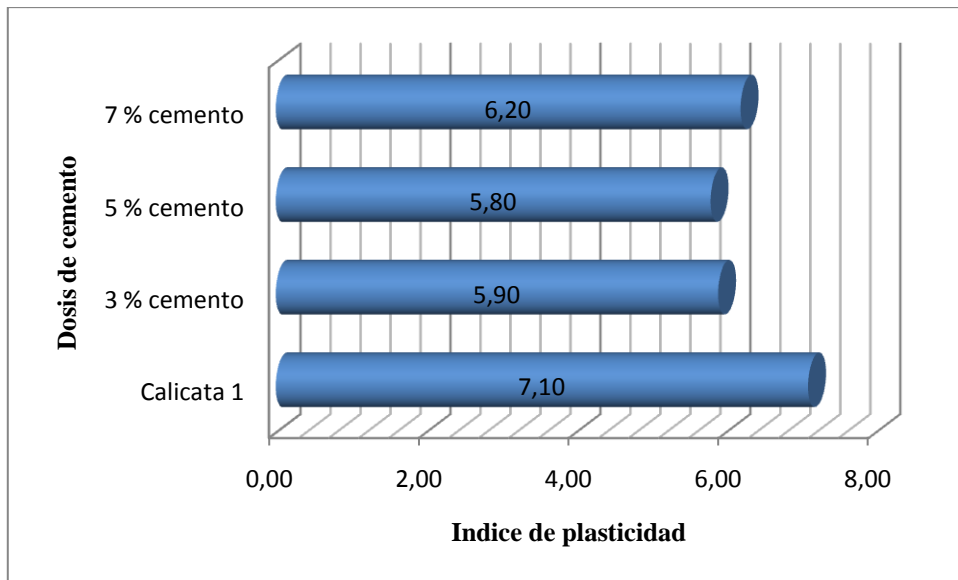


Figura N° 3.68. Variaciones del índice de plasticidad con la dosis de cemento. Calicata 1

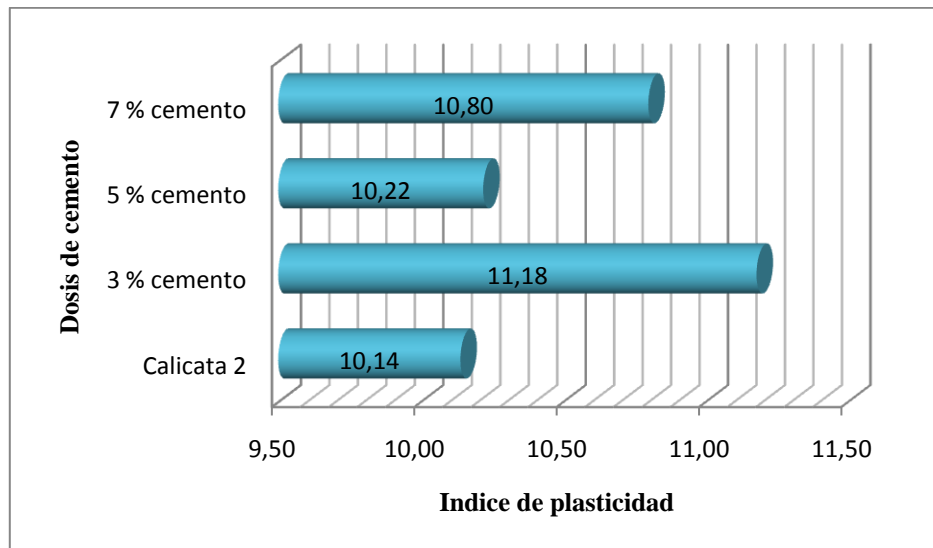


Figura N° 3.69. Variaciones del índice de plasticidad con la dosis de cemento. Calicata 2

3.7.2.4.- Variaciones en el Índice de variación volumétrica y expansibilidad

Se determinó una buena correlación entre dosis de cemento y disminución del Índice de variación volumétrica respecto a las muestras originales de cada calicata. En el caso de la Calicata 1 del 70 al 86% y en la Calicata 2 del 79 al 90% (ver figuras).

