

*Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela de Ingeniería Agrícola*  
*Suelos y su Laboratorio, Tomo III*  
*Adrián Enrique Chavarría Vidal*  
*Cartago, Costa Rica - 2025*

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

## Dedicatoria y agradecimiento

A Dios sobre todas las cosas que es el dador de toda vida y de toda buena dádiva

**(Adquiere sabiduría, adquiere entendimiento y no te apartes de los dichos de mi boca. No la abandones para que ella te proteja, ámala para que te libre)**

**Proverbios 4: 5 - 6**

**(Presta atención hijo Mío a mis Palabras e inclina tu oído a mi discurso, no se aparten de tus ojos; sino guárdalas dentro de tu corazón, pues son vida para los que las hallan y salud para toda su carne)**

**Proverbios 4: 20 - 22**

*A mi amada esposa Kattia Lorena Moreno Valencia*

A mis amados hijos Jafet y Kemuel  
Chavarría Moreno

A todos aquellos que en algún momento y en alguna medida me han ayudado y aconsejado

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

# Contenido

Índice de Figuras .....	8
Índice de Cuadros.....	15
Estructura del suelo .....	17
Objetivos .....	17
Introducción.....	17
Forma de los agregados o tipo de estructura .....	21
Otros tipo de estructura del suelo .....	48
Grado de desarrollo de la estructura .....	48
Otra clasificaciones de la estructura del suelo utilizada usualmente en mecánica de suelos .....	52
Agregación en el suelo .....	53
Instrucciones .....	57
Materiales.....	57
Procedimiento .....	58
Preguntas.....	58
Densidad real de las partículas del suelo .....	60
Objetivo .....	60
Introducción.....	60
Determinación de la densidad real de partículas .....	61
Metodología 1 (método del picnómetro).....	63
Materiales.....	63

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

Procedimiento .....	63
Metodología 2 (método de volúmenes) .....	67
Instrucciones .....	67
Materiales.....	67
Preguntas.....	68
Metodología 3 (método de la fórmula de porosidad total del suelo).....	71
Instrucciones .....	71
Materiales.....	72
Metodología 4 (método del razonamiento de la deducción de volúmenes y masas de una muestra de suelo.....	75
Conductividad hidráulica saturada de muestras de suelo indisturbadas por los métodos de carga constante y carga variable y otros métodos de campo .....	79
Objetivo .....	79
Introducción.....	79
Factores que afectan la conductividad hidráulica: .....	81
Materiales.....	81
Métodos para determinar la conductividad hidráulica de los suelo .....	83
Métodos de laboratorio:.....	83
Procedimiento para permeámetros de carga constante .....	83
Procedimiento para permeámetros de carga variable.....	86
Preguntas.....	94

Densidad aparente, humedad gravimétrica, humedad volumétrica, diferentes estados de humedad en el suelo, porosidad total, relación de vacíos y porosidad de aireación llamado porcentaje de aire en el suelo.....	95
Objetivos .....	95
Introducción.....	95
Método del cilindro .....	101
Materiales.....	101
Procedimiento .....	102
Método del terrón parafinado.....	104
Materiales.....	104
Procedimiento .....	105
Agua en el suelo visto como parámetros de la humedad gravimétrica y humedad volumétrica del suelo y sus estados energéticos o su clasificación.....	107
Otra clasificación del agua en el suelo según sus diferentes estados de energía y contenido de humedad:.....	117
Agua gravitacional:.....	117
Punto del agua a capacidad de campo llamado usualmente como capacidad de campo (CC):.....	117
Punto del agua a marchitez permanente (PMP): .....	119
Rango del agua en el suelo del agua disponible:.....	120
Rango del agua en el suelo del agua NO disponible:.....	124
Procedimiento .....	134
1- Porosidad total del suelo .....	134

**CC BY-NC-ND 4.0**

2- Relación de vacíos .....	142
3- Porosidad de aireación del suelo.....	143
Procedimiento .....	144
Preguntas.....	146
Determinación del límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, índice de flujo, índice líquido, el punto adhesivo del suelo y el límite de contracción.....	147
Objetivo.....	147
Introducción.....	147
Consistencia del suelo .....	147
El método de clasificación de la American Society for Testing Materials (ASTM) .....	155
Utilización práctica de los Límites de Atterberg .....	160
Índice de plasticidad: .....	160
Significado práctico de las constantes de Atterberg .....	163
Límite inferior de plasticidad o límite plástico o límite de fragmentación de varillas rodantes (LP).....	165
Materiales.....	165
Procedimiento .....	165
Límite superior de plasticidad o límite plástico o límite líquido (LL) .....	167
Materiales.....	168
Procedimiento método estándar para estimar el límite líquido.....	168
Procedimiento método simplificado para estimar el límite líquido .....	170
Procedimiento método de un solo punto para estimar el límite líquido .....	171
Punto adhesivo.....	172

Actividad de las arcillas (A) .....	176
Comportamiento del suelo .....	177
Índice de dureza.....	177
Tipo de Arcillas.....	178
Potencial de cambio de volumen .....	178
Índice de consistencia (Ic).....	178
Índice de tenacidad.....	184
Sensitividad .....	184
Índice de Compresibilidad o Índice de Compresión.....	187
Índice de cohesión.....	187
Preguntas.....	195
Bibliografía.....	197

## Índice de Figuras

Figura 1: Posición geográfica de los diferentes tipos de suelos .....	18
Figura 2: Estructura y partículas de la textura general del suelo.....	19
Figura 3: Agregados del suelo que forman la estructura del suelo y su forma de determinarlos.....	20
Figura 4: Estructura migajosa .....	22
Figura 5: Ejemplo 2 de Estructura migajosa .....	23
Figura 6: Estructura granular .....	24
Figura 7: Ejemplo 2 de Estructura granular .....	25
Figura 8: Estructura bloques angulares .....	26
Figura 9: Ejemplo 2 de Estructura Bloques Angulares .....	26
Figura 10: Estructura bloques subangulares .....	27
Figura 11: Ejemplo 2 de Estructura Bloques Subangulares .....	28
Figura 12: Ejemplo de Estructura prismática.....	29
Figura 13: Ejemplos 2 de Estructura Prismática.....	30
Figura 14: Ejemplo 3 de Estructura Prismática.....	31
Figura 15: Ejemplo 4 de Estructura Prismática.....	32
Figura 16: Estructura columnar.....	33
Figura 17: Ejemplo 2 de Estructura Columnar .....	34
Figura 18: Estructura laminar .....	35
Figura 19: Falta de estructura por suelo suelto .....	36
Figura 20: Ejemplo de no estructura por suelo suelta .....	37

**CC BY-NC-ND 4.0**

<b>Figura 21: Falta de estructura por suelo masivo .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 22: Ejemplo de no estructura por suelo suelta .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 23: Estructura fibrosa.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 24: Estructura escamosa .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 25: Descripción micro morfológica de estructura del suelo .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 26: Descripción de participación de las raíces en la estructura del suelo .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 27: Interpretación micro morfológica de la estructura del suelo.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 28: Clase de estructura granular .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 29: Clase de estructura de bloques angulares y subangulares.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 30: Clase de estructura prismática y columnar.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 31: Clase de estructura laminar.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 32: Clase de estructura cuneiforme .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 33: Estimación del grado de estructura .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 34: Pesado del picnómetro en seco y vacío .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 35: Incorporación del suelo dentro del picnómetro.....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 36: Pesado del picnómetro junto con el suelo .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 37: Arrastre de partículas de suelo hacia el fondo del picnómetro con agua destilada .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 38: Calentado hasta ebullición del agua destilada y suelo que se encuentra dentro del picnómetro.....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 39: Agua destilada y suelo que se encuentra dentro del picnómetro en proceso de enfriamiento .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 40: Llenado con agua destilada con una piseta hasta el punto de calibración... </b>	<b>65</b>

**CC BY-NC-ND 4.0**

<b>Figura 41: Picnómetro lleno hasta el punto de calibración .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 42: Pesado del picnómetro lleno hasta el punto de calibración.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 43: Medición de la temperatura del picnómetro lleno .....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 44: Pesado del picnómetro con el agua destilada .....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 45: Medida de conductividad hidráulica permeámetro de carga constante .....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 46: Permeámetro de carga variable con área transversal de la muestra diferente al área transversal del tubo que contiene la altura del agua sobre la muestra.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 47: Permeámetro de carga variable con área transversal de la muestra igual al área transversal del tubo que contiene la altura del agua sobre la muestra.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 48: Curva que representa la lámina de infiltración acumulada con sus tres secciones del comportamiento .....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 49: Curva que representa la lámina de infiltración acumulada con sus tres secciones del comportamiento .....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 50: Curva que representa la lámina de infiltración acumulada con sus tres secciones del comportamiento .....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 51: Curva que representa la lámina de infiltración acumulada con sus tres secciones del comportamiento .....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 52: Curva que representa la lámina de infiltración acumulada con sus tres secciones del comportamiento .....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 53: Elementos de las fases y del volumen de suelo .....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 54: Curva Densidad aparente del suelo en sus cualidades y sus valores.....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 55: Toma de muestra para estimar la densidad aparente .....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 56: Toma de muestra para estimar la densidad aparente .....</b>	<b>105</b>

<b>Figura 57: Valores de densidad aparente del suelo relacionados con clases de suelos y propiedades físicas del suelo.....</b>	<b>107</b>
<b>Figura 58: Agua almacenada en el suelo desde el balance del ciclo hidrológico del agua en el suelo.....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 59: Porcentaje de peso de suelo ocupado por agua y ejemplo de cálculo.....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 60: Porcentaje de volumen de suelo ocupado por agua y ejemplo de cálculo .</b>	<b>109</b>
<b>Figura 61: Estatus de humedad del agua en el suelo en valores energéticos .....</b>	<b>110</b>
<b>Figura 62: Determinación de la humedad del suelo por medio del tacto I .....</b>	<b>113</b>
<b>Figura 63: Determinación de la humedad del suelo por medio del tacto II .....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 64: Determinación de la humedad del suelo por medio del tacto III .....</b>	<b>115</b>
<b>Figura 65: Determinación de la humedad del suelo por medio del tacto IV .....</b>	<b>116</b>
<b>Figura 66: Representación gráfica del agua gravitacional en el suelo .....</b>	<b>117</b>
<b>Figura 67: Representación gráfica del punto del agua a capacidad de campo en el suelo .....</b>	<b>119</b>
<b>Figura 68: Representación gráfica del punto del agua a marchitez permanente en el suelo .....</b>	<b>120</b>
<b>Figura 69: Representación gráfica del rango del agua disponible en el suelo .....</b>	<b>122</b>
<b>Figura 70: Representación gráfica con valores de CCg y PMPg del rango del agua disponible en el suelo .....</b>	<b>123</b>
<b>Figura 71: Variación del contenido de humedad del suelo según la textura .....</b>	<b>124</b>
<b>Figura 72: Representación gráfica de los puntos y rangos de agua disponibles y no disponibles para la vida en el suelo.....</b>	<b>126</b>
<b>Figura 73: Agua del suelo en sus características y comportamiento .....</b>	<b>127</b>

**CC BY-NC-ND 4.0**

<b>Figura 74: Descripción detallada de la asociación entre las regiones de respuesta del cultivo y el suelo y la disponibilidad de humedad del suelo. Fuente: Rhoads y Yonts, 1984.....</b>	<b>128</b>
<b>Figura 75: Representación gráfica del agua en el suelo desde el estado de completamente seco hasta el estado de saturación donde muestra que a pesar de haber espacio poroso libre de agua aún sigue drenando rápido hasta llega a CC. ....</b>	<b>129</b>
<b>Figura 76: Representación gráfica del agua en el suelo desde el estado de completamente seco hasta el estado de saturación .....</b>	<b>130</b>
<b>Figura 77: Resumen de propiedades físicas del suelo respecto a los contenidos de humedad o de agua para algunas texturas .....</b>	<b>131</b>
<b>Figura 78: Estados de la humedad del suelo desde el punto de vista cualitativo del comportamiento de suelo con diferentes cantidades de agua.....</b>	<b>132</b>
<b>Figura 79: Estados de la humedad del suelo desde el punto de vista cualitativo del comportamiento de suelo con diferentes cantidades de agua y la actividad de la consistencia del suelo con respecto a la cohesión y la adhesión .....</b>	<b>133</b>
<b>Figura 80: Índice plástico e índice de contracción .....</b>	<b>134</b>
<b>Figura 81: Esquema para la estimación de la porosidad existente en el suelo .....</b>	<b>135</b>
<b>Figura 82: Definición de los poros según su tamaño .....</b>	<b>136</b>
<b>Figura 83: Condición buena, moderada y pobre porosidad (de izquierda a derecha)..</b>	<b>137</b>
<b>Figura 84: Características visuales de pobre, moderada y buena condición de porosidad con respecto a la macroporosidad .....</b>	<b>137</b>
<b>Figura 85: Porosidad tanto de poros grandes como de poros pequeños .....</b>	<b>138</b>

<b>Figura 86: Diferentes condiciones de porosidad del suelo con respecto a la estructura del suelo .....</b>	<b>139</b>
<b>Figura 87: Humedad del suelo y el estado y comportamiento de las formas de consistencia del mismo .....</b>	<b>151</b>
<b>Figura 88: Límite de Atterberg y el estado del suelo en términos de consistencia .....</b>	<b>153</b>
<b>Figura 89: Límite de Atterberg y el estado del suelo en términos de consistencia con respecto al máximo porcentaje de fuerza aplicada .....</b>	<b>154</b>
<b>Figura 90: Gráfico de plasticidad (Casagrande, 1932).....</b>	<b>156</b>
<b>Figura 91: Horizontes de los suelos que deben de ser estudiados cada uno según presentan sus características .....</b>	<b>157</b>
<b>Figura 92: Clasificación de los suelos según Carta de Plasticidad de Casagran según tipos de los materiales .....</b>	<b>158</b>
<b>Figura 93: Clasificación del contenido de los finos.....</b>	<b>159</b>
<b>Figura 94: Relación entre el potencial de hinchamiento y el índice de plasticidad .....</b>	<b>163</b>
<b>Figura 95: Límite plástico, humedad por debajo de la que no es posible hacer bastoncillos de 3,0 mm de diámetro .....</b>	<b>165</b>
<b>Figura 96: Procedimiento de determinación del límite inferior de plasticidad.....</b>	<b>166</b>
<b>Figura 97: Muestra de suelo con prueba del límite plástico o límite inferior de plasticidad.....</b>	<b>166</b>
<b>Figura 98: Fragmentos para determinación de humedad .....</b>	<b>167</b>
<b>Figura 99: Fragmentos para determinación de humedad .....</b>	<b>167</b>
<b>Figura 100: Muestra de suelo en estado semilíquido .....</b>	<b>168</b>
<b>Figura 101: Suelo nivelado en el aparato de Casagrande .....</b>	<b>169</b>

Figura 102: Suelo nivelado y corte definido en el aparato de Casagrande .....	169
Figura 103: Suelo en contacto de 13 mm en el aparato de Casagrande .....	170
Figura 104: Relación entre el grado de expansión y el límite líquido .....	172
Figura 105: Deslizamiento de un suelo en la estimación del límite líquido .....	174
Figura 106: Aparato de Casagrande y punto donde se registra el número de impactos .....	175
Figura 107: Ejemplo de hoja semi-logarítmica para graficar el número de golpes en el eje logarítmico y la humedad en el eje milimétrico .....	180
Figura 108: Ejemplo de confección de un gráfico para límite líquido o límite superior de plasticidad según datos del cuadro 16.....	181
Figura 109: Ejemplo de confección de un gráfico para límite líquido o límite superior de plasticidad, límite plástico e índice de plasticidad .....	182
Figura 110: Patrón para confección de un gráfico para límite líquido o límite superior de plasticidad, límite plástico e índice de plasticidad .....	183
Figura 111: Ejemplo de Relación entre el índice de liquidez y la sensibilidad.....	186
Figura 112: Relación entre la resistencia al corte no-drenada, el número de golpes N de penetración estándar SPT y el índice plástico para arcillas .....	188
Figura 113: Ejemplo de diferenciación entre limos y arcillas que utiliza el índice de plasticidad y el límite plástico (índice de cohesión).....	188
Figura 114: Nomograma del Procedimiento método simplificado .....	190
Figura 115: Contracción del suelo por pérdida de humedad.....	191
Figura 116: Ejemplo de molde de lámina galvanizada de 2 * 2 * 10 cm .....	192
Figura 117: Definición del ángulo residual.....	196

## Índice de Cuadros

Cuadro 1: Valores medios para clasificar la clase estructural de las partículas del suelo, junto al tipo de estructura a la que corresponda y al tamaño de los agregados existentes .....	59
Cuadro 2: Densidad real de partículas de diferentes constituyentes del suelo (g/cm <sup>3</sup> ).	62
Cuadro 3: Densidades reales de partículas de diferentes horizontes de los suelos .....	62
Cuadro 4: Densidad del agua a temperaturas de los 15 a los 35 °C de rango .....	69
Cuadro 5: Densidad del agua en el rango de temperaturas de 0 a los 100 °C .....	70
Cuadro 6: Tabulación y cálculo de la densidad real de partículas .....	71
Cuadro 7: Valores comparativos de conductividad hidráulica del suelo (mm/h cm/h y m/d) .....	82
Cuadro 8: Valores de conductividad hidráulica para diferentes tipos de sedimentos ...	82
Cuadro 9: Valores de conductividad hidráulica para diferentes texturas del suelo .....	83
Cuadro 10: Valores de densidad aparente de diferentes horizontes del suelo .....	98
Cuadro 11: Variación de los valores de densidad aparente en Costa Rica de diferentes órdenes y profundidades del suelo .....	100
Cuadro 12: Valores de densidad .....	106
Cuadro 13: Valores de índice plástico según diferentes texturas del suelo y tipos de minerales de arcilla .....	162
Cuadro 14:: Determinar el contenido de humedad del suelo de las muestras que provienen del aparato de Casagrande .....	173

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

<b>Cuadro 15: Comportamiento del suelo según el índice líquido .....</b>	<b>177</b>
<b>Cuadro 16:: Actividad de las arcillas “A” según tipo .....</b>	<b>178</b>
<b>Cuadro 17: Ejemplo de confección de cálculos para determinar el límite superior de plasticidad.....</b>	<b>181</b>
<b>Cuadro 18: Valores para la relación <math>(N / 25)^{0,121}</math> .....</b>	<b>184</b>
<b>Cuadro 19: Correlaciones empíricas entre el índice de compresibilidad (Cc) y los límites de Atterberg .....</b>	<b>189</b>

**CC BY-NC-ND 4.0**

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)**

# Estructura del suelo

## Objetivos

Entender y Determinar la estructura del suelo expresada en su clase, desarrollo y tamaño

## Introducción

En el suelo hay partículas de distintos tamaños, desde menores a 2 micras y hasta 2 mm desde el punto de vista para las plantas comprendiendo la textura que son las arcillas, los limos, las arenas y la materia orgánica (principalmente la humificada) y que es tan común no observarlas en los suelos por separado sino que aparecen normalmente mezcladas, siguiendo diferentes procesos en los que predominan adhesión, la cohesión y la floculación de los coloides inorgánicos y orgánicos junto con agentes sementantes, lleva consigo la inclusión de los grupos de partículas unidas que tienen un mayor tamaño llamados agregados, peds o terrones. Todo ello genera unas formas con tamaños, geometría y desarrollo o dureza diferentes que reciben nombres específicos para facilitar la comprensión y simplificación de las descripciones que es a lo cual se le llama la estructura del suelo.

No obstante, existe una estructura general (como la estructura general que manifiesta un edificio) que presentan cada uno de los suelos como se muestra en las figuras 1 y 2 y 3 la cual depende de su posición en el relieve donde se generan todos los procesos tanto orgánicos como inorgánicos utilizando todo lo existente en el mismo suelo juntamente con el clima para el sostenimiento de la vida tanto de manera externa y en la superficie del suelo como interna dentro del suelo.

La estructura del suelo (Figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45 y el Cuadro 1) es muy importante para regular la aireación del suelo, la temperatura del suelo, la infiltración y erosión del suelo, el movimiento y almacenamiento del agua, el suministro de nutrientes, la penetración y desarrollo de las raíces y la facilidad de trabajar el suelo.

No obstante, las propiedades físicas y estas regulaciones mencionadas varían conforme varía la estructura del suelo y esta a su vez se ve afectada por varias variables pero una de ellas muy importante es la posición geográfica del suelo en estudio como se observa en la figura 1.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

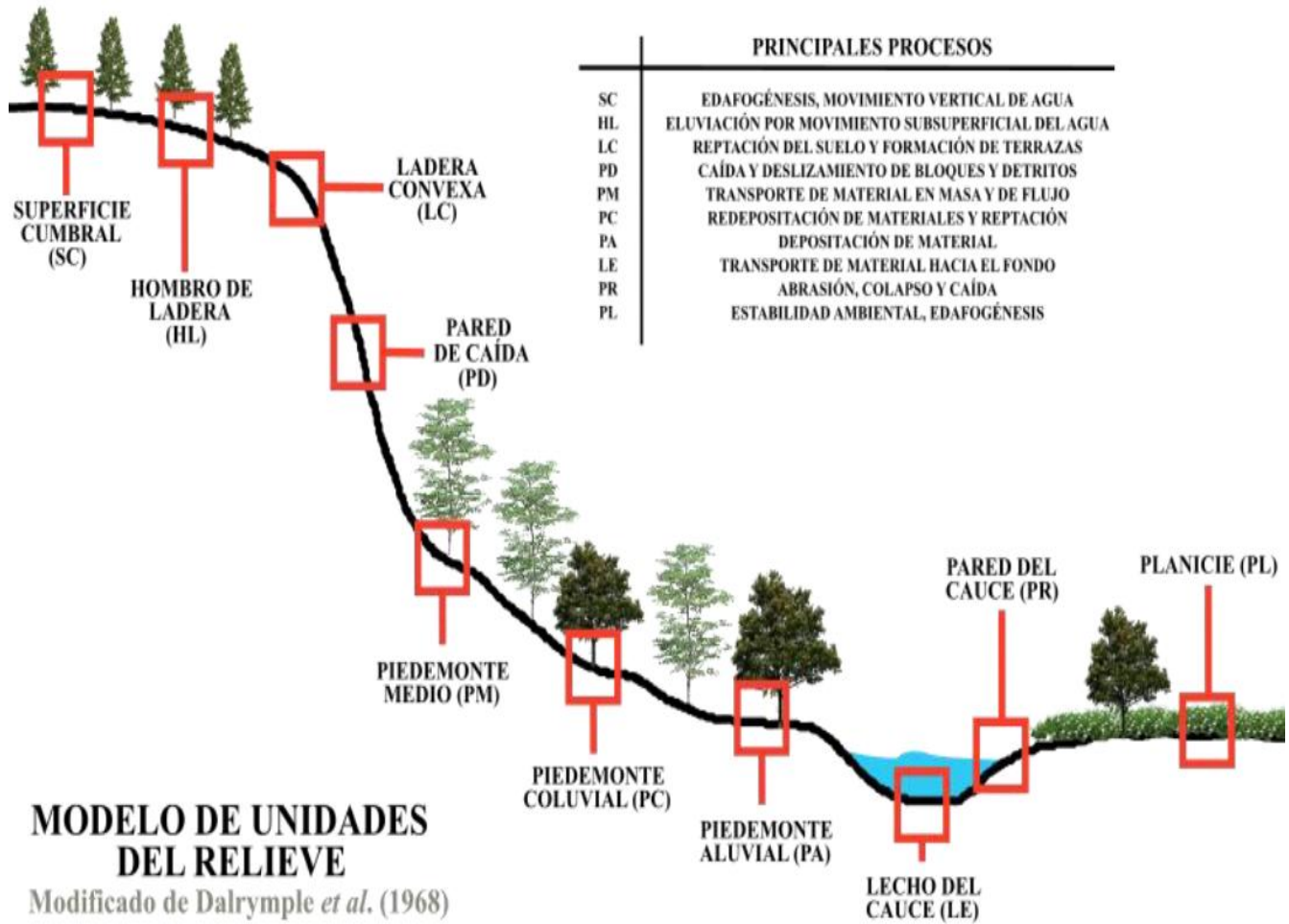


Figura 1: Posición geográfica de los diferentes tipos de suelos  
Tomado de: (Tercer Concurso Mexicano de Evaluación de Suelos, 2020)

**CC BY-NC-ND 4.0**



**Comparación de tamaños arena, limo y arcilla**



Figura 2: Estructura y partículas de la textura general del suelo

Tomado de: (Permacultor Celtibero)

Tomado de: (crs Laboratorio)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Viendo la estructura del suelo con mayor detalle (Figuras 2 y 3) y no de manera tan general, es una propiedad edáfica que diferencia un suelo que tiene estructura de un material geológico la cual no tiene estructura. Cuando las partículas individuales se agrupan, toman el aspecto de partículas mayores y a estos se les denominan **agregados**.



Figura 3: Agregados del suelo que forman la estructura del suelo y su forma de determinarlos  
 Tomado de: (Osorio Rivera, Carrillo Barahona, Haro Altamirano, & Negrete Costales, 2022)  
 Tomado de: (AARHUS UNIVERSITET )

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

La vida en el suelo (Figuras 2, 25 y 26) es posible debido a que las partículas no forman una masa continua, sino que al unirse forman los agregados (agregación o floculación), crean espacios (espacio poroso del suelo) donde muchos de los cuales se comunican entre sí formando los poros, canales, fisuras y huecos. Por medio de estos espacios comunicantes se presenta la transferencia de fluidos de agua y aire, teniendo en ellos el desarrollo de la actividad microbiana y el crecimiento radical.

La estructura del suelo se define como el resultado de la combinación de los componentes primarios arenas, limos y arcillas y otros más grandes de naturaleza mineral junto a componentes orgánicos, los que por acción directa de materiales cementantes, se agregan y se forman los agregados del suelo llamados peds. Por ello, los agregados o unidades estructurales del suelo se definen como el producto de las partículas que se unen de forma natural entre sí para formar unidades secundarias de mayor tamaño que tienen carácter persistente. Entre los materiales cementantes más importantes se encuentran los minerales arcillosos, la materia orgánica coloidal, los óxidos de hierro y aluminio, los carbonatos y otros.

En un estudio de estructura del suelo para su descripción se debe de considerar:

- i. Forma de los agregados o tipo de estructura
- ii. Tamaño de la estructura o clase de estructura
- iii. Grado de desarrollo de la estructura

### **Forma de los agregados o tipo de estructura**

El tipo de estructura o forma de los agregados se refiere a la forma y ordenamiento de las partículas primarias y se clasifican en:

1.1 **Migajosa** (Figuras 4 y 5): agregados porosos de forma redondeada (no se ajustan a los agregados vecinos) que a veces varía hasta ser de grano suelto. Procedente de la floculación de los coloides minerales y orgánicos y mantiene el aspecto de los grumos formados. Sus agregados son pequeños, muy porosos y redondeados, lo que hace que no encajen unos con otros y dejen huecos muy favorables para la penetración de las raíces. Su pequeño tamaño hace que el contacto entre suelo y semilla sea bueno y favorezca su germinación al suministrarle el agua necesaria. Es propia de los horizontes A, ricos en materia orgánica.

Sus agregados son pequeños, muy porosos y redondeados (gran porosidad), por lo que la penetración de las raíces se ve muy favorecida. También beneficia a la germinación de las semillas, pues opone poca resistencia a la germinación. Representa al grupo de las estructuras que se conocen como construidas.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

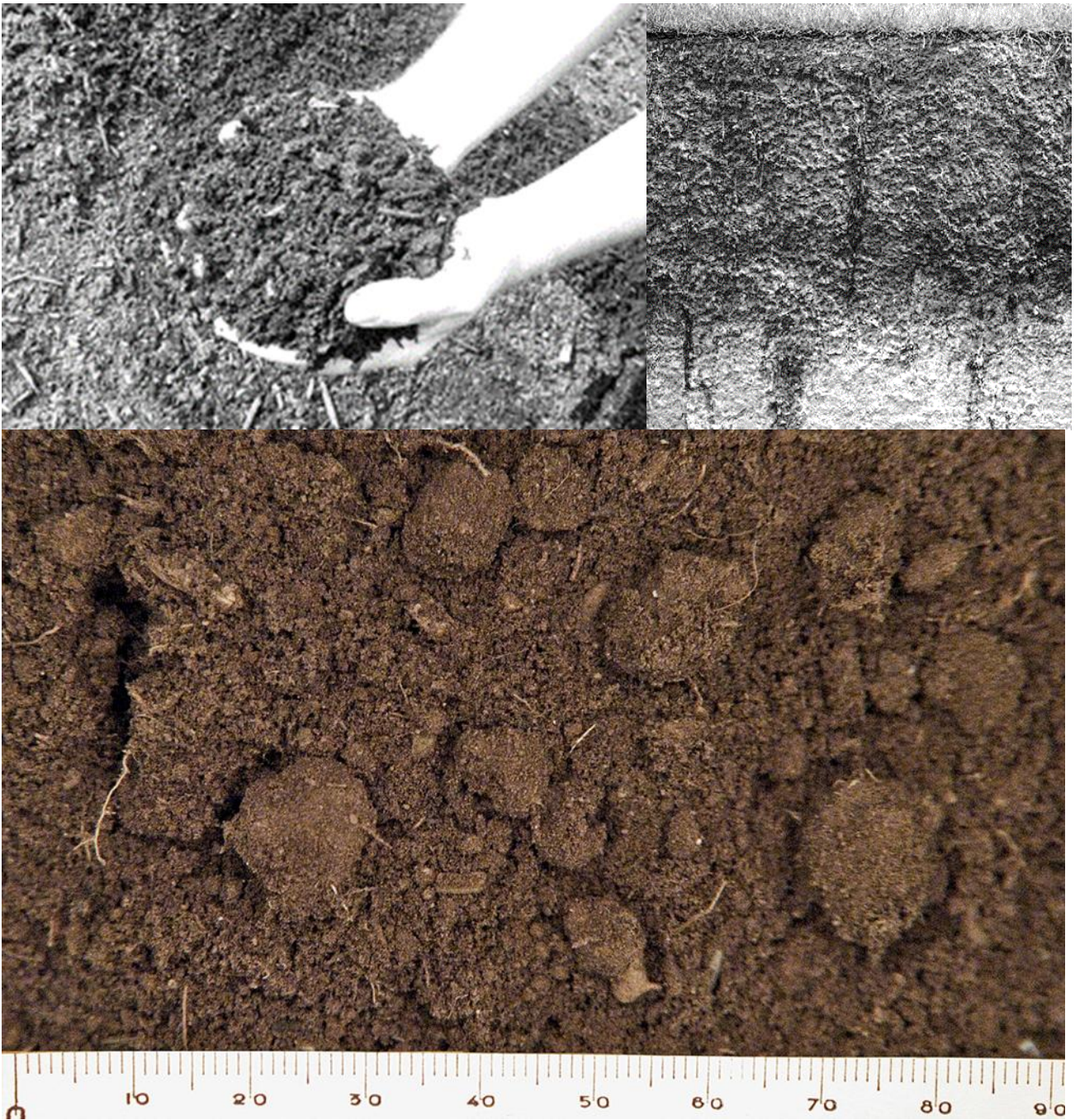


Figura 4: Estructura migajosa

Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

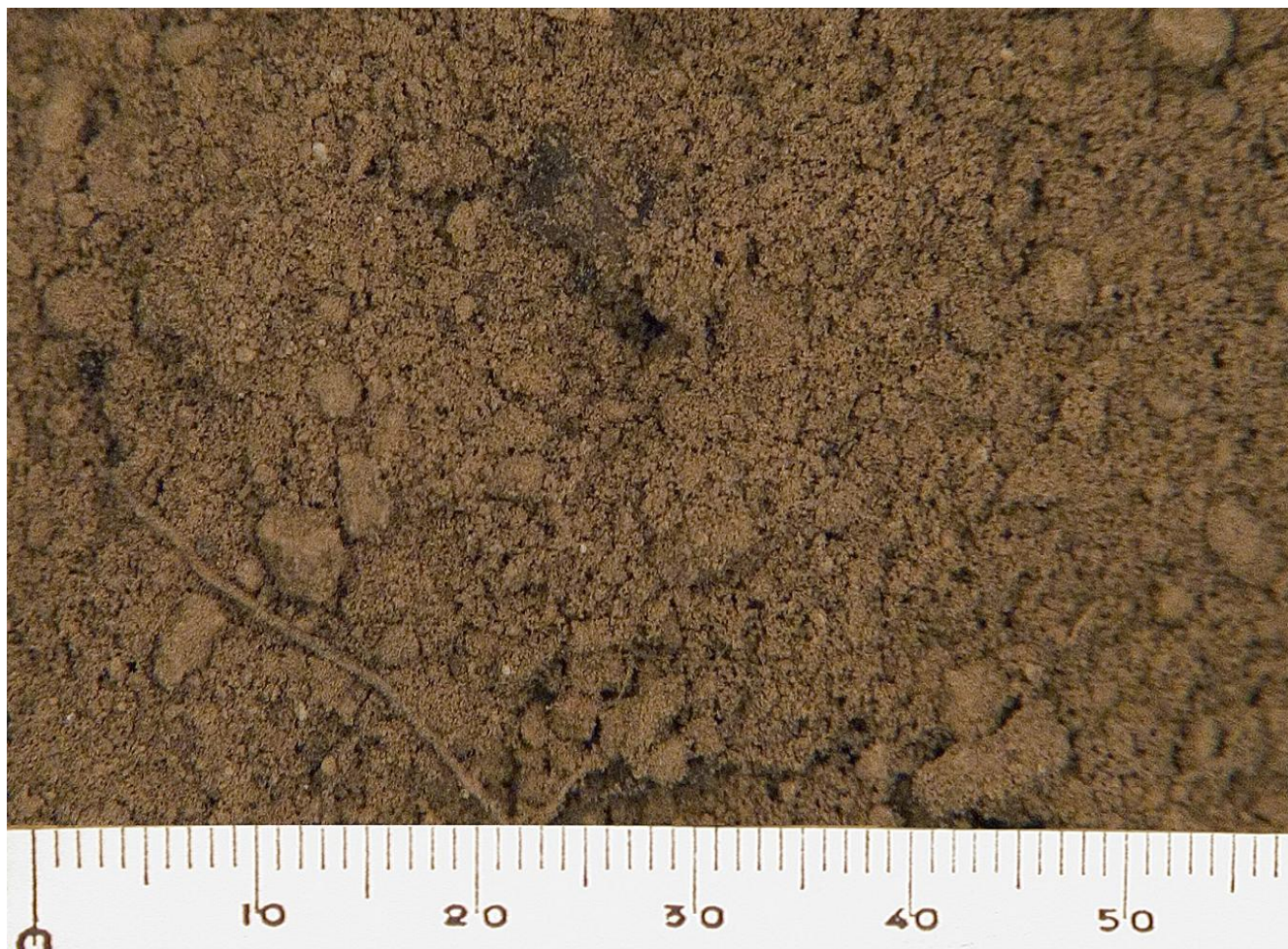


Figura 5: Ejemplo 2 de Estructura migajosa

Tomado de: (Osorio Rivera, Haro Altamirano, Carrillo Barahona, & Negrete Costales, 2022)

Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

1.2 **Granular** (Figuras 6 y 7): agregados sin apenas poros en su interior, de forma redondeada (no se ajustan a los agregados vecinos). Esferoides o poliedros que tienen superficies curvilíneas o irregulares, que no son moldes de las caras de los agregados vecinos.

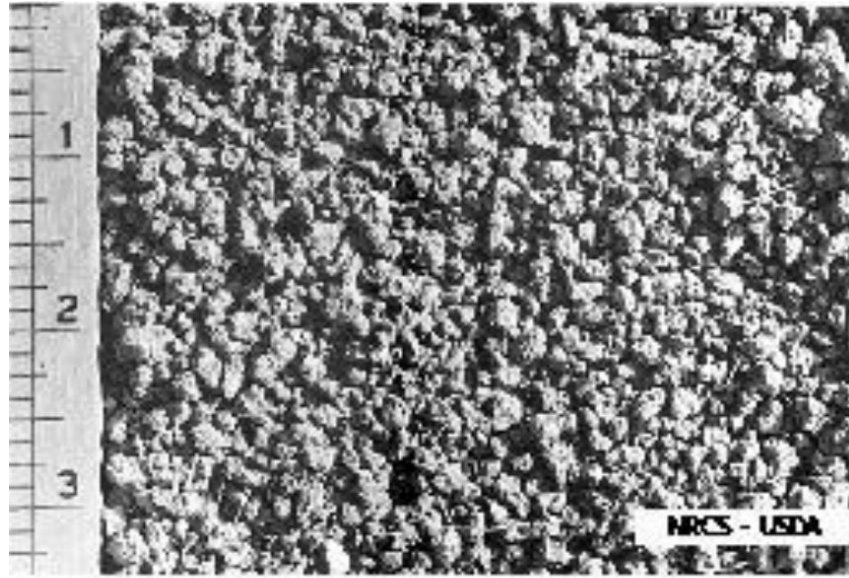
Es similar a la migajosa pero con los agregados compactos.

Aparece cuando los agregados son poco o nada porosos por el predominio de la arcilla sobre la materia orgánica en el proceso de floculación. Es propia de horizontes A de suelos pobres en materia orgánica.

Se asemeja a las migas de una galleta, normalmente con un diámetro inferior a 0,5 cm. Suele encontrarse en horizontes más superficiales donde han crecido raíces

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)



Fine and Medium Granular Structure



granular



granular

bloques subangulares

Figura 6: Estructura granular

Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS) y de (Borselle, 2024 / 2025)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

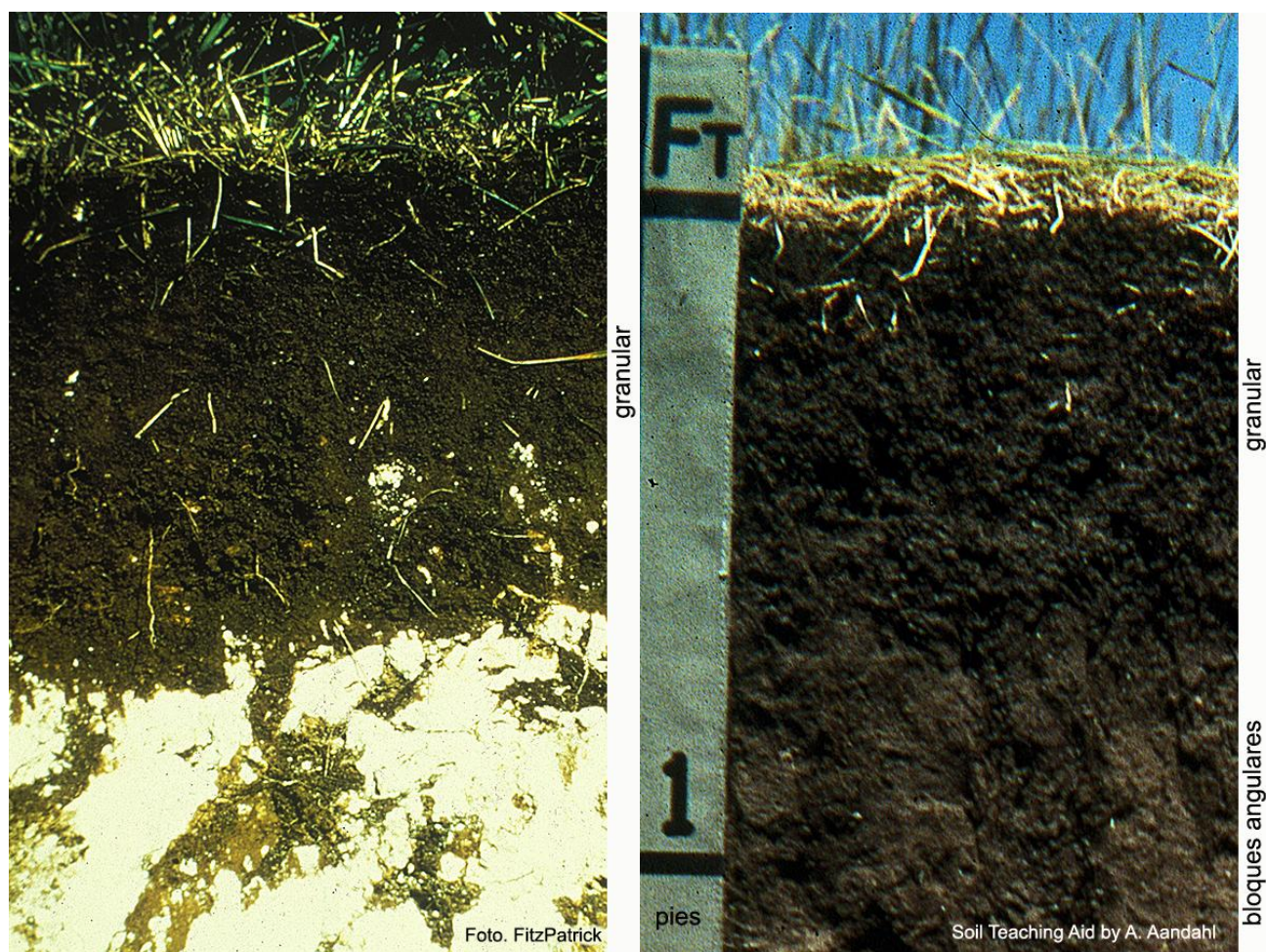


Figura 7: Ejemplo 2 de Estructura granular  
Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

1.3 **Angular o en bloques angulares** (Figuras 8 y 9): Bloques o poliedros casi equidimensionales, con superficies planas o ligeramente redondeadas, que son moldes de caras de los agregados vecinos, con caras intersecando a ángulos relativamente agudos.

También se definen como agregados de forma poliédrica, con superficies planas, de aristas vivas y con vértices. Las caras del agregado se ajustan muy bien a las de los agregados vecinos.

Típicamente en los horizontes arcillosos, como son los horizonte B.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)



Figura 8: Estructura bloques angulares



Figura 9: Ejemplo 2 de Estructura Bloques Angulares

Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

- 1.4 **Subangular o en bloques subangulares** (Figuras 10 y 11): Bloques o poliedros casi equidimensionales, con superficies planas o ligeramente redondeadas, que son moldes de caras de los agregados vecinos, con las caras intersectando a ángulos redondeados

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

También se definen como agregados de forma poliédrica, con superficies no muy planas, de aristas o redondeadas. Las caras del agregado se ajustan moderadamente a las de los agregados vecinos.

Es propia de horizontes A muy pobres en materia orgánica y de la parte superior de los horizontes B.

