



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

“Influencia de la humedad natural del suelo en su potencial expansivo, estudiada en suelos del austro ecuatoriano.”

Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Civil

Autores:

Jonnathan Fabricio Espinoza Calle

CI: 010712397-8

Correo electrónico: jfabo12@yahoo.es

Bjarne Nicolás Vargas Rosvik

CI: 010452659-5

Correo electrónico: bjarnevargas@gmail.com

Directora:

Ing. Karla Johanna Santacruz Reyes

CI: 030173139-4

Cuenca - Ecuador

14-marzo-2022



Resumen:

En el campo de la ingeniería geotécnica, el comportamiento de los suelos expansivos ha sido un tema que ha generado incertidumbre a lo largo de la historia, convirtiéndose con el paso del tiempo, en un problema clave a ser abordado dentro de las construcciones civiles, ya sea por seguridad o factores económicos. En esta línea, múltiples investigaciones con diferentes resultados han demostrado la importancia de abordar la expansividad; a pesar de esto, prevalece una limitación de información, especialmente, cuando se requiere conocer la relación que existe entre el potencial expansivo y la humedad natural que pueden tener los suelos. Conocimiento que podría aportar a un mejor entendimiento del comportamiento de los suelos cuando están expuestos a cambios bruscos de humedad.

Con estos antecedentes, el presente estudio tiene por objetivo determinar cómo afecta la humedad al potencial expansivo de suelos del austro ecuatoriano, para lo cual se ha trabajado con una metodología cuantitativa, y un alcance correlacional, iniciando con una recopilación bibliográfica de valores de presión y porcentaje de expansión conjuntamente con las cualidades del suelo en estudio y su ubicación en la zona austral del Ecuador. A continuación, se han elaborado ensayos basados en normativas, obteniéndose la caracterización del suelo y valores propios de presión de expansión para sitios ubicados en la ciudad de Cuenca y sus alrededores: Miraflores, Challuabamba y Cojitambo. Los resultados alcanzados corresponden a curvas de *humedad inicial vs. presión de expansión* obtenidos mediante regresión múltiple de segundo grado, mismas que podrán ser utilizadas para determinar la expansión en función del contenido de agua y peso específico seco (γ_d) para estos lugares en particular. Las conclusiones indican valores de potencial expansivo bajo para la muestra de Cojitambo, la cual se caracteriza como un suelo poco expansivo, deduciendo que no se trata de un material bentonítico, como afirma la bibliografía. Caso diferente resulta lo analizado para los suelos de Miraflores y Challuabamba, con valores relativamente altos de presión y deformación por expansión, los cuales entran en concordancia con lo que indican las correlaciones según su grado de expansividad y una modificación de la ecuación propuesta por Nayak & Christensen (1979).

Palabras clave: Potencial de expansión. Presión de expansión. Deformación de expansión. Humedad natural. Suelos expansivos. Hinchamiento de suelos.



Abstract:

In the field of geotechnical engineering, the expansive soils behavior has been a topic that has generated uncertainty throughout history, becoming over time, a key problem to be addressed in civil constructions, either for safety or economic factors. In this way, multiple investigations with different results have demonstrated the importance of addressing expansivity; despite this, a limitation of information prevails, especially when it is necessary to know the relationship between the expansive potential and the natural moisture soils may have. This knowledge could contribute to a better understanding of the soils behavior when they are exposed to sudden changes in moisture.

With this background, the present study aims to determine how moisture affects expansive potential of soils from the southern zone of Ecuador, which we have worked with a quantitative methodology, and a correlational scope, starting with a bibliographic compilation of swelling pressure and expansion percentage together with the soil qualities under study and its location in the southern zone of Ecuador. Then, tests based on regulations have been elaborated, obtaining the soil characterization and own values of swelling pressure for sites located in Cuenca and its surroundings: Miraflores, Challuabamba and Cojitambo. The results obtained correspond to *initial moisture vs. swelling pressure* curves obtained by means of second-degree multiple regression, which can be used to determine the expansion as a function of water content and dry density (γ_d) for these particular sites. The conclusions indicate low expansive potential values for the Cojitambo sample, which is characterized as a low expansive soil, inferring that it is not a bentonite material, as stated in the literature. A different case is analyzed for the soils of Miraflores and Challuabamba, with relatively high values of swelling pressure and expansive deformation, which are in agreement with the correlations according to their degree of expansivity and a modified equation proposed by Nayak & Christensen (1979).

Keywords: Swelling potential. Swelling pressure. Expansive deformation. Swelling strain. Swelling deformation. Natural moisture. Expansive soils. Swelling soils.



1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Antecedentes y justificación	14
1.2. Objetivos	15
1.2.1. Objetivo general	15
1.2.2. Objetivos específicos	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1. Suelos expansivos	16
2.1.1. Comportamiento de suelos expansivos	16
2.1.2. Hidratación de las partículas de suelo	18
2.1.3. Factores que influyen en la expansión de los suelos	20
2.1.3.1. Factores que influyen en la deformación por expansión	21
2.1.3.2. Factores que influyen en la presión de expansión	23
2.1.3.3. Condiciones ambientales	25
2.2. Caracterización de suelos expansivos	26
2.2.1. Humedad	26
2.2.2. Peso específico	27
2.2.2.1. Gravedad específica (Gs)	27
2.2.3. Granulometría	29
2.2.4. Límites de Atterberg	31
2.2.5. Clasificación del suelo	34
2.2.5.1. Sistema de clasificación AASHTO	34
2.2.5.2. Sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS)	35
2.2.6. Porcentaje de expansión unidimensional	36
2.2.7. Presión de expansión	37
2.3. Suelos expansivos en el austro ecuatoriano	39
2.3.1. Descripción geológica y geotécnica de zonas potencialmente expansivas	39
2.3.2. Compilación bibliográfica de estudios en suelos expansivos	43
2.4. Correlaciones	45
2.4.1. Mineral predominante	45
2.4.2. Grado de expansividad	47
2.4.3. Presión de expansión	49
2.5. Análisis estadístico	50
2.5.1. Métodos estadísticos	50
2.5.1.1. Regresiones Simples	51
2.5.1.2. Regresiones Múltiples	52
2.5.1.3. Análisis de las regresiones	53
3. METODOLOGÍA	54
3.1. Análisis de zonas potencialmente expansivas	54



3.1.1.	Inspección en campo	56
3.2.	Obtención de muestras de suelos expansivos	60
3.3.	Caracterización de suelos expansivos	62
3.3.1.	Gravedad específica (Gs)	63
3.3.2.	Granulometría	63
3.3.3.	Límites de Atterberg	64
3.3.4.	Clasificación del suelo	64
3.3.4.1.	Sistema de clasificación AASHTO	64
3.3.4.2.	Sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS)	65
3.4.	Carácter expansivo	65
3.4.1.	Expansión Libre	69
3.4.2.	Presión de expansión	70
3.5.	Evaluación estadística	70
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
4.1.	Ensayos preliminares de expansión	71
4.2.	Caracterización	72
4.2.1.	Gravedad Específica (Gs)	72
4.2.2.	Granulometría	76
4.2.3.	Límites de Atterberg	77
4.2.4.	Clasificación del suelo	80
4.3.	Carácter expansivo	84
4.3.1.	Expansión Libre	84
4.3.2.	Presión de expansión	87
4.4.	Correlaciones	89
4.4.1.	Mineral predominante	89
4.4.2.	Grado de expansividad	90
4.4.3.	Presión de expansión	92
4.5.	Curvas de Humedad versus presión de Expansión	94
5.	CONCLUSIONES	101
6.	RECOMENDACIONES	103
7.	BIBLIOGRAFÍA	105
8.	ANEXOS	109



Índice de figuras

Figura 1. Estructura de los minerales de arcilla: caolinita, illita y montmorillonita.	17
Figura 2. Experimento con muestras de caolinita y montmorillonita.	18
Figura 3. Modelo de ión hidratado.	18
Figura 4. Micela de arcilla.	19
Figura 5. Hidratación de minerales de arcilla en relación al límite líquido LL.	19
Figura 6. Relación entre la deformación por expansión y la densidad seca de suelos expansivos.	21
Figura 7. Efecto de la humedad inicial sobre la deformación por expansión variando la densidad seca.	22
Figura 8. Efecto del contenido de agua inicial y la densidad seca sobre la deformación por expansión.	22
Figura 9. Relación entre la presión de expansión y el tiempo.	23
Figura 10. Relación de presión de expansión y densidad seca.	24
Figura 11. Efecto de la densidad seca sobre la presión de expansión.	24
Figura 12. Relación entre esfuerzo expansivo y contenido de humedad para diversas densidades secas.	25
Figura 13. Utilización de balanza para pesado de matraz.	29
Figura 14. Serie de tamices e instrumentos para análisis por hidrómetro.	30
Figura 15. Límites de Atterberg.	32
Figura 16. Cuchara de Casagrande con suelo ranurado.	33
Figura 17. Nombres de suelo con tamaños de grano.	34
Figura 18. Carta de plasticidad.	36
Figura 19. Cámara de edómetro armada, con muestra sumergida.	37
Figura 20. Edómetro armado para un ensayo de presión de expansión.	39
Figura 21. Suelo de la formación Loyola, autopista Cuenca-Azogues.	40
Figura 22. Suelo de la Formación Guapán, sector parroquia Antonio Borrero.	41
Figura 23. Suelo de la Formación Biblián, sector Cojitambo.	42
Figura 24. Suelo del Depósito Arcillas Varvadas, vía Miraflores, sector Bodegas de Eljuri.	43
Figura 25. Presión de expansión vs Humedad inicial en base a resultados de diversos autores.	45
Figura 26. Carta del gradiente mineral.	47
Figura 27. Potencial de hinchamiento en función de la actividad de las arcillas.	48
Figura 28. Extracto de mapa geológico del sector Miraflores de la ciudad de Cuenca.	55
Figura 29. Extracto de mapa geológico del sector Challuabamba, autopista Cuenca-Azogues.	55
Figura 30. Extracto de mapa geológico de Azogues, sector Cojitambo.	56
Figura 31. Escala fotográfica de referencia.	57
Figura 32. Inspección visual en bodegas de Eljuri, sector Miraflores.	57
Figura 33. Inspección visual en la Calle Del Concierto, sector Miraflores.	58
Figura 34. Taludes de suelo agrietado en el sector Challuabamba.	58
Figura 35. Inspección visual en casas y calles de Challuabamba.	59
Figura 36. Inspección visual en Cojitambo.	60
Figura 37. Sitio de extracción de la muestra de suelo en Miraflores.	61
Figura 38. Talud de extracción de la muestra de suelo en Challuabamba.	61
Figura 39. Sitio de extracción de la muestra de suelo en Cojitambo.	62
Figura 40. Obtención de muestra inalterada de Challuabamba en anillo en laboratorio.	66
Figura 41. Proceso de remoldeo en laboratorio de suelo de Miraflores.	67
Figura 42. Papel filtro utilizado en ensayos de expansión libre y controlada.	68
Figura 43. Deformímetros utilizados para expansión libre y controlada.	69
Figura 44. Ensayos preliminares de porcentaje de expansión para Miraflores, Challuabamba y Cojitambo.	71



Figura 45. Ensayos preliminares de presión de expansión para Miraflores, Challuabamba y Cojitambo.	72
Figura 46. Obtención de Gravedad Específica de Miraflores.	73
Figura 47. Obtención de Gravedad Específica de Challuabamba.	75
Figura 48. Curva granulométrica y datos de Miraflores.	76
Figura 49. Curva granulométrica y datos de Challuabamba.	77
Figura 50. Obtención de Límite Líquido con ecuación ajustada para suelo de Miraflores.	78
Figura 51. Obtención de Límite Líquido con ecuación ajustada para suelo de Challuabamba.	79
Figura 52. Gráfica de plasticidad para clasificación según SUCS de Miraflores.	82
Figura 53. Gráfica de plasticidad para clasificación según SUCS de Challuabamba.	84
Figura 54. Gráficos de porcentaje de expansión en el tiempo del suelo Miraflores.	85
Figura 55. Gráficos de porcentaje de expansión en el tiempo del suelo Challuabamba.	86
Figura 56. Humedad vs Presión de expansión de Miraflores.	88
Figura 57. Humedad vs Presión de expansión de Challuabamba.	88
Figura 58. Ubicación de puntos de Miraflores y Challuabamba en gráfica de Gradiente Mineral.	90
Figura 59. Ubicación de puntos de Miraflores y Challuabamba en gráfica de Actividad según Seed (1962).	91
Figura 60. Curvas de correlaciones empíricas de humedad vs presión de expansión.	93
Figura 61. Correlaciones para Miraflores.	94
Figura 62. Correlaciones para Challuabamba.	94
Figura 63. Humedad vs presión de expansión de Challuabamba.	95
Figura 64. Humedad vs presión de expansión de Miraflores.	97
Figura 65. Comparación de los resultados de Miraflores con las correlaciones.	98
Figura 66. Comparación de los resultados de Challuabamba con las correlaciones.	99
Figura 67: Modificación de Curva Nayak Christensen (1979) para resultados observados en Miraflores	100



Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades del suelo que influyen en el potencial de expansión.	20
Tabla 2: Recopilación de resultados de ensayos de expansión de bibliografía local	44
Tabla 3. Gravedad específica de los minerales más importantes.	45
Tabla 4. Actividades para varios minerales de arcilla.	46
Tabla 5. Potencial de expansión en función del Índice de plasticidad.	47
Tabla 6. Método de Holtz y Gibbs, potencial de expansión en función del Índice de plasticidad.	47
Tabla 7. Grado de expansividad en función de Límites de Atterberg.	48
Tabla 8. Grados de expansividad y valores medios de parámetros geotécnicos.	49
Tabla 9. Grado de expansión según porcentaje de finos, límite líquido, expansión libre y presión de hinchamiento.	49
Tabla 10: Descripción de puntos de extracción de muestras.	62
Tabla 11. Presión de expansión de muestras de suelo de Miraflores y Challuabamba inalteradas y remoldeadas.	72
Tabla 12. Cantidad de suelo usada para determinar el Gs para el suelo de Miraflores.	73
Tabla 13. Valores resumidos para la obtención de Gravedad Específica Gs para suelo de Miraflores.	73
Tabla 14. Cantidad de suelo usada para determinar el Gs para el suelo de Challuabamba.	74
Tabla 15. Valores resumidos para la obtención de Gravedad Específica Gs para suelo de Challuabamba.	75
Tabla 16. Valores de humedad y número de golpes para la obtención de Límite Líquido LL para suelo de Miraflores.	77
Tabla 17. Valores de humedad para la obtención de Límite Plástico LP para suelo de Miraflores.	78
Tabla 18. Valores de humedad y número de golpes para la obtención de Límite Líquido LL para suelo de Challuabamba.	79
Tabla 19. Valores de humedad para la obtención de Límite Plástico LP para suelo de Challuabamba.	80
Tabla 20. Comparación de los datos de suelo Miraflores con los establecidos por AASHTO.	80
Tabla 21. Comparación de los datos de suelo Challuabamba con los establecidos por AASHTO.	82
Tabla 22. Resultados de expansión libre para las muestras de Miraflores.	85
Tabla 23. Resultados de expansión libre para las muestras de Challuabamba.	85
Tabla 24. Propiedades antes y después del ensayo de expansión libre para las muestras de Miraflores.	86
Tabla 25. Propiedades antes y después del ensayo de expansión libre para las muestras de Challuabamba.	86
Tabla 26. Presión de expansión, humedad y peso específico seco de Miraflores, Challuabamba y Cojitambo.	87
Tabla 27. Resumen de datos y propiedades de suelo de Miraflores y Challuabamba utilizados para determinar el mineral predominante.	89
Tabla 28. Resumen de datos y propiedades de suelo de Miraflores y Challuabamba utilizados para determinar cualitativamente el potencial expansivo.	90
Tabla 29. Resumen de datos y propiedades de suelo de Miraflores y Challuabamba utilizados en las ecuaciones.	92
Tabla 30. Ecuaciones según correlaciones en función de la humedad del suelo para Miraflores y Challuabamba.	92
Tabla 31. Datos de regresión para Challuabamba.	96
Tabla 32. Datos de regresión para Miraflores.	97



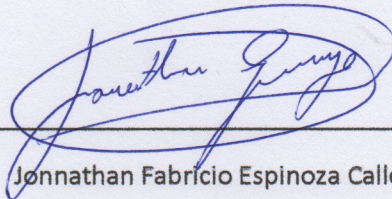
UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Jonnathan Fabricio Espinoza Calle, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Influencia de la humedad natural del suelo en su potencial expansivo, estudiada en suelos del austro ecuatoriano", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 14 de marzo de 2022



Jonnathan Fabricio Espinoza Calle

C.I: 010712397-8



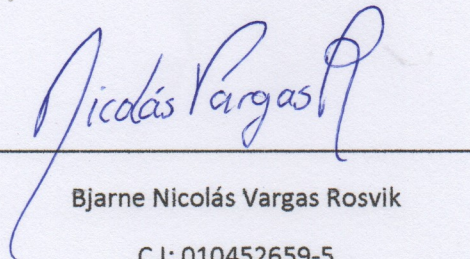
UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Bjarne Nicolás Vargas Rosvik, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Influencia de la humedad natural del suelo en su potencial expansivo, estudiada en suelos del austro ecuatoriano", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 14 de marzo de 2022



Bjarne Nicolás Vargas Rosvik
C.I: 010452659-5



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Jonnathan Fabricio Espinoza Calle, autor del trabajo de titulación "Influencia de la humedad natural del suelo en su potencial expansivo, estudiada en suelos del austro ecuatoriano" certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 14 de marzo de 2022

Jonnathan Fabricio Espinoza Calle

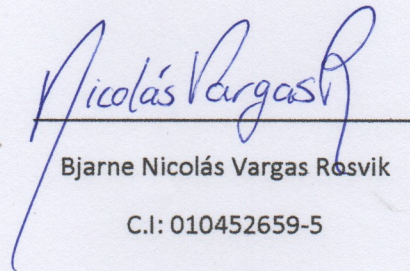
C.I: 010712397-8



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Bjarne Nicolás Vargas Rosvik, autor del trabajo de titulación "Influencia de la humedad natural del suelo en su potencial expansivo, estudiada en suelos del austro ecuatoriano" certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 14 de marzo de 2022


Bjarne Nicolás Vargas Rosvik
C.I: 010452659-5



1. INTRODUCCIÓN

Suelos expansivos han tenido origen desde hace millones de años en la era del vulcanismo (Méndez & Pineda, 2001), pero solo hasta entrado el siglo XX, los ingenieros de suelo reconocieron este fenómeno como un problema a abordar. Es así que estudios relacionados dan cuenta de que antes de 1920 la mayoría de las edificaciones contenían estructuras simples sin percepción de grietas y que, a partir de 1930, las viviendas de ladrillo empezaron a generalizarse, apareciendo los primeros problemas de fisuras, que fueron atribuidos a construcciones de mala calidad, sin reconocer ni dimensionar siquiera el efecto de los suelos expansivos (Chen, 1975).

El descubrimiento de depósitos profundos de arcillas blandas, no aptas para la construcción en grandes ciudades de la costa de América del Norte y Europa y la necesidad de expansión de construcciones a gran escala, tanto en estas ciudades como en zonas con suelos áridos de Medio Oriente, Australia o África (Chen, 1973), han llevado a ingenieros geotécnicos a indagar sobre la causa del daño de las construcciones levantadas en estas zonas; en donde no siempre ha sido el asentamiento o la calidad de los recursos utilizados.

El interés de profesionales de la ingeniería geotécnica e ingeniería de cimientos y pavimentos por conocer el comportamiento de los suelos expansivos, evitando la presencia de grietas en paredes, el levantamiento de aceras y demás inconvenientes en la construcción que han ocasionado pérdidas económicas, ha derivado en un punto de inflexión y, a partir de 1960, la investigación del tema inició ocupando un puesto significativo en el estudio de suelos. Se han difundido resultados de estas investigaciones en libros y publicaciones de impacto científico, indagando información adicional en conferencias, talleres y cursos de formación que han ayudado a enfrentar este inconveniente. Hablar del problema de expansión significa entender que detrás de este fenómeno existe un sinnúmero de factores que pueden llegar a causar más complicaciones: el peso específico del suelo, su humedad natural, sus componentes mineralógicos, su entorno y en general, las condiciones ambientales a las que está expuesto el suelo.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal determinar la influencia que genera la humedad natural de un suelo en su potencial expansivo, considerando además factores adicionales que intervienen. Se presenta una serie de ensayos, en donde se analizan las condiciones en las que se puede obtener grandes magnitudes de deformación o presión por expansión. Se ha trabajado con una metodología cuantitativa basada en métodos elaborados por la INEN y la ASTM D18 Committee, contrastando los procesos elaborados con lo descrito en la normativa. Los recursos y equipos utilizados cuentan con el aval del Laboratorio de Suelos y Geotecnia de la Universidad de Cuenca.

El resultado final sirve de referencia para el profesional y el estudiante interesado en la influencia de la humedad del suelo en el potencial de expansión e hinchamiento de los suelos de Miraflores, Challuabamba y Cojitambo. La organización de este documento inicia con una parte introductoria, en la que se realiza una revisión bibliográfica de los valores de potencial expansivo, parámetros característicos del suelo, cualidades físico-mecánicas y humedades registradas en la ciudad de Cuenca y sus alrededores, sitios que han sido investigados anteriormente desde el punto de vista de la expansividad. A continuación, se detalla un marco teórico en el que se explica el comportamiento de los suelos expansivos, los minerales presentes, las condiciones ambientales y factores que influyen en la magnitud del potencial de expansión. Después, dentro de la metodología,



se cubren los ensayos y métodos utilizados, la explicación de la caracterización y clasificación del suelo y los métodos estadísticos manejados. Finalmente, se presentan los resultados y discusiones de los procesos anteriormente realizados y su comparación con correlaciones y valores que han sido determinados en estudios semejantes, para concluir con las curvas de *humedad inicial vs. presión de expansión* de los suelos de interés.

1.1. Antecedentes y justificación

Diferentes estudios dan cuenta de la importancia de la influencia de factores en la expansividad de los suelos: Johnson (1969) manifestó que “Las arcillas secas se hinchan más que las húmedas debido a la relación directa entre el contenido de agua y las presiones de succión”; en España, Villar & Lloret (2008) demostró la influencia del peso específico seco y contenido de agua en la expansión de suelos bentoníticos; Huang et al. (2019), investigó la influencia del contenido inicial de agua y peso específico seco en arcillas de la zona de Yi-Chang, China. Estudios que han seguido la misma línea, obteniendo resultados relevantes sobre suelos arcillosos en diversos contextos.

En Ecuador, a raíz de la catástrofe de la Josefina (1994), en el denominado Proyecto PRECUPA “Prevención de desastres naturales en la cuenca del río Paute, Ecuador”, se inician los primeros estudios sobre suelos; el informe fue publicado en 1998 y marca el principio de las clasificaciones de suelo en el ámbito local, dando una descripción geológica y sus parámetros físico-mecánicos; aunque mencionando ligeramente su expansividad. Continúan esta línea de investigación otros autores como Arízaga & Sánchez (2005) en su publicación “Estudio de los suelos expansivos en el sector de Miraflores de la ciudad de Cuenca” y Guncay & Morocho (2005) en el “Estudio de los suelos expansivos en Cuenca: sector Parroquia Bellavista”, donde ya incluyen presiones de expansión. Otro estudio importante es una investigación de correlaciones entre índices de suelo, como límites de consistencia y potenciales expansivos (Vélez, 2012), en este caso, se trabajó exclusivamente con arcillas de la zona de Challuabamba, sector históricamente conocido por tener un alto potencial expansivo. Finalmente, dos estudios con muestras cercanas a las estudiadas, se puede evidenciar en “Métodos para controlar el potencial expansivo en suelos arcillosos de la ciudad de Cuenca”, (Bravo & Daza, 2019) y en “Caracterización de suelos expansivos de la ciudad de Cuenca” (Idrovo, 2019). Todos estos estudios hacen alusión a la necesidad de conocer la ubicación de los suelos expansivos en nuestra localidad y su potencial expansivo.

Las publicaciones realizadas por estos autores demuestran los estudios de expansividad, quedando pendiente abordar los análisis cuantitativos de los factores que influyen el proceso físico que da lugar al hinchamiento y que no han sido realizados en suelos de la localidad, dada principalmente por la influencia de la humedad inicial en el comportamiento expansivo.

En esta virtud, el objetivo de esta investigación, es definir la influencia directa de la humedad en los problemas de hinchamiento de suelos. Ensayos de expansión enfocados en esta dirección se verifican en varios lugares del mundo, sin embargo, no se presentan estudios para zonas de la parte austral del Ecuador. Además, existen varios métodos para determinar la magnitud del potencial expansivo, es preciso entonces definir las condiciones en las que se realizan los ensayos. Definir los tipos de muestras y la metodología seguida servirá de base para comprender los resultados obtenidos y contrarrestar con lo obtenido para suelos de nuestro medio.



1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar la influencia de la humedad natural del suelo en su potencial expansivo, en suelos de la ciudad de Cuenca.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Recolectar y resumir aportes de literatura relacionados a la expansión en suelos, incluyendo: la ubicación de depósitos de suelos expansivos, el potencial expansivo, los ensayos y metodologías utilizadas y las correlaciones empíricas.
2. Caracterizar el potencial expansivo a través de ensayos y mediante distintas metodologías.
3. Establecer los mejores mecanismos para determinar la expansión de los suelos.
4. Relacionar el potencial expansivo versus la humedad natural del suelo en estudio.



2. MARCO TEÓRICO

2.1. Suelos expansivos

Para una mejor comprensión del tema de interés, se procede a definir ciertos términos usados frecuentemente a lo largo de este documento:

Suelo expansivo es una expresión que se suele utilizar para definir cualquier suelo o material rocoso que tenga la capacidad de contraerse o expandirse cuando existen condiciones cambiantes de humedad (Nelson et al., 2015). La **presión de expansión** se define como la carga necesaria para la cual la relación de vacíos permanece constante. Se mantiene un mismo volumen inicial a medida que incrementa la humedad (Vélez, 2012). La **deformación por expansión** es la magnitud del incremento de volumen medido en la dirección en la que la muestra no se encuentra confinada, producida generalmente por un cambio brusco de humedad (Lambe & Whitman, 1969).

Estos términos se suelen utilizar para definir el **potencial de hinchamiento**. A mayor potencial, es más probable que los problemas de expansión comiencen a aparecer, ya que las deformaciones que pueden tener son mucho mayores que las deformaciones elásticas y no pueden estudiarse mediante la teoría de la plasticidad o por la elasticidad clásica. Este movimiento suele ser diferente, irregular y de una magnitud que provoca grandes problemas en las estructuras (Méndez & Pineda, 2001).

Por este motivo, resulta significativo entender la importancia de todo aquello que defina una magnitud alta del potencial expansivo. Comportamientos de suelos con estas características y algunos de los factores que intervienen se analizan a continuación, siendo la base para ensayos de laboratorio realizados en el presente documento.

2.1.1. Comportamiento de suelos expansivos

La forma en la que los suelos expansivos se hinchan es difícil de comprender, pues se produce cuando existen cambios en la humedad que alteran el equilibrio de fuerzas internas. Para llegar a dicho equilibrio, el espaciamiento de las partículas de suelo cambia. Este cambio del espacio es lo que se conoce como expansión o contracción (Nelson & Miller, 1992).

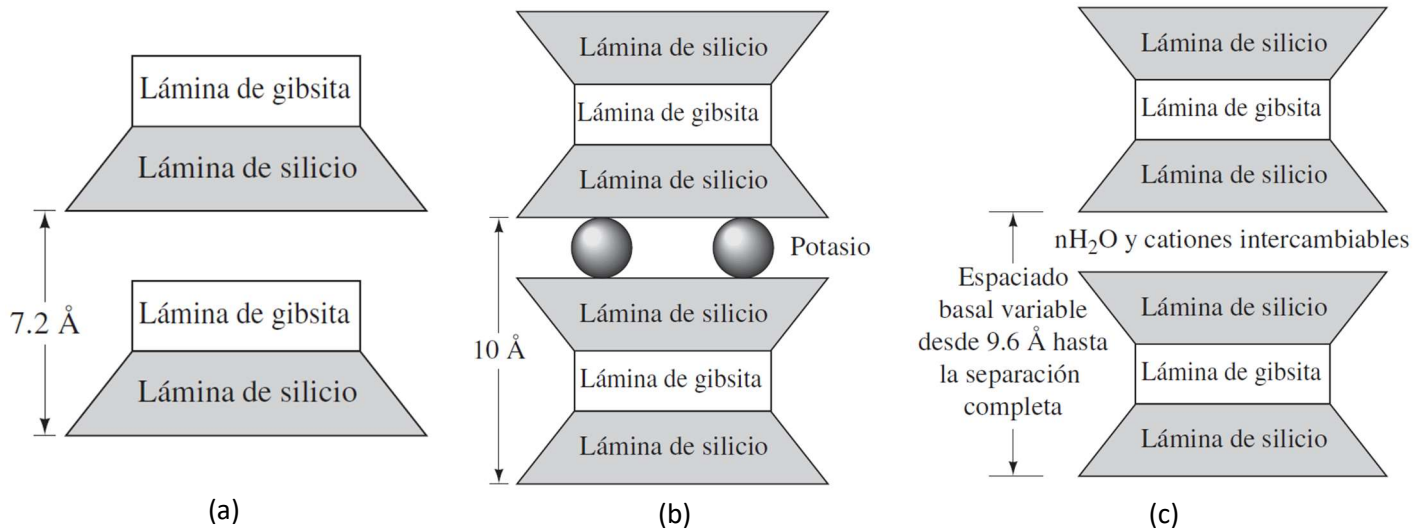
Los suelos expansivos son generalmente arcillosos, con partículas planas que tienen carga eléctrica negativa sobre su superficie y carga eléctrica positiva en su eje. Desde una perspectiva química, los minerales de arcilla son silicatos de aluminio y/o hierro y magnesio, representada por una combinación de dos unidades estructurales simples: el tetraedro de silicio y el octaedro de aluminio-magnesio (Grim, 1968). La combinación de unidades tetraédricas da una *lámina de silicio*, mientras que la octaédricas resulta en *láminas de gibsita* (Braja Das, 2015). Si se combinan estas formas se pueden crear diferentes minerales arcillosos, pero los más importantes son:

1. Caolinita
2. Illita
3. Montmorillonita

La *caolinita* está compuesta de repetidas capas de silicio y gibsita, cada capa tiene un espesor aproximado de 7.2 \AA ($72 \times 10^{-11} \text{ m}$). La *illita* es una lámina de gibsita unida a dos láminas de sílice, una en la parte inferior y otra en la parte superior, con un espesor aproximado de 10 \AA . Finalmente, la *montmorillonita* posee una estructura parecida a la illita, con una lámina de gibsita entre láminas de sílice; cada capa tiene un espaciado variable desde 9.6 \AA hasta la separación completa (Braja Das, 2015). La estructura diagramada de estos minerales se observa en la Figura 1.



Figura 1. Estructura de los minerales de arcilla: caolinita, illita y montmorillonita.



(a) (b) (c)
Nota. La figura muestra el diagrama de las estructuras de: (a) caolinita; (b) illita; (c) montmorillonita. Fuente: Braja Das (2015).

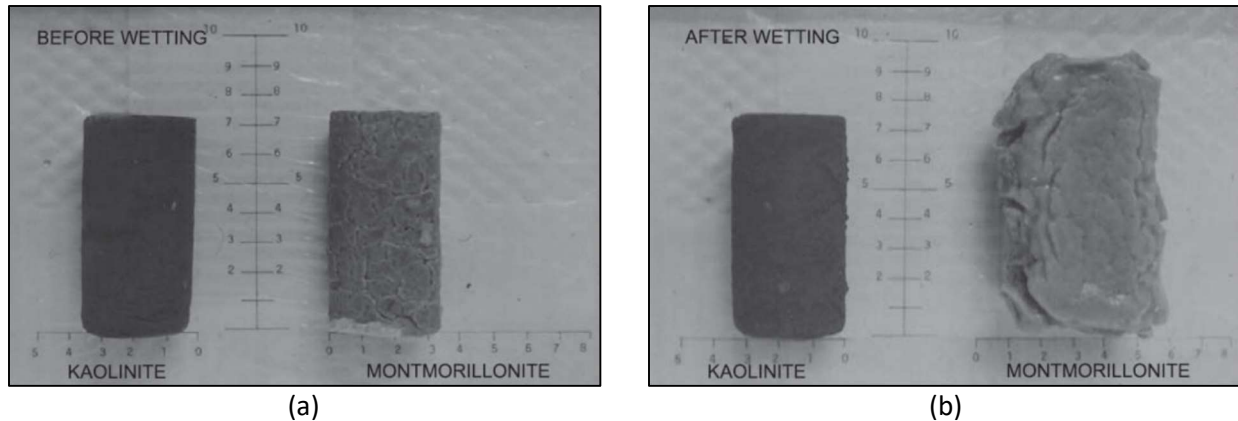
De acuerdo a Vélez (2012), todos los suelos que contengan estas partículas de arcilla van a presentar variación en su volumen. Algunos de estos suelos se expandirán más que otros principalmente en función de su humedad. Se observarán cambios más extremos cuanto mayor sea la porción de partículas menor a 2 micras ($0.002mm$) y también según cuán mayor sea la cantidad del mineral **montmorillonita**.

Por ejemplo, la bentonita es un término que se refiere a arcillas ricas en montmorillonita haciendo referencia a suelos altamente expansivos. Se usa para varios propósitos, como cosméticos, espesantes de pintura, fluidos de perforación, zanjas de lechada, entre otros (Nelson et al., 2015). Pero es necesario especificar que, en base a su comportamiento se puede diferenciar entre bentonitas naturales altamente expansivas (sódicas) y bentonitas naturales poco expansivas (cálcicas).

Según Nelson et al. (2015), suelos con componente mineralógico de la caolinita e illita son menos expansivos debido a la existencia de iones de potasio entre sus partículas, haciendo que se produzca un fuerte enlace entre ellas (Figura 1). En el caso de la montmorillonita, la unión entre las dos láminas está constituida por fuerzas de Van der Waals más débiles. Un ejemplo visual se puede observar en la Figura 2, en la cual se muestran dos suelos compactados, uno de caolinita y otro de montmorillonita. Las dos se colocaron en agua y se dejaron hinchar. Se observa claramente la diferencia de su crecimiento.

En base a la información expuesta, se llega a la conclusión de que generalmente los suelos son expansivos debido a su contenido de finos, su composición mineralógica y a las condiciones cambiantes de humedad que se pueden dar en su entorno.

Figura 2. Experimento con muestras de caolinita y montmorillonita.



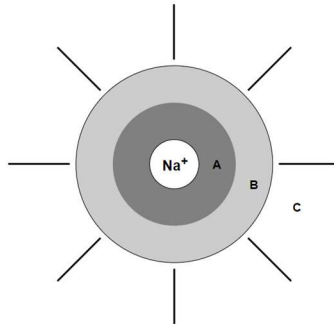
Nota. En la figura se observan: Muestras de caolinita y montmorillonita: (a) secas; (b) húmedas.

Fuente: Nelson et al. (2015).

2.1.2. Hidratación de las partículas de suelo

El agua interactúa con las partículas de suelo principalmente como agua adsorbida, la cual consiste de cationes hidratados y agua atraída por la concentración de cationes. A continuación, se describe a más detalle, los fundamentos bajo los cuales se relacionan las partículas de suelo y el agua.

Figura 3. Modelo de ión hidratado.



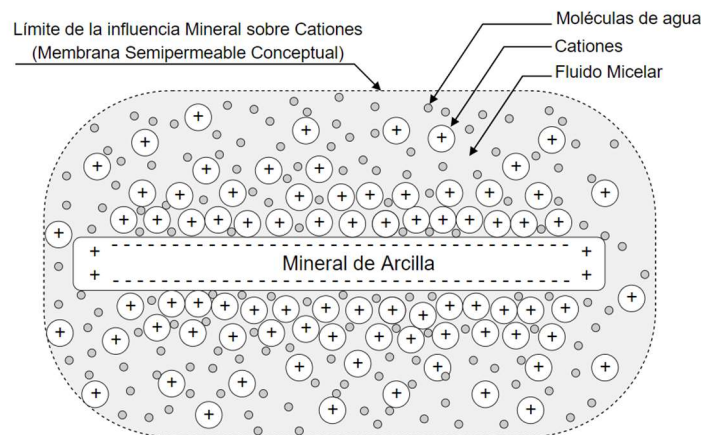
Nota. La figura muestra la interacción agua iónica: A) Región de inmovilización, B) Región de ruptura de la estructura y C) Agua estructuralmente "normal". Fuente: Frank & Wen (1957).

En primer lugar, se tiene los cationes que rodean la partícula de mineral de arcilla, la carga negativa que está en la superficie plana de la partícula de arcilla se equilibra con estos cationes. Además, estos cationes tienen la capacidad de hidratarse atrayendo el polo negativo de las moléculas de agua (hidrógeno). A modo de ejemplo, se considera al sodio (Na^+) como el catión presente, ya que este suele estar presente con un gran potencial expansivo. Según Lambe & Whitman (1969), el tamaño de los radios de iones de sodio no hidratados suelen estar cerca de $0,98 \text{ \AA}$ ($9,8 \times 10^{-11} \text{ m}$), mientras que los hidratados cercanos a $7,8 \text{ \AA}$ ($78 \times 10^{-11} \text{ m}$). Es decir, al pasar de estado seco a completamente húmedo, el ión puede aumentar de tamaño en más de siete veces. Lo que explica en parte la influencia de la humedad en la expansión. En base a procesos de hidratación, los cationes pueden encontrarse en distintas regiones. Frank & Wen (1957) propusieron un modelo de ion hidratado como se ve en la Figura 3. En la sección A, de inmovilización, las moléculas de agua están fuertemente retenidas y se consideran prácticamente unidas permanentemente con el ión, en la

sección B, las moléculas de agua están fuertemente ligadas al ión, pero pueden ser eliminadas sometiendo a las partículas a altas temperaturas, mientras que la sección C está compuesta de agua ligeramente atraída por el ión, y se puede separar fácilmente (Nelson et al., 2015).

Además del agua presente en los cationes hidratados, se tiene que la concentración de cationes causa una atracción osmótica, es decir el paso de agua de un medio de menor concentración iónica a un medio de mayor concentración, que, sumado a las cargas negativas de la partícula de suelo, hace que se genere la acumulación de más agua alrededor de la partícula de arcilla. En su análisis, estos tres elementos: la partícula de arcilla, los cationes y el agua, se unifican para formar lo que Lambe (1958) denominó la *micela de arcilla*, una representación gráfica propuesta por Nelson et al. (2015) se muestra en la Figura 4. La micela está conformada por estos tres elementos en la zona en la que la partícula de arcilla tiene una influencia sobre la concentración de cationes en el agua.

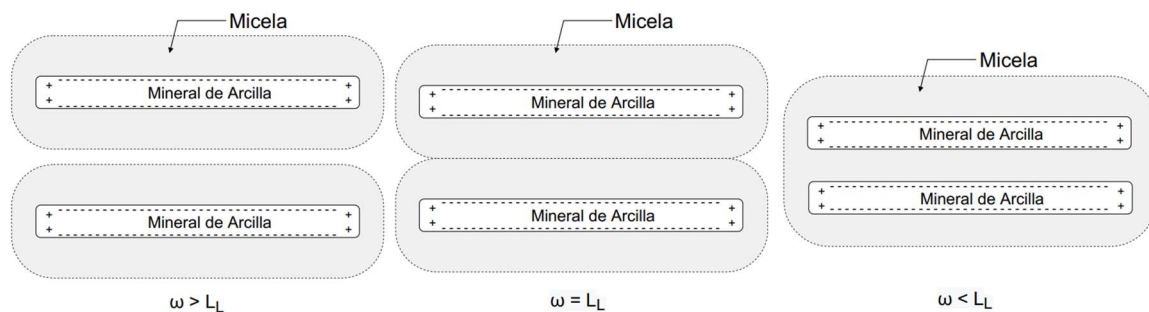
Figura 4. Micela de arcilla.



Nota. Micela de arcilla que muestra la concentración de cationes cerca de la superficie de una partícula de arcilla. Fuente: Modificado de Nelson et al. (2015)

Es así que a medida que incrementa el contenido de agua de una muestra, aumenta tanto el contenido del agua de hidratación de cationes, como el agua producto de la atracción osmótica, por lo que los espacios entre minerales de arcilla aumentan, como se muestra en la Figura 5. Conforme estos espacios aumentan, incrementa el volumen de la masa de suelo; resultado de este hinchamiento se pueden generar presiones de expansión.

Figura 5. Hidratación de minerales de arcilla en relación al límite líquido LL.



Nota. Fuente: Modificado de Nelson et al. (2015)



2.1.3. Factores que influyen en la expansión de los suelos

El potencial expansivo se puede ver afectado por características propias de un suelo. A continuación, se expresa en la Tabla 1 de manera general, las propiedades del suelo que pueden llegar a influir en su expansión.

Tabla 1. Propiedades del suelo que influyen en el potencial de expansión.

Factor	Descripción
Mineralogía de la arcilla	Los minerales de arcilla que suelen ayudar a la expansión son las montmorillonitas. También existen illitas y caolinitas, que causan un cambio bajo en su volumen.
Química del agua del suelo	Cuando el agua tiene mayor concentración y cationes de mayor valencia, la expansión disminuye.
Plasticidad	Los suelos con un comportamiento plástico en grandes rangos de humedad y con un límite líquido alto, tienen un mayor potencial de expansión.
Estructura y tejido del suelo	Las arcillas floculadas son más expansivas que las arcillas dispersas. La estructura se altera por compactación cuando se aumenta agua o cuando se remoldea.
Densidad seca	Una densidad más alta significa que hay menos espacio entre partículas, lo que representa mayores fuerzas repulsivas y un mayor potencial de expansión.

Nota. Información tomada de Nelson & Miller (1992)

Algunas de estas propiedades se analizarán con base en aplicaciones y ensayos de laboratorio. Estas propiedades representan factores generales que pueden incidir directamente en el potencial expansivo, definido por la deformación y presión de expansión de los suelos.

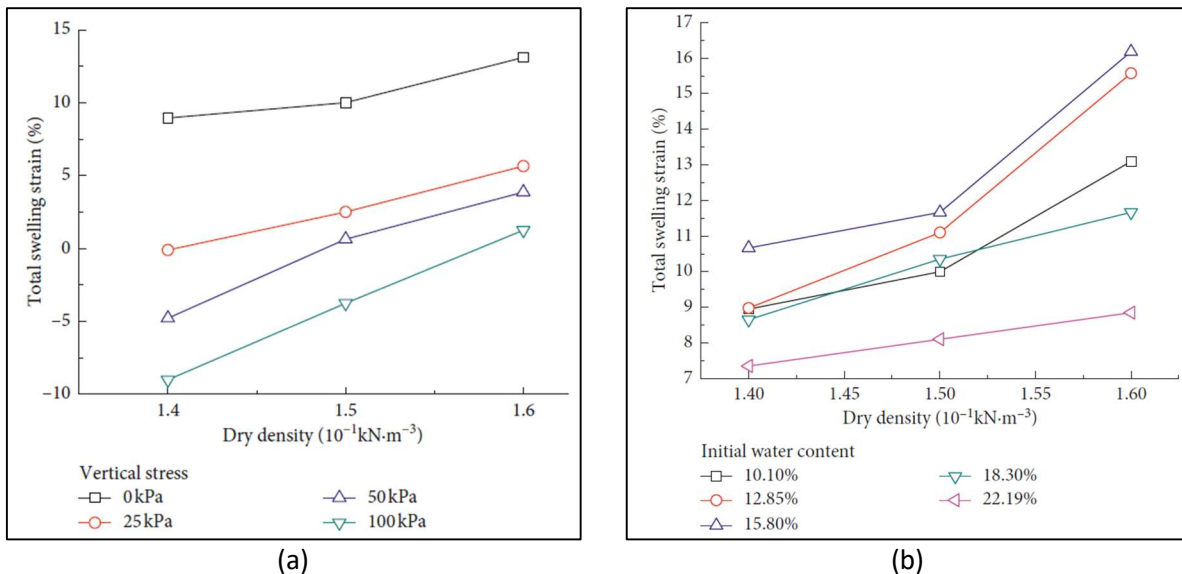
Para el análisis de las propiedades descritas a continuación se tiene una guía de estudios realizados por Huang et al. (2019), Villar & Lloret (2008) y Chen (1973). Estos trabajos presentan estudios de suelo basados en ensayos para cuantificar factores que afectan la expansión. Sus muestras de suelo fueron obtenidas de Hubei, Guangxi y Yunnan, China y de Cortijo de Archidona, Almería, España. Suelos estudiados con una cantidad superior al 90% del componente mineralógico montmorillonita, considerado un material problemático expansivo en el campo de la ingeniería geotécnica.