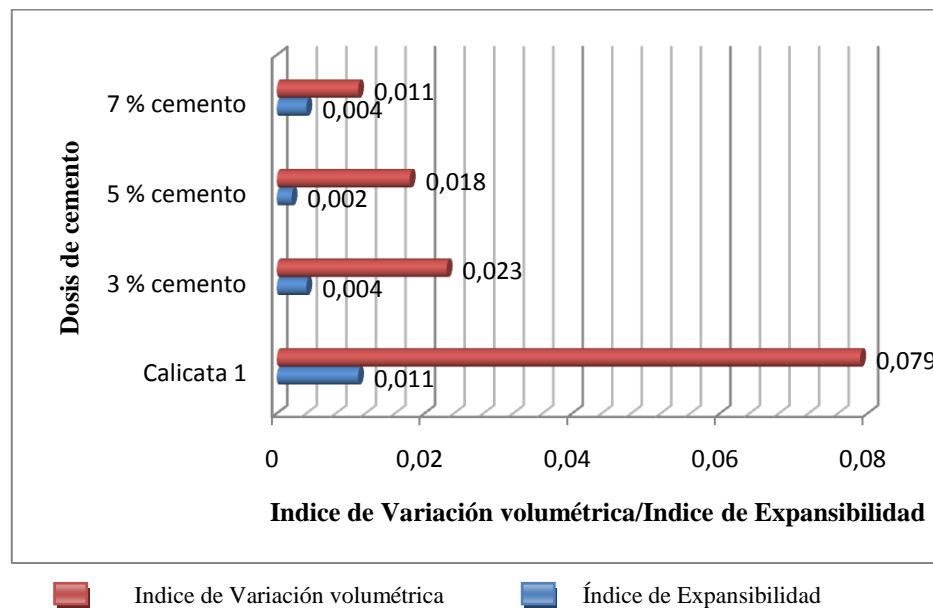
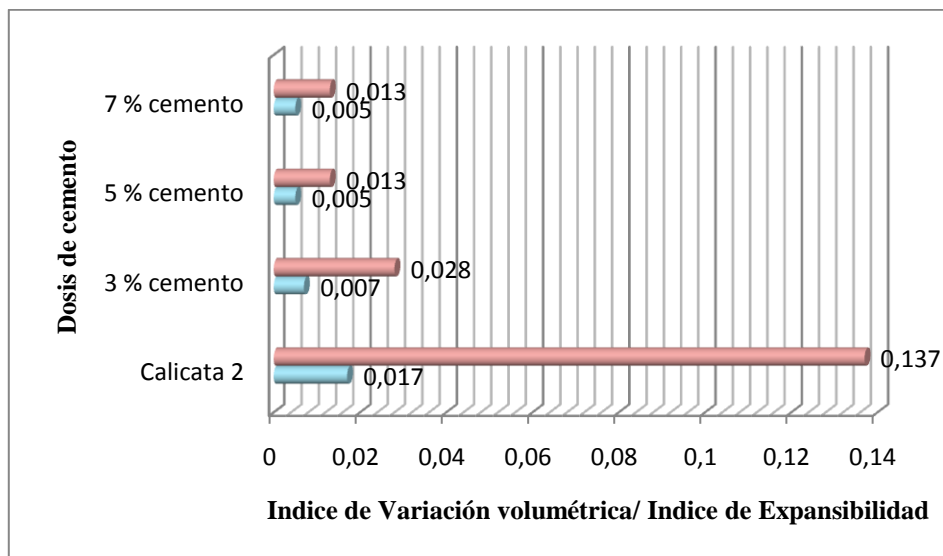


Figura N° 3.70. Variaciones de los índices de variación volumétrica y expansibilidad a diferentes dosis de cemento. Calicata 1



■ Índice de Variación volumétrica ■ Índice de Expansibilidad

Figura N° 3.71. Variaciones de los índices de variación volumétrica y expansibilidad a diferentes dosis de cemento. Calicata 2

3.7.3.-Tratamiento de arenas con cemento

Se realizó una evaluación de la influencia de los tratamientos con mezclas de cemento en arenas limosas, las cuales se encuentran presentes en varios sectores a lo largo de la ruta. En este caso se efectuó una experiencia con una arena limosa con 20% de finos de baja plasticidad.