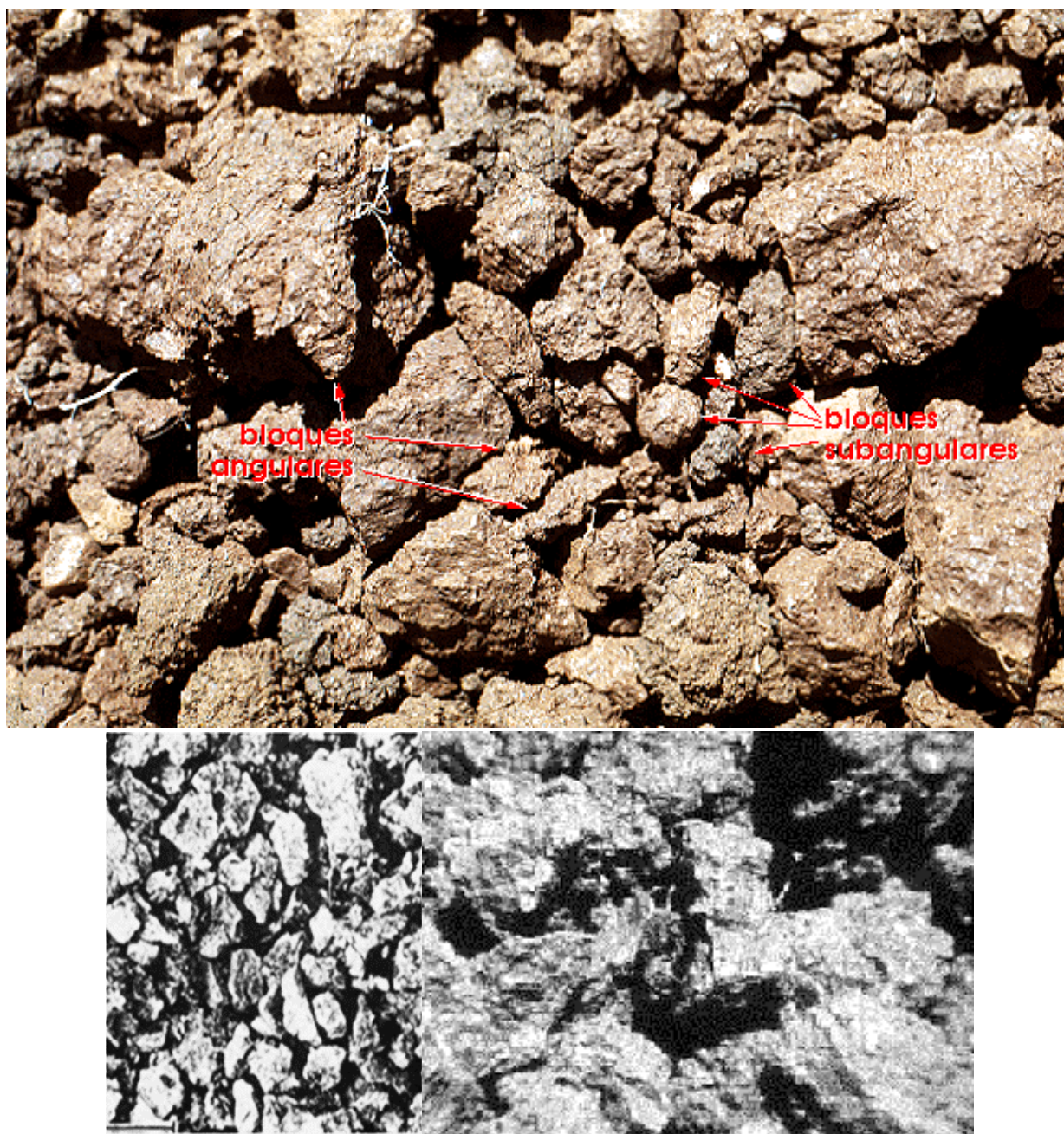


Figura 10: Estructura bloques subangulares  
Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

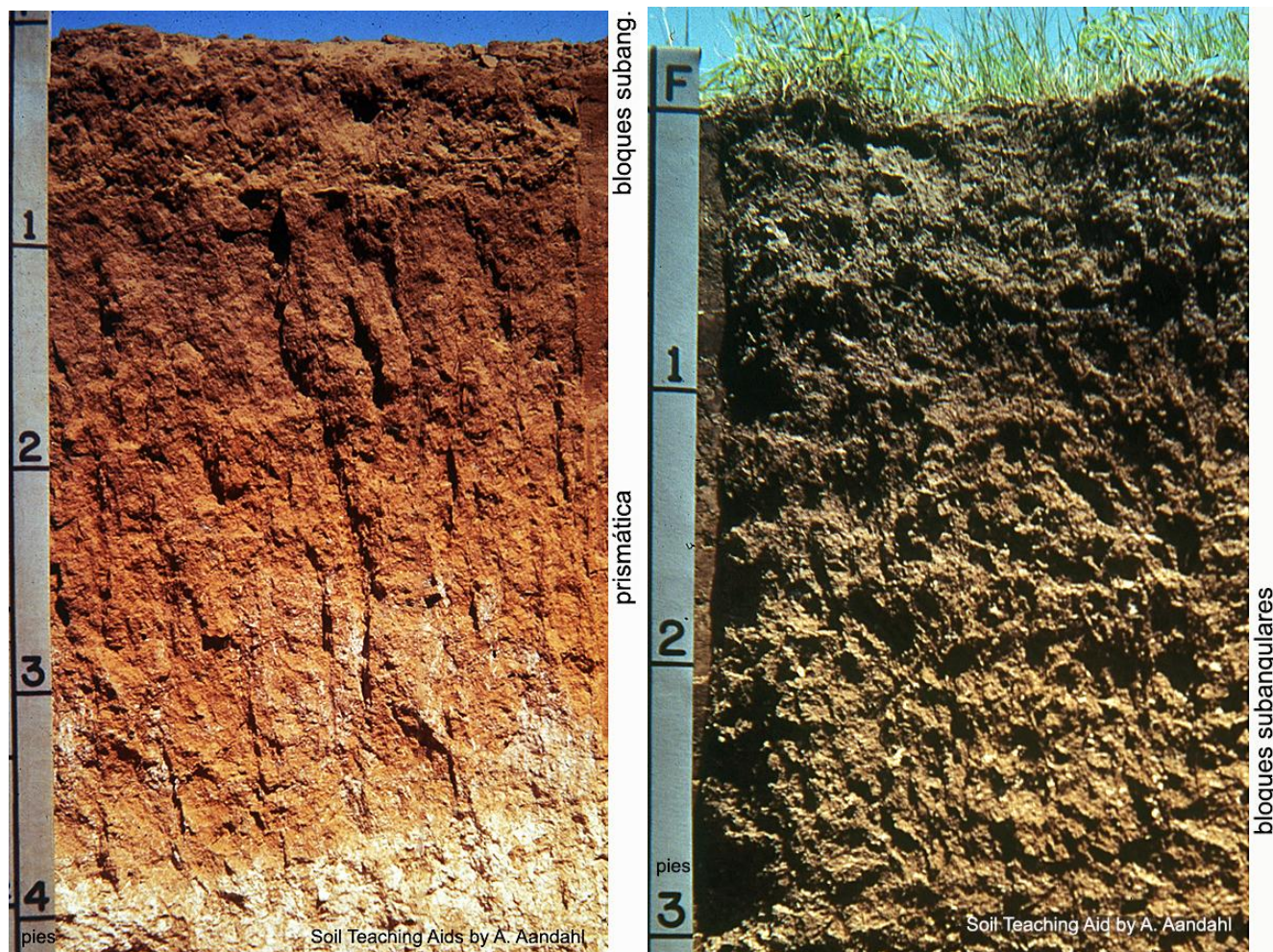


Figura 11: Ejemplo 2 de Estructura Bloques Subangulares  
Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

1.5 **Prismática** (Figuras 12, 13, 14 y 15): presenta agregados con caras definidas y es a través de ellas que se realiza el contacto, rompiéndose los mismos por estas caras; los agregados son densos y en general menos porosos que los de estructura granular, los bloques se desarrollan en una dirección (vertical) más que en las dos horizontales.

Cuando es muy gruesa constituye una transición a la estructura masiva.

Es propia de los horizontes B muy arcillosos que los hace compactos y se resquebrajan en grandes bloques. Existe una variedad de estructura prismática en la que la base superior del prisma esté inclinada en forma de cuña.

Está asociada a la presencia de arcillas expansibles que generan en el suelo un sistema de grietas verticales cuando se seca, estas grietas se rellenan parcialmente con material

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

caído desde la superficie lo que provoca que al humedecerse, y recuperar el volumen inicial, se produzca una elevación del material forzada por la compresión lateral; este hecho obliga a tomar la forma de cuña que facilita el ascenso.

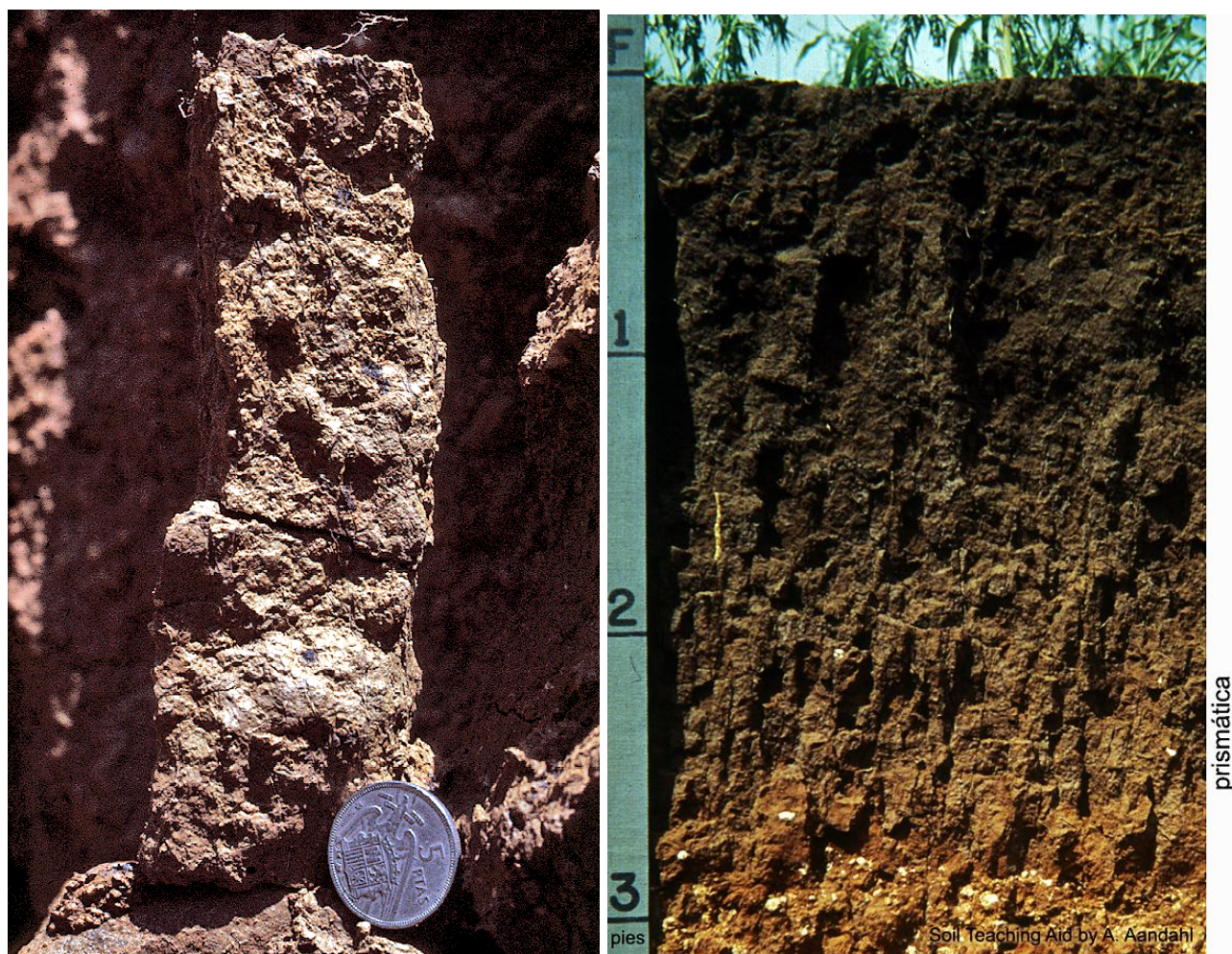


Figura 12: Ejemplo de Estructura prismática  
Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

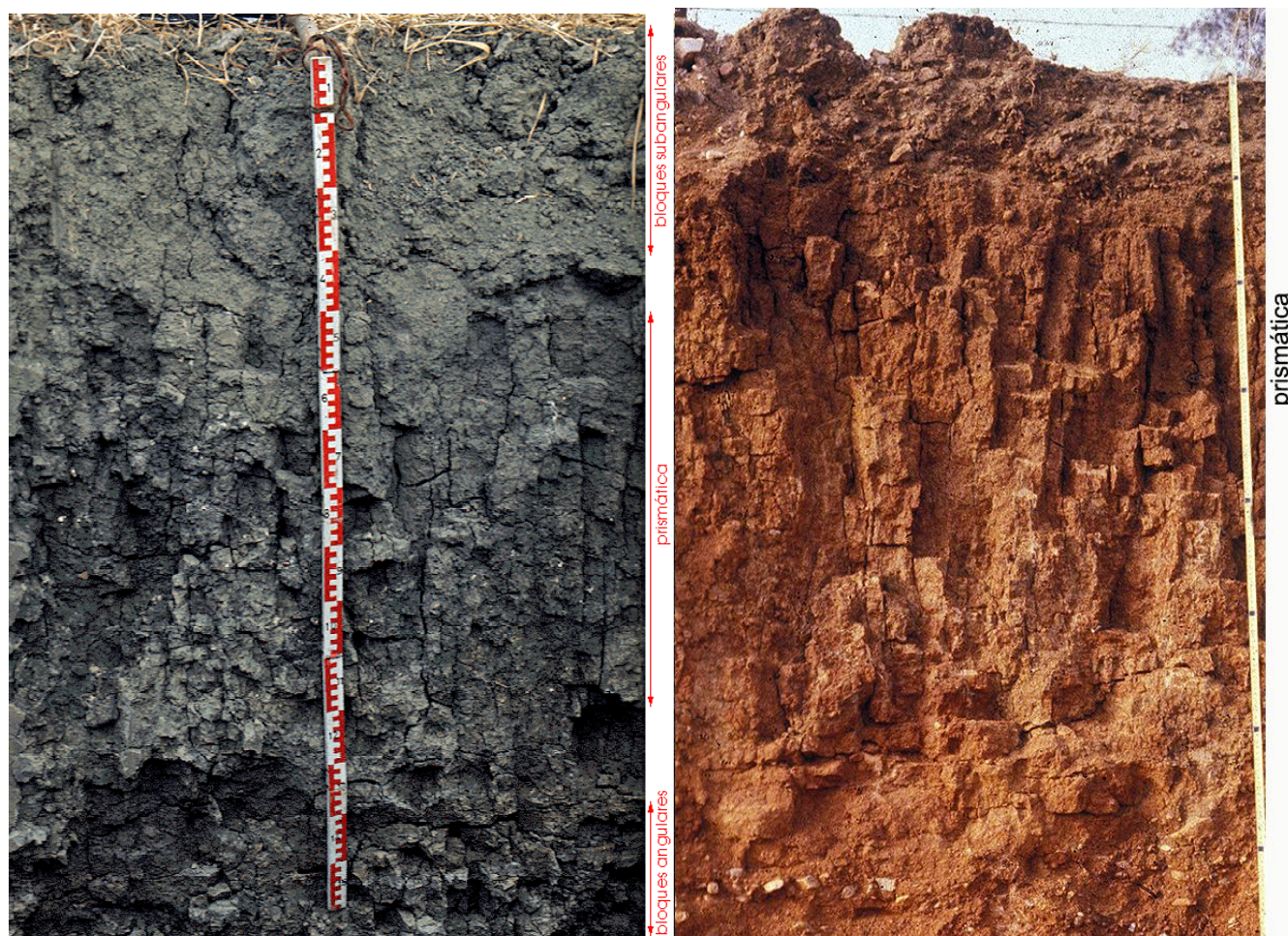


Figura 13: Ejemplos 2 de Estructura Prismática  
Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

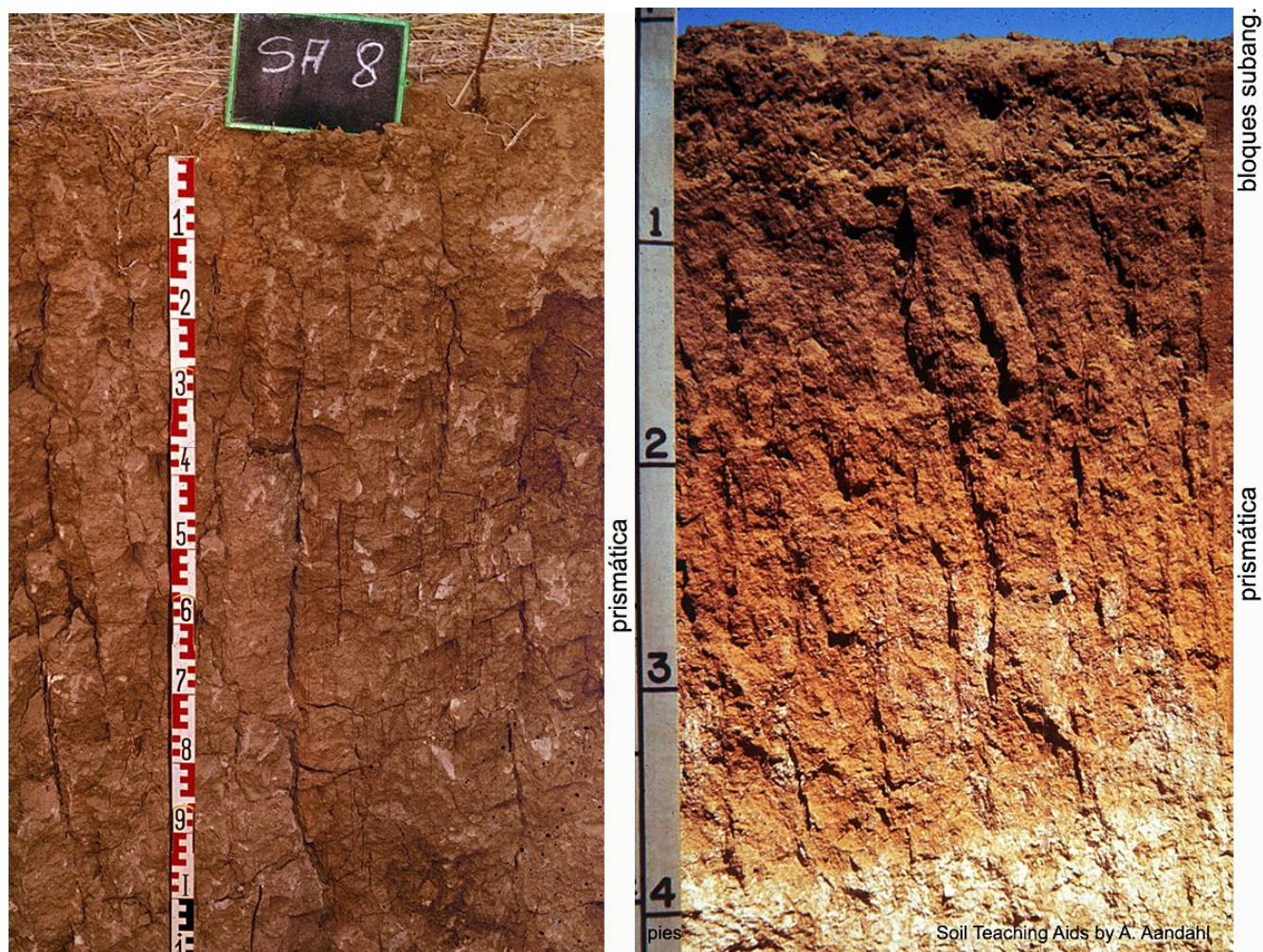
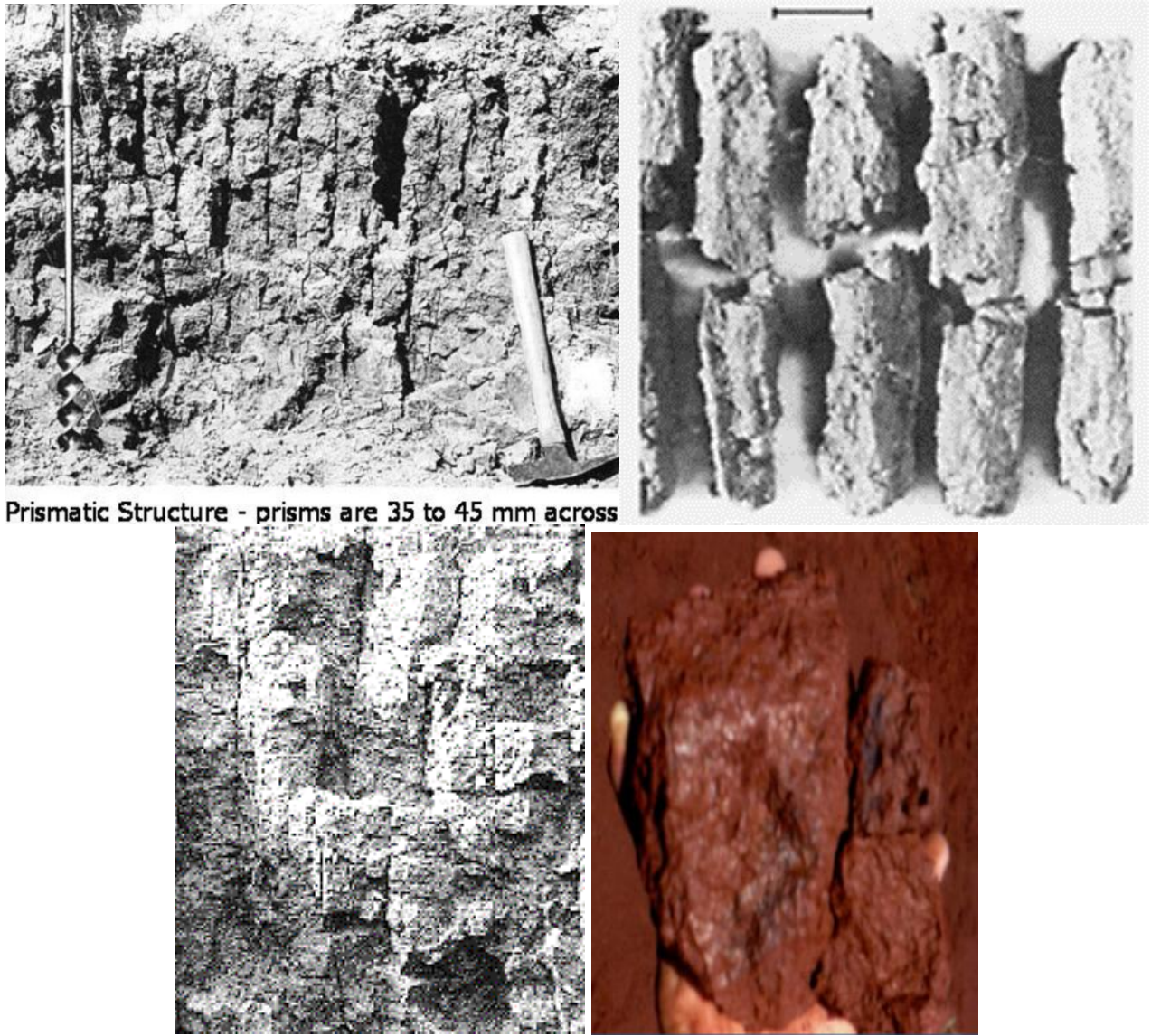


Figura 14: Ejemplo 3 de Estructura Prismática  
Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)



Prismatic Structure - prisms are 35 to 45 mm across

Figura 15: Ejemplo 4 de Estructura Prismática

Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

- 1.6 **Columnar – prismas:** (Figuras 16 y 17): Es otra variedad de estructura prismática que se produce siempre que hay una dispersión fuerte de la arcilla provocada por una alta concentración de sodio.

Las arcillas sódicas al secarse forman una masa muy compacta que se resquebraja en grandes prismas muy duros e impenetrables por el agua; el agua cargada de coloides fluye fundamentalmente por las grietas que quedan entre los agregados y esto hace que las partículas en suspensión erosionen la parte alta de los agregados y le den un aspecto de cúpula.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

En estas condiciones también se dispersa la materia orgánica, por lo que esa suspensión impregna la superficie de los agregados que quedan revestidas de oscuro y se les conoce como columnas enlutadas. Es frecuente que las sales queden impregnando la parte superior y cristalicen al secar, lo que provoca una cubierta blanca.

Es propia de los horizontes “B” de suelos salinos sódicos con su cara superior redondeada: Estructura muy rara.

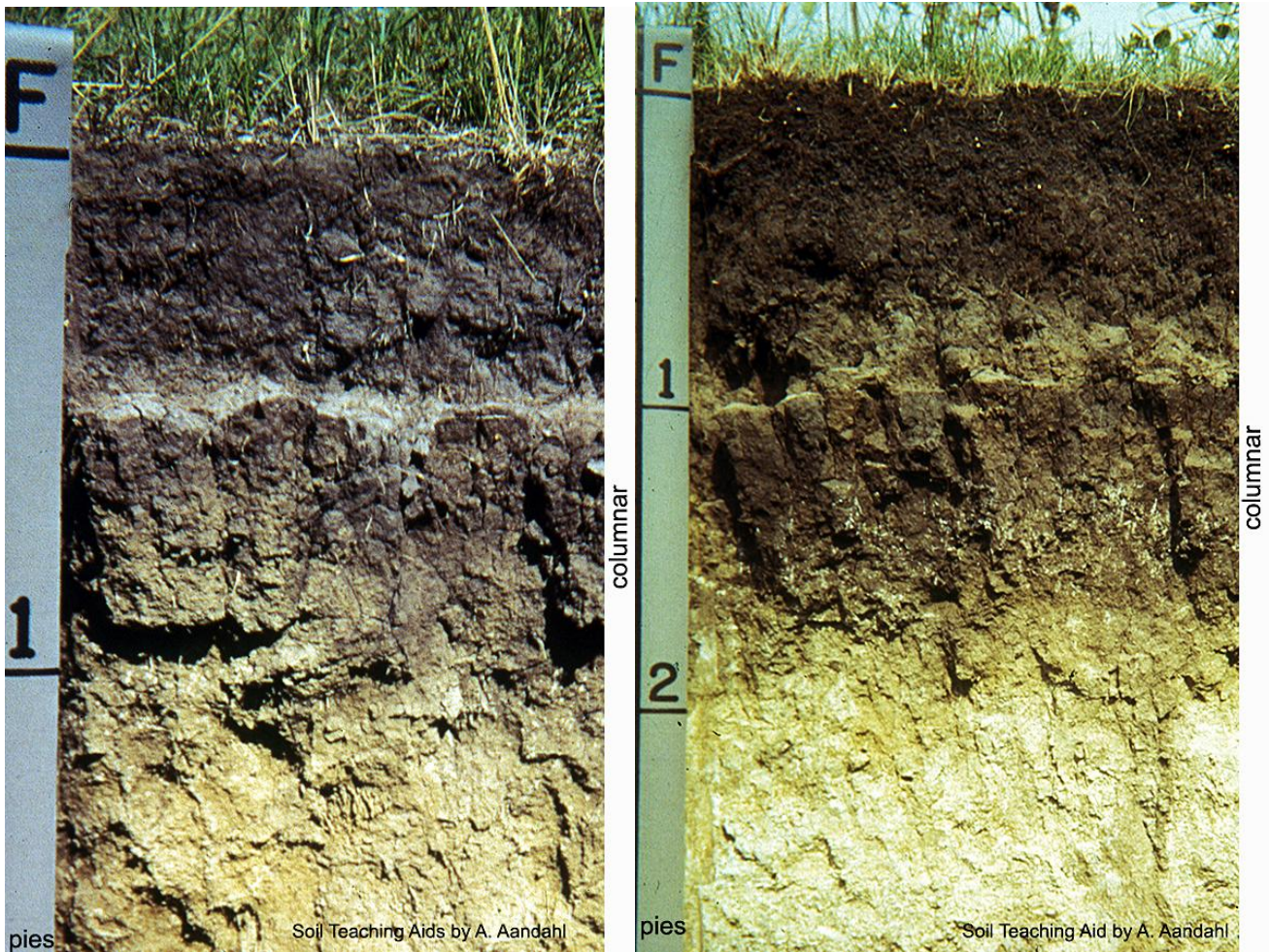


Figura 16: Estructura columnar  
Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

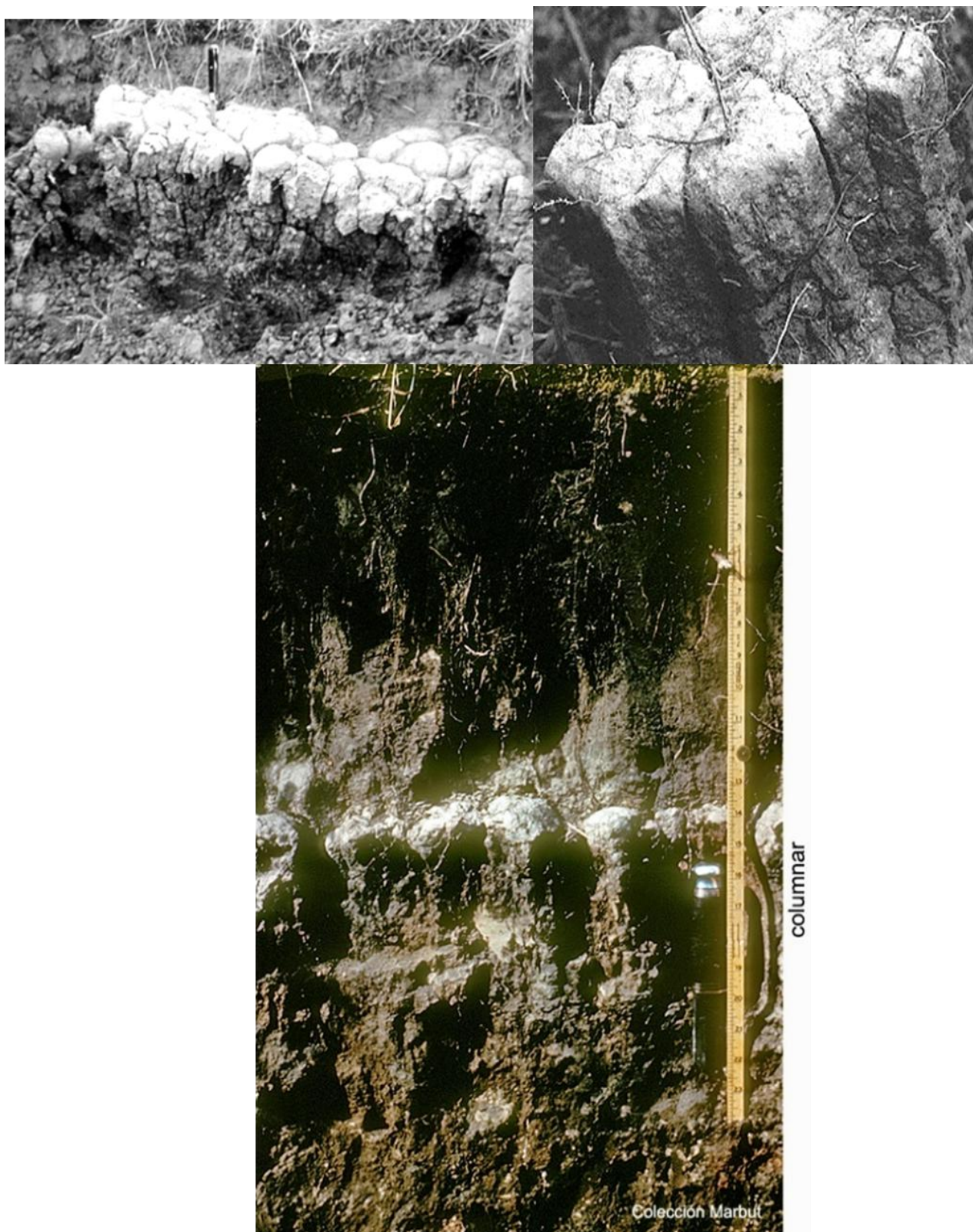


Figura 17: Ejemplo 2 de Estructura Columnar  
Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

- 1.7 **Laminar o capas horizontales:** (Figura 18): Cuando los agregados se desarrollan en dos direcciones horizontales más que en vertical. Típica de los horizontes arenosos, como los horizontes E. También llamada Plana o láminas de suelo finas y planas dispuestas horizontalmente. Normalmente se encuentra en suelo compacto.

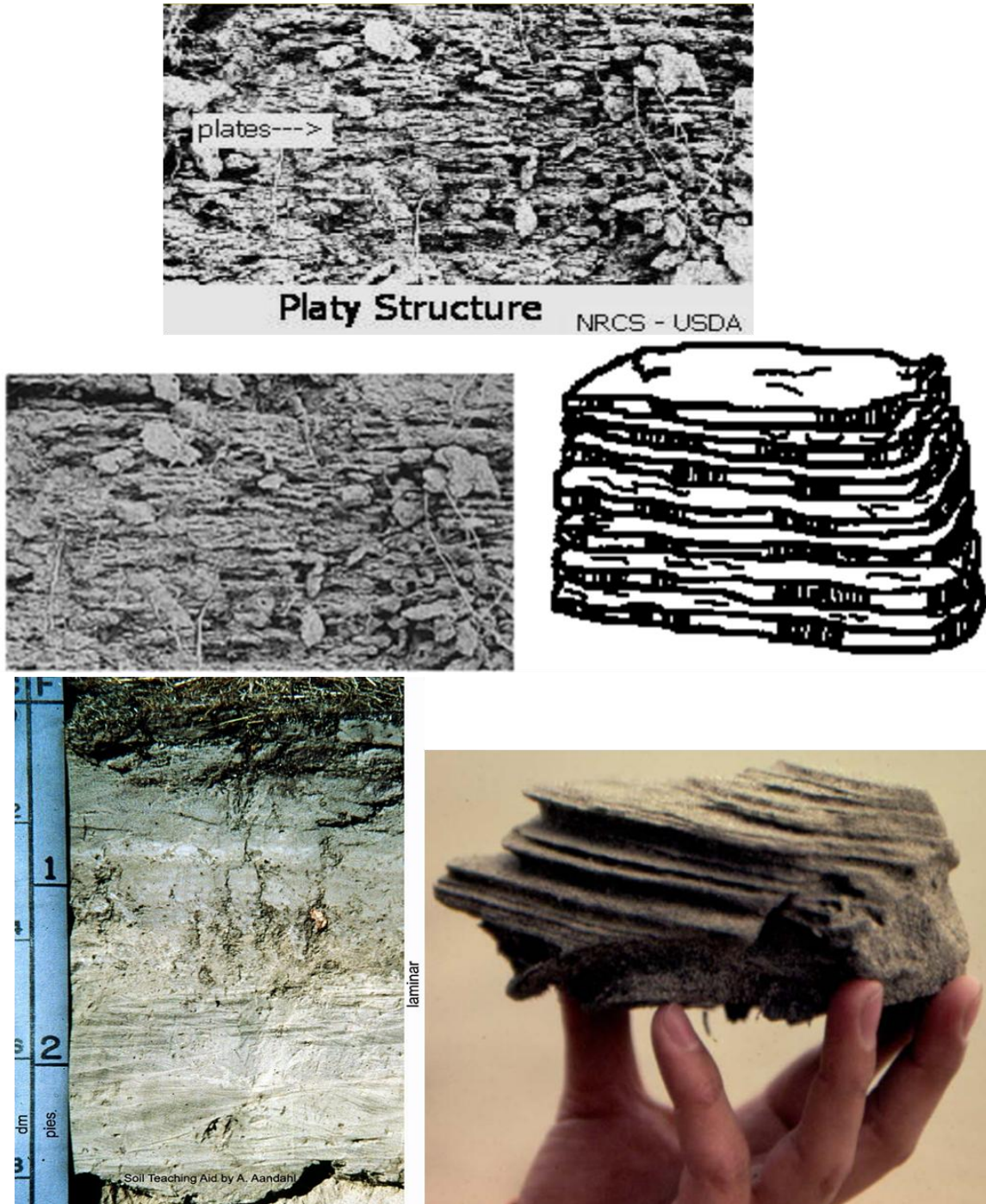


Figura 18: Estructura laminar

Tomado de: (Algunos conceptos) y de (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

1.8 **Sin estructura:** (Figuras 19, 20, 21 y 22) cuando no hay desarrollo de agregados peds o terrones que normamente se nombran así cuando se presentan en el suelo granos sueltos o cuando se presentan grandes masas llamado masivo:

1.8.a) **Horizontes de partículas sueltas** (Figuras 19 y 20): Esta estructura se presenta cuando solo hay arena y no hay síntomas de agregación. Es propia de los horizontes E. Realmente no se trata de una estructura pues no responde a los criterios de definición de la misma pero se le asigna el término para mantener una unidad en la definición y describir este estado de "no agregación" del suelo.



Figura 19: Falta de estructura por suelo suelto

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)



Figura 20: Ejemplo de no estructura por suelo suelta

Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

**1.8.b) Masivos** (Figuras 21 y 22): No existen unidades estructurales y el material es una masa que no ha de estar necesariamente cementada. Es una masa sin grietas y sin diferenciación de agregados.

Es propia de materiales que no han sufrido procesos edáficos pero que poseen coloides arcillosos derivados de su origen como son los horizontes C.

Estructura masiva se trata de horizontes de suelos sin estructura aparente donde todas las partículas del suelo están unidas. Se trata de terrones muy grandes difíciles de romper.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

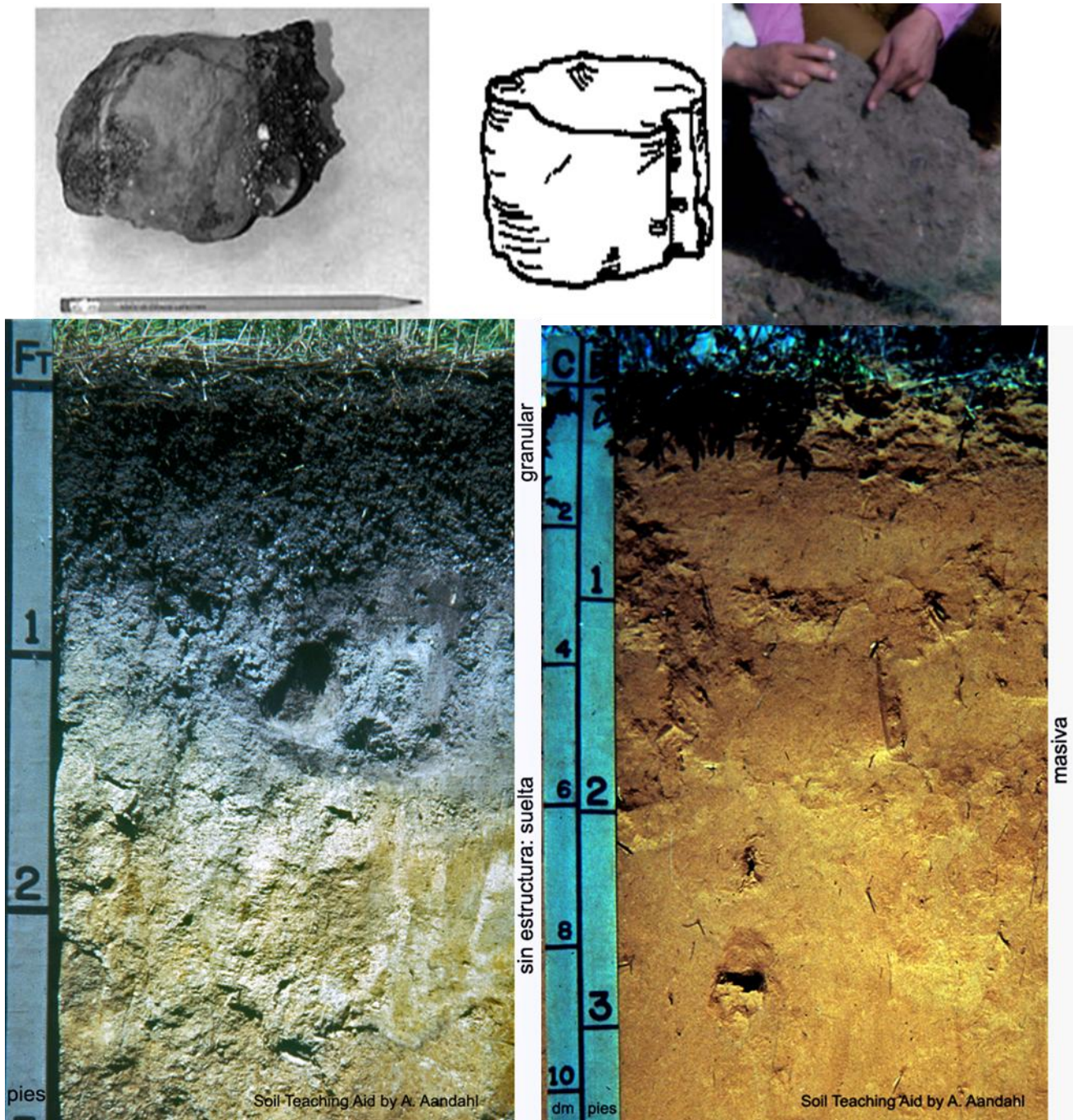


Figura 21: Falta de estructura por suelo masivo

Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

Tomado de: (Algunos conceptos)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

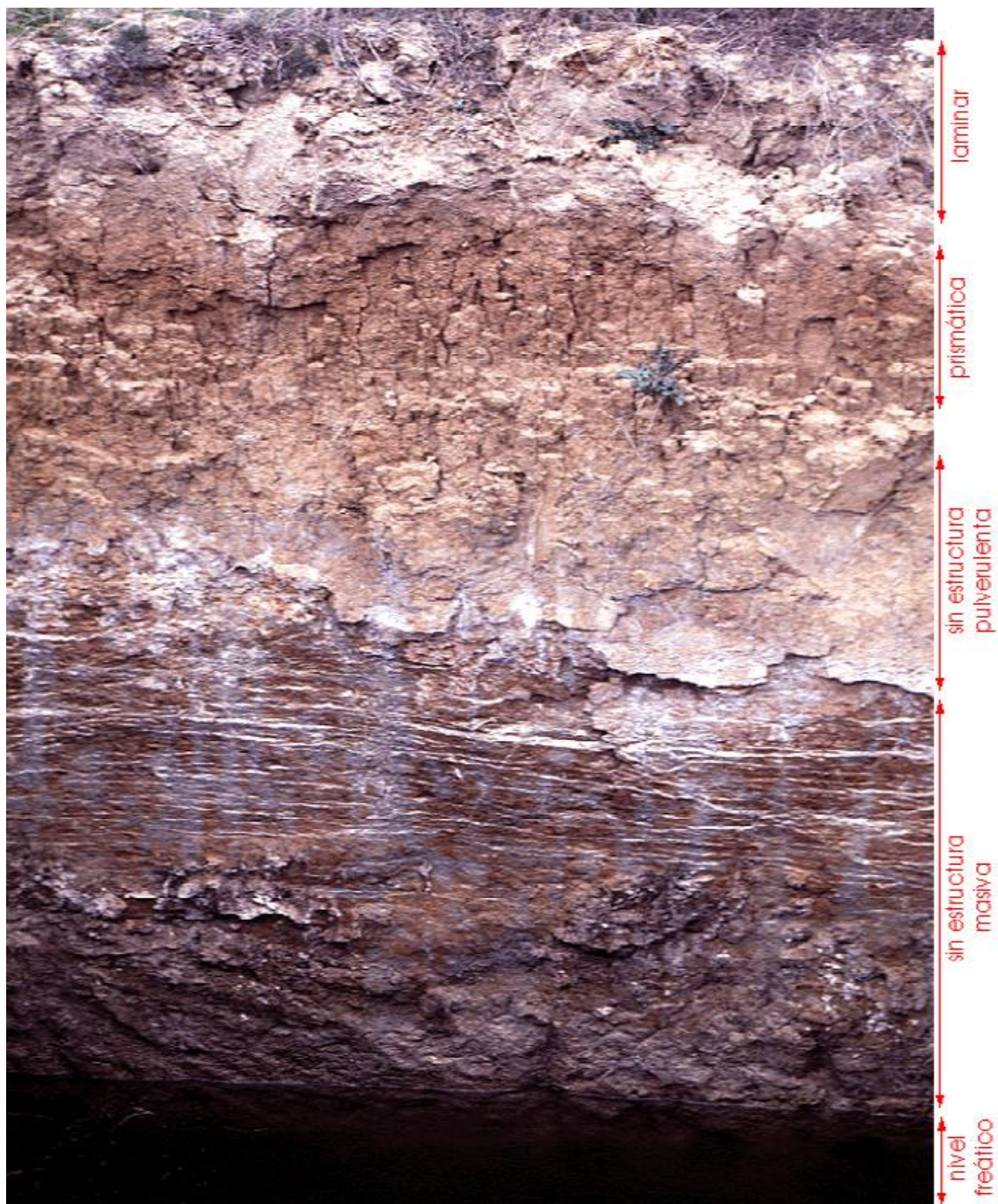


Figura 22: Ejemplo de no estructura por suelo suelta

Tomado de: Tomado de: (Heredia, 2010)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

**1.8.c) Estructura fibrosa** (Figura 23): Es otra de las situaciones que no responde al criterio de estructura como sucede con las anteriores. Está constituida por fibras procedentes del material orgánico poco descompuesto en el que los restos de tejidos son fácilmente visibles; la única organización es el entrelazamiento de las fibras. Es propia de los horizontes orgánicos H y O

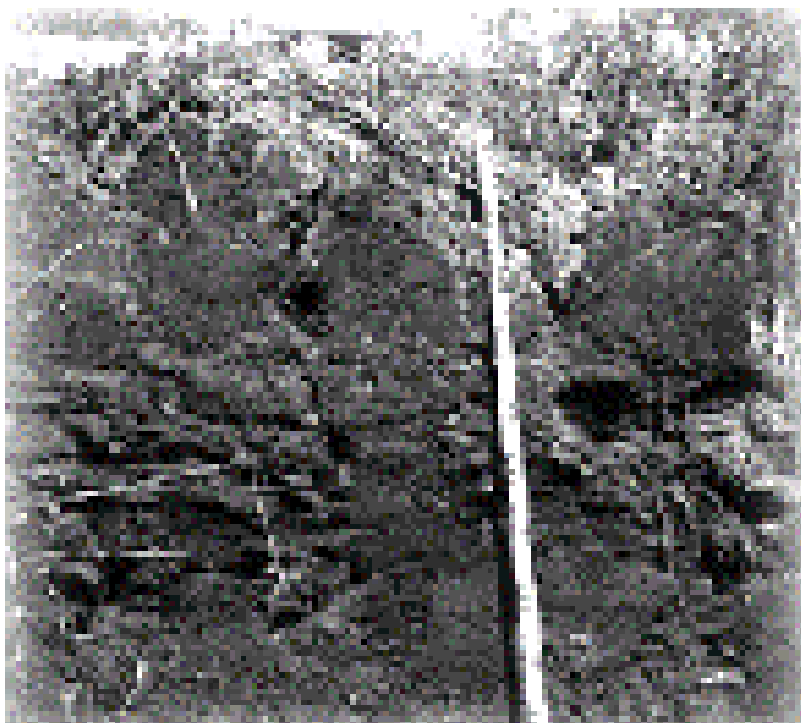


Figura 23: Estructura fibrosa

**1.8.d) Estructura escamosa** (Figura 24): Su forma es la de una lámina delgada y curvada con aspecto cóncavo. Ocurre en zonas encharcadas y desecadas en las que, en el último período, se produce una sedimentación de las partículas que había en suspensión y una selección por tamaños en la que quedan abajo las más gruesas. Al secarse, mientras las partículas gruesas no cambian de volumen, la fracción fina y coloidal se contrae. Este estrechamiento provoca tensión y hace que la superficie se curve. Siempre aparece en superficie y es una estructura pasajera porque en el momento que llueve la estructura va a su forma primigenia.