Dentro de los estudios considerados, se podrían incluir también ensayos de otros autores como Attom & Barakat (2000), Basma & Husein (1995) y otros que también presentan relaciones de deformación y presión de expansión con la densidad seca, humedad inicial o variación de volumen. Sus conclusiones y resultados son similares a la expuestos a continuación, por lo que se optó por explicar únicamente los trabajos más destacados.

2.1.3.1. Factores que influyen en la deformación por expansión

Efecto de la densidad seca. En la Figura 6a se muestra una gráfica que explica la influencia de la densidad seca en la deformación por expansión, analizando para una humedad y un esfuerzo vertical constante. Se observa que la deformación incrementa con la densidad seca, los vacíos entre las partículas del suelo son menores, lo que provoca un aumento en la presión expansiva (Huang et al., 2019). Lógicamente, la deformación expansiva sin carga impuesta fue mucho mayor que la de las muestras bajo esfuerzo vertical mayor; entonces la expansión disminuye a mayor esfuerzo vertical impuesto. Respecto a la humedad, no se ve una tendencia constante; cuando la humedad es menor a 15%, para algunos casos la expansión se mantiene o incrementa con la humedad; cuando la humedad supera el 15%, la expansión disminuye conforme crece la humedad.

Figura 6. Relación entre la deformación por expansión y la densidad seca de suelos expansivos.

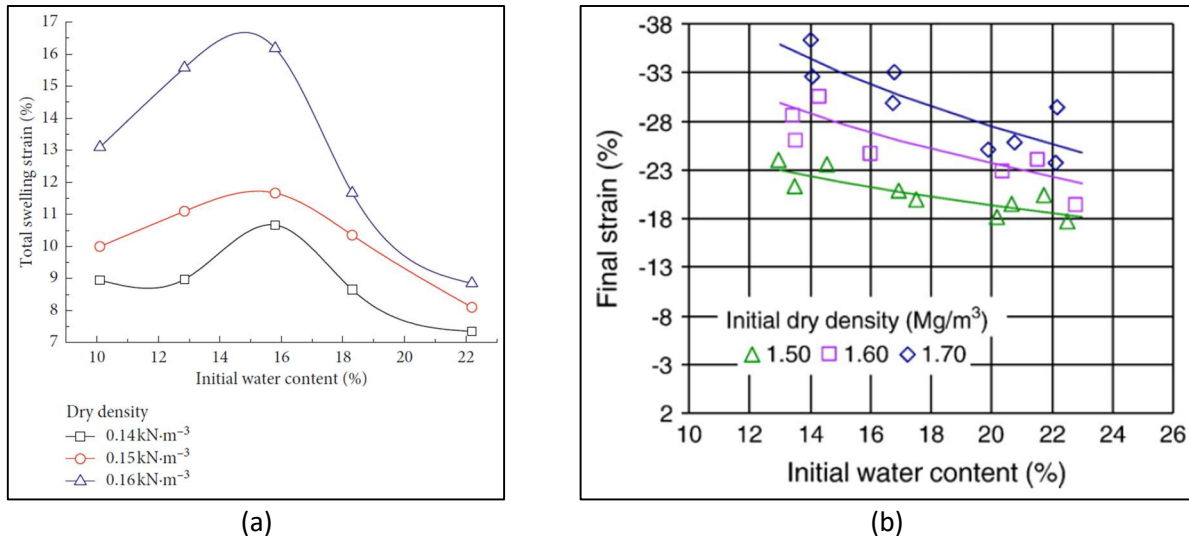


Nota. La figura muestra la relación entre la deformación y la densidad seca según la condición: (a) con humedad constante; (b) sin esfuerzo vertical. Fuente: Huang et al. (2019).

Como se pudo observar anteriormente en la Figura 6a, la mayor deformación por expansión se produce cuando la carga axial es la más baja, siempre que se tengan las mismas condiciones de humedad inicial y densidad seca. Huang et al. (2019) elaboró ensayos para determinar el efecto de la presión axial sobre el potencial expansivo, sin embargo, para propósitos de este documento de tesis no resulta relevante analizarlo a profundidad.

Efecto de la humedad inicial. Huang et al. (2019) y Villar & Lloret (2008) realizaron estudios para diferentes valores de densidad seca. En el primer ensayo de la Figura 7, la deformación por expansión aumentó hasta cierto punto, para luego reducirse. Mientras que, en el segundo ensayo, la deformación por expansión siempre disminuye con el aumento de humedad.

Figura 7. Efecto de la humedad inicial sobre la deformación por expansión variando la densidad seca.

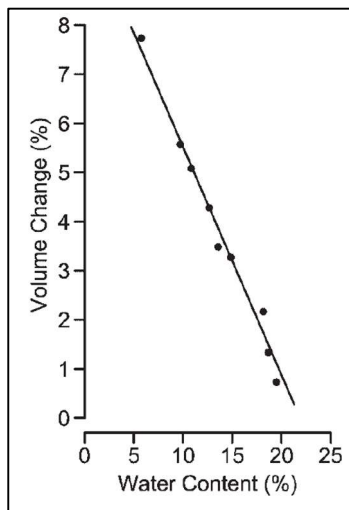


Nota. La figura muestra el efecto del contenido inicial de agua sobre la deformación por expansión al variar la densidad seca: (a) Según Huang et al. (2019); (b) Según Villar & Lloret (2008).

Estudios concluyentes de varios autores, Jayalath et al. (2016), Çimen et al. (2012), Attom & Barakat (2000), Dafalla (2012) y Villar & Lloret (2008), señalan que la deformación por expansión generalmente disminuye a medida que la humedad aumenta, como se puede observar también en la Figura 7b. Esto entra en discrepancia con la particularidad del estudio propuesto por Huang et al. (2019), debido a que es el único autor, comparando las conclusiones planteadas por el resto de autores analizados en este documento, que propone resultados de deformación por expansión que primero ascienden y luego descienden.

De igual manera, Chen (1973) realizó pruebas de expansión con la misma densidad inicial y aumentando el contenido de agua. Esto se observa a continuación, donde el hinchamiento claramente se reduce conforme incrementa el contenido de agua inicial.

Figura 8. Efecto del contenido de agua inicial y la densidad seca sobre la deformación por expansión.

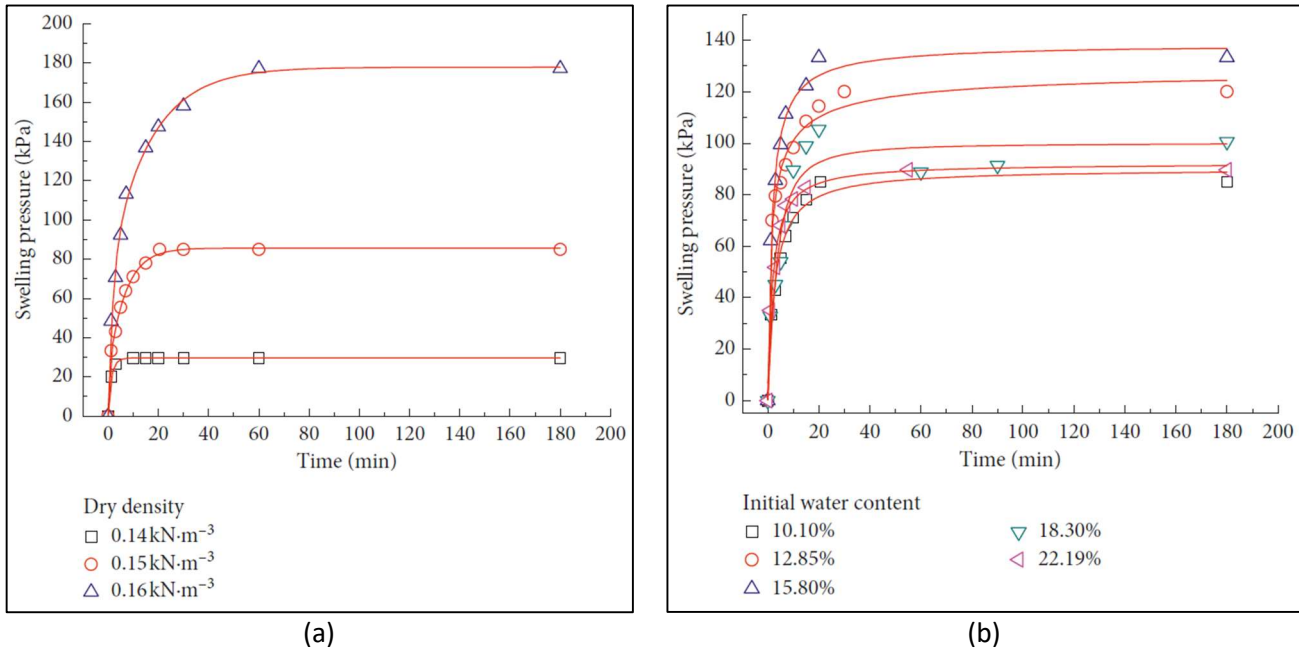


Fuente: Chen (1973).

2.1.3.2. Factores que influyen en la presión de expansión

Tiempo. En la Figura 9, en base al ensayo realizado por Huang et al. (2019), se pueden observar dos gráficas de tiempo vs. presión de expansión. En la primera varía la densidad seca con una humedad inicial constante, mientras que en la segunda varía la humedad con una densidad seca constante.

Figura 9. Relación entre la presión de expansión y el tiempo.



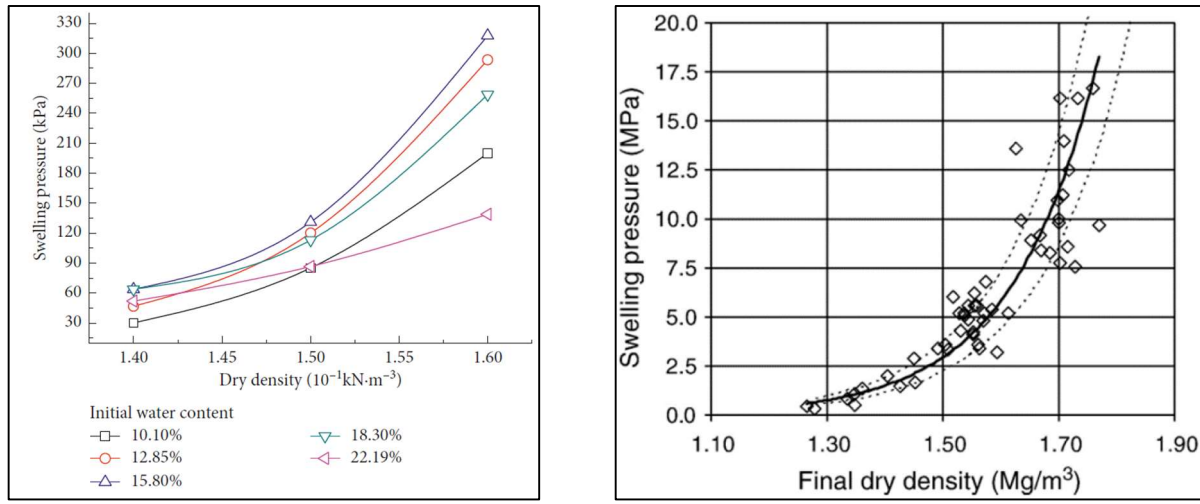
Nota. La figura muestra los ensayos con: (a) contenido de agua inicial constante; (b) densidad seca constante. Fuente: Huang et al. (2019).

Para las dos figuras, se pueden describir en tres fases distintas. Primero, la presión de expansión aumenta de manera brusca al entrar en contacto con el agua. Luego, la presión de hinchamiento incrementa lentamente a medida que pasa el tiempo en comparación con la primera etapa. Finalmente, las muestras se saturan y la presión de hinchamiento no cambia más (Huang et al., 2019). Se puede observar que la presión de expansión aumenta con la densidad seca, mientras que no se tiene una tendencia clara con el contenido inicial de agua. A medida que la humedad incrementa, en una primera instancia se incrementa la presión de expansión, luego disminuye.

También se concluye que, a mayor densidad seca, mayor es el tiempo en el que la muestra se estabiliza en un valor constante de presión de expansión.

Efecto de densidad seca. Huang et al. (2019) y Villar & Lloret (2008) propusieron ensayos para definir la relación de presión de expansión vs. densidad seca, aumentando el contenido inicial de agua. Para los dos estudios presentados de la Figura 10, la presión de hinchamiento aumentó conforme se incrementa el valor de densidad seca.

Figura 10. Relación de presión de expansión y densidad seca.



(a)

(b)

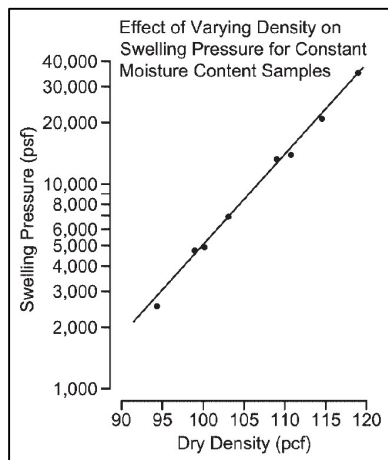
Nota. La figura muestra los ensayos con: (a) diferentes contenidos de agua iniciales (Huang et al., 2019); (b) humedad constante (Villar & Lloret, 2008).

Para el ensayo propuesto por Huang et al. (2019) (Figura 10a), se llega a la conclusión de que el suelo incrementa sustancialmente la presión de expansión cuando la densidad seca supera los 15 KN/m³; bajo este valor los cambios máximos de presión de expansión bordean alrededor del 40%.

Se entendió también, que la expansión del suelo se produjo gracias a la cantidad de agua que se adsorbe en las capas de montmorillonita, llenando los vacíos en la muestra en condiciones confinadas (Huang et al., 2019).

Chen (1973) también realizó pruebas de expansión manteniendo constante con la humedad inicial de la muestra. En la Figura 11, se observa que la densidad inicial afectó en gran manera a la presión de expansión. Por lo tanto, se llega a la conclusión de que cuanto más seco y denso inicialmente sea la muestra de suelo, mayor será el potencial de expansión.

Figura 11. Efecto de la densidad seca sobre la presión de expansión.

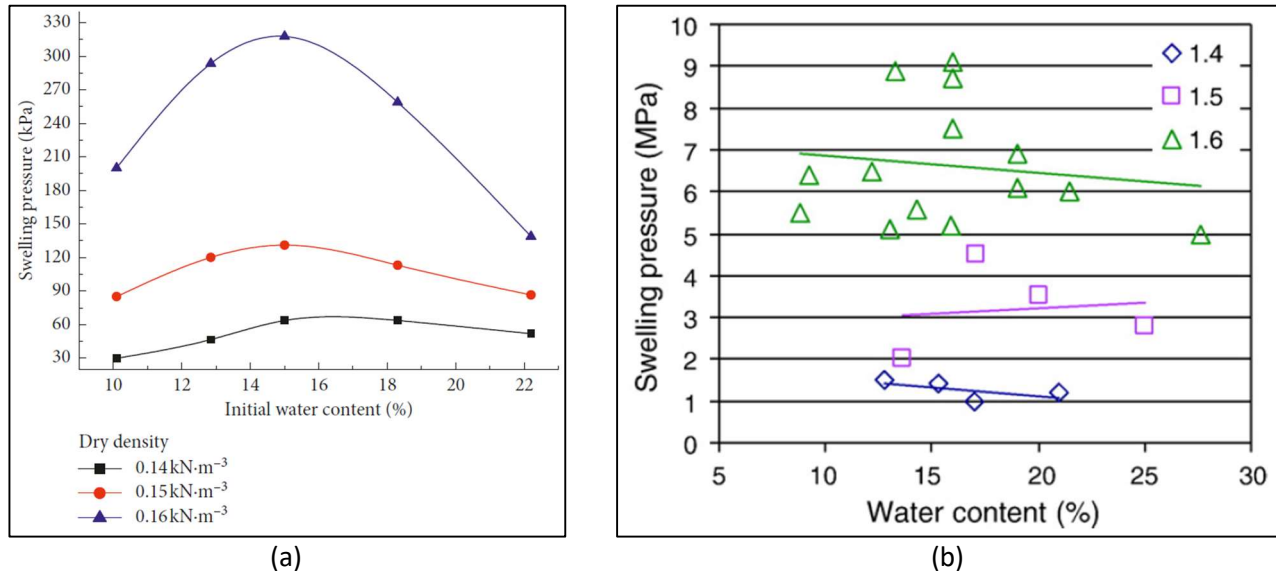


Fuente: Chen (1973).



Efecto de la humedad inicial. Huang et al. (2019) y Villar & Lloret (2008) elaboraron ensayos relacionando la humedad inicial con la presión de expansión al variar la densidad seca. En el primer estudio de la Figura 12, la presión de expansión aumentó hasta cierto punto, para luego reducirse. Mientras que, en el segundo ensayo, la presión de expansión disminuye con el aumento de humedad. Caso similar que se obtuvo en la relación de humedad vs. deformación por expansión.

Figura 12. Relación entre esfuerzo expansivo y contenido de humedad para diversas densidades secas.



Fuente: (a) Según Huang et al. (2019); (b) Según Villar & Lloret (2008)

Una vez analizados los resultados de estos ensayos queda definido que, la densidad seca, la presión axial y la humedad inicial son capaces de afectar directamente al potencial expansivo de los suelos. Adicionalmente, es importante entender que el motivo por el que estos factores varían tan bruscamente en campo es gracias a condiciones ambientales, explicadas a continuación.

2.1.3.3. Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales a las que un suelo está expuesto son las principales causantes de la modificación de propiedades que podrían afectar el potencial expansivo. La variación de humedad inicial es una de las más importantes, ya que un suelo expansivo inicialmente seco tendrá más afinidad por el agua, que el mismo suelo con mayor humedad. Esto ocurre principalmente en los primeros metros del perfil de suelo donde se produce la mayor expansión y contracción, conocida como *zona activa*. Según Nelson & Miller (1992), algunos de los factores que pueden causar un cambio brusco de humedad son:

- **Clima.** Considerando la magnitud y periodo de la lluvia y los climas semiáridos con periodos de humedad cortos.
- **Agua subterránea.** Con mayor cantidad de agua en capas freáticas.
- **Drenaje y fuentes de agua superficiales.** En donde se incluyen tuberías con fugas y fuentes estancadas de agua en la superficie, como charcos.
- **Vegetación.** El pasto y árboles hacen que el suelo se humedezca de manera diferente.



Adicionalmente a los cambios de humedad, las condiciones de tensión en el suelo podrían causar mayor potencial expansivo (Nelson & Miller, 1992), siendo:

- **Historia de tensión.** Un suelo sobreconsolidado es más expansivo que un suelo normalmente consolidado, aunque mantengan la misma relación de vacíos.
- **Carga.** La cantidad de carga sobre el suelo determina el cambio de volumen que habrá para una cantidad definida de humedad y densidad.
- **Perfil de suelo.** El ancho y ubicación de estratos expansivos influyen en el potencial de expansión.

Las condiciones mencionadas afectarán en mayor magnitud al suelo que se encuentre en la zona activa. Según Nelson & Miller (1992), esta zona generalmente suele estar entre 4.5 y 6.0 metros de profundidad. Las estimaciones de profundidad de la zona activa de menos de 3 metros no son confiables y se debería dudar de estos resultados. Sin embargo, según Vélez (2012), suelos de Challuabamba si poseen una capa activa del suelo de entre 2.0 a 2.5 metros.

Considerando que las muestras de suelo extraídas para los ensayos de la sección 4.3 estarán dentro de los primeros metros de los perfiles de suelo analizados, hay que tener en cuenta que serán aquellos que rangos más amplios de variación de humedad presenten.

2.2. Caracterización de suelos expansivos

Existen factores que deben identificarse al caracterizar un sitio en donde puedan existir problemas de expansión o contracción:

- Condiciones ambientales
- Propiedades expansivas o de contracción del suelo

Las condiciones ambientales, abordadas en la sección anterior, generalmente son analizadas en campo en base a lo que ocurre en su entorno natural, siendo importante identificar aquello que pueda causar que el suelo cambie de humedad y aumente su potencial expansivo. Se puede realizar una inspección visual, sin embargo, como menciona Vélez (2012), métodos visuales e indirectos otorgan interpretaciones superficiales y con datos muy variables. Por este motivo, es necesario recurrir a métodos directos, determinando las propiedades expansivas.

Las propiedades expansivas o de contracción suelen ser más difíciles de interpretar en campo, siendo necesario extraer muestras para ser llevadas a laboratorio y realizar ensayos basados en normativas, definiendo cuantitativamente sus características. A continuación, se definen estas propiedades.

2.2.1. Humedad

La determinación de este factor es necesario para precisar rangos de humedad natural, para ensayos de límites de Atterberg y con el fin de conocer la humedad de cada muestra en ensayos de expansión libre y controlada. La norma ecuatoriana de referencia es la *NTE INEN 0690: "Mecánica de suelos. Determinación del contenido de agua. Método del secado al horno."*, basada principalmente en la normativa *ASTM D2216 "Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo y/o roca por masa"*.



Dado que la humedad es un factor central del presente trabajo de investigación, se pormenoriza la normativa de referencia (*NTE INEN 0690*), que detalla los procesos realizados para obtenerla. El procedimiento consiste en medir la masa del recipiente (m_1) que contendrá la muestra, posteriormente se coloca la masa de suelo húmeda dentro del recipiente y se determina su masa (m_2), para después secarla en horno a temperatura de $110\pm 5^\circ\text{C}$ hasta llegar a una masa constante y volver a cuantificar su masa (m_3), en esta ocasión seca (*INEN, 1982a*). El cálculo de la humedad se realiza en función de los tres datos antes descritos expresados en la siguiente ecuación.

$$\omega[\%] = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \cdot 100 \quad (1)$$

La masa mínima de muestra en muestras con tamaño máximo de partícula de 2mm es de 50gr y la balanza a utilizarse en casos de muestras de 100gr o menos es de 0.01gr de precisión.

2.2.2. Peso específico

El peso específico es la relación entre el peso y el volumen total de una muestra de suelo. Bajo un concepto similar existen relaciones derivadas de especial interés; una de ellas es el peso específico seco el cual indica la cantidad de masa que corresponde a la porción seca de un volumen total de material húmedo, esta relación fundamental es la que se ha utilizado de manera general como parámetro de control en estudios de factores de influencia sobre expansividad, debido a que no está directamente relacionada con el contenido de agua de una muestra, de modo que se pueden aislar dos factores de influencia: humedad y peso específico seco.

Además de las antes mencionadas existe una relación de particular interés, la gravedad específica llamada también peso específico relativo de la fase sólida. Es importante definirla debido a que es una propiedad invariable utilizada para varios ensayos de laboratorio y para el cálculo de otras relaciones fundamentales.

2.2.2.1. Gravedad específica (Gs)

Se define como la relación entre la masa de una unidad de volumen de partículas de sólidos del suelo y la masa del mismo volumen de agua (*ASTM D18 Committee, 2006*). Para su determinación se pueden considerar las normativas de referencia: *NTE INEN-ISO 11508. "Calidad del suelo. Determinación de la densidad de las partículas"* y su análoga la norma *ASTM D854 "Métodos de prueba estándar por picnómetro para Gravedad Específica de los sólidos del suelo"*. Los resultados obtenidos son especialmente importantes para el posterior análisis granulométrico y la distribución del tamaño de partículas principalmente en la porción de tamaño menor a $75\text{-}\mu\text{m}$ correspondiente al tamiz 200. El proceso del ensayo como se presenta en la normativa ASTM se describe de manera resumida al contexto, a continuación:

- En primer lugar, se realiza la calibración del matraz, donde se determina su masa mediante la utilización de una balanza con una precisión de 0.01gr por 5 ocasiones, reportando el promedio y verificando que la desviación estándar sea menor a 0.02gr. Una vez determinada su masa se llena hasta la marca de aforo con agua eliminando burbujas de agua y se eleva su temperatura a baño maría, posterior a esto se pesa el matraz con agua a 5 temperaturas diferentes entre 50°C y 20°C pesando en cada una de ellas el matraz con agua hasta la marca de aforo.
- Tras la calibración, se describen dos métodos:



- El "Método A" o procedimiento para muestras húmedas, se toma una porción de material húmedo se determina su humedad, y se calcula la cantidad necesaria de suelo húmedo de manera que la porción seca represente 35 ± 5 gr en el caso de arcilla y limo; utilizando un agitador mecánico se mezcla el suelo con aproximadamente 100 ml de agua, después se coloca esta mezcla en un matraz de 500 ml y se completa con agua, asegurándose de dejar bordes y paredes limpias.
- El "Método B" o procedimiento para muestras secadas al horno, para el caso de arcilla y limo se procede tomándose 35 ± 5 gr de suelo en el caso del matraz de 250ml y 50 ± 10 gr en el caso del matraz de 500ml. En primer lugar, se agrega agua en el matraz a entre $1/3$ y $1/2$ de su capacidad, se añade el suelo y agita la muestra, tras esto se completa hasta el aforo completo con agua asegurándose de limpiar las paredes del matraz, y se eliminan las burbujas.
- Con el matraz listo, se eleva su temperatura a baño maría y se toman tres lecturas de temperatura y peso (como se muestra en la figura 13) mientras el matraz alcanza el equilibrio térmico, la precisión requerida es de 0.5°C y 0.01 gr respectivamente, una vez terminado el ensayo se coloca la mezcla en una bandeja y se deja a secar en un horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, para finalmente registrar la masa seca de material con una precisión de 0.01 gr.

Los cálculos requeridos para la obtención de la gravedad específica son los siguientes:

- 1) Cálculo de la masa del matraz + agua a temperaturas determinadas:

$$M_{\rho w,t} = M_{\rho} + (V_{\rho} \cdot \rho_{w,t}) \quad (2)$$

Donde:

$M_{\rho w,t}$: Masa del matraz + agua a una temperatura determinada [gr]

M_{ρ} : Masa promedio del picnómetro vacío calibrado [gr]

V_{ρ} : Volumen promedio del picnómetro calibrado [ml]

$\rho_{w,t}$: Densidad del agua a una temperatura determinada [gr / ml]

- 2) Cálculo de la gravedad específica a determinada temperatura:

$$G_t = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{M_s}{(M_{\rho w,t} - (M_{\rho w,t} - M_s))} \quad (3)$$

Donde:

ρ_s : Densidad de fase sólida [gr / ml]

$\rho_{w,t}$: Densidad del agua a una temperatura determinada [gr/ml]

M_s : Masa de suelo secada al horno [gr]

$M_{\rho w,t}$: Masa del matraz + agua + suelo a una temperatura determinada [gr]

$M_{\rho w,t}$: Masa del matraz + agua a una temperatura determinada [gr]

- 3) Cálculo de la gravedad específica a 20°C :

$$G_{20^\circ\text{C}} = K \cdot G_t \quad (4)$$

Donde:

K : factor de temperatura (disponible en la normativa)



En caso de que exista una fracción de suelo retenida en el tamiz No. 4 (4.75mm) se requiere el siguiente cálculo adicional:

- 4) Cálculo de la gravedad específica a 20°C en caso de haber partículas superiores a 4.75mm:

$$G_{prom20^{\circ}C} = \frac{1}{\frac{R}{100 \cdot G_{1@20^{\circ}C}} + \frac{P}{100 \cdot G_{2@20^{\circ}C}}} \quad (5)$$

Donde:

R : Porcentaje de suelo retenido en el No.4 (4.75mm)

P : Porcentaje de suelo pasante tamiz No.4 (4.75mm)

$G_{1@20^{\circ}C}$: Gravedad específica de partículas superiores a 4.75mm (ASTM C127)

$G_{2@20^{\circ}C}$: Gravedad específica de partículas inferiores a 4.75mm

Figura 13. Utilización de balanza para pesado de matraz.



Nota. Fotografía capturada en el Laboratorio de Suelos y Geotecnia de la Universidad de Cuenca.

Fuente: elaboración propia.

2.2.3. Granulometría

El análisis por tamaño de partículas es abordado la normativa ecuatoriana *NTE INEN-ISO 14688-2 "Ingeniería geotécnica. Identificación y clasificación de suelos. Parte 2: principios de clasificación"*, el análisis también es abordado específicamente por la normativa *ASTM D422 "Método de prueba estándar para análisis de suelo por tamaño de partículas"*. La distribución se analiza en dos segmentos: uno para partículas de tamaño superior a 75- μ m correspondiente al tamiz 200, el cual se determina a través de una serie de tamices y en el caso de partículas de tamaño inferior a 75- μ m, que se halla mediante la utilización del hidrómetro. El proceso descrito por la normativa se presenta de forma resumida a continuación:

- En primer lugar, se tamiza utilizando el tamiz No. 10 (2mm), la porción retenida en este tamiz, es tamizada nuevamente a través de la serie de tamices: 3", 1½", 1", ¾", ⅜", No. 4 (4.75mm) y No. 10 (2mm), y se determinan las masas retenidas en cada tamiz, asegurándose que la suma de todos los pesos sea igual a la masa inicial total de forma que no se haya perdido material durante el tamizado.
- Para la porción pasante del tamiz No. 10 (2mm), se utiliza el método del hidrómetro para obtener la granulometría; es posible utilizar dos hidrómetros: 151H y 152H. El hidrómetro seleccionado se coloca en una solución de hexametáfosfato de sodio con una concentración de 5 gr/L, con el fin de determinar las correcciones por menisco y defloculante.
- Después de la calibración del hidrómetro, se prepara aproximadamente 50 gr de suelo seco el cual se añade una solución de 125ml de hexametáfosfato de sodio a razón de 40gr/L, se agita y se deja en reposo durante más de 16h. Paralelamente se toman aproximadamente 15 gr de suelo y se colocan en un horno a una temperatura de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ con el fin de determinar la humedad higroscópica, humedad ambiental absorbida por el suelo.
- Una vez reposada, la mezcla se vierte sobre un agitador mecánico obteniendo mediante lavado todos los residuos del recipiente en el cual reposó, de manera que no quede ningún residuo y se agita durante un minuto. Tras esto se coloca la mezcla en una probeta marcada de 1000ml y se completa la mezcla adicionando agua hasta el aforo. Una vez completado, se tapa usando la palma de la mano o un tapón de goma y se agita la probeta girando 180° de arriba hacia abajo, dando 60 giros en 1 minuto.
- Inmediatamente después de lista la mezcla, se coloca la probeta en un recipiente de agua que actúa como regulador de temperatura y contiene una probeta adicional llena de agua, esta sirve como muestra de control, como se muestra en la figura 14b. Apenas colocada la probeta se toma el tiempo y se realizan lecturas de temperatura e hidrómetro a los tiempos de: 2, 5, 14, 30, 60, 250 y 1440 minutos y lecturas adicionales que se crean convenientes.
- Una vez finalizado el ensayo de hidrómetro, se lava la mezcla resultante en el tamiz No. 200 (75- μm) hasta que el agua pasante fuera cristalina, se deja secar en el horno y se tamiza utilizando tamices entre el tamiz No.10 (2 mm) hasta el tamiz No. 200 (75- μm), como se muestra en la figura 14a. Una vez hecho este proceso se pueden determinar las porciones retenidas en cada tamiz, como el tamaño de partícula del análisis de hidrómetro.



Nota. Fotografías capturadas en el Laboratorio de Suelos y Geotecnia de la Universidad de Cuenca.
Fuente: elaboración propia.



El cálculo de diámetro de partícula para el análisis de hidrómetro se determina mediante una fórmula deducida a partir de la ecuación de Stokes, la cual se define como:

$$D = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot z}{(G_s - 1) \cdot \rho_w \cdot g \cdot t_D}} \quad (6)$$

Donde:

D : Diámetro de partícula [cm]

μ : Viscosidad dinámica a la temperatura de lectura [$gr/(cm \cdot s)$]

z : Longitud de caída desde punto de lectura del hidrómetro hasta el centro de volumen [cm]

G_s : Gravedad específica.

ρ_w : Densidad del agua a la temperatura de lectura [gr/cm^3]

g : Aceleración de la gravedad [$981 \text{ cm}/s^2$]

t_D : Tiempo transcurrido hasta la lectura [s]

El cálculo de porcentaje de suelo que permanece en suspensión depende del hidrómetro utilizado. A continuación, se muestran las ecuaciones para el hidrómetro 151H (ecuación 7) y para el hidrómetro 152H (ecuación 8).

$$P = \left[\left(\frac{100000}{W} \right) \times \frac{G}{G - G_1} \right] (R - G_1) \quad (7)$$

$$P = (R \cdot a/W) \times 100 \quad (8)$$

Donde:

a : Factor de corrección aplicado al hidrómetro 152H (disponible en la normativa ASTM D422)

P : Porcentaje de suelo en suspensión al momento de lectura

R : Lectura del hidrómetro corregida

W : Masa Total de suelo seca

G : Gravedad específica de las partículas

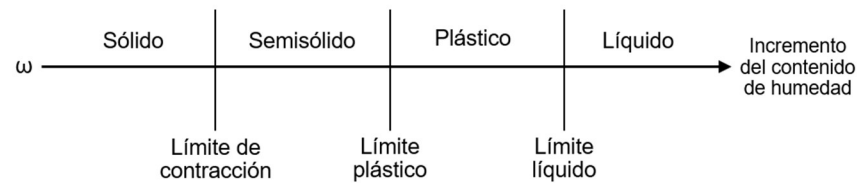
G_1 : Gravedad específica de la solución en la que están sumergidas las partículas

El análisis por cribado y por el método del hidrómetro deben ser conjugados para esto se debe determinar la porción pasante del tamiz No. 10, esta corresponde al total del material utilizado para el hidrómetro el cual se debe multiplicar por porcentaje de suelo pasante del tamiz en cuestión para obtener el porcentaje ajustado. El método ha sido descrito realizando la separación inicial para el uso del hidrómetro, en el tamiz No. 10, sin embargo, según la normativa ASTM D18 Committee (2002) la separación se puede hacer en el No. 4 (4,75 mm), No. 40 (425 μm), o el tamiz No. 200 (75 μm). A partir de la curva granulométrica, es posible determinar porcentajes de material menor a un cierto tamaño, lo cual es de utilidad para fines de clasificación como se describirá más adelante.

2.2.4. Límites de Atterberg

Los límites de consistencia de un suelo son parte de un método creado con el fin de describir la consistencia del mismo (Das, 2015). Este sistema fue creado por Albert Mauritz Atterberg y define cuatro estados de consistencia: sólido, semisólido, plástico y líquido, los mismos están separados por tres límites: límite de contracción, plástico y líquido, como se muestra en la figura 15.

Figura 15. Límites de Atterberg.



Fuente: Elaboración Propia

Mediante la determinación del límite líquido y límite plástico, se consigue calcular el índice de plasticidad, siendo la diferencia entre el límite líquido y el plástico y representa el rango de humedades en las cuales el suelo se comporta de forma plástica (ASTM D18 Committee, 2000b). Para los fines de este trabajo de investigación se profundiza en los límites líquido y plástico. Las normativas ecuatorianas que definen el procedimiento para su obtención son: *NTE INEN 0691 "Mecánica de suelos. Determinación del Límite líquido método de Casa Grande"*, *NTE INEN 0692: "Mecánica de suelos. Determinación del Límite plástico"*, normativas que coinciden con la norma: *ASTM D4318 "Métodos de prueba para límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos"*.

Para la obtención del límite líquido se utiliza el método de la cuchara de Casagrande; se distinguen el método multipunto descrito en la norma ASTM D4318 (2000), también referido como "método A" y el método de un solo punto también referido como "Método B". Los procedimientos de la normativa se describen de manera sintetizada, a continuación:

- En caso de usar material seco se toman de 150gr a 200gr de material pasante del tamiz No. 40 (425- μ m). En caso de usar material húmedo se verifica visualmente que no exista una gran cantidad de material que pudiese pasar el tamiz No.40 y se toman 150 a 200gr de material.
- Posterior a esto se añade agua destilada y se mezcla utilizando un recipiente y una espátula metálica buscando una consistencia plástica, se dejan curar un periodo de al menos 16 horas cubriendo el recipiente evitando la pérdida de humedad. Pasado este periodo se vuelve a mezclar.
- Una vez lista la mezcla, se llena la cuchara de Casagrande usando una espátula de modo que la mezcla quede horizontal y al nivel del borde inferior del cuenco, cuidando no dejar burbujas de aire. Tras esto, se forma un canal con ayuda de un acanalador de forma perpendicular a la superficie del cuenco en un movimiento de arriba hacia abajo en un solo movimiento. Este se realiza a la mitad de la cuchara de Casagrande. La figura 16 muestra el resultado del proceso.
- Una vez lista la muestra, se procede a girar la manivela de forma que la cuchara suba y baje de manera brusca a una razón de aproximadamente 2 golpes por segundo. Se contabilizan el número de golpes hasta que las dos porciones de la muestra entren en contacto en una línea de al menos 13mm, comprobando que no se cause un colapso por una burbuja de aire, lo cual se verifica cuando ambos lados de la muestra han descendido de una forma relativamente simétrica.



- Una vez entren en contacto se toma una porción horizontal de suelo de extremo a extremo del ancho de la espátula, incluyendo la que ha entrado en contacto, esto se coloca en un recipiente y se obtiene su humedad.
- A continuación, se presenta la diferencia fundamental entre los métodos A y B:
 - En el “método A” el proceso antes descrito se repite aumentando el contenido de agua de modo que se reduzcan el número de golpes para obtener al menos 3 puntos a diferentes humedades, asegurándose que exista al menos un punto en cada uno de los siguientes rangos de golpes (25-35), (20-30), (15-25). Finalmente, se grafica el número de golpes con respecto a la humedad en escala semilogarítmica, ajustando los puntos a una recta, donde el límite líquido se establece como el punto en la recta correspondiente a los 25 golpes.
 - En el “método B” solo se realiza el proceso antes descrito asegurándose que el número de golpes necesario para el contacto sea de 20 a 30 y se repite una vez el procedimiento con la misma humedad para verificar que el número de golpes es el mismo o tiene una diferencia máxima de dos golpes, caso contrario se mezcla nuevamente y se repite. Para el cálculo del límite líquido mediante este método, se usa la siguiente expresión:

$$LL^n = W^n \cdot \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \quad (9)$$

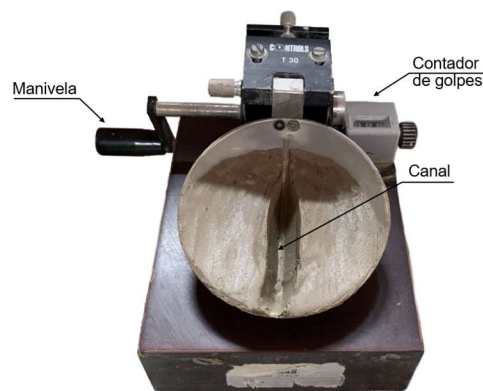
Donde:

LL^n : Límite líquido mediante método de un punto [%]

W^n : Contenido de agua para el ensayo realizado [%]

N : Número de golpes necesarios para contacto de 13mm en canal.

Figura 16. Cuchara de Casagrande con suelo ranurado.



Nota. Fotografía capturada en el Laboratorio de Suelos y Geotecnia de la Universidad de Cuenca.

Fuente: elaboración propia.

Para la determinación del límite plástico se describe el método manual, el proceso sintetizado se describe a continuación:

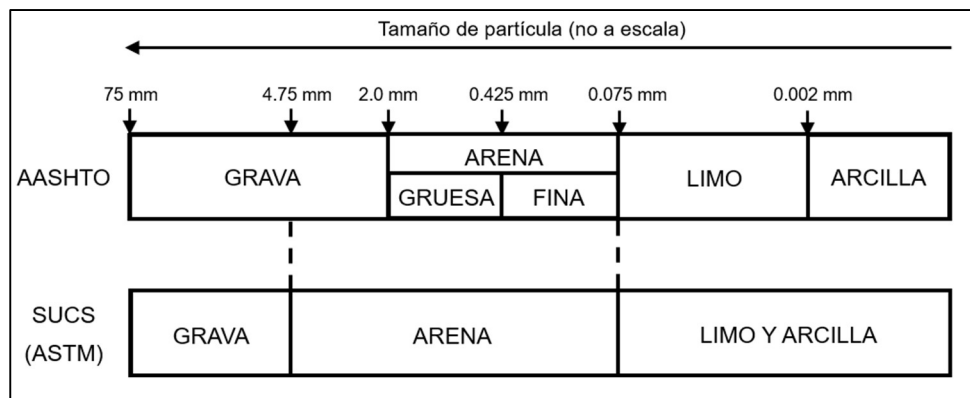


- Se toma una porción mayor a 20gr de la mezcla utilizada para el límite líquido y de ser necesario se reduce su humedad exponiéndola al aire, posterior a esto se toma una porción menor de aproximadamente 2gr de suelo asegurándose que pueda manipularse sin adherirse a las manos o a la placa de vidrio.
- Una vez cumplido el punto anterior se procede utilizando las palmas de las manos y una placa de vidrio para formar cilindros de suelo, se considera que la muestra tiene la humedad correspondiente al límite plástico cuando los cilindros se agrietan al llegar a un diámetro de aproximadamente 3.2mm en menos de 2 minutos.
- Una vez se obtiene una muestra en el límite, se repite el proceso hasta obtener al menos dos contenedores de 6gr de suelo cada uno, de los cuales se determina su humedad.

2.2.5. Clasificación del suelo

Dos sistemas son usados actualmente en base a la granulometría y a la plasticidad. Estos son el American Association of State Highway Officials (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Las normativas que describen los procedimientos para clasificación son ASTM D3282 y ASTM D2487, respectivamente. Los dos sistemas también se fundamentan en el tamaño de grano. La figura 17 especifica las dimensiones de las partículas de suelo para grava, arena gruesa y fina, limo y arcilla. A continuación, se presentan los fundamentos para ambas clasificaciones.

Figura 17. Nombres de suelo con tamaños de grano.



Fuente: Modificado de Ishibashi & Hazarika (2015)

2.2.5.1. Sistema de clasificación AASHTO

La tabla para este sistema de clasificación se puede observar en el Anexo A, organizando al suelo en siete grupos principales: de A-1 a A-7. Los suelos que pertenecen a los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, mientras que los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 se componen principalmente de limo y arcilla. Si se encuentran *cantos* (suelo con tamaño mayor a 75mm) no se incluyen en la muestra. La tabla de clasificación es utilizada de izquierda a derecha. Por proceso de eliminación, el primer grupo de la izquierda en la que coincidan todos los datos de prueba es la clasificación correcta (Braja Das, 2015).

La AASHTO clasifica al suelo para aplicaciones ingenieriles de carretera. Y para evaluar la calidad de un suelo como material subrasante nace el criterio conocido como *índice de grupo (IG)*, dado por la siguiente expresión:

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(IP - 10) \quad (10)$$



En donde:

F = porcentaje pasado por el tamiz #200

LL = límite líquido

IP = índice de plasticidad

Además, según ASTM D18 Committee (2004), se deben tener algunas consideraciones:

1. Si la ecuación de *índice de grupo (IG)* da negativo, se toma igual a 0.
2. Se redondea al número entero próximo (no hay decimales).
3. No hay un límite superior.
4. Para los grupos A-2-6 y A-2-7, se utiliza el índice de grupo parcial definido como:

$$IG = 0.01(F - 15)(IP - 10) \quad (11)$$

2.2.5.2. Sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS)

Es un sistema de clasificación ampliamente utilizado (Norma ASTM D-2487), organizando al suelo en dos grandes grupos:

1. Suelos con tamaño grueso de partícula que corresponde a grava y arena. Es el suelo con un porcentaje que pasa el tamiz #200 menor al 50%. Con prefijo G para grava y S para arena.
2. Suelo de grano fino con 50% o más que pasa el tamiz #200. Con prefijo C para arcilla, M para limos y O para suelo orgánico. También se suele utilizar el símbolo Pt para turba, lodo y suelos altamente orgánicos (Das, 2015).

Adicionalmente a esta nomenclatura y según ASTM D18 Committee (2000a), otros símbolos que se usan para la clasificación son:

- L: baja plasticidad (Límite líquido menor a 50%)
- H: alta plasticidad (Límite líquido mayor a 50%)
- W: bien graduado
- P: mal graduado

Las condiciones para utilizar una u otra nomenclatura se pueden observar en el Anexo A, aquí se indica cuando la carta de plasticidad deba ser utilizada. En el caso que se clasifique al suelo como material granular serán necesarios los coeficientes de uniformidad y de curvatura. Estos son obtenidos en la curva granulométrica.