El material fue clasificado como A-2-4 conforme a los parámetros de granulometría y límites de consistencia establecidos por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y sobre la base del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos ASTM-D-2487-93 se corresponde con una arena limosa (SM).

Basados en la metodología para estabilización de suelo cemento y considerando las características del material, se preparó una trilogía de pruebas con diferentes dosis a fin de optimizar la misma considerando que el material en uso es

incompresible (límite líquido del material = 17 y No Plástico). Estas dosis fueron de 5%, 7% y 9%. Se verificó de acuerdo al contenido de finos (19.91%) que la resistencia mínima para éste caso debería ser de 21 Kgf/cm².

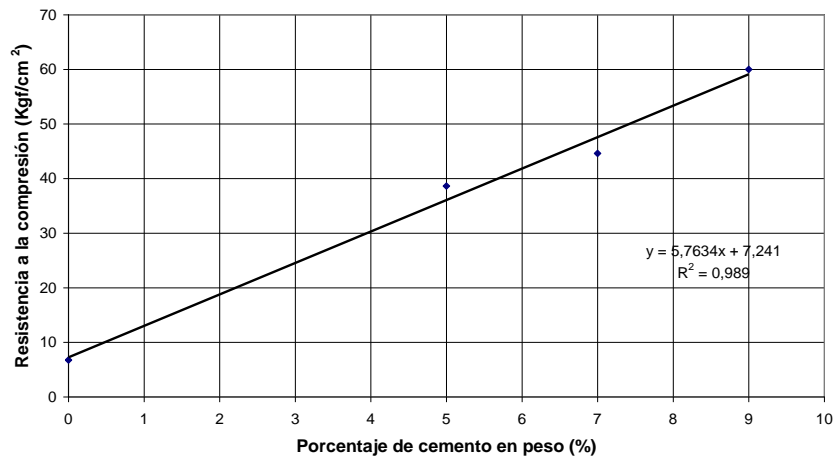
Fue elaborada una tabla donde se resumen los parámetros evaluados en la muestra original y los obtenidos a diferentes dosis de suelo cemento. En el Anexo 2 se detallan los resultados de los ensayos de laboratorio.

| Muestra | % Grava | % Arenas | % Pasa #200 | PE | LL | LP | IP | g _{max} (Kg/m ³) | % w _{op} | Clasif. SUCS / ASSTHO | q _u (Kgf/cm ²) |
|------------------|---------|----------|-------------|-------|----|----|----|---------------------------------------|-------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Muestra Original | 0 | 80,09 | 19,91 | 2,660 | 17 | NP | NP | 1985 | 9,65 | SM / A-2-4 | 7 |
| 5% cemento | - | - | - | 2,707 | 18 | NP | NP | 1995 | 8 | | 39 |
| 7% cemento | - | - | - | 2,707 | 18 | NP | NP | 2073 | 8,9 | | 45 |
| 9% cemento | - | - | - | 2,706 | 17 | NP | NP | 2085 | 8,7 | | >58 |

Tabla N° 3.36. Parámetros de la muestra original y los obtenidos a diferentes dosis de cemento

Cabe destacar que se encontró una relación lineal entre la dosis de cemento y la resistencia a la compresión obtenida, lo cual puede apreciarse en la figura siguiente. En todos los casos se superó la resistencia a la compresión mínima requerida. Sobre esta base, se permite inferir que a una dosis de 3% se obtendría una mezcla satisfactoria de suelo cemento para el material estudiado. Es importante destacar que los problemas de compresibilidad no se evaluaron, ya que a pesar de haber ejecutado los ensayos de consolidación, como era de esperarse y para ningún caso, tanto del suelo original como para las diferentes mezclas, los materiales resultaron virtualmente incompresibles.