**CC BY-NC-ND 4.0**



Figura 24: Estructura escamosa

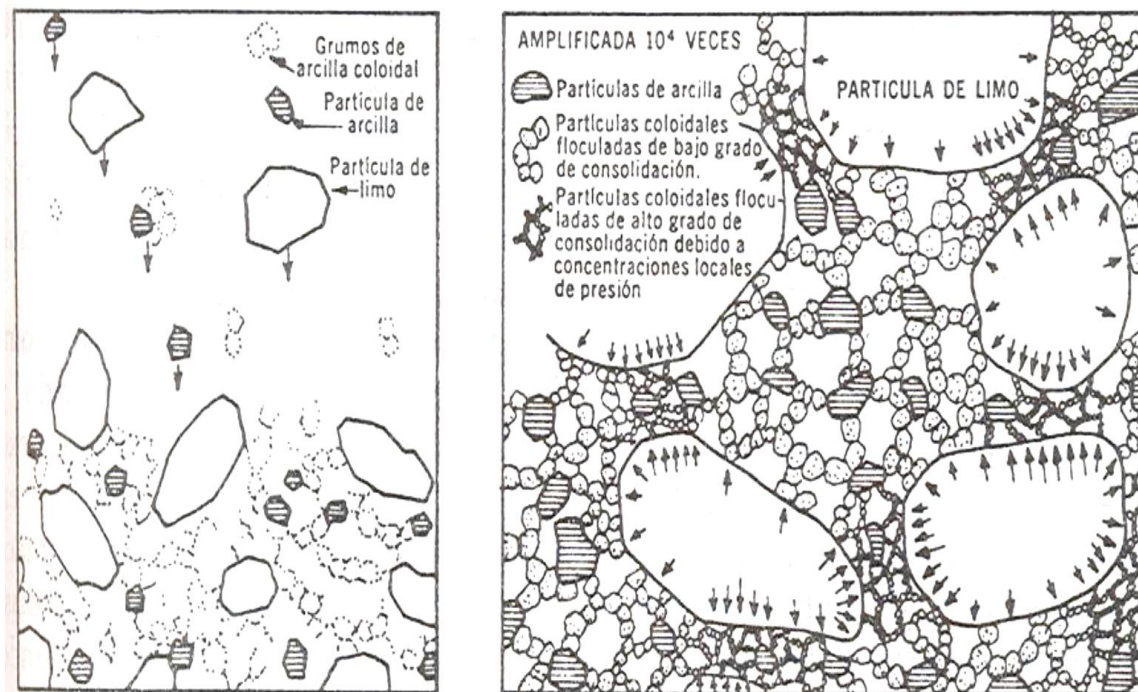
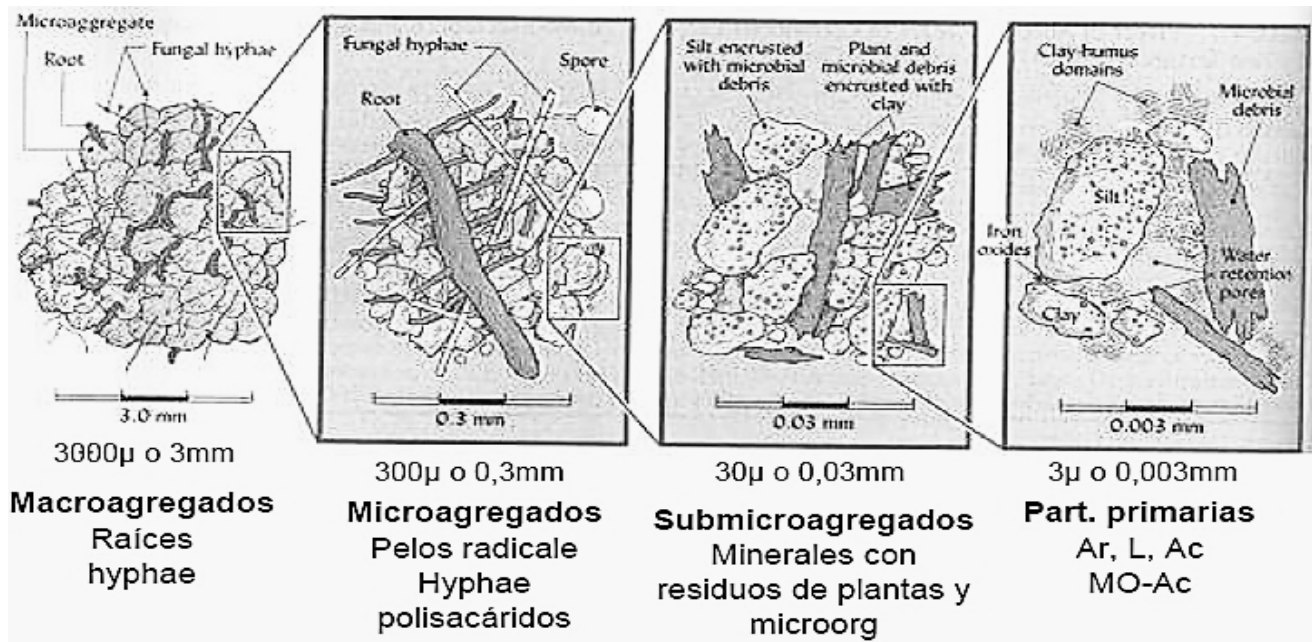


Figura 25: Descripción micro morfológica de estructura del suelo

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)



**Mecanismos de formación de agregados en suelos tropicales y templados**

A NE: agregados no estables; AE agregados estables en agua. Modificado de Six, J., et al., 2002.

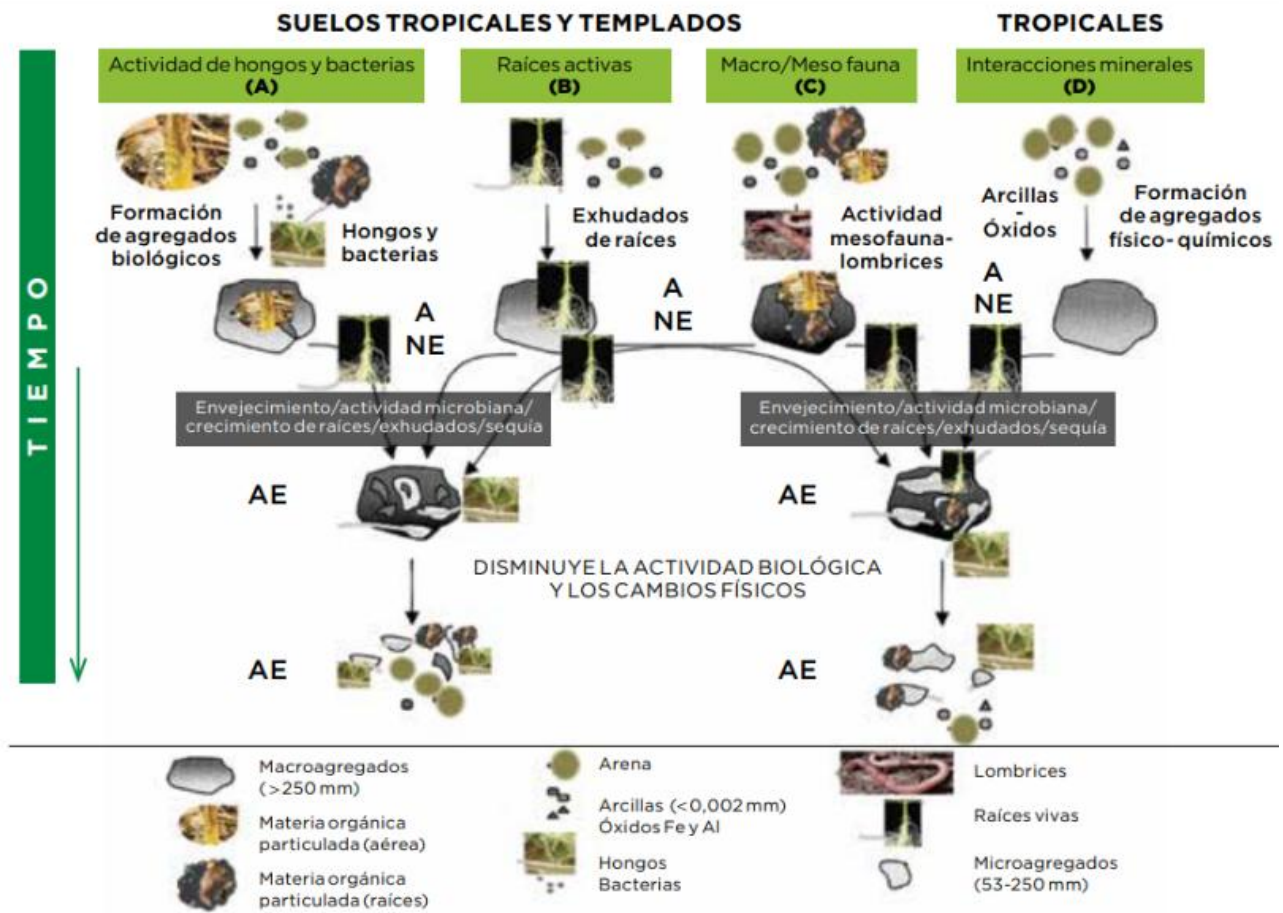


Figura 26: Descripción de participación de las raíces en la estructura del suelo  
Tomado de: (Consultas Agrícolas)

**CC BY-NC-ND 4.0**

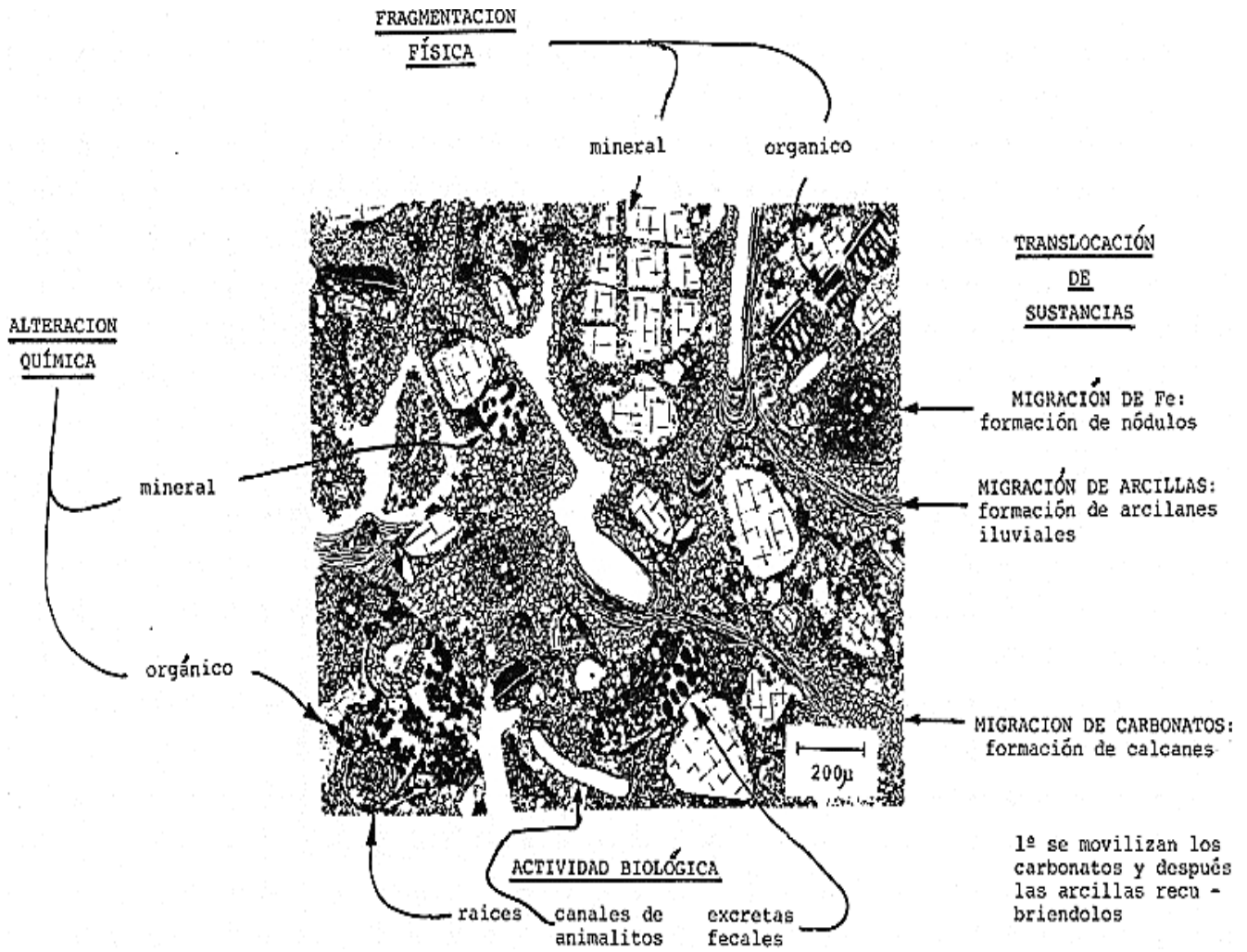


Figura 27: Interpretación micro morfológica de la estructura del suelo

### Tamaño de la estructura o clase de estructura

La clase que se refiere al tamaño de los agregados (Figuras 28, 29, 30, 31 y 32) se clasifican en: 1- muy grueso, 2- grueso, 3- mediano, 4- fino y 5- muy fino.

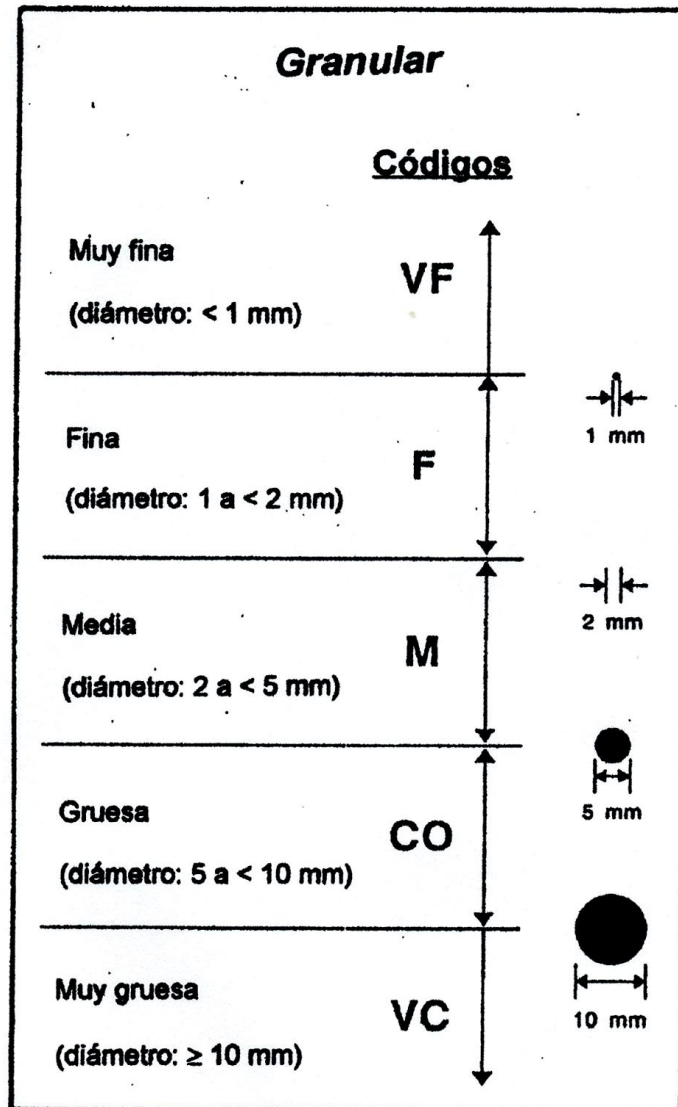


Figura 28: Clase de estructura granular

**CC BY-NC-ND 4.0**

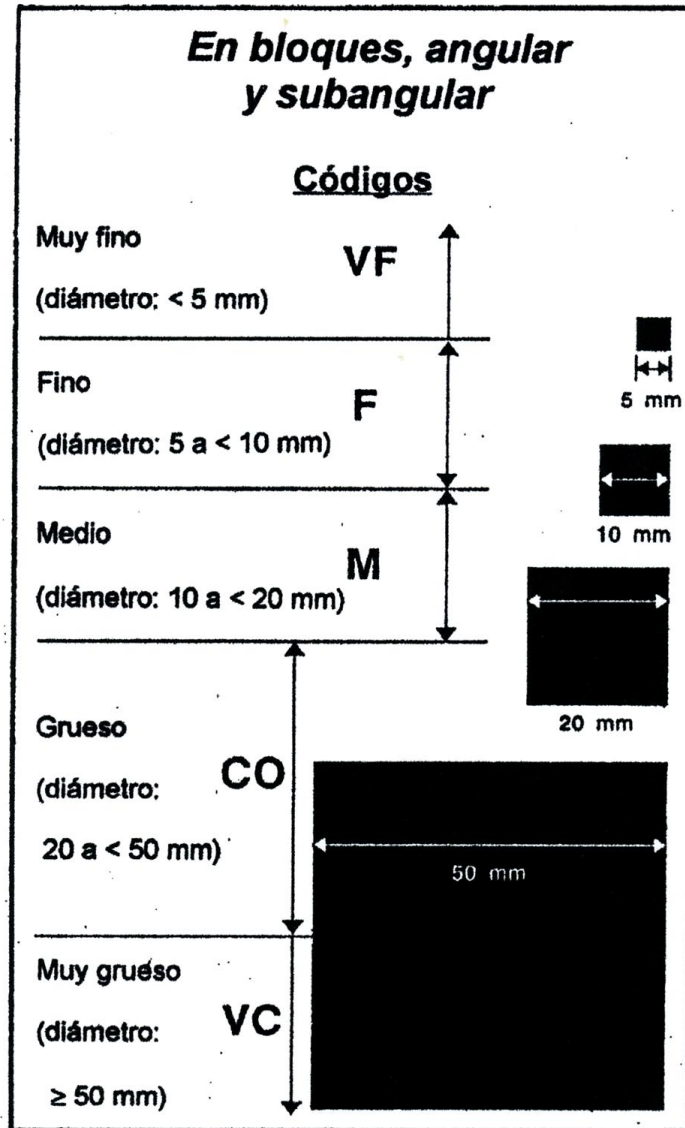


Figura 29: Clase de estructura de bloques angulares y subangulares

**CC BY-NC-ND 4.0**

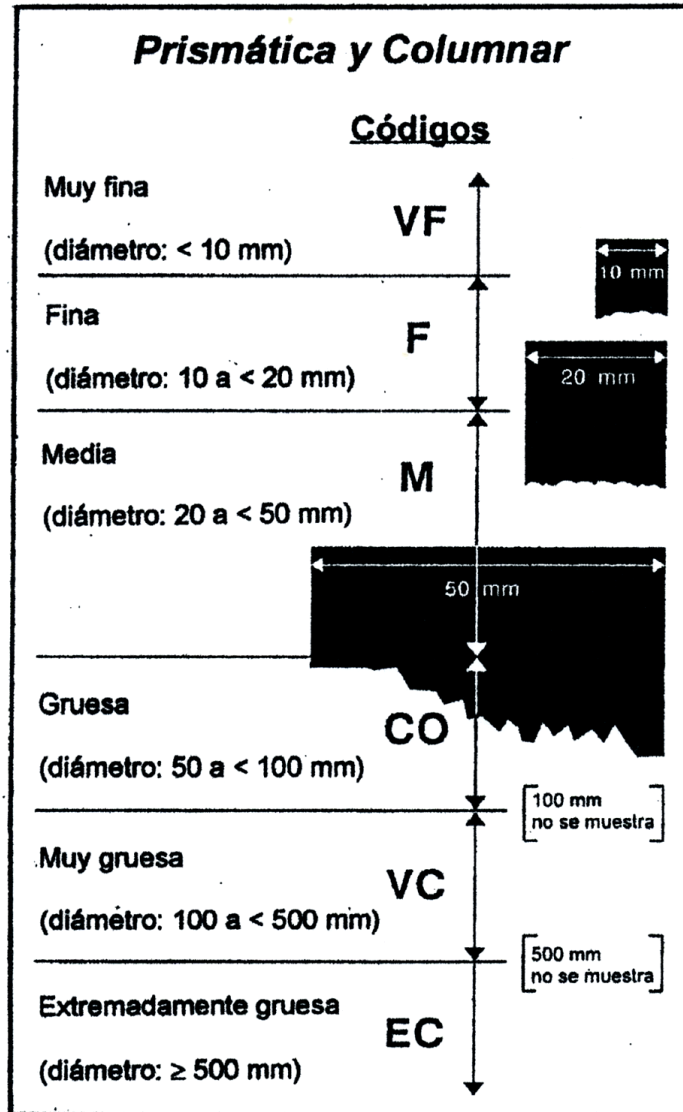


Figura 30: Clase de estructura prismática y columnar

**CC BY-NC-ND 4.0**

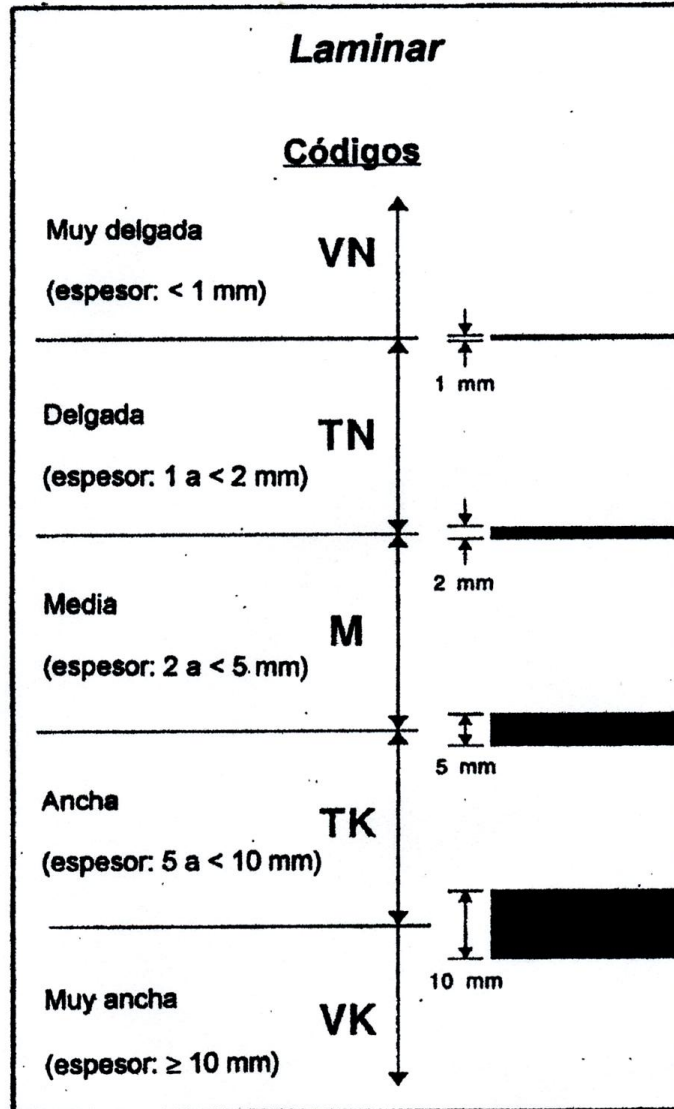


Figura 31: Clase de estructura laminar

**CC BY-NC-ND 4.0**

Otros tipo de estructura del suelo

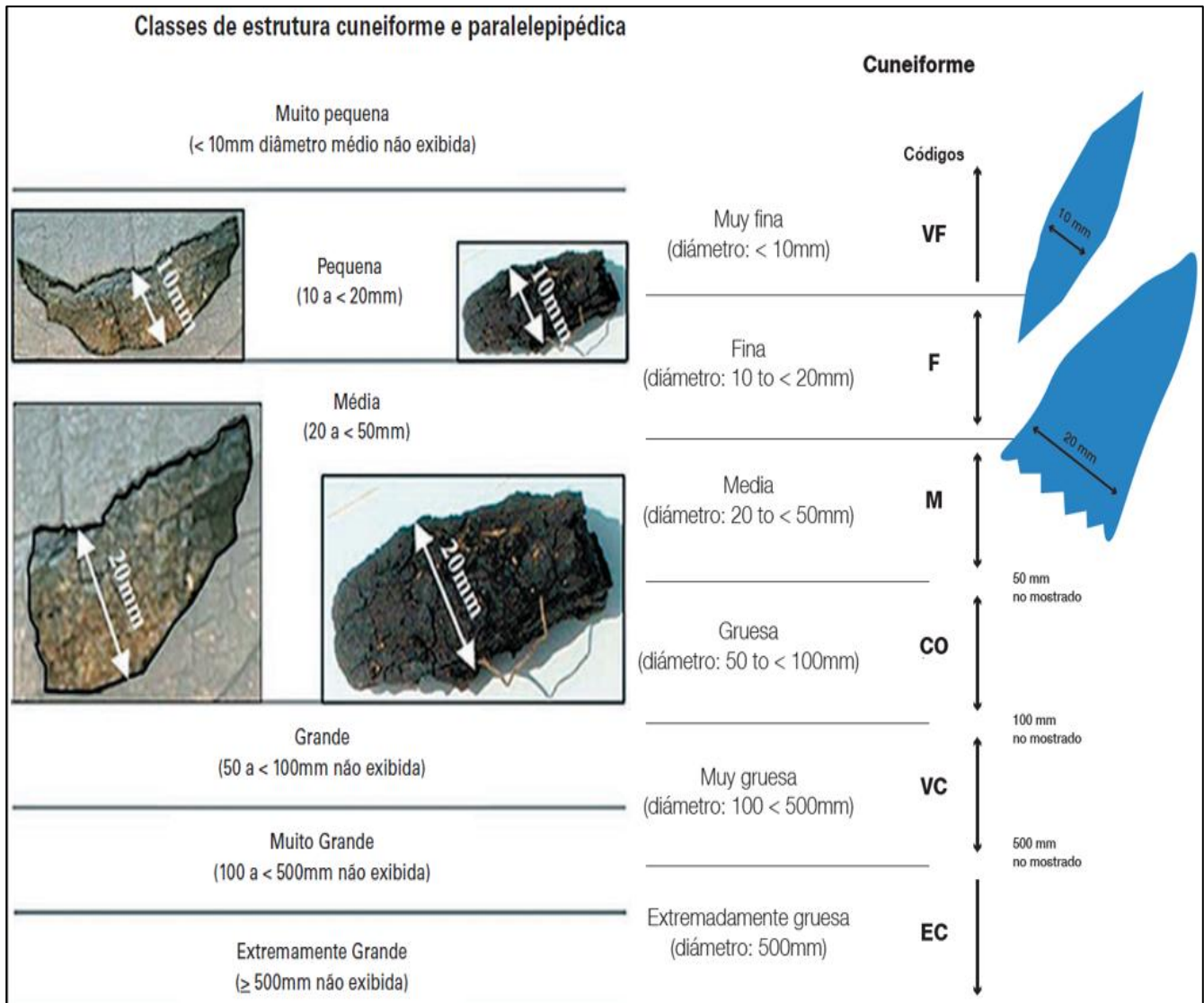


Figura 32: Clase de estructura cuneiforme

**Grado de desarrollo de la estructura**

El grado (Cuadro 1 y Figuras 33, 34 y 35), se refiere a la definición, estabilidad o durabilidad de los agregados (peds) frente a fuerzas o agentes externos. Se refiere a la fortaleza de la agregación y expresa a la vez tanto la cohesión dentro de los agregados como la adhesión entre los agregados.

**CC BY-NC-ND 4.0**



Figura 33: Estimación del grado de estructura

En el campo el grado de estructura se determina empíricamente, observando la durabilidad de los agregados y la proporción relativa del material agregado o desagregado que resulta cuando los peds son desplazados o removidos de la masa del suelo o cuando un fragmento de la masa del suelo se presiona suavemente entre los dedos. Por ello es necesario realizar la descripción del grado de estructura a un contenido de humedad como capacidad de campo. El grado de estructura es la intensidad de agregación y expresa la diferencia entre la cohesión dentro de los agregados y la adhesividad entre ellos. La cohesión es la propiedad de partículas similares de adherirse entre sí, mientras que la adhesión es la propiedad para adherirse de diferentes partículas o superficies.

El grado de estructura por sus características es primordial para la clasificación del suelo en:

- 1- grado 0 o sin estructura: son los suelos donde no se observa agregación (peds) o no se observa la presencia de líneas o planos naturales de debilitamiento. Si el suelo es denso se califica como masivo y si es material suelto se considera grano suelto
- 2- grado 1 o estructura débil: se aplica a materiales que se caracterizan por tener peds o agregados muy poco definidos y muy deficiente o pobremente formados, observables con gran dificultad dentro de la masa del suelo. Cuando la masa del horizonte se disturba se obtiene una mezcla de unos pocos peds enteros, otros partidos y una gran cantidad desmenuzados o no agregados. Cuando se intenta separar los peds de la masa del horizonte estos suelen desmenuzarse con gran facilidad. En ocasiones el grado débil puede ser subdividido en muy débil o moderadamente débil.
- 3- grado 2, o estructura media o moderada: se caracteriza por la presencia de agregados o peds definidos y bien formados, moderadamente consistentes y evidentes, pero que se desmenuzan con relativa facilidad cuando se trata de retirarlos de la masa del suelo. Cuando el horizonte se disturba generalmente resulta una mezcla de bastantes peds enteros y definidos, pocos peds partidos y muy poco material disgregado.

**CC BY-NC-ND 4.0**

- 4- grado 3 o estructura fuerte: se aplica cuando los pedos son rígidos, diferenciados que son duraderos y bien formados y se adhieren débilmente entre si. No solamente pueden ser separados con facilidad de la masa del suelo, sino que se requiere de una apreciable presión de los dedos para desmenuzarlos. El grado fuerte puede ser subdividido en moderadamente fuerte o muy fuerte.



Figura 34: Clasificación de Clases de estructura del suelo resumida en su desarrollo 1  
Tomado de: (Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS)

**Pobre** condición



Reducida cantidad de partículas medianas y finas. Predominan los terrones

**Moderada** condición

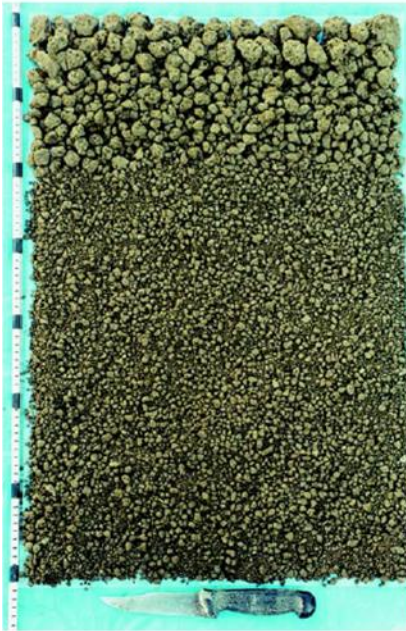


Adecuada distribución de partículas medianas, pequeñas y finas. Presencia terrones

**Buena** condición



Adecuada distribución de partículas medianas y pequeñas. Pocos terrones



GOOD CONDITION VS = 2  
Good distribution of friable finer aggregates with no significant clodding



MODERATE CONDITION VS = 1  
Soil contains significant proportions of both coarse firm clods and friable, fine aggregates



POOR CONDITION VS = 0  
Soil dominated by extremely coarse, very firm clods with very few finer aggregates

Figura 35: Clasificación de Clases de estructura del suelo en su desarrollo 2

Tomado de: (Benites Jump, 2014)

Tomado de: (VISUAL SOIL ASSESSMENT Volume 1: Field guide for cropping & pastoral grazing on flat to rolling country)

**CC BY-NC-ND 4.0**

**Otra clasificaciones de la estructura del suelo utilizada usualmente en mecánica de suelos y el modelo jerárquico de agración del suelo (Figuras 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44 y 45 )**

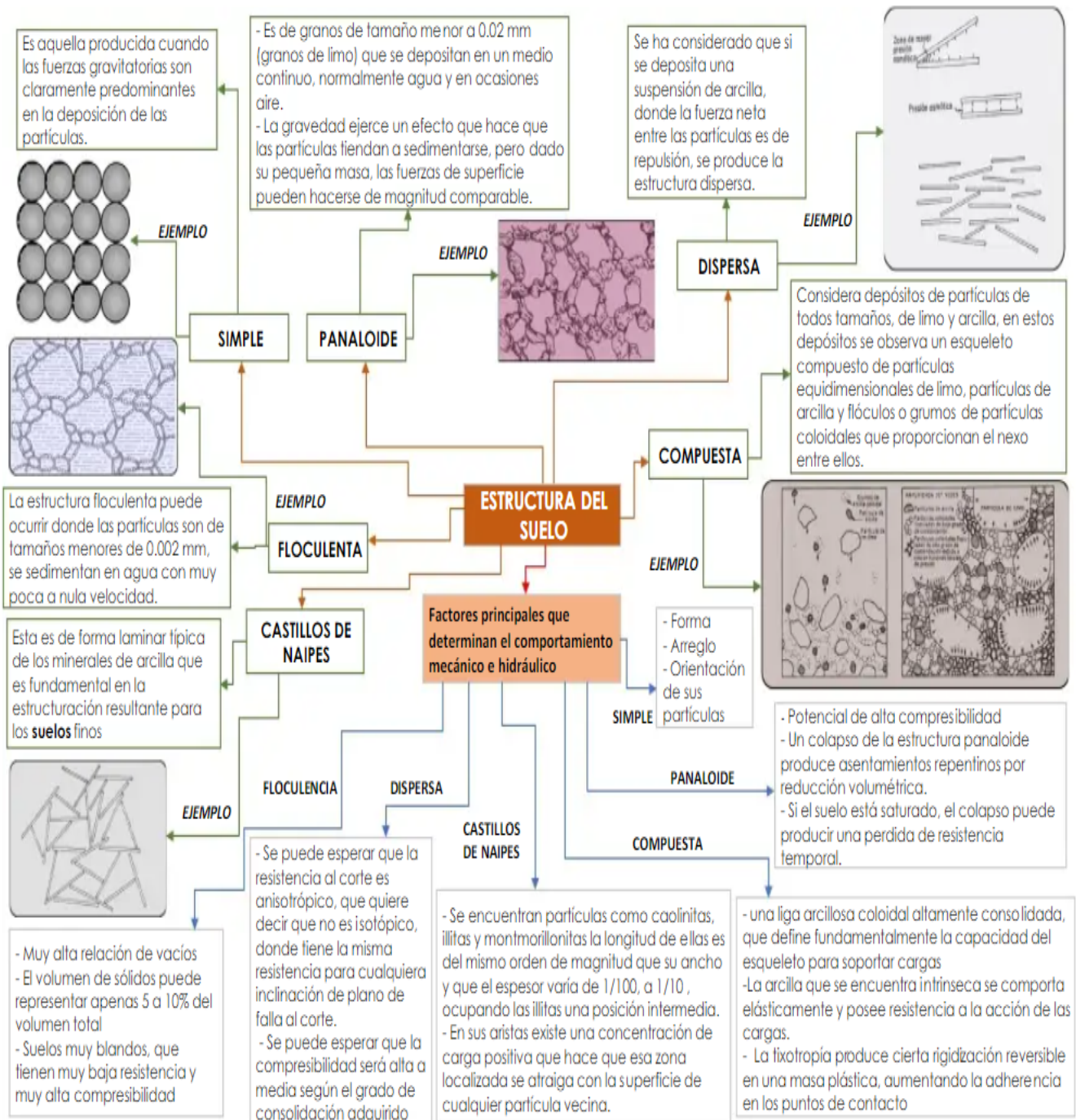


Figura 36: Estructura del suelo (mecánica de suelos)

Tomado de: (Esquema de Estructura Del Suelo)

**CC BY-NC-ND 4.0**

## Agregación en el suelo

Como hemos visto, las partículas del suelo se encuentran mezcladas y a menudo unidas por lo que no se encuentran aisladas, sino que están en cierta manera organizadas en agregados estructurales o pes o terrones naturales y esto forma el suelo. Estos agregados normalmente y en su gran mayoría están formados por minerales y materia orgánica, los cuales se consideran como los bloques fundamentales en la formación de la estructura del suelo donde se presentan las fuerzas de cohesión o intra-agregados y las fuerzas de adhesión o inter-agregados.