Coeficiente de uniformidad

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (12)$$

Coeficiente de curvatura

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}} \quad (13)$$



En donde,

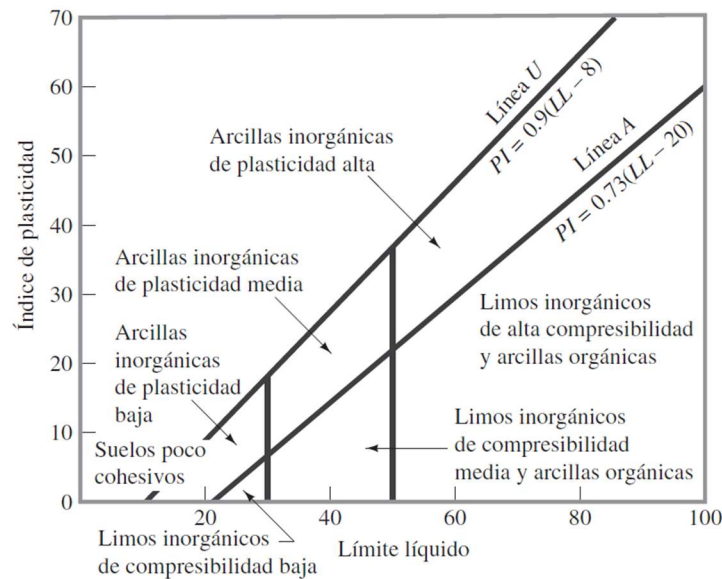
D_x = tamaño que deja pasar el $X\%$ de material

Carta de Plasticidad

Las características del suelo están en función de varios factores, uno de los más importantes es la determinación de los límites líquido y plástico (Das, 2015). Teniendo estos resultados se propuso la carta de plasticidad que se muestra en la figura 18. Se observa la línea A empírica, que separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos. Viene definida por la ecuación:

$$IP = 0.73(LL - 20). \quad (14)$$

Figura 18. Carta de plasticidad.



Fuente: Braja Das (2015)

Dependiendo del punto de ubicación en la carta de plasticidad se obtienen distintas características del suelo, que son la base para la clasificación de suelos finos según SUCS. Adicionalmente en la carta se encuentra la línea U, que es de aproximadamente el límite superior de la relación del índice plástico al límite líquido para cualquier suelo encontrado hasta ahora (Das, 2015), viene dada por la ecuación:

$$IP = 0.9(LL - 8). \quad (15)$$

2.2.6. Porcentaje de expansión unidimensional

El porcentaje de expansión es abordado en la normativa ASTM D4546 "Métodos de prueba estándar para el expansión o colapso unidimensional de suelos cohesivos", se describe en el apartado del "método B" que puede ser utilizado para medir la expansión unidimensional inducida por hidratación (ASTM D18 Committee, 2008b), mediante utilización de un edómetro o consolidómetro.

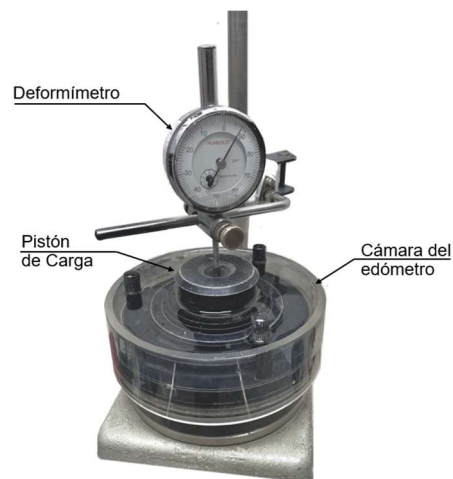


La normativa describe adicionalmente los métodos "A" y "C", que son utilizados para la determinación de presión de expansión.

La deformación en expansión libre fue medida de acorde con el también denominado como método de hidratación tras carga de un único espécimen, en el cual se utiliza una presión de 1kPa que en el edómetro es aplicada por el peso propio de la piedra porosa y el pistón de carga, el proceso seguido se describe de manera breve a continuación:

- Se miden los anillos a ser utilizados. Utilizando un calibrador se determina su altura y diámetro con precisión de 0.1mm y su masa con precisión de 0.1gr.
- Se obtienen las muestras inalteradas hincando cuidadosamente anillos de toma de muestra sobre bloques de suelo inalterado.
- Con las muestras listas se pesan y cada anillo se coloca en la cámara del edómetro correspondiente con papel filtro sobre la cara superior e inferior de la muestra. Una vez colocados la piedra porosa y pistón de carga, se fijan los deformímetros haciendo contacto con el centro del pistón de carga, calibrándolos en el dial de deformación 0, la cámara armada se muestra en la figura 19.
- Posterior al armado de la celda del edómetro, se sumerge la muestra en agua y se realiza la toma de datos de deformación en intervalos de tiempo creciente típicamente siguiendo el esquema de tiempos siguiente: (0.5 min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 24 h, 48h, 72h) o hasta que la expansión primaria haya terminado.
- Terminado el ensayo se obtiene el peso saturado de la muestra y se coloca la muestra en el horno para la determinación de humedad de la muestra. Se determina gráficamente el punto de cambio de tendencia correspondiente al fin de la expansión primaria.

Figura 19. Cámara de edómetro armada, con muestra sumergida.



Nota. Capturada en el Laboratorio de Suelos y Geotecnia de la Universidad de Cuenca. Fuente: elaboración propia.

2.2.7. Presión de expansión

Existen múltiples ensayos que pueden ser llevados a cabo para determinar la presión de expansión. En función de los utilizados en bibliografía nacional e internacional se consideraron los



procedimientos de las normativas *UNE 103602: 1996 "Ensayo para calcular la presión de hinchamiento de un suelo en edómetro"* y *ASTM D4546 "Métodos de prueba estándar para el expansión o colapso unidimensional de suelos cohesivos"*. La norma ASTM D4546 muestra dos métodos mediante los cuales se puede determinar presiones de expansión, por otra parte, la norma UNE 103602:1996 presenta un único ensayo. A continuación, se realiza una descripción breve de los ensayos.

El "método A" o de "hidratación después de carga en varias muestras" de la ASTM D4546 requiere de al menos 4 muestras idénticas; las muestras se someterán a cargas diferentes, con el propósito de determinar la presión de expansión correspondiente a la deformación nula. Este método tiene mayores requerimientos en cuanto a número de muestras, cantidad de equipos y tiempo de ejecución del ensayo.

El "método C", o de "carga después de hidratación" de la ASTM D4546, se puede aplicar sobre especímenes producto del "método A" o de una expansión libre ("método B"), sobre los cuales se aplican cargas de la misma forma en la que se aplicarían en un ensayo de consolidación, midiendo las deformaciones generadas. La desventaja principal que muestra este método, es que, a causa de la combinación de ensayos, la duración es extensa y limita el número de muestras que se puedan analizar en un determinado tiempo.

El ensayo de "expansión cero", descrito por la normativa UNE 103602:1996, se basa en impedir la expansión de la muestra de suelo mediante la aplicación de cargas en el edómetro hasta que la muestra alcance un equilibrio sin mostrar variación de expansión mayor a 0.01mm. Dado que este procedimiento es el seguido en el presente trabajo, tiene gran influencia en los resultados obtenidos y además por motivos de replicabilidad del ensayo, se describe de manera pormenorizada a continuación:

- Se miden los anillos a ser utilizados y se determina su altura y diámetro con precisión de 0.1mm y su masa con precisión de 0.1gr.
- Se obtienen muestras inalteradas, hincando cuidadosamente anillos de toma de muestra sobre bloques de suelo. En tanto que, muestras remoldeadas se forman mezclando cantidades definidas de suelo y agua en pozuelos de goma. La mezcla es apisonada al interior del anillo con el fin de lograr un peso específico previamente determinado.
- Se pesan las muestras y posteriormente, cada anillo se coloca en la cámara del edómetro correspondiente conjuntamente con su papel filtro. Una vez colocada la piedra porosa y pistón de carga, se fijan los deformímetros haciendo contacto con el centro de carga en el brazo de palanca sobre el pistón. Se calibra en el dial de deformación 0.
- Posterior al armado de la celda del edómetro, se sumerge la muestra en agua y se controla mediante la aplicación de carga que la deformación esté en un rango de $0 \pm 0.01 \text{ mm}$.
- El ensayo para determinar la presión de expansión termina cuando se registra que la muestra ha llegado a la estabilidad y no se registra variación en la deformación.
- Una vez terminada la fase de carga la normativa determina un procedimiento para determinar el porcentaje de expansión que consiste en retirar gradualmente la carga de forma escalonada en intervalos de tiempo que permitan la estabilización de la muestra.
- Finalmente, se obtiene el peso saturado y se coloca en el horno para la determinación de humedad de la muestra.



Todos los métodos antes descritos se fundamentan en la respuesta del suelo ante la aplicación de carga, por lo que en todos es necesaria la utilización de un edómetro. A continuación, en la figura 20, se presenta un esquema en el cual se indican sus partes.

Figura 20. Edómetro armado para un ensayo de presión de expansión.



Nota. Capturada en el Laboratorio de Suelos y Geotecnia de la Universidad de Cuenca. Fuente: elaboración propia.

2.3. Suelos expansivos en el austro ecuatoriano

Los suelos expansivos son sinónimo de desafíos geotécnicos y de ingeniería estructural alrededor de todo el mundo. Como se mencionó anteriormente, los problemas de expansividad suelen aparecer en lugares húmedos en donde existen suelos con alto índice de plasticidad (IP) y límite líquido (LL) o en sitios áridos/semiáridos donde los suelos, incluso de expansión moderada, pueden causar daños significativos. En estos lugares las estaciones son muy marcadas, con periodos secos prolongados (Nelson et al., 2015). Existen referencias de este tipo de suelo en Estados Unidos, México, Venezuela, Perú, Colombia, Brasil, Argentina, Reino Unido, **Ecuador**, entre otros países (Arízaga & Sánchez, 2005).

En el Ecuador, este fenómeno natural suele ocurrir debido a la interacción del suelo con la vegetación y los cambios en el contenido de agua. Los problemas de expansión/contracción de los suelos en el Ecuador se encuentran, sobre todo, en la costa ecuatoriana y en algunas zonas de la sierra y oriente (Marín Nieto, 1991).

A continuación, se analizarán suelos de la zona sur del austro ecuatoriano, haciendo especial énfasis en la ciudad de Cuenca y lugares aledaños, con base en estudios geológicos que demuestran características expansivas de varios sitios alrededor de esta zona austral.

2.3.1. Descripción geológica y geotécnica de zonas potencialmente expansivas

Con el pasar de los años, autores como Guncay & Morocho (2005), Arízaga & Sánchez (2005), Vélez (2012), Idrovo (2019), entre otros, han realizado ensayos para determinar el carácter expansivo en suelos de la ciudad de Cuenca y sus alrededores. Estos estudios sirven de base para identificar zonas



del austro que puedan presentar suelos con un gran hinchamiento. Cada una de las regiones potencialmente expansivas, pertenecen a formaciones, unidades y depósitos que pueden ser analizados en mapas geológicos del Instituto Geográfico Militar del Ecuador.

Los mapas geológicos representan la distribución de distintos tipos de roca y depósitos superficiales. Interpretar esta información es comprender no sólo dónde se encuentran los materiales sino también entender qué características poseen, ayudando a identificar la ubicación de suelos expansivos (Tarbuck & Lutgens, 2005). Para esto, a continuación, se presenta una recopilación de información geológica, en donde realiza una descripción de las características y propiedades en campo de las formaciones y unidades a las que pertenecen los puntos potencialmente expansivos.

Formación Loyola (MI)

Existen grandes afloramientos en sector de El Descanso de la Autopista Cuenca-Azogues. Se trata de una formación sedimentaria conformada principalmente por lutitas y limolitas de color café, habano y gris; presenta también lentes de areniscas limosas, calizas y brechas. La formación muestra alta cantidad de yeso y además cemento calcáreo entre los lentes de arenisca (Precupa, 1994).

Según el mismo autor y en base al comportamiento geotécnico, los suelos en esta zona tienen las siguientes características:

- Existencia de fenómenos inestables.
- Fragmentado mediante desecación, estratificación y fracturación (en la superficie).
- Fácil excavación en estado seco.
- Arcillas blandas en estado húmedo, no se recomienda usarla como relleno debido a sus características expansivas.
- Susceptibilidad moderada a alta a terrenos inestables.

Figura 21. Suelo de la formación Loyola, autopista Cuenca-Azogues.



Nota. Foto capturada en la autopista Cuenca-Azogues. Fuente: (Precupa, 1994).

Los suelos de la formación Loyola causan movimientos lentos en capas superiores de sus laderas arcillosas y deslizamientos rotacionales profundos en pendientes bajas a medias. Según Precupa (1994), en base a sus características físicas poseen un peso específico en campo (γ) de entre 18 y 21 KN/m^3 y se clasifica según SUCS como $ML - CL - CH$.



Formación Guapán (Mg)

Se presenta en el valle Azogues, formando parte del subsuelo de la ciudad. Parecida a la formación Loyola, con lutitas de color café oscuro a negro y cremas. Se observa gran cantidad de bentonita y estratos de yeso (Precupa, 1994). Según Feininger (1980), pueden existir 500.000 toneladas de reserva de bentonita.

Según el proyecto Precupa (1994) y en base al comportamiento geotécnico, los suelos en esta zona se caracterizan por:

- Erosión y movimientos del terreno.
- Material fragmentado propenso a la erosión laminar.
- Fácil de excavar con equipo pesado, aunque es sensible a la humedad.
- Susceptibilidad moderada a terrenos inestables.

Según Precupa (1994), en base a sus características físicas poseen un peso específico en campo (γ) de entre 18 y 21 KN/m^3 y se clasifica según SUCS como *ML – CL*.

Figura 22. Suelo de la Formación Guapán, sector parroquia Antonio Borrero.



Nota. Foto capturada en la parroquia Antonio Borrero, sector Loma Blanca. Fuente: elaboración propia.

Formación Biblián (Mb)

Existen afloramientos en el sureste de Cuenca, también en la autopista Cuenca-Azogues y Cojitambo. Sus sedimentos emergen alrededor de Jadán y Biblián hasta la cuenca de Quingeo. La formación presenta una “alternancia de limolitas rojizas con areniscas tobáceas de grano fino a grueso, también se puede ver yeso en grietas” (Precupa, 1994). Se compara con la formación Loyola.

De acuerdo al mismo autor y en base al comportamiento geotécnico, las arcillas en esta zona tienen las siguientes características:

- Permeabilidad de baja a nula.
- Excavación fácil con maquinaria liviana o manualmente.
- Expansividad media alta.
- Susceptibilidad moderada a terrenos inestables.



Según Precupa (1994), en base a sus características físicas poseen un peso específico en campo (γ) de entre 17 y 19 KN/m^3 y se clasifica según SUCS como *CL – ML*.

Figura 23. Suelo de la Formación Biblián, sector Cojitambo.



Nota. Foto capturada en el sector Surampa. Fuente: elaboración propia.

Formación Tarqui (PT)

Los afloramientos de esta formación se encuentran distribuidos en la parte sur de Cuenca y al margen este de la cuenca de Nabón. Se halla también en la provincia de Loja. La formación Tarqui tiene una gran cantidad de piroclastos que van desde intermedios a ácidos. Posee ignimbitas, tobas, brechas y flujos piroclásticos (Pilatasig, 2020).

Arcillas varvadas (QV)

Existe un pequeño depósito en Miraflores, norte de Cuenca. Se puede encontrar “arcillas, limos y limolitas finamente estratificados color habano claro a habano oscuro, oxidados y fragmentados” (Precupa, 1994).

De acuerdo al mismo autor y en base al comportamiento geotécnico, las arcillas en esta zona tienen las siguientes características:

- Susceptible a la humedad con alta expansividad.
- Colapsable en pendientes bajas a moderadas.
- Sensible a la saturación y remoldeo, de mediana a baja consistencia en estado seco y baja resistencia al corte en estado húmedo.
- Susceptibilidad mediana a alta a terrenos inestables.

Según Precupa (1994), en base a sus características físicas poseen un peso específico en campo (γ) de entre 13 y 16 KN/m^3 y se clasifica según SUCS como *ML – CL*.



Figura 24. Suelo del Depósito Arcillas Varvadas, vía Miraflores, sector Bodegas de Eljuri.



Nota. Capturada en la Calle Del Concierto, Miraflores. Fuente: elaboración propia.

Miembro Santa Rosa (Mr)

Esta formación se encuentra repartida al noreste de Cuenca, en la cuenca del Sidcay y del Paluncay y al este de Biblián. “Existen depósitos de clastos gruesos, conglomerados con cantos intrusivos con lutitas rojas arenosas y limosas” (Precupa, 1994). De acuerdo al mismo autor y en base al comportamiento geotécnico, las arcillas en esta zona tienen las siguientes características:

- Gran cantidad de deslizamientos.
- Ocasionalmente microfisuración por desecación.
- Fácil a mediana facilidad de excavación con maquinaria pesada.
- Baja resistencia al corte en condiciones saturadas
- Susceptibilidad moderada a terrenos inestables.

Según Precupa (1994), en base a sus características físicas poseen un peso específico en campo (γ) de entre 18 y 23 KN/m^3 y se clasifica según SUCS como $CL - CH$.

2.3.2. Compilación bibliográfica de estudios en suelos expansivos

El estudio de arcillas expansivas en la ciudad de Cuenca ha sido abordado en múltiples ocasiones desde varias perspectivas, la mayor parte de trabajos de investigación han sido realizados en la Universidad de Cuenca, estos generalmente presentan resultados de ensayos en edómetro tanto para expansión libre como controlada, así como aspectos generales de clasificación y límites de Atterberg, mismos que están íntimamente relacionados con los potenciales expansivos del suelo como se describió anteriormente.

Los resultados de ensayos de expansión controlada son parámetros de interés para la identificación de expansividad de suelos, pues muestran de forma cuantitativa una propiedad mecánica del suelo que actúa sobre estructuras transmitiendo esfuerzos o generando desplazamientos.

A continuación, se presenta una tabla que contiene información resumida de los trabajos de investigación mencionados previamente. La tabla presenta: la fuente bibliográfica de donde se tomó la información, un identificador para ubicar cada punto en el mapa provisto en el Anexo B (mapa), la ubicación y coordenadas del sitio en investigación; además presenta el resultado de presión de expansión junto con la humedad inicial reportada para la muestra usada en el correspondiente ensayo de expansión. Finalmente se muestran los límites de Atterberg obtenidos, así como la clasificación de la muestra en sistema SUCS y AASHTO. En el Anexo C se presenta una tabla extendida donde se incluyen resultados de expansión libre.



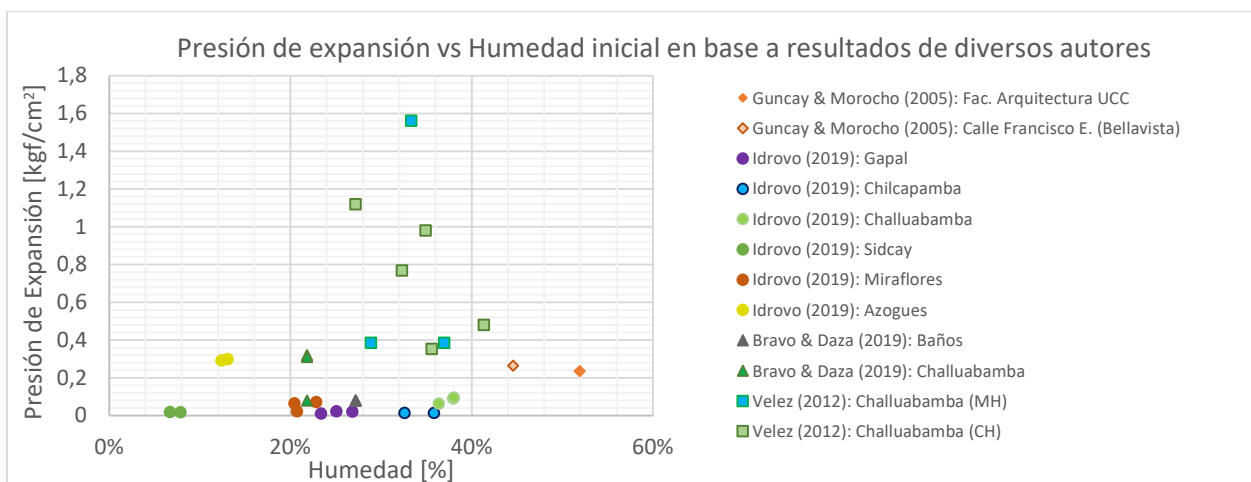
Tabla 2: Recopilación de resultados de ensayos de expansión de bibliografía local

Fuente	ID	Descripción Ubicación	Coordenadas	Expansión controlada		Límites de Atterberg		Clasificación
				Presión expansión [kgf/cm ²]	Humedad reportada	Límite Líquido	Límite Plástico	
Guncay & Morocho (2005): "Estudio de los suelos expansivos en Cuenca: sector Parroquia Bellavista"	1	Facultad de Arquitectura Universidad Católica	2°53'06"S 79°00'20"W	0.235	51.92%	36.0%	22.04%	SUCS: CL AASHTO: A6
	2	Calle Francisco E. Tamariz y General Morales	2°53'10"S 79°00'11"W	0.265	44.57%	56.5%	25.6%	SUCS: CH AASHTO: A7-6
Idrovo (2019): "Caracterización de suelos expansivos de la ciudad de Cuenca"	3	Gapal	2°55'21"S 78°59'43"W	0.0214	25.07%	40.4%	23.48%	SUCS: CL AASHTO: A7-6
				0.0206	26.85%			
				0.0095	23.37%			
	4	Chilcapamba (Camino a El Valle)	2°55'22"S 78°58'42"W	0.013	35.85%	42.5%	23.83%	SUCS: SC AASHTO: A7-6
				0.013	32.59%			
	5	Challuabamba	2°51'30"S 78°55'13"W	0.089	37.98%	63.3%	21.35%	SUCS: CH AASHTO: A7-6
				0.095	38.05%			
				0.063	36.39%			
	6	Sidcay	2°51'28"S 78°56'16"W	0.0174	7.88%	24.5%	13.04%	SUCS: SC AASHTO: A6
				0.0190	6.70%			
	7	Miraflores	2°52'48"S 78°59'47"W	0.0713	22.86%	88.4%	27.27%	SUCS: CH AASHTO: A7-6
				0.0648	20.44%			
0.0227				20.73%				
8	Azogues	2°44'46"S 78°51'6"W	0.2915	12.41%	48.4%	36.15%	SUCS: SC AASHTO: A2-7	
			0.298	13.06%				
Bravo & Daza (2019): "Métodos para controlar el potencial expansivo en suelos arcillosos de la ciudad de Cuenca"	9	Baños	2°55'08"S 79°03'12"W	0.08	27.21%	67.27%	32.95%	SUCS: CH AASHTO: A7-5
				0.08	27.21%			
				0.08	27.21%			
	10	Miraflores	2°52'44.4"S 78°59'46.2"W	15.32	25.49%	86.41%	34.14%	SUCS: CH AASHTO: A7-5
				12.1	23.40%			
				13.06	23.64%			
11	Challuabamba	2°51'30.6"S 78°54'59"W	0.08	21.82%	79.25%	37.98%	SUCS: CH AASHTO: A7-5	
			0.32	21.82%				
Vélez (2012): "Comprobación de las correlaciones de la presión de expansión con las propiedades índices en suelos del sector Challuabamba, Cuenca, recomendaciones para la construcción de cimentaciones"	12	Challuabamba (Urbanización Colinas de Challuabamba)	2°51'23"S 78°55'11"W	1.560	33.35%	77.75%	36.62%	SUCS: MH
				0.384	28.91%	86.76%	39.87%	
				0.384	36.98%	87.59%	39.20%	
				SUCS: CH	0.352	35.62%	85.89%	29.71%
					0.767	32.31%	87.67%	36.03%
					0.480	41.36%	107.75%	41.24%
					0.979	34.92%		
1.119	27.18%	89.75%	36.16%					

Los resultados descritos en la tabla se muestran en el siguiente gráfico, donde se diferencian los puntos de cada autor y cada zona estudiada, además del caso particular de Vélez (2012) en cual se ha hecho una distinción por su clasificación SUCS, esto debido a que los resultados presentados por el autor corresponden a una serie de calicatas repartidas sobre el área de la Urbanización colinas de Challuabamba. Además, se omiten los resultados de Bravo & Daza (2019) en la zona de Miraflores debido a que presentan presiones de expansión notablemente atípicos respecto a sus pares, con valores muy altos incluso para suelos altamente expansivos.



Figura 25. Presión de expansión vs Humedad inicial en base a resultados de diversos autores.



Se observa que la distribución de datos es dispersa, en general no se presentan suficientes puntos para establecer una tendencia, dado que todos los ensayos se llevaron a cabo sobre muestras inalteradas es viable asumir que la variación de peso específico seco en cada grupo es mínima y que la diferencia en los datos se debe primariamente a la variación de la humedad. Siendo el correspondiente a Vélez (2012), con el suelo CH de Challuabamba, el único grupo de datos que describe una ligera tendencia con respecto a su valor inicial de humedad.

2.4. Correlaciones

Las correlaciones de distintos autores y obtenidas después de una gran cantidad de ensayos a lo largo de los años, nos ayudan a relacionar las propiedades de un suelo con sus cualidades expansivas. Según Vélez (2012), se organizan las correlaciones en los siguientes grupos:

- Las que determinan el tipo de mineral predominante en la arcilla.
- Las que otorgan grado de expansividad, pudiendo ser: bajo, medio, alto, muy alto.
- Las que cuantifican la presión de expansión, en base a correlaciones empíricas.

2.4.1. Mineral predominante

Las correlaciones para definir el mineral predominante en la arcilla de las muestras de suelo se basan en distintos estudios, definidos a continuación:

Según Das (2008), el valor de la gravedad específica está en función de la mineralogía del suelo. Por lo tanto, al conocer dicho valor, se podría intuir el tipo de mineral predominante.

Tabla 3. Gravedad específica de los minerales más importantes.

Mineral	Gravedad específica, Gs
Cuarzo	2.65
Caolinita	2.60
Illita	2.80
Montmorillonita	2.65 - 2.80
Haloisita	2.00 - 2.55



Feldespatos de potasio	2.57
Feldespatos de sodio y calcio	2.62
Clorita	2.60 - 2.90
Biotita	2.80 - 3.20
Muscovita	2.76 - 3.10
Hornblenda	3.00 - 3.47
Limonita	3.60 - 4.00
Olivino	3.27 - 3.37

Fuente: Braja M. Das (2008).

En base a relaciones entre gráficas de índice de plasticidad y el porcentaje de partículas menores a $2 \mu\text{m}$ (0.002mm) definidas por Skempton (1953), se encontró que había correlaciones lineales únicas entre ellas para cada una de las diferentes arcillas. La pendiente de estas correlaciones se define como la actividad, por lo que:

$$A = \frac{IP}{\text{fracción de suelo } (< 2\mu\text{m})} \quad (16)$$

Donde el índice plástico (IP) y la fracción de suelo se expresan en porcentaje.

Skempton (1953) sugirió tres clases de arcillas según su actividad como: inactiva, para actividades menores a 0,75; normal, para actividades entre 0,75 y 1,25; y activa, para actividades superiores a 1,25. Las arcillas activas brindan el mayor potencial de expansión (Nelson & Miller, 1992). Los valores típicos de actividad para minerales de arcilla se muestran en la Tabla 4. La actividad está altamente relacionada con el potencial de expansión (Ishibashi & Hazarika, 2015).

Tabla 4. Actividades para varios minerales de arcilla.

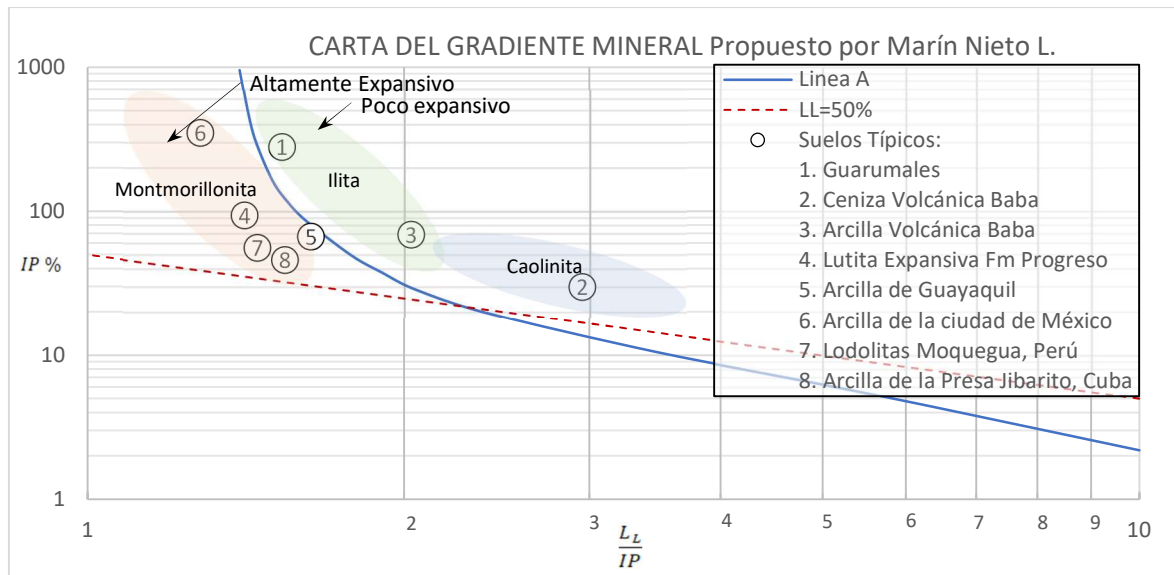
Mineral	Actividad
Montmorillonita	1 – 7
Illita	0.5 – 1
Caolinita	0.5

Fuente: Mitchell and Soga (2005).

Adicionalmente, Marín Nieto (1991) propuso identificar el mineral predominante de una arcilla en base al método del gradiente mineral. Se basa en la Figura 26, en la cual se identifica la relación **límite líquido / índice de plasticidad** y el **índice de plasticidad** en sus abscisas y ordenadas, respectivamente. El mineral de la arcilla dependerá de la ubicación en la gráfica. La línea A se define por la ecuación:

$$IP = 0.73 \cdot (LL - 20) \quad (17)$$

Figura 26. Carta del gradiente mineral.



Fuente: Marín Nieto (1991)

2.4.2. Grado de expansividad

Para la caracterización en base a la expansividad se emplean correlaciones según parámetros característicos del suelo. Estos otorgan un grado de expansividad cualitativo, pudiendo ser generalmente: bajo, medio, alto, muy alto.

El índice de plasticidad (IP) se relaciona con el potencial de expansión (Peck et al., 1974). Por ejemplo, con estudios determinados por Peck, Hanson & Thornburn (1974) y el método de Holtz y Gibbs (1954). Las dos se pueden observar en la Tabla 5 y Tabla 6, respectivamente.

Tabla 5. Potencial de expansión en función del Índice de plasticidad.

Índice de plasticidad [%]	Potencial de expansión
0 – 15	Bajo
0 – 35	Medio
20 – 55	Alto
> 35	Muy Alto

Fuente: Peck et al. (1974).

Tabla 6. Método de Holtz y Gibbs, potencial de expansión en función del Índice de plasticidad.

Índice de plasticidad [%]	Potencial de expansión
0 – 15	Bajo
10 – 35	Medio
20 – 55	Alto
> 55	Muy Alto

Fuente: Holtz y Gibbs (1954).



Holtz, Dakshanamurthy y Raman (1973) clasifica el grado de expansión también en función del índice de plasticidad (IP), pero considerando una relación con el límite de contracción y límite líquido. Esta se observa en la Tabla 7.

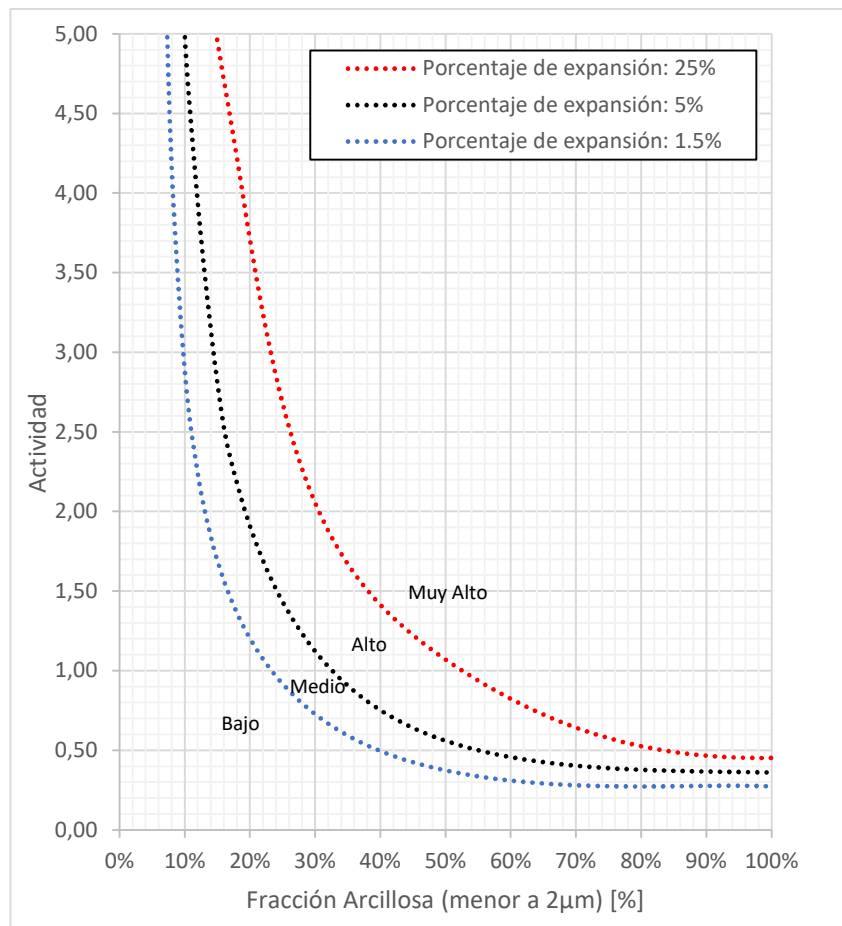
Tabla 7. Grado de expansividad en función de Límites de Atterberg.

Grado de expansividad	Índice de plasticidad [%]	Límite de contracción [%]	Límite Líquido [%]
Bajo	< 18	> 15	20 – 35
Medio	15 – 25	10 – 15	35 – 50
Alto	25 – 41	7 – 12	50 – 70
Muy alto	> 35	< 11	> 70

Fuente: Holtz y Dakshanamurthy y Raman (1973).

Seed et al. (1962) propuso la gráfica que se muestra en la Figura 27. Se determina el potencial expansivo en función de la actividad y de la fracción arcillosa menor a 0.002mm, estimando una expansión baja, media, alta o muy alta.

Figura 27. Potencial de hinchamiento en función de la actividad de las arcillas.



Fuente: Seed et al. (1962).



González de Vallejo (2002) y Chen (1988) propusieron un grupo de correlaciones que se basan en un análisis cualitativo de la expansividad en la Tabla 8 y Tabla 9, respectivamente. Para estos grupos de correlaciones se establecen tablas para su clasificación que incluyen parámetros como límites de Atterberg, porcentaje de finos, presión de hinchamiento, porcentaje de hinchamiento, entre otros.

Tabla 8. Grados de expansividad y valores medios de parámetros geotécnicos.

Grado	Grado de expansividad	Porcentaje de Finos [%]	Límite líquido [%]	Presión de hinchamiento [Kpa]	Porcentaje de hinchamiento [%]
I	Baja	< 30	< 35	< 25	< 1
II	Baja a Media	30 – 60	35 – 50	25 – 125	1 – 4
III	Media a Alta	60 – 95	60 – 65	125 – 300	4 – 10
IV	Muy Alta	> 95	> 65	> 300	> 10

Fuente: González de Vallejo (2002).

Tabla 9. Grado de expansión según porcentaje de finos, límite líquido, expansión libre y presión de hinchamiento.

Grado de expansividad	Porcentaje de Finos [%]	Límite líquido [%]	Expansión libre [%]	Presión de hinchamiento [Kg/cm ²]
Muy Alto	> 95	> 60	> 10	> 10
Alto	60 – 95	40 – 60	3 – 10	2.5 – 10
Medio	30 – 60	30 – 40	1 – 5	1.5 – 2.5
Bajo	< 30	< 30	< 1	< 0.5

Fuente: Chen (1988).

2.4.3. Presión de expansión

Los distintos valores de presión de expansión determinados en este punto se estiman en base a ecuaciones empíricas y en función de distintos parámetros obtenidos en ensayos de laboratorio (Çimen et al., 2012). Las ecuaciones usadas se describen a continuación:

Ecuación según Komornik y David (1969) para suelos inalterados:

$$\log(PS) = -2.132 + 0.0208 LL + 0.000665 \gamma_d - 0.0269 \omega \quad (18)$$

En donde:

PS = presión de expansión [kg/cm^2]

LL = límite líquido [%]

γ_d = peso específico seco [kg/m^3]

ω = humedad natural [%]

Expresión según Nayak y Christensen (1979) para suelos compactados al peso unitario estándar AASHTO máximo con un contenido de agua óptimo:

$$PS = \frac{0.03581 IP^{1.12} C^2}{\omega^2} + 3.7912 \quad (19)$$

En donde:



PS = presión de expansión [Psi]

IP = índice de plasticidad [%]

C = contenido de partículas menores a $0.002mm$ [%]

ω = humedad natural [%]

Expresiones según Erzin y Erol (2004):

$$\log(PS) = -4.812 + 0.01405 IP + 2.394 \gamma_d - 0.0163 \omega \quad (20)$$

$$\log(PS) = -5.020 + 0.01383 IP + 2.356 \gamma_d \quad (21)$$

En donde:

PS = presión de expansión [kg/cm^2]

IP = índice de plasticidad [%]

γ_d = peso específico seco [gr/cm^3]

ω = humedad natural [%]

Expresión según Sabtan (2005) para suelos inalterados:

$$PS = 135 + 2(C + IP - \omega) \quad (22)$$

En donde:

PS = presión de expansión [kPa]

C = contenido de partículas menores a $0.002mm$ [%]

IP = índice de plasticidad [%]

ω = humedad natural [%]

Ecuación según Huang et al. (2019), en donde existe una relación única de deformación por expansión y presión de expansión:

$$PS = 0.1548 * \delta^{2.7455} \quad (23)$$

En donde:

PS = presión de expansión [kPa]

δ = deformación por expansión [%]

Todas estas expresiones se encuentran en función de los parámetros que comúnmente influyen en el potencial expansivo. Las ecuaciones serán analizadas más adelante para los suelos expansivos estudiados.

2.5. Análisis estadístico

2.5.1. Métodos estadísticos

El objetivo del presente trabajo busca determinar la influencia de la humedad del suelo en su potencial expansivo. El proceso involucra variables adicionales cuya influencia deberá ser estudiada también. Para llegar a conclusiones apropiadas se requiere de un análisis estadístico que establezca relaciones de comparación y su validez. A continuación, se revisa los análisis estadísticos de regresión, por lo que se incluyen conceptos fundamentales de estos análisis.

Un análisis de regresión paramétrico es un método matemático estadístico, en estudios experimentales es utilizado para establecer relaciones en función de una respuesta o variable



dependiente efecto de una o varias variables independientes. El método consiste en ajustar un grupo de datos observados a una ecuación reduciendo el total de diferencia o error, al menor valor posible.

Existen varios modelos de regresión entre ellos lineal o no lineal, paramétrico o no paramétrico. Como se mencionó previamente los modelos de regresión pueden tener varios datos de entrada e igualmente de salida, por lo que, si un modelo tiene una variable de entrada y una de salida se denominan como simples, en caso de tener varias entradas y una sola respuesta o variable dependiente se denominan múltiples, finalmente en el caso de tener varias entradas y salidas se denominan como modelos multivariable (Izenman, 2008). Para los fines de este trabajo de investigación, se enfocará la atención hacia los modelos simples y múltiples pues se trabajará con una única respuesta.

2.5.1.1. Regresiones Simples

Las regresiones simples son regresiones que cuentan únicamente con una variable de entrada o variable independiente y una variable de salida o dependiente. Se describirá en primer lugar y detalladamente, una regresión lineal simple puesto que sus conceptos pueden ser generalizados para regresiones más complejas.

Un modelo de regresión lineal simple estima la recta con el mejor ajuste con respecto a un grupo de puntos. Es así que para un determinado y o valor de respuesta en la recta (variable dependiente), existe un x o variable independiente, perteneciente a la recta:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \varepsilon \quad (24)$$

Donde β_0 es una constante que representa la intersección con el eje Y, β_1 es la pendiente de la recta y ε es el error o diferencia entre la respuesta observada o real \hat{y} y el punto de la recta y . Para reducir el error de la estimación, se utiliza el método de mínimos cuadrados, que consiste en hallar la sumatoria de los cuadrados de los errores (de modo que no se contrarresten valores positivos y negativos de error) y se hallan los valores de β_0 y β_1 , que reduzcan el valor de esta sumatoria de cuadrados al mínimo. Entonces si se tiene un número n de datos observados x e \hat{y} , la expresión de mínimos cuadrados es la siguiente:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon^2 + \sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y - \beta_0 - \beta_1 \cdot x)^2 \quad (25)$$

Si encontramos los valores de β_0 y β_1 que reducen la sumatoria de errores al mínimo mediante igualar a cero sus derivadas parciales determinaremos que sus valores son:

$$\beta_1 = \frac{S_{xy}}{S_x^2} \quad (26)$$

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \cdot \bar{x} \quad (27)$$

Donde S_{xy} es la covarianza de las dos variables, S_x^2 la varianza de la variable independiente al cuadrado, \bar{y} es la media de los datos observados de la variable dependiente y \bar{x} es la media de los datos observados de la variable independiente.



En caso que los datos no presenten una tendencia lineal es de utilidad otro modelo de regresión el cual puede ser exponencial, potencial, polinomial, entre otros. El modelo polinomial también es determinado bajo el concepto de mínimos cuadrados y para un modelo de orden k su expresión es la siguiente:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \beta_2 \cdot x^2 + \dots + \beta_k \cdot x^k + \varepsilon \quad (28)$$

En este caso la complejidad para determinar los coeficientes β crece conforme mayor sea el grado del polinomio, y a pesar de que es posible ajustar una curva con virtualidad exactitud al número de puntos elevando el grado del polinomio esto no es recomendable, puesto que no ofrece una respuesta que se pueda ajustarse a nuevas observaciones.

2.5.1.2. Regresiones Múltiples

Todos los conceptos fundamentales descritos para un modelo de regresión lineal simple son válidos para un modelo de regresión lineal múltiple, donde entra en análisis más de una variable independiente, estos modelos también utilizan el método de mínimos cuadrados (Montgomery, 2013). Un modelo lineal múltiple donde la respuesta y se determina en función de las variables independientes x_1, x_2, \dots, x_k siendo k el número de variables, tiene como expresión la siguiente:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_k \cdot x_k + \varepsilon \quad (29)$$

Esta expresión puede ser escrita como la ecuación matricial que se muestra:

$$Y = X \times \beta + \epsilon \quad (30)$$

Donde con n número de datos observados y k número de variables:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \text{ y } \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix}$$

Siendo Y un vector de respuestas observadas, X una matriz que contiene variables independientes observadas, β un vector de coeficientes de regresión y ϵ un vector de errores.

Para aplicar el método de mínimos cuadrados en esta ecuación matricial de modo que se encuentren los coeficientes β que minimicen el error se debe derivar la siguiente expresión e igualarla a cero:

$$\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \epsilon' \times \epsilon = (Y - X \times \beta)' \times (Y - X \times \beta) \quad (31)$$

Tras derivar e igualar a cero se tiene que:

$$\beta = (X' \times X)^{-1} \times (X' \times Y) \quad (32)$$

Con esta ecuación se pueden determinar los coeficientes que minimizan el cuadrado de errores para una regresión lineal múltiple. Dado que estos procesos requieren un procesamiento de gran cantidad de datos es común realizarlos utilizando un software estadístico.