Figura N° 3.72. Relación % cemento vs Resistencia a la compresión



CAPITULO IV- CONCLUSIONES

Se pudo observar que el 57% de las muestras caracterizadas por el SUCS resultaron ser arcillas (CL), 27 % arcillas con contenido de arena, y el 87% de todas las muestras comprenden materiales finos (arcillas o limos), dejando sólo un 11 % de materiales arenosos con alto contenido de limos y arcillas, el porcentaje de material gravoso es escaso, alcanzando solo el 2%. Por la frecuencia de estos materiales finos se entiende que la mayor parte de la construcción de la vía férrea se establecerá sobre ellos.

En la clasificación AASHTO, el porcentaje de las muestras de los materiales finos están comprendidas por suelos del tipo A-6 y A-7, comprendiendo materiales de baja calidad o pobres para la conformación de terraplenes. A su vez existe un 25% de materiales que clasifican como A-7-6, los cuales con los mencionados anteriormente suman un 78% de muestras ensayadas que presentan esta calidad pobre debido a su alta proporción de finos y sus índices de plasticidad, que le dan a las muestras un carácter compresible si se encuentran en estado de saturación. Estos suelos se encuentran en el cuerpo de los terraplenes entre las progresivas Km 310+00 hasta la 350+000, donde comienza a intercalarse en diversos rangos con materiales de tipo A-3 y A-4 hasta la progresiva Km 360+000.

En cuanto a los materiales a ser estabilizados, se puede decir que las relaciones encontradas entre variación de densidad y dosis de cemento para cada una de las calicatas estudiadas fue baja y por igual para los límites de consistencia. Para el caso de la resistencia a la compresión no se encontró una buena relación lineal entre la dosis de cemento y la resistencia a la compresión obtenida; sin embargo, en todos los casos se superó la resistencia a la compresión mínima requerida para el material correspondiente a la Calicatas 1 (19.5 Kgf/cm^2) y por igual para la Calicata 2 (17 Kgf/cm^2). Los incrementos de resistencia llegaron en algunos casos hasta el 500%. Así mismo, en lo que concierne a los índices de variación volumétrica, se

disminuyen significativamente (entre el 70 al 90% en promedio). a mayor dosis de cemento siendo satisfactorios aun para dosis de 3%. Sobre esta base, se permite inferir que a dosis de 3% se obtendría una mezcla satisfactoria de suelo cemento para los materiales estudiados, cuya dosis se podría aplicar en el núcleo del terraplén y el último metro del mismo, así como la base realizarla a un porcentaje del 5%.

En lo que se refiere al potencial de expansión de los suelos finos que se encuentran en la futura vía férrea, se puede decir que son en su mayoría materiales con una muy alta capacidad para expandirse, ya que un 67% de los suelos estudiados presentaron valoraciones de índices de expansión que se encuentran entre 135 y 230, generando presiones de expansión entre 2.50 y 3.50 Kg/cm². Este tipo de material, sumado con aquellos que poseen una alta susceptibilidad de hinchamiento representan casi la totalidad del universo de materiales finos que fueron objeto de este estudio, siendo interrumpidos por escasos materiales de baja expansión como los localizados en la progresiva 340+060 y de los pocos frecuentes cuerpos arenosos.

Es importante destacar que estos materiales se encuentran bajo condiciones de densidad y humedad controladas y que las posibles deformaciones a las que pudieran estar sometidos los suelos dependen en gran medida de los incrementos de humedad en los terraplenes. Estos posibles incrementos de humedad son los que pudieran funcionar como detonantes para la generación de la inestabilidad interna de los suelos, además de la deformación por expansión mencionada anteriormente, la cual se ha determinado su relación directa con sus propiedades físicas tal como su límite líquido, humedad natural e índice de plasticidad.

El subsuelo de la zona de estudio comprende una litología monótona conformada por rocas sedimentarias que se intercalan entre arcilitas abigarradas y lutitas con presencia de areniscas friables de forma lenticular, cuyo tamaño de grano varía de fino a medio. La mayoría de estas areniscas poseen matriz limosa o arcillosa. Dicha litología coincide con la descripción mencionada en la bibliografía estudiada

de la Formación Quiamare. Las arcilitas pueden presentar una variación en su coloración que va desde tonos rojizos a abigarrados con presencia de minerales de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), y algunos precipitados calcáreos. Las lutitas de color gris verdoso, en su mayoría calcáreas, con presencia de minerales de yeso y micas.