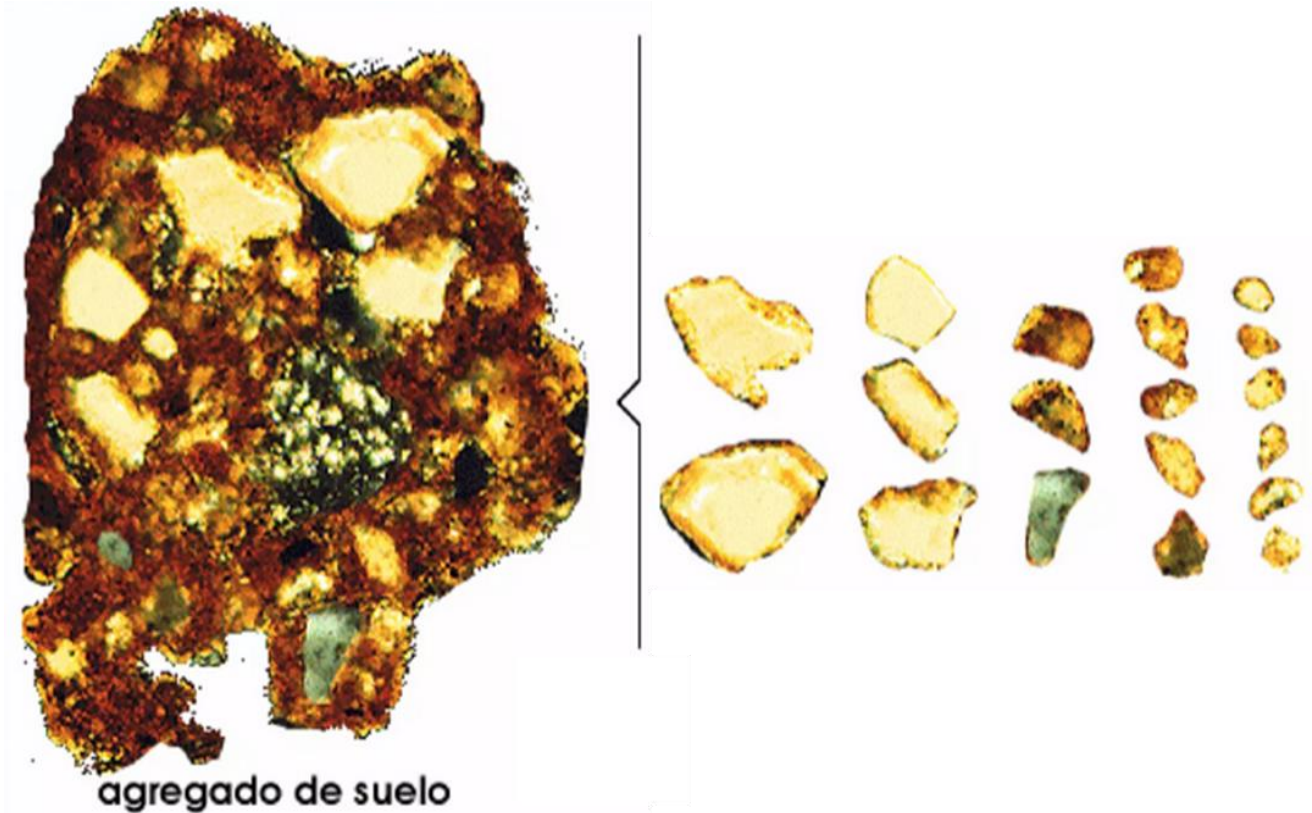


Figura 37: Estructura del suelo en sus partes

Tomado de: (Slideshare de Scribd, 2025)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

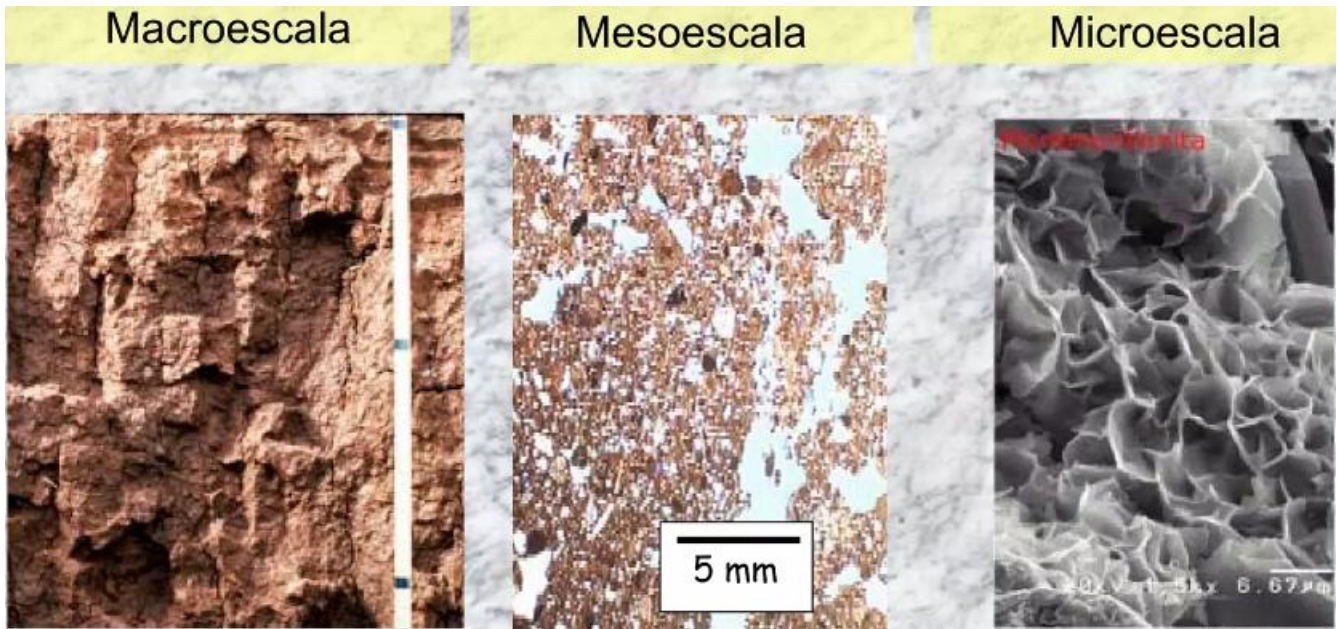


Figura 38: Estructura del suelo en su escala

Tomado de: (Slideshare de Scribd, 2025)

En los suelos se presentan procesos como humectación-secado, hinchamiento-retracción, congelación-licuefacción, translocación, transformación, pérdidas y ganancias de minerales y materia orgánica que conlleva o participan también en la formación de la estructura.

Elementos que participan en la agregación de los componentes del suelo son los cationes, óxidos de hierro, hidróxidos de aluminio, carbonatos de calcio, materia orgánica, óxidos, carbonatos, sílice e interacciones entre partículas de arcillas, bacterias, hongos.

Los aluminosilicatos amorfos, óxidos y la materia orgánica muy descompuestas adsorbidos sobre la superficie de las arcillas y las interacciones electrostáticas entre las partículas de arcillas que producen la unión o floculación o unión de las partículas del suelo y según su tamaño tienen diferentes formas de participación como se muestra en las siguientes figuras 19.5, 19.6, 19.7, 19.8, y 19.9.

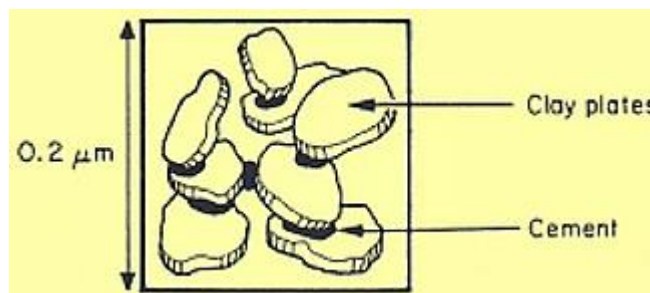


Figura 39: Estructura del suelo en su formación 0,2 micras

Tomado de: (Slideshare de Scribd, 2025)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Los residuos microbiales y fúngicos mezclados con componentes orgánicos

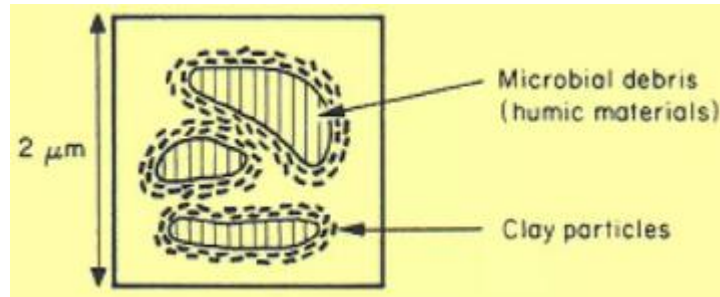


Figura 40: Estructura del suelo en su formación 2,0 micras

Tomado de: (Slideshare de Scribd, 2025)

Residuos de plantas y hongos mezclados con componentes inorgánicos

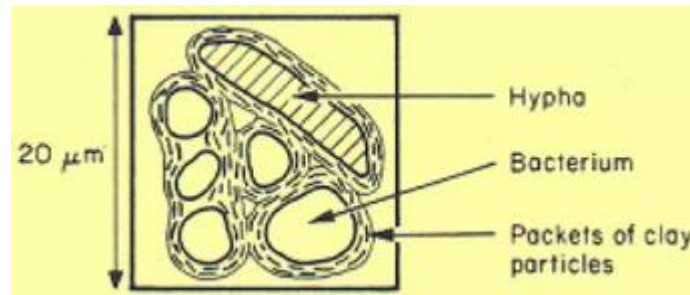


Figura 41: Estructura del suelo en su formación 20,0 micras

Tomado de: (Slideshare de Scribd, 2025)

Raíces e hifas

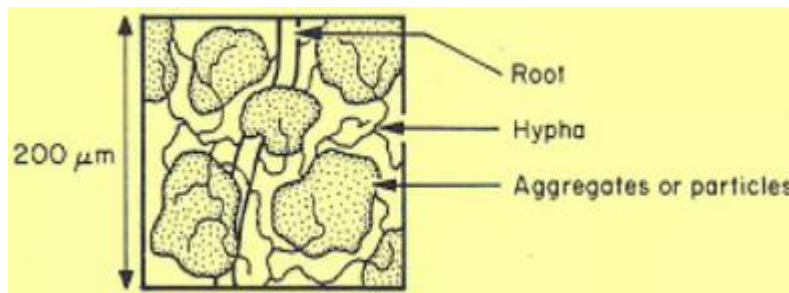


Figura 42: Estructura del suelo en su formación 200,0 micras

Tomado de: (Slideshare de Scribd, 2025)

**CC BY-NC-ND 4.0**

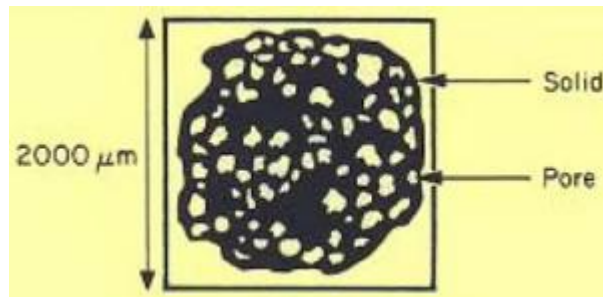
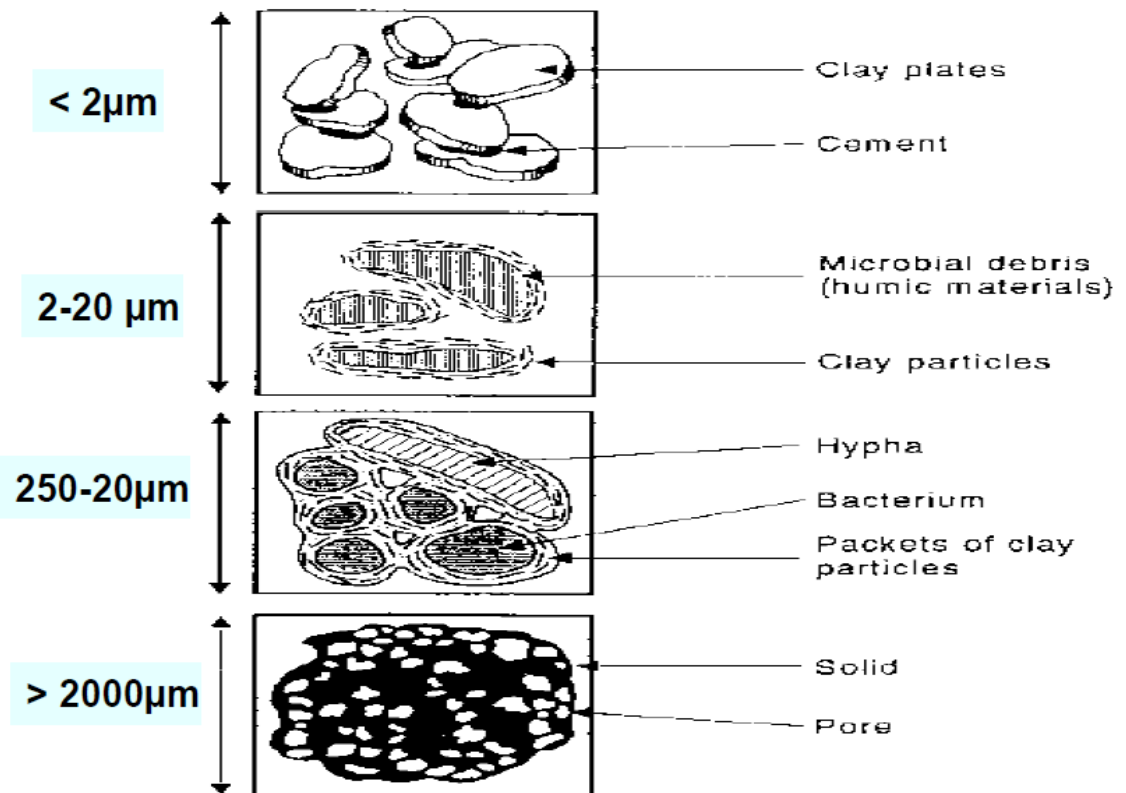


Figura 43: Estructura del suelo en su formación 2000,0 micras

Tomado de: (Slideshare de Scribd, 2025)

A esta manera de representar la formación y desarrollo de la estructura por niveles se la llama "MODELO JERÁRQUICO DE AGREGACIÓN DEL SUELO" del cual la figura 19.10.1 muestra un resumen rápido de la misma:

## Modelo jerárquico de agregación



Tisdall y Oades, 1982

Figura 44: Estructura del suelo en su formación jerárquica

Tomado de: (Heredia, 2010)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Las lombrices de tierra forman los llamados “Cast” o masas de suelo con mucosidad y materia orgánica particulada, que si bien húmedos son inestables, al secar, resultan agregados estables y con efectos no solo en la estructura sino en la aireación e infiltración del suelo.



Figura 45: Estructura del suelo en su formación de suelo por lombrices

Tomado de: (MundoAgro)

## Instrucciones

Se puede realizar varias estructuras de diferentes clases y tipos de suelo o de diferentes horizontes en un mismo perfil de suelo

## Materiales

- Muestras de suelo indisturbada de 10\*10\*10 cm como mínimo con humedad de capacidad de campo
- Agua destilada
- Espátula
- Cuchilla
- Tamiz de 2,0 mm
- Contenedores y bandejas
- Balanza granataria o analítica
- Guía para la clasificación de peds de acuerdo a su tamaño según su forma
- Vidrio transparente de 30\*30 cm

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

## Procedimiento

- Se toma la muestra de suelo indisturbada que se encuentre en condiciones de humedad ideal a capacidad de campo
- Se desmenuza suavemente entre las manos ejerciendo movimientos semicirculares teniendo especial cuidado de no aplicarle fuerza directa, esto con el fin de obtener los pedos sin modificar su estructura original.
- Con una brocha o pincel de cerdas suaves se retira el material suelto que rodea cada uno para obtener su tamaño real y apreciar su forma sin distorsiones.
- Se deben de clasificar de acuerdo a su tamaño haciendo uso de la guía según sea su forma y disponerlos para su cuantificación (medición de la abundancia) de acuerdo a las categorías de 1- muy grueso, 2- grueso, 3- mediano, 4- fino y 5- muy fino.
- Cada categoría anteriormente cuantificada, se dispone para determinar su masa en la balanza.
- Se registran los resultados y se disponen para obtener sus porcentajes relativos en número y masa, así como el porcentaje verdadero de representación de cada una de las categorías en la muestra para obtener la clase o tamaño de estructura predominante.
- Describir la estructura en el orden de: tipo, clase y grado, cada uno separado por una coma. Como ejemplo “Estructura blocosa subangular, media, moderada; pudiéndose omitir la palabra “estructura”. Si se presenta más de un tipo, clase o grado de estructura se debe añadir dentro de la descripción. Como ejemplo “Estructura blocosa subangular, media, fuerte, que parte a granular, fina y media, moderada a fuerte”.

## Preguntas

- 1- Por qué la estructura del suelo puede ser afectada por el grado de humedad del suelo
- 2- Por qué un pedo no debe ser confundido con:
  - 2.1- Un terrón originado por cualquier disturbación como arados o excavaciones
  - 2.2- Un fragmento originado por la ruptura de la masa del suelo por una fuerza externa aplicada arbitrariamente.
  - 2.3- Concreciones originadas por una concentración local de compuestos que tienden a cementar entre si las partículas del suelo.

**CC BY-NC-ND 4.0**

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)**

Cuadro 1: Valores medios para clasificar la clase estructural de las partículas del suelo, junto al tipo de estructura a la que corresponda y al tamaño de los agregados existentes

CLASE	TIPO			Agregados porosos
	Prismático, con dos dimensiones (las horizontales) limitadas y considerablemente menores que la vertical; dispuestos alrededor de una línea vertical; caras verticales bien definidas; vértices angulares	Blocoso, poliédrico o esférico, con tres dimensiones del mismo orden de magnitud, dispuestas alrededor de un punto	Blocoso; bloques o poliedros que tienen superficies planas o curvas con ligera acomodación o no a las caras de los agregados circundantes	
Muy fino o muy delgado	Laminar Laminar muy delgado; T < 1 mm	Sin extremos redondeados Con extremos redondeados	Caras aplanadas y redondas con muchos vértices redondeados	Agregados no porosos
Fino o delgado	Laminar Laminar delgado; 1 a 2 mm	Prismático Columnar muy fino; T < 10 mm	Bloques (angulares)	Migajón
Medio	Laminar delgado; 1 a 2 mm	Prismático Columnar fino; 10 a 20 mm	Bloques subangulares muy finos; T < 5 mm	Migajón muy fino T < 1 mm
Grueso o espeso	Laminar delgado; 1 a 2 mm	Prismático Columnar medio; 20 a 50 mm	Bloques subangulares finos; 5 a 10 mm	Migajón fino; 1 a 2 mm
Muy grueso o muy espeso	Laminar delgado; 1 a 2 mm	Prismático Columnar grueso; 50 a 100 mm	Bloques subangulares medios; 10 a 20 mm	Migajón medio; 2 a 5 mm
	Laminar espeso; 5 a 10 mm	Prismático Columnar grueso; 50 a 100 mm	Subangular grueso; 20 a 50 mm	Granular grueso; 5 a 10 mm
	Laminar muy espeso; T > 10 mm	Prismático Columnar muy grueso; T > 100 mm	Bloques angulares muy gruesos; T > 50 mm	Granular muy grueso; T > 10 mm

Tomado de: (Moreno Ramón, Gisbert Blanquer, & Ibáñez Asensio)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

# Densidad real de las partículas del suelo

## Objetivo

Estimar la densidad real de las partículas del suelo

## Introducción

La densidad de las partículas o densidad real se define como la relación entre la masa total de sólidos y su volumen, sin considerar el espacio poroso. Se establece por la composición química y mineralógica de la fase sólida del suelo (ligada a sus proporciones relativas); por lo tanto, es una función de la densidad de los constituyentes minerales del suelo.

Las partículas de un suelo varían en su composición y en su densidad, por ello, cuando se calcula la densidad de partículas de un suelo corresponde a la densidad media de la fase sólida.

La densidad de partículas representa un valor relativamente constante para la mayoría de los suelos, donde los valores varían entre 2,45 - 2,75 g/cm<sup>3</sup>. Estos estrechos límites se deben a la fracción mineral del suelo, la cual está constituida, casi en su totalidad, por cuarzo, arcillas y algunos feldespatos, cuyas densidades se encuentran dentro de esos rangos.

En algunos casos, la presencia de cantidades poco frecuentes de ciertos minerales pesados, por ejemplo, el elevado contenido de óxidos de hierro o ferro magnésicos, magnetita, granates y epidota, inciden en densidades de partículas mayores de 2,75 g/cm<sup>3</sup>. Caso contrario, si la densidad de partículas es inferior a 2,65 g/cm<sup>3</sup>, el suelo podría tener un alto contenido de materia orgánica, la cual, afecta significativamente la densidad de las partículas por su menor peso, si se le compara con un mismo volumen de sólidos minerales.

En los horizontes superficiales de suelos con alto contenido de materia orgánica, ocasionalmente, registran densidad de partículas cercana a 2,40 g/cm<sup>3</sup>.

La densidad real de los materiales orgánicos mencionan algunos valores que se encuentra entre 1,3 y 1,53 g/cm<sup>3</sup> como el caso del humus y otros mencionan que se encuentran entre valores de 1,1 - 1,4 g/cm<sup>3</sup> (para el caso de la densidad aparente de los materiales orgánicos se reportan densidades de 0,06 – 0,60 g/cm<sup>3</sup>).

La densidad real, densidad de partículas, densidad específica o gravedad específica depende de la constitución química, mineralógica y del grado de hidratación de las partículas y

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

corresponde a la masa total de los sólidos dividido por el volumen total de ellos, sin incluir el espacio poroso (Cuadros 2 y 3).

El conocimiento de la densidad de las partículas de suelo es importante para calcular la porosidad total del suelo junto con la densidad aparente, la concentración de sólidos suspendidos para la evaluación de la densidad en suspensión y la velocidad de sedimentación de las partículas en líquidos y gases, en la predicción de pérdida de suelo y en conservación de suelos.

$$D_s = \frac{M_s}{V_s}$$

donde:

$D_s$  = densidad real de partículas (g/ cm<sup>3</sup>, kg/ m<sup>3</sup>, Ton/ m<sup>3</sup>)

$M_s$  = masa total de los sólidos (g, kg, Ton)

$V_s$  = Volumen total de los sólidos del suelo (no incluye el espacio poroso) (cm<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>)

### **Determinación de la densidad real de partículas**

Los métodos (Figuras 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44 y cuadros 4, 5 y 6) basados en el principio de Arquímedes no pueden dar la densidad real de los materiales porosos. Esto sucede porque parte de la porosidad es inaccesible al líquido en el que sumergimos, los poros cerrados o aquellos abiertos que no permitan la entrada del líquido o fluido.

Para obtener en este caso la verdadera densidad, o mejor, el verdadero peso específico, necesitamos pulverizar el material que produzca la rotura de los pequeños poros y de los poros cerrados.

El fin que se persigue con la pulverización es hacer desaparecer, los poros cerrados y poder hacer una medida del volumen que ocupa el material sólido.

El líquido de inmersión penetra entre las partículas de sólido una vez que se elimina el aire que existe entre ellas.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

Cuadro 2: Densidad real de partículas de diferentes constituyentes del suelo ( $\text{g/cm}^3$ )

PESO ESPECÍFICO RELATIVO PARA ALGUNOS SUELOS		
Tipo de SUELO		Gs
<b>INORGANICO</b>	Gravas	2.65
	Arena gruesa a media	2.65 - 2.67
	Arena fina (limosa)	2.67 – 2.70
	Arena arcillosa	2.67
	Limo	2.65 – 2.70
	Limo arenoso	2.66
	Limo arcillo arenoso	2.67
	Arcilla	2.70 – 2.80
	Arcilla arenosa	2.70
	Arcilla limosa	2.75
	Loes, polvo de piedra	2.67
	Suelos con micas o minerales de Hierro	2.75 – 3.00
	<b>ORGANICO</b>	Limo con trazos de materia orgánica
Arcilla		2.60
Lodos aluviales orgánicos		2.13 – 2.60
Turba		1.20 – 2.15

\*Variable, puede ser inferior a 2.0

minerales-de-arcilla	2,00 a 2,65 $\text{Mg m}^{-3}$
cuarzo-feldespato	2,50 a 2,60 $\text{Mg m}^{-3}$
minerales con elementos metálicos pesados	4,90 a 5,30 $\text{Mg m}^{-3}$
materia-orgánica	0,20 $\text{Mg m}^{-3}$

Tomado de: (Heredia, 2010)

Cuadro 3: Densidades reales de partículas de diferentes horizontes de los suelos

	Minerales de arcilla:	2000-2650 $\text{kgm}^{-3}$
	Cuarzo, feldespato:	2500-2600 $\text{kgm}^{-3}$
	Minerales con elementos metálicos	4900-5300 $\text{kgm}^{-3}$
	Horizontes minerales:	2600-2750 $\text{kgm}^{-3}$
$\rho_s = M_s / V_s$	Horizontes orgánicos:	1100-1400 $\text{kgm}^{-3}$
	Horizontes ricos en minerales pesados	2750 $\text{kgm}^{-3}$
	Valor medio para suelos minerales:	2650 $\text{kgm}^{-3}$
	De forma empírica se ha establecido para suelos ricos	
	2650-(1450% m.o)/100 en materia orgánica (de leenherr, 1970)	

**CC BY-NC-ND 4.0**

## Metodología 1 (método del picnómetro)

### Materiales

Picnómetro, Horno, Tamiz 2 mm, Balanza con una precisión de 0,1 g, Agua destilada, Estufa, Piseta, Termómetro, Lápiz o bolígrafo, Guantes para horno o pinzas

### Procedimiento

- Pesar el picnómetro seco y vacío ( $p$ ) sin tapón (Figura 34)
- Pesar exactamente 25 gramos de suelo seco a la estufa y tamizada (tamiz de 2,0 mm).
- Introducirlos en un picnómetro de 100 ml previamente tarado y pesar el conjunto ( $p_s$  = picnómetro + suelo) (Figuras 35 y 36).
- Limpiar el cuello del matraz con un frasco lavador con agua destilada para arrastrar partículas de suelo que hubieran podido quedar adheridas llenándolo así hasta la mitad (Figura 37).
- Calentar lentamente (Figura 38) hasta ebullición el matraz aforado con la muestra de suelo removiendo suavemente durante 10 segundos cada minuto para evitar la formación de espuma. Hervir durante 10 minutos para que el aire que ocupa los poros escape (si se dispone de una bomba de vacío es preferible a la ebullición).
- Cuando ya esté frío dejar reposar el picnómetro tapado durante 24 horas (Figura 41).
- Al cabo de este tiempo rellenar con agua destilada hasta enrasar. Para enrasar con precisión terminar de rellenar con una piseta (Figura 41 y 42).
- Una vez enrasado el picnómetro pesarlo ( $p_{sa}$  = picnómetro + suelo + agua) y medir la temperatura del líquido (Figura 43 y 44).
- Al terminar la ebullición retirar el picnómetro del fuego y dejarlo enfriar durante unos minutos.
- Finalmente limpia bien el picnómetro, enrasarlo únicamente con agua destilada y pesar el conjunto ( $p_a$  = picnómetro + agua)

**CC BY-NC-ND 4.0**

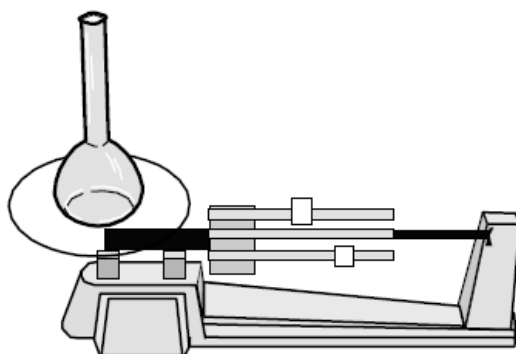


Figura 34: Pesado del picnómetro en seco y vacío

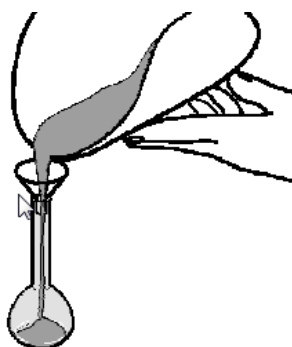


Figura 35: Incorporación del suelo dentro del picnómetro

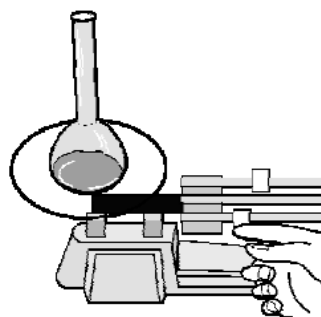


Figura 36: Pesado del picnómetro junto con el suelo

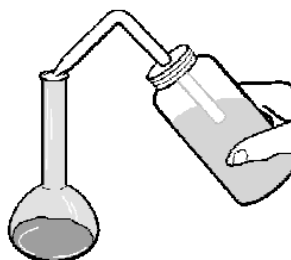


Figura 37: Arrastre de partículas de suelo hacia el fondo del picnómetro con agua destilada

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

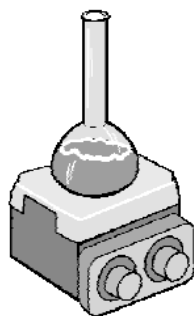


Figura 38: Calentado hasta ebullición del agua destilada y suelo que se encuentra dentro del picnómetro

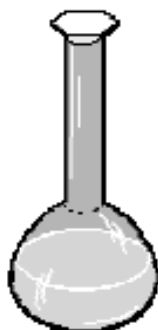


Figura 39: Agua destilada y suelo que se encuentra dentro del picnómetro en proceso de enfriamiento



Figura 40: Llenado con agua destilada con una pipeta hasta el punto de calibración

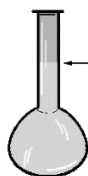


Figura 41: Picnómetro lleno hasta el punto de calibración

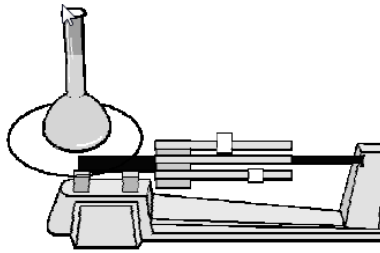


Figura 42: Pesado del picnómetro lleno hasta el punto de calibración

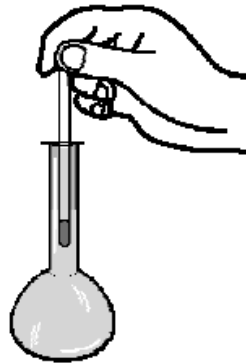


Figura 43: Medición de la temperatura del picnómetro lleno

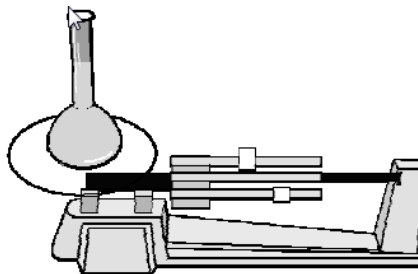


Figura 44: Pesado del picnómetro con el agua destilada

La temperatura debe ser medida cuando cuando se realizan las medidas para el cálculo debido a que la densidad del agua varía con la temperatura. La densidad de partículas se calcula con ayuda de la siguiente fórmula:

$$D_p = \frac{D_a * (p_s - p)}{(p_s - p) - (p_{sa} - p_a)}$$

donde:

$D_p$  = densidad de partículas

$D_a$  = densidad del agua

$p_s$  = peso de picnómetro con el suelo seco

$p$  = peso del picnómetro vacío

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

psa = peso del picnómetro con suelo y agua

pa = peso del picnómetro con agua

## Metodología 2 (método de volúmenes)

La densidad de partículas o la densidad real se pueden determinar midiendo el volumen desplazado de agua por una masa conocida de suelo en un frasco volumétrico. Por lo anterior es necesario conocer los valores de densidad del agua en función de la temperatura (Cuadros 4 y 5).

### Instrucciones

Se pueden estimar valores de densidad real de suelos sin materia orgánica y con materia orgánica, de diferentes clases y tipos de suelo o de diferentes horizontes en un mismo perfil de suelo. Los valores con materia orgánica de densidad real son menores a los que no incluyen materia orgánica.

### Materiales

Para realizar la determinación de la densidad real de partículas se necesita:

- Muestra de 100 gramos de suelo seco.
- Embudo boca ancha
- Balón aforado contenedor de 250 ml
- Agua destilada hervida
- alcohol amílico
- Agitador de vidrio
- Plantilla
- Termómetro
- Balanza de precisión
- Paño de tela, seco

### Procedimiento

- Cada balón se identifica, se lava cuidadosamente y se seca totalmente en una estufa.
- Luego se pesa seco y se llena después con agua destilada y hervida previamente hasta la marca del aforo
- Se mide el peso del balón con el agua y la temperatura del agua con el objeto de conocer su densidad
- Por diferencia se saca el peso del agua , se conoce su densidad y se puede conocer entonces el volumen que ocupa en el balón aforado

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

- Se determina una masa de aproximadamente 100 gramos de suelo, de cada una de las muestras para analizar
- Se apuntan los datos en el cuadro 6
- En un balón aforado previamente y con ayuda de un embudo boca ancha se agrega la masa de suelo determinada anteriormente, se debe tener especial cuidado de no generar pérdidas de la muestra pues agregaría un error en los resultados finales.
- Se determina la masa.
- Se agrega al balón aforado aproximadamente 100 ml de agua destilada previamente hervida.
- Se coloca el balón con la muestra de suelo y el agua en una parrilla eléctrica y se lleva a ebullición por 10 minutos, esto con el objetivo de sacar el aire de las partículas de suelo.
- Se deja enfriar alrededor de los 34 grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), para aforar con agua hervida. En caso necesario se agregan gotas de alcohol amílico para mejorar la visibilidad de la marca de aforo.
- Una vez aforado se registra su masa y su temperatura en grados Celsius.
- Se realizan los cálculos conforme el cuadro 6 lo indica

## Preguntas

- 1- ¿La textura influye en el valor de la densidad real de partículas?
- 2- ¿La estructura influye en el valor de la densidad real de partículas?
- 3- ¿La materia orgánica influye en el valor de la densidad real de partículas?

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

Cuadro 4: Densidad del agua a temperaturas de los 15 a los 35 °C de rango

t (°C)	$\rho_{ag}$ (g/ml)	t (°C)	$\rho_{ag}$ (g/ml)
15	0,99913	26	0,99681
16	0,99897	27	0,99654
17	0,99880	28	0,99626
18	0,99862	29	0,99597
19	0,99843	30	0,99567
20	0,99823	31	0,99537
21	0,99802	32	0,99505
22	0,99780	33	0,99473
23	0,99756	34	0,99440
24	0,99732	35	0,99406
25	0,99707		
1 ml $\approx$	1,000028 cm <sup>3</sup>		

**CC BY-NC-ND 4.0**

Cuadro 5: Densidad del agua en el rango de temperaturas de 0 a los 100 °C

Presión externa: 1 atm = 101 325 Pa					
Temperatura	Densidad	Temperatura	Densidad	Temperatura	Densidad
°C	kg / m <sup>3</sup>	°C	kg / m <sup>3</sup>	°C	kg / m <sup>3</sup>
0 (hielo)	917,00	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	1000,00	38	993,00	72	976,47
5	1000,00	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	989,80	80	971,60
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	963,70
25	997,13	59	983,64	93	963,01
26	996,86	60	983,13	94	962,31
27	996,59	61	982,60	95	961,62
28	996,31	62	982,07	96	960,91
29	996,02	63	981,54	97	960,20
30	995,71	64	981,00	98	959,49
31	995,41	65	980,45	99	958,78
32	995,09	66	979,90	100	958,05

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

Cuadro 6: Tabulación y cálculo de la densidad real de partículas

Número de muestra	1	2
1-Masa del balón seco		
2-Masa de balón + agua al calibrar		
3-Masa de agua al calibrar(2-1)		
4-Temperatura del agua al calibrar		
5-Densidad del agua al calibrar		
6-Volumen del balón(3/5)		
7-Masa de balón seco + suelo		
8-Masa del suelo(7-1)		
9-Masa del balón + suelo + agua en la lectura		
10-Temperatura del suelo + agua en la lectura		
11-Densidad del agua en la lectura		
12-Volumen del agua(9-7)/11		
13-Volumen del suelo(6-12)		
14-Densidad de partículas(8/13)		

### Metodología 3 (método de la fórmula de porosidad total del suelo)

La densidad de partículas o la densidad real se pueden determinar de manera muy aproximada al valor real midiendo los valores de la densidad aparente y el porcentaje de porosidad total del suelo.

Además, este método puede presentar valores un poco menores al valor real de la densidad real de las partículas del suelo cuando el suelo tiene altos contenidos de materia orgánica ya que, en la vida real; el suelo está compuesto por mezclas de sustancias minerales y sustancias orgánicas además del agua y del aire y en ese caso, a menores contenidos de materia orgánica en el suelo estudiado, el valor encontrado de densidad real de partículas por esta metodología es más exacto al valor real.

### Instrucciones

Se pueden estimar valores de densidad real de suelos sin materia orgánica y con valores muy baje de materia orgánica (esta última va a presentar una ligera desviación del valor real), de diferentes clases y tipos de suelo o de diferentes horizontes en un mismo perfil de suelo.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

Normalmente los valores de densidad real de partículas con contenidos bajos de materia orgánica son ligeramente menores a los que no incluyen materia orgánica. No obstante en valor de densidad real de partículas del suelo en su definición debe ser totalmente eliminada la materia orgánica aunque algunas metodologías de eliminación de dicha materia orgánica no son completamente perfectas.

## Materiales

Para realizar la determinación de la densidad real de partículas por la metodología de la fórmula de porosidad se necesita:

- Cilindros para toma de muestras de suelo indeformadas
- Muestra de suelo indeformada
- Mazo
- Horno
- Capsulas de aluminio para secar al horno
- Regla graduada milimétricamente
- Balanza de precisión
- espátula

## Procedimiento

Para cálculo del porcentaje total de poros o de porosidad total (se explicará más adelante) se utilizan los datos de densidad real y densidad aparente (se explicará más adelante) utilizándose la fórmula:

$$\%Porosidad = \left[ 1 - \left( \frac{Da}{Dr} \right) \right] \times 100$$

o

$$\%Porosidad = \%P = \left( \frac{Dr - Da}{Dr} \right) * 100$$

donde:

$\%Porosidad = \%P =$  porcentaje de porosidad total del suelo o porcentaje total de poros ( $\text{cm}^3$  de poros /  $\text{cm}^3$  de suelo)

$Dr =$  Densidad real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$Da =$  Densidad aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (se encuentran explicado en la sección humedad gravimétrica, humedad volumétrica del suelo, densidad aparente, porosidad total del suelo y porosidad de aireación llamado porcentaje de aire en el suelo).

### **CC BY-NC-ND 4.0**

Como se puede observar, de dicha ecuación además de la densidad aparente se necesitaría solamente calcular o estimar el valor de porosidad total ya que, despejando la densidad real de la ecuación anterior obtenemos la siguiente ecuación:

$$Dr = \frac{Da}{1 - \frac{\%P}{100}}$$

El porcentaje total de porosidad del suelo no se calcula como se muestra explicado en la sección “Humedad gravimétrica, densidad aparente, volumétrica del suelo, porosidad total del suelo y porosidad de aireación llamado porcentaje de aire en el suelo”, lo cual; para su cálculo se utilizarán los siguientes conceptos:

La porosidad total del suelo se encuentra normalmente llena con aire (en el caso de estar el suelo seco), con agua (en el caso de que el suelo se encuentre completamente lleno de agua o en estado saturado) y con aire y agua (en el caso de que el suelo se encuentra húmedo). Si un suelo dado expresado en una muestra de suelo indeformada se satura correctamente, se considera que todo el espacio poroso se encuentra lleno de agua en su totalidad (aunque no necesariamente sucede en la totalidad del espacio poroso) y si una muestra de suelo se seca durante 24 horas a 105 – 110 °C se considera que la muestra de suelo está completamente lleno de aire (aunque no necesariamente sucede en la totalidad del espacio poroso).

Con estos dos conceptos anteriores se puede tener el peso del suelo en saturado y el peso del suelo en seco expresado en una muestra indeformada y utilizando el valor de la densidad del agua que es 1,0 g/cm<sup>3</sup> podemos directamente conocer por diferencia entre el peso saturado y el peso seco, el volumen de agua que estaba ocupando todo el espacio poroso y este volumen, correspondería al volumen total de poros que existiría en la muestra de suelo.

Para calcular el espacio poroso total se puede realizar mediante la fórmula siguiente:

$$Volmaxag = \frac{Pssat - Pssec}{Dagua}$$

$$Volmaxagu = Voltotporos$$

donde:

Volmaxag = volumen máximo de agua en una muestra de suelo (cm<sup>3</sup>)

Pssat = peso del suelo de la muestra saturada (g)

#### **CC BY-NC-ND 4.0**

$P_{ssec}$  = peso del suelo de la muestra en estado seco (g) (muestra secada en un horno a 105 °C hasta peso constante)

$D_{agua}$  = densidad del agua ( $g/cm^3$ )

$V_{oltotporos}$  = volumen total de poros en la muestra indeformada del suelo

Luego para calcular el porcentaje total de poros en la muestra del suelo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\%P = \frac{V_{oltotporos}}{V_{oltotmuesuel}} * 100$$

Donde

$V_{oltotporos}$  = volumen total de poros en la muestra indeformada del suelo ( $cm^3$ )

$V_{oltotmuesuel}$  = volumen total de la muestra del suelo ( $cm^3$ )

Ejemplo:

Se tiene una muestra de suelo de  $100 cm^3$  a la cual el peso de la muestra saturada fue de 191 g y el peso de la muestra de suelo seca fue de 143 g. Calcular la densidad real de partículas por el método de la fórmula de porosidad.

$$V_{olmaxag} = \frac{P_{ssat} - P_{ssec}}{D_{agua}}$$

$$V_{olmaxag} = \frac{191 g - 143 g}{1,0 \frac{g}{cm^3}}$$

$$V_{olmaxag} = 48 cm^3$$

$$\%P = \frac{48 cm^3}{100 cm^3} * 100$$

$$\%P = 48 \%$$

Calculando la densidad aparente por la metodología indicada tenemos:

#### **CC BY-NC-ND 4.0**

75

$$Da = \frac{143 \text{ g}}{100 \text{ cm}^3}$$

$$Da = 1,43 \text{ g/cm}^3$$

Calculando la densidad real de partículas tenemos:

$$Dr = \frac{1,43}{1 - \frac{48}{100}}$$

$$Dr = 2,75 \text{ g/cm}^3$$

Como se puede observar, el valor encontrado es totalmente acorde o normal a los valores de densidad real de partículas ya que normalmente las arenas tienen un valor en promedio de  $2,65 \text{ g/cm}^3$  y las arcillas se encuentran en un rango entre  $2,45 - 2,9 \text{ g/cm}^3$ .

#### **Metodología 4 (método del razonamiento de la deducción de volúmenes y masas de una muestra de suelo)**

Esta metodología es altamente influenciada al error entre mayor sea el contenido de materia orgánica en el suelo. Por esto, un suelo con un 2% de materia orgánica tendrá menor error respecto a un suelo que tiene un 20% de materia orgánica.