En caso que los datos no muestren tendencias lineales, es adecuado realizar un análisis de regresión polinómico con múltiples variables. En ese caso la expresión para una regresión de segundo orden con dos variables es la siguiente:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_{11} \cdot x_1^2 + \beta_{22} \cdot x_2^2 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \varepsilon \quad (33)$$

Donde β_1 y β_2 son coeficientes de efecto lineal, β_{11} y β_{22} son coeficientes de efecto cuadrático y β_{12} es un coeficiente de efecto de interacción (Sinha, 2013). A una expresión de este tipo con dos variables se le llama también superficie de respuesta. Y su expresión matricial al igual que en el caso lineal es:

$$Y = X \times \beta + \epsilon \quad (34)$$

De igual manera, su solución es la misma que en el caso lineal:

$$\beta = (X' \times X)^{-1} \times (X' \times Y) \quad (35)$$

2.5.1.3. Análisis de las regresiones

Para determinar la validez de una regresión se deben tener en cuenta indicadores estadísticos que muestren como se relacionan las variables analizadas, uno de los indicadores más importantes y ampliamente utilizados es el coeficiente de determinación, también conocido como R^2 , este es un valor entre 0 y 1 que muestra que tan ajustados están los datos al modelo de regresión (Montgomery, 2013), se puede calcular de la siguiente manera:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SSR + SSE} \quad (36)$$

Donde el **SSE** (sum of squares error) es la suma de cuadrados de error, que está definida como la suma de los cuadrados de las diferencias entre los datos observados y los predcidos por la regresión, **SSR** (sum of squares due to regression) es la suma de los cuadrados por regresión, definida como la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores predcidos y la media de la variable dependiente. La expresión **SSR + SSE** suele ser reemplazada con **SST** (sum of squares total) o suma de cuadrados totales, que también puede ser calculada como la suma de los cuadrados de las diferencias entre los datos observados de la variable dependiente y su media)

Dado que en el análisis con múltiples variables el R^2 puede ser incrementado con la inclusión de variables y su interdependencia, mismas que no pueden ser significativas para la regresión, existe un valor ajustado de R^2 , el mismo puede mostrar cómo afecta la inclusión de nuevas variables al modelo (Montgomery, 2013), reduciendo notablemente el valor de R^2 en caso de utilizar una variable innecesaria, considerando que N es el número de datos y k el número de variables independientes, su fórmula es la siguiente:

$$R^2_{ajust} = 1 - \frac{N - 1}{N - k - 1} \cdot [1 - R^2] \quad (37)$$

Además de este valor, los programas de estadística suelen incluir un valor de R^2_{pred} , el mismo determina que tan buena es la regresión para predecir nuevos datos, para esto se retira un dato del grupo de datos, se realiza una regresión con el dato faltante, se predice y evalúa el error con la



respuesta de predicción obtenida y se realiza el mismo análisis con todos los datos (Montgomery, 2013). Este valor es de utilidad especialmente si la regresión ha de ser usada para estimar nuevos datos.

3. METODOLOGÍA

En esta sección se presentan los procedimientos de ensayos realizados, conjuntamente con la normativa de referencia utilizada, para la obtención de cualidades expansivas y caracterización de muestras. En el primer punto se analizan zonas propensas a tener gran hinchamiento con el fin de definir los suelos a ser considerados dentro del estudio expansivo. Posteriormente, se explica el procedimiento de muestreo, ensayos y las consideraciones utilizadas para la elaboración de curvas de *humedad versus presión de expansión*.

3.1. Análisis de zonas potencialmente expansivas

El análisis de las zonas potencialmente expansivas comenzó con un estudio bibliográfico que se puede observar en la Tabla 2 y en Figura 25 de la sección 2.3.2. En base a esto, se definieron lugares, conjuntamente con sus características expansivas, que se convertirían en sitios potenciales de interés para la extracción de muestras de suelo, tales como Challuabamba, Baños, Sidcay, Cojitambo, Miraflores, Azogues, Chilcapamba o Galap.

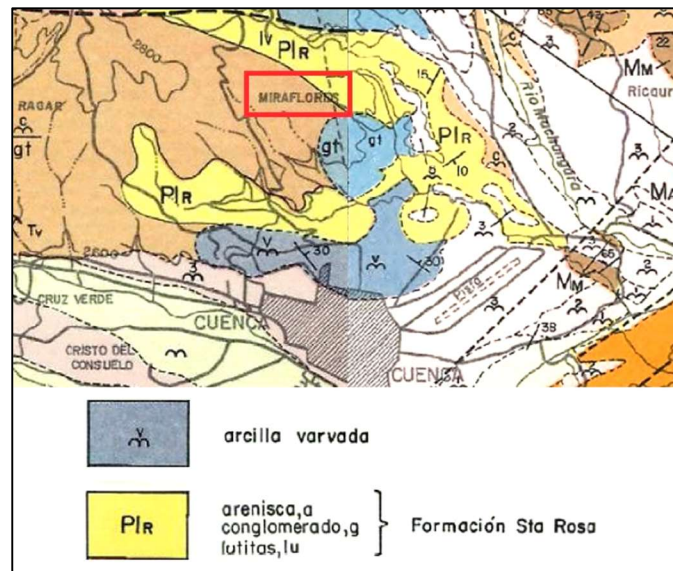
Luego, se optó por tener una guía de las características geológicas de los sitios mencionados, corroborando que se encuentren en zonas asociadas a suelos expansivos. Para ello, se obtuvieron mapas temáticos escala 1:100 000 del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE, 2018). Los lugares de estudio se encuentran en la Hoja Geológica Cuenca y la Hoja Geológica Azogues, por lo que se procedió a su descarga.

Formaciones con suelos problemáticos coincidieron con algunos de estos sitios. Por ejemplo, Loyola (MI), con un gran número de fenómenos inestables con arcillas sensibles en estado húmedo; Guapán (Mg), con una gran cantidad de bentonita; Santa Rosa (Mr), con material que sufre fisuración por desecación; o Arcillas varvadas (QV), conocida por tener suelo susceptible a la humedad con alta expansividad (Precupa, 1994).

Teniendo en cuenta las características de estas formaciones y unidades geológicas, se hizo una comparación conjuntamente con los sitios relacionados a suelos expansivos, definiendo el primer sitio de muestreo: **Miraflores**. Varios autores, Bravo & Daza (2019), Guncay & Morocho (2005) e Idrovo (2019), coincidieron que esta zona, al norte de la ciudad de Cuenca, sería un sitio que coincidiría con estas características. La Figura 28 muestra que Miraflores se encuentra en una zona de arcillas varvadas en la Formación Santa Rosa.



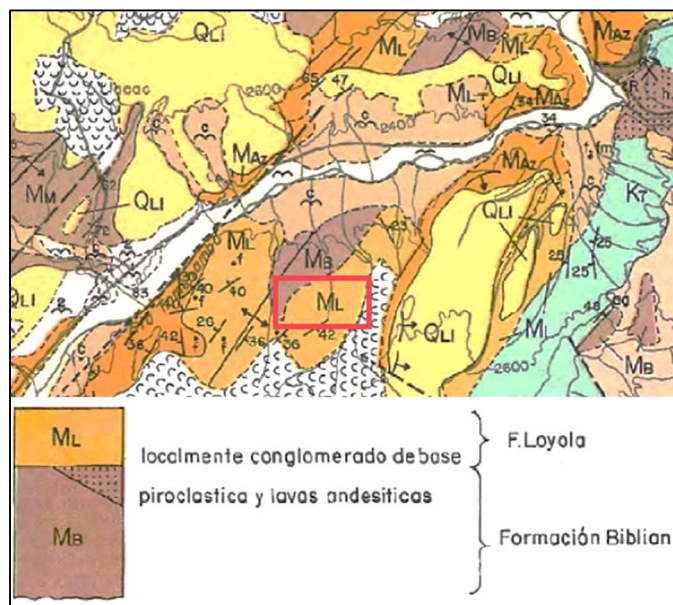
Figura 28. Extracto de mapa geológico del sector Miraflores de la ciudad de Cuenca.



Nota. La figura muestra un extracto de la hoja geológica Cuenca y hoja geológica Azogues (IIGE, 2018). Escala 1:100 000.

Otra zona que es conocida por tener problemas constructivos es **Challuabamba**, en la autopista Cuenca-Azogues. Algunos autores, Bravo & Daza (2019); Idrovo (2019) y Vélez (2012), realizaron ensayos en los que claramente se presentan características expansivas. La zona se encuentra principalmente en la Formación Loyola, por lo que se seleccionó este sitio para realizar la inspección visual y verificar los problemas que menciona la literatura.

Figura 29. Extracto de mapa geológico del sector Challuabamba, autopista Cuenca-Azogues.

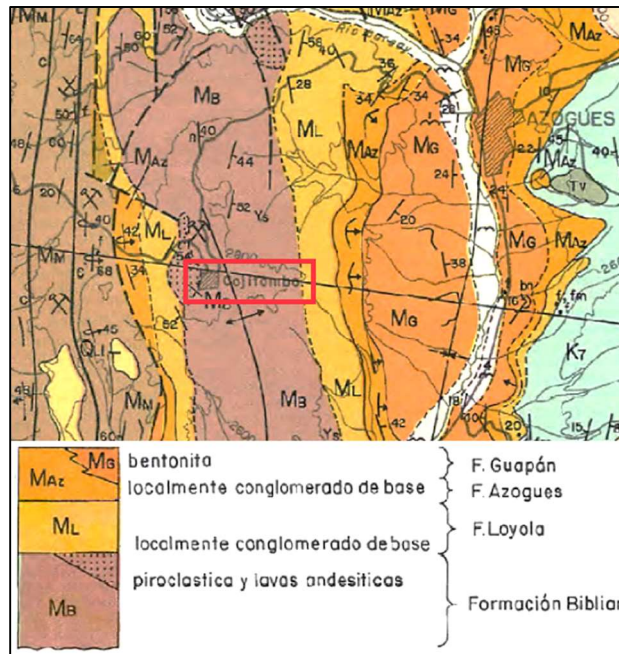


Nota. La figura muestra un extracto de la hoja geológica Azogues (IIGE, 2018). Escala 1:100 000.



Finalmente, se pretendió localizar suelos bentoníticos mencionados por autores como: Cajas & Coellar (1993), Coello (1983) o Simbala (1981). Con base en la revisión bibliográfica, se revela la existencia de bentonitas en la zona de Charasol y **Cojitambo**, sitios cercanos a la ciudad de Azogues los cuales, según su mineralogía, deberían tener cualidades expansivas.

Figura 30. Extracto de mapa geológico de Azogues, sector Cojitambo.



Nota. La figura muestra un extracto de la hoja geológica Azogues (IIGE, 2018). Escala 1:100 000.

Una vez que se analizaron los datos recolectados de las fuentes principales, se comenzó a categorizar los distintos suelos seleccionados. Algunos son históricamente conocidos por causar problemas en las cimentaciones, grietas en paredes de viviendas, levantamiento de material, fisuración en pavimento rígido, entre otros inconvenientes. Se consideró que, si causaban tantas complicaciones, sus características podrían ser seguramente expansivas y, por ende, tener un alto potencial de expansión. Para esto, se procedió a la inspección en campo.

3.1.1. Inspección en campo

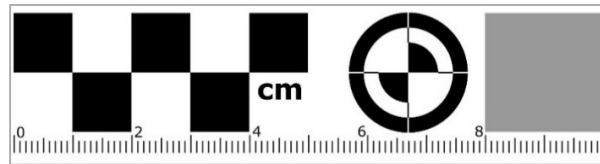
Los reconocimientos en campo representan una parte importante en el análisis de los suelos. Aunque libros y hojas geológicas simbolizan años de estudio de profesionales y sean base fundamental para entender el comportamiento de los suelos, generalmente representan estudios a gran escala por lo que, es necesario revisar las características puntuales de los materiales a través de una inspección en campo y ejecución de ensayos de laboratorio. Por este motivo, se realizaron estos estudios para cada uno de los sitios definidos.

Para algunas de las fotografías tomadas en campo, se consideró adecuado utilizar una escala de referencia que permita dimensionar adecuadamente las características mostradas. La escala utilizada, creada por Elder (2019), contiene un patrón de cuadrícula blanco y negro, cada cuadrado con un centímetro de lado, un objetivo circular que permite determinar con precisión la orientación de la escala y la perspectiva del plano sobre el que se coloca y un cuadro de dos centímetros de lado



de color neutro (gris), utilizado para corrección de color. El contenido de las imágenes mostradas no requirió corrección de color pues la finalidad de las fotografías no lo requiere, además, se limitó la corrección de perspectiva realizando capturas perpendiculares al plano fotografiado. La escala utilizada se muestra en la siguiente figura.

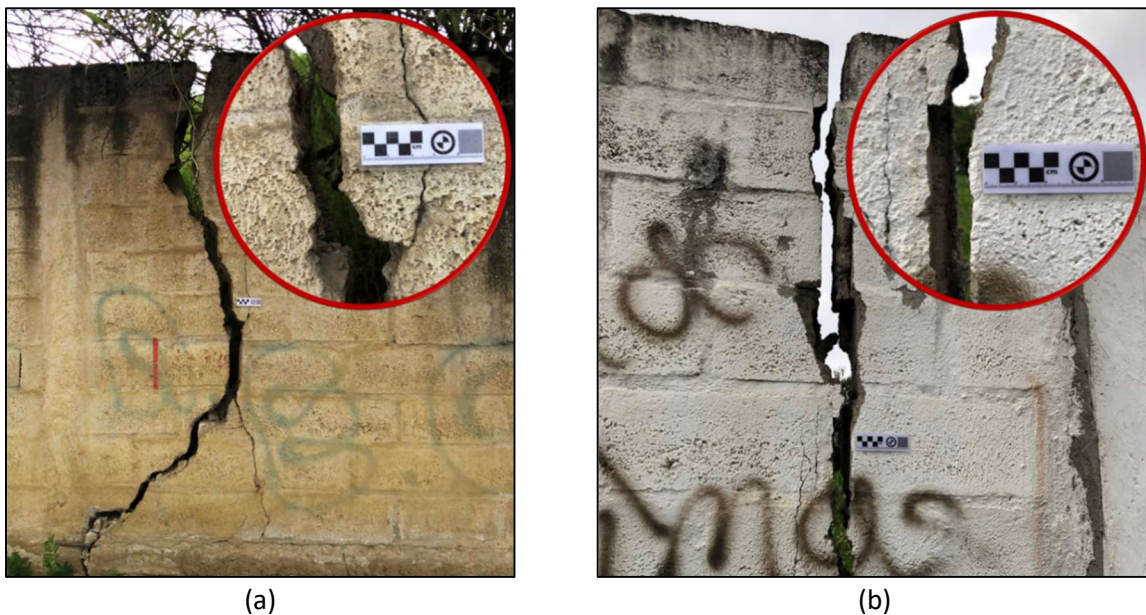
Figura 31. Escala fotográfica de referencia.



Nota. La figura no se encuentra a escala. Modificado de (Elder, 2019) (smallpond.ca/jim/scale)

Como punto inicial, se realizó una revisión preliminar en el sector **Miraflores**, considerando problemas de asentamientos o cuarteos y lugares en donde se puedan extraer muestras de suelo sin que exista inconvenientes con los moradores. Se evidenciaron problemas constructivos en casas, veredas y calles (Figura 32 y Figura 33a). Fotografías adicionales de los problemas debido a los suelos expansivos en Miraflores se muestran en el Anexo D.

Figura 32. Inspección visual en bodegas de Eljuri, sector Miraflores.



Nota. En la figura se observan: (a) Grieta en la Calle Del Acordeón; (b) Grieta en la Calle Del Concierto. Fuente: elaboración propia.

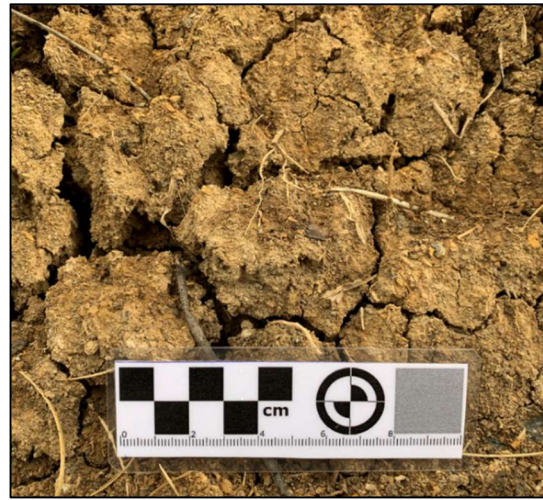
Adicionalmente en la zona, se observó suelo agrietado, material que se pudo haber contraído debido a variación brusca de humedad (Figura 33b). En base a todas esas características y sumado a la investigación bibliográfica, se optó por extraer este material para ser llevado al laboratorio.



Figura 33. Inspección visual en la Calle Del Concierto, sector Miraflores.



(a)



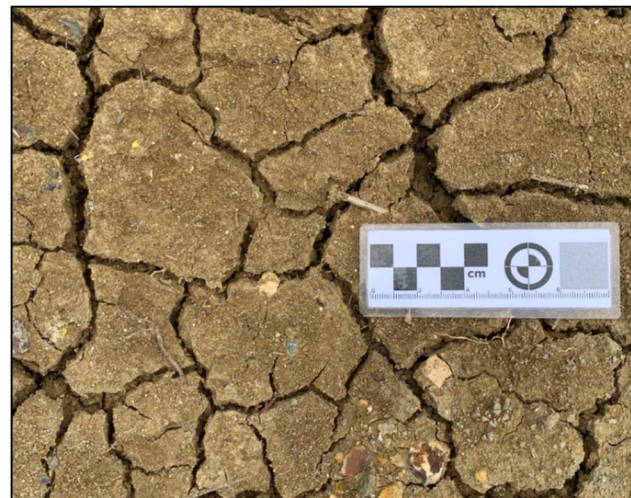
(b)

Nota. En la figura se observa: (a) pavimento agrietado; (b) muestra de suelo agrietada. Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, la inspección visual fue realizada en **Challuabamba**, sector autopista Cuenca-Azogues. La revisión comprendió un área extensa de las zonas que presentaban problemas con suelos expansivos según la literatura.

En este sector, una obra del Municipio de Cuenca se estaba llevando a cabo, en la cual se colocarían veredas y se realizaría la pavimentación de las calles. Maquinaria se encontraba extrayendo material. Se pudieron observar muestras de suelo agrietadas dentro de calicatas realizadas días anteriores, como se observa en la Figura 34. Para corroborar que se trataba de un suelo complejo, la Ing. María Paula Manzano, residente de la obra, expresó que se estaba realizando un muro debido a la inestabilidad de este tipo de suelo y que seguramente tendría características expansivas. Este se puede observar en la foto Anexo D.

Figura 34. Taludes de suelo agrietado en el sector Challuabamba.

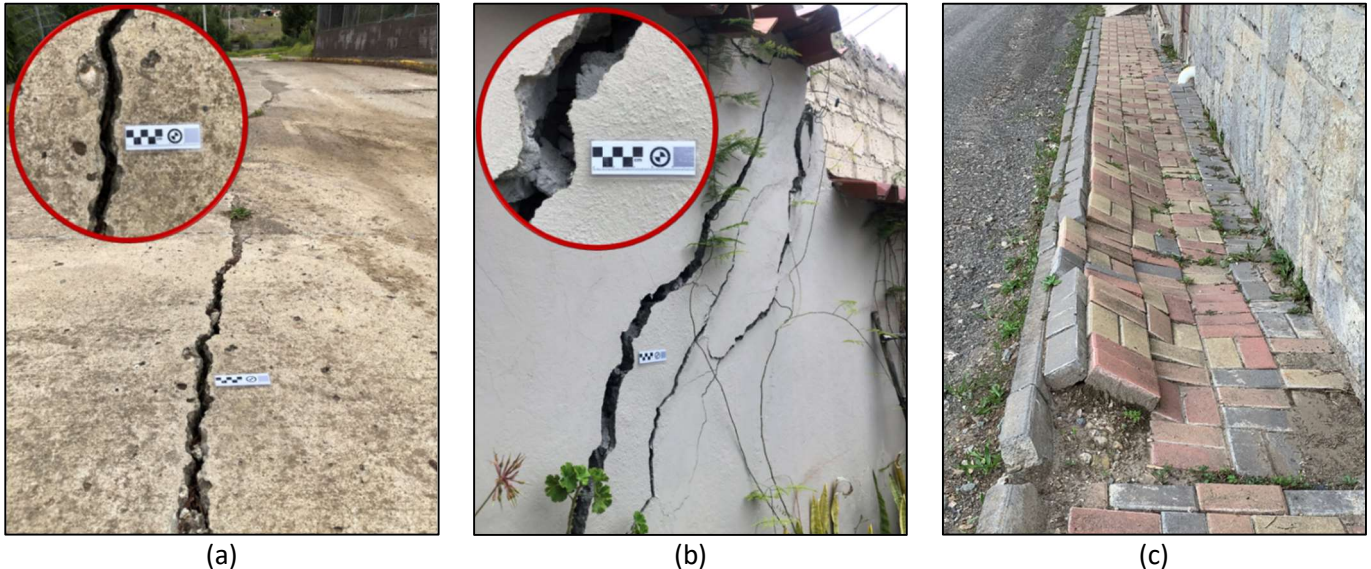


Nota. Las figuras fueron capturadas en la Calle Cultura Challuabamba. Fuente: elaboración propia.



Adicionalmente, tal como se observa en la Figura 35, se pudieron observar grandes desprendimientos de material, levantamiento de veredas y fisuración en el pavimento y en las paredes de las viviendas aledañas. En base a todas estas observaciones de la zona de interés, se procedió a extraer muestras de suelo para ser llevadas al laboratorio. Fotografías adicionales de los problemas debido a los suelos expansivos en Challuabamba se muestran en el Anexo D.

Figura 35. Inspección visual en casas y calles de Challuabamba.



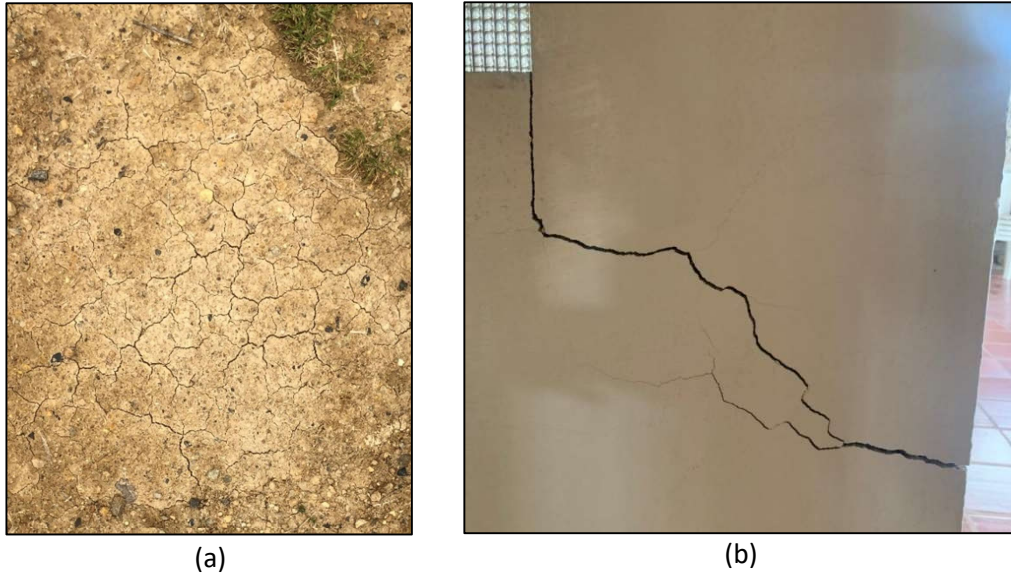
Nota. La figura muestra: (a) Grieta en la Calle Guillermo Vázquez Astudillo; (b) Grieta en la Calle Cultura El Inga; (c) Levantamiento de acera en la Calle Cultura El Inga. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se procedió al reconocimiento visual en el sector **Cojitambo**. En esta zona, Simbala (1981) definió la existencia de seis sitios con presencia de material bentonítico. Se definió un solo sitio de recolección de material debido a la cercanía de los puntos, eligiendo el sitio donde se pudiera realizar el muestreo sin inconvenientes. Su ubicación general se puede observar en la figura del Anexo E.

Para la localidad seleccionada se observó grandes deslizamientos de material y suelo agrietado (Figura 36). Se notó la presencia de fisuras en paredes cercanas al lugar, pero no se observó un gran número de desperfectos constructivos debido a la poca existencia de viviendas. Con fin de identificar las propiedades expansivas de las bentonitas, se obtuvieron muestras de este punto del sector Cojitambo.



Figura 36. Inspección visual en Cojitambo.



Nota. En la figura se observa: (a) muestra de suelo agrietadas en el sector La Villa, Cojitambo; (b) pared agrietada en casa del sector La Villa. Fuente: elaboración propia.

3.2. Obtención de muestras de suelos expansivos

Las características propias de cada suelo y su accesibilidad definieron la metodología de extracción de las muestras, por lo que describiremos cada uno de los casos y como se procedió para obtener las muestras.

En **Miraflores**, la mayor parte de la zona se encuentra urbanizada, por lo que existen pocos lugares donde se pueden realizar extracciones de muestras, no obstante, se definió un punto donde se había realizado una excavación previa. Como se muestra en la Figura 37, el material encontrado en campo estaba dispuesto en dos zonas: la primera con humedad baja, rígida al tacto y quebradiza; bajo esta facie se encontró la segunda, que a causa del temporal lluvioso había aumentado su contenido de agua y tenía una consistencia ligeramente más moldeable, pero quebradiza. Por efecto de la excavación previa, se encontró material disgregado, disperso y con alta humedad, mismo que tenía consistencia similar a plastilina. Este material se recogió en saquillos y se obtuvo dos bloques inalterados de suelo de aproximadamente 20cm x 20cm x 15cm.

Figura 37. Sitio de extracción de la muestra de suelo en Miraflores.



Para el suelo de **Challuabamba**, al momento de hacer la extracción de la muestra, se realizaba una excavación en la zona, misma que puede ser vista en la Figura 38, lo que permitió obtener dos grandes bloques inalterados de aproximadamente 40cm x 30cm x 30cm. La consistencia del material era plástica y una humedad alta, el color de la muestra habano.

Figura 38. Talud de extracción de la muestra de suelo en Challuabamba.



Finalmente, para el punto en **Cojitambo**, se pudo observar deslizamientos en los terrenos, el material era igualmente de consistencia rígida al tacto y con una humedad baja, altamente disgregable y de color café claro. No se pudieron obtener bloques inalterados por su consistencia rígida y quebradiza.

Figura 39. Sitio de extracción de la muestra de suelo en Cojitambo.



A continuación, se muestra una tabla que sintetiza la información de los puntos de extracción.

Tabla 10: Descripción de puntos de extracción de muestras.

Zona	Coordenadas	Descripción	Fecha de extracción
Miraflores	2°51'40"S, 78°55'13"W	Muestra del tipo fino, tamaño de grano uniforme, color crema, con alta humedad. Difícil extracción en bloques, material disgregado.	22 de noviembre de 2021
Challuabamba	2°51'40"S, 78°55'13"W	Suelo de consistencia plástica, humedad alta, color habano. Extracción asistida con equipo de excavación.	27 de septiembre de 2021
Cojitambo	2°45'35"S, 78°53'48"W	Suelo de humedad baja, consistencia rígida y quebradiza. Difícil extracción no se obtuvieron bloques inalterados	30 de noviembre de 2021

3.3. Caracterización de suelos expansivos

Para la caracterización de los suelos en análisis se procedió conforme las normativas descritas en el apartado 2.2. *Caracterización de suelos expansivos*, correspondiente al marco teórico. En esta sección se describen detalles del proceso seguido y los métodos elegidos, así como particularidades de los procedimientos adaptadas a las realidades de materiales y objetivos del presente trabajo de investigación. Para cada muestra de suelo se realizó su caracterización física y de carácter expansivo. Dentro de la caracterización física se obtuvo su gravedad específica, curva granulométrica, límites de Atterberg y clasificación del suelo. En cuanto a la determinación del carácter expansivo se ejecutaron los ensayos de expansión libre y controlada. A continuación, se describen detalles de los procesos seguidos.



3.3.1. Gravedad específica (Gs)

Para su determinación se utilizó el “Método B” o procedimiento para muestras secadas al horno, de la normativa ASTM D854 “Métodos de prueba estándar por picnómetro para Gravedad Específica de los sólidos del suelo”. Se procedió al uso de un matraz de 500 ml de capacidad, una balanza de precisión de 0.01 gr y un termómetro con una división de escala de 1°C en el que se hicieron lecturas observadas a nivel de $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Sin embargo, se utilizó una cantidad de suelo inicial equivalente a $W_o = 100 \text{ gr}$ y no de $50 \pm 10 \text{ gr}$.

Las variables de la expresión para el cálculo de la gravedad específica (Gs) (ecuación 3) que indica la normativa, fueron redefinidas de la siguiente manera:

$$Gs = \frac{W_s}{W_{m+a} - (W_{m+a+s} - W_s)} \quad (38)$$

No obstante, el cálculo fue el mismo.

El factor de temperatura que se utilizó se ve reflejado en el peso específico variable del agua. Por lo tanto, la expresión completa para el cálculo de la gravedad específica quedaría definida como:

$$Gs = \frac{W_s}{W_{m+a} - (W_{m+a+s} - W_s)} * \frac{\gamma_{wT}}{\gamma_w} \quad (39)$$

En donde,

γ_{wT} : Peso específico del agua a temperatura del ensayo

γ_w : Peso específico del agua en condiciones normales

Es preciso que los dos tengan las mismas unidades. Los valores de peso específico del agua a temperatura del ensayo se pueden hallar en la tabla guía del Anexo F. Mientras que, el peso específico del agua en condiciones naturales se consideró siempre igual a:

$$\gamma_w = 1000 \text{ kg/m}^3.$$

El material retenido en el tamiz No. 4 (4.75 mm) es prácticamente nulo, por lo que se consideró que no contiene este tamaño de partículas. Debido a esto, no fue necesario aplicar el numeral 4 de la sección 2.2.2.1, emplear la normativa ASTM C127 determinando el peso específico de la fase sólida para partículas de este tamaño.

3.3.2. Granulometría

Como se ha mencionado antes el porcentaje de material de ciertos tamaños de partícula se ha vinculado con sus características expansivas, especialmente en los tamaños de partícula correspondiente a arcillas, además, una correcta clasificación granulométrica permite calcular el índice de actividad que a su vez es un indicador del mineral predominante. En el proceso de análisis por tamaño de partículas se siguió la norma ASTM D422 “Método de prueba estándar para análisis de suelo por tamaño de partículas” descrito previamente, el agitado de la muestra con hexametáfosfato de sodio se realizó mediante utilización de herramienta mecánica y el hidrómetro



utilizado en todos los ensayos fue el 151H. Para mantener la probeta con suelo y la probeta de control a temperaturas similares, se las sumergió parcialmente a un tercio de su altura en un tanque de agua que permitió mantener el equilibrio térmico, sin embargo, las primeras lecturas de temperatura se hicieron en ambas probetas, pues el proceso de agitado previo al ensayo podía resultar en una diferencia de temperaturas.

3.3.3. Límites de Atterberg

La normativa de referencia en este caso es la *ASTM D4318 “Métodos de prueba estándar para límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos”*, misma que se ha sintetizado en la sección de marco teórico.

Para la obtención del **límite líquido** se siguió el método multipunto descrito en la norma de referencia también referido como “método A”, el mismo que ha sido explicado previamente; es descrito por la norma como más preciso y el método por defecto en caso de no haber ninguna especificación, y es por estos motivos que fue el método seleccionado.

En el caso del **límite plástico**, se elaboraron cilindros a mano, siguiendo las recomendaciones de la normativa. Se realizaron cuatro muestras de 6gr de suelo con la guía establecida de obtener al menos dos de estas. Finalmente se obtuvo su promedio.

En ninguno de los casos se ensayó el **límite de contracción**, indicado en la norma ASTM D427. Para la estimación de este valor se requiere mercurio, mismo que es de difícil adquisición. Adicionalmente, según Vélez (2012), los métodos donde interviene el límite de contracción no son aplicables para los suelos que se encuentran en la formación Loyola, sector donde se obtuvieron muestras. Según estos métodos, el potencial expansivo sería bajo, lo cual no coincide con la realidad de la zona.

Debido a que los criterios en los que intervienen el límite de contracción no son aplicables para calificar el grado de expansividad de las arcillas definidas en la literatura, se determinó que el resultado del ensayo no era justificado para los fines de la presente investigación.

Finalmente, se calculó el **índice de plasticidad (IP)**, manteniendo la expresión definida por:

$$IP = \text{Límite Líquido} - \text{Límite Plástico} \quad (40)$$

3.3.4. Clasificación del suelo

Como se mencionó anteriormente, dos sistemas en la actualidad son los más utilizados para la clasificación de un suelo, AASHTO y SUCS (por sus siglas en español). Debido a esto, se procedió a seguir sus metodologías con el fin de definir las características de las muestras de suelos expansivos.

3.3.4.1. Sistema de clasificación AASHTO

Para este sistema de clasificación, se siguieron las consideraciones presentadas en la sección 2.2.5.1. La tabla guía para clasificar el suelo se encuentra en el Anexo A, utilizada por eliminación de izquierda a derecha. Adicionalmente, para todas las muestras de suelo se tuvieron en cuenta las siguientes observaciones:

- No se encontró suelo con tamaño de partícula mayor a 75mm, aun así, no se hubiera incluido en la muestra para su clasificación.



- El índice de grupo fue calculado en base a la ecuación 10, la expresión completa. La ecuación 11, la expresión parcial, no fue utilizada debido a que el suelo no es un material granular catalogado como A-2.
- La clasificación del suelo se expresó colocando el grupo principal, seguido del subgrupo al que pertenece y el índice de grupo entre paréntesis.
- Cuando el suelo se clasificó como arcilloso, se consideraron dos nuevas condiciones para determinar a qué subgrupo pertenece, tal como la indica la tabla guía del Anexo A.

Si cumple la condición $IP \leq LL - 30$, corresponde a A-7-5.

Si cumple la condición $IP > LL - 30$, corresponde a A-7-6.

Considerando estas aclaraciones, lo descrito en la normativa ASTM D2487 para la clasificación AASHTO fue cumplido a cabalidad.

3.3.4.2. Sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS)

La guía de la sección 2.2.5.2, sumada a la tabla del Anexo A, favorecieron a la clasificación para todas las muestras de suelo según este método, considerando lo siguiente:

- Aunque seguramente exista un porcentaje pequeño de material orgánico en las muestras analizadas debido a sus condiciones en campo, todos fueron catalogados como suelos inorgánicos. Debido a esto, no fueron utilizados los prefijos O (suelo orgánico) o Pt (turba o lodo).
- En base a la granulometría obtenida, todos son suelos de grano fino. Por este motivo, no se consideraron en la clasificación: los símbolos W (bien graduado) y P (mal graduado); los coeficientes de uniformidad (C_u) y curvatura (C_c); y tampoco la consideración de un doble nombre (grano fino y grano grueso).
- Cuando se utilizó la carta de plasticidad, el límite líquido (LL) y el índice de plasticidad (IP) se expresaron como coordenadas, abscisas y ordenadas, respectivamente, con el fin de obtener el punto y la clasificación del suelo según su ubicación en la gráfica (Figura 21).
- La línea A de la carta de plasticidad indica la separación entre arcillas y limos. Sin embargo, en este caso no se pudo distinguir claramente en qué zona se situó el punto. Se utilizó la ecuación 14, se reemplazó el límite líquido (LL) y se obtuvo el índice plástico del gráfico ($IP_{gráfico}$). Si el índice plástico del suelo es mayor a este valor ($IP > IP_{gráfico}$) el suelo es arcilloso, caso contrario se considera limo.

3.4. Carácter expansivo

Con el fin de realizar ensayos de carácter expansivo, fue necesaria una preparación previa de las muestras de suelo a ser ensayadas en los consolidómetros. En base al tipo de material encontrado en campo, fueron definidas dos tipos de muestra: inalterada y remoldeada. Las muestras remoldeadas se construirán con las propiedades del suelo inalterado, con ello se espera que los resultados no se vean influenciados por el tipo de muestra ensayada.

Según la forma en la cual se obtuvieron las muestras de suelos indicadas en la sección 3.2, se definió que para **Miraflores** y **Challuabamba** se trabajaría con muestras remoldeadas e inalteradas, comparando resultados; **Cojitambo**, por su parte, únicamente con muestras remoldeadas.



Muestra inalterada

Las muestras inalteradas fueron obtenidas en anillos directamente en campo o de bloques de suelo llevados a laboratorio (Figura 40). La humedad y el peso específico se mantienen teóricamente en sus condiciones naturales. Sin embargo, para la obtención de muestras con humedades más bajas fue necesario colocarlas a la intemperie o en hornos a temperaturas cercanas a 50°C. El tiempo de duración estuvo en función del valor de humedad requerido, variando entre 10 y 30 minutos para humedades del rango entre 20 y 45%, aproximadamente.

Figura 40. Obtención de muestra inalterada de Challuabamba en anillo en laboratorio.



Nota. Capturada en el Laboratorio de Suelos y Geotecnia de la Universidad de Cuenca. Fuente: elaboración propia.

Muestra remoldeada

El remoldeo fue utilizado cuando no se disponía de bloques inalterados en laboratorio o cuando la muestra no pudo ser obtenida en campo. Para llevar a cabo este proceso, fue necesario definir los valores de volumen, humedad y peso específico que tendrá la muestra.

- El **volumen V** fue obtenido en el laboratorio con ayuda de un calibrador al determinar las dimensiones del anillo utilizado (diámetro interno y altura).
- El rango de **humedad ω** utilizado se definió en base a la revisión bibliográfica de la Tabla 2, en donde se encuentra el resumen de ciertos parámetros de suelos anteriormente estudiados en el austro ecuatoriano. Viene definida por la relación:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de sólidos}} \quad (41)$$

- En el caso del **peso específico γ** , se tomaron valores guía de Precupa (1994) en función de la formación a la que pertenecen. Esta característica se observa para los suelos de análisis: Miraflores, Challuabamba y Cojitambo en la sección 2.3.1. Definido por la expresión:



$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{\text{Peso total}}{\text{Volumen total}} \quad (42)$$

Por facilidad de cálculos, se modifican las unidades del peso específico debido a los datos de laboratorio de peso W y volumen V :

$$\gamma \left[\frac{KN}{m^3} \right] \rightarrow \gamma \left[\frac{gr}{cm^3} \right]$$

La cantidad de sólidos fue tomada del material triturado que pasa el tamiz No. 200 (0.0075mm). El material utilizado y la colocación del suelo remoldeado en anillo se observa en la Figura 41.

Figura 41. Proceso de remoldeo en laboratorio de suelo de Miraflores.



Nota. La figura incluye: (a) trituración de material; (b) colocación de suelo remoldeado en anillo.

Capturada en el Laboratorio de Suelos y Geotecnia de la Universidad de Cuenca. Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenidos estos datos, se puede obtener el peso total de la muestra en gramos, despejando de la ecuación 42:

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

$$W [gr] = \gamma * V \quad (43)$$

Se conoce que el peso total de la muestra W será igual a la suma del peso de agua W_w más el peso de los sólidos W_s , por lo que:

$$W [gr] = W_w + W_s \quad (44)$$

Adicionalmente, con la ecuación 41, se puede formar la relación:

$$\omega * W_s = W_w$$



Reemplazando en la ecuación 44, se obtiene la relación para el peso en gramos de los sólidos:

$$W = \omega * W_s + W_s$$

$$W = W_s(\omega + 1)$$

$$W_s [gr] = \frac{W}{(\omega + 1)} \quad (45)$$

Finalmente, en la ecuación 46, se calcula la cantidad de agua en gramos:

$$W = W_w + W_s$$

$$W_w [gr] = W - W_s \quad (46)$$

En base a este procedimiento, se obtienen los datos necesarios para la muestra remoldeada:

- Peso de sólidos W_s [gr]
- Peso de agua W_w [gr]
- Peso total de la muestra W [gr]

Finalmente, para la preparación de las muestras utilizadas, se optó por colocar papel filtro en la parte inferior y superior del suelo en contacto con las piedras porosas según afirma ASTM D18 Committee (2008) en la sección 7: Aparatos y Materiales.

Figura 42. Papel filtro utilizado en ensayos de expansión libre y controlada.



(a)



(b)

Nota. La figura muestra papel filtro: (a) colocado en el anillo de muestra; (b) colocado dentro del consolidómetro. Capturada en el Laboratorio de Suelos y Geotecnia de la Universidad de Cuenca.

Fuente: elaboración propia.

Resulta importante mencionar que siempre se debe conocer el peso de la muestra y el anillo. El peso húmedo (antes del inicio del ensayo), peso saturado (después del ensayo) y peso seco (después de sacar del horno) son importantes para conocer propiedades fundamentales y humedad alcanzada.

3.4.1. Expansión Libre

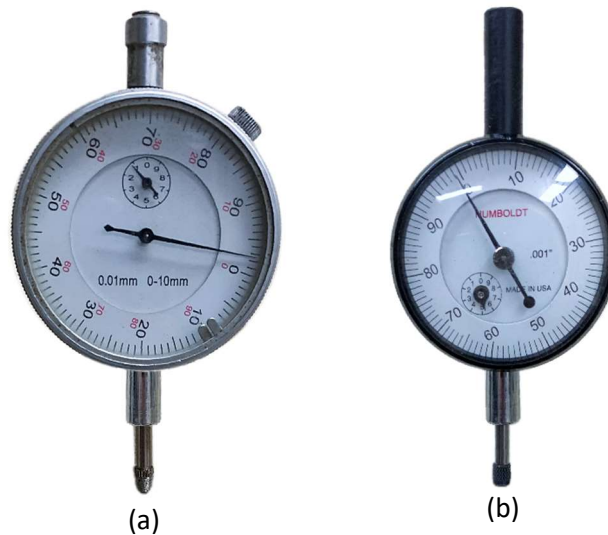
Como se verá más adelante, la expansión libre fue uno de los primeros ensayos realizados con las muestras de suelo. Esto se debe a que, según Vélez (2012), una forma confiable de conocer el potencial expansivo es en base a ensayos directos con el uso del consolidómetro.

La deformación en expansión libre o porcentaje de expansión fue medida de acuerdo con el “método B” de la norma de ASTM D4546 “Métodos de prueba estándar para el expansión o colapso unidimensional de suelos cohesivos”. En el caso de la determinación de porcentaje de expansión libre, se utiliza una presión mínima de 1kPa, la cual en el edómetro es aplicada por el peso propio de la piedra porosa y el pistón de carga.

La normativa destina el uso del método B en muestras inalteradas, esto se debe principalmente a que la presión aplicada sobre la muestra puede ser tanto 1kPa para expansión libre, como una presión de diseño o la presión in situ para cuantificar el nivel de respuesta del suelo. No obstante, por las características de algunos suelos, no fue posible obtener siempre muestras inalteradas, por lo que se recurrió al remoldeo.

En el ensayo de expansión libre fueron utilizados dos tipos de deformímetros disponibles en el Laboratorio de Suelos y Geotecnia de la Universidad de Cuenca. El primero con una precisión de 0.01mm y el segundo con 0.001". La deformación total varía en función del número de rayas en el tipo de equipo utilizado.

Figura 43. Deformímetros utilizados para expansión libre y controlada.



Nota. La figura muestra los deformímetros: (a) con precisión de 0.01mm; (b) con precisión de 0.001". Capturada en el Laboratorio de Suelos y Geotecnia de la Universidad de Cuenca. Fuente: elaboración propia.

Para determinar la deformación por expansión en [mm] según el número de rayas n° :

- Para el primer tipo de deformímetro únicamente fue necesario dividir n° entre 100;
- Para el segundo, n° se multiplica por 25.4 y se divide entre 1000.



Los ensayos realizados para las muestras de Miraflores y Cojitambo fueron llevados a cabo con muestras remoldeadas con peso específico de $\gamma_d = 1.40 \text{ gr/cm}^3$ y $\gamma_d = 1.44 \text{ gr/cm}^3$, respectivamente, valores que coinciden con la bibliografía de las zonas según Precupa (1994). La muestra de Challuabamba fue obtenida directamente de un bloque inalterado con un peso específico seco igual a $\gamma_d = 1.62 \text{ gr/cm}^3$.

3.4.2. Presión de expansión

El procedimiento seleccionado para determinar la presión de expansión fue aquel que permitió optimizar el número de muestras y el tiempo utilizado para cada ensayo, para esto se consideraron los procedimientos de las normativas UNE 103602:1996 y ASTM D4546. Finalmente se seleccionó la normativa UNE 103602:1996 "Ensayo para calcular la presión de hinchamiento de un suelo edómetro" emitida por el Comité Técnico de Normalización 103 – Geotecnia mismo que pertenece a la Asociación Española de Normalización.