El estudio mineralógico realizado a las rocas de arcilita mediante difracción de rayos X, determinó que los minerales de arcilla contenidos en las mismas predomina la montmorillonita, mineral de arcilla de carácter expansivo, la cual tiene la capacidad de absorber agua, generando hinchamiento en su estructura cristalina, pudiendo producirse la completa disociación de las láminas, teniendo un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Dichas características le generan a la roca un alto índice plástico, generando cambios de volumen con las variaciones de humedad del terreno, así como también debido a los procesos de meteorización y alteración de estas rocas se generan suelos residuales de tipo arcilloso, los cuales poseen un alto contenido de coloides, índice de plasticidad de medio a alto y propiedades expansivas importantes.

CAPITULO V.- RECOMENDACIONES

Después de analizar las muestras de suelo que comprenden los materiales, los cuales conformarán los terraplenes, cajones y obras de paso del sistema ferroviario de los Llanos Centrales en el sub-tramo Chaguaramas-Zaraza, es conveniente para mantener en buen estado el cuerpo de dichas obras, realizar sistemas de prevención de erosión en los taludes de relleno. Se espera que estos sistemas de prevención de erosión eviten que los materiales finos que se encuentran conformando estos terraplenes sufran deformaciones por absorber agua.

Se recomienda realizarle a los materiales con un alto contenido de finos (mayor al 50 %), otros tratamientos de estabilización como la adición de cloruro de Sodio, cal y aceite sulfonado.

Se recomienda la realización del ensayo de hinchamiento libre, para estimar el grado de expansión de suelos con alto contenido de finos (mayor al 50 %), debido a que es un ensayo económico y fácil de realizar.

VI.- BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2000). “Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)” ASTM D 2487-00. Anual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, Soil and Rock (I):D420-4914.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1998). “Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer”. ASTM D 422-63-98. Anual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, Soil and Rock (I):D420-4914.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2000). “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³(2,700 kN-m/m³))” ASTM D 1557-00. Anual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, Soil and Rock (I):D420-4914.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1998). “Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass”. ASTM D 2216-98. Anual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, Soil and Rock (I):D420-4914.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2000). “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils”. ASTM D 4318-00. Anual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, Soil and Rock (I):D420-4914.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1998). “Standard Test Method for Materials Finer than 75- μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing”. ASTM C 117-95. Anual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, Soil and Rock (I):D420-4914.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1998). “Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils”. ASTM D 2435-96. Anual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, Soil and Rock (I):D420-4914.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1996). “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates” ASTM C 136-96^a. Anual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, Soil and Rock (I):D420-4914.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1998). “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solid by Water Pycnometer”. ASTM D 856-93. Anual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, Soil and Rock (I):D420-4914.

BARBIERO, Jhonny, 1999. “Análisis de las cargas y deformaciones en la construcción del túnel Pitahaya del ferrocarril Caracas-Cua en arcillas expansivas”. U.C.V., Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, 45-71 . Caracas.

BRUZUAL, Jesús, 1976. “Estudio Geológico-Geotécnico sobre arcillas dispersivas en la zona del canal B4-D del sistema de riego río Guárico, Dto. Miranda, Estado Guárico”. U.C.V., Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y

Geofísica, Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, 21-51 . Caracas.

CODIGO GEOLOGICO DE VENEZUELA <http://www.pdvsa.com/lexico/> Consulta Junio 2009.

CORNELIUS, S. HURLBUT, JR. 1976. “Manual de Mineralogía de Dana”. Edit. Reverté, S.A España, 653 p.

DE SANTIS, F., 2006. “Los suelos de acuerdo a la nueva versión del Sistema Unificado de Clasificación de suelos modificado en la norma ASTM D-2487-00” Boletín 86 Sociedad Venezolana de Geotecnia.

DE SISTO. (1961) “La Mesa and Sacacual Sediments of Eastern Venezuela”. Asoc. Venez. Geol., Min y Petrol., Bol., 4(6): 171-198

ESCAMILLA, H. Y ROMERO K. (2000) “Distribución de las facies sedimentarias y características de los sedimentos en la parte superior del delta del Orinoco”. T.E.G. 109 p.