Cuando se toma una muestra de suelo indisturbada en un cilindro se tiene de manera general sólidos, líquidos y gases (también se tienen raíces, hongos, bacterias y muchos otros pero normalmente no se consideran) donde lo que se necesita es conocer la masa de suelo y el volumen del suelo sin contemplar el espacio poroso. Por ello el volumen total del suelo es una muestra está dado por la siguiente ecuación:

$$V_{tot} = V_s + V_{ai} + V_{ag}$$

$$V_{tot} = V_s + V_{poros}$$

Donde:

$V_{tot}$  = volumen total ( $\text{cm}^3$ )

$V_s$  = volumen de suelo ( $\text{cm}^3$ )

$V_{ai}$  = volumen del aire ( $\text{cm}^3$ )

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

$V_{ag}$  = volume del agua ( $\text{cm}^3$ )

$V_{poros}$  = volumen de poros ( $\text{cm}^3$ )

Como la densidad real es el peso suelo seco dividido entre el volumen del suelo sin el espacio poroso, entonces se puede tomar ambos valores de la siguiente manera:

- 1- El peso del suelo seco (g) de la muestra se toma después de haber metido al suelo en un horno por 24 horas a una temperatura de  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- 2- El volumen del suelo sin el espacio poroso se puede tomar de la ecuación anterior de la siguiente manera:
  - 2.1. Se satura la muestra desde abajo hacia arriba del cilindro muestreador para sacarle todo el aire que se encuentra en dicha muestra
  - 2.2. Se pesa el cilindro con la muestra del suelo (g) completamente saturado
  - 2.3. Se seca el suelo en un horno hasta secarlo completamente por 2 días a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - 2.4. Se pesa el suelo con la muestra (g) completamente seco
  - 2.5. Se le resta al valor del peso del suelo (g) húmedo el valor del peso del suelo seco (g) para obtener el peso total del agua (g) que se evaporó
  - 2.6. El peso del agua que se evaporó (g) es igual al volumen del agua ( $\text{cm}^3$ ) que se evaporó pero, al estar la muestra completamente saturado entonces el total del agua que se evaporó es igual al volumen total de poros ( $\text{cm}^3$ ) que se encuentra en la muestra
  - 2.7. Se calcula el volumen total ( $\text{cm}^3$ ) del suelo mediante la siguiente fórmula:

$$V_s = V_{tot} - V_{poros}$$

- 3- Se calcula la densidad real de partículas con los valores encontrados del peso de suelo seco y el volumen total del suelo sin incluir el volumen de los poros.
- 4- **Corrección de la densidad real de partículas:** esta se realiza calculando el volumen de la materia orgánica en el suelo pero se debe de tener cuidado en el procedimiento a utilizar al estimar la cantidad o el porcentaje de la materia orgánica. A menudo el porcentaje de materia orgánica se confunde con el porcentaje del humus en el suelo debido al procedimiento utilizado y el error consiste en que la materia orgánica del suelo no solamente es el humus ya que existen diferentes estados de la materia orgánica del suelo como son fibrosa, semi fibrosa y descompuesta completamente (esta última es la que se considera como húmus del suelo cuando ya son coloides orgánicos del suelo) pero si que todo el humus si es materia orgánica pero no la única.
- 5- Se calcula el porcentaje de la materia orgánica con la siguiente fórmula:

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

$$mo(\% \text{gravimétrico}) = \frac{PSS_{60^{\circ}\text{C}-72\text{h}} - PSC_{700^{\circ}\text{C}-4\text{h}}}{PSS_{60^{\circ}\text{C}-72\text{h}}} * 100$$

donde:

mo(%gravimétrico) = % de Materia Orgánica gravimétrico ( $g_{mo} / 100_{\text{suelo}}$ )

$PSS_{(105^{\circ}\text{C}-24\text{h o } 60^{\circ}\text{C}-72\text{h})}$  = peso del suelo secado a 105 °C (g)

$PSC_{(445-24\text{h o } 350-16\text{h o } 550-14\text{h o } 700-4\text{h } ^{\circ}\text{C})}$  = peso calcinado del suelo a la temperatura y tiempos predeterminados (g)

- 6- Se puede observar que el porcentaje de materia orgánica es con base al peso y debe ser con base al porcentaje del volumen para poder eliminar este volumen de la materia orgánica y obtener un volumen de suelo sin el espacio poroso y sin el volumen de la materia orgánica. Esto se debe de hacerse mediante la siguiente forma:

$$mo\%vol = \frac{mo(\% \text{gravimétrico})}{\text{Densidad de la materia orgánica}} : \left( \frac{\frac{g_{mo}}{100g_{\text{suelo seco}}}}{\frac{g_{mo}}{cm^3_{\text{suelo seco}}}} \right)$$

$$mo\%vol = \text{Número de } \frac{cm^3}{100g_{\text{suelo seco}}}$$

De esta fórmula podemos ver que necesitamos el peso de la muestra de suelo seco para poder determinar el volumen de la materia orgánica en dicho suelo.

Normalmente la densidad aparente de la materia orgánica se encuentra entre 0,1 g/cm<sup>3</sup> a 0,3 g/cm<sup>3</sup> aunque algunos autores mencionan que puede llegar hasta 0,6 g/cm<sup>3</sup>.

Un ejemplo de cálculo es el siguiente: Se tiene un cilindro de toma de muestras indeformadas completamente lleno de suelo de 100 cm<sup>3</sup> donde se encontró 50% de humedad volumétrica al secarse desde saturado hasta suelo seco, contenido de materia orgánica del 8 % (mo) y una densidad real de la materia orgánica de 1,10 g/cm<sup>3</sup>. El peso de suelo seco total fue de 110 g. Calcular la densidad real de partículas del suelo.

Solución:

El volumen de poros es el mismo volumen que el agua que se evaporó desde saturado hasta el suelo seco. Entonces:

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

$$\text{Volumen de poros} = 100 \cdot 30 / 100 = 30 \text{ cm}^3$$

Aplicando el procedimiento y la ecuación para estimar el volumen de la materia orgánica

$$\text{Volumen de la mo cm}^3 / 100 \text{ g suelo seco} = \frac{\text{mo (\% gravimétrico)}}{\text{Densidad de la materia orgánica}}$$

$$\text{Volumen de la mo cm}^3 / 100 \text{ g suelo seco} = \frac{8 \text{ g mo} / 100 \text{ g suelo seco}}{1,1 \text{ g mo} / \text{cm}^3 \text{ mo}}$$

$$\text{Volumen de la mo cm}^3 / 100 \text{ g suelo seco} = \frac{0,07273 \text{ mo cm}^3}{\text{g suelo seco}}$$

$$\text{Volumen de la mo cm}^3 = \frac{0,07273 \text{ mo cm}^3 * 110 \text{ g suelo seco}}{\text{g suelo seco}} =$$

$$\text{Volumen de la mo cm}^3 = 8,0003 \text{ mo cm}^3$$

$$\text{Volumen total del suelo} = 100 \text{ cm}^3 \text{ totales} - 8,0003 \text{ mo cm}^3 - 50 \text{ cm}^3 \text{ poros}$$

$$\text{Volumen total del suelo} = 41,9997 \text{ cm}^3$$

$$\text{La densidad real del suelo} = 110 \text{ g} / 41,2724 \text{ cm}^3$$

La densidad real del suelo = 2,6191 g / cm<sup>3</sup> donde esta no contiene el volumen de los poros ni el volumen de la materia orgánica

Aquí podemos hacer la siguiente pregunta:

¿Cuál sería el valor de la densidad real si no se elimina el volumen de la materia orgánica?

$$\text{Volumen total del suelo} = 100 \text{ cm}^3 \text{ totales} - 50 \text{ cm}^3 \text{ poros}$$

$$\text{Volumen total del suelo} = 50 \text{ cm}^3 \text{ (donde NO se ha eliminado el volumen de la materia orgánica)}$$

$$\text{La densidad real del suelo} = 110 \text{ g} / 50 \text{ cm}^3$$

La densidad real del suelo = 2,20 g / cm<sup>3</sup> donde esta **NO** contiene el volumen de los poros pero **SI** contiene el volumen de la materia orgánica y el valor que se obtiene es erróneo y este error se comete a menudo

**CC BY-NC-ND 4.0**

# Conductividad hidráulica saturada de muestras de suelo indisturbadas por los métodos de carga constante y carga variable y otros métodos de campo

## Objetivo

Determinar la conductividad hidráulica en muestras de suelo inalteradas.

## Introducción

Esta cualidad es la que define las posibilidades que tiene el agua de moverse dentro del suelo saturado o es la habilidad del suelo saturado de permitir el paso de agua a través de él; que por su definición, es una cualidad que se relaciona estrechamente con el drenaje del suelo.

Esta varía tanto en los horizontes de un mismo perfil de suelo como en diferentes clases y tipos de suelos, debido a mineralogía del suelo, materia orgánica, actividad macro y microbiológica, manejo del suelo, tipo de iones predominantes, tipo de viscosidad del fluido y otros. Además, la conductividad hidráulica saturada depende no sólo del suelo sino también del líquido que fluye (Cuadros 7, 8 y 9).

Sus unidades son de longitud por unidad de tiempo siendo común utilizar cm/s, cm/min, cm/h y m/d.

En el suelo se presenta la conductividad hidráulica tanto en un flujo saturado como en flujo no saturado y a la unión de ellas se le llama la conductividad hidráulica total. Al movimiento del agua en flujo saturado se le llama conductividad hidráulica saturada y al movimiento del agua en flujo no saturado se le llama de varias maneras (como al proceso de infiltración de agua en el suelo que es un flujo no saturado de agua) y una de ellas es conductividad hidráulica no saturada.

La conductividad hidráulica saturada se establece por definición que se presenta desde el punto de saturación hasta el punto a capacidad de campo donde se muestra un flujo de agua principalmente en los macroporos del suelo y la conductividad hidráulica no saturada se presenta desde el punto de capacidad de campo hasta el punto higroscópico donde se muestra un flujo de agua principalmente en los meso y microporos del suelo. La conductividad hidráulica saturada se ve regida fundamentalmente por la fuerza que ejerce la atracción de la gravedad hacia el centro de la tierra y la conductividad hidráulica no saturada está regida fundamentalmente por los potenciales del agua en el suelo.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

Por lo anterior la dirección de la conductividad hidráulica saturada por lo general se presenta como un flujo de los horizontes superiores del suelo hacia los horizontes inferiores del mismo a excepciones como cuando existen acuíferos confinados o semiconfinados que empujan el agua en contra de la fuerza de la gravedad por medio de la presión de dichos acuíferos desplegando un flujo ascendente, y también; cuando se presentan altas cantidades de precipitación y el nivel freático asciende. Existen casos especiales como cuando los suelos están en pendiente y se dan las condiciones necesarias para que se muestre una conductividad hidráulica saturada a favor de dichas pendientes.

El flujo de la conductividad hidráulica no saturada del suelo se puede presentar en cualquier dirección dentro del perfil del mismo donde en el suelo siempre se estará equilibrando los potenciales de agua no saturada en el suelo. Este flujo se manifiesta desde un punto de mayor potencial de agua en el suelo hacia otro punto de menor potencial de agua en el suelo. Como ejemplo se puede indicar que cuando la superficie del suelo pierde humedad, en este sector del perfil del suelo se genera un potencial de agua muy bajo (muy negativo) y en las capas subsuperficiales se encuentra humedad mostrando un alto potencial de agua en el suelo (menos negativo con valores cercanos a potencial cero); por lo cual se presenta un flujo ascendente de agua en el perfil del suelo para equilibrar los potenciales de agua entre ambos puntos.

Por lo anterior la conductividad hidráulica total del suelo es fuertemente dependiente de su contenido de humedad y puede disminuir varios órdenes de magnitud al pasar del estado de saturación a punto de marchitez permanente. La conductividad hidráulica del suelo es máxima cuando está saturado, pues todos los poros están llenos con agua y actúan como conductores; además, a mayor tamaño de poros, mayor es la conductividad, por lo cual es una propiedad que depende fuertemente de la estructura, la textura y la composición mineralógica de las arcillas, y además; de la continuidad, distribución, forma, y tortuosidad de la porosidad del suelo y como se mencionó, del tamaño de la misma.

La conductividad hidráulica saturada del suelo se puede medir tanto en el campo como en el laboratorio. La conductividad hidráulica del suelo se determina, en laboratorio, midiendo el tiempo que gasta en pasar un volumen determinado de agua a través de una columna de él, saturado con agua; para hacer esta prueba se utilizan los permeámetros, los cuales pueden ser de cabeza constante (el más común) y de cabeza variable (especial para suelos de baja permeabilidad).

Para llevar a cabo la determinación, lo más recomendable es tomar muestras, sin disturbar, en sentido vertical y replicadas por lo menos 4 veces; pueden fabricarse los cilindros con tubería

**CC BY-NC-ND 4.0**

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)**

de PVC o de metal, según la dureza del suelo, a los cuales se les debe biselar uno de los bordes para facilitar su penetración en el suelo.

### **Factores que afectan la conductividad hidráulica:**

1. Textura: los suelos arcillosos generalmente tienen conductividades hidráulicas bajas comparadas con los arenosos, esto principalmente por efecto del tamaño de los poros, ya que al medirse la permeabilidad el suelo está saturado, por lo tanto la tensión de humedad es baja y su efecto es mínimo.
2. Materia orgánica: un contenido adecuado de materia orgánica favorece la permeabilidad en las capas superiores ya que mejora la estructura.
3. Propiedades físicas y químicas del suelo como: densidad aparente, estabilidad estructural, solución del suelo, expansión del suelo, actividad microbial, tamaño, forma y continuidad del espacio poroso, etc. También los suelos compactados, consolidados y adensados naturalmente tienden a tener valores bajos.

La determinación de la conductividad hidráulica es un aspecto muy importante para trabajos de ingeniería de suelos, tales como sistemas de drenaje, almacenamiento de agua, programas de conservación de suelos y aguas y otros.

### **Materiales**

Para realizar la determinación de la conductividad hidráulica de las muestras, se necesita:

- Muestras indisturbadas de suelo contenidas en cilindros muestreadores de cada horizonte a analizar
- Círculos de tela tipo gasa o malín con diámetros mayores al cilindro muestreador en 2,0 – 3,0 cm
- Ligas o cilindros de hule de 2,0 – 3,0 mm de alto, de 10,0 a 20,0 mm menor del diámetro menor al cilindro que contiene la muestra para sostener el malín
- Cilindros de hule de 4,0 cm de alto, de 1,0 a 2,0 cm menor del diámetro menor al cilindro que contiene la muestra para la unión de los dos cilindros
- Recipiente para introducir los cilindros

**CC BY-NC-ND 4.0**

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)**

- Cilindros muestreadores vacíos y de las mismas proporciones que los que contienen las muestras de suelo
- Embudo boca ancha
- Recipiente de vidrio de 150 o 200 ml
- Agua
- Piseta
- Probeta de 50 ml
- Cronómetro

Cuadro 7: Valores comparativos de conductividad hidráulica del suelo (mm/h cm/h y m/d)

CLASE	K <sub>sat</sub> mm/h	Conductividad Hidráulica		Interpretación
		cm/hora	m/día	
Muy alta	> 360	< 0,1	< 0,03	Muy Lenta
Alta	36-360	0,1 - 0,5	0,03 - 0,12	Lenta
Mod. Alta	3,6-36	0,5 - 1,6	0,12 - 0,38	Mod. Lenta
Mod. Baja	0,36-3,6	1,6 - 5,0	0,38 - 1,20	Moderada
Baja	0,036-0,36	5,0 - 12,0	1,20 - 2,90	Mod. Rápida
Muy baja	<0,036	12,0 - 18,0	2,90 - 4,30	Rápida
		>18,0	> 4,30	Muy Rápida

Cuadro 8: Valores de conductividad hidráulica para diferentes tipos de sedimentos

Tipo Sedimento	Conductividad Hidráulica (m/día)				
	Autor				
	Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Grava	25 a 2500	100 a 10 <sup>5</sup>	100 a 10 <sup>6</sup>	10 a 1000	
Arena gruesa	0,1 a 500	0,001 a 1000	1 a 1000	1 a 100	1 a 100
Arena media	0,1 a 50			0,01 a 1	0,01 a 1
Arena fina	0,02 a 20			0,001 a 0,1	
Arena arcillosa			0,01 a 100	0,001 a 0,1	
Arcilla	10 <sup>-6</sup> a 4*10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-7</sup> a 10 <sup>-3</sup>		10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>

### CC BY-NC-ND 4.0

Cuadro 9: Valores de conductividad hidráulica para diferentes texturas del suelo

Textura	K (m d <sup>-1</sup> )	K (cm h <sup>-1</sup> )
Arenosa	15	62,5
Areno franca	13,5	56,3
Franco arenosa	3,0	12,5
Franco limosa	0,6	2,5
Franca	0,6	2,5
Franco arcillo arenosa	0,54	2,3
Franco arcillo limosa	0,15	0,6
Franco arcillosa	0,21	0,9
Arcilla arenoso	0,19	0,8
Arcillo limosa	0,09	0,4
Arcillosa	0,11	0,5

### Métodos para determinar la conductividad hidráulica de los suelo

Para una predicción del movimiento de agua en el suelo se requiere una medición cuidadosa de los parámetros hidráulicos del suelo. Para ello se han desarrollado una serie de métodos de laboratorio y campo; sin embargo, hay que considerar que estos métodos presentan problemas con la variabilidad espacial, la exactitud de los procedimientos y la escala de medición. Suelen presentarse grandes dificultades para aplicar resultados obtenidos en mediciones realizadas en pequeñas muestras en el laboratorio a escala de campo (Figuras 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51 y 52).

#### Métodos de laboratorio:

Los métodos de laboratorio para medir la conductividad hidráulica han estado disponible desde los primeros experimentos de Henri Darcy en 1856 (Stephens, 1996), los cuales generalmente utilizan muestras cilíndricas no alterados o cilindros de suelo empacados. Para medir la conductividad hidráulica en el laboratorio se utilizan aparatos llamados permeámetros tanto de carga constante como de carga variable

#### Procedimiento para permeámetros de carga constante (Figuras 45 y 47)

- Se toman muestras indisturbadas del suelo en cilindros
- Se dejan planas las caras del cilindro con la muestra se suelo interna con navajas o cuchillas

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

- Los cilindros se cubren en uno de sus extremos con tela tipo gasa o malín y se aseguran con ligas de hule
- Una vez asegurados los cilindros se introducen en un recipiente sobre su lado cubierto y se agrega agua hasta el borde superior del cilindro más pequeño sin sobrepasarlo, de manera que no se sature la muestra por arriba de su extremo superior encima del cilindro; sino, que se sature toda la muestra de abajo hacia arriba y se dejan hasta total saturación
- Cuando se observe la parte superior de la muestra en estado de saturación, se coloca otro cilindro sobre el extremo abierto del que contiene la muestra y se asegura con cilindros de hule
- Se prepara la tabla perforada, el embudo y el frasco colector sobre una superficie firme y sin vibraciones
- Se disponen los cilindros sobre el embudo y se llena con agua hasta lograr un goteo regular manteniendo una carga constante
- Logrado el goteo regular se dispone un frasco colector y se recoge el agua que atraviesa la muestra por un periodo de tiempo previamente calibrado
- Se mide el volumen colectado
- Se calcula la conductividad hidráulica y exprese el resultado en cm/h, cm/min o m/d
- Se repiten los pasos desde el punto séptimo en adelante hasta que la conductividad hidráulica presente una variación no mayor al 10% por tres veces consecutivas

El procedimiento y las ecuaciones para calcular la conductividad hidráulica es la siguiente:

- 1- Se calcula el caudal en base al volumen recogido en el tiempo establecido

$$Q = \frac{V}{t}$$

donde:

V = volumen (cm<sup>3</sup>)

t = tiempo (min)

Q = Caudal (cm<sup>3</sup>/ min)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

- 2- Con el dato de caudal previamente calculado se procede a calcular la conductividad hidráulica

$$k = \frac{Q * L}{A * H}$$

donde:

L = Longitud de la columna de suelo (cm)

H = Carga hidráulica o carga de agua (cm)

h = altura de agua sobre la muestra (cm)

A = Área de la sección transversal del flujo

$A = \pi * r^2$  (cm<sup>2</sup>)

K = Conductividad hidráulica (cm/min)

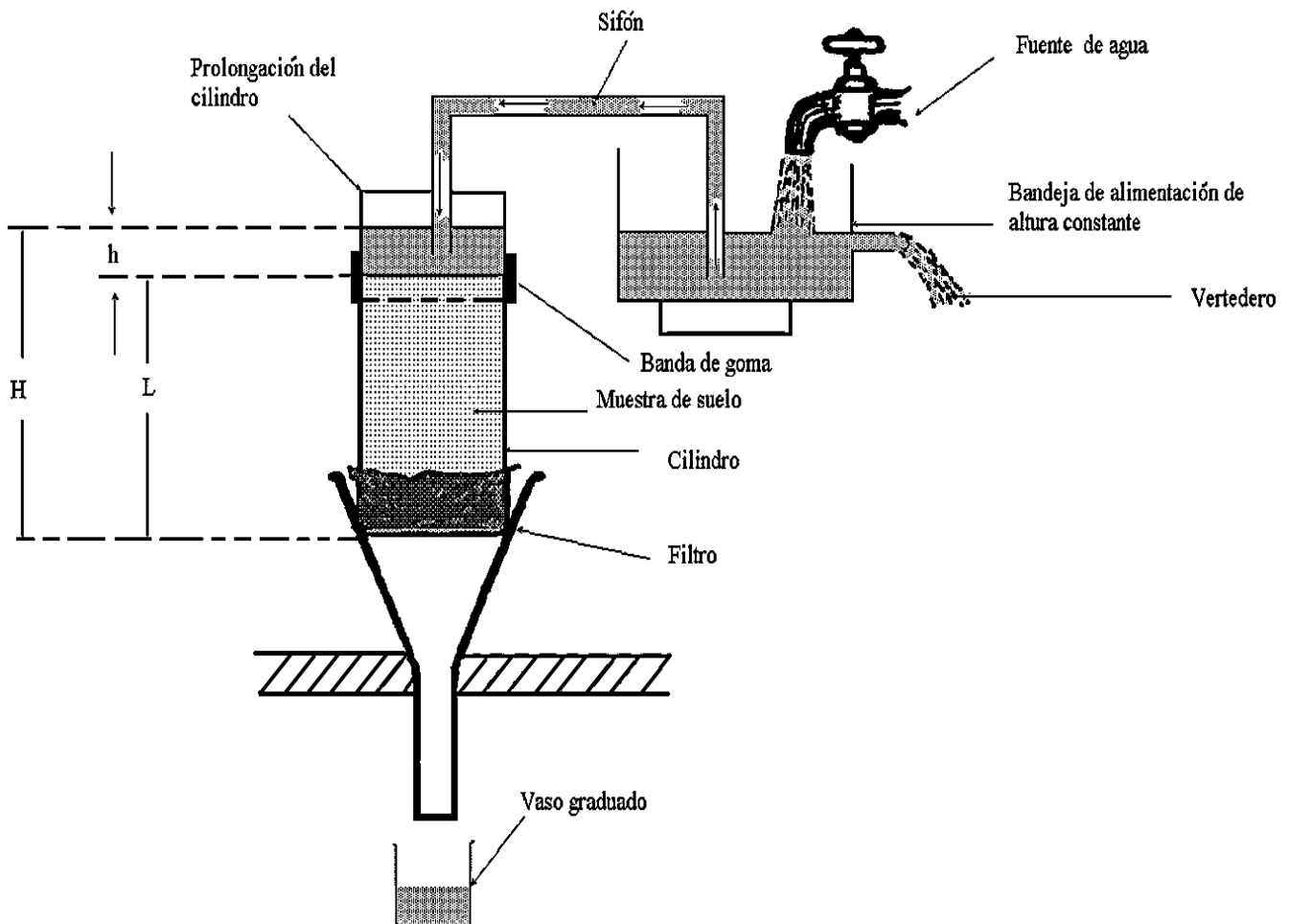


Figura 45: Medida de conductividad hidráulica permeámetro de carga constante

**CC BY-NC-ND 4.0**

## **Procedimiento para permeámetros de carga variable**

El permeámetro de carga variable es similar al de carga constante, excepto que en lugar de mantener una carga constante de agua sobre la superficie de la muestra de suelo no se agrega más agua y al cambiar el nivel de la carga de agua se observa como percola el agua a través de la muestra.

Los cilindros de suelo previamente preparados se humedecen desde la parte inferior hasta alcanzar la saturación. Se toman dos lecturas sucesivas en un mismo descenso del nivel del agua en la bureta (Figura 46) para iguales intervalos de tiempo, luego se aplica agua con la bureta y se anota el tiempo y el nivel del agua sobre en punto de salida después de percolar ( $h_0$ ), cuando se observe un descenso en el nivel o a las 24 horas debe anotarse el volumen del agua sobre el punto de desagüe. Se toma el volumen percolado y el tiempo transcurrido.

Cada pequeño descenso en la altura de la columna de agua por unidad de tiempo representa un flujo de la misma cantidad de agua por unidad de área por unidad de tiempo a través de la columna

**CC BY-NC-ND 4.0**

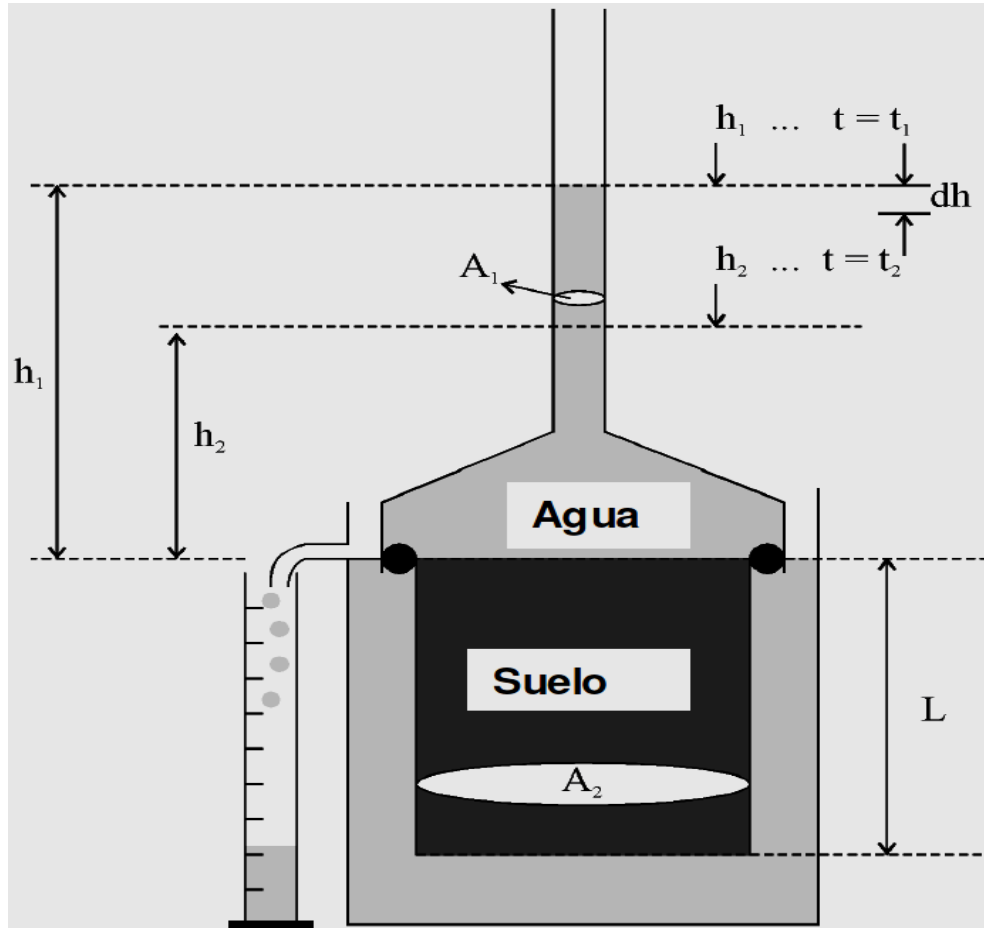


Figura 46: Permeámetro de carga variable con área transversal de la muestra diferente al área transversal del tubo que contiene la altura del agua sobre la muestra

La ecuación para calcular la conductividad hidráulica con un permeámetro de carga variable donde el área transversal de la muestra es diferente al área transversal del tubo que contiene la altura del agua sobre la muestra es para la figura 47):

$$k = \frac{A_1}{A_2} * \frac{L}{(t_2 - t_1)} * \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

donde:

$k$  = conductividad hidráulica (cm/h)

$L$  = longitud de la columna de suelo (cm)

$A_1$  = área de la sección transversal del tubo por encima del suelo que contiene el agua sobre la muestra de suelo (cm<sup>2</sup>)

$A_2$  = área de la sección transversal del suelo (cm<sup>2</sup>)

$h_1$  = altura inicial (cm)

**CC BY-NC-ND 4.0**

$h_2$  = altura final (cm)

La ecuación para calcular la conductividad hidráulica con un permeámetro de carga variable donde el área transversal de la muestra es igual al área transversal del tubo que contiene la altura del agua sobre la muestra es para la figura 33:

$$K = \frac{L}{\Delta t} 2.3 \log \frac{H_i}{H_f}$$

donde:

$K$  = conductividad hidráulica (cm/h)

$L$  = largo de la muestra (cm)

$\Delta t$  = intervalo de tiempo desde  $H_i$  a  $H_f$  (h)

$H_i$  = altura inicial del agua (cm)

$H_f$  = altura final del agua (cm)

El método de carga variable es más exacto en el rango de conductividad hidráulica entre  $10^{-3}$  a  $10^{-7}$  cm/s, mientras que el método del permeámetro de carga constante es mejor para suelos con conductividad hidráulica en el rango desde mayor de 1,0 cm/s a  $10^{-5}$  cm/s.

La determinación de la conductividad hidráulica saturada mediante muestras cilíndricas tiene algunas ventajas, ya que la misma muestra puede ser usada para medir otras propiedades físicas, tales como: retención de humedad, conductividad hidráulica no saturada, densidad aparente, porosidad total y distribución de tamaños de poros, y otros índices.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

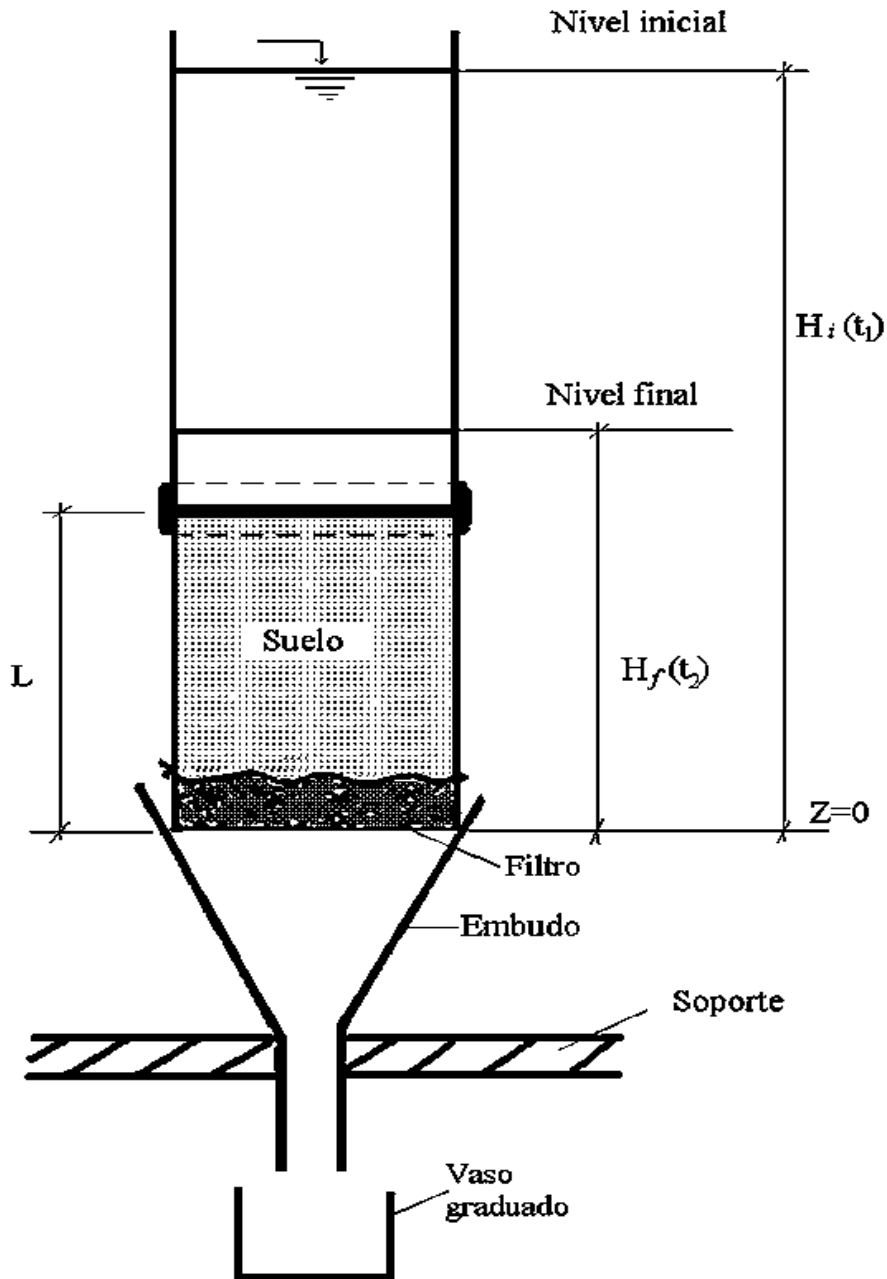


Figura 47: Permeámetro de carga variable con área transversal de la muestra igual al área transversal del tubo que contiene la altura del agua sobre la muestra

## Análisis de medidas de campo respecto a la conductividad hidráulica para su cálculo

### Por medio de la medida de la Infiltración

Cuando se hacen medidas en el campo para estimar infiltración de agua en el suelo se puede estimar la conductividad hidráulica (Figuras 48, 49, 50, 51 y 52) que a menudo le llaman o es usado como sinónimo permeabilidad de agua en el suelo, aunque en realidad no es lo mismo

**CC BY-NC-ND 4.0**

ya que la conductividad hidráulica incluye las dos tipos de factores que son las propiedades que dependen del suelo y las propiedades que dependen del líquido mientras que la permeabilidad llamada también permeabilidad intrínseca depende fundamentalmente del suelo.

La permeabilidad de los suelos para el caso de las arenas van desde 0,1 m/d en arenas muy finas hasta 30 m/d en arenas gruesas; para el caso de las arcillas van desde 0,01 m/d hasta 30,0 m/d donde algunas arcillas en suelo con muy buena estructura son más permeables que las arena gruesas pero sin embargo, las arcillas son generalmente el material menos permeable de los que constituyen el suelo y por ello es frecuente la existencia de suelos con conductividades casi de valor a cero; y los suelos turbosos presentan permeabilidades que van desde 0,01 m/d hasta 10,0 m/d.

Al medir la infiltración en un suelo se toman varios datos y se procesan de donde se calcula la infiltración acumulada normalmente medida en unidades de milímetros y se grafica con respecto al tiempo acumulado que puede ser establecido en las unidades de minutos y se logra una curva. En esta curva se presentan tres secciones que son las siguientes:

- 1- Al inicio se presenta una zona de humedecimiento del suelo (comenzando con suelo seco)
- 2- Luego se presenta una sección de saturación del suelo
- 3- Por último se pasa a una sección de transporte

Como tal, también se presentarían conductividades hidráulicas que serían, la conductividad hidráulica no saturada de humedecimiento, la conductividad hidráulica no saturada del proceso de saturación y la conductividad hidráulica saturada de transporte.

**CC BY-NC-ND 4.0**

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)**

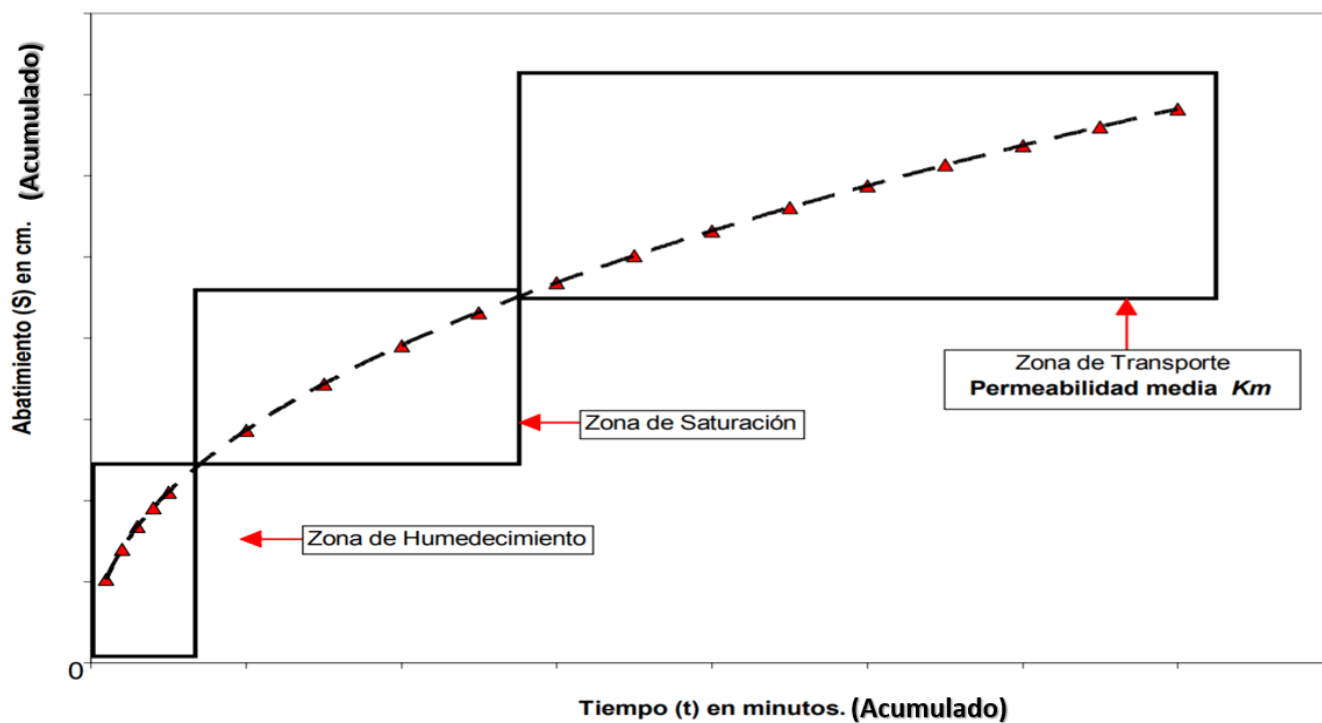


Figura 48: Curva que representa la lámina de infiltración acumulada con sus tres secciones del comportamiento

Tomado de: (Alvarez-Manilla, Valadéz Castro, Garnica Anguas, & Martínez Peña, 2002)

Para mostrar la manera de cálculo se va a hacer por medio del siguiente ejemplo expresado en las figuras 49, 50, 51 y 52 siguientes:

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

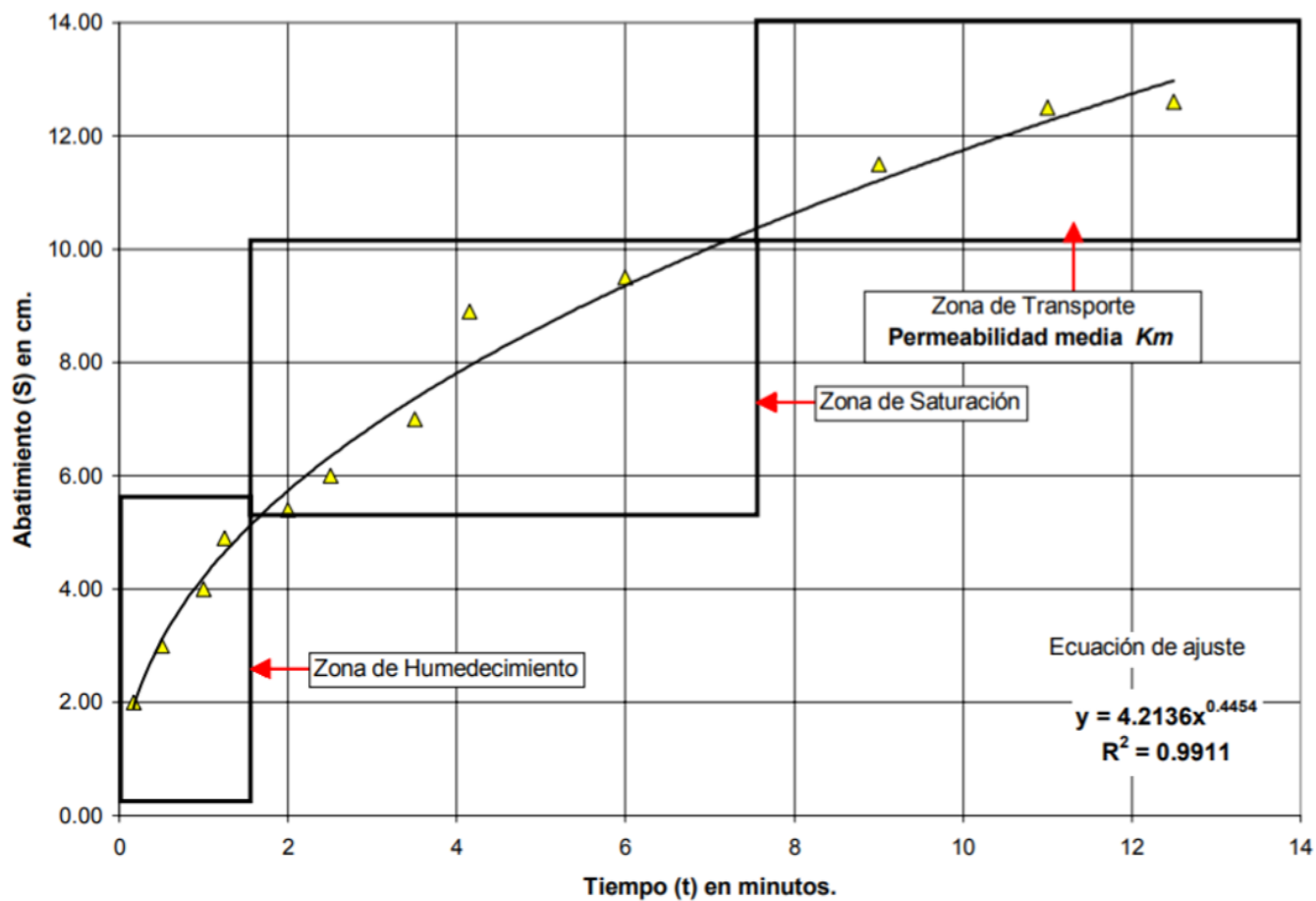


Figura 49: Curva que representa la lámina de infiltración acumulada con sus tres secciones del comportamiento

Tomado de: (Alvarez-Manilla, Valadéz Castro, Garnica Anguas, & Martínez Peña, 2002)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

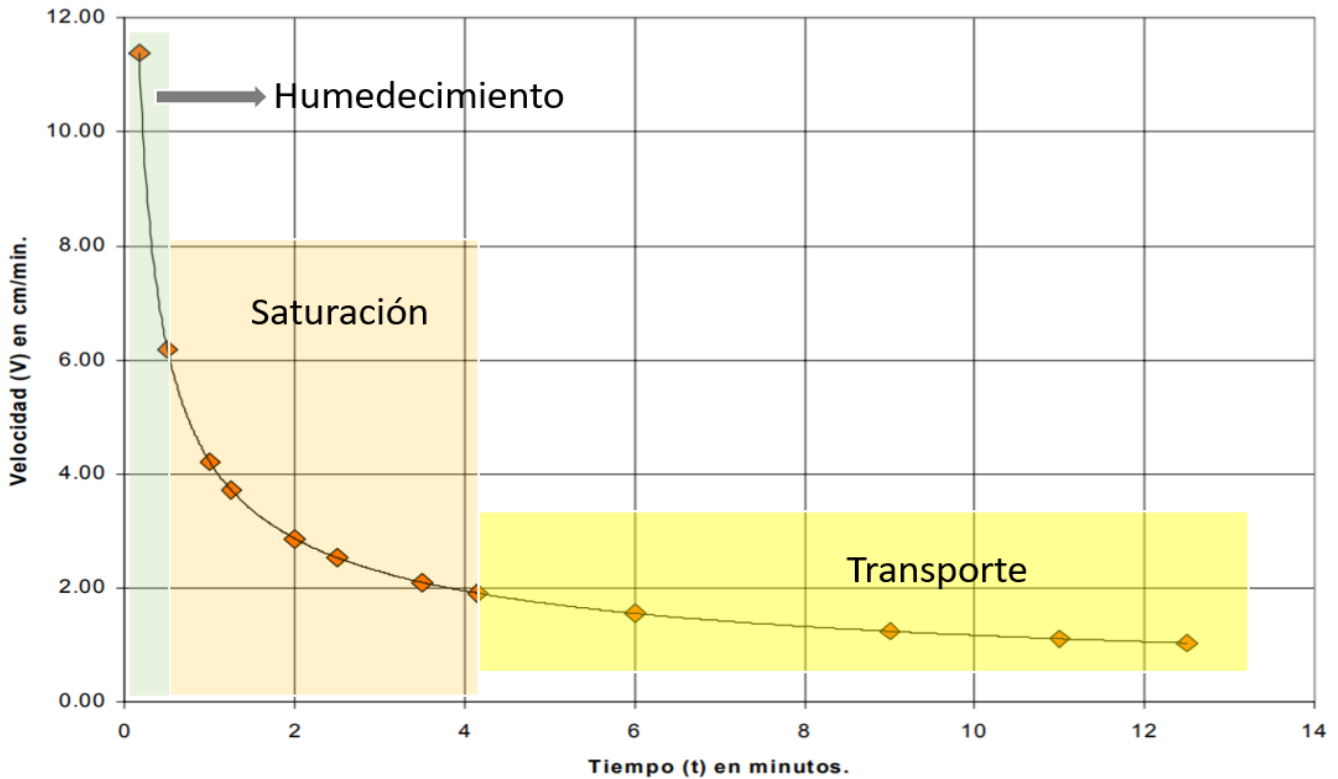


Figura 50: Curva que representa la lámina de infiltración acumulada con sus tres secciones del comportamiento  
 Tomado de: (Alvarez-Manilla, Valadéz Castro, Garnica Anguas, & Martínez Peña, 2002)