La expansión controlada, conocida también como ensayo de "expansión cero" o "volumen constante" según la UNE, ha sido utilizada en múltiples publicaciones: Villar & Lloret (2008) en la influencia del peso específico seco y contenido de agua en la expansión de bentonita; Basma & Husein (1995) en el análisis del comportamiento cíclico de expansión y contracción de un suelo arcilloso; Huang et al. (2019) al describir los factores que influyen la expansión y compresión de arcillas en la región de Yichang, China; o Attom & Barakat (2000) donde destaca que existe una mayor diferencia entre los distintos métodos con un alto peso específico seco y bajo contenido de agua.

El método de la UNE describe también la determinación de la expansión libre posterior a la obtención de la presión de expansión. Este consiste en realizar una serie de descargas hasta llegar a una estabilización, misma que puede tomar 24 horas en cada descarga. No obstante, se omitió esta porción del procedimiento ya que podía alargar significativamente el ensayo y no permitiría obtener el peso saturado de la muestra en expansión controlada a "volumen cero".

3.5. Evaluación estadística

Una vez obtenidos los datos se procedió a realizar un análisis de estadístico sobre los datos, se efectuaron análisis de regresión múltiples sobre los grupos de datos de interés teniendo como variables independientes la humedad y el peso específico seco, y se utilizó el Software Mathcad para llevar a cabo las computaciones necesarias.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

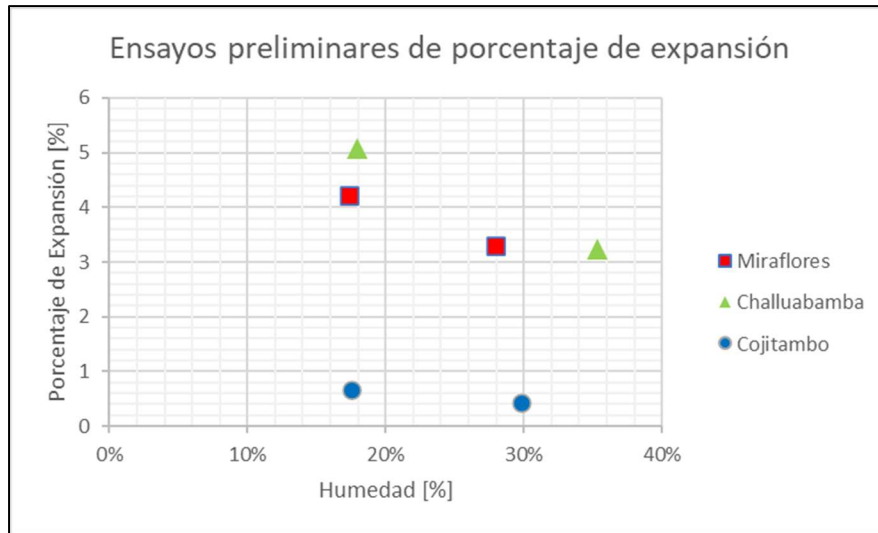
En esta sección se elaboran los cálculos basados en los procedimientos explicados en el Capítulo 2: Marco Teórico y Capítulo 3: Metodología. Adicionalmente, se realiza un análisis y una discusión comparativa de los valores determinados.

En la primera parte se realizan ensayos preliminares para determinar magnitudes de potencial expansivo y la diferencia entre resultados inalterados y remoldeados. Luego, se realiza la caracterización de las muestras de suelo: curvas granulométricas, aplicación de los sistemas de clasificación y expansión y la comparación de las correlaciones con los datos obtenidos en ensayos. Finalmente, se elaboran las curvas de *humedad versus presión de expansión* para las muestras de suelos expansivos.

4.1. Ensayos preliminares de expansión

Miraflores, Challuabamba y Cojitambo son considerados sitios que poseen suelos potencialmente expansivos; al menos así nos lo indica la literatura. Para corroborar esta información, es necesario llevar a cabo ensayos de laboratorio que indiquen directamente la magnitud del potencial de hinchamiento, definido por la deformación y presión de expansión de los suelos. Por conveniencia de este documento de tesis, no resulta significativo caracterizar suelos no expansivos. Por este motivo, se ejecutaron ensayos preliminares de expansión, los mismos que arrojan los siguientes resultados:

Figura 44. Ensayos preliminares de porcentaje de expansión para Miraflores, Challuabamba y Cojitambo.



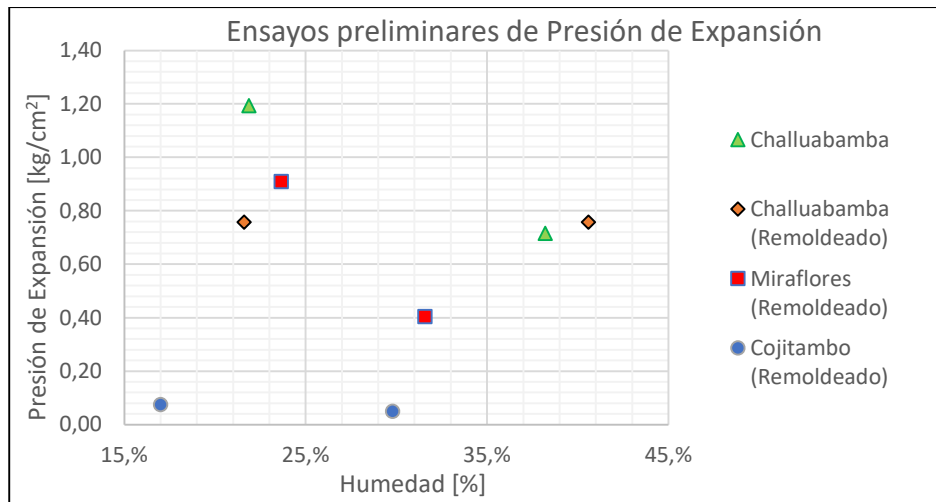
Los puntos mostrados son únicamente una fracción del número total de ensayos y como se puede observar, ya existe diferencia entre resultados de porcentaje de expansión para los tres suelos (los datos completos se pueden ver en el Anexo J, Anexo K y Anexo L). Miraflores y Challuabamba indican un porcentaje de hinchamiento relativamente alto en comparación con los resultados de Cojitambo.

Como ensayo preliminar adicional se define también la diferencia de magnitud de presión de expansión entre muestras inalteradas y remodeladas (Figura 45).

Por el análisis anterior y en base a los objetivos de esta tesis, la caracterización, los ensayos expansivos y la aplicación de correlaciones definidos en la literatura, serán desarrollados únicamente para los suelos de Miraflores y Challuabamba. Cojitambo no se considerará un suelo expansivo.



Figura 45. Ensayos preliminares de presión de expansión para Miraflores, Challuabamba y Cojitambo.



Se intentó mantener la humedad y peso específico seco de las muestras inalteradas, en las remoldeadas. En el caso de Challuabamba se muestran, además, las condiciones en las que fueron hechos los ensayos, junto con la similaridad entre sus resultados, se considera que la alteración de la estructura del suelo no afecta a la presión de expansión. Se muestra también la Tabla 11 donde se incluyen los pesos específicos secos de cada muestra. En el caso de Miraflores y Cojitambo no fue posible obtener muestras inalteradas debido a la consistencia del suelo, por lo que se optó por trabajar únicamente con muestras remoldeadas.

Tabla 11. Presión de expansión de muestras de suelo de Miraflores y Challuabamba inalteradas y remoldeadas.

Muestra	Presión de expansión [kg/cm ²]	Humedad [%]	γ_d [kg/cm ³]
Challuabamba	0.73	39.9%	1.27
Challuabamba	1.19	21.8%	1.28
Challuabamba (Remoldeado)	0.76	40.6%	1.30
Challuabamba (Remoldeado)	0.76	21.6%	1.27
Miraflores (Remoldeado)	0.91	23.6%	1.58
Miraflores (Remoldeado)	0.40	31.6%	1.58
Cojitambo (Remoldeado)	0.05	29.8%	1.44
Cojitambo (Remoldeado)	0.08	17.0%	1.47

4.2. Caracterización

4.2.1. Gravedad Específica (Gs)

Miraflores

Tal como lo indica la normativa, la calibración del matraz fue el primer paso para calcular la gravedad específica de la muestra de suelo obtenida en **Miraflores**. Los valores de peso de matraz más agua (W_{m+a}) tomados a distintas temperaturas se muestran en el Anexo G. En ella se observa también la



gráfica de los datos conjuntamente con su línea de tendencia y la ecuación lineal que la representa ($y = -0.2395x + 678.61$).

La cantidad de material inicial utilizado y el peso obtenido después de haber colocado la muestra en el horno, se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 12. Cantidad de suelo usada para determinar el Gs para el suelo de Miraflores.

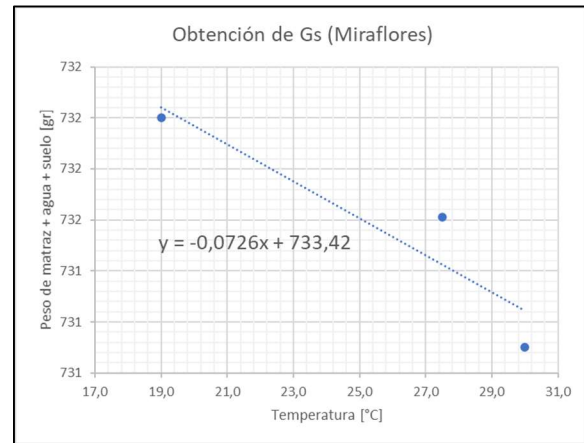
Peso inicial (antes de mezclar con agua y colocar en el matraz) W_o [gr]	100.0
Peso final (después de secar al horno) W_s [gr]	93.8

Seguidamente en la siguiente figura, se observan los valores de peso de matraz, agua y suelo (W_{m+a+s}) a distintas temperaturas y su línea de tendencia entre los tres puntos tomados en el laboratorio.

Figura 46. Obtención de Gravedad Específica de Miraflores.

Temperatura	Peso de matraz + agua + suelo
T (°C)	W_{m+a+s} [gr]
30.0	731.10
27.5	731.61
19.0	732.00

(a)



(b)

Nota. La figura muestra información de Miraflores: (a) tabla de datos; (b) ecuación ajustada.

Una vez definidas las dos ecuaciones de líneas de tendencia, se utilizaron las mismas para encontrar los valores de W_{m+a} y W_{m+a+s} a las temperaturas de ensayo 30, 27.5 y 19°C. Al mismo tiempo que fue necesario el peso específico del agua a estas temperaturas (γ_{wT}).

Tabla 13. Valores resumidos para la obtención de Gravedad Específica Gs para suelo de Miraflores.

Peso específico de agua a condiciones naturales γ_w [Kg/m ³]	1000		
Temperaturas de ensayo [°C]	30.0	27.5	19.0
Peso de matraz + agua W_{m+a} [gr]	669.93	670.52	672.56
Peso de matraz + agua + suelo W_{m+a+s} [gr]	731.21	731.40	732.04
Peso específico del agua a temperatura del ensayo γ_{wT} (Anexo F) [Kg/m ³]	995.71	996.59	998.49
Peso específico de la fase sólida Gs	2.87	2.84	2.73



Con todos los valores obtenidos y resumidos en la Tabla 13, se calculó mediante la ecuación 39 para las tres temperaturas. Fueron calculados tres valores y su promedio significó el valor de gravedad específica para Miraflores.

$$Gs = \frac{W_s}{W_{m+a} + W_s - W_{m+a+s}} * \frac{\gamma_{wT}}{\gamma_w}$$

$$Gs_{Miraflores} = Gs_{promedio} = \frac{Gs_1 + Gs_2 + Gs_3}{3} = \frac{2.87 + 2.84 + 2.73}{3}$$

$$Gs_{Miraflores} \approx 2.81$$

La gravedad específica estimada para Miraflores coincide con valores cercanos hallados en la bibliografía. Según Idrovo (2019), este suelo tiene un $Gs = 2.83$, el cual es similar al calculado. Sin embargo, la variabilidad de sus resultados antes del promedio es relativamente alta. Cabe recalcar que el peso inicial de la muestra W_o para este ensayo no coincide con la normativa, pero esto resulta irrelevante observando el resultado final de Gs para este suelo.

Challuabamba

Los valores de peso de matraz más agua (W_{m+a}) tomados a distintas temperaturas para calcular la gravedad específica (Gs) para **Challuabamba** se muestran en el Anexo G. Se observa también la gráfica de los datos conjuntamente con su línea de tendencia y la ecuación lineal que la representa ($y = -0.1995x + 678.53$).

La cantidad de material inicial utilizado y el peso obtenido después de haber colocado la muestra en el horno, se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 14. Cantidad de suelo usada para determinar el Gs para el suelo de Challuabamba.

Peso inicial (antes de mezclar con agua y colocar en el matraz) W_o [gr]	100.0
Peso final (después de secar al horno) W_s [gr]	91.6

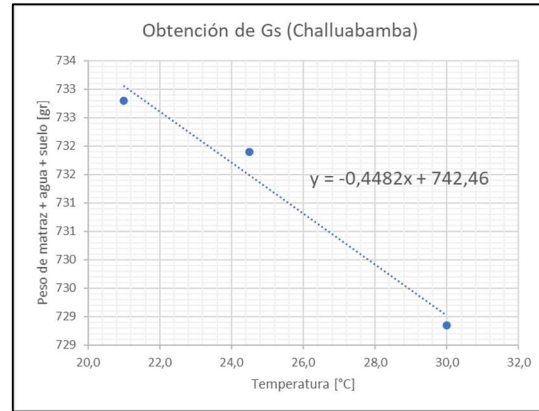
Seguidamente en la siguiente figura, se observan los valores de peso de matraz, agua y suelo (W_{m+a+s}) a distintas temperaturas y su línea de tendencia entre los tres puntos.



Figura 47. Obtención de Gravedad Específica de Challuabamba.

Temperatura	Peso de matraz + agua + suelo
T (°C)	W_{m+a+s} [gr]
30.0	728.85
24.5	731.90
21.0	732.79

(a)



(b)

Nota. La figura muestra información de Challuabamba: (a) tabla de datos; (b) ecuación ajustada.

Una vez definidas las dos ecuaciones de líneas de tendencia, se utilizaron las mismas para encontrar los valores de W_{m+a} y W_{m+a+s} a las temperaturas de ensayo 30, 24.5 y 21°C. Al mismo tiempo que fue necesario el peso específico del agua a estas temperaturas (γ_{wT}).

Tabla 15. Valores resumidos para la obtención de Gravedad Específica G_s para suelo de Challuabamba.

Peso específico de agua a condiciones naturales γ_w [Kg/m ³]	1000		
Temperaturas de ensayo [°C]	30.0	24.5	21.0
Peso de matraz + agua W_{m+a} [gr]	672.38	673.36	673.99
Peso de matraz + agua + suelo W_{m+a+s} [gr]	729.01	731.22	732.62
Peso específico del agua a temperatura del ensayo γ_{wT} (se puede ver en el Anexo F) [Kg/m ³]	995.71	997.13	998.08
Peso específico de la fase sólida G_s	2.67	2.79	3.04

Con todos los valores obtenidos y resumidos en la Tabla 15, se calculó mediante la ecuación 39 para las tres temperaturas. Fueron calculados tres valores y su promedio significó el valor de gravedad específica para Challuabamba.

$$G_s = \frac{W_s}{W_{m+a} + W_s - W_{m+a+s}} * \frac{\gamma_{wT}}{\gamma_w}$$

$$G_{sChalluabamba} = G_{s\text{promedio}} = \frac{G_{s1} + G_{s2} + G_{s3}}{3} = \frac{2.67 + 2.79 + 3.04}{3}$$

$$G_{sChalluabamba} \approx 2.83$$

La gravedad específica estimada para Challuabamba coincide con valores cercanos hallados en la bibliografía. Según Idrovo (2019), este suelo tiene un $G_s = 2.82$ y según (Vélez, 2012) un promedio igual a $G_s = 2.81$, el cual es similar al calculado. Al igual que en el primer suelo, el peso inicial de la



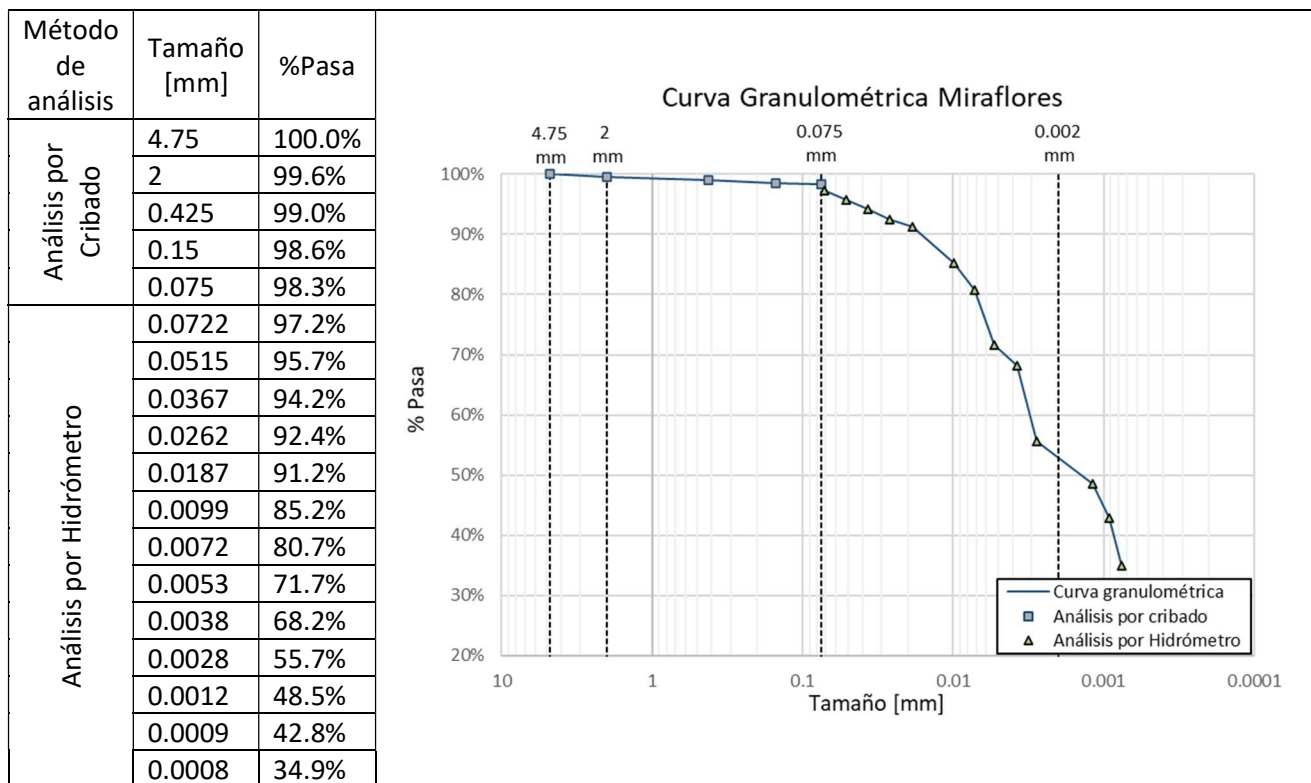
muestra W_0 para este ensayo no coincide con la normativa, pero esto resulta irrelevante observando el resultado final de G_s para este suelo.

4.2.2. Granulometría

Conforme al procedimiento descrito para clasificación granulométrica en la sección 2.2.3, se obtuvieron los resultados que se muestran más adelante.

Para la muestra obtenida de Miraflores se observa que un gran porcentaje pasa el tamiz No. 200, con un porcentaje del 98.3%, por lo que los datos obtenidos a partir del análisis por hidrómetro forman la mayor parte de la curva granulométrica.

Figura 48. Curva granulométrica y datos de Miraflores.

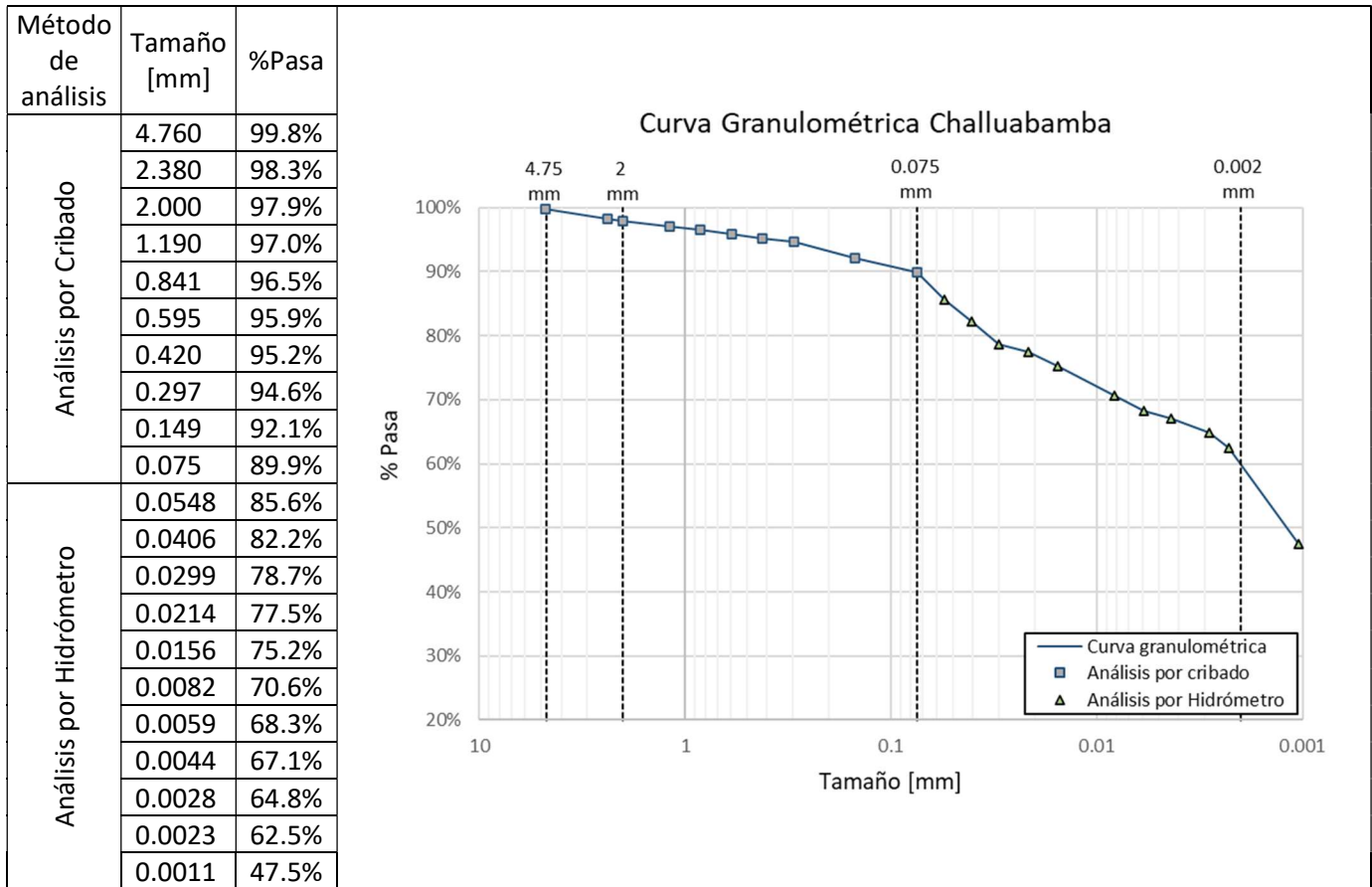


De la curva mostrada se puede obtener el porcentaje de suelo de tamaño menor a los 0.002mm en este caso 53.1%, mismo que será utilizado determinar el índice de actividad y el porcentaje correspondiente a arcilla según la clasificación AASHTO. El tamaño máximo de partícula es de 2mm. Además, el tiempo del ensayo de granulometría por hidrómetro fue de 72 horas tras lo que se determinó un porcentaje de partícula de tamaño menor a 0.0008mm. Un análisis extendido de granulometría para Miraflores se puede encontrar en el Anexo H.

En el caso del material obtenido de Challuabamba también se observó un gran porcentaje pasante del tamiz No. 200 es de 89.9%, un valor menor al determinado en Miraflores, no obstante, alto e indicativo de gran cantidad de finos.



Figura 49. Curva granulométrica y datos de Challuabamba.



En este caso el porcentaje de partículas menores a 0.002mm es de 59.7% y el tamaño máximo de partícula es de 4.75mm. El tiempo del ensayo por hidrómetro fue de 24 horas tras lo que se determinó un porcentaje de partícula de tamaño menor a 0.0011mm, más detalles pueden encontrarse en el Anexo I.

4.2.3. Límites de Atterberg

Miraflores

Con base en el procedimiento explicado en la sección 2.2.4, se procede a obtener el **límite líquido (LL)** a partir de los datos de la Tabla 16. Se calculan las humedades en base al peso seco y peso húmedo de cada una de las muestras.

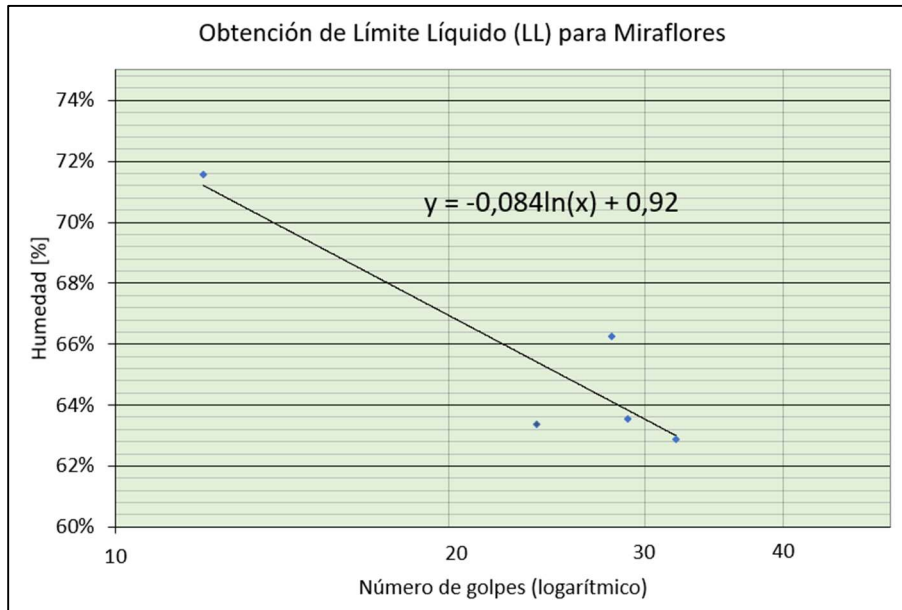
Tabla 16. Valores de humedad y número de golpes para la obtención de Límite Líquido LL para suelo de Miraflores.

No. de golpes	Tara No.	Peso de Tara [gr]	Peso de tara + Suelo húmedo [gr]	Peso de tara + Suelo seco [gr]	Humedad
32	47	47.80	72.10	62.72	62.9%
29	171	50.20	69.50	62.00	63.6%
28	18	40.69	64.58	55.06	66.2%
24	101	43.80	76.34	63.72	63.4%
12	136	41.18	74.65	60.69	71.6%



En el gráfico semilogarítmico de la Figura 50, se observan los cinco puntos obtenidos y se determina la línea de tendencia conjuntamente con su ecuación.

Figura 50. Obtención de Límite Líquido con ecuación ajustada para suelo de Miraflores.



La variable y corresponde a la humedad, mientras que x es el número de golpes. Por lo tanto, se calcula el límite líquido en base a la ecuación para 25 golpes.

$$y = -0.084 * \ln(X) + 0.92$$

$$LL = -0.084 * \ln(25) + 0.92$$

$$LL_{\text{Miraflores}} \approx 65.0\%$$

Posterior a la obtención de este valor, se muestran los resultados del proceso repetitivo que se muestran resumidos en la Tabla 17, correspondiente al **límite plástico (LP)**. Se calculan las humedades en base a su peso seco y peso húmedo. Finalmente, este límite será el promedio de los resultados, tal como se muestra.

Tabla 17. Valores de humedad para la obtención de Límite Plástico LP para suelo de Miraflores.

Tara No.	Peso de Tara [gr]	Peso de tara + Suelo húmedo [gr]	Peso de tara + Suelo seco [gr]	Humedad
2	43.86	46.67	45.98	32.5%
43	43.89	46.72	46.04	31.7%
48	40.74	43.61	42.94	30.4%
10	44.64	47.91	47.15	30.3%

$$LP = \frac{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4}{4}$$



$$LP = \frac{32.5 + 31.7 + 30.4 + 30.3}{4}$$

$$LP \approx 31.2\%$$

Adicionalmente a los criterios de Límites de Atterberg, se obtiene el **índice de plasticidad (IP)**, definido por la diferencia entre:

$$IP = \text{Límite Líquido} - \text{Límite Plástico}$$

$$IP = 65.0 - 31.2 \approx 33.8\%$$

Challuabamba

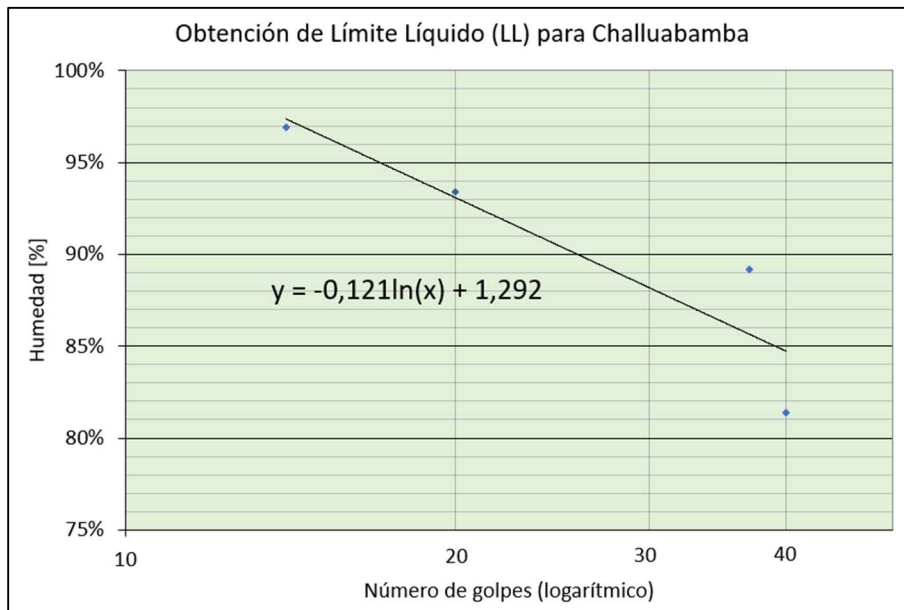
Se procede a obtener el **límite líquido (LL)** a partir de los datos de la Tabla 18 para Challuabamba. Se calculan las humedades en base al peso seco y peso húmedo de cada una de las muestras.

Tabla 18. Valores de humedad y número de golpes para la obtención de Límite Líquido LL para suelo de Challuabamba.

No. de golpes	Tara No.	Peso de Tara [gr]	Peso de tara + Suelo húmedo [gr]	Peso de tara + Suelo seco [gr]	Humedad
40	43	44.05	70.80	58.80	81.4%
37	18	40.79	65.44	53.82	89.2%
20	135	40.49	64.80	53.06	93.4%
14	89	46.57	75.24	61.13	96.9%

Se elabora un gráfico semilogarítmico, en el cual se determina una línea de tendencia a partir de los datos obtenidos.

Figura 51. Obtención de Límite Líquido con ecuación ajustada para suelo de Challuabamba.





La variable y corresponde a la humedad, mientras que x es el número de golpes. Por lo tanto, se calcula el límite líquido en base a la ecuación para 25 golpes.

$$y = -0,121 * \ln (X) + 1,292$$

$$LL = -0,121 * \ln (25) + 1,292$$

$$LL_{Challuabamba} \approx 90.3\%$$

Nuevamente y posterior a la obtención de este valor, se calcula el **límite plástico (LP)** en función de los resultados del proceso repetitivo que se muestran en la Tabla 19. Se calculan las humedades en base a su peso seco y peso húmedo.

Tabla 19. Valores de humedad para la obtención de Límite Plástico LP para suelo de Challuabamba.

Tara No.	Peso de Tara [gr]	Peso de tara + Suelo húmedo [gr]	Peso de tara + Suelo seco [gr]	Humedad
L2	41.22	46.36	45.00	36.0%
15	44.89	56.46	53.38	36.3%
74	45.62	52.48	50.48	41.1%
48	40.90	49.80	47.32	38.6%

$$LP = \frac{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4}{4}$$

$$LP = \frac{36.0 + 36.3 + 41.1 + 38.6}{4}$$

$$LP \approx 38.0\%$$

Finalmente, se calcula el **índice de plasticidad (IP)**, siendo definido por:

$$IP = \text{Límite Líquido} - \text{Límite Plástico}$$

$$IP = 90.3 - 38.0 \approx 52.3\%$$

4.2.4. Clasificación del suelo

Miraflores

Con base en la sección 2.2.5, se procede a la clasificación del suelo de Miraflores a partir de los resultados de la Tabla 20.

Para el **sistema de clasificación AASHTO**, se comprueban los datos de la tabla guía del Anexo A con los obtenidos para el suelo de Miraflores de la Tabla 20. Se verifica que el último grupo es aquel que cumple con todos los criterios impuestos.

Tabla 20. Comparación de los datos de suelo Miraflores con los establecidos por AASHTO.

Análisis de Tamiz (Porcentaje que pasa)	Condición	Observación
Núm. 10	99.6%	-
Núm. 40	99.0%	-
Núm. 200	98.3%	36 mín. Cumple



Características de la fracción de paso			
Límite Líquido	65.0%	41 mín.	Cumple
Índice de plasticidad	33.7%	11 mín.	Cumple

Por lo que el suelo de Miraflores está dentro del grupo **A-7**. En base a la nueva condición para determinar el subgrupo se verifica que:

- Para A-7-5:

$$IP \leq LL - 30$$

$$33.7 \leq 65.0 - 30$$

$$33.7 \leq 35.0$$

Si cumple la condición $IP \leq LL - 30$

Por este motivo, el suelo de Miraflores estaría clasificado dentro del grupo A-7-5. Finalmente, se considera el *índice de grupo (IG)* mencionado en la sección 2.2.5.1.

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

$$IG = (98.3 - 35)[0.2 + 0.005(65 - 40)] + 0.01(98.3 - 15)(33.7 - 10)$$

$$IG_{\text{Miraflores}} = 40.32 \approx 40$$

Con este valor, se define la clasificación según AASHTO de la muestra de suelo de Miraflores como **A-7-5 (40)**.

Los índices de grupo de suelos con un porcentaje alto de arcilla suelen ser mayores a 20. Adicionalmente, según Braja Das (2015), la calidad del rendimiento de un suelo que va a ser utilizado como subrasante es inversamente proporcional al índice de grupo. Debido a todo esto, al tener un $IG = 40$, se considera un suelo arcilloso de mala calidad.

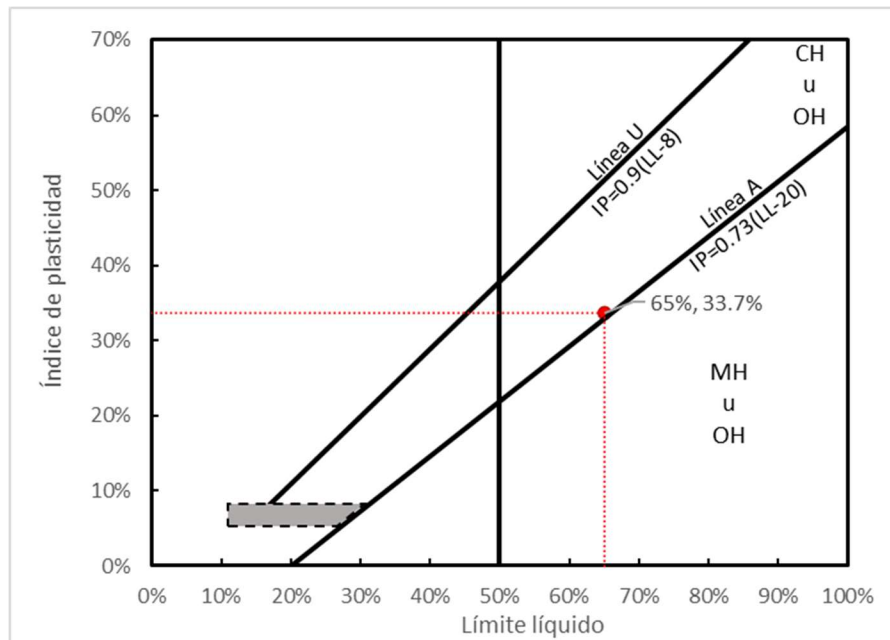
Para la **clasificación SUCS**, se toma en consideración la tabla guía del Anexo A con los datos obtenidos anteriormente para el suelo de Miraflores, que se resumen en la Tabla 20. Con un porcentaje que pasa a través del tamiz núm. 200 que supera el 50% se define como un suelo de grano fino. Con un límite líquido (LL) superior a 50 y considerando un suelo inorgánico, se requiere el uso de la carta de plasticidad.

La Figura 52 muestra la ubicación del punto para este tipo de suelo. Al estar relativamente cerca de la línea A empírica, se define si es una arcilla de alta plasticidad (CH) o un limo de alta plasticidad (MH).

$$IP_{\text{gráfico}} = 0.73(LL - 20)$$

$$IP_{\text{gráfico}} = 0.73(65.0 - 20) \approx 32.9$$

Figura 52. Gráfica de plasticidad para clasificación según SUCS de Miraflores.



Fuente: Modificado de (Das, 2015).

Al verificar la ubicación en la gráfica del límite de plasticidad y al comprobar que este se encuentra por encima de la línea A ($33.7 > 32.9$), el suelo de Miraflores se clasifica según SUCS como una **arcilla de alta plasticidad (CH)**, lo cual coincide con lo descrito por Idrovo (2019) y la información obtenida por Precupa (1994) para suelos de esta localidad.

Challuabamba

Con base en la sección 2.2.5, se procede a la clasificación del suelo de Challuabamba a partir de los resultados de la Tabla 21.

Para el **sistema de clasificación AASHTO**, se comprueban las características resumidas del suelo en la Tabla 21. Se observa que el último grupo es aquel que cumple con todos los criterios impuestos.

Tabla 21. Comparación de los datos de suelo Challuabamba con los establecidos por AASHTO.

Análisis de Tamiz (Porcentaje que pasa)	Condición	Observación
Núm. 10	97.9%	-
Núm. 40	95.2%	-
Núm. 200	89.9%	36 mín. Cumple
Características de la fracción de paso		
Límite Líquido (LL)	90.3%	41 mín. Cumple
Índice de plasticidad (IP)	52.3%	11 mín. Cumple



Por lo que el suelo de Challuabamba está dentro del grupo **A-7**. En base a la nueva condición para determinar el subgrupo se verifica que:

- Para A-7-5:

$$IP \leq LL - 30$$

$$52.3 \leq 90.3 - 30$$

$$52.3 \leq 60.3$$

Si cumple la condición para $IP \leq LL - 30$

Por este motivo, el suelo está clasificado dentro del grupo A-7-5. Finalmente, se considera el *índice de grupo (IG)* mencionado en la sección 2.2.5.1.

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

$$IG = (89.9 - 35)[0.2 + 0.005(90.3 - 40)] + 0.01(89.9 - 15)(52.3 - 10)$$

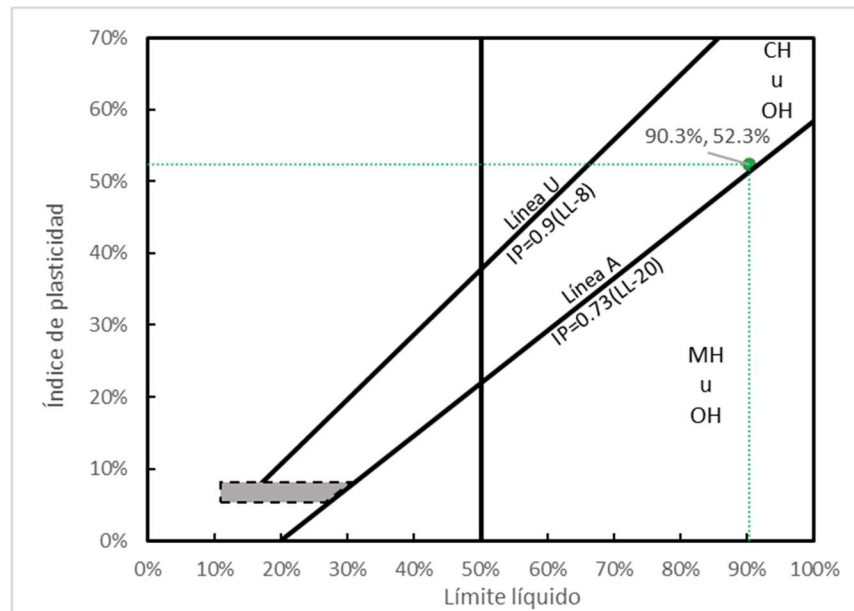
$$IG_{Challuabamba} = 56.41 \approx 56$$

Con este valor, se define la clasificación según AASHTO de la muestra de suelo de Challuabamba como **A-7-5 (56)**.

La clasificación de Challuabamba se asemeja a la analizada en Miraflores. Como se expresó antes, la calidad del rendimiento de un suelo que va a ser utilizado como subrasante es inversamente proporcional al índice de grupo. Debido a esto, al tener un $IG = 56$, también se considera un suelo arcilloso de mala calidad.

Para el **sistema de clasificación SUCS**, considerando la tabla guía y en comparación con la Tabla 21, se define un suelo de grano fino, un límite líquido (LL) mayor a 50 y un suelo inorgánico. Debido a estas consideraciones, se requiere el uso de la carta de plasticidad.

Figura 53. Gráfica de plasticidad para clasificación según SUCS de Challuabamba.



Fuente: Modificado de (Das, 2015).

La Figura 53 muestra la ubicación del punto para este suelo. Al igual como en el suelo de Miraflores, se define si es una arcilla de alta plasticidad (CH) o un limo de alta plasticidad (MH).

$$IP_{gráfico} = 0.73(LL - 20)$$

$$IP_{gráfico} = 0.73(90.3 - 20) \approx 51.3$$

Al verificar la ubicación en la gráfica del límite de plasticidad y al comprobar que este se encuentra por encima de la línea A ($52.3 > 51.3$), el suelo de Challuabamba se clasifica según SUCS como una **arcilla de alta plasticidad (CH)**, lo cual coincide con lo descrito por Idrovo (2019), Brito & Delgado (2007), Vélez (2012) y la información obtenida por Precupa (1994) para suelos de esta localidad.

4.3. Carácter expansivo

Para definir el carácter expansivo de un suelo, se elaboran dos ensayos directos en laboratorio: el ensayo de expansión libre, que indica el porcentaje de expansión, y el ensayo de expansión controlada, que nos entrega la presión de expansión. Los dos definen el potencial expansivo de las muestras analizadas. A continuación, se presentan los resultados.

4.3.1. Expansión Libre

Se muestran los resultados obtenidos en ensayos de expansión libre para las muestras de Miraflores y Challuabamba. Algunos de los datos obtenidos son los que se observan en la sección 4.1: Ensayos preliminares, en la cual se define que la muestra de Cojitambo no será tomada en consideración para ensayos de carácter expansivo.