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERÍA Y AGRIMENSURA, UNIVERSIDAD DEL ROSARIO (2009) “Geología y Geotécnia”: <http://fiselect2.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia>. Consulta 28 de Julio 2010.

FUENTES, S. EDEGMA DEL V. (2006) “Procesos de erosión severa de la Formación Mesa y su incidencia en obras civiles”. T.E.G. 186 P.

GONZÁLEZ DE JUANA, C., ITURRALDE, C., & PICARD, X., (1.980). “Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas”. Edic. Foninvés, Caracas. 2 Vols. 633 p.

GONZALEZ DE VALLEJO, LUIS. Y otros. (2002). “Ingeniería Geológica”. Madrid: Pearson Educación. 20-233

GOODMAN, E. RICHARD. “Introduction to Rock Mechanics”. Edit. John Wiley & Sons. 2da ed. (1989) 562p.

GRIM, RALPH. (1953). “Clay Mineralogy”. Edit. Mc Graw-Hill Book company, inc. New York. 384p

HEDBERG, H.D. (1950) “Geology of the Eastern Venezuela basin (Anzoátegui-Monagas- Sucre-eastern Guárico)”. Geol. Soc. Am., Bull 61(11):1173-1216

HERNÁNDEZ, Marco Antonio, 2006. “Estudio Geológico y Reconocimiento de arcillas expansivas en suelos de una zona al sur de Maracay, Estado Aragua”. U.C.V., Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, 18-47 . Caracas.

HOLTZ, W.G. y GIBBS, 1959. “Engineering properties of expansive clays”. Editorial Asce.

MARTINEZ WILMER Y ZURBARAN LUÍS (2007). “Geología y Geomecánica del macizo rocoso San Juan de los Morros-Los Flores, para la construcción del túnel San Juan. Sistema ferroviario San Juan de los Morros- San Fernando de Apure (Tramo D-1), Estado Guárico. T.E.G 169 p.

- NAVARRO. T, THAIDE Y PEREZ. R, SERGIO (1991) Geología de la región de Anaco, Distrito Sifontes, Estado Bolívar. T.E.G. 118 p.
- LEE, K.L., 1970. “Comparación de ensayos, deformaciones planas y triaxiales sobre arenas”. J. Soil Mech. Found Div. ASCE, SM-3.
- LEXICO ESTRATIGRAFICO DE VENEZUELA , Ministerio de Minas e Hidrocarburos, 1956. (primera edición). bol. geol., caracas, pub. espec. 1, 728 p. (ed. en inglés)
- PEIRSON III, A. L., 1965. “Geology of the Guárico mountain front”. Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról., Bol. Inform., 8(7): 183-212.
- SINDE, V. RAQUEL Y TORRES. C, CESAR (2008). “Caracterización geológica-geotécnica en el “proyecto integral autopista de los llanos centrales” progresiva 0+000Km al 32+100Km”. T.E.G. 126 p.
- SALVADOR, A. (1961). “Nomenclature of the Las Piedras and related formations in Eastern Venezuela”. Asoc. Geol., Min y Petrol., Bol Inform., 4(10): 297-327
- SKEMPTON, A. W (1953). “The colloidal activity of clays. Proceedings 3er International Conference of Soil Mechanics Foundation Engineering”. Vol. I, pp 57. Switerland.
- TARBUCK, EDWARD J. Y LUTGENS FREDERICK. K. “Ciencias de la Tierra”. Prentice Hall, Madrid, 1999. 616 p.

TERZAGUI & PECK, 1996. “Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica” Editorial El Ateneo. Segunda Edición.

UGAS, C., 1985. “Ensayos de Laboratorio en Mecánica de Suelos”. Instituto de Materiales y Modelos Estructurales IMME. Facultad de Ingeniería, U.C.V. Inédito.

WIKIPEDIA, LA ENCICLOPEDIA LIBRE (sf). “Ensayo Proctor”.
http://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_Proctor. Consulta 28 de Julio 2010.