Tiempo min	Velocidad cm/min	Velocidad Promedio cm/min
0.16	0.190	Humedecimiento
0.50	0.103	$V_{\bar{h}} = \underline{0.1398}$
0.50	0.103	Saturación $V_{\bar{s}} = \underline{0.0519}$
1.00	0.070	
1.25	0.062	
2.00	0.048	
2.50	0.042	
3.50	0.035	
4.15	0.032	Transporte $V_{\bar{t}} = \underline{0.02231}$
4.15	0.032	
6.00	0.026	
9.00	0.021	
11.00	0.019	
12.50	0.017	

Figura 51: Curva que representa la lámina de infiltración acumulada con sus tres secciones del comportamiento  
 Tomado de: (Alvarez-Manilla, Valadéz Castro, Garnica Anguas, & Martínez Peña, 2002)

**CC BY-NC-ND 4.0**

De la figura 51 podemos ver que la conductividad hidráulica media de la zona de transporte es de 0,02231cm/min que serían 1,3386 cm/hr o 32,13 cm /día o 0,3213 m/día

Utilizando la misma metodología de medida de las capacidades de infiltración de agua en el suelo también para estimar la conductividad hidráulica del suelo se tiene la metodología donde la pendiente de la casi recta que se forma en la sección de transporte de la curva de infiltración acumulada es el valor de la conductividad hidráulica del suelo como se muestra en la figura 52

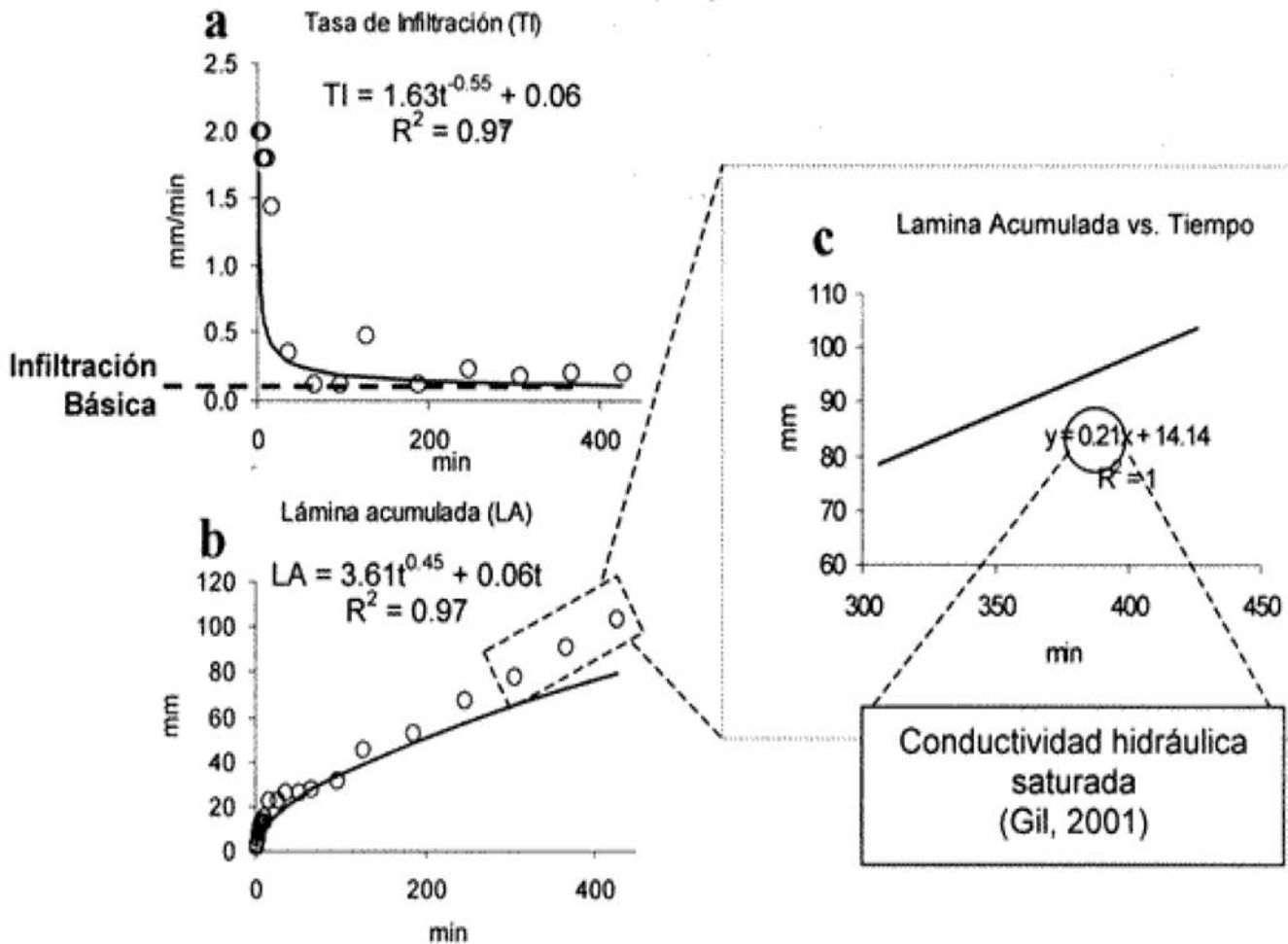


Figura 52: Curva que representa la lámina de infiltración acumulada con sus tres secciones del comportamiento

Tomado de: (Alvarez-Manilla, Valadéz Castro, Garnica Anguas, & Martínez Peña, 2002)

### Preguntas

1. ¿Por qué debe mantenerse el nivel de agua constante?
2. ¿Qué efecto tiene sobre la estructura de suelo sobre la conductividad hidráulica?

**CC BY-NC-ND 4.0**

# Densidad aparente, humedad gravimétrica, humedad volumétrica, diferentes estados de humedad en el suelo, porosidad total, relación de vacíos y porosidad de aireación llamado porcentaje de aire en el suelo

## Objetivos

- 1- Determinar la humedad gravimétrica de una muestra de suelo.
- 2- Determinar la densidad aparente del suelo.
- 3- Determinar la humedad volumétrica de una muestra del suelo
- 4- Determinar porosidad total del suelo del suelo.
- 5- Determinar el porcentaje de aire en el suelo y la porosidad de aireación del suelo

Todos estos temas se verán en las figuras 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86 y en los cuadros 10, 11, 12.

## Introducción

La densidad de un material se define como la masa del mismo por unidad de volumen, es decir:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

donde

$\rho$  = densidad (g/cm<sup>3</sup>)

m = masa (g)

v = volumen (cm<sup>3</sup>)

Por lo tanto, para poder determinar las densidades de un material, definidas éstas como el cociente de la masa entre el volumen, se realizará de la siguiente forma:

La masa: se adoptará siempre para calcular la densidad, el valor de la masa de la muestra seca a peso constante.

El volumen: cabe distinguir dos tipos de volúmenes que un material puede presentar en el espacio dependiendo de que consideremos el contenido o no de huecos o espacio poroso de éste. Partiendo de la consideración de que todo material está formado por una determinada

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

cantidad real de materia y una cantidad de huecos o porosidad, podemos clasificar los distintos volúmenes.

Así el volumen total ( $v_t$ ) (otros lo denominan volumen aparente) de un material consta de los siguientes sumandos (Figura 53):

$$V_t = V_m + V_p$$

donde:

$v_m$  = volumen ocupado por la masa o sólidos de material (volumen másico).

$v_p$  = volumen ocupado por los poros

$$v_p = V_{ag} + V_{ai}$$

donde:

$v_{ag}$  = volumen ocupado por el volumen de agua

$v_{ai}$  = volumen ocupado por el aire

Por lo que se cumple:

$$V_t = V_m + V_{ag} + V_{ai}$$

La suma del volumen másico ( $v_m$ ) más el volumen de los poros cerrados ( $v_p$ ) se denomina, habitualmente, volumen aparente ( $v_{ap}$ ) y otros lo denominan volumen relativo.

### 1- La densidad aparente

Es una de las características del suelo que reviste mayor importancia para conocer el espacio poroso, transformar la humedad gravimétrica en volumétrica, estimar el valor del coeficiente de expansión lineal (COEL), detectar capas endurecidas en el perfil del suelo, parámetro para clasificar los suelos orgánicos y los derivados de cenizas volcánicas, en fertilidad para calcular la masa de la capa arable, y en riegos, para calcular la lámina de agua.

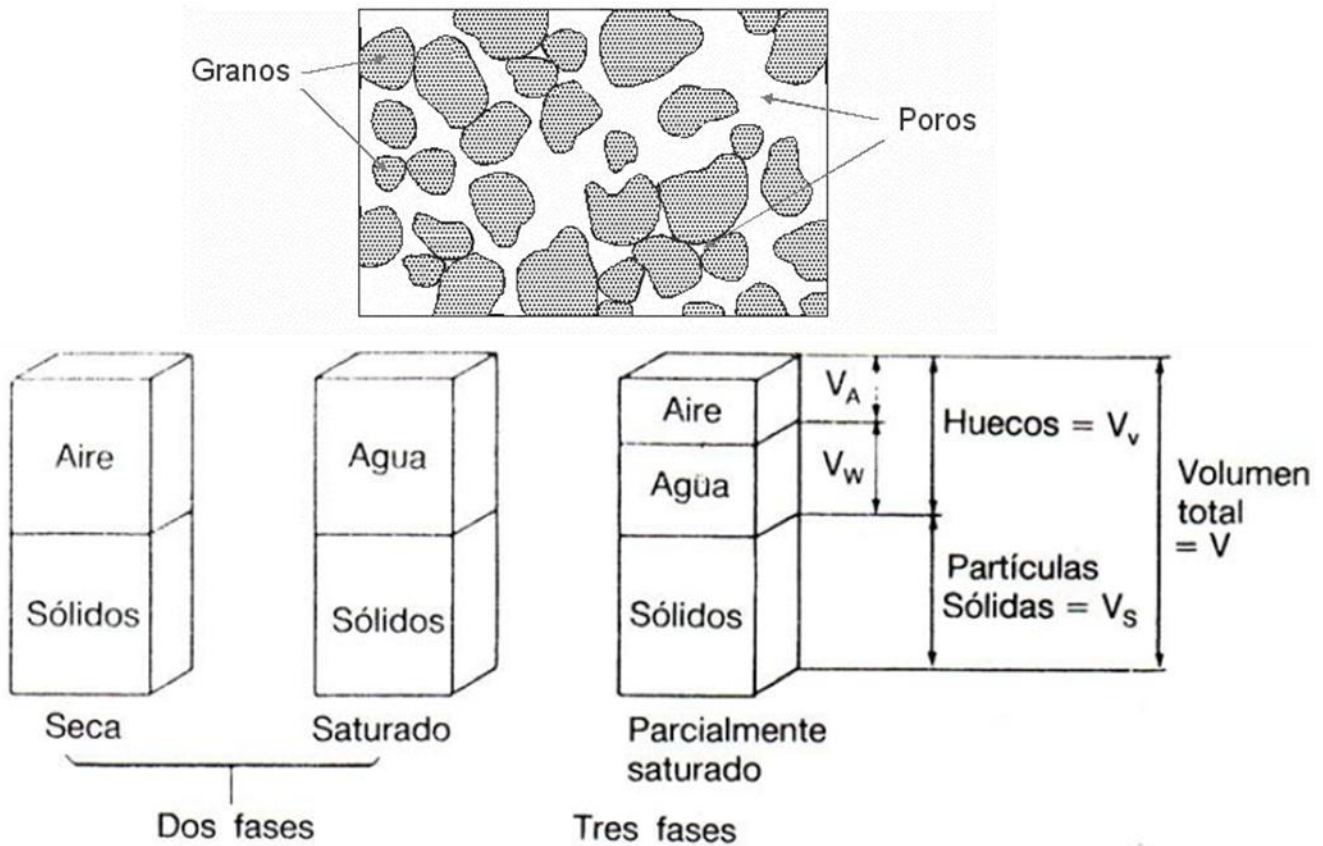


Figura 53: Elementos de las fases y del volumen de suelo

Tomado de: (Chacón Montero, Irigaray Fernández, Lamas Fernández, & Hamdouni Jenoui, 2004)

La densidad aparente es la relación del peso de suelo seco entre la unidad de volumen aparente del mismo, donde el volumen aparente o volumen relativo incluye el volumen de las partículas sólidas de suelo y el espacio poroso. Este volumen debe ser medido cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo.

Valores comunes de densidad aparente se pueden observar en el cuadros 10, 11 y figuras 54 y 57.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

Cuadro 10: Valores de densidad aparente de diferentes horizontes del suelo

Clases texturales	da (g/cm <sup>3</sup> )
Arena ( <i>Sands</i> )	1,70-1,80
Arena gruesa ( <i>Coarse sand</i> )	1,60-1,70
Arena y arena fina ( <i>Sand and Fine Sand</i> )	1,55-1,65
Arena muy fina ( <i>Very fine sand</i> )	
Arena franca ( <i>Loamy sands</i> )	1,60-1,70
Arena franca gruesa ( <i>Loamy coarse sand</i> )	1,55-1,65
Arena franca, Arena franca fina ( <i>Loamy sand, Loamy fine sand</i> )	1,55-1,60
Arena franca muy fina ( <i>Loamy very fine sand</i> )	
Franco arenosa ( <i>Sandy loams</i> )	1,55-1,60
Franco arenosa gruesa ( <i>Coarse sandy loam</i> ) Franco arenosa y Franco arenosa fina ( <i>Sandy loam Fine sandy loam</i> )	1,50-1,60 1,45-1,55
Franco arenosa muy fina ( <i>Very fine sandy loam</i> )	
Franca y franco limosa ( <i>Loam and Silty loam</i> )	1,45-1,55
Limo ( <i>Silt</i> )	1,40-1,50
Franco arcillosa ( <i>Clay loam</i> )	1,40-1,50
Franco arcillo arenosa y franco arcillo limosa ( <i>Sandy clay loam Silty clay loam</i> )	1,45-1,55
Arcilla arenosa ( <i>Sandy clay</i> )	1,35-1,45
Arcilla limosa ( <i>Silty clay</i> )	1,40-1,50
Arcilla ( <i>Clay 35-50%</i> )	1,35-1,45
( <i>Clay 50-65%</i> )	1,25-1,35

Suelos	Daparente
Horizontes arenosos	1450-1600 kg m <sup>-3</sup>
Horizontes arcillosos con estructura	1050-1100 kg m <sup>-3</sup>
Horizontes compactos	1900-1950 kg m <sup>-3</sup>
Horizontes suelos volcánicos	850 kg m <sup>-3</sup>
Valor medio	1350 kg m <sup>-3</sup>
Horizonte turboso	250 kg m <sup>-3</sup>

**CC BY-NC-ND 4.0**

Características (válido para suelos secos)	Densidad aparente [g/cm <sup>3</sup> ]			Evaluación
	Arenas y limos	Franco	Arcillosos	
El cuchillo sólo se puede introducir bajo fuerzas mayores, la muestra casi no se desmorona.	>1.9	> 1.8	>1.6	ALTA
El cuchillo sólo se introduce con dificultad 1 a 2 cm en el suelo, la muestra se desmorona en pocos fragmentos que sólo se pueden partir con dificultad.	1.8	1.6	1.4	MEDIA
El cuchillo se puede introducir en el suelo con poco esfuerzo, la muestra se desmorona en pocos fragmentos, los cuales pueden ser partidos en fragmentos más pequeños con la mano.	1.6	1.4	1.2	
Al presionar suavemente, el suelo se desmorona en muchos fragmentos.	1.4	1.2	1.0	BAJA
La muestra se desmorona totalmente al tomarla, se ven muchos poros gruesos y muy gruesos.	1.2	<1.0	-	

Textura de suelo	Da ideal (g/cc)	Da que puede afectar el desarrollo de raíces (g/cc)	Da que afecta el desarrollo de raíces <sub>1</sub> (g/cc)
Arenosa, areno francoso	<1,6	1,69	>1,8
Franco arenosa, Franca	< 1,4	1,63	>1,8
Franco areno arcillosa	<1,4	1,60	>1,75
Franco limosa, limosa	<1,4	1,60	>1,75
Franco arcillosa	<1,3	1,60	>1,75
Franco arcillo limosa	<1,1	1,55	>1,65
Areno arcillosa, arcillo limosa (35-45% de arcilla)	<1,1	1,49	>1,58
Arcillosa (>45% arcilla)	<1,1	1,39	>1,47

Figura 54: Curva Densidad aparente del suelo en sus cualidades y sus valores  
Tomado de: (3er Curso Mexicano de Evaluación de Suelos (CMES), 2020)

#### CC BY-NC-ND 4.0

Cuadro 11: Variación de los valores de densidad aparente en Costa Rica de diferentes órdenes y profundidades del suelo

ENTISOLES							ANDISOLES						
Prof. cm	Horizontes No.	$\rho_a \text{ Mg m}^{-3}$			DE	CV %	Prof. cm	Horizontes No.	$\rho_a \text{ Mg m}^{-3}$			DE	CV %
		Mín.	Máx.	Prom.					Mín.	Máx.	Prom.		
0-20	10	0,88	1,35	1,12	0,14	12,48	0-20	14	0,55	1,12	0,87	0,17	19,49
20-40	5	1,00	1,53	1,25	0,20	16,05	20-40	11	0,76	1,00	0,86	0,08	9,27
40-60	10	0,87	1,67	1,26	0,27	21,45	40-60	10	0,59	1,18	0,85	0,19	22,35
60-80	8	0,91	1,51	1,11	0,20	18,02	60-80	10	0,65	1,10	0,88	0,15	17,12
80-100	10	0,93	1,62	1,22	0,22	18,05	80-100	12	0,67	1,46	1,03	0,21	20,36

INCEPTISOLES							MOLLISOLES						
Prof. cm.	Horizontes No.	$\rho_a \text{ Mg m}^{-3}$			DE	CV %	Prof. cm	Horizontes No.	$\rho_a \text{ Mg m}^{-3}$			DE	CV %
		Mín.	Máx.	Prom.					Mín.	Máx.	Prom.		
0-20	35	0,67	1,71	1,21	0,27	22,30	0-20	25	0,98	1,65	1,20	0,19	15,85
20-40	17	0,83	1,70	1,26	0,30	23,78	20-40	16	0,91	1,52	1,21	0,18	14,91
40-60	19	0,85	1,79	1,19	0,24	20,25	40-60	18	0,88	1,41	1,17	0,18	15,34
60-80	25	0,85	1,70	1,28	0,22	17,22	60-80	14	0,88	1,48	1,24	0,22	17,71
80-100	24	0,90	1,60	1,21	0,16	13,21	80-100	20	0,88	1,70	1,23	0,25	20,26

ALFISOLES							ULTISOLES						
Prof. cm	Horizontes No.	$\rho_a \text{ Mg m}^{-3}$			DE	CV %	Prof. cm	Horizontes No.	$\rho_a \text{ Mg m}^{-3}$			DE	CV %
		Mín.	Máx.	Prom.					Mín.	Máx.	Prom.		
0-20	10	0,60	1,41	1,03	0,22	21,36	0-20	21	0,53	1,50	0,96	0,28	29,07
20-40	9	0,80	1,52	1,12	0,22	19,68	20-40	16	0,72	1,74	1,15	0,30	26,20
40-60	4	1,22	1,55	1,36	0,14	10,33	40-60	7	1,15	1,83	1,42	0,24	16,88
60-80	6	0,82	1,58	1,14	0,26	22,77	60-80	9	0,70	1,50	1,08	0,23	21,21
80-100	5	0,99	1,78	1,28	0,29	22,62	80-100	12	0,86	1,83	1,25	0,27	21,67

VERTISOLES						
Prof. cm	Horizontes No.	$\rho_a \text{ Mg m}^{-3}$			DE	CV %
		Mín.	Máx.	Prom.		
0-20	27	0,98	1,78	1,29	0,21	16,32
20-40	16	0,92	1,80	1,35	0,32	23,63
40-60	15	1,05	1,83	1,38	0,26	18,91
60-80	15	1,09	1,95	1,35	0,25	18,57
80-100	15	1,06	2,00	1,51	0,30	19,90

Tomado de: (Alvarado &amp; Forsythe, 2005)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

$$\rho_a = \frac{\text{Peso suelo seco}}{\text{volumen (suelo + poros)}} \quad \frac{\text{g}}{(\text{cm}^3 + \text{cm}^3)} \quad \frac{\text{kg}}{(\text{m}^3 + \text{m}^3)}$$

En general ocurre que suelos sueltos, granulados, porosos, tienen densidad aparente baja; los arenosos valores altos y los arcillosos baja densidad por alto porcentaje de porosidad. A mayor contenido de materia orgánica, menor el valor de densidad aparente y también varía con la profundidad debido a compactación, consolidación, menor contenido de materia orgánica, adensamiento natural, cementación natural y otros (Cuadros 10 y 11).

Los suelos de origen volcánico normalmente presentan valores de densidad aparente en el ámbito de 0,3 a 0,9 g/cm<sup>3</sup> mientras que en suelos de textura franca, limosa, y arcillosa no volcánicos, usualmente varía en el ámbito de 0,80 a 1,80 g/cm<sup>3</sup>.

### Método del cilindro

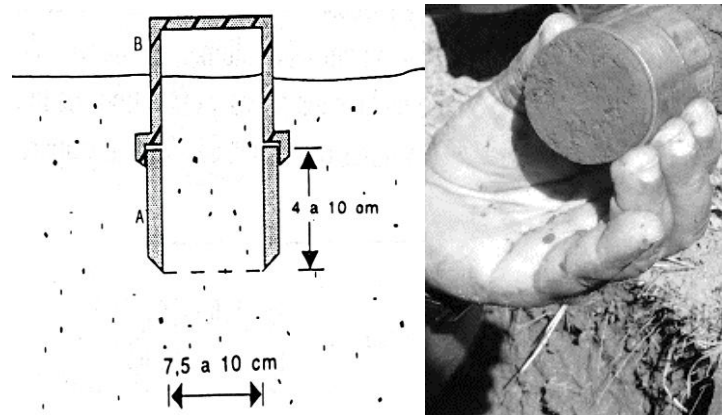


Figura 55: Toma de muestra para estimar la densidad aparente

Se obtienen muestras indeformadas de manera vertical u horizontal y de la superficie del suelo o de un perfil de una calicata, utilizando cilindros metálicos afilados en un extremo de diámetro similar a la altura como se muestra en la figura 55 (observar volumen I del Suelo y su Laboratorio).

### Materiales

- Palas
- Muestreador (si no hay use un mazo pequeño)
- Balanzas sensitivas o 0,1 gramos
- Cilindros metálicos
- Estufa
- Espátulas
- Regla con escala en cm.

**CC BY-NC-ND 4.0**

- Malín circular con diámetro mayor al diámetro del cilindro muestreador en 4 cm.
- Cilindro de hule de altura de 2 mm con diámetro menor entre 10 a 20 mm

### Procedimiento

- Elimine la capa orgánica con una pala o machete del lugar seleccionado para muestrear
- Ponga el cilindro muestreador con el lado afilado sobre la superficie a muestrear
- Coloque el muestreador sobre el cilindro y libere el contra peso hasta que la plataforma toque el suelo. Además para hundir los cilindros se puede usar un mazo pequeño y el cilindro debe golpearse con golpes sólidos y que penetre verticalmente
- Se extraen con pala cuidando que los extremos no estén disturbados ni sean disturbados
- Una vez extraída la muestra se debe llevar a una humedad aproximada a capacidad de campo
- Las dos caras de la muestra de suelo se deben de dejar planas con una espátula, bisturí o cuchilla sin ejercer compresión, ni perder suelo. De lo contrario se debe de extraer otra muestra
- Envuelva con el malín el extremo inferior del cilindro muestreador y prénselo con el cilindro de hule
- Pese el suelo y el cilindro a la humedad aproximada de capacidad de campo y se mide el volumen del suelo y poros contenido en el cilindro
- El cilindro ponerlo en una lata de aluminio y póngalo en la estufa por 24 horas a 105°C
- Luego se saca de la estufa y se pesa el cilindro total como se introdujo dentro de la estufa, para obtener el peso seco total, se extrae el suelo del cilindro y se pesa el cilindro limpio, el cilindro de hule y el malín que funcionaron como amarre de la muestra para evitar la pérdida de suelo. Por diferencia se obtiene el peso seco del suelo
- Luego la densidad aparente por definición se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$Dap = \frac{\text{Peso suelo seco (g)}}{\text{Volumen del suelo dentro del cilindro incluyendo el espacio poroso del suelo (cm}^3\text{)}}$$

### **CC BY-NC-ND 4.0**

Recordar que el volumen de un cilindro =  $\pi * r^2 * h$

**Si se diera el caso en que aparecieran alguna(s) piedra(s), la Da corregida (Dac) sería:**

- Se hace un hueco u orificio en el suelo
- Se mide el volumen (cm<sup>3</sup>) total del orificio (puede ser con el método del agua y la bolsa plástica transparente)
- Se pesa (g) en seco el total de la masa extraída
- De todo el material extraído se separa el material pedregoso y gravoso o grueso mayor a 2 mm del material fino
- Se toma el volumen (cm<sup>3</sup>) del material grueso mayor a 2,0 mm (Vp)
- Se pesa (g) en seco el material grueso mayor a 2,0 mm (Pp)

Como las piedras ocupan un volumen y en el caso que no se puedan determinar, éste se puede estimar dividiendo el peso de la piedra o material grueso mayor a 2 mm entre volumen que ocupa la piedra (Vp) ya que se conoce que la densidad de todo mineral es casi constante de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, por lo que el volumen del material grueso se puede estimar de la siguiente manera

$$Vp = \frac{\text{peso de la piedra (g)}}{2,65 \text{ g/cm}^3}$$

La densidad aparente corregida (Dac) sería:

$$Dac = \frac{Mss \text{ (g)} - Pp \text{ (g)}}{V \text{ (cm}^3\text{)} - Vp \text{ (cm}^3\text{)}}$$

Donde:

Dac = densidad aparente corregida (g/cm<sup>3</sup>)

Mss = masa seca del total del material extraído (g)

V = volumen total calculado del hoyo (cm<sup>3</sup>)

Pp = peso de la piedra o material grueso mayor a 2,0 mm (g)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

$V_p$  = volumen de la piedra o material grueso mayor a 2,0 mm ( $\text{cm}^3$ )

### **Método del terrón parafinado**

La densidad aparente del suelo puede ser determinada mediante el recubrimiento del terrón, de peso conocido, con una sustancia repelente al agua (por ejemplo, parafina de densidad conocida), pesándolo de nuevo para luego ser sumergido en un envase de volumen conocido conteniendo un líquido de densidad conocida, utilizando el 'principio de Arquímedes'. Este método es aplicado comúnmente por pedólogos y paleopedólogos. Sin embargo, algunos investigadores en las últimas décadas proponen este método, entre otros, para evaluar la densidad aparente de los agregados, ya que las propiedades de los agregados son usualmente diferentes a las propiedades del suelo, señalando su importancia en la estimación de la porosidad intra-agregados e inter-agregados. Esto plantea el interés en métodos para determinar la densidad de los agregados del suelo (Cuadro 10, 11 y Figura 56).

### **Materiales**

- Terrones de suelo seco
- Balanza
- Parafina
- Probeta
- Agua

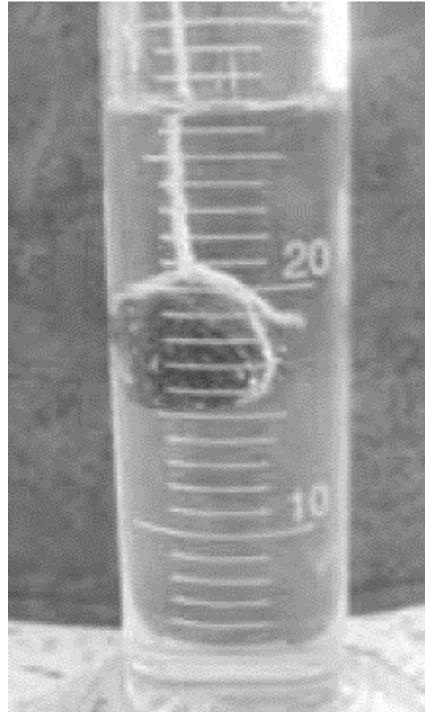


Figura 56: Toma de muestra para estimar la densidad aparente

### Procedimiento

1. Caliente la parafina hasta que llegue a su fase líquida
2. Tome un terrón de suelo indisturbado, hágale un nudo con un mecate y pese (Aplicar corrección de acuerdo a la humedad utilizando la regla matemática llamada regla de 3)
3. Sumergir el terrón en parafina, sacar y dejar enfriar; repetir el procedimiento hasta que el terrón quede totalmente cubierto
4. Pese de nuevo el terrón de suelo ahora parafinado y tome el dato en su libreta de apuntes

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

5. Mida un volumen exacto de agua en una probeta
6. Sumerja el terrón en el contenido de la probeta y tome el dato de volumen desplazado
7. Realice cada medición por triplicado y obtenga el promedio para cada muestra de suelo
9. Utilice el cuadro 11 para ordenar los datos para el calculo
8. Calcular las densidades aparentes conforme la siguiente ecuación

$$Da = \frac{PSS\ 105^{\circ}C}{Vd - \left[ \frac{(PSSP - PSS)}{0.9} \right]}$$

Donde:

Da= Densidad aparente

PSS 105° C = Peso del terrón de suelo corregido

Vd= Volumen desplazado

PSSP= Peso del terrón de suelo parafinado

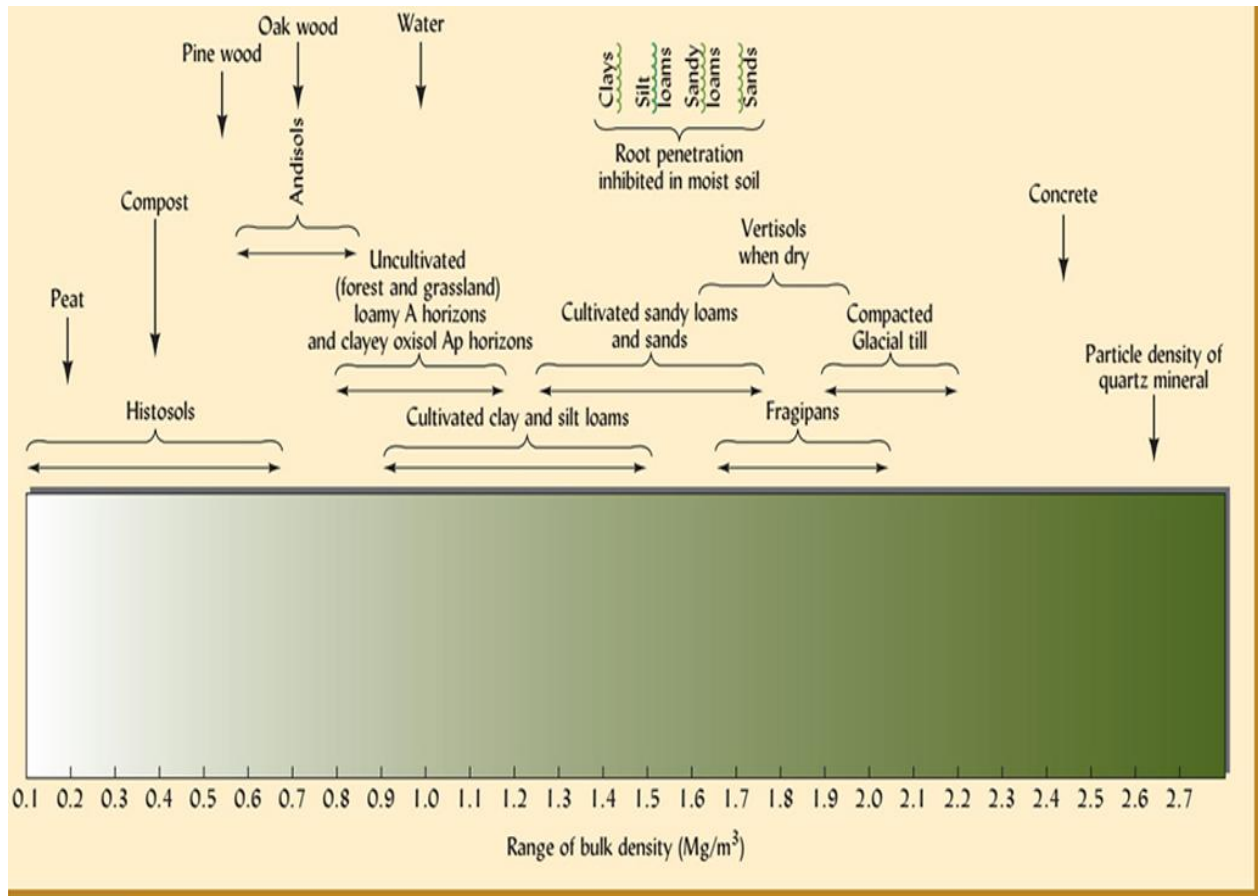
PSS= Peso terrón de suelo sin parafinar

0.9= Densidad de la parafina

Cuadro 12: Valores de densidad

<b>TABLA DE DATOS DENSIDAD APARENTE MÉTODO DEL TERRÓN PARAFINADO</b>				
<b>Numero</b>	<b>p. suelo seco 105°C</b>	<b>p. suelo seco parafinado</b>	<b>Volumen Desplazado</b>	<b>Densidad Aparente</b>

**CC BY-NC-ND 4.0**



*Bulk densities typical of a variety of soils and soil materials.*

The Nature and Properties of Soils, 15th ed. RR. Weil and NC. Brady. Ed. Pearson

Figura 57: Valores de densidad aparente del suelo relacionados con clases de suelos y propiedades físicas del suelo

## 2- Agua en el suelo visto como parámetros de la humedad gravimétrica y humedad volumétrica del suelo y sus estados energéticos o su clasificación

El agua es uno de los componentes fundamentales en la productividad de los ecosistemas en general y por lo tanto en los ecosistemas agrícolas.

El agua del suelo debe ser considerada como retenida en los poros del suelo a diferentes niveles de energía, y que al contener sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas constituye la solución del suelo.

Agua en el suelo desde el punto de vista agrícola constituye la principal reserva de agua para el crecimiento de las plantas y es el almacenamiento regulador del ciclo hidrológico a nivel de cultivos.

El estudio del agua del suelo (Figuras 58, 59 y 60) nos permite comprender los procesos

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

físicos, químicos y biológicos del suelo, es decir desde la meteorización, procesos formadores, estado energético en que se encuentra el agua, capacidad de retención de los suelos como también el movimiento y disponibilidad para la planta, evaporación, drenaje etc.

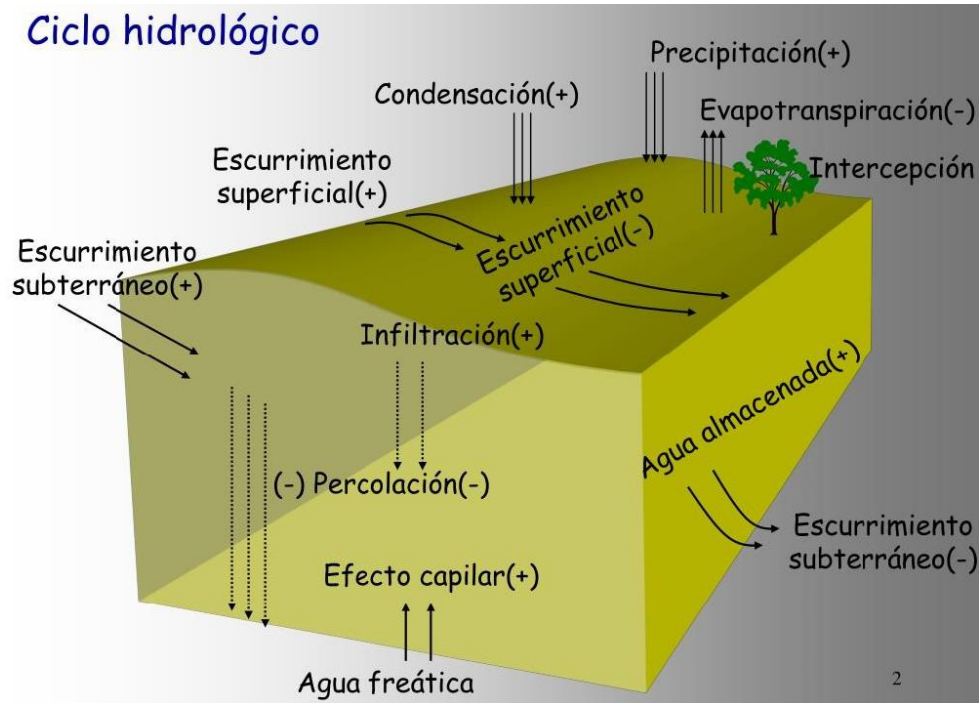


Figura 58: Agua almacenada en el suelo desde el balance del ciclo hidrológico del agua en el suelo

Tomado de: (Cabalceta Aguilar)

No obstante, el agua del suelo está sujeta a niveles energéticos (Figura 61) y también en toda planta, para poder absorberla, necesita superar estos niveles. Recordemos que la porosidad es el espacio vacío que queda en el suelo, donde el agua está disponible para las plantas.

La humedad en un suelo se refiere al contenido de agua con relación al peso o volumen de la masa de suelo. Se puede expresar en forma gravimétrica (Figura 59) o volumétrica (Figura 60). Gravimétricamente en relación a la masa del suelo ( $g_{\text{agua}}/g_{\text{suelo}}$ ) y volumétricamente ( $\text{cm}^3_{\text{agua}}/\text{cm}^3_{\text{suelo}}$ ) en relación al volumen del suelo.

La humedad volumétrica no puede ser mayor al porcentaje de porosidad. La máxima cantidad de agua en términos volumétricos es igual al porcentaje de poros que tiene el suelo.

La humedad gravimétrica es la forma más común de expresar la humedad del suelo y se define como la relación entre la masa de agua y la masa de los sólidos del suelo. Frecuentemente se expresa en porcentaje, aunque también se puede expresar en forma adimensional.

### **CC BY-NC-ND 4.0**

La humedad volumétrica se define como la relación entre el volumen del agua contenido en el suelo y el volumen total de ese suelo.

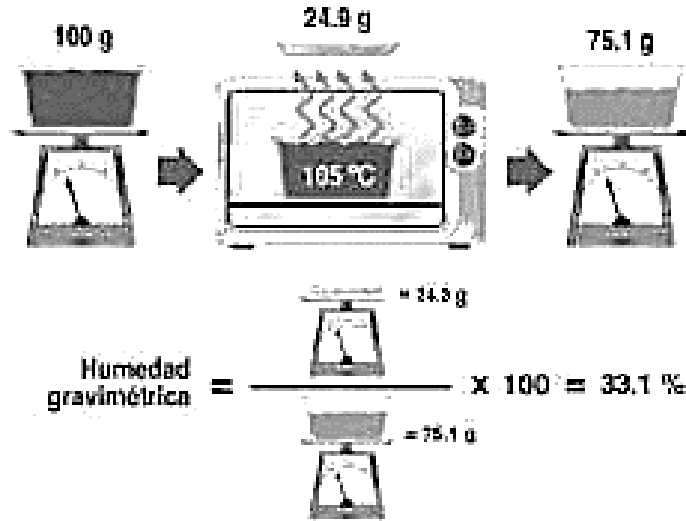


Figura 59: Porcentaje de peso de suelo ocupado por agua y ejemplo de cálculo

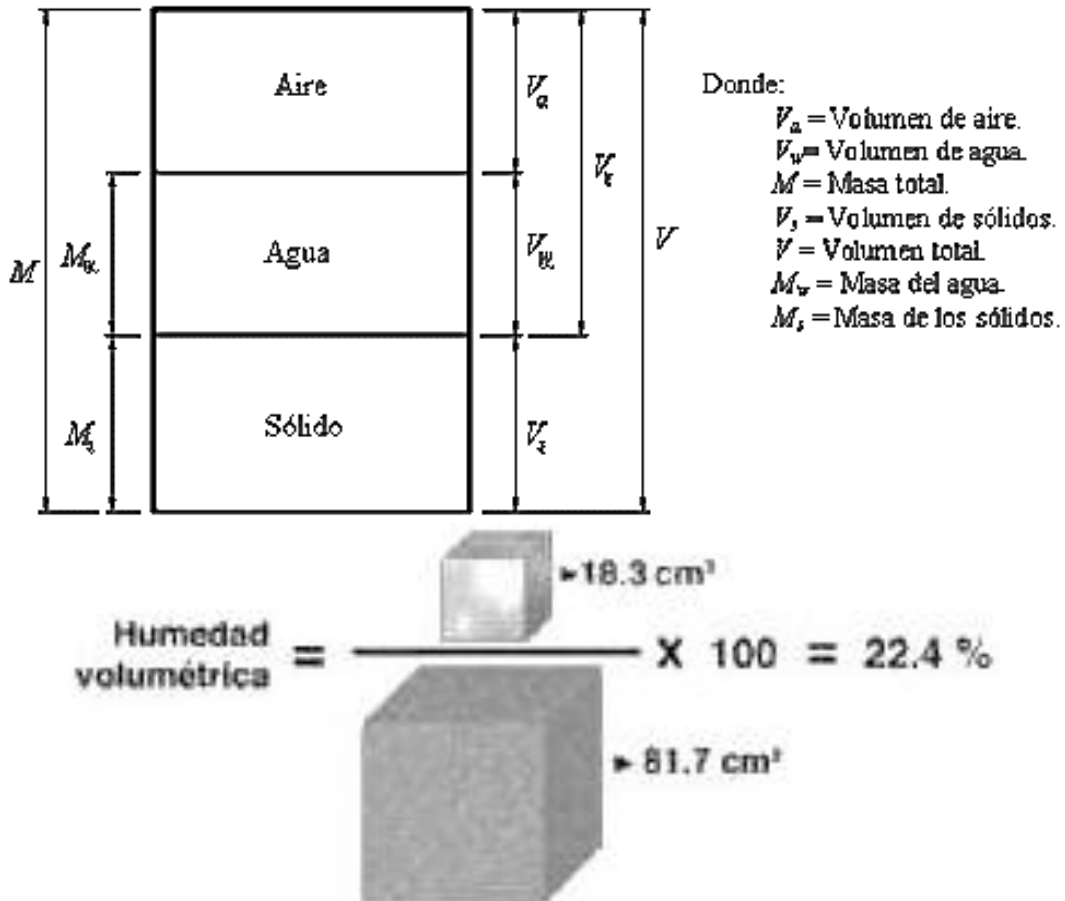


Figura 60: Porcentaje de volumen de suelo ocupado por agua y ejemplo de cálculo

**CC BY-NC-ND 4.0**

Clase Estado del Agua	Código		Criterio: Tensión	Criterio Tradicional: Tensión y Campo
	Conv.	NASIS		
Seco <sup>1</sup>	D	D	> 1500 kPa	> 15 atmósferas de tensión <sup>2</sup> (= 1500 kPa)
Húmedo <sup>2</sup>	M	M <sup>2</sup>	≤1500 kPa a > 1.0 kPa (o > 0.5 kPa <sup>3</sup> )	Uso anterior: > 1/3 a 15 atmósferas de tensión (33 a 1,500 kPa) (capacidad de campo a punto de marchitez permanente)
Mojado	W		≤1.0 kPa (o < 0.5 kPa <sup>3</sup> )	0 - 1/3 atmósferas de tensión (< 33 kPa) (capacidad del campo o mas mojado)
Mojado: No-Saturado <sup>5</sup>	WN		> 0.01 y ≤ 1.0 kPa (o < 0.5 kPa <sup>3</sup> )	No agua libre: Las capas de agua son visibles; los granos de arena y los agregados brillan, pero no hay agua libre presente.
Mojado: Saturado <sup>5</sup>	WS	W	≤0.01 kPa	Agua Libre: agua libre claramente visible.