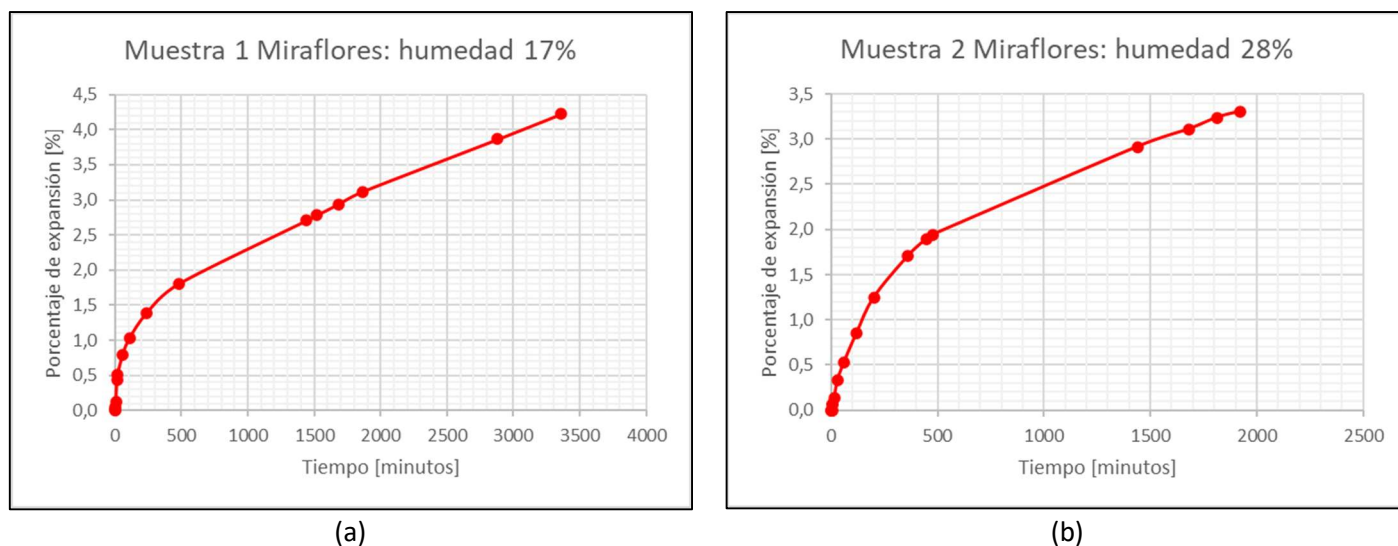
Los resultados para la muestra de **Miraflores** se observan en la Tabla 22. Se presenta el tiempo del ensayo en minutos, el número de rayas, la deformación, el porcentaje de expansión y la humedad inicial. Para la muestra 1 se tuvo una precisión de 0.01mm , mientras que $0.001''$ para la muestra 2.

Tabla 22. Resultados de expansión libre para las muestras de Miraflores.

Muestra	Tiempo [min]	# de rayas (0.01 mm) / (0.001")	Deformación [mm]	Expansión [%]	Humedad [%]
1	3360	82.0	0.82	4.23	17.4
2	1920	25.5	0.65	3.30	27.9

Se observa claramente que la muestra que tiene humedad más baja tuvo un porcentaje de expansión más alto y coincide en que el tiempo de ensayo también fue mayor. La Figura 54 muestra la expansión a lo largo del tiempo para las dos muestras de Miraflores.

Figura 54. Gráficos de porcentaje de expansión en el tiempo del suelo Miraflores.



Nota. En la figura se observa: (a) Muestra 1 con humedad 17%; (b) Muestra 2 con humedad 28%.

Los resultados para la muestra de **Challuabamba**, tienen el mismo formato que los datos anteriormente mostrados. En la Tabla 23 se presenta el tiempo del ensayo en minutos, el número de rayas, la deformación, el porcentaje de expansión y la humedad inicial. Nuevamente, para la muestra 1 se tuvo una precisión de 0.01mm , mientras que $0.001''$ para la muestra 2.

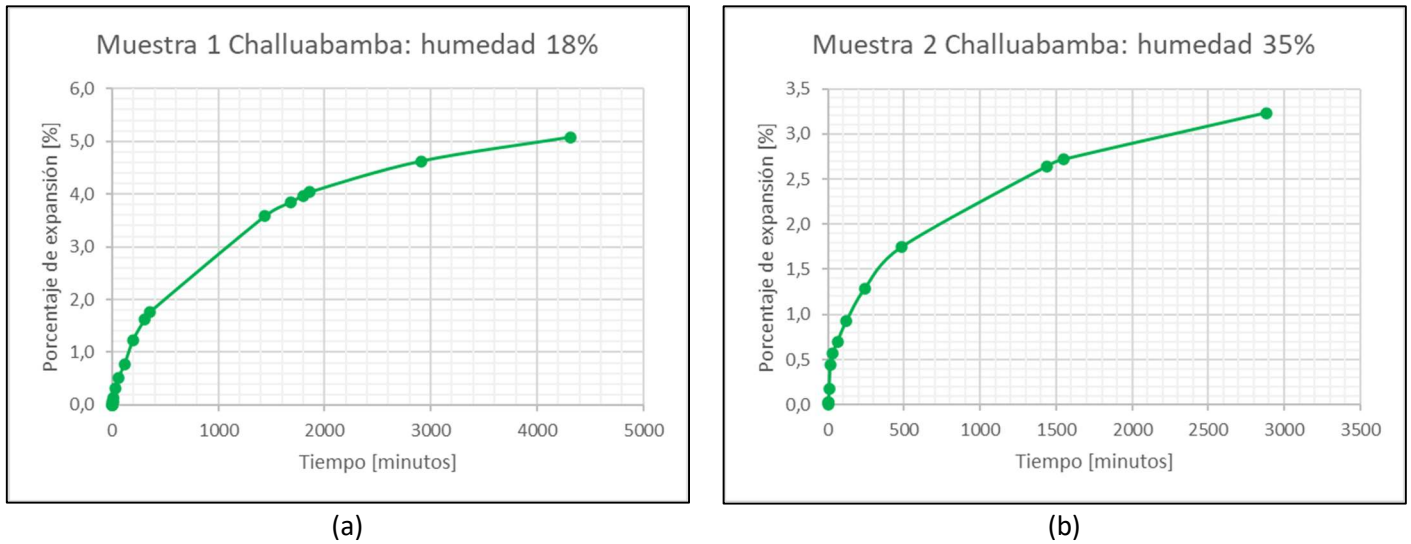
Tabla 23. Resultados de expansión libre para las muestras de Challuabamba.

Muestra	Tiempo [min]	# de rayas (0.01 mm) / (0.001")	Deformación [mm]	Expansión [%]	Humedad [%]
1	4320	39.0	0.99	5.08	18.0
2	2880	63.0	0.63	3.23	35.4

También se puede ver que, al igual que Miraflores, la muestra que tiene humedad más baja tuvo un porcentaje de expansión más alto y coincide en que el tiempo de ensayo también fue mayor.



Figura 55. Gráficos de porcentaje de expansión en el tiempo del suelo Challuabamba.



Nota. En la figura se observa: (a) Muestra 1 con humedad 18%; (b) Muestra 2 con humedad 35%.

Los datos completos de porcentaje de expansión en el tiempo y análisis de propiedades de la muestra antes y después del presente ensayo para suelos de Miraflores, Challuabamba y Cojitambo se pueden encontrar en el Anexo J, Anexo K y Anexo L, respectivamente. Además, en las siguientes tablas, se muestran propiedades como la humedad, peso específico húmedo, peso específico seco y saturación para las muestras analizadas de Miraflores y Challuabamba.

Tabla 24. Propiedades antes y después del ensayo de expansión libre para las muestras de Miraflores.

Cálculos	Muestra 1		Muestra 2	
	Inicial	Final	Inicial	Final
Humedad [%]	17.4%	53.6%	27.9%	36.2%
Volumen [cm ³]	38.4	40.0	78.0	80.6
Peso específico [gr/cm ³]	1.24	1.56	1.97	2.03
Peso específico seco [gr/cm ³]	1.06	1.02	1.54	1.49
Saturación [%]	63.2	99.1	78.4	97.6

Tabla 25. Propiedades antes y después del ensayo de expansión libre para las muestras de Challuabamba.

Cálculos	Muestra 1		Muestra 2	
	Inicial	Final	Inicial	Final
Humedad [%]	18.0%	42.3%	35.3%	39.4%
Volumen [cm ³]	39.1	41.0	39.1	40.3
Peso específico [gr/cm ³]	1.67	1.91	1.94	1.94
Peso específico seco [gr/cm ³]	1.41	1.34	1.43	1.39
Saturación [%]	73.9	99.8	84.3	98.7



4.3.2. Presión de expansión

Se llevaron a cabo un total de 33 ensayos de expansión controlada conforme al proceso detallado en la sección 3.4.2, distribuidos en 2 ensayos para muestras remoldeadas de Cojitambo, 11 ensayos sobre muestras remoldeadas de Miraflores y 20 ensayos en muestras de Challuabamba, donde 17 fueron sobre muestras inalteradas y 3 en muestras remoldeadas.

Se presenta a continuación una tabla resumen que contiene los resultados de cada ensayo y características principales calculadas.

Tabla 26. Presión de expansión, humedad y peso específico seco de Miraflores, Challuabamba y Cojitambo.

Origen de la Muestra	Presión de expansión [kg/cm ²]	Humedad ω	Peso específico seco γ_d [gr/cm ³]	Descripción
Cojitambo	0.05	29.8%	1.44	Muestras Remoldeadas
	0.08	17.0%	1.47	
Miraflores	0.91	23.6%	1.58	Muestras remoldeadas
	0.40	31.6%	1.58	
	0.50	24.0%	1.36	
	0.33	20.4%	1.30	
	0.62	17.9%	1.40	
	0.95	21.4%	1.56	
	0.055	38.3%	1.22	
	0.050	40.2%	1.29	
	1.25	14.2%	1.51	
	0.25	35.6%	1.47	
	2.12	12.3%	1.58	
Challuabamba	0.73	39.9%	1.27	Muestras inalteradas
	1.19	21.8%	1.28	
	0.79	32.2%	1.32	
	0.35	31.3%	1.27	
	0.18	43.4%	1.25	
	0.76	40.5%	1.30	
	0.72	38.2%	1.28	
	3.54	21.9%	1.62	
	3.00	23.0%	1.47	
	0.40	43.9%	1.27	
	0.24	27.2%	1.12	
	0.37	41.5%	1.31	
	0.25	45.7%	1.14	
	0.19	39.2%	1.22	
	0.76	39.4%	1.32	
3.03	26.1%	1.53		
0.50	39.4%	1.27	Muestras remoldeadas	
0.76	40.6%	1.30		
2.02	30.4%	1.37		
	0.76	21.6%	1.27	



Figura 56. Humedad vs Presión de expansión de Miraflores.

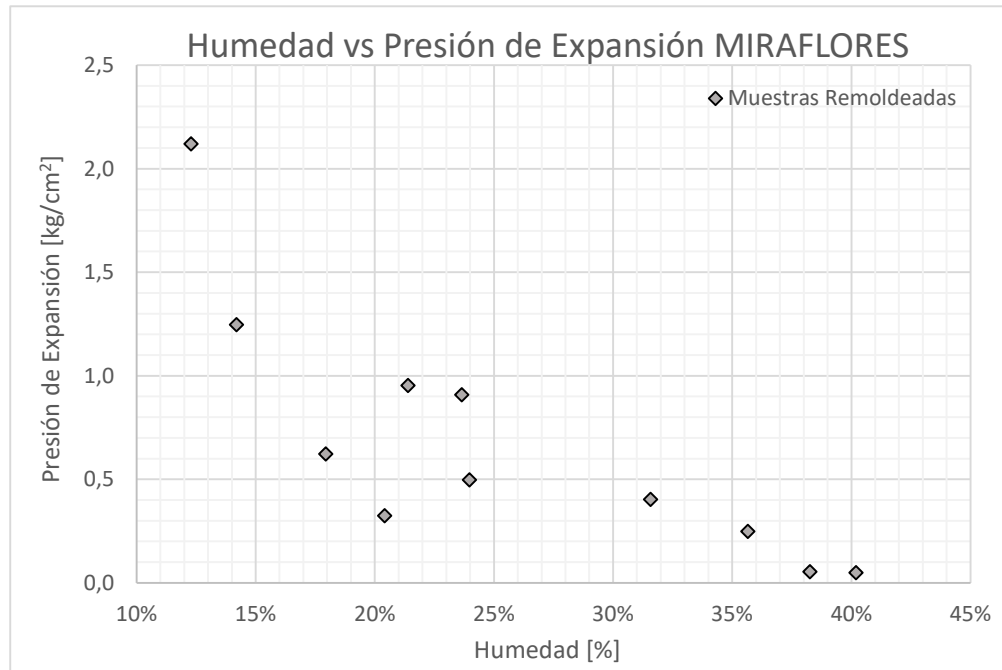
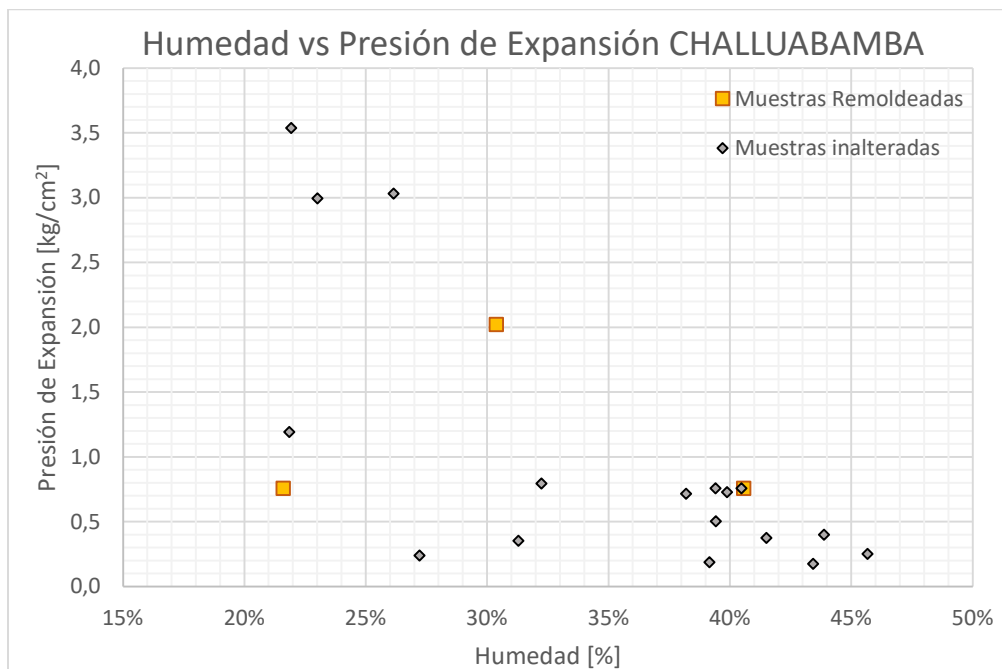


Figura 57. Humedad vs Presión de expansión de Challuabamba.



Más adelante, en la sección 4.5, se presentan las relaciones establecidas entre los factores presentados, acompañado de un análisis estadístico de datos y una interpretación.



4.4. Correlaciones

Las correlaciones de varios autores, analizadas en la sección 2.4, serán utilizadas para determinar, de manera general, el grado de expansividad y el mineral predominante de los suelos expansivos en este documento de tesis. Debido a que se consideran correlaciones empíricas, ayudarán sólo de manera comparativa, sin definir una conclusión objetiva de las muestras de suelo.

Adicionalmente, se utilizarán las ecuaciones descritas para determinar la magnitud de la presión de expansión y elaborar curvas en función de parámetros característicos del suelo, considerando la humedad como punto variable. Luego, en la sección 4.5, se realizará una comparación con las curvas obtenidas para los suelos de Challuabamba y Miraflores.

4.4.1. Mineral predominante

Para obtener el mineral predominante, se presenta la siguiente Tabla 25, en donde muestran los resultados resumidos de distintas características para los suelos de Miraflores y Challuabamba. Cada una de las propiedades que se observan fueron necesarias para estimar el mineral según Das (2008), Skempton (1953) y Marín Nieto (1991).

Tabla 27. Resumen de datos y propiedades de suelo de Miraflores y Challuabamba utilizados para determinar el mineral predominante.

Ubicación de la muestra de suelo	Miraflores	Challuabamba	
Gravedad Específica Gs [adim]	2.81	2.83	
Índice plástico IP [%]	33.7	52.3	
Fracción de suelo < 0,002mm [%]	53.1	59.7	
Actividad [adim]	0.64	0.88	
Límite líquido LL [%]	65.0	90.3	
Límite líquido / Índice plástico [adim]	1.93	1.73	
Mineral predominante según:	Braja Das (2008)	Montmorillonita	Montmorillonita
	Skempton (1953)	Illita	Illita
	Marín Nieto (1991)	Illita	Illita

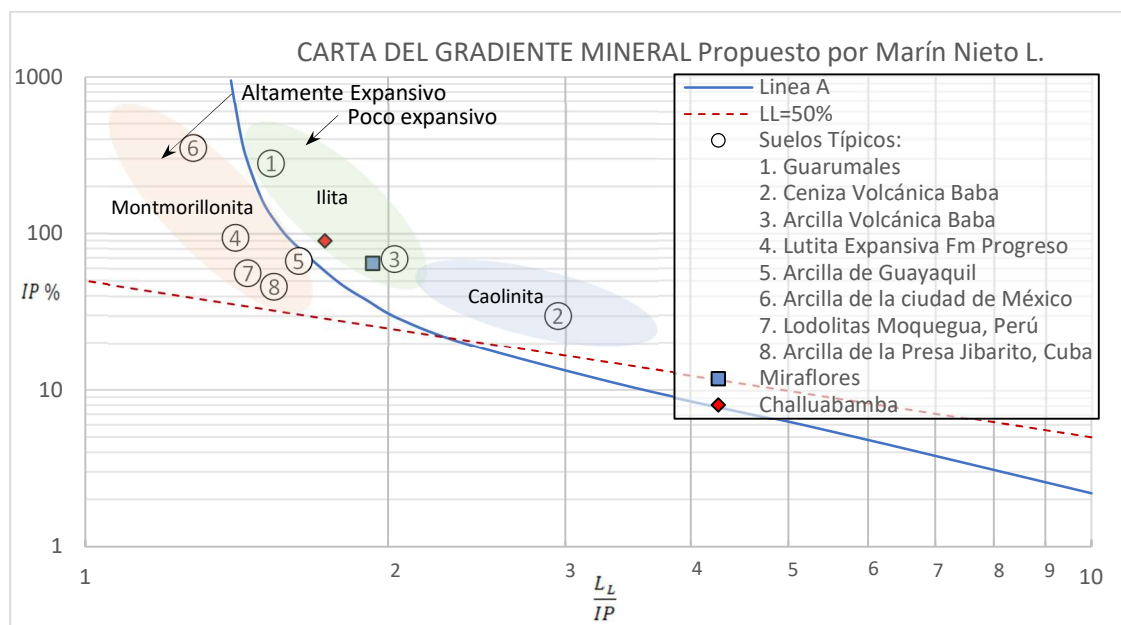
En base a Das (2008) y al valor de la gravedad específica (Gs), la Tabla 3 de la sección 2.4.1 indica que el componente mineralógico de mayor porcentaje coincide dentro del rango de la montmorillonita para los dos suelos estudiados, Miraflores y Challuabamba. Se puede observar también que valor de Gs obtenido coincide con otros minerales importantes, sin embargo, al no considerarse componentes mineralógicos de arcilla expansiva no se tienen en consideración. Por este motivo, según este autor, se puede estimar a la montmorillonita como mineral predominante.

Según la ecuación 16 propuesta por Skempton (1953) y en base a la actividad mineralógica, la illita es la que predomina para las dos muestras. Sin embargo, según análisis de carácter expansivo realizados en anteriores secciones de este documento se puede asegurar que la montmorillonita es el mineral predominante. No siempre se tiene un material completamente limpio, sino que se puede dar el caso en donde se tenga una illita no pura que cause el comportamiento expansivo.

Finalmente, la gráfica de Marín Nieto (1991) nos entrega los resultados que se observan en la Figura 58. Los puntos de color rojo y azul corresponden al suelo de Challuabamba y Miraflores,

respectivamente. Se observa que el primero (rojo) se encuentra cerca de la zona de illita, al igual que el segundo punto (azul).

Figura 58. Ubicación de puntos de Miraflores y Challuabamba en gráfica de Gradiente Mineral.



De manera general, los suelos con una relación LL/IP menores que 2 y con un índice de plasticidad IP mayor a 50%, indican que existe montmorillonita en suelo, siendo bastante probable que tengan un alto potencial expansivo (Vélez, 2012). El suelo de Challuabamba cumple con las dos condiciones mientras que, para Miraflores, coincide parcialmente.

4.4.2. Grado de expansividad

De igual manera, para obtener el grado de expansividad, se presenta la Tabla 26, en la cual se observan los resultados resumidos de distintas características para las muestras de Miraflores y Challuabamba. Los valores calculados son utilizados para definir cualitativamente qué tan expansivos pueden llegar a ser según los autores aquí expuestos.

Tabla 28. Resumen de datos y propiedades de suelo de Miraflores y Challuabamba utilizados para determinar cualitativamente el potencial expansivo.

Ubicación de la muestra de suelo	Miraflores	Challuabamba
Índice plástico IP [%]	33.7	52.3
Límite líquido LL [%]	65.0	90.3
Fracción de suelo $< 0,002\text{mm}$ [%]	53.1	59.7
Actividad [adim]	0.64	0.88
Porcentaje de finos [%]	98.3	89.9
Presión de hinchamiento [kPa]	208	347
Presión de hinchamiento [Kg/cm^2]	2.12	3.54
Porcentaje de hinchamiento [%]	4.23	5.08
Peck, Hanson & Thornburn (1974)	Medio / Alto	Alto / Muy alto
Holtz y Gibbs (1954)	Alto	Alto

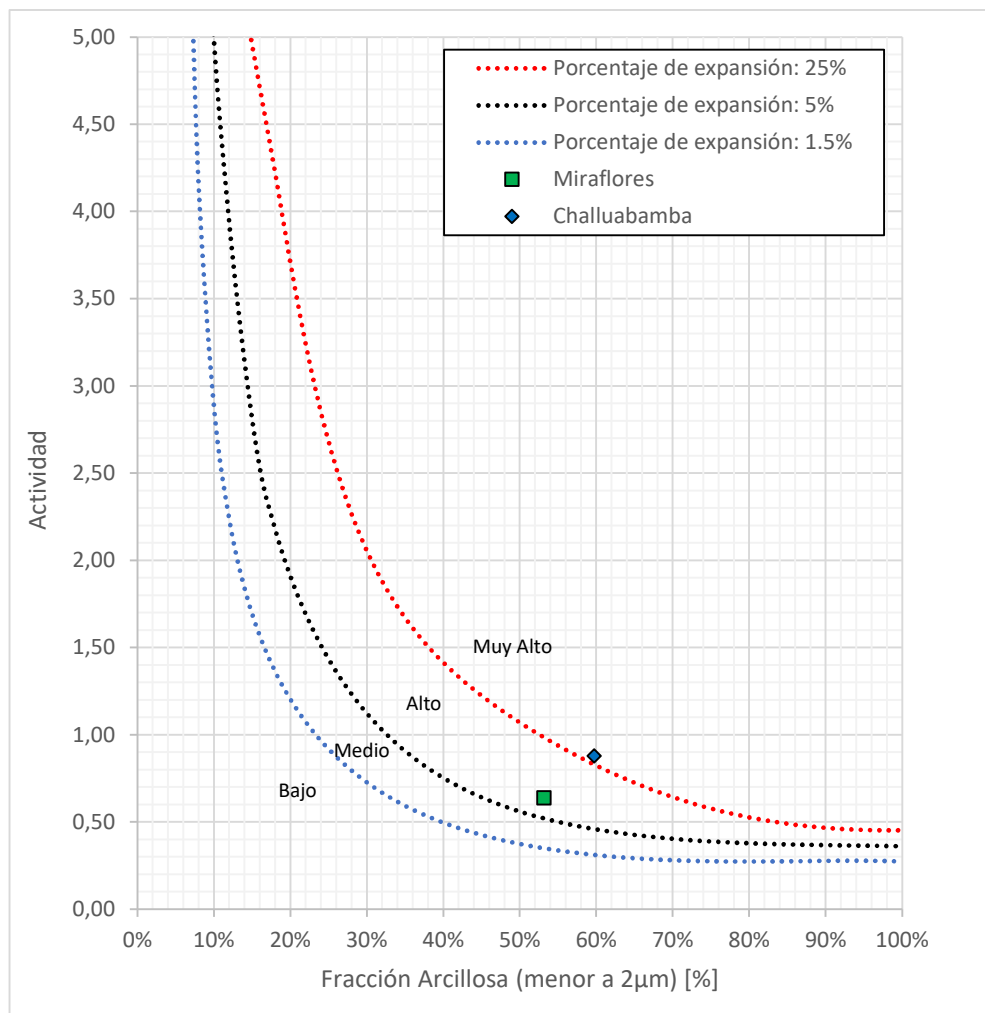


Grado de Expansividad según:	Holtz, Dakshanamurthy y Raman (1973)	Alto	Muy alto
	Seed et al. (1962)	Alto	Muy alto
	González de Vallejo (2002)	Medio / Alto	Medio / Alto / Muy alto
	Chen (1988)	Medio / Alto / Muy alto	Alto / Muy alto

El grado de expansión cualitativo para definir si el suelo es bajo, medio, alto o muy alto, determinado por Peck, Hanson & Thornburn (1974), Holtz y Gibbs (1954), Holtz, Dakshanamurthy y Raman (1973), González de Vallejo (2002) y Chen (1988), fueron obtenidos a través de las Tablas contenidas en la sección 2.4.2. La presión y porcentaje de expansión expresados en la tabla para determinar el grado de expansividad fueron los máximos valores calculados entre todos los ensayos realizados en la sección 4.3.2.

Por otro lado, la gráfica propuesta por Seed et al. (1962) muestra los puntos de color verde y azul que corresponden al suelo de Miraflores y Challuabamba, respectivamente. Estos representan la relación entre la fracción arcillosa menor al 0.002mm y la actividad.

Figura 59. Ubicación de puntos de Miraflores y Challuabamba en gráfica de Actividad según Seed (1962).





Según lo obtenido para el suelo de Miraflores, se observa que el resultado que más frecuencia presentó fue un grado de expansión “Alto”. Mientras que para Challuabamba, la mayoría de la bibliografía lo cataloga como “Muy alto”. Aunque existan diferencias entre lo clasificado según cada autor, se debe considerar que la base de esta caracterización son relaciones empíricas llevadas a cabo en lugares específicos, que no coinciden exactamente con las características de las muestras obtenidas en este documento de tesis.

4.4.3. Presión de expansión

A diferencia de las dos anteriores clasificaciones de grupos de correlación, la presión de expansión otorga un valor cuantitativo del potencial de expansión. En la siguiente Tabla, se muestran valores de características obtenidos anteriormente y resumidos a continuación, con el objetivo de elaborar ecuaciones con las correlaciones empíricas de la sección 2.4.3. El peso específico seco es el promedio de todas las muestras analizadas.

Tabla 29. Resumen de datos y propiedades de suelo de Miraflores y Challuabamba utilizados en las ecuaciones.

Ubicación de la muestra de suelo	Miraflores	Challuabamba
Peso específico seco [Kg/m ³]	1395	1271
Peso específico seco [gr/cm ³]	1.40	1.27
Índice plástico IP [%]	33.7	52.3
Límite líquido LL [%]	65.0	90.3
Fracción de suelo < 0,002mm [%]	53.1	59.7

Reemplazando los valores de propiedades como límites de Atterberg, peso específico seco o porcentajes de suelo de la granulometría para los dos sitios, se definen las siguientes ecuaciones que se encuentran en función de la humedad natural del material:

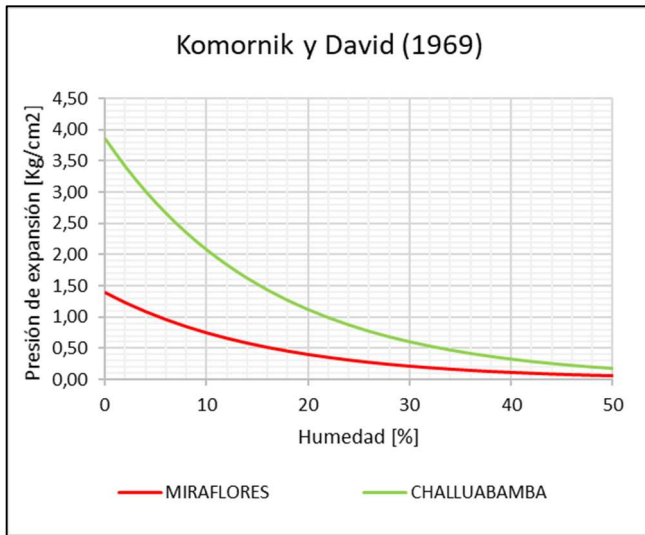
Tabla 30. Ecuaciones según correlaciones en función de la humedad del suelo para Miraflores y Challuabamba.

Autor (año)	Miraflores	Challuabamba
Komornik & David (1969) [Kg/cm ²]	$\log(PS) = 0.148 - 0.0269 \omega$	$\log(PS) = 0.591 - 0.0269 \omega$
Nayak & Christensen (1979) [Psi]	$PS = \frac{5189.7}{\omega^2} + 3.7912$	$PS = \frac{10731.9}{\omega^2} + 3.7912$
Erzin & Erol (2004) [Kg/cm ²]	$\log(PS) = -0.987 - 0.0163 \omega$	$\log(PS) = -1.037 - 0.0163 \omega$
Sabtan (2005) [kPa]	$PS = 135 + 2(86.8 - \omega)$	$PS = 135 + 2(112 - \omega)$

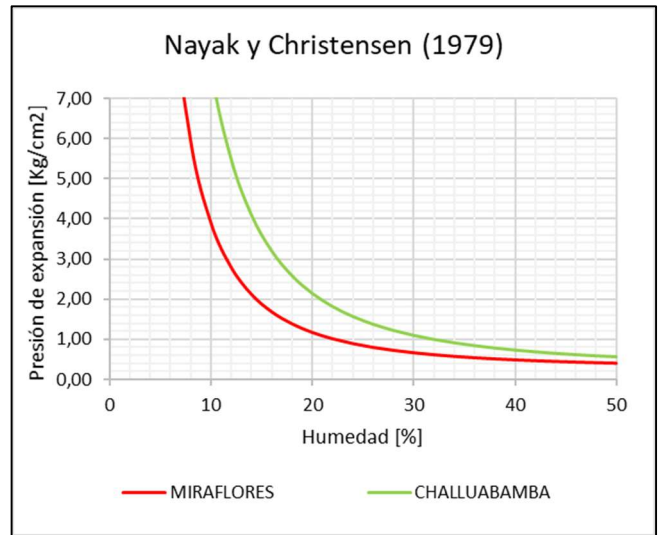
No todas las ecuaciones descritas comparten las mismas unidades para la presión de expansión, sino que varían según su autor. Gráficamente y para facilidad de interpretación de resultados, los valores expresados para las siguientes gráficas están en [Kg/cm²]. Los datos de las curvas estimadas para el suelo de Miraflores y Challuabamba se pueden observar en el Anexo K y quedarían definidas de la siguiente manera:



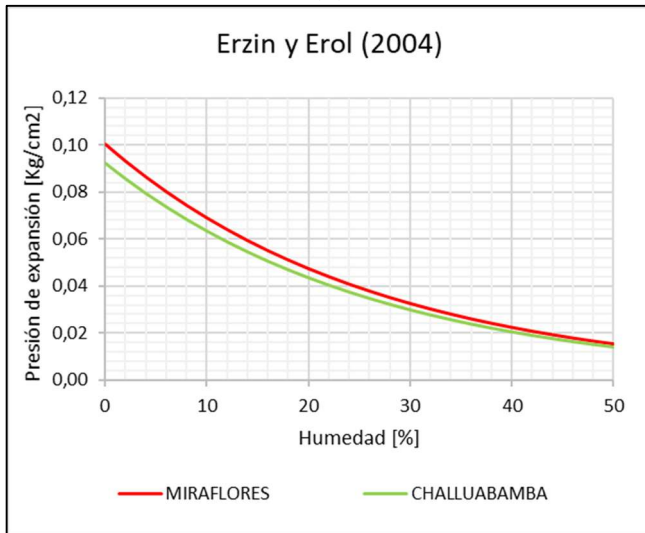
Figura 60. Curvas de correlaciones empíricas de humedad vs presión de expansión.



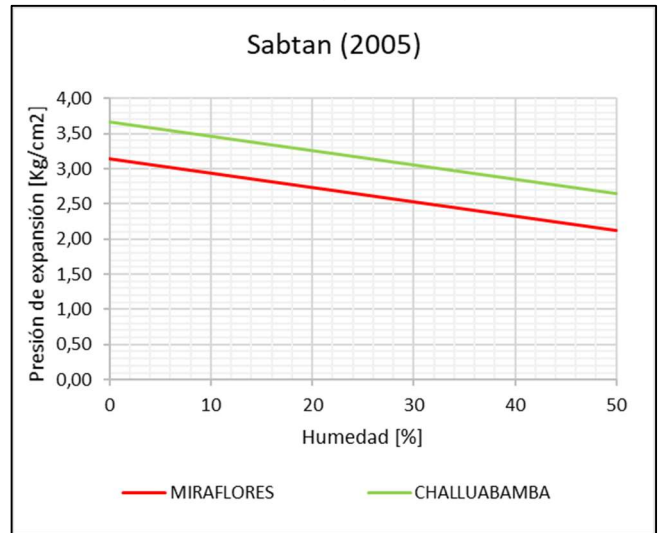
(a)



(b)



(c)



(d)

Nota. En la figura se observan correlaciones según: (a) Komornik y David (1969); (b) Nayak & Christensen (1979); (c) Erzin & Erol (2004); (d) Sabtan (2005).

En base a la Figura 60, se observa que, según tres de los cuatro autores, el suelo de Challuabamba resulta con un potencial expansivo más alto que Miraflores. Esto entra en concordancia con los valores de presión y deformación por expansión presentados anteriormente para los dos suelos. Adicionalmente, en la Figura 61 y Figura 62 se observan los gráficos de las ecuaciones presentadas por los cuatro autores individualmente para Miraflores y Challuabamba, respectivamente. Las curvas, en el mismo rango de valores, pueden ser comparadas de mejor manera.

Figura 61. Correlaciones para Miraflores.

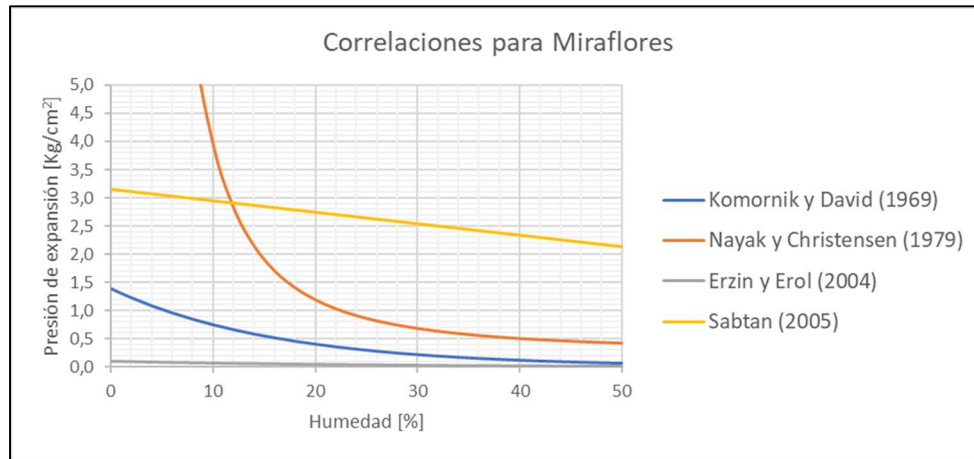
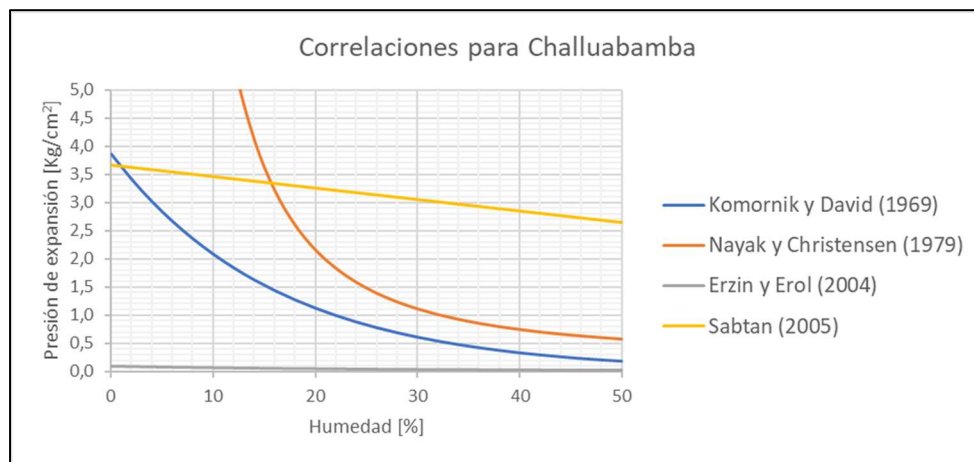


Figura 62. Correlaciones para Challuabamba.



De las correlaciones según los cuatro autores analizados, dos de ellas, Komornik & David (1969) y Nayak & Christensen (1979), representan grandes semejanzas con la bibliografía estudiada en la sección 2.1.3. Estos autores proponen ecuaciones donde la magnitud de la presión de expansión concuerda con los valores que sugieren Villar & Lloret (2008), Huang et al. (2019) y Chen (1973), causando que la presión de expansión disminuya a medida que la humedad aumenta.

Caso diferente sucede con las correlaciones según Erzin & Erol (2004) o Sabtan (2005), cuyos resultados no coinciden con los autores de la bibliografía ni con los estudios preliminares de los suelos expansivos de estudio en este documento. La magnitud de presión de expansión es diferente a la estudiada, al igual que su relación con la humedad.

Por este motivo, las curvas de los dos primeros autores serán aquellas que puedan ser comparadas con los resultados obtenidos para las muestras de suelo de Miraflores y Challuabamba.

4.5. Curvas de Humedad versus presión de Expansión

Tras aplicar una regresión polinomial de múltiples variables en ambos grupos de datos resultados de la presión de expansión se obtuvieron ecuaciones polinómicas de segundo grado con dos variables independientes, a continuación, se muestran acompañadas de su rango de aplicación y un



gráfico que permite observar su variación respecto a la humedad a distintos valores de peso específico seco.

Para el conjunto de datos de Challuabamba, se obtuvo una ecuación a partir de los datos únicamente de muestras inalteradas, en función de la humedad y peso específico seco, en la misma se recomienda la utilización de un peso específico seco en un rango de 1.15 gr/cm³ a 1.5 gr/cm³ dado que no existen suficientes valores sobre o por debajo estos, para utilizar la estimación de forma confiable, en cuanto a la humedad, los valores a utilizar en la estimación están en un rango de 20% a 45% siguiendo el rango de humedades de las muestras analizadas, utilizar valores fuera de este rango puede dar un resultado extrapolado que no represente una estimación válida. La ecuación hallada es la siguiente:

$$PS(\omega, \gamma_d) = -9.038 + 10.147 \cdot \omega + 8.61 \cdot \gamma_d - 18.907 \cdot \omega \cdot \gamma_d + 15.19 \cdot \omega^2 + 1.054 \cdot \gamma_d^2 \quad (47)$$

A continuación, se muestran los datos experimentales acompañados de $PS(\omega, \gamma_d)$ con valores de $\gamma_d = 1.15, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 \text{ gr/cm}^3$.

Figura 63. Humedad vs presión de expansión de Challuabamba.

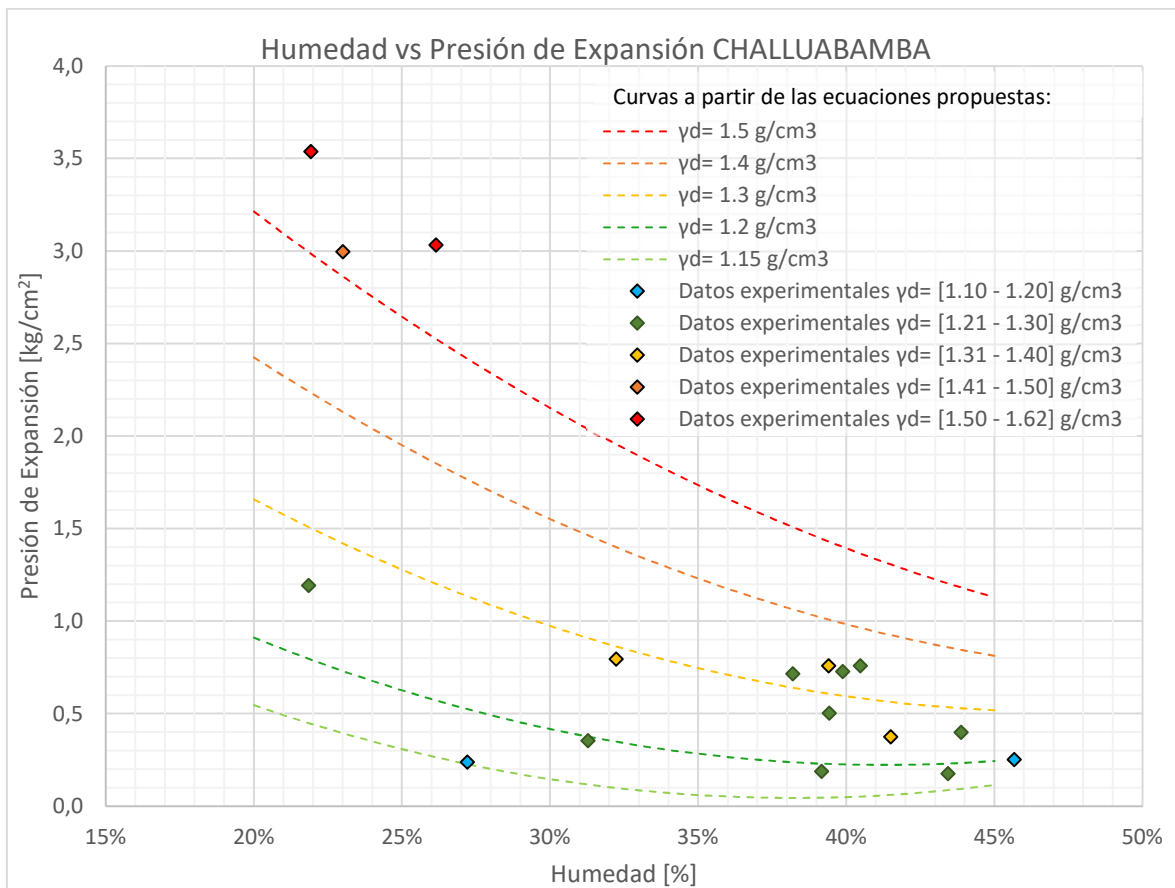




Tabla 31. Datos de regresión para Challuabamba.

Regresión Challuabamba	
R^2	0.955
R^2_{ajust}	0.934
R^2_{pred}	0.665

Como se puede ver el coeficiente de determinación R^2 guarda correspondencia con R^2_{ajust} , además si se realiza un ajuste de regresión únicamente con la variable independiente de peso específico seco se obtiene un $R^2(\gamma_d) = 0.903$, haciéndolo únicamente con la humedad se tiene que $R^2(\omega) = 0.589$, sugiriendo que no existen variables innecesarias en la regresión puesto que no se reduce con la inclusión de variables y que el factor de principal importancia es el peso específico seco. En tanto que el R^2_{pred} indica que el modelo no tiene una gran capacidad de predicción pues se espera que el modelo tenga la capacidad de explicar el 66.5% de variabilidad en nuevas observaciones (Montgomery, 2013).

Para el conjunto de datos de Miraflores, se obtuvo una ecuación a partir de los 11 datos de muestras remoldeadas, en función de la humedad y peso específico seco, en la misma se recomienda la utilización de un peso específico seco en un rango de 1.3g/cm^3 a 1.6g/cm^3 dado que no existen suficientes valores fuera de dicho rango, para utilizar la estimación de forma confiable, en cuanto a la humedad, los valores a utilizar están en un rango de 20% a 45% siguiendo los valores de los datos experimentales, utilizar valores fuera de este rango puede dar un resultado extrapolado que no represente una estimación válida. La ecuación hallada es la siguiente:

$$PS(\omega, \gamma_d) = -3.926 + 12.101 \cdot \omega + 2.392 \cdot \gamma_d - 15.874 \cdot \omega \cdot \gamma_d + 12.318 \cdot \omega^2 + 1.388 \cdot \gamma_d^2 \quad (48)$$

A continuación, se muestran los datos experimentales acompañados de $PS(\omega, \gamma_d)$ con valores de $\gamma_d = 1.3, 1.4, 1.3, 1.5, 1.6 \text{ gr/cm}^3$.



Figura 64. Humedad vs presión de expansión de Miraflores.