Figura 61: Estatus de humedad del agua en el suelo en valores energéticos

De la figura 61 tenemos lo siguiente:

1. Subclases adicionales del estado del agua pueden ser reconocidas por clases Secas y Húmedas
2. Por convención se asumen 15 atmósferas de tensión como el punto de marchitez permanente para la mayoría de la agricultura en filas de cultivo pero existen cultivos con menos capacidad de succión y otros con capacidades de succión hasta 32 atmósferas.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

3. Por convención se asumen 1,0 kPa como límite para todas las texturas, excepto aquellas más gruesas que las arenas finas francas en donde se utilizan 0,5 kPa como límite para el caso de Mojado (Punto de Capacidad de Campo)
4. Saciado (mojado no saturado) vs saturación: la saciedad implica cantidades menores de aire atrapado en los poros más pequeños, normalmente corresponde a la humedad a capacidad de campo ya que la saturación implica no tener aire atrapado. Saciedad en términos prácticos es saturación, donde monitoreos temporales del nivel freático pueden ser requeridos para verificar la saturación
5. Endosaturación: es la saturación en todas las capas dentro de los 200 cm de profundidad desde la superficie del suelo.
6. Saturación Ántrica: es una variante de la episaturación y es la saturación debida al manejo de inundaciones (ejemplo: producción de arroz o arándalo)
7. Episaturación: el suelo está saturado con agua en una o más capas dentro de los 200 cm de la superficie del suelo mineral y también tiene una o más capas no saturadas, con un límite superior arriba de los 200 cm de profundidad y por debajo de la capa saturada, es decir; el nivel freático está sobre una capa relativamente impermeable.

El contenido de humedad del suelo se puede expresar gravimétricamente con la siguiente formula, que expresa el porcentaje de humedad del suelo basado en el peso del suelo seco.

$$\% \text{ Humedad gravimétrica} = \frac{(\text{peso suelo húmedo} - \text{peso suelo seco})}{\text{peso suelo seco}} \times 100$$

$$\% \text{HG} = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} * 100 \quad (\text{g de agua} / \text{g de suelo})$$

Donde:

%HG : humedad gravimétrica en porcentaje

Psh: peso del suelo húmedo (g)

Pss: peso del suelo seco (g)

La humedad gravimétrica se determina tomando una muestra de suelo, y dentro de un recipiente colocada en un horno por 24 horas a 105 °C. Se pesa previamente húmeda antes

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

de meterla al horno (Psh) luego de sacarla del horno y enfriarla se determina el peso de la muestra seca (Pss).

Otra manera de expresarlo es estos índices; es volumétricamente, según el porcentaje de agua por volumen

$$\% \text{Humedad volumétrica} = \text{Densidad aparente} * \% \text{ Humedad gravimétrica}$$

$$\% \text{HV} = \text{Dap} * \% \text{HG} \text{ (cm}^3 \text{ de agua / cm}^3 \text{ de suelo)}$$

O también:

$$\% \text{HV} = \frac{\text{Volumen de agua en el suelo}}{\text{Volumen total del suelo}} * 100$$

Donde:

%HV = humedad volumétrica en el porcentaje del volumen total

%HG = humedad gravimétrica en porcentaje del peso total del suelo

Dap= densidad aparente del suelo en g/cm<sup>3</sup>.

Dag= densidad del agua en g/cm<sup>3</sup>

También la humedad o el agua que se encuentra en el suelo en su cantidad puede ser expresada como una lámina o altura de agua y esto se logra multiplicando el porcentaje de la humedad volumétrica por la profundidad del suelo como se expresa a continuación:

$$L_{\text{agua}} = \% \text{HV} * \text{ProfSuelo}$$

Donde:

Lagua = lámina de agua (mm)

%HV = porcentaje de humedad volumétrica (%)

ProfSuelo = profundidad del suelo (mm)

### **Estimación de la cantidad de agua que se encuentra en el suelo por medio del tacto**

Frecuentemente no se tienen instrumentos ni tiempo para tener valores de humedad aproximados que se encuentran en el suelo y por ello se debe recurrir a la experiencia práctica de estimar la humedad del suelo y para generar dicha experiencia se procede a mostrar una metodología en las figuras 62, 63, 64 y 65 que nos ayudan a comprender en términos generales los valores aproximados de la humedad existente en el suelo.

**CC BY-NC-ND 4.0**

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)**

## Apariencia de los suelos de arena fina y arena fina francosa en diferentes condiciones de humedad



**0-25 por ciento disponible**  
**1.2-0.5 pulgada/pie reducido**

Seco, suelto, se mantiene unido si no se molesta, deja granos de arena sueltos en los dedos si se aplica presión. (No hay figura)

**25-50 por ciento disponible**  
**0.9-0.3 pulgada/pie reducido**

Levemente húmedo, forma una bola bastante débil con las marcas de los dedos bien definidas, una capa suave de granos de arena sueltos y agregados queda en los dedos.



**50-75 por ciento disponible**  
**0.6-0.2 pulgada/pie reducido**

Húmedo, forma una bola débil que deja granos de arena sueltos y agregados en los dedos, color oscuro, mancha moderada de agua en los dedos, no se forma cinta.



**75-100 por ciento disponible**  
**0.3-0.0 pulgada/pie reducido**

Mojado, forma una bola débil, quedan granos de arena sueltos y agregados en los dedos, color oscuro, manchas gruesas de agua en los dedos, no forma cinta.

Figura 62: Determinación de la humedad del suelo por medio del tacto I

Tomado de: (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA))

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

## Apariencia de los suelos franco arenoso y franco arenoso fino en diferentes condiciones de humedad

0-25 por ciento disponible  
1.7-1.0 pulgada/pie reducido

Seco, forma una bola muy débil, de la bola se caen fácilmente granos de suelo agregado.  
(No hay figura)



50-75 por ciento disponible  
0.9-0.3 pulgada/pie reducido

Húmedo, forma una bola con marcas definidas de los dedos, deja manchas leves de suelo/agua en los dedos, color oscuro, no se pega.



25-50 por ciento disponible  
1.3-0.7 pulgada/pie reducido

Levemente húmedo, forma una bola débil con marcas definidas de los dedos, color oscuro, no deja mancha de agua en los dedos, los granos se caen.



75-100 por ciento disponible  
0.4-0.0 pulgada/pie reducido

Mojado, forma una bola dejando una marca mojada en la mano, manchas suaves/medias en los dedos, forma una cinta débil entre los dedos pulgar e índice.

Figura 63: Determinación de la humedad del suelo por medio del tacto II

Tomado de: (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA))

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

**Apariencia de los suelos franco arenoso arcilloso, franco y franco limoso en diferentes condiciones de humedad**

■ **0-25 por ciento disponible**  
**2.1-1.1 pulgada/pie reducido**

Seco, los agregados del suelo se caen con facilidad, no quedan manchas en los dedos, cuando se aplica presión se desmoronan los terrones. (No hay figura)



■ **25-50 por ciento disponible**  
**1.6-0.8 pulgada/pie reducido**

Ligeramente húmedo, forma una bola débil con superficie rugosa, no quedan manchas de agua en los dedos, se caen pocos granos de suelo agregado.



■ **50-75 por ciento disponible**  
**1.1-0.4 pulgada/pie reducido**

Húmedo, forma una bola, quedan manchas muy suaves en los dedos, color oscuro, maleable, forma una cinta débil entre los dedos pulgar e índice.



■ **75-100 por ciento disponible**  
**0.5-0.0 pulgada/pie reducido**

Mojado, forma una bola con las marcas de los dedos bien definidas, queda una capa liviana a gruesa de suelo/agua en los dedos, forma una cinta entre los dedos pulgar e índice.

Figura 64: Determinación de la humedad del suelo por medio del tacto III

Tomado de: (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA))

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

**Apariencia de los suelos arcilla, franco arcilloso y franco arcilloso limoso en diferentes condiciones de humedad**



**25-50 por ciento disponible**  
**1.8-0.8 pulgada/pie reducido**

Ligeramente húmedo, forma una bola débil, muy pocos agregados se caen, no hay manchas de agua, los terrones se aplanan cuando se ejerce presión.

**0-25 por ciento disponible**  
**2.4-1.2 pulgada/pie reducido**

Seco, los agregados del suelo se separan con facilidad, los terrones se desmoronan con dificultad al ejercer presión. (No hay figura)



**50-75 por ciento disponible**  
**1.2-0.4 pulgada/pie reducido**

Húmedo, forma una bola suave con las marcas de los dedos definidas, quedan manchas suaves de suelo/agua en los dedos, se forma una cinta entre los dedos pulgar e índice.



**75-100 por ciento disponible**  
**0.6-0.0 pulgada/pie reducido**

Mojado, forma una bola, deja una capa desigual de suelo/agua entre mediana y gruesa en los dedos, forma fácilmente una cinta entre los dedos pulgar e índice.

Figura 65: Determinación de la humedad del suelo por medio del tacto IV

Tomado de: (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA))

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

**Otra clasificación del agua en el suelo según sus diferentes estados de energía y contenido de humedad:**

**Agua gravitacional:** es cuando un suelo se satura con agua sea por medios naturales (lluvia) o por medios artificiales (riego) y el agua que infiltra ocupa todos los espacios porosos (macro meso y microporos) y parte del total de esa agua fluye libremente por el espacio de los macro poros debido específicamente a la fuerza de la gravedad (Figura 66). Esta agua tiene un movimiento vertical descendente debido a que esta es manejada por esta fuerza de gravedad y por ello se considera que el principal componente es el potencial gravitacional.

En consecuencia el agua comienza a moverse con velocidad alta exclusivamente a través de los macroporos y comienza a drenar, percolando a través del perfil del suelo. Este tipo de agua se considera no aprovechable por las plantas ya que drena rápidamente y se pierde o sale del suelo y del espacio donde se encuentran las raíces de la mayoría de las plantas. Este es un tipo de agua no disponible para las plantas.

## Agua gravitacional

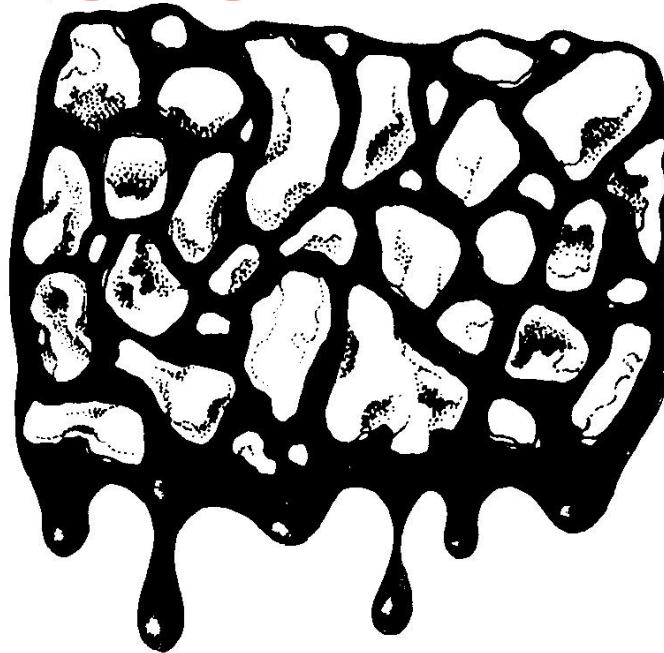


Figura 66: Representación gráfica del agua gravitacional en el suelo

**Punto del agua a capacidad de campo llamado usualmente como capacidad de campo (CC):** Después que drena el agua gravitacional y no continúa drenando de manera rápida y visible hasta el punto de dejar de gotear, pero siempre evitando la evaporación entonces; la cantidad de agua remanente es la máxima cantidad de agua que puede retener un suelo en

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

contra de la fuerza de la gravedad y en este punto el agua ocupa completamente llenos los meso y microporos (porque teóricamente los macro poros ya drenaron) y forma una película líquida flojamente retenida alrededor de las partículas de suelo (Figura 67, 75, 76 y 77)). La fuerza de retención (estado energético) en el espacio poroso o en la matriz del suelo es de aproximadamente  $-1/3$  de atmósfera de succión de agua en el suelo ( $-0,3333 \text{ kg/cm}^2$  o  $-3,3333 \text{ mca}$  o  $-333,33 \text{ cmca}$ ) según la escuela norteamericana pero la escuela europea menciona que la fuerza de retención para capacidad de campo es de  $-0,1 \text{ atm}$  ( $-0,1 \text{ kg/cm}^2$  o  $-1,0 \text{ mca}$  o  $-100 \text{ cmca}$ ). Después de diferentes investigaciones se aplica para suelos arenosos la succión de  $-0,1 \text{ atm}$  para la capacidad de campo y de  $-0,3333 \text{ atm}$  para suelos arcillosos y de  $-0,15$  y  $-0,2 \text{ atm}$  para texturas intermedias.

Se ha pensado que dependiendo de la estructura y la textura del suelo se puede lograr este punto entre 6 (para suelos arenosos gruesos) a 48 horas (para suelos arcillosos). En este punto de agua en el suelo las plantas ya tienen la capacidad de absorber agua sin dificultad, superando con su fuerza de succión las fuerzas con que la humedad es retenida en el suelo. Se considera agua biológicamente útil ya que las plantas pueden absorber con poco esfuerzo.

Existen ecuaciones de estimación de la capacidad de campo como se muestra a continuación:

(Bodman y Mahmud):

$$CC\%ps = 0.023 (\% \text{ arena}) + 0.25 (\% \text{ limo}) + 0.61 (\% \text{ arcilla})$$

Donde:

CC% ps = porcentaje de humedad con base a peso seco o humedad gravimétrica correspondiente al punto de humedad de capacidad de campo

$$CC = 21.977 - 0.186(AR) + 2.601(MO) + 0.127(AC)$$

$$CCg = 0,555 * \%Arcillas + 0,187 * \%Limos + 0,027 * \%Arenas$$

$$CC = (PS / 1.84) - 0.48$$

Donde; CC: Humedad a capacidad de campo, en %; y PS: Punto de saturación del suelo, en %.

Donde:

CC = porcentaje de humedad con base a peso seco o humedad gravimétrica correspondiente al punto de humedad de capacidad de campo

CC%ps = porcentaje de humedad con base a peso seco o humedad gravimétrica correspondiente al punto de humedad de capacidad de campo

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

(AR) = porcentaje de arenas  
 (MO) = porcentaje de materia orgánica  
 (AC) = porcentaje de arcilla

## Agua a capacidad de campo

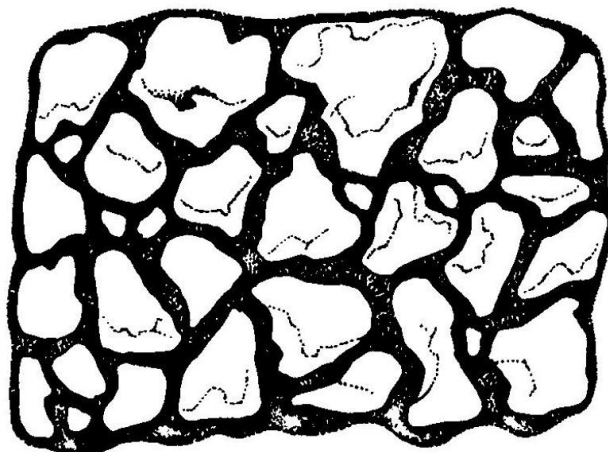


Figura 67: Representación gráfica del punto del agua a capacidad de campo en el suelo

**Punto del agua a marchitez permanente (PMP):** Es el contenido de agua de un suelo al cual la planta se marchita y ya no recobra su turgencia al colocarla en una atmósfera saturada durante 12 horas (Figura 68, 75, 76 y 77). Por convención corresponde al contenido de agua a una tensión o potencial mátrico de -15 bares (estado energético).

El PMP puede ser estimado a partir de la CC:

$$\%PMPg = \frac{\%CCg}{de\ 1,85\ a\ 2,0}$$

$$PMP = CC \times 0.595$$

Donde; PMP: Humedad a punto de marchitamiento permanente, en %; y CC: Humedad a capacidad de campo, en %

$$\text{(Silva et al., 1988): } PMP\ \%ps = -5 + 0.74\ CC\ \%ps$$

$$\text{(Máximov): } PMP\ \%ps = 0.001(\%arena) + 0.12(\%limo) + 0.57(\%arcilla)$$

Donde:

%PMPg = porcentaje de humedad gravimétrico en el punto de marchitez permanente

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

%CCg = porcentaje de humedad gravimétrico en el punto de capacidad de campo

PMP %ps = porcentaje de humedad con base a peso seco o humedad gravimétrica correspondiente al punto de marchitez permanente

CC% ps = porcentaje de humedad con base a peso seco o humedad gravimétrica correspondiente al punto de humedad de capacidad de campo

## Agua a punto de marchitez permanente

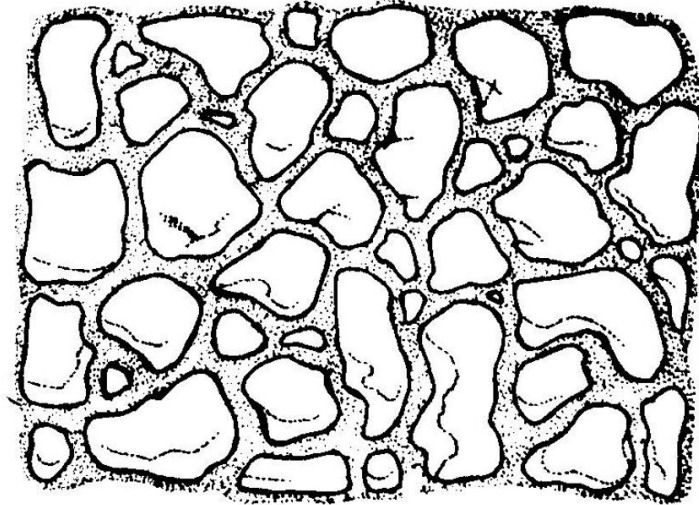


Figura 68: Representación gráfica del punto del agua a marchitez permanente en el suelo

Con los valores definidos de los estados energéticos de los puntos de CC y PMP usualmente se pueden llevar muestras de suelo a los laboratorios donde existen procedimientos para aplicar los respectivos estados energéticos y así estimarles o determinarles los porcentajes de humedad que tienen en esos puntos.

**Rango del agua en el suelo del agua disponible:** este rango de agua se considera el agua biológicamente CON mayor actividad de provechamiento para la vida o biológicamente que se soporta en el suelo y dentro de estos se encuentra la gran mayoría de biomasa de las plantas (por ello usualmente se le llama Agua Disponible para las Plantas) (Figuras 69, 75, 76 y 77). Esta agua se encuentra dentro de los poros capilares del suelo llamados meso poros y por ello el agua se encuentra retenida por las fuerzar capilares de la matriz del suelo. Esté rango de agua disponible se encuentra entre el punto de agua a capacidad de campo y el punto de agua a marchitez permanente, y puede ser expresado por la siguiente ecuación:

$$\%HDg = \%CCg - \%PMPg$$

$$\%HDv = \%CCv - \%PMPv$$

**CC BY-NC-ND 4.0**

Donde:

%HDg = porcentaje de agua disponible gravimétrico

%CCg = porcentaje del punto de capacidad de campo gravimétrico

% PMPg = porcentaje del punto de marchitez permanente gravimétrico

%HDv = porcentaje de agua disponible volumétrico

%CCv = porcentaje del punto de capacidad de campo volumétrico

% PMPv = porcentaje del punto de marchitez permanente volumétrico

**Lámina de agua disponible:** es el mismo rango de agua disponible en porcentaje gravimétrico pero expresado en las unidades de milímetros de lámina de agua

$$\text{Lámina agua disponible} = \frac{HA}{100} * Prof * Dap$$

Donde; HA: Humedad aprovechable en %, Sup: Prof: Profundidad del muestreo en cm y Dap: Densidad aparente en g/cm<sup>3</sup>.

Los puntos y los rangos de contenidos de humedad de agua en el suelo varían debido a diferentes parámetros y propiedades del suelo y esto hace que existan variaciones entre los tipos de suelos ya que como ejemplos podemos mencionar que si se aplica -1,0 atm de succión a dos muestra de suelo indisturbada donde la primera pertenece a un suelo arcilloso extraería un 25% del agua que contiene ese suelo en la muestra indisturbada y en la segunda muestra siendo de textura arenosa extraería un 82% del agua contenida en ese suelo en la muestra indisturbada; lo que indica que para una misma presión ejercida a un tipo de suelo se le extraería mayor o menor cantidad de agua que a otro tipo de suelo.

Otro ejemplo pero aplicando al contrario el concepto analizado es el hecho de que para extraer un 40% de la humedad que existe en un suelo en una muestra indisturbada, de un suelo arcillosos se necesitaría ejercer una succión de -2,0 atm y para un suelo arenoso necesitaría tan solo -0,2 atm de succión.

Esto quiere decir que para iguales estados de energía del contenido de agua en el suelo en los diferentes tipos de suelo tienen diferentes contenidos de humedad y que para iguales contenidos de humedad en los suelos los estados de energía de esos contenidos son diferentes para los diferentes tipos de suelos.

Lo anterior nos indica que los suelos en término de riego para los cultivos se deben de manejar de manera adecuada según el comportamiento que cada uno de los tipos de suelo que se presentan, en los cuales se presentarían sus funcionalidades que dependen de las características o parámetros que cada uno de ellos presenta.

#### **CC BY-NC-ND 4.0**

Claro está, el riego debe siempre de mantener el contenido de agua del suelo en el rango de agua útil ya que es el rango de contenido de agua en el suelo considerada como biológicamente activa, pero siempre en valores cercanos a capacidad de campo y alejado de los valores de punto de marchitez permanente para no provocar estrés en las plantas.

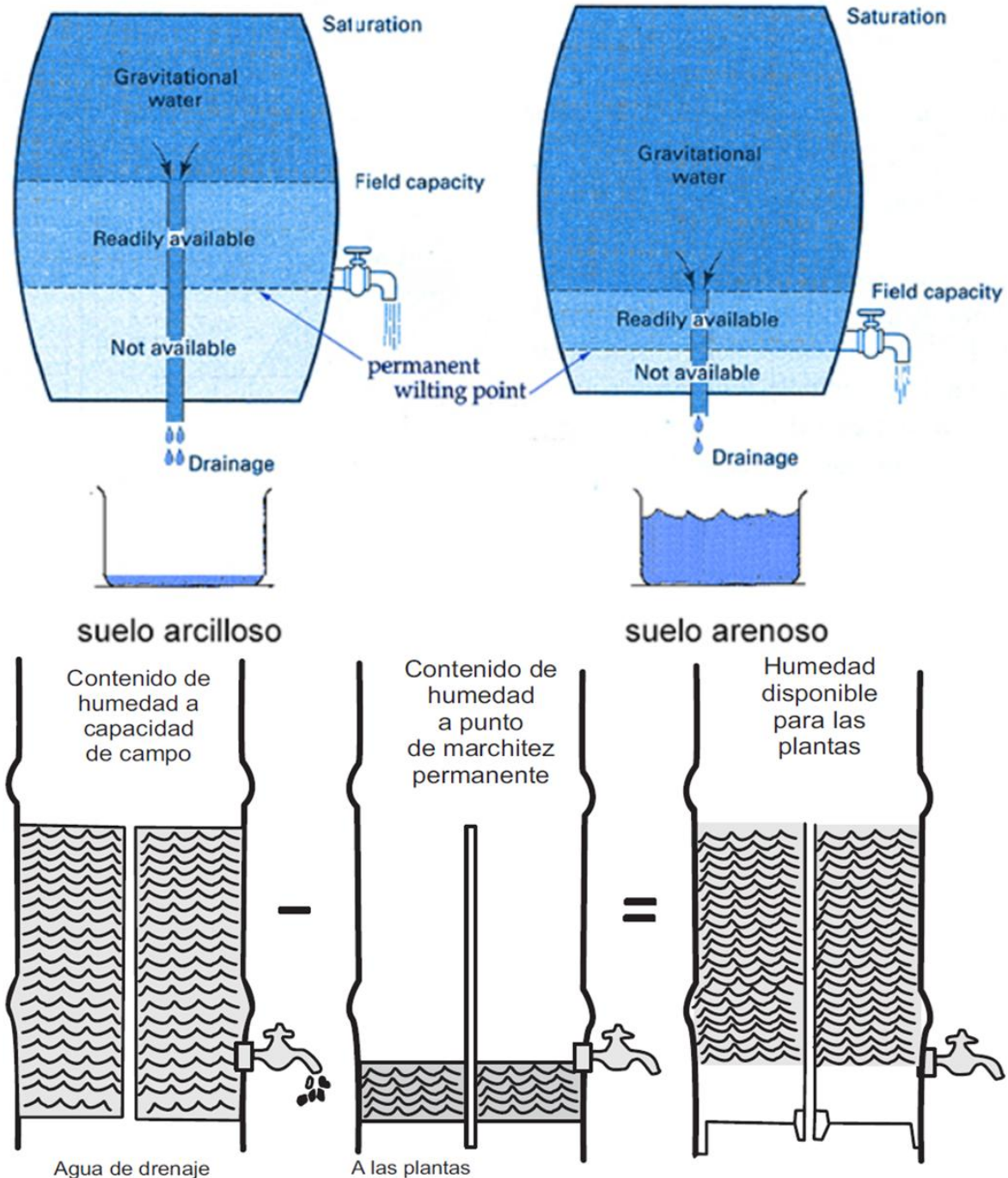


Figura 69: Representación gráfica del rango del agua disponible en el suelo

Tomado de: (Tema 3. CONSTITUYENTES. FASES LIQUIDA Y GASEOSA—)

Tomado de: (Dirección general de competitividad agrícola, Perú, 2011)

**CC BY-NC-ND 4.0**

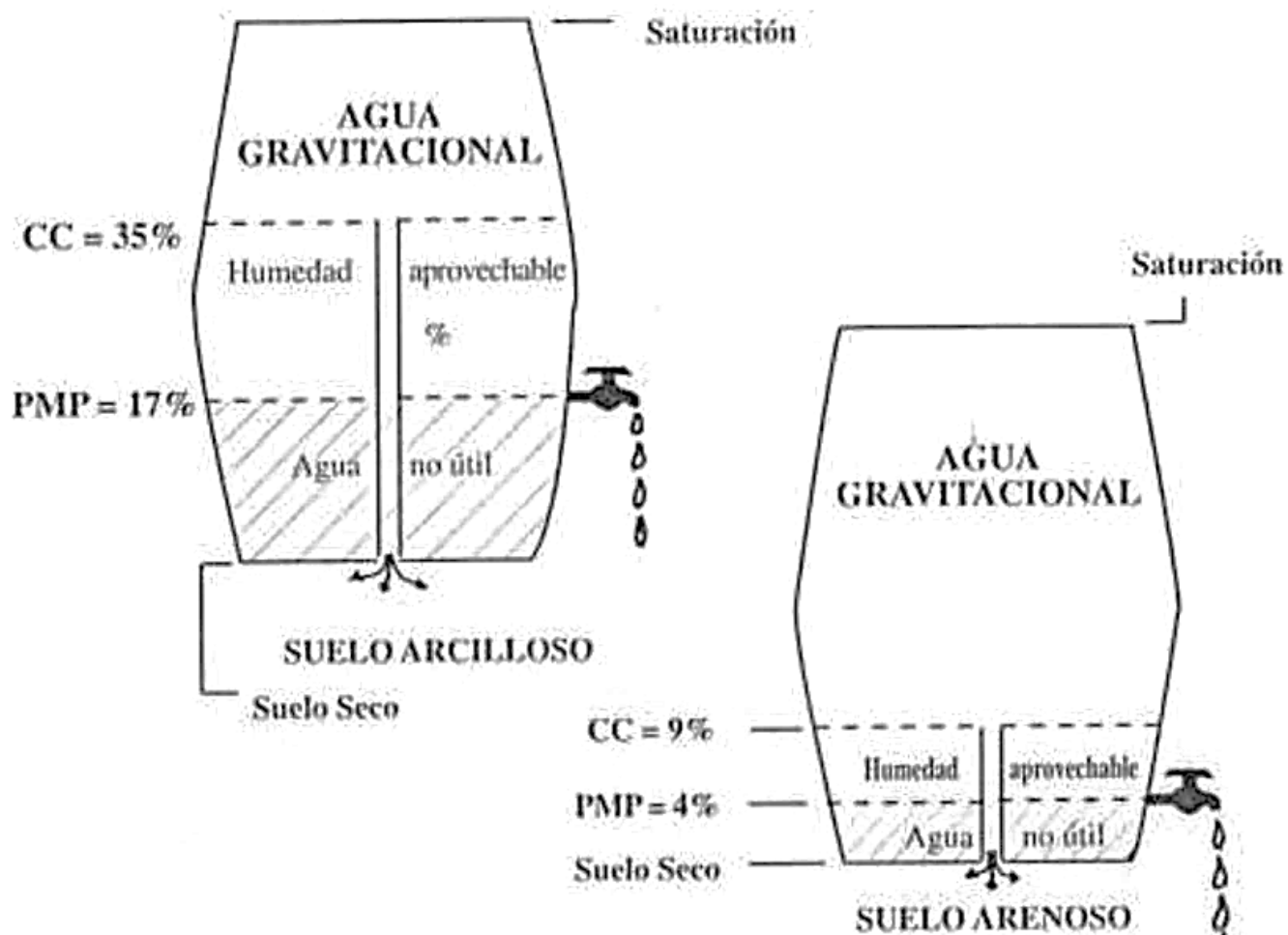


Figura 70: Representación gráfica con valores de CCg y PMPg del rango del agua disponible en el suelo

Tomado de: (Serra)

TEXTURA	CAPACIDAD DE CAMPO		PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE	
Arenoso	5 -15		3 -8	
Franco arenoso	10 -20		6 -12	
Franco	15 -30		8 -17	
Franco arcilloso	25 -35		13 -20	
Arcilloso	30 -70		17 -40	

Clase textural	CC (%)		PMP (%)	
Arcilla	23-46		13-29	
Franco arcillosa	18-23		9-10	
Franca	12-18		4-11	
Franco arenosa	8-13		4-6	
Arena	5-7		1-3	

	Punto de Marchitez Textura		Capacidad de Campo (Agua por 30 cm. de profundidad)		Agua Disponible	
	%	cm	%	cm	%	cm
Arena media	1.7	0.76	6.8	3.1	5.1	2.3
Arena fina	2.3	1.1	8.5	3.8	6.2	2.8
Franco-arenoso	3.4	1.5	11.3	5.1	7.9	3.6
Fco-arenoso fino	4.5	2.0	14.7	6.6	10.2	4.6
Franco	6.8	3.1	18.1	8.1	11.3	5.1
Franco limoso	7.9	3.6	19.8	8.9	11.9	5.3
Franco arcilloso	10.2	4.6	21.5	9.7	11.3	5.1
Arcilloso	14.7	6.6	22.6	10.2	7.9	3.6

Fuente: Adaptado de "Water", The Yearbook of Agriculture, USDA (1955)

Figura 71: Variación del contenido de humedad del suelo según la textura

Tomado de: (Silva C. , Silva R. , Garrido S. , & Acevedo H. , 2015)

**Rango del agua en el suelo del agua NO disponible:** este rango de agua se considera el agua biológicamente SIN actividad de aprovechamiento para la vida que se soporta en el suelo y dentro de estos se encuentra la gran mayoría de biomasa de las plantas (por ello usualmente se le llama Agua NO Disponible para las Plantas) (Figuras 72, 73 y 74). Esta agua se encuentra dentro de los poros capilares del suelo llamados micro poros y por ello el agua se encuentra retenida por las fuerzar capilares muy altas dentro de los poros muy pequeños de la matriz del suelo. Esté rango de agua NO disponible se encuentra entre el punto de agua a marchitez

#### **CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

permanente y el suelo completamente seco donde se logra cuando el suelo es secado en horno a 105 °C por 24 horas y el suelo estaría lleno de aire con cantidad de humedad igual a cero:

$$\%HNDg = \%PMPg - 0\%H$$

$$\%HNDg = \%PMPg$$

$$\%HNDv = \%PMPv - 0\%H$$

$$\%HNDv = \%PMPv$$

De donde podemos ver que toda la cantidad de agua que se encuentra en los micro poros se considera como agua no disponible para la gran mayoría de las plantas

Donde:

%HDg = porcentaje de agua disponible gravimétrico

% PMPg = porcentaje del punto de marchitez permanente gravimétrico

%HDv = porcentaje de agua disponible volumétrico

% PMPv = porcentaje del punto de marchitez permanente volumétrico

%H = porcentaje de humedad

Dentro de este rango de agua NO disponible que se presenta dentro de los microporos se encuentran dos rangos más y dos puntos más que viene a ser subdivisiones dentro de este rango de agua. Estos rangos y puntos son los siguientes:

**Punto de Coeficiente Higroscópico (CH):** es el punto donde la cantidad de agua que permanece en el suelo (Figuras 72, 73 y 74) tiene un estado energético de -50 atm s -31 atm o 3,1 mega Pascales (Mpa)

**Rango Agua Capilar NO Disponible:** es el rango de agua que se encuentra entre los estados energéticos de 15 atm que pertenece al punto de marchitez permanente a 31 atm (Figuras 72, 73 y 74) que es el punto de coeficiente higroscópico

**Rango de Agua Higroscópica:** es el rango de agua que existe desde los estados energéticos de -50 atm a -31 atm perteneciente al coeficiente higroscópico hasta 10 000 atm que corresponde al estado de energético del suelo seco. Se dice que esta agua no es líquida, sino

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

que es un vapor de agua que se encuentra alrededor de las partículas del suelo la cual es muy poca (Figuras 72, 73 y 74).

Por último se presenta el agua constitutiva de la fracción mineral del suelo que sería la siguiente:

**Agua de combinación química o constitutiva de la fracción mineral del suelo:** esta agua forma parte de compuestos químicos y un ejemplo de estos es la limonita (mineral secundario del suelo) cuya constitución química es  $Fe_2O_3 \times 2H_2O$  o  $(FeO(OH) \cdot nH_2O)$ . Esta agua que se encuentra de manera constitutiva del mineral secundario del suelo no es disponible para las plantas, y es biológicamente en su totalidad inactiva

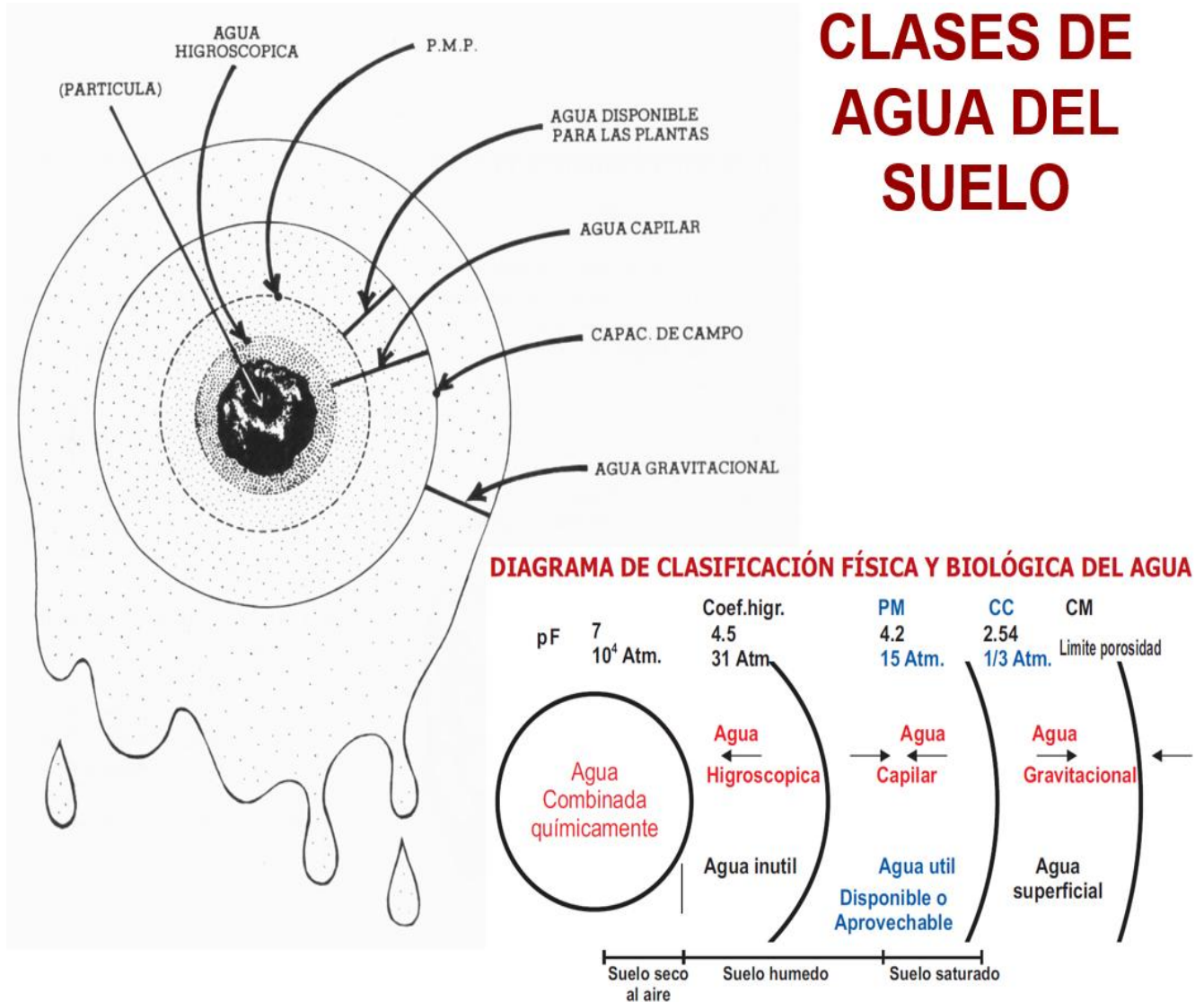


Figura 72: Representación gráfica de los puntos y rangos de agua disponibles y no disponibles para la vida en el suelo

Tomado de: (Dirección general de competitividad agrícola, Perú, 2011)

**CC BY-NC-ND 4.0**

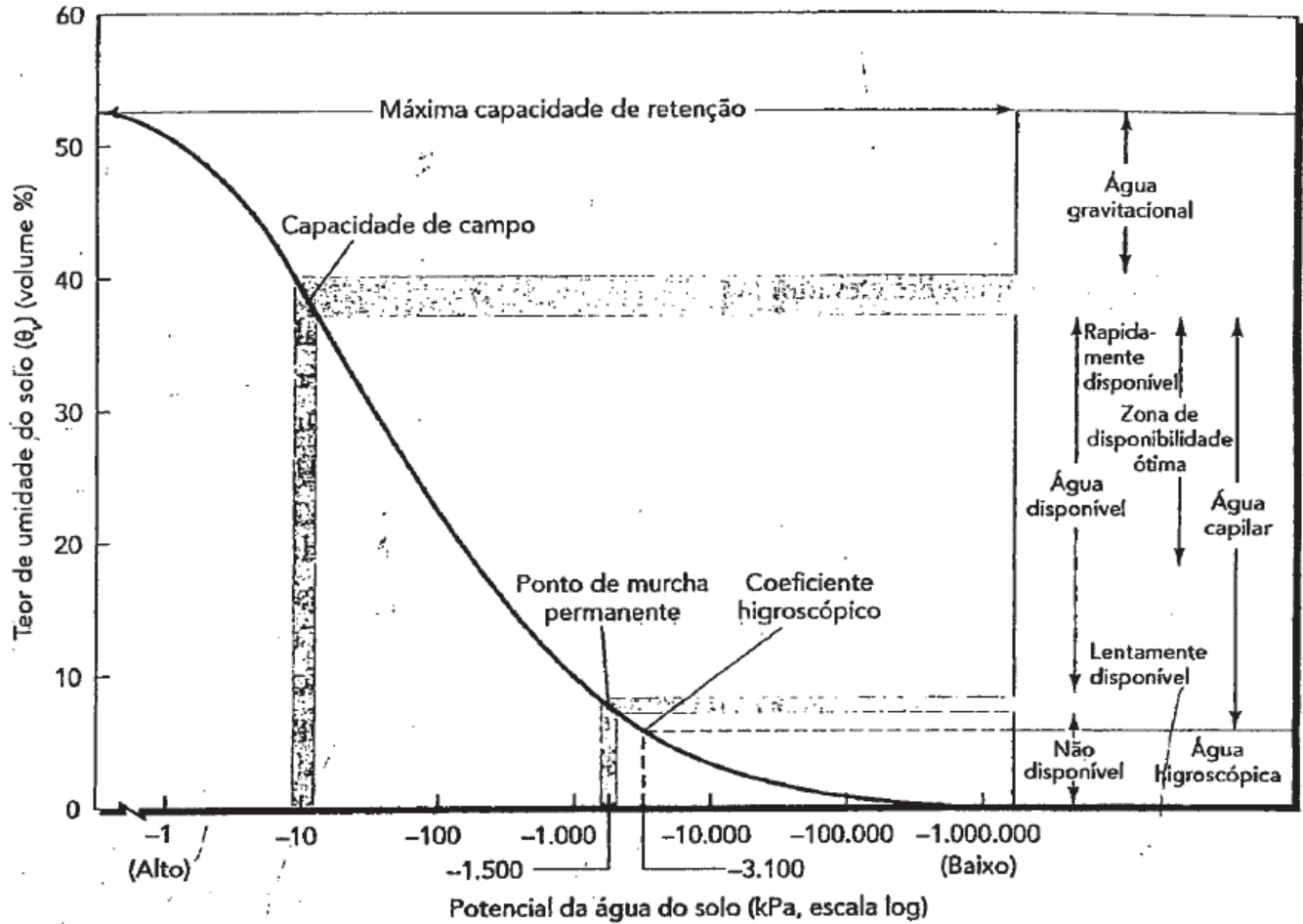


Figura 73: Água del suelo en sus características y comportamiento

Tomado de: (Brady & Weil, 2013)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

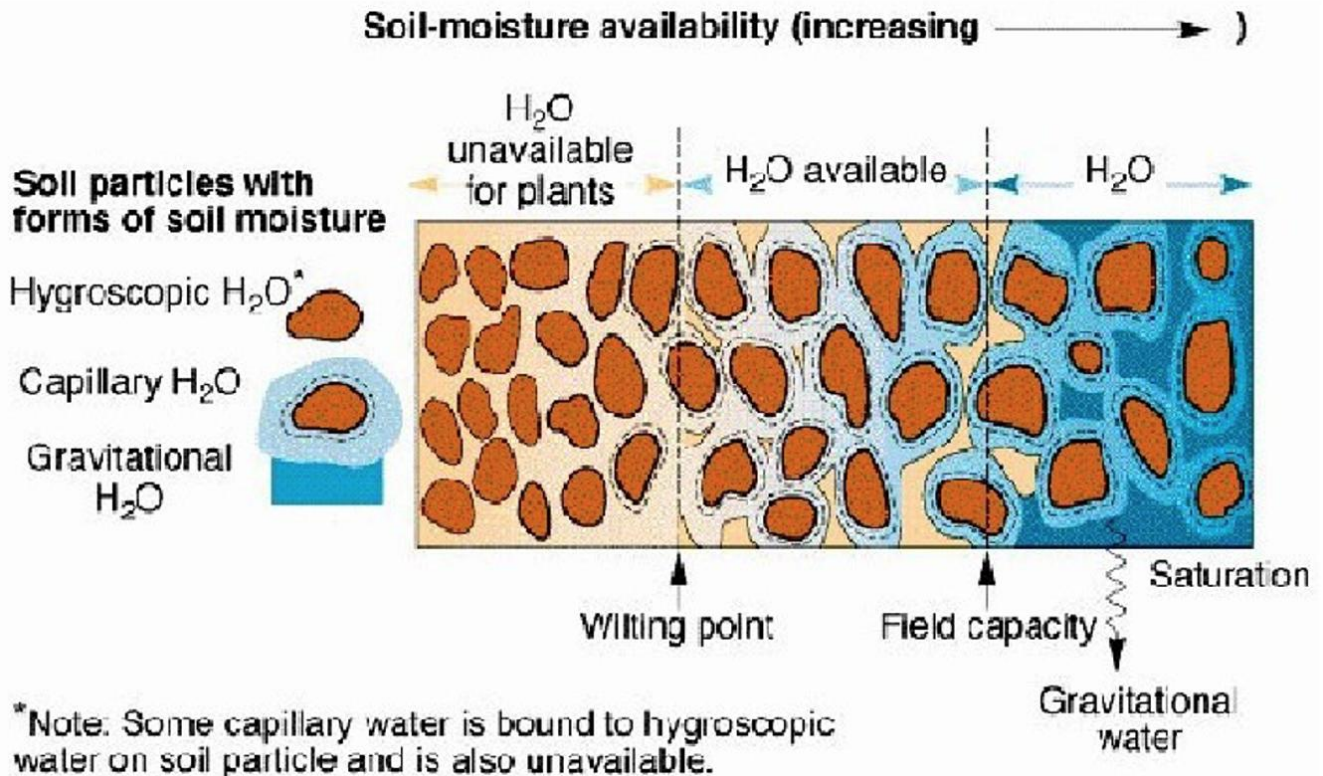


Figura 74: Descripción detallada de la asociación entre las regiones de respuesta del cultivo y el suelo y la disponibilidad de humedad del suelo. Fuente: Rhoads y Yonts, 1984.