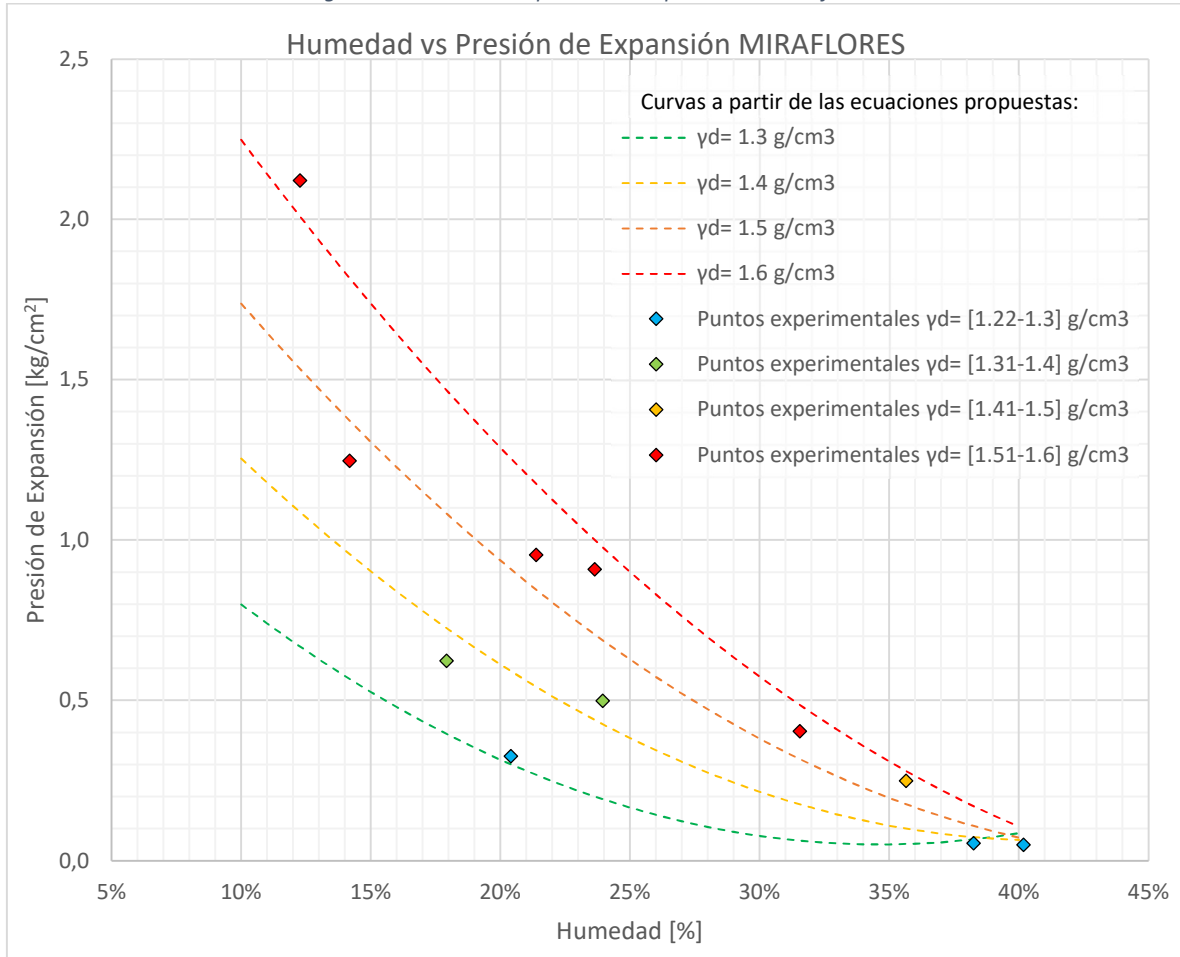


Tabla 32. Datos de regresión para Miraflores.

Regresión Miraflores	
R^2	0.966
R^2_{ajust}	0.932
R^2_{pred}	0.819

En este caso el coeficiente de determinación R^2 , también guarda correspondencia con R^2_{ajust} , y si se realiza un ajuste de regresión únicamente con la variable independiente de peso específico seco se obtiene un $R^2(\gamma_d) = 0.481$, haciéndolo únicamente con la humedad se tiene que $R^2(\omega) = 0.762$, sugiriendo que no existen variables innecesarias en la regresión puesto que no se reduce con la inclusión de variables. En tanto que el R^2_{pred} indica que el modelo tiene una mejor capacidad de predicción pues se espera que el modelo tenga la capacidad de explicar el 81.2% de variabilidad en nuevas observaciones (Montgomery, 2013).

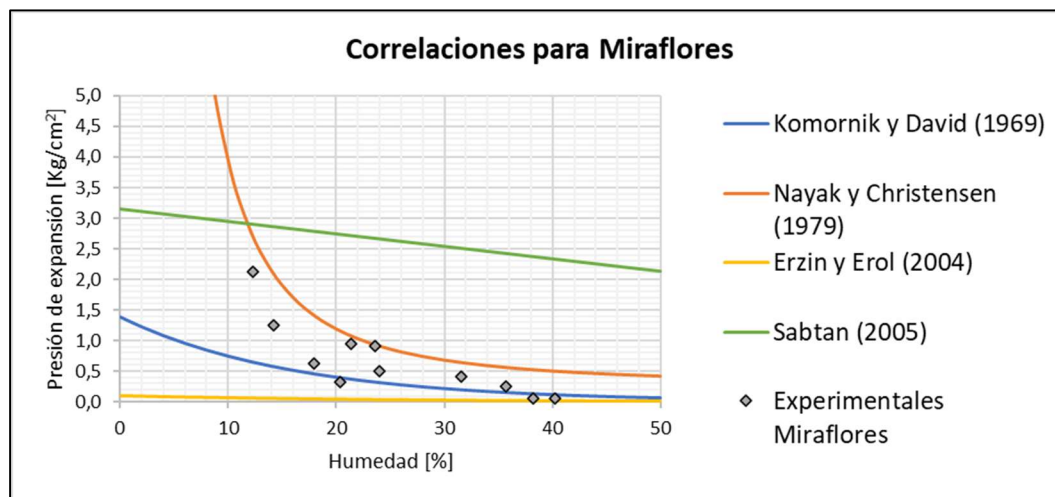
Comparación con las correlaciones

Finalmente, una vez elaboradas las curvas de *humedad vs. presión de expansión*, se procede a comparar con lo obtenido en las correlaciones de la sección 4.4.3. Resulta difícil hallar una expresión

que coincide exactamente con los puntos hallados en este documento de tesis. Para esto, se analizan las correlaciones de los autores propuestos en el marco teórico.

- **Erzin y Erol (2004):** la ecuación simboliza valores de magnitud de presión de expansión demasiado bajos, comparados con los resultados en el presente documento de tesis. No guarda relación para ninguna de las dos muestras, Miraflores y Challuabamba (Figura 65 y Figura 66).
- **Komornik y David (1969):** Esta expresión tiene una tendencia mucho más parecida a los puntos experimentales con humedades altas de Miraflores y Challuabamba (Figura 65 y Figura 66). Sin embargo, la magnitud de la presión de expansión sigue siendo relativamente baja, especialmente para valores con humedad alta. En el caso que se decida por esta gráfica como curva de diseño en un estudio de suelo, se predecirá un empuje vertical muy bajo, corriendo el riesgo de que, en el que caso que se presente una presión de expansión más alta, cause problema en construcciones civiles.

Figura 65. Comparación de los resultados de Miraflores con las correlaciones.



Nota. En la figura se observa la comparación de los puntos calculados para el suelo de Miraflores con lo obtenido según Komornik y David (1969), Nayak & Christensen (1979), Erzin y Erol (2004) y Sabtan (2005).

En base a los expuesto por los dos siguientes autores, se observan diferencias entre las muestras de Miraflores y Challuabamba. Por este motivo, se analizan individualmente:

- **Nayak y Christensen (1979):** Para la Figura 65, la ecuación propuesta sigue, de manera visual, la tendencia de los puntos hallados experimentalmente. Es la que más se aproxima, sin embargo, se obtienen valores de presión de expansión demasiado altos para humedades bajas. Se puede considerar una opción para encontrar la presión de expansión para el suelo de Miraflores y posteriormente, profundizar con ensayos directos de laboratorio.

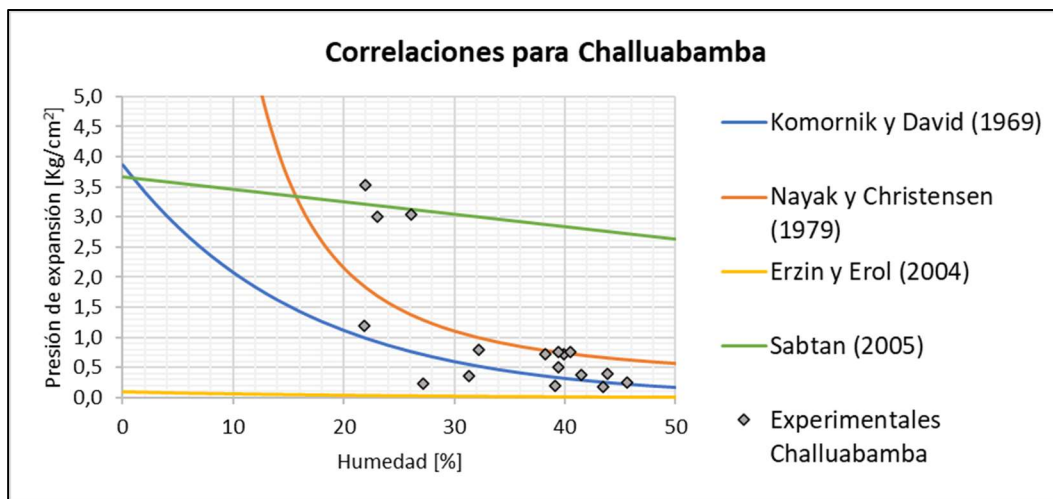
Esta ecuación se encuentra únicamente en función de la humedad y no del peso específico seco (ecuación 19). En la sección 2.4.3 se expresa que la correlación propuesta por este

autor fue establecida en base a suelos remoldeados, entrando en concordancia con el tipo de muestra utilizada para el suelo de Miraflores

- **Sabtan (2005):** Siendo una expresión lineal mucho más simple, esta ecuación supera en todos sus puntos la magnitud de la presión de expansión. Desde el punto de vista de la seguridad, es la ecuación ideal, sin embargo, representaría un desembolso alto de dinero para el diseño. Se puede considerar una opción para encontrar la presión de expansión mayorada para Miraflores y posteriormente, profundizar con ensayos directos de laboratorio.

En el caso de Challuabamba, el comportamiento de los datos en base a **Erzin y Erol (2004)** y **Komornik y David (1969)**, es el mismo explicado anteriormente. En este suelo se trabajó principalmente con muestras inalteradas y son estas las que se han utilizado en el análisis que se muestra a continuación.

Figura 66. Comparación de los resultados de Challuabamba con las correlaciones.



Nota. En la figura se observa la comparación de los puntos calculados para el suelo de Challuabamba con lo obtenido según Komornik y David (1969), Nayak & Christensen (1979), Erzin y Erol (2004) y Sabtan (2005).

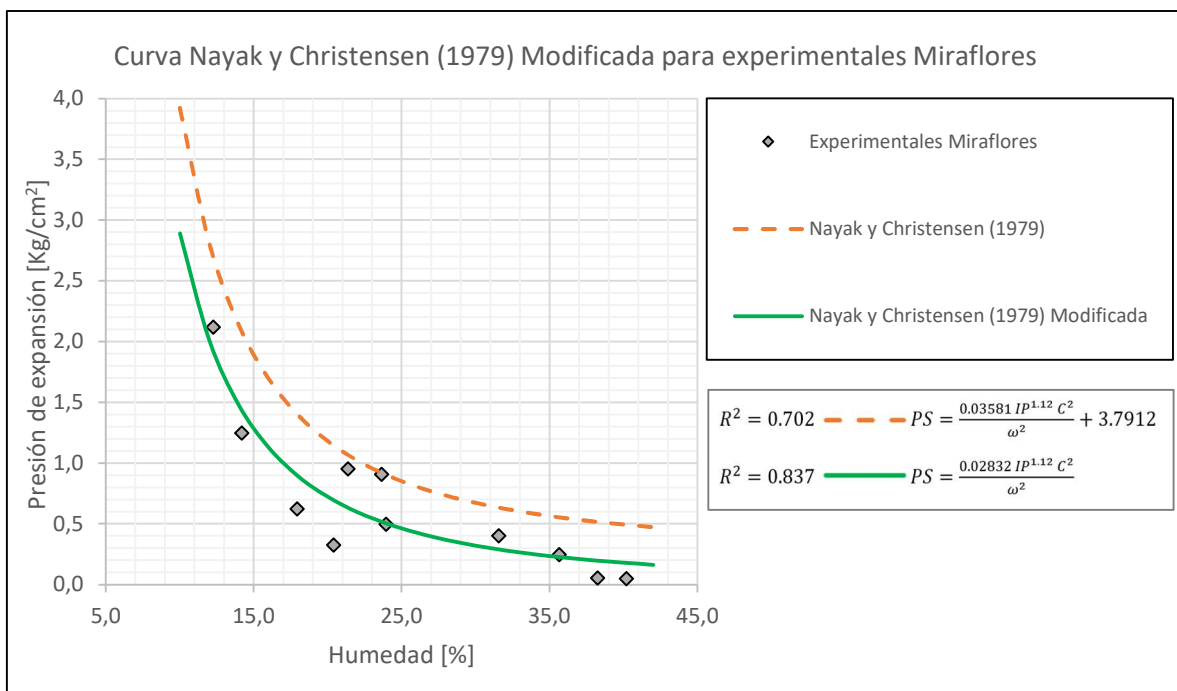
- **Nayak y Christensen (1979):** En la Figura 66, se observa que la ecuación sigue la tendencia de los puntos hallados experimentalmente en humedades altas y bajas. Sin embargo, los valores son superados cuando la humedad va disminuyendo. Se puede considerar una opción para encontrar la presión de expansión para el suelo de Miraflores y posteriormente, profundizar con ensayos directos de laboratorio.
- **Sabtan (2005):** Aunque esta ecuación supera gran parte a la magnitud de la presión de expansión, ciertos puntos sobrepasan su límite. No es recomendable utilizar esta ecuación para el suelo de Challuabamba porque no sigue la tendencia de puntos y representaría un costo alto.

Para el caso particular de Miraflores, dado que los puntos muestran una tendencia más definida, que se aproxima a la correlación propuesta por Nayak y Christensen (1979), se propone establecer una modificación de modo que tenga un mejor ajuste a los resultados y pueda servir como una referencia adicional. Para esto, se define la bondad de ajuste mediante el coeficiente de determinación R^2 , que relaciona la ecuación de correlación con los datos experimentales. Se modifican los coeficientes de la ecuación iterativamente buscando que se minimice la suma de cuadrados de error, como se muestra en el Anexo P. El resultado es una ecuación que se ajusta de manera más cercana a las observaciones hechas en laboratorio para este suelo en particular. La ecuación de Nayak y Christensen modificada acorde a los datos experimentales es:

$$PS = \frac{0.02832 IP^{1.12} C^2}{\omega^2} \quad (49)$$

El resultado de esta modificación se presenta en la figura 67, donde se muestra cómo se disponen los datos experimentales en relación a el ajuste propuesto y la ecuación original de correlación.

Figura 67: Modificación de Curva Nayak Christensen (1979) para resultados observados en Miraflores



Como se observa, las presiones de expansión obtenidas en laboratorio se adaptan de mejor forma a la ecuación modificada, no obstante, la ecuación original puede ser una referencia para una aproximación realizada desde la seguridad.



5. CONCLUSIONES

El presente trabajo de titulación tiene como propósito determinar cómo afecta la humedad al potencial expansivo de suelos del austro ecuatoriano, principalmente los que se encuentran en la ciudad de Cuenca y sus alrededores. Además, se analizan parámetros físicos y mecánicos, propiedades y factores adicionales que intervienen en las características expansivas de los suelos estudiados.

Se recolectaron tres suelos que se encuentran en las provincias de Azuay y Cañar. Las muestras estudiadas se encuentran en los sectores Miraflores, Challuabamba y Cojitambo. Las dos primeras pertenecientes a la provincia del Azuay, en la ciudad de Cuenca y en la autopista dirección Azogues. La segunda, propia del Cañar. Geológicamente pertenecen a las formaciones de Arcillas Varvadas, Loyola y Guapán, respectivamente.

Los suelos fueron seleccionados en base a revisiones bibliográficas de estudios realizados en años anteriores por estudiantes y profesionales del área de la geotecnia en la ciudad de Cuenca. Las conclusiones obtenidas en dichos estudios, apuntaban que todos serían suelos de grano fino y muy probablemente, con potencial expansivo alto. Para ello se elaboraron ensayos preliminares, determinando que Miraflores y Challuabamba contienen altos porcentajes de expansión con su humedad de campo, la expansión resultó del orden de 4.23 y 5.08%, respectivamente. Mientras que Cojitambo de 0.67%. Caso similar ocurre con la presión de expansión, en donde se obtienen valores máximos de 2.12, 3.54 y 0.08 Kg/cm^2 para los tres suelos, respectivamente. Se concluye entonces, que las dos primeras muestras de suelo sí son expansivas, mientras que la de Cojitambo prácticamente no lo es. Considerando la poca capacidad de hinchamiento de este último suelo lo más probable es que, o bien no sean bentonitas, o que sean depósitos de bentonitas cálcicas (poco expansivas) en lugar de bentonitas sódicas. Entonces, se procedió con la caracterización de las dos muestras de suelo que poseen características expansivas.

Miraflores clasificó como **A-7-5 (40)** según AASHTO y **CH** según SUCS, con un porcentaje de finos de **98.3%**, $IP = 33.7\%$, $LL = 65.0\%$ y $G_s = 2.81$. *Challuabamba*, por su parte como **A-7-5 (56)** según AASHTO y **CH** según SUCS, con un porcentaje de finos de **89.9%**, $IP = 52.3\%$, $LL = 90.3\%$ y $G_s = 2.83$. Con estos valores, se define que los dos son suelos en donde no es recomendable realizar construcciones civiles sin los debidos estudios geotécnicos. En base a los ensayos realizados, se concluye que el valor de *índice de grupo IG* es bastante alto, esperado según sus propiedades.

Respecto al mineral predominante, las referencias en literatura no arrojan una tendencia clara para los resultados obtenidos en el presente trabajo. Al tratarse de propuestas empíricas aproximadas, es difícil llegar a una caracterización real. Sin embargo, se optó por una respuesta basada en su comportamiento expansivo, definiendo a la **montmorillonita** como el componente mineralógico de mayor porcentaje en los dos suelos.

El **grado de expansividad** tuvo una tendencia más clara, comparando los resultados obtenidos para una clasificación final. La muestra de Miraflores fue catalogada dentro de los grupos: Medio, Alto y Muy alto; y fue la clasificación "**Alto**" aquella que más frecuencia mostró entre los autores según el



grado de expansividad. El suelo de Challuabamba tuvo un comportamiento similar, clasificado finalmente como “**Muy Alto**”.

Las correlaciones de la **presión de expansión** son basadas en expresiones desde la ecuación 18 hasta la ecuación 22, excluyendo las que no se encuentran en función de la humedad natural. Los parámetros, características e índices de Miraflores fueron reemplazados y aunque expresiones empíricas no son aplicables para todos los suelos arcillosos, a partir de la ecuación de correlación propuesta por **Nayak y Christensen (1979)**, se obtuvo una curva modificada que mostró efectivamente la relación que guarda la humedad con el potencial expansivo. Por otro lado, se concluye que las correlaciones propuestas no son recomendables para las arcillas de Challuabamba.

Los ensayos de carácter expansivo fueron completados a partir de los resultados obtenidos en los estudios preliminares, en donde, al comparar los resultados de los puntos remoldeados con los inalterados se observa una variabilidad que puede ser ocasionada por los mismos factores que generan a la variabilidad de las muestras inalteradas. Debido a las condiciones en las que se realizó el muestreo, se elaboraron las *gráficas de humedad inicial vs. presión de expansión* con muestras *remoldeadas* para Miraflores e *inalteradas* para Challuabamba.

La duración de los ensayos de expansión controlada fue mayor para las muestras obtenidas de Challuabamba tanto para muestras inalteradas como remoldeadas, salvo limitadas excepciones. Los ensayos tomaban usualmente alrededor de 48 horas para estabilizar su expansión ante la carga aplicada, mientras que para el caso de Miraflores soportaban mayor carga en los primeros minutos y se estabilizaban más rápidamente, tomando usualmente 24 horas en estabilizarse.

En base a los resultados de presión de expansión, se obtuvieron mediante regresión múltiple de segundo grado, dos ecuaciones, en las mismas se demostró que el peso específico seco y la humedad son variables que influyen en la expansión, sin embargo, las ecuaciones a las que se llegó se verían beneficiadas con un mayor número de muestras. Para cada ecuación se definieron rangos de aplicación en función de las características de los suelos en análisis, es importante recalcar que las ecuaciones presentadas son válidas únicamente para las ubicaciones y las condiciones en las que se ensayaron estas muestras, observaciones tanto para Challuabamba como Miraflores se muestran a continuación.

Los datos para las muestras inalteradas de Challuabamba presentaron una fuerte influencia del peso específico seco sobre la presión de expansión, mientras que la humedad, a pesar de ser un factor de influencia, muestra menor impacto en los resultados, es decir, la presión de expansión se ve más afectada por una variación de peso específico seco que por una variación de humedad. Utilizar muestras inalteradas dificultó el control sobre la humedad, esto hizo que los datos no presentaran una buena distribución de humedades, lo que no favoreció el análisis estadístico. La ecuación propuesta para el suelo del sitio no es óptima para la predicción de nuevas observaciones, dado que su $R^2_{\text{pred}} = 0.665$, lo que a su vez exhibe la necesidad de más ensayos sobre el suelo en mención o un análisis que identifique un factor de influencia obviado en el presente estudio, no obstante, sus indicadores $R^2 = 0.955$ y $R^2_{\text{ajust}} = 0.934$ indican que las variables propuestas para la



regresión: humedad y peso específico seco explican gran parte de la variabilidad observada en los ensayos.

En el caso de las muestras remoldeadas de Miraflores los datos presentaron una fuerte influencia sobre la presión de expansión tanto del peso específico seco como la humedad, siendo más sensible a la variación de peso específico seco. El remoldeo de muestras permitió que, a pesar de tener menor cantidad de muestras, los datos abarquen mayor rango de valores, lo que favoreció el análisis estadístico. Esto hace que la ecuación propuesta para el suelo del sitio sea mejor para la predicción de nuevas observaciones sobre muestras remoldeadas como muestra su indicador $R^2_{\text{pred}} = 0.819$. En lo referente al coeficiente de determinación de los datos experimentales se tiene que: $R^2 = 0.966$ y $R^2_{\text{ajust}} = 0.932$, lo que indica que las variables utilizadas en la regresión explican la gran parte de la variabilidad de los ensayos, no obstante, el utilizar muestras remoldeadas la ecuación obtenida puede no explicar completamente el fenómeno, puesto que es imposible replicar características naturales como el acomodo de partículas.

Las muestras de suelo de Miraflores y Challuabamba fueron analizadas en base a algunos mecanismos: una identificación visual inicial, una identificación en base a correlaciones y una identificación directa. Se concluye que la identificación visual es muy superficial y no entrega resultados objetivos; según Vélez (2012) la identificación en base a correlaciones entrega resultados variables que no siempre coinciden con el comportamiento final del suelo; La identificación por métodos directos es el mejor mecanismo y el más preciso, definiendo cuantitativamente el potencial expansivo en función de la deformación y presión de hinchamiento. Por este motivo, la última metodología es imprescindible en cualquier estudio de suelos expansivos.

6. RECOMENDACIONES

Para muestras inalteradas, se recomienda generar un control más adecuado de la humedad para poder llegar a relaciones que determinen predicciones con mayor confianza, para esto se debe asegurar una mejor distribución de los datos que se podría lograr tomando muestras en distintas estaciones del año a distintas profundidades y en general, con un mayor número de muestras.

Es aconsejable realizar muestreos más extensos y complementar con otros estudios que se han realizado en los lugares estudiados. Podría ayudar a formar mejores interpretaciones y tener una visión más general del fenómeno. Adicionalmente, se podría realizar una investigación adicional de cómo son afectados los resultados de expansión en función de otros parámetros influyentes como el peso específico seco, o el porcentaje de finos para los suelos de nuestra localidad o de cualquier localidad a estudiarse.

Se debe verificar la aplicabilidad en campo de los valores de presión de expansión calculados con la ecuación determinada. La ecuación establecida, a través de datos hallados experimentalmente, no siempre contempla la variabilidad que pueden ocurrir debido a condiciones ambientales.

Puesto que no siempre es posible obtener muestras inalteradas para ensayos de carácter expansivo, para futuras investigaciones se podría analizar la influencia del remoldeo de la muestra en el



potencial expansivo, con el fin de identificar cuantitativamente y con certeza el o los factores que diferencian una muestra inalterada de una remoldeada.

La ecuación encontrada para el suelo de Miraflores, modificada de **Nayak y Christensen (1979)**, se debe utilizar para la ubicación y las condiciones en las que se ensayaron las muestras. Caso contrario, se pueden estimar resultados erróneos de presión de expansión.

Para la elaboración de estudios en donde se realicen reiteradamente ensayos del mismo tipo, se recomienda que la muestra de suelo se encuentre en las mismas condiciones o al menos, limitar la mayor cantidad de diferencias de factores cuya influencia no se pueda determinar.

Tanto para los ensayos de expansión libre como controlada, es aconsejable verificar el estado de los anillos a utilizar, puesto que hendiduras o desperfectos, consecuencia de golpes al momento de extraer muestras, pueden limitar el paso del pistón de carga. Esto puede ocasionar una carga no homogénea que cause lecturas erróneas en dichos ensayos.

Es aconsejable usar el mismo tamaño de anillo si los implementos disponibles así lo permiten. Todo esto con el fin de que los resultados muestren conclusiones efectivas basadas en las características del suelo y no por factores que puedan relacionarse con el tamaño de muestra. Autores como Attom & El-Emam (2011) sugieren que aumentar el tamaño de muestra aumenta ligeramente las presiones de expansión.

En el ensayo de expansión controlada, el incremento de cargas en el equipo utilizado se realiza de forma manual, por lo que es de utilidad iniciar el ensayo con el tiempo suficiente para que el suelo alcance una virtual estabilidad, antes de retirarse por periodos prolongados en los que el ensayo no es supervisado. Si no se realiza de esta manera el suelo puede expandirse o contraerse fuera de los límites permisibles.

La cantidad de agua puede no ser uniforme en un bloque de suelo, si el bloque ha sido almacenado al aire libre o ha sido secado, es probable que las superficies que han estado en contacto con el aire hayan perdido una cantidad de humedad superior a las de su interior. Por este motivo, se recomienda que la humedad se determine a partir del contenido del anillo extraído del bloque, con especial cuidado de perder la mínima cantidad posible de material durante su manipulación, y considerar el tamaño suficiente del bloque de modo que se puedan retirar los extremos que han perdido contenido de agua, esto con el fin de asegurar una mayor uniformidad en la muestra.

Al momento de almacenar material seco tamizado es importante hacerlo en un recipiente hermético o en una bolsa sellada, puesto que al entrar en contacto con la humedad ambiental el material adquiere una humedad higroscópica, misma que afecta especialmente en el remoldeo puesto que la cantidad de material aparentemente seco pesado, no representa únicamente el peso del material, sino también de un contenido de agua que no determinado.



7. BIBLIOGRAFÍA

- Abbaszadeh, S., Houston, S. L., & Zapata, C. E. (2016). Effect of Desiccation Cracking on the Swell and Swell Pressure of Expansive Clay. *Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016*, 2054-2065. <https://doi.org/10.1061/9780784479742.176>
- AENOR Comité CTN 103 Geotecnia. (1996). *UNE: 103602 Ensayo para calcular la presión de hinchamiento de un suelo en edómetro*.
- Arízaga, J. S., & Sánchez, E. R. (2005). *Estudio de los suelos expansivos en el sector de Miraflores de la ciudad de Cuenca*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/7385>
- Asia Pacific Conference on Unsaturated Soils, B., O., Fityus, S., Sheng, D., CRC Press, & Asia Pacific Conference on Unsaturated Soils (Eds.). (2010). *Unsaturated soils*. CRC Press : Taylor & Francis [distribuidor].
- ASTM D18 Committee. (2000a). *Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2487-00>
- ASTM D18 Committee. (2000b). *Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4318-00>
- ASTM D18 Committee. (2002). *Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0422-63R02>
- ASTM D18 Committee. (2004). *Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D3282-93R04E01>
- ASTM D18 Committee. (2006). *Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0854-06E01>
- ASTM D18 Committee. (2008a). *Test Method for Expansion Index of Soils*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4829-11>
- ASTM D18 Committee. (2008b). *Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4546-08>
- ASTM D18 Committee. (2010). *Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2216-10>
- Attom, M. F., & Barakat, S. (2000). Investigation of three methods for evaluating swelling pressure of soils. *Environmental and Engineering Geoscience*, 6(3), 293-299. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.6.3.293>
- Attom, M. F., & El-Emam, M. M. (2011). *Experimental evaluation of free swell method to measure swelling pressure of expansive soil*. 127-132. <https://doi.org/doi:10.3233/978-1-60750-801-4-127>
- Basma, A. A., & Husein, A. (1995). Laboratory assessment of swelling pressure of expansive soils. *Applied Clay Science*, 14.
- Bravo, P. E., & Daza, P. A. (2019). *Métodos para controlar el potencial expansivo en suelos arcillosos de la ciudad de Cuenca*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32443>



- Brito, A. V., & Delgado, P. E. (2007). *Determinación de las presiones en arcillas expansivas de la ciudad de Cuenca*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/7456>
- Cajas, M., & Coellar, J. (1993). *Estudio de la bentonita de Charasol utilizada como aglutinante para arenas de molde sintéticas para fundición*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/8177>
- Chen, F. H. (1973). *The basic physical property of expansive soils* (3ra ed.).
- Chen, F. H. (1975). *Foundations on Expansive Soils* (Vol. 12). <https://www.sciencedirect.com/bookseries/developments-in-geotechnical-engineering/vol/12/suppl/C>
- Çimen, Ö., Keskin, S. N., & Yıldırım, H. (2012). Prediction of Swelling Potential and Pressure in Compacted Clay. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37(6), 1535-1546. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0268-4>
- Coello Porras, G. (1983). *Ensayos de arena y arcilla para fundición*. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/4336>
- Dafalla, M. (2012). The Influence of Placement Conditions on the Swelling of Variable Clays. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30. <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9544-z>
- Das, B. (2008). *Advanced soil mechanics* (3rd ed). Taylor & Francis.
- Das, B. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (4ta ed.). CENGAGE Learning.
- Elder, J. (2019). *Photographic reference scale*. <https://smallpond.ca/jim/scale/>
- Frank, H., & Wen, W.-Y. (1957). *Structural Aspects of Ion-Solvent Interaction in Aqueous Solutions*. Discussion Faraday Society.
- González, O. J., Bezada, M., Millán, Z. D. V., & Manuel, J. (2014). Caracterización de las arenas y arcillas minerales de los depósitos de canal y planicie de inundación del río Portuguesa, Venezuela. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2014(85), 18-32. <https://doi.org/10.14350/rig.35291>
- Grim, R. (1968). *Clay Mineralogy*. McGraw-Hill.
- Guncay, C. M., & Morocho, G. F. (2005). *Estudio de los suelos expansivos en Cuenca: Sector Parroquia Bellavista*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/7393>
- Huang, C., Wang, X., Zhou, H., & Liang, Y. (2019). Factors Affecting the Swelling-Compression Characteristics of Clays in Yichang, China. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2019/6568208>
- Idrovo, B. S. (2019). *Caracterización de suelos expansivos de la ciudad de Cuenca*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/33514>
- IIGE. (2018). *Hojas Geológicas 1: 100.000—Instituto de Investigación Geológico y Energético*. Mapas Temáticos. <https://www.geoenergia.gob.ec/mapas-tematicos-1-100-000/>



- INEN, I. N. (1982a). *NTE INEN 0690: Mecánica de suelos. Determinación del contenido de agua. Método del secado al horno* (Norma Técnica N.º 0690; p. 9).
<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/690.pdf>
- INEN, I. N. (1982b). *NTE INEN 0691: Mecánica de suelos. Determinación del Límite líquido método de Casa Grande*.
- INEN, I. N. (1982c). *NTE INEN 0692: Mecánica de suelos. Determinación del Límite plástico*.
- INEN, I. N. (1998). *NTE-INEN ISO 11508. Calidad del suelo. Determinación de la densidad de las partículas* (N.º 11508).
- INEN, I. N. (2014). *NTE INEN-ISO 14688-2 Ingeniería geotécnica. Identificación y clasificación de suelos. Parte 2: Principios de clasificación* (N.º 14688).
- Ishibashi, I., & Hazarika, H. (2015). *Soil Mechanics Fundamentals and Applications* (2da ed.). CRC Press: Taylor & Francis.
- Izenman, A. J. (2008). *Modern Multivariate Statistical Techniques*. Springer New York.
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-78189-1>
- Jayalath, C., Gallage, C., & Miguntanna, N. (2016). *Factors affecting the swelling pressure measured by the oedometer method | GEOMATE Journal*.
<https://geomatejournal.com/geomate/article/view/2083>
- Johnson, L. D. (1969). Review of literature on expansive clay soils. *Waterways Experiment Station (U.S.). Miscellaneous Paper, S-69-24*, 60.
- Lambe, W. (1958). The Structure of Compacted Clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 84(SM2)*.
- Lambe, W., & Whitman, R. (1969). *Soil Mechanics*.
- Marín Nieto, L. (1991). *Arcillas expansivas en Ecuador*. IX Pan-American Conference on Soil Mechanics and foundation, Viña del mar - Chile.
- Méndez, & Pineda. (2001). *Comportamiento de Cimentaciones en Suelos Expansivos*.
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and analysis of experiments* (Eighth edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Nayak, N. V. (1971). Swelling Characteristics of Compacted, Expansive Soils. *Clays and Clay Minerals, 19(4)*, 251-261. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1971.0190406>
- Nelson, J. D., Chao, K. C. G., Overton, D. D., & Nelson, E. J. (2015). *Foundation Engineering for Expansive Soils: Nelson/Foundation Engineering for Expansive Soils*. John Wiley & Sons, Inc.
<https://doi.org/10.1002/9781118996096>
- Nelson, J. D., & Miller, D. J. (1992). *Expansive soils: Problems and practice in foundation and pavement engineering*. J. Wiley.



- Nelson, J. D., Overton, D. D., & Durkee, D. B. (2001). Depth of Wetting and the Active Zone. *Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations*, 95-109. [https://doi.org/10.1061/40592\(270\)6](https://doi.org/10.1061/40592(270)6)
- Nelson, J. D., Reichler, D. K., & Cumbers, J. M. (2006). Parameters for Heave Prediction by Oedometer Tests. *Unsaturated Soils 2006*, 951-961. [https://doi.org/10.1061/40802\(189\)76](https://doi.org/10.1061/40802(189)76)
- Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1974). *Foundation Engineering* (2d ed). Wiley.
- Pilatasig, B. S. (2020). *Análisis de procedencia de las formaciones de la cuenca de Cuenca al sur del Ecuador y sus implicaciones en el contexto geológico* [Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20744>
- Precupa. (1994). *Proyecto PRECUPA, CSS (Cooperación Ecuador-Suiza)*.
- Rodríguez, P. C. A., & Rodríguez, P. C. A. (2020). Un método simplificado de predicción de hinchamiento de arcillas expansivas debido a cambios de humedad. *Obras y proyectos*, 28, 35-44. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132020000200035>
- Rojas, J. C. P., & Ortiz, J. A. O. (s. f.). *Análisis experimental de la expansividad en suelos bentoníticos*. 95.
- She, J., Lu, Z., Yao, H., Fang, R., & Xian, S. (2019). Experimental Study on the Swelling Behavior of Expansive Soil at Different Depths under Unidirectional Seepage. *Applied Sciences*, 9(6), 1233. <https://doi.org/10.3390/app9061233>
- Simbala, V. (1981). *Estudio de Las Arcillas de la Zona de Charasol (cañar) Para la Utilización en Fluidos de Perforación*. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/32496>
- Sinha, P. (2013). *Multivariate Polynomial Regression in Data Mining: Methodology, Problems and Solutions*. 4(12), 5.
- Tarback, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física* (8.^a ed.). Pearson Education.
- Vélez, P. E. (2012). *Comprobación de las correlaciones de la presión de expansión con las propiedades índices en suelos del sector Challuabamba, Cuenca, recomendaciones para la construcción de cimentaciones*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/2558>
- Villar, M. V., & Lloret, A. (2008). Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite. *Applied Clay Science*, 39(1-2), 38-49. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.04.007>
- Zapata, C. E., Houston, S. L., Houston, W. N., & Dye, H. (2006). Expansion Index and Its Relationship with Other Index Properties. *Unsaturated Soils 2006*, 2133-2137. [https://doi.org/10.1061/40802\(189\)180](https://doi.org/10.1061/40802(189)180)



8. ANEXOS

ANEXO A. Clasificación del suelo.

Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures

General Classification	Granular Materials (35 % or less passing No. 200)							Silt-Clay Materials (More than 35 % passing No. 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Sieve analysis, % passing:											
No. 10 (2.00 mm)	50 max	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425 µm)	30 max	50 max	51 min	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75 µm)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Characteristics of fraction passing No. 40 (425 µm):											
Liquid limit	...	...	...	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Plasticity index	6 max	...	N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min ^A
Usual types of significant constituent materials	Stone Fragments, Gravel and Sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand				Silty Soils		Clayey Soils	
General rating as subgrade	Excellent to Good							Fair to Poor			
^{AA} A-7-5, $PI \leq LL - 30$											
A-7-6, $PI > LL - 30$											

Clasificación de suelo según AASHTO. Modificado de (ASTM D18 Committee, 2004).

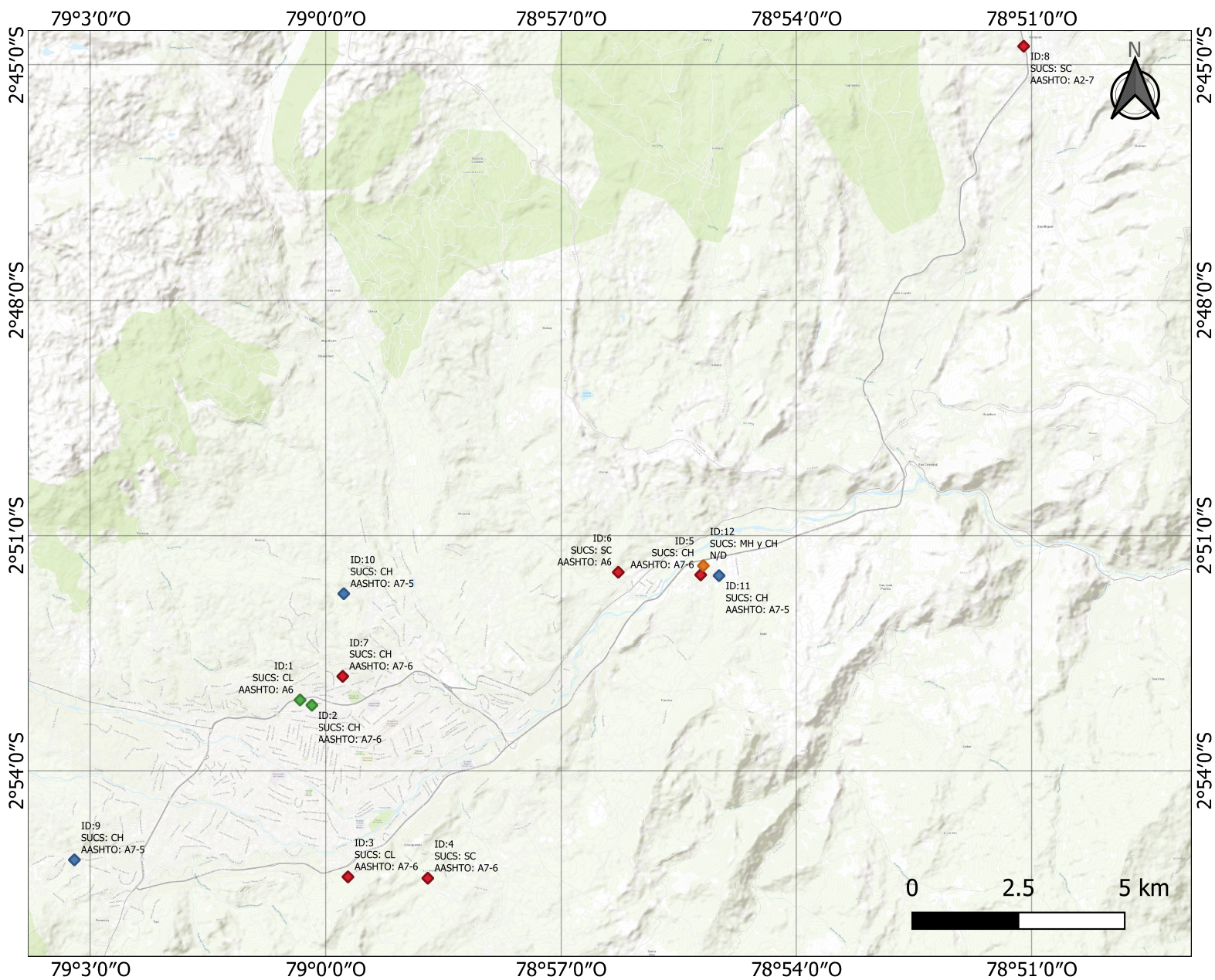
Sistema unificado de clasificación de suelo (basado en el material que pasa por el tamiz núm. 75)

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de grupo	
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias Menos de 5% finos	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$ $C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3$	GW GP	
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Gravas con finos Más de 12% finos	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" $PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A"	GM GC	
		Arenas limpias Menos de 5% finos	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3$ $C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3$	SW SP	
	Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" $PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A"	CL ML
			Orgánico	Límite líquido: secado < 0.75 ; zona OL Límite líquido: no secado	OL
		Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	Gráficos PI en o por encima de línea "A" Gráficos PI por debajo de "A" línea	CH MH
Orgánico			Límite líquido: secado < 0.75 ; zona OH Límite líquido: no secado	OH	
Suelos altamente orgánicos	Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico			Pt	

Sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS) (Das, 2015).



ANEXO B. Mapa de recopilación de resultados de ensayos de expansión de bibliografía local.



Autor:

- ◆ Bravo & Daza (2019)
- ◆ Guncay & Morocho (2005)
- ◆ Idrovo (2019)
- ◆ Vélez (2012)

Tamaño de Lámina de impresión:
A4

Escala de impresión:
1:125000

Sistema de georeferenciación:
EPSG:4326-WGS 84

Fuente:
Elaboración propia a partir de trabajos de titulación de la universidad de Cuenca, y el mapa base Esri "World Topographic Map".

Créditos:
Esri. "Topographic" [Mapa Base]. Escala 1:125000. "World Topographic Map". 2012. http://services.arcgisonline.com/arcgis/rest/services/World_Topo_Map/MapServer.



ANEXO C. Recopilación de resultados de ensayos de expansión de bibliografía local (tabla extendida)

Fuente	ID	Descripción Ubicación	Coordenadas	Expansión controlada		Expansión libre		Límites de Atterberg		Clasificación
				Presión expansión [kgf/cm ²]	Humedad reportada en Exp. Cont	Expansión Libre [%]	Humedad reportada en Exp. Lib	Límite Líquido	Límite Plástico	
Guncay & Morocho (2005): "Estudio de los suelos expansivos en Cuenca: sector Parroquia Bellavista"	1	Facultad de Arquitectura Universidad Católica	2°53'06"S 79°00'20"W	0.235	51.92%	1.068%	49.94%	36.0%	22.04%	SUCS: CL AASHTO: A6
	2	Calle Francisco E. Tamariz y General Morales	2°53'10"S 79°00'11"W	0.265	44.57%	2.109%	39.42%	56.5%	25.6%	SUCS: CH AASHTO: A7-6
Idrovo (2019): "Caracterización de suelos expansivos de la ciudad de Cuenca"	3	Gapal	2°55'21"S 78°59'43"W	0.0214	25.07%	1.04%	32.75%	40.4%	23.48%	SUCS: CL AASHTO: A7-6
				0.0206	26.85%	0.99%	33.16%			
				0.0095	23.37%					
	4	Chilcapamba (Camino a El Valle)	2°55'22"S 78°58'42"W	0.013	35.85%	0.47%	26.99%	42.5%	23.83%	SUCS: SC AASHTO: A7-6
				0.013	32.59%	0.48%	21.62%			
	5	Challuabamba	2°51'30"S 78°55'13"W	0.089	37.98%	2.63%	31.20%	63.3%	21.35%	SUCS: CH AASHTO: A7-6
				0.095	38.05%	2.51%	31.31%			
				0.063	36.39%					
	6	Sidcay	2°51'28"S 78°56'16"W	0.0174	7.88%	0.94%	17.90%	24.5%	13.04%	SUCS: SC AASHTO: A6
				0.0190	6.70%	0.90%	19.62%			
	7	Miraflores	2°52'48"S 78°59'47"W	0.0713	22.86%	2.89%	27.78%	88.4%	27.27%	SUCS: CH AASHTO: A7-6
				0.0648	20.44%	3.08%	24.13%			
0.0227				20.73%						
8	Azogues	2°44'46"S 78°51'6"W	0.2915	12.41%	2.29%	20.20%	48.4%	36.15%	SUCS: SC AASHTO: A2-7	
			0.298	13.06%	2.18%	24.17%				
Bravo & Daza (2019): "Métodos para controlar el potencial expansivo en suelos arcillosos de la ciudad de Cuenca"	9	Baños	2°55'08"S 79°03'12"W	0.08	27.21%	2.56%	27.21%	67.27%	32.95%	SUCS: CH AASHTO: A7-5
				0.08	27.21%	2.86%	24.27%			
				0.08	27.21%	3.25%	27.21%			
	10	Miraflores	2°52'44.4"S 78°59'46.2"W	15.32	25.49%	41.85%	26.78%	86.41%	34.14%	SUCS: CH AASHTO: A7-5
				12.1	23.40%	48.42%	25.49%			
				13.06	23.64%	51.73%	21.33%			
	11	Challuabamba	2°51'30.6"S 78°54'59"W	0.08	21.82%	3.81%	29.28%	79.25%	37.98%	SUCS: CH AASHTO: A7-5
				0.32	21.82%	3.32%	29.28%			
				0.31	21.82%	2.75%	29.28%			
Vélez (2012): "Comprobación de las correlaciones de la presión de expansión con las propiedades índices en suelos del sector Challuabamba, Cuenca, recomendaciones para la construcción de cimentaciones"	12	Challuabamba (Urbanización Colinas de Challuabamba)	2°51'23"S 78°55'11"W	1.560	33.35%	6.49%	33.35%	77.75%	36.62%	SUCS: MH
				0.384	28.91%	1.81%	28.91%	86.76%	39.87%	
				0.384	36.98%	1.24%	36.98%	87.59%	39.20%	
				0.352	35.62%	1.33%	35.62%	85.89%	29.71%	SUCS: CH
				0.767	32.31%	2.99%	32.31%	87.67%	36.03%	
				0.480	41.36%	0.77%	41.36%	107.75%	41.24%	
				0.979	34.92%	2.26%	34.92%			
				1.119	27.18%	5.27%	27.18%	89.75%	36.16%	



ANEXO D. Inspección visual en campo en Miraflores y Challuabamba.



(a)



(b)

Inspección visual en bodegas de Eljuri, sector Miraflores



Elaboración de muro en la calle Cultura Challuabamba, sector Challuabamba.



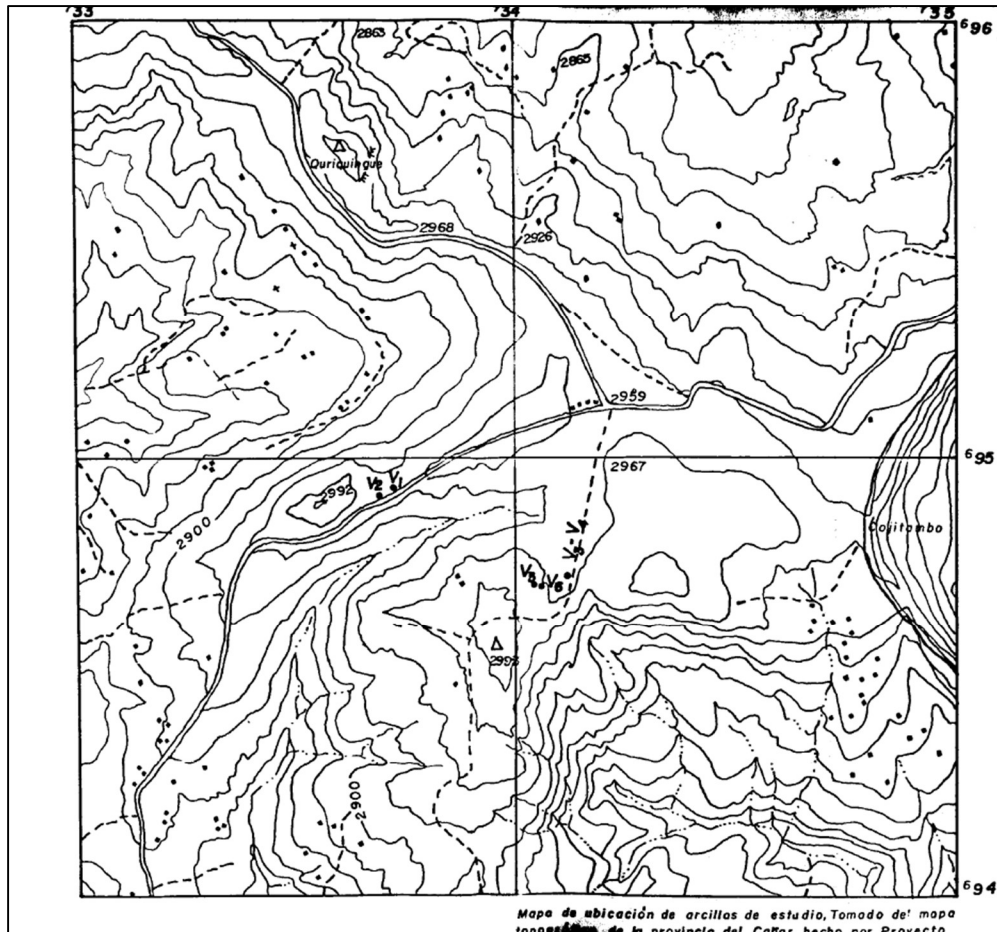
(a)



(b)

Inspección visual en Challuabamba.

ANEXO E. Puntos de suelos bentoníticos en Cojitambo. Fuente: Simbala (1981).



*ANEXO F. Densidad del agua líquida entre 0°C y 100°C.*

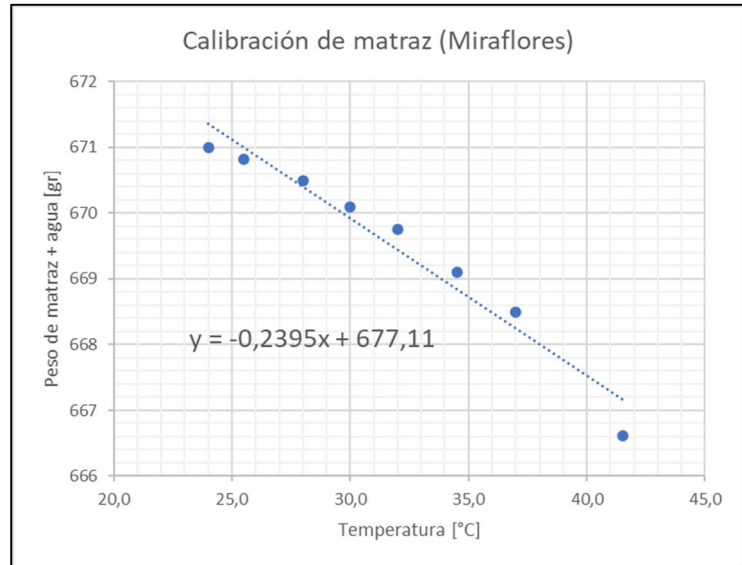
Presión externa: 1 atm					
Temperatura °C	Peso específico kg/m³	Temperatura °C	Peso específico kg/m³	Temperatura °C	Peso específico kg/m³
0 (hielo)	917	33	994.76	67	979.34
0	999.82	34	994.43	68	978.78
1	999.89	35	994.08	69	978.21
2	999.94	36	993.73	70	977.63
3	999.98	37	993.37	71	977.05
4	1000	38	993	72	976.47
5	1000	39	992.63	73	975.88
6	999.99	40	992.25	74	975.28
7	999.96	41	991.86	75	974.68
8	999.91	42	991.46	76	974.08
9	999.85	43	991.05	77	973.46
10	999.77	44	990.64	78	972.85
11	999.68	45	990.22	79	972.23
12	999.58	46	989.8	80	971.6
13	999.46	47	989.36	81	970.97
14	999.33	48	988.92	82	970.33
15	999.19	49	988.47	83	969.69
16	999.03	50	988.02	84	969.04
17	998.86	51	987.56	85	968.39
18	998.68	52	987.09	86	967.73
19	998.49	53	986.62	87	967.07
20	998.29	54	986.14	88	966.41
21	998.08	55	985.65	89	965.74
22	997.86	56	985.16	90	965.06
23	997.62	57	984.66	91	964.38
24	997.38	58	984.16	92	963.7
25	997.13	59	983.64	93	963.01
26	996.86	60	983.13	94	962.31
27	996.59	61	982.6	95	961.62
28	996.31	62	982.07	96	960.91
29	996.02	63	981.54	97	960.2
30	995.71	64	981	98	959.49
31	995.41	65	980.45	99	958.78
32	995.09	66	979.9	100	958.05



ANEXO G. Calibración de matraz para determinación de Gravedad Específica Gs para Miraflores y Challuabamba.

Temperatura	Peso de matraz + agua
T (°C)	W_{m+a} [gr]
41.5	666.62
37.0	668.50
34.5	669.10
32.0	669.75
30.0	670.10
28.0	670.50
25.5	670.82
24.0	671.00

(a)

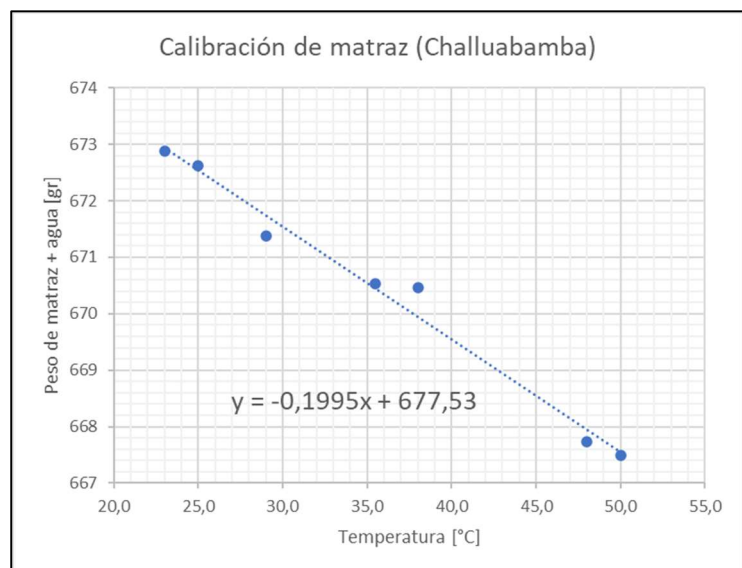


(b)

Calibración de matraz para obtención de Gravedad Específica para suelo de Miraflores: (a) Tabla de datos; (b) Ecuación ajustada.

Temperatura	Peso de matraz + agua
T (°C)	W_{m+a} [gr]
50.0	667.49
48.0	667.74
38.0	670.47
35.5	670.53
29.0	671.38
25.0	672.62
23.0	672.88

(a)



(b)

Calibración de matraz para obtención de Gravedad Específica para suelo de Challuabamba: (a) Tabla de datos; (b) Ecuación ajustada.



ANEXO H. Resultados de granulometría Miraflores

Análisis por hidrómetro Miraflores										
Tiempo	R _{susp}	R _{agua}	Temperatura	R _c	Z _r	Z _{rc}	P _w	Viscosidad	D	Pasa
[min]	[Rayas]	[Rayas]	[°C]	[Rayas]	[cm]	[cm]	[g/cm ³]	[g*s/cm ²]	[mm]	%
0.25	33.50	1.2	21	33.40	9.01	7.90	0.9981	0.009790	0.0722	98.95
0.5	33.00	1.2	21	32.90	9.15	8.04	0.9981	0.009790	0.0515	97.42
1	32.50	1.2	21	32.40	9.29	8.18	0.9981	0.009790	0.0367	95.88
2	31.90	1.2	21	31.80	9.45	8.34	0.9981	0.009790	0.0262	94.05
4	31.50	1.2	21	31.40	9.56	8.45	0.9981	0.009790	0.0187	92.82
15	29.50	1.2	21	29.40	10.11	9.00	0.9981	0.009790	0.0099	86.69
30	28.00	1.2	21	27.90	10.52	9.42	0.9981	0.009790	0.0072	82.10
60	25.00	1.2	21	24.90	11.35	10.24	0.9981	0.009790	0.0053	72.91
120	24.50	1.2	21.5	24.40	11.49	10.38	0.9980	0.009670	0.0038	69.38
240	19.80	1.3	22	19.70	12.78	11.67	0.9979	0.009550	0.0028	56.66
1440	17.30	1.2	21	17.20	13.47	12.36	0.9981	0.009790	0.0012	49.32
2880	15.00	0.8	16.5	14.90	14.10	12.99	0.9989	0.010950	0.0009	43.54
4320	12.50	0.9	17.5	12.40	14.79	13.68	0.9988	0.010675	0.0008	35.56

Análisis combinado ajustado Miraflores		
Análisis	Tamaño [mm]	%Pasa
Análisis por cribado	4.75	100.0%
	2	99.6%
	0.425	99.0%
	0.15	98.6%
	0.075	98.3%
Análisis por Hidrómetro Ajustado	0.0722	97.2%
	0.0515	95.7%
	0.0367	94.2%
	0.0262	92.4%
	0.0187	91.2%
	0.0099	85.2%
	0.0072	80.7%
	0.0053	71.7%
	0.0038	68.2%
	0.0028	55.7%
	0.0012	48.5%
0.0009	42.8%	
0.0008	34.9%	



ANEXO I. Resultados de granulometría Challuabamba

Análisis por hidrómetro Challuabamba										
Tiempo	R _{susp}	R _{agua}	Temperatura	R _c	Z _r	Z _{rc}	P _w	Viscosidad	D	Pasa
[min]	[Rayas]	[Rayas]	[°C]	[Rayas]	[cm]	[cm]	[g/cm ³]	[g*s/cm ²]	[mm]	%
0.25	41.00	4	17	41.50	5.27	4.17	0.9989	0.010810	0.05481	95.26
0.5	39.50	4	17	40.00	5.68	4.57	0.9989	0.010810	0.04058	91.39
1	38.00	4	17	38.50	6.08	4.97	0.9989	0.010810	0.02993	87.53
2	37.50	4	17	38.00	6.21	5.11	0.9989	0.010810	0.02145	86.24
4	36.50	4	17	37.00	6.48	5.37	0.9989	0.010810	0.01556	83.67
15	34.50	4	19	35.00	7.01	5.91	0.9985	0.010280	0.00821	78.49
30	34.00	4.5	18	34.50	7.15	6.04	0.9987	0.010540	0.00595	75.93
60	32.50	3.5	17.5	33.00	7.55	6.44	0.9988	0.010675	0.00437	74.65
150	32.00	4	16.5	32.50	7.68	6.58	0.9989	0.010950	0.00283	72.09
240	31.00	4	16.5	31.50	7.95	6.85	0.9989	0.010950	0.00228	69.52
1440	24.50	4	16	25.00	9.69	8.59	0.9990	0.011090	0.00105	52.79

Análisis combinado ajustado Challuabamba		
Análisis	Tamaño [mm]	%Pasa
Análisis por cribado	4.760	99.8%
	2.380	98.3%
	2.000	97.9%
	1.190	97.0%
	0.841	96.5%
	0.595	95.9%
	0.420	95.2%
	0.297	94.6%
	0.149	92.1%
	0.075	89.9%
Análisis por Hidrómetro Ajustado	0.0548	85.6%
	0.0406	82.2%
	0.0299	78.7%
	0.0214	77.5%
	0.0156	75.2%
	0.0082	70.6%
	0.0059	68.3%
	0.0044	67.1%
	0.0028	64.8%
	0.0023	62.5%
0.0011	47.5%	



ANEXO J. Resultados de expansión libre para Miraflores.

Muestra 1 Miraflores: humedad 17%			
Gravedad Específica Gs		2.81	
Datos de anillo 1	Altura h [cm]	1.94	
	Diámetro interno [cm]	5.02	
	Peso W [gr]	60.29	
	Peso de muestra + anillo [gr]	Húmeda	108.0
	Saturada	122.7	
	Seca	100.9	
Tiempo [min]	# de rayas (0.01 mm)	Deformación [mm]	Expansión [%]
0	0.0	0.00	0.00
1	0.0	0.00	0.00
2	0.5	0.01	0.03
4	1.0	0.01	0.05
8	2.5	0.03	0.13
15	8.5	0.09	0.44
20	10.0	0.10	0.52
60	15.5	0.16	0.80
110	20.0	0.20	1.03
240	27.0	0.27	1.39
480	35.0	0.35	1.80
1440	52.5	0.53	2.71
1520	54.0	0.54	2.78
1680	57.0	0.57	2.94
1862	60.5	0.61	3.12
2880	75.0	0.75	3.87
3360	82.0	0.82	4.23
Cálculos		Inicial	Final
Humedad [%]		17.4%	53.6%
Volumen [cm ³]		38.4	40.0
Peso específico [gr/cm ³]		1.24	1.56
Peso específico seco [gr/cm ³]		1.06	1.02

Muestra 2 Miraflores: humedad 28%			
Gravedad Específica Gs		2.81	
Datos de anillo 3	Altura h [cm]	1.96	
	Diámetro interno [cm]	7.12	
	Peso W [gr]	82.58	
	Peso de muestra + anillo [gr]	Húmeda	236.0
	Saturada	245.9	
	Seca	202.5	
Tiempo [min]	# de rayas (0.001")	Deformación [mm]	Expansión [%]
0	0.0	0.00	0.00
1	0.0	0.00	0.00
2	0.0	0.00	0.00
4	0.0	0.00	0.00
6	0.5	0.01	0.07
8	0.5	0.01	0.07
15	1.0	0.03	0.13
30	2.5	0.06	0.33
60	4.0	0.10	0.52
120	6.5	0.17	0.85
200	9.5	0.24	1.24
360	13.0	0.33	1.70
450	14.5	0.37	1.90
480	15.0	0.38	1.94
1440	22.5	0.57	2.92
1680	24.0	0.61	3.11
1813	25.0	0.64	3.24
1920	25.5	0.65	3.30
Cálculos		Inicial	Final
Humedad [%]		27.9%	36.2%
Volumen [cm ³]		78.0	80.6
Peso específico [gr/cm ³]		1.97	2.03
Peso específico seco [gr/cm ³]		1.54	1.49



ANEXO K. Resultados de expansión libre para Challuabamba.

Muestra 1 Challuabamba: humedad 18%			
Gravedad Específica Gs		2.83	
Datos de anillo 2	Altura h [cm]	1.95	
	Diámetro interno [cm]	5.05	
	Peso W [gr]	58.31	
Peso de muestra + anillo [gr]	Húmeda	123.4	
	Saturada	136.8	
	Seca	113.5	
Tiempo [min]	# de rayas (0.001")	Deformación [mm]	Expansión [%]
0	0.0	0.00	0.00
1	0.0	0.00	0.00
2	0.0	0.00	0.00
4	0.0	0.00	0.00
6	0.5	0.01	0.07
8	0.5	0.01	0.07
15	1.0	0.03	0.13
30	2.5	0.06	0.33
60	4.0	0.10	0.52
120	6.0	0.15	0.78
200	9.5	0.24	1.24
310	12.5	0.32	1.63
352	13.5	0.34	1.76
1440	27.5	0.70	3.58
1680	29.5	0.75	3.84
1800	30.5	0.77	3.97
1860	31.0	0.79	4.04
2910	35.5	0.90	4.62
4320	39.0	0.99	5.08
Cálculos		Inicial	Final
Humedad [%]		18.0%	42.3%
Volumen [cm³]		39.06	41.04
Peso específico [gr/cm³]		1.67	1.91
Peso específico seco [gr/cm³]		1.41	1.34

Muestra 2 Challuabamba: humedad 35%			
Gravedad Específica Gs		2.83	
Datos de anillo 2	Altura h [cm]	1.95	
	Diámetro interno [cm]	5.05	
	Peso W [gr]	58.31	
Peso de muestra + anillo [gr]	Húmeda	134.1	
	Saturada	136.5	
	Seca	114.4	
Tiempo [min]	# de rayas (0.01 mm)	Deformación [mm]	Expansión [%]
0	0.0	0.00	0.00
1	0.5	0.01	0.03
2	0.5	0.01	0.03
4	0.5	0.01	0.03
8	3.5	0.04	0.18
15	8.5	0.09	0.44
30	11.0	0.11	0.56
60	13.5	0.14	0.69
120	18.0	0.18	0.92
240	25.0	0.25	1.28
480	34.0	0.34	1.74
1440	51.5	0.52	2.64
1552	53.0	0.53	2.72
2880	63.0	0.63	3.23
Cálculos		Inicial	Final
Humedad [%]		35.3%	39.4%
Volumen [cm³]		39.1	40.3
Peso específico [gr/cm³]		1.94	1.94
Peso específico seco [gr/cm³]		1.43	1.39



ANEXO L. Resultados de expansión libre para Cojitambo.

Muestra 1 Cojitambo: humedad 18%			
Datos de anillo 5	Altura h [cm]	1.95	
	Diámetro interno [cm]	5.05	
	Peso W [gr]	58.31	
Peso de muestra + anillo [gr]	Húmeda	125.6	
	Saturada	135.9	
	Seca	115.6	
Tiempo [min]	# de rayas (0.01 mm)	Deformación [mm]	Expansión [%]
0	0.0	0.00	0.00
1	0.0	0.00	0.00
2	0.0	0.00	0.00
4	0.5	0.01	0.03
8	3.5	0.04	0.18
15	5.0	0.05	0.26
30	9.0	0.09	0.46
60	10.5	0.11	0.54
120	11.5	0.12	0.59
240	12.5	0.13	0.64
1440	13.0	0.13	0.67
1680	13.0	0.13	0.67
Cálculos	Inicial	Final	
Humedad [%]	17.5%	35.5%	
Volumen [cm³]	39.1	39.3	
Peso específico [gr/cm³]	1.72	1.97	
Peso específico seco [gr/cm³]	1.47	1.46	

Muestra 2 Cojitambo: humedad 30%			
Datos de anillo 2	Altura h [cm]	1.95	
	Diámetro interno [cm]	5.05	
	Peso W [gr]	58.31	
Peso de muestra + anillo [gr]	Húmeda	135.1	
	Saturada	137.5	
	Seca	117.5	
Tiempo [min]	# de rayas (0.01 mm)	Deformación [mm]	Expansión [%]
0	0.0	0.00	0.00
1	0.0	0.00	0.00
2	0.5	0.01	0.03
4	1.0	0.01	0.05
6	2.0	0.02	0.10
8	2.5	0.03	0.13
15	4.0	0.04	0.21
30	6.0	0.06	0.31
60	7.5	0.08	0.38
120	8.0	0.08	0.41
200	8.5	0.09	0.44
Cálculos	Inicial	Final	
Humedad [%]	29.8%	33.8%	
Volumen [cm³]	39.1	39.2	
Peso específico [gr/cm³]	1.97	2.02	
Peso específico seco [gr/cm³]	1.52	1.51	



ANEXO M. Resultados de expansión controlada para Miraflores.

Fecha de inicio del ensayo		23/11/2021		
Ubicación		Miraflores		
Brazo de Palanca		10	10	
Datos		Anillo 1 (altura: 1.94 cm, diámetro: 5.02cm; peso 60.29g)	Anillo 4 (altura: 1.94 cm, diámetro: 5.02 cm; peso 59.17g)	
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	135.3	138.8	
	Saturada	138.1	139.8	
	Seca	121.0	119.7	
Esquema de cargas				
	Tiempo (min)	Carga (gr)	Tiempo (min)	Carga (gr)
	2	100	2	100
	9	200	23	150
	16	300	28	200
	28	400	44	300
	38	500	218	800
	44	800	1350	800
	50	1300		
	218	1800		
	1350	1800		
Cálculos				
Peso específico (gr/cm ³)		1.95	2.07	
Peso específico seco (gr/cm ³)		1.58	1.58	
Humedad (%)		23.6%	31.6%	
Presión de expansión (Kg/cm ²)		0.91	0.40	
Tiempo de ensayo (horas)		22.5	22.5	

Fecha de inicio del ensayo		01/12/2021		
Ubicación		Miraflores		
Brazo de Palanca		10	10	
Datos		Anillo 2 (altura: 1.95 cm, diámetro: 5.05cm; peso 58.31g)	Anillo 3 (altura: 1.96 cm, diámetro: 7.12 cm; peso 82.58g)	
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	124.2	204.9	
	Saturada	132.0	225.4	
	Seca	111.5	184.2	
Esquema de cargas				
	Tiempo (min)	Carga (gr)	Tiempo (min)	Carga (gr)
	1	50	1	100
	3	100	2	200
	7	300	4	300
	13	500	6	1000
	18	750	19	1500
	35	1000	91	1300
	67	1200	1029	1300
	92	1000		
	1030	1000		
Cálculos				
Peso específico (gr/cm ³)		1.69	1.57	
Peso específico seco (gr/cm ³)		1.36	1.30	
Humedad (%)		24.0%	20.4%	
Presión de expansión (Kg/cm ²)		0.50	0.33	
Tiempo de ensayo (horas)		17.17	17.15	



Fecha de inicio del ensayo		06/12/2021			
Ubicación		Miraflores			
Brazo de Palanca		10	10		
Datos		Anillo 2 (altura: 1.95 cm, diámetro: 5.05cm; peso 58.31g)	Anillo 3 (altura: 1.96 cm, diámetro: 7.12 cm; peso 82.58g)		
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	122.6	229.9		
	Saturada	134.3	243.0		
	Seca	112.9	203.9		
Esquema de cargas					
		Tiempo (min)	Carga (gr)	Tiempo (min)	Carga (gr)
		1	100	1	80
		6	300	3	550
		8	450	10	1000
		14	700	19	1250
		19	800	25	1500
		35	1000	35	2000
		53	1250	54	2500
		1080	1250	60	2800
				120	3800
				1080	3800
Cálculos					
Peso específico (gr/cm ³)		1.65	1.89		
Peso específico seco (gr/cm ³)		1.40	1.56		
Humedad (%)		17.9%	21.4%		
Presión de expansión (Kg/cm ²)		0.62	0.95		
Tiempo de ensayo (horas)		18.0	18.0		

Fecha de inicio del ensayo		07/12/2021			
Ubicación		Miraflores			
Brazo de Palanca		11	10		
Datos		Anillo 2 (altura: 1.95 cm, diámetro: 5.05cm; peso 58.31g)	Anillo 3 (altura: 1.96 cm, diámetro: 7.12 cm; peso 82.58g)		
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	124.3	224.0		
	Saturada	128.1	225.8		
	Seca	106.0	183.5		
Esquema de cargas					
		Tiempo (min)	Carga (gr)	Tiempo (min)	Carga (gr)
		14	50	14	50
		34	100	34	150
		73	130	73	250
		132	150	132	200
		1440	150	1440	200
Cálculos					
Peso específico (gr/cm ³)		1.69	1.81		
Peso específico seco (gr/cm ³)		1.22	1.29		
Humedad (%)		38.3%	40.2%		
Presión de expansión (Kg/cm ²)		0.055	0.050		
Tiempo de ensayo (horas)		24.00	24.00		



Fecha de inicio del ensayo		08/12/2021	
Ubicación		Miraflores	
Brazo de Palanca		10	10
Datos		Anillo 2 (altura: 1.95 cm, diámetro: 5.05cm; peso 58.31g)	Anillo 5 (altura: 1.95 cm, diámetro: 5.05 cm; peso 58.31g)
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	125.9	136.4
	Saturada	135.9	136.7
	Seca	117.5	115.9
Esquema de cargas			
		Tiempo (min)	Carga (gr)
		1	100
		6	300
		7	500
		9	1000
		16	1300
		23	1500
		34	2500
		57	2750
		70	3000
		85	3500
		1106	3500
Cálculos			
Peso específico (gr/cm³)		1.73	2.00
Peso específico seco (gr/cm³)		1.51	1.47
Humedad (%)		14.2%	35.6%
Presión de expansión (Kg/cm²)		1.25	0.25
Tiempo de ensayo (horas)		18.4	18.4

Fecha de inicio del ensayo		09/12/2021	
Ubicación		Miraflores	
Brazo de Palanca		10	
Datos		Anillo 2 (altura: 1.95 cm, diámetro: 5.05cm; peso 58.31g)	
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	127.4	
	Saturada	137.8	
	Seca	120.0	
Esquema de cargas			
		Tiempo (min)	Carga (gr)
		2	300
		6	800
		10	1500
		18	2000
		23	2500
		30	2750
		39	3000
		250	4000
		360	4200
		1440	4200
Cálculos			
Peso específico (gr/cm³)		1.78	
Peso específico seco (gr/cm³)		1.58	
Humedad (%)		12.3%	
Presión de expansión (Kg/cm²)		2.12	
Tiempo de ensayo (horas)		24.0	

*ANEXO N. Resultados de expansión controlada para Challuabamba.*

Fecha de inicio del ensayo		28/09/2021	
Ubicación		Challuabamba	
Brazo de Palanca		9	10
Datos		Anillo 4 (altura: 1.94 cm, diámetro: 5.02 cm; peso 59.17g)	
		Anillo 3 (altura: 1.96 cm, diámetro: 7.12 cm; peso 82.58g)	
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	127.6	203.9
	Saturada	129.7	224.9
	Seca	108.1	182.2
Esquema de cargas			
		Tiempo (min)	Carga (gr)
		10	100
		22	350
		60	400
		115	500
		145	600
		175	700
		227	730
		1312	1000
		1320	1250
		1340	1500
		1350	2000
		1365	2300
		1380	2250
		1392	2000
		1421	1800
		1441	1600
		2814	1600
Cálculos			
Peso específico (gr/cm ³)		1.78	1.56
Peso específico seco (gr/cm ³)		1.27	1.28
Humedad (%)		39.9%	21.8%
Presión de expansión (Kg/cm ²)		0.728	1.193
Tiempo de ensayo (horas)		46.9	72

Fecha de inicio del ensayo		20/10/2021	
Ubicación		Challuabamba	
Brazo de Palanca		10	
Datos		Anillo 7 (altura: 2 cm, diámetro: 6.33 cm; peso 74.28g)	
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	184.5	
	Saturada	189.7	
	Seca	157.6	
Esquema de cargas			
		Tiempo (min)	Carga (gr)
		1	100
		10	150
		22	300
		45	350
		201	600
		206	1100
		1311	2100
		1365	1800
		1388	2500
		3092	2500
Cálculos			
Peso específico (gr/cm ³)		1.75	
Peso específico seco (gr/cm ³)		1.32	
Humedad (%)		32.2%	
Presión de expansión (Kg/cm ²)		0.79	
Tiempo de ensayo (horas)		52	



Fecha de inicio del ensayo		08/11/2021	
Ubicación		Challuabamba	
Brazo de Palanca		10	
Datos		Anillo 1 (altura: 1.94 cm, diámetro: 5.02cm; peso 60.29g)	Anillo 3 (altura: 1.96 cm, diámetro: 7.12 cm; peso 82.58g)
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	124.2	222.3
	Saturada	130.0	223.3
	Seca	109.0	180.0
Esquema de cargas			
		Tiempo (min)	Carga (gr)
		15	100
		68	200
		100	300
		309	750
		1290	530
		1740	700
		2880	700
			145
			204
			1289
			1297
			1317
			1740
			2880
Cálculos			
Peso específico (gr/cm ³)		1.67	1.79
Peso específico seco (gr/cm ³)		1.27	1.25
Humedad (%)		31.3%	43.4%
Presión de expansión (Kg/cm ²)		0.35	0.176
Tiempo de ensayo (horas)		48.00	48.00

Fecha de inicio del ensayo		08/12/2021	
Ubicación		Challuabamba	
Brazo de Palanca		10	
Datos		Anillo 3 (altura: 1.96 cm, diámetro: 7.12 cm; peso 82.58g)	
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	220.4	
	Saturada	225.1	
	Seca	182.3	
Esquema de cargas			
		Tiempo (min)	Carga (gr)
		1	50
		6	250
		26	350
		43	500
		58	600
		71	850
		1105	2850
		1182	3000
		1463	4000
		1517	3500
		2700	2850
Cálculos			
Peso específico (gr/cm ³)		1.77	
Peso específico seco (gr/cm ³)		1.28	
Humedad (%)		38.2%	
Presión de expansión (Kg/cm ²)		0.72	
Tiempo de ensayo (horas)		45	



Fecha de inicio del ensayo		09/12/2021
Ubicación		Challuabamba
Brazo de Palanca		10
Datos		Anillo 1 (altura: 1.94 cm, diámetro: 5.02cm; peso 60.29g)
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	139.7
	Saturada	139.3
	Seca	122.3
Esquema de cargas		
	Tiempo (min)	Carga (gr)
	2	300
	11	500
	19	750
	21	1000
	30	1500
	250	3500
	280	4000
	337	4500
	363	5000
	1420	6000
	1706	7000
	5730	7000
Cálculos		
Peso específico (gr/cm³)		2.07
Peso específico seco (gr/cm³)		1.62
Humedad (%)		21.9%
Presión de expansión (Kg/cm²)		3.54
Tiempo de ensayo (horas)		95.50 (permaneció el fin de semana)

Fecha de inicio del ensayo		13/12/2021					
Ubicación		Challuabamba					
Brazo de Palanca		10	10	10	10	10	10
Datos		Anillo 2 (altura: 1.95 cm, diámetro: 5.05cm; peso 58.31g)		Anillo 5 (altura: 1.95 cm, diámetro: 5.05 cm; peso 58.31g)		Anillo 6 (altura: 1.96 cm, diámetro: 7.12 cm; peso 82.4g)	
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	128.8	129.9	216.43	216.43	216.43	216.43
	Saturada	133.8	130.2	217.93	217.93	217.93	217.93
	Seca	115.6	108.0	170.13	170.13	170.13	170.13
Esquema de cargas							
	Tiempo (min)	Carga (gr)	Tiempo (min)	Carga (gr)	Tiempo (min)	Carga (gr)	Tiempo (min)
	2	200	3	100	2	100	2
	13	500	25	150	25	250	25
	24	700	218	500	201	450	201
	207	1500	310	800	320	950	320
	309	3000	1332	800	1332	950	1332
	1331	5000					
	1650	5500					
	1770	6000					
	2940	6000					
Cálculos							
Peso específico (gr/cm³)		1.80	1.83	1.72	1.72	1.72	1.72
Peso específico seco (gr/cm³)		1.47	1.27	1.12	1.12	1.12	1.12
Humedad (%)		23.0%	43.9%	27.2%	27.2%	27.2%	27.2%
Presión de expansión (Kg/cm²)		3.00	0.40	0.24	0.24	0.24	0.24
Tiempo de ensayo (horas)		49.00	22.20	22.20	22.20	22.20	22.20



Fecha de inicio del ensayo		14/12/2021			
Ubicación		Challuabamba			
Brazo de Palanca		10	10		
Datos		Anillo 4 (altura: 1.94 cm, diámetro: 5.02 cm; peso 59.17g)	Anillo 3 (altura: 1.96 cm, diámetro: 7.12 cm; peso 82.58g)		
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	130.2	212.4		
	Saturada	130.9	218.1		
	Seca	109.4	171.7		
Esquema de cargas					
		Tiempo (min)	Carga (gr)	Tiempo (min)	Carga (gr)
		3	100	3	50
		248	500	30	80
		1430	750	247	500
		2760	750	1430	1000
				2760	1000
Cálculos					
Peso específico (gr/cm ³)		1.85		1.66	
Peso específico seco (gr/cm ³)		1.31		1.14	
Humedad (%)		41.5%		45.7%	
Presión de expansión (Kg/cm ²)		0.37		0.25	
Tiempo de ensayo (horas)		46.00		46.00	

Fecha de inicio del ensayo		25/01/2021					
Ubicación		Challuabamba					
Brazo de Palanca		10		10		10	
Datos		Anillo 6 (altura: 1.96 cm, diámetro: 7.12 cm; peso 82.4g)		Anillo 1 (altura: 1.94 cm, diámetro: 5.02cm; peso 60.29g) (remoldeado)		Anillo 4 (altura: 1.94 cm, diámetro: 5.02 cm; peso 59.17g) (remoldeado)	
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	215.19		130.28		127.74	
	Saturada	222.28		131.26		131.69	
	Seca	177.82		110.08		111.76	
Esquema de cargas							
		Tiempo (min)	Carga (gr)	Tiempo (min)	Carga (gr)	Tiempo (min)	Carga (gr)
		1	100	1	50	1	100
		12	300	9	300	9	300
		73	500	52	500	17	600
		1383	750	84	600	34	1000
		2940	750	1120	1500	51	2000
				2580	1500	1120	3000
						1410	4000
						2580	4000
Cálculos							
Peso específico (gr/cm ³)		1.70		1.82		1.79	
Peso específico seco (gr/cm ³)		1.22		1.30		1.37	
Humedad (%)		39.2%		40.6%		30.4%	
Presión de expansión (Kg/cm ²)		0.19		0.76		2.02	
Tiempo de ensayo (horas)		49.00		43.00		43.00	



Fecha de inicio del ensayo		31/01/2022		
Ubicación		Challuabamba		
Brazo de Palanca		10	10	
Datos	Anillo 1 (altura: 1.94 cm, diámetro: 5.02cm; peso 60.29g)	Anillo 4 (altura: 1.94 cm, diámetro: 5.02 cm; peso 59.17g)		
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	130.19	129.82	
	Saturada	131.35	130.41	
	Seca	110.05	109.85	
Esquema de cargas				
	Tiempo (min)	Carga (gr)	Tiempo (min)	Carga (gr)
	13	200	2	100
	30	800	14	250
	200	1250	200	1250
	1620	1500	1365	2250
	3120	1500	1620	2000
			2760	1500
			3120	1500
Cálculos				
Peso específico (gr/cm ³)		1.82	1.84	
Peso específico seco (gr/cm ³)		1.30	1.32	
Humedad (%)		40.5%	39.4%	
Presión de expansión (Kg/cm ²)		0.76	0.76	
Tiempo de ensayo (horas)		52.00	52.00	

Fecha de inicio del ensayo		07/02/2022				
Ubicación		Challuabamba				
Precisión de deformímetro		0,01mm	0,001"	0,001"		
Datos	Anillo 1 (altura: 1.94 cm, diámetro: 5.02cm; peso 60.29g)	Anillo 4 (altura: 1.94 cm, diámetro: 5.02 cm; peso 59.17g) (remoldeado)	Anillo 6 (altura: 1.96 cm, diámetro: 7.12 cm; peso 82.4g)			
Peso muestra + anillo (gr)	Húmeda	134.20	118.40	220.89		
	Saturada	136.99	131.22	224.45		
	Seca	118.88	107.88	181.73		
Esquema de cargas						
	Tiempo (min)	Carga (gr)	Tiempo (min)	Carga (gr)	Tiempo (min)	Carga (gr)
	1	200	1	100	1	50
	4	500	2	500	2	250
	20	750	20	850	20	300
	30	1000	35	1000	35	500
	48	15000	60	1300	60	700
	68	1600	65	1250	1041	2500
	1040	4000	1040	2250	1335	2000
	1065	5000	1335	1500	2520	2000
	1336	6000	2520	1500		
	2520	6000				
Cálculos						
Peso específico (gr/cm ³)		1.92	1.54	1.77		
Peso específico seco (gr/cm ³)		1.53	1.27	1.27		
Humedad (%)		26.1%	21.6%	39.4%		
Presión de expansión (Kg/cm ²)		3.03	0.76	0.50		
Tiempo de ensayo (horas)		42.00	42.00	42.00		



ANEXO O. Datos de presión de expansión de ecuaciones en base a las correlaciones de los cinco autores analizados para Miraflores y Challuabamba.

Humedad [%]	MIRAFLORES				CHALLUABAMBA			
	Komornik y David (1969)	Nayak y Christensen (1979)	Erzin y Erol (2004)	Sabtan (2005)	Komornik y David (1969)	Nayak y Christensen (1979)	Erzin y Erol (2004)	Sabtan (2005)
0	1.39	4E+18	0.10	3.15	3.86	8E+18	0.09	3.66
2	1.23	91.71	0.09	3.11	3.41	188.76	0.09	3.62
4	1.08	23.13	0.09	3.07	3.01	47.39	0.08	3.58
6	0.96	10.43	0.08	3.03	2.66	21.21	0.07	3.54
8	0.85	5.98	0.07	2.99	2.35	12.05	0.07	3.50
10	0.75	3.92	0.07	2.94	2.08	7.81	0.06	3.46
12	0.66	2.81	0.06	2.90	1.84	5.50	0.06	3.42
14	0.58	2.13	0.06	2.86	1.62	4.11	0.05	3.37
16	0.52	1.70	0.06	2.82	1.43	3.21	0.05	3.33
18	0.46	1.40	0.05	2.78	1.27	2.59	0.05	3.29
20	0.40	1.18	0.05	2.74	1.12	2.15	0.04	3.25
22	0.36	1.02	0.04	2.70	0.99	1.82	0.04	3.21
24	0.31	0.90	0.04	2.66	0.87	1.58	0.04	3.17
26	0.28	0.81	0.04	2.62	0.77	1.38	0.03	3.13
28	0.25	0.73	0.04	2.58	0.68	1.23	0.03	3.09
30	0.22	0.67	0.03	2.54	0.60	1.10	0.03	3.05
32	0.19	0.62	0.03	2.50	0.53	1.00	0.03	3.01
34	0.17	0.58	0.03	2.45	0.47	0.92	0.03	2.97
36	0.15	0.55	0.03	2.41	0.42	0.85	0.02	2.93
38	0.13	0.52	0.02	2.37	0.37	0.79	0.02	2.88
40	0.12	0.50	0.02	2.33	0.32	0.74	0.02	2.84
42	0.10	0.47	0.02	2.29	0.29	0.69	0.02	2.80
44	0.09	0.46	0.02	2.25	0.25	0.66	0.02	2.76
46	0.08	0.44	0.02	2.21	0.22	0.62	0.02	2.72
48	0.07	0.43	0.02	2.17	0.20	0.59	0.02	2.68
50	0.06	0.41	0.02	2.13	0.17	0.57	0.01	2.64



ANEXO P. Modificación de la ecuación de Nayak y Christensen para obtención de curva de mejor ajuste a datos experimentales de Miraflores

Ajuste de Nayak y Christensen (1979) con datos experimentales de Miraflores				
Coficiente 1:	0.03581	$PS = \frac{0.03581 IP^{1.12} C^2}{\omega^2} + 3.7912$		
Coficiente 2:	3.7912			
Humedad [%]	Nayak y Christensen (1979)	Datos Experimentales	Cuadrados de error	Cuadrados de regresión
23.6	23.6	0.921	0.909	0.000
31.6	31.6	0.634	0.404	0.053
24.0	24.0	0.904	0.499	0.164
20.4	20.4	1.145	0.327	0.670
17.9	17.9	1.404	0.624	0.608
21.4	21.4	1.067	0.954	0.013
38.3	38.3	0.517	0.055	0.213
40.2	40.2	0.493	0.050	0.196
14.2	14.2	2.085	1.248	0.700
35.6	35.6	0.554	0.250	0.093
12.3	12.3	2.696	2.122	0.330
Media datos:				0.6766
SSE:				3.0391
SSR:				7.1493
R²:				0.702

Ajuste de Nayak y Christensen (1979) (Modificada) con datos experimentales de Miraflores				
Coficiente 1:	0.02832	$PS = \frac{0.02832 IP^{1.12} C^2}{\omega^2}$		
Coficiente 2:	0			
Humedad [%]	Nayak y Christensen (1979)	Datos Experimentales	Cuadrados de error	Cuadrados de regresión
23.6	0.518	0.9094	0.154	0.025
31.6	0.290	0.40	0.013	0.149
24.0	0.504	0.50	0.000	0.030
20.4	0.695	0.33	0.136	0.000
17.9	0.900	0.62	0.076	0.050
21.4	0.633	0.95	0.104	0.002
38.3	0.198	0.055	0.020	0.229
40.2	0.179	0.050	0.017	0.248
14.2	1.438	1.25	0.036	0.579
35.6	0.228	0.25	0.000	0.202
12.3	1.921	2.12	0.040	1.549
Media datos:				0.677
SSE:				0.595
SSR:				3.063
R²:				0.837