Tomado de: (Schwyter & Vaughan, 2020)

Los tipos de suelos en sus texturas, estructuras y en sus diferentes horizontes se presentan macro, meso y micro poros pero en proporcionalidades o porcentajes diferentes lo que hace que los suelos tengan diferentes cantidades de rangos de agua gravitacionales (considerada como no son disponibles para las plantas), disponible para las plantas y NO disponibles para las plantas y también, variaciones en los contenidos de humedad respecto a los puntos de humedad como los de capacidad de campo, y el de marchitez permanente.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

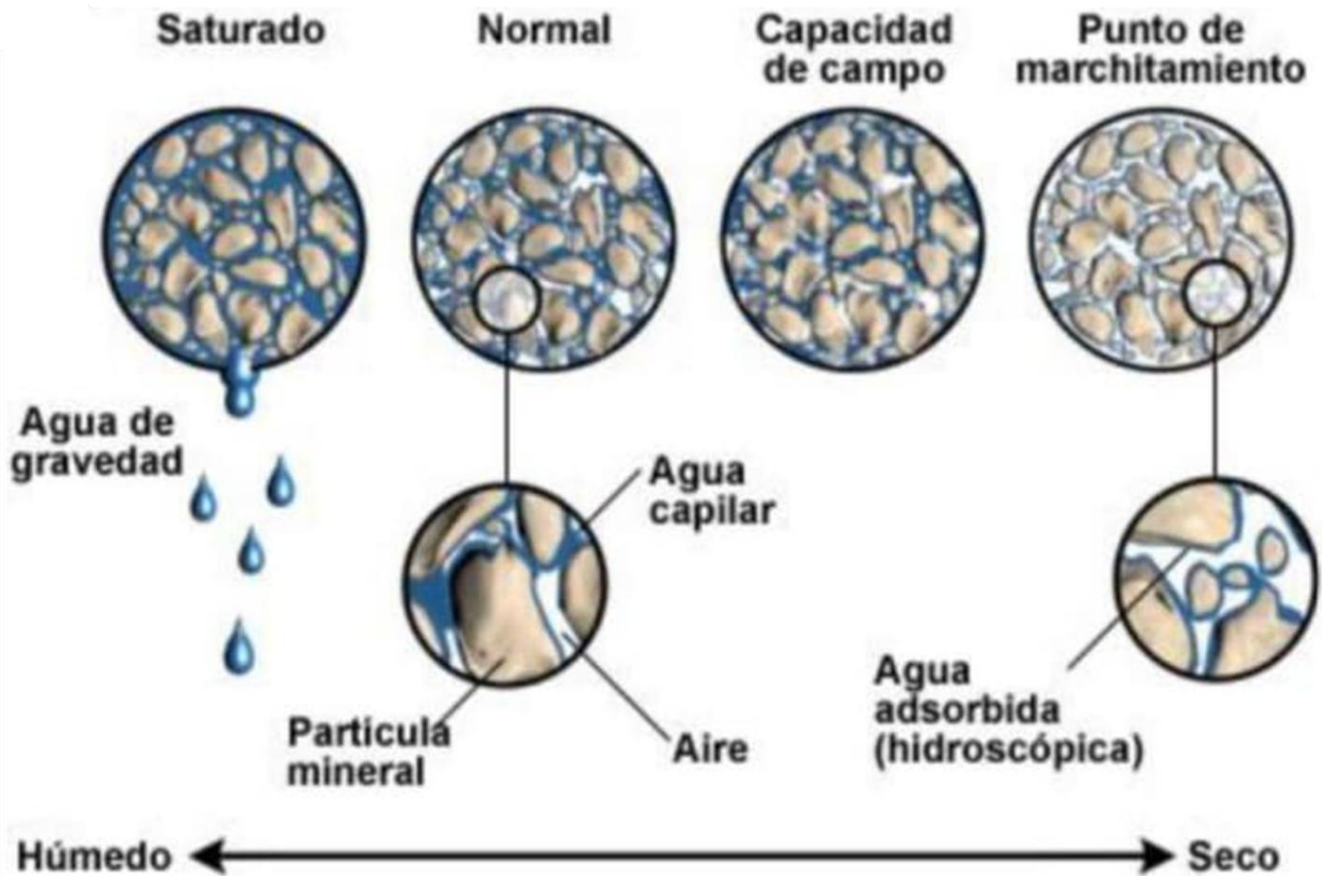


Figura 75: Representación gráfica del agua en el suelo desde el estado de completamente seco hasta el estado de saturación donde muestra que a pesar de haber espacio poroso libre de agua aún sigue drenando rápido hasta llega a CC.

Tomado de: (Agroquímicos Arca S. A. de C.V., 2020)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

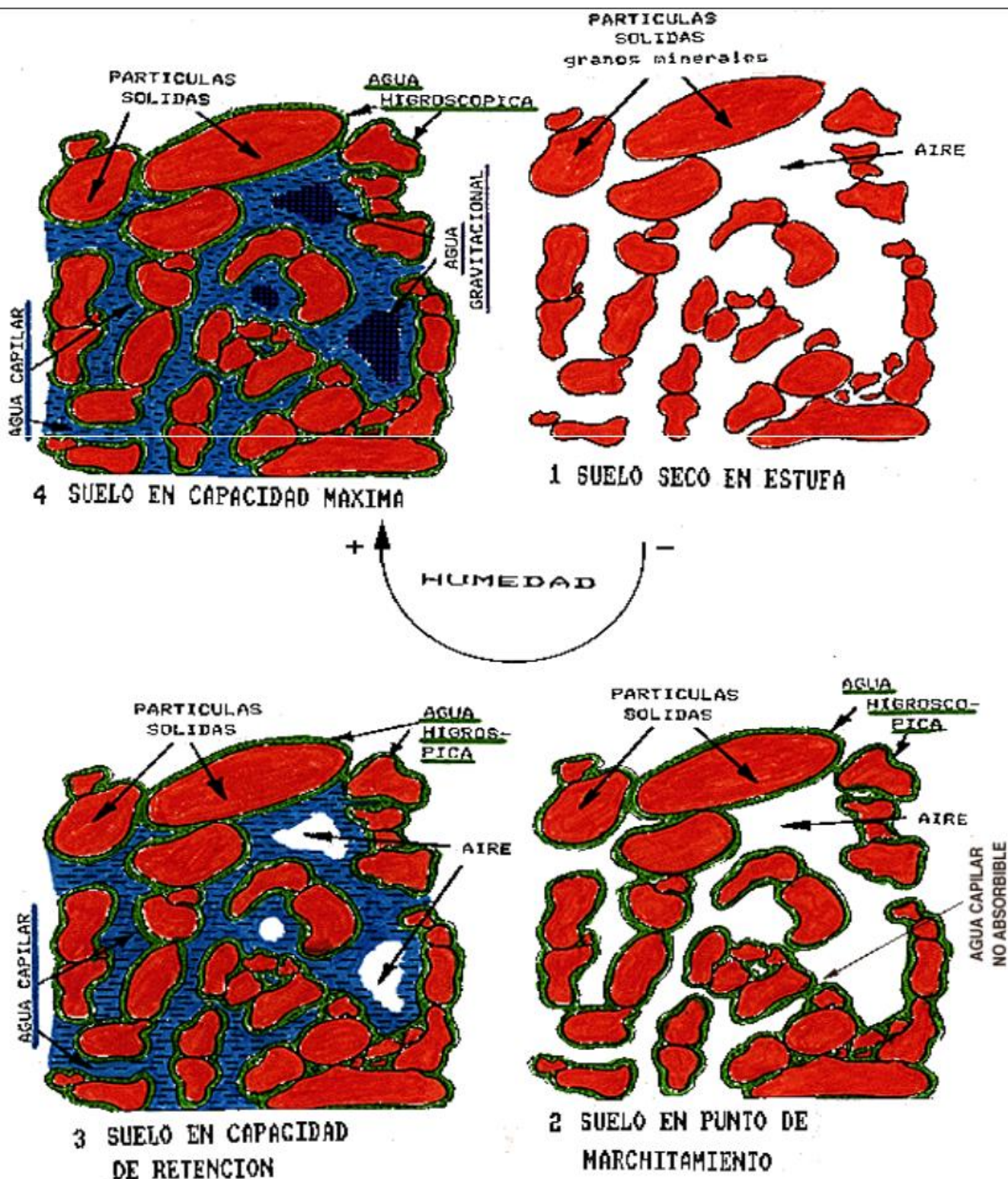


Figura 76: Representación gráfica del agua en el suelo desde el estado de completamente seco hasta el estado de saturación

Tomado de: (Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Unidad de Hidrología, Departamento de Suelos y Aguas)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

Textura	Porosid. total (%)	DA (g cm <sup>-3</sup> )	CC (%)	CMP (%)	Agua disponible		
					H% p.s.	H% vol	H mm 10 cm <sup>-1</sup>
Arenoso	38	1.65	9	4	5	8	8
	(32-42)	(1.55-1.8)	(6-12)	(2-6)	(4-6)	(6-10)	(7-10)
Franco-arenoso	43	1.5	14	6	8	12	12
	(40-47)	(1.4-1.60)	(10-18)	(4-8)	(6-10)	(9-15)	(9-15)
Franco	47	1.4	22	10	12	17	17
	(43-49)	(1.35-1.5)	(18-26)	(6-10)	(10-14)	(14-20)	(14-19)
Franco-arcilloso	49	1.33	27	13	14	19	19
	(47-51)	(1.3-1.4)	(23-31)	(12-15)	(12-16)	(16-22)	(17-22)
Arcillo-Arenoso	51	1.3	31	15	16	21	21
	(49-53)	(1.25-1.35)	(27-35)	(14-18)	(14-18)	(18-23)	(18-23)
Arcilloso	53	1.25	36	17	18	23	23
	(51-55)	(1.2-1.3)	(31-39)	(16-20)	(16-20)	(20-25)	(20-25)

Figura 77: Resumen de propiedades físicas del suelo respecto a los contenidos de humedad o de agua para algunas texturas

Tomado de: (Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Unidad de Hidrología, Departamento de Suelos y Aguas)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

Otra clasificación cuya base es el comportamiento del suelo con respecto al contenido del agua donde se establecen puntos de contenido de humedad que son límites del comportamiento del suelo en su estado de adhesión y cohesión (Figuras 78, 79 y 80):

**Estado líquido:** es el que presentan los suelos cuando manifiestan las propiedades de una suspensión.

**Estado semilíquido:** cuando los suelos tienen el comportamiento de un fluido viscoso.

**Estado plástico:** en el cual los suelos presentan las propiedades de plasticidad mencionadas anteriormente.

**Estado semisólido:** en el que la apariencia de los suelos es de un sólido; sin embargo, al secarse disminuye su volumen.

**Estado sólido:** en el que el volumen de los sólidos no varía aun cuando se le someta a secado.

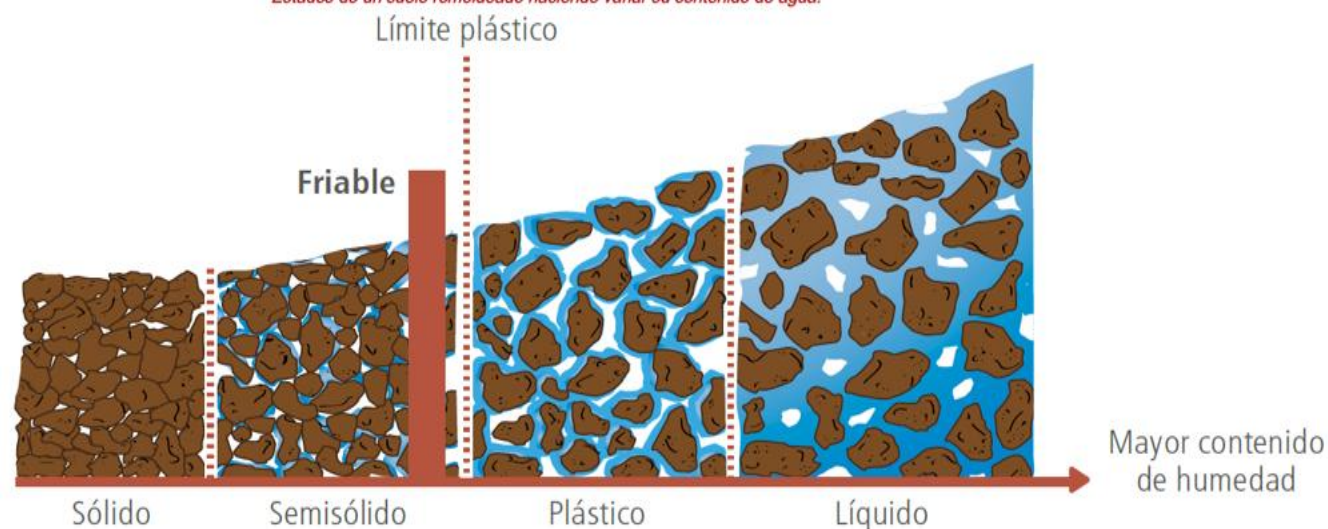
**LL Límite Líquido:** frontera superior entre el estado plástico y el semilíquido.

**LP Límite Plástico:** frontera inferior entre el estado plástico y el semisólido.

**LC Limite de contracción:** frontera entre los estados semisólido y sólido

ESTADO	SÓLIDO	SEMI SÓLIDO	PLÁSTICO	SEMI LÍQUIDO	LÍQUIDO
FRONTERA		LC	LP	LL	

*Estados de un suelo remoldeado haciendo variar su contenido de agua.*



A la diferencia aritmética entre el límite líquido y el límite plástico, se le conoce como índice plástico (IP).

Figura 78: Estados de la humedad del suelo desde el punto de vista cualitativo del comportamiento de suelo con diferentes cantidades de agua

Tomado de: (Rodríguez Hurtado & Valencia Montenegro, 2015)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

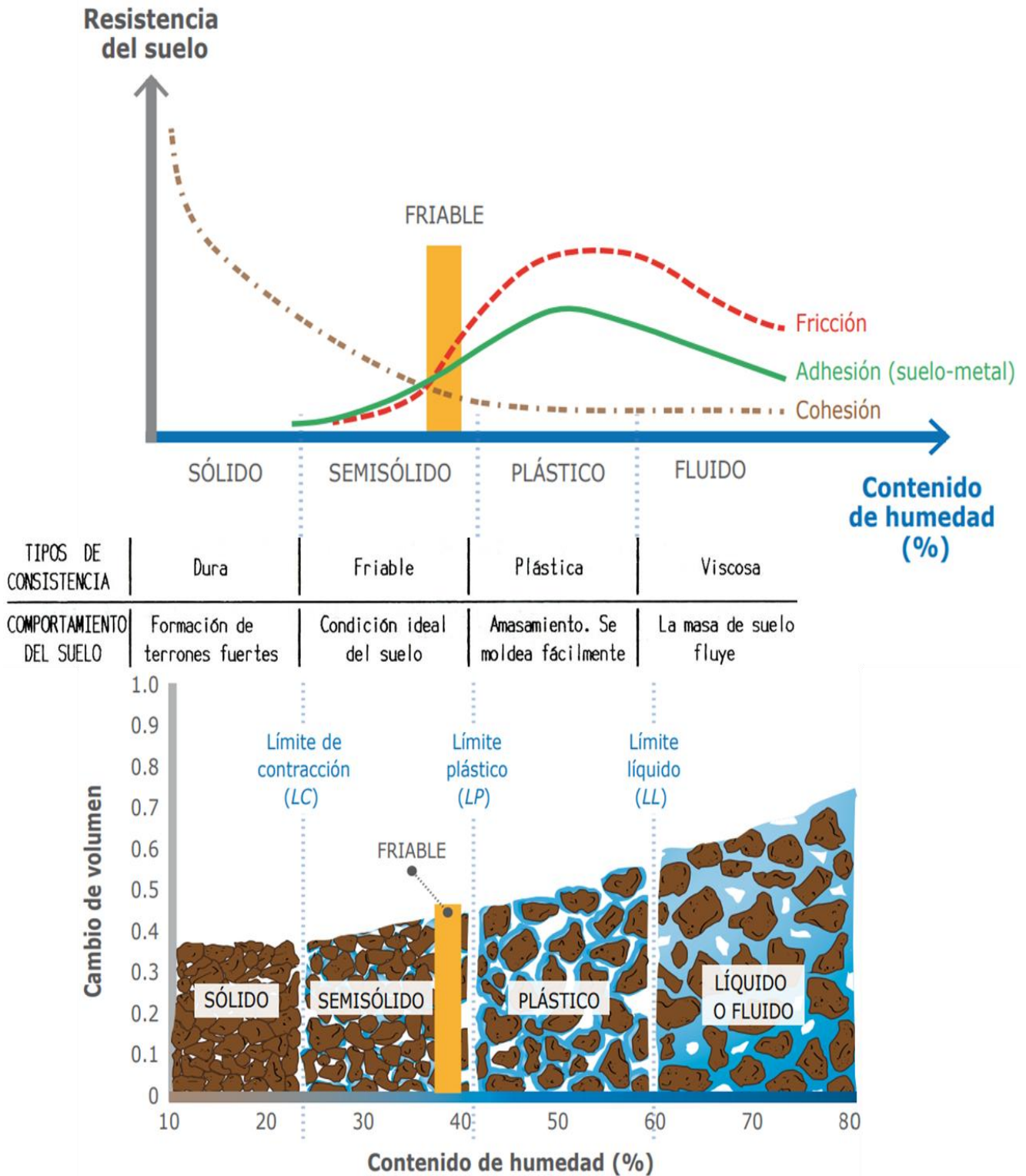


Figura 79: Estados de la humedad del suelo desde el punto de vista cualitativo del comportamiento de suelo con diferentes cantidades de agua y la actividad de la consistencia del suelo con respecto a la cohesión y la adhesión  
 Tomado de: (Rodríguez Hurtado & Valencia Montenegro, 2015)

**CC BY-NC-ND 4.0**

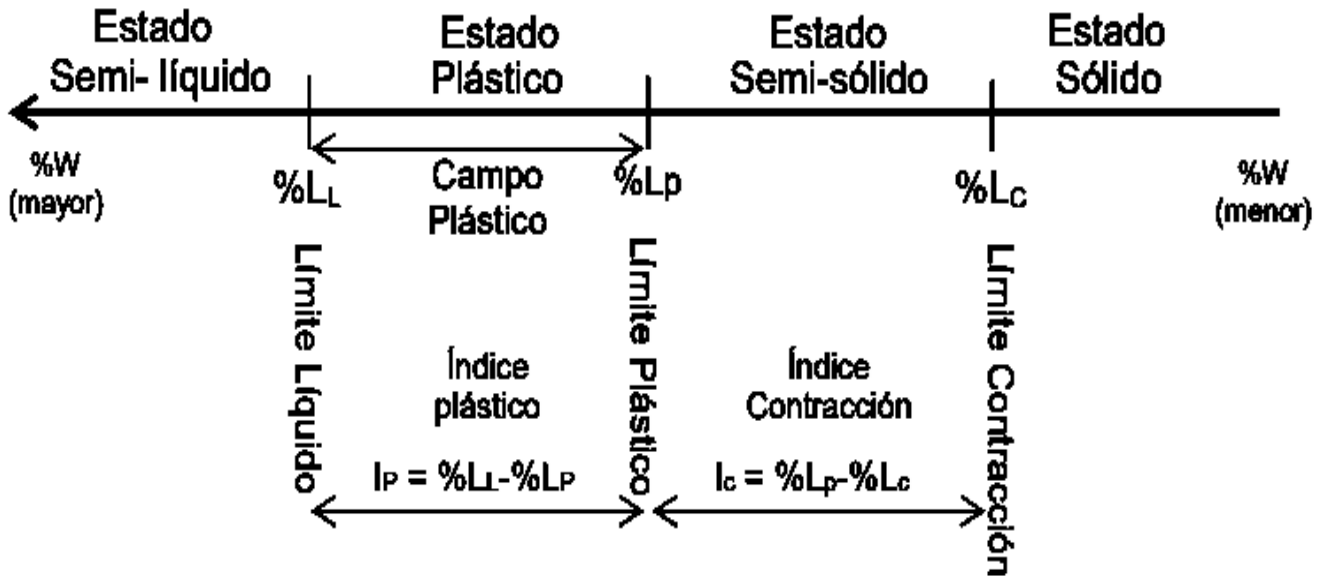


Figura 80: Índice plástico e índice de contracción

Tomado de: (Laboratorio de mecánica de suelos. Práctica 6, Límites de consistencia)

### Procedimiento

- Se toma el peso húmedo de la muestra para densidad aparente
- Se toma el peso seco de la muestra para densidad aparente
- Se calcula la humedad gravimétrica
- Se calcula la humedad volumétrica con el valor de densidad aparente y humedad gravimétrica

#### 1- Porosidad total del suelo

El crecimiento de las plantas, del que depende su producción económica, está determinado por factores atmosféricos, biológicos y edáficos. Estos últimos son físicos y químicos, siendo los primeros las propiedades del suelo que determinan el crecimiento radicular y la dinámica del aire y del agua. Estas propiedades del suelo, están determinadas por las características cuantitativas y cualitativas del espacio del suelo no ocupado por sólidos, denominado espacio poroso (Figuras 81, 82, 83, 84 y 86).

Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macroporos, mesoporos y microporos. Los primeros no retienen el agua contra la fuerza de la gravedad, y por lo tanto son los

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

responsables del drenaje y la aireación del suelo, constituyendo además, el principal espacio en el que se desarrollan las raíces. Los otros dos son los que retienen agua, donde los mesoporos son los que retienen el agua disponible para las plantas.

La porosidad total o espacio poroso del suelo, es la suma de macroporos, mesoporos y microporos.

Se considera como una buena condición de porosidad en el suelo aquella que tiene la presencia de muchos macro y meso poros, la condición de porosidad moderada presentan menor proporción o cantidad de macro y meso poros que la condición buena y la condición de pobre porosida presenta muchísimos micro poros y pocos o muy pocos macro y meso poros.

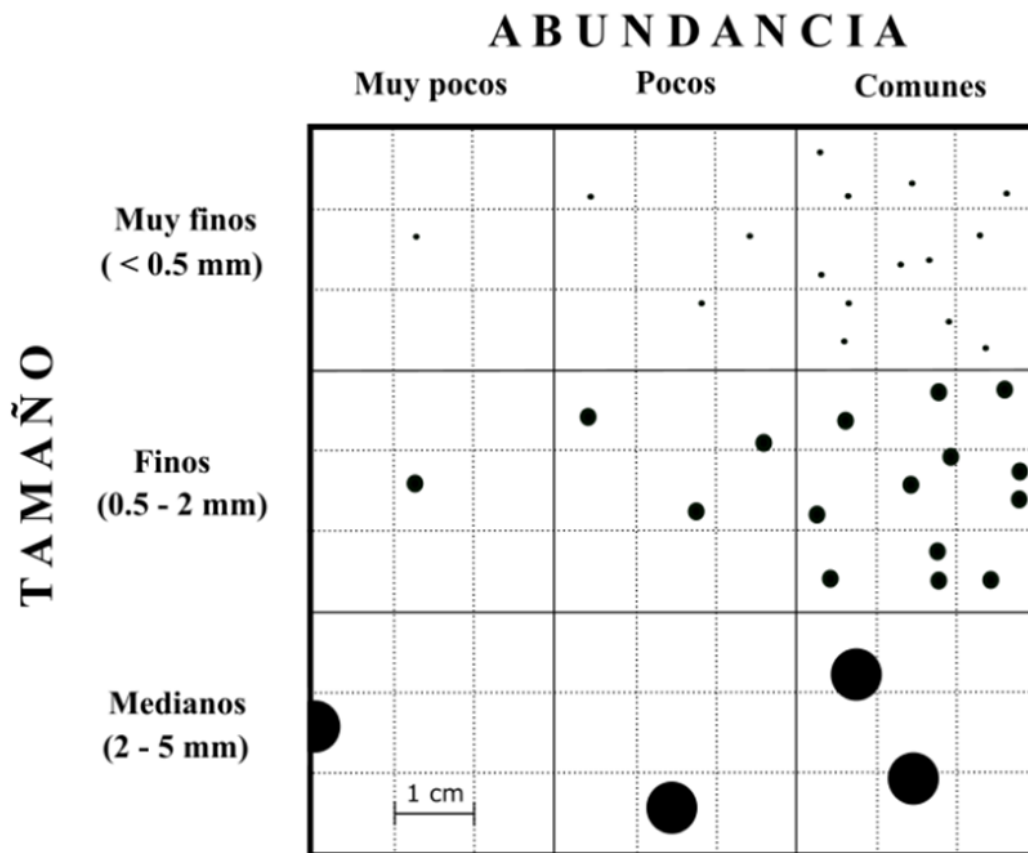


Figura 81: Esquema para la estimación de la porosidad existente en el suelo  
Tomado de: (3er Curso Mexicano de Evaluación de Suelos (CMES), 2020)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

Nombre	Tamaño (micras)	Función
Macroporos	> 100	Aireación y drenaje (flujo de gravedad)
Mesoporos	30 – 100	Conducción de agua (flujo capilar rápido)
Microporos	3 – 30	Retención de agua (flujo capilar lento)

Figura 82: Definición de los poros según su tamaño

Tomado de: (Flores Delgadillo & Alcalá Martínez, 2010)

Los suelos con buena estructura tienen una alta porosidad entre y dentro de los agregados, pero los suelos con estructura pobre pueden no tener macroporos dentro de los terrones grandes, lo cual restringe su capacidad de drenaje y aireación.

A su vez, una aireación deficiente conduce a la acumulación de dióxido de carbono, metano y gases sulfurosos, y reduce la capacidad de las plantas para absorber agua y nutrientes, particularmente nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y azufre (S).

Las plantas solo pueden utilizar S y N en forma de sulfato oxigenado ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). Por lo tanto, las plantas requieren suelos aireados para una eficiente absorción y utilización de S y N.

Es decir que una escasa macroporosidad que condiciona el uso del agua y nutrientes pone ciertas restricciones a la información obtenida de los análisis químicos de suelo que normalmente se realizan al momento de elaborar estrategias de fertilización.

El número, la actividad y la biodiversidad de los microorganismos y las lombrices de tierra también son mayores en suelos con buena porosidad y estos organismos pueden descomponer y reciclar la materia orgánica y los nutrientes más eficientemente con buen intercambio gaseoso cuando existen suficientes macro poros para este proceso.

Cuanto mayor es la porosidad, mejor es el drenaje y, por lo tanto, es menos probable que los poros del suelo se llenen de agua hasta los niveles críticos necesarios para acelerar la producción de gases de efecto invernadero, como, por ejemplo, óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ )

#### **CC BY-NC-ND 4.0**



Figura 83: Condición buena, moderada y pobre porosidad (de izquierda a derecha)  
 Tomado, de: (Álvarez, Leizica, & Gómez, 2021)  
 Tomado de: (Benites Jump, 2014)

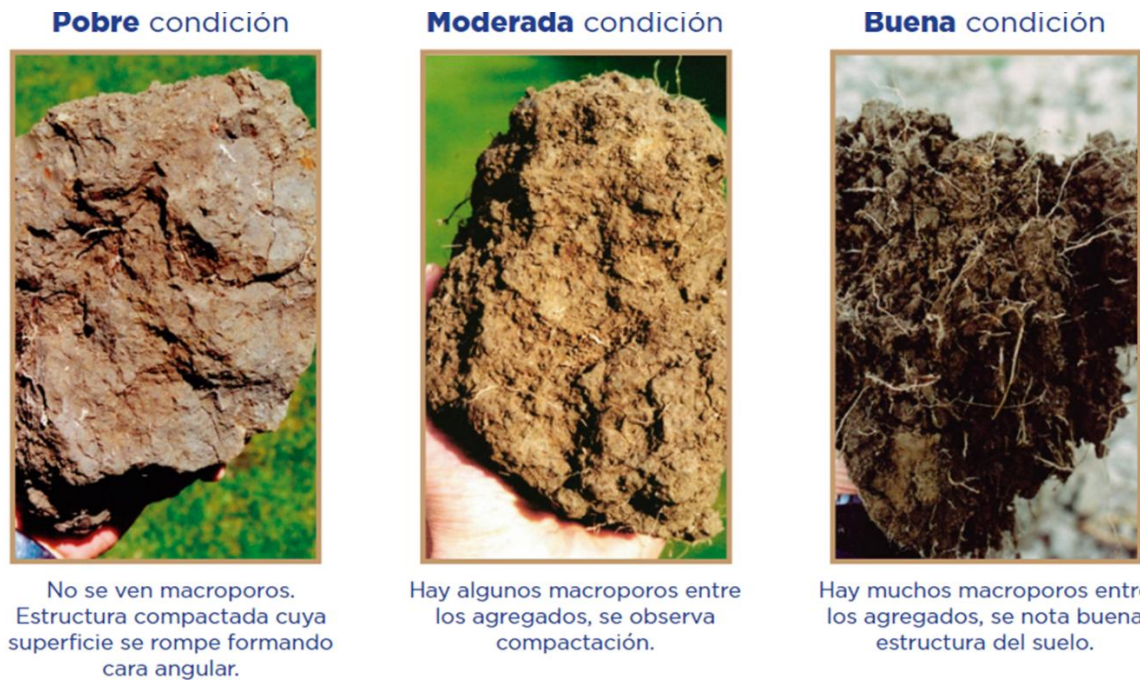


Figura 84: Características visuales de pobre, moderada y buena condición de porosidad con respecto a la macroporosidad  
 Tomado de: (Catholic Relief Services)

**CC BY-NC-ND 4.0**

En cuanto a la magnitud de la porosidad total, es mayor cuando en la textura dominan las fracciones finas que cuando dominan las gruesas. Los suelos arcillosos poseen más porosidad total que los arenosos (Figura 85).

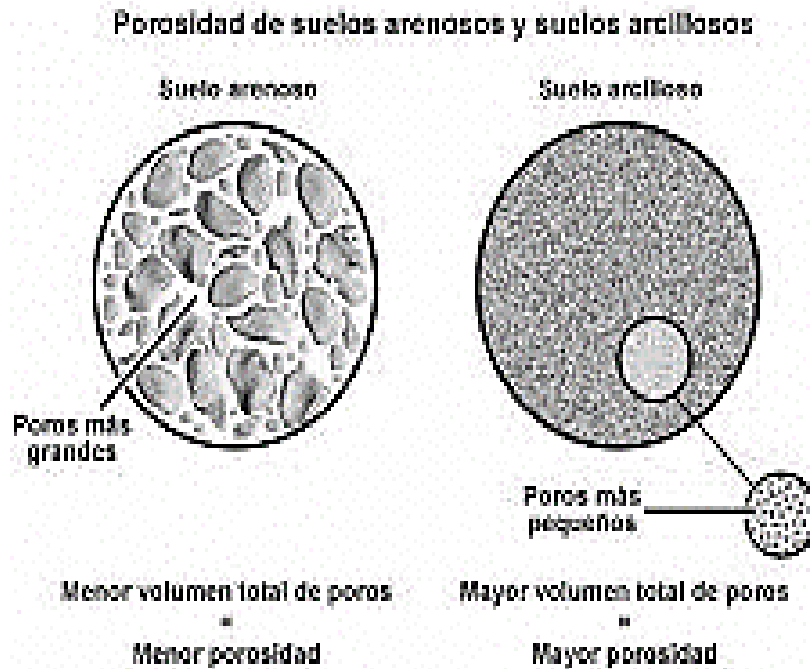


Figura 85: Porosidad tanto de poros grandes como de poros pequeños

**CC BY-NC-ND 4.0**



**GOOD CONDITION VS = 2**  
Good distribution of friable finer aggregates with no significant clodding



**MODERATE CONDITION VS = 1**  
Soil contains significant proportions of both coarse firm clods and friable, fine



**POOR CONDITION VS = 0**  
Soil dominated by extremely coarse, very firm clods with very few finer aggregates



**GOOD CONDITION VS = 2**  
Soils have many macropores between and within aggregates associated with readily apparent good soil structure



**MODERATE CONDITION VS = 1**  
Soil macropores between and within aggregates have declined significantly but are present on close examination of clods showing a moderate amount of consolidation



**POOR CONDITION VS = 0**  
No macropores or coarse micropores are visually apparent within compact, massive structureless clods that typically show smooth faces with sharp angles, and have few cracks or holes

Figura 86: Diferentes condiciones de porosidad del suelo con respecto a la estructura del suelo

Tomado de: (Benites Jump, 2014)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

La porosidad, se expresa como el porcentaje del volumen del suelo ocupado por poros, o lo que es lo mismo, el porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. Supóngase que en  $10 \text{ cm}^3$  de suelo existen  $4,5 \text{ cm}^3$  no ocupados por sólidos. La porosidad total de este suelo será 45 %.

La porosidad total se determina directamente, en muestras de suelo indisturbadas, es decir tal como están en el campo, sin ninguna deformación que altere la ubicación de las partículas sólidas, y por lo tanto los espacios que dejan entre ellas.

La porosidad depende de la textura, de la estructura materia orgánica y de la actividad biológica del suelo y otros. Cuanto más gruesos son los elementos de la textura mayores son los poros entre ellos pero no tan numerosos, salvo si las partículas más finas se colocan dentro de los poros, o sí los coloidales los obturan. No obstante los suelos limosos y arcillosos, poseen alta cantidad de poros pero de pequeño tamaño a excepción de los suelos arcillosos bien estructurados. La materia orgánica contribuye a aumentar sensiblemente la porosidad.

La porosidad es la relación existente entre el volumen no ocupado por las partículas sólidas del suelo y el volumen total del suelo. Comprende porosidad capilar (meso y micro poros) y macroporos. La porosidad influye en:

- Capacidad de retención de agua
- Movimiento del aire en el suelo
- Movimiento del agua en el suelo
- Afecta el crecimiento radical
- Afecta permeabilidad e infiltración

El laboreo; al adicionar materia orgánica a los suelos, afecta el porcentaje de porosidad (lo incrementa.)

Para su cálculo se utilizan los datos de densidad real y densidad aparente utilizándose la fórmula:

$$\% \text{Porosidad} = \left[ 1 - \left( \frac{D_a}{D_r} \right) \right] \times 100$$

o

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

$$\%P = \frac{(Dr - Da)}{Dr} * 100$$

$\%P = \%Porosidad (cm^3 \text{ de poros} / cm^3 \text{ de suelo})$

donde:

$Dr = \text{Densidad real (g/cm}^3\text{)}$

$Da = \text{Densidad aparente (g/cm}^3\text{)}$

También se puede calcular la porosidad del suelo por medio de la siguiente expresión:

$$\%P = \frac{\frac{\text{Peso suelo saturado (g)}}{D_{\text{agua}}} - \frac{\text{Peso suelo seco (g)}}{D_{\text{agua}}}}{\text{Volumen total de la muestra de suelo (cm}^3\text{)}} * 100$$

donde:

$D_{\text{agua}} = \text{densidad del agua (g/cm}^3\text{)}$

$\%P = \%Porosidad (cm^3 \text{ de poros} / cm^3 \text{ de suelo})$

La porosidad varía en un rango de entre 0 – 100 % donde para suelos arenosos la porosidad se encuentra usualmente entre 25 – 50 % y para suelos arcillosos varía entre 30 – 90 % aproximadamente.

Nota importante de la Porosidad Total del Suelo: Dentro de la porosidad total del suelo se considera que se encuentra el aire y el agua y la suma de estos valores con unidades volumétricas nunca puede ser mayor a la porosidad total teniendo las mismas unidades (incluye los porcentajes).

Quando la porosidad total del suelo está en porcentaje, es un porcentaje volumétrico y por ello es totalmente correcto a un porcentaje de porosidad total restarle un porcentaje de humedad volumétrica o un porcentaje de aire volumétrico pero es un error sumamente fuerte a un porcentaje de porosidad total restarle un porcentaje de humedad gravimétrica porque los dos porcentajes tienen unidades diferentes ya que uno es con base al volumen y el otro es con base a peso.

Por esto, se cumple y es correcto la siguiente ecuación:

$$\%P = \%HV + \%AV$$

**CC BY-NC-ND 4.0**

Pero no se cumple y es un muy fuerte error que se comete comúnmente la siguiente ecuación:

$$\cancel{\%P = \%HG + \%AV}$$

## 2- Relación de vacíos

La proporción de vacíos en un elemento de suelo se expresa en función de la Relación de Vacíos, Razón de vacíos o Índice de Poros, denotada con **e**.

Los rangos de valores de relación de vacíos que se encuentran comúnmente en los suelos granulares dependen de la organización de las partículas en el esqueleto del suelo.

$$e = \frac{n}{1 - n}$$

$$e = \frac{\frac{\%n}{100}}{1 - \frac{\%n}{100}}$$

Donde:

e = relación de vacíos en proporción

n = porosidad total en proporción

%n = porcentaje de porosidad

Los suelos más sueltos corresponden al máximo volumen de vacíos como aquellos que han sido preparados mecánicamente y el estado más denso corresponde al mínimo volumen de vacíos. Para suelos cohesivos, e = 0,55 – 5,0

También la relación de vacíos se puede calcular por la siguiente relación:

$$e = \frac{\text{Volumen de vacíos}}{\text{Volumen de sólidos}} = \frac{\text{Volumen de vacíos}}{\text{Volumen total} - \text{Volumen de vacíos}}$$

Los valores extremos que se obtienen en la práctica para suelos granulares se encuentran notablemente limitados por los valores teóricos. Los rangos típicos son los siguientes.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

arenas bien graduadas:

$$e = 0,43 - 0,67 \quad \text{y} \quad n = 30 \% - 40 \%$$

arenas de tamaño uniforme:

$$e = 0,51 - 0,85 \quad \text{y} \quad n = 34 \% - 46 \%$$

Es claro que el conocimiento de la relación de vacíos de un suelo en su estado natural no proporciona en sí mismo una información suficiente para establecer si el suelo se encuentra en su estado "suelto o denso".

Normalmente mediante test específico como los ASTM D4253 y D4354 se miden los dos índices de vacíos que son: el índice de vacíos máximo ( $e_{\max}$ ) y el índice de vacíos mínimos ( $e_{\min}$ ) donde la primera es la condición que corresponde a la densificación mínima y la segunda corresponde a la condición de máxima compactación. Con estos valores se puede calcular la densidad relativa y este es un parámetro especial que usualmente se utiliza para suelos arenosos y de grava.

Por lo anterior, esta información puede obtenerse sólo si la relación de vacíos e "in situ" se compara con la relación de vacíos máxima y mínima ( $e_{\max}$  y  $e_{\min}$ ), que pueden obtenerse con ese suelo. Por esto, tal comparación puede expresarse numéricamente en términos de la Densidad Relativa  $D_r$  del depósito de suelo, la cual se define como:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

### 3- Porosidad de aireación del suelo

La porosidad de aireación es la parte ocupada por aire de la porosidad total del suelo. Esta equivale a la diferencia entre el volumen de la porosidad total y el volumen de agua que contiene el suelo en el momento de la determinación de la porosidad. La porosidad de aireación se calcula a partir de los valores de la porosidad total, la humedad y la densidad del suelo y se expresa en porcentaje de volumen de este último

$$\% \text{Aire en el suelo} = \% \text{Poros} - \% \text{Hv}$$

$$\% \text{Aire en el suelo} = (\text{cm}^3 \text{ de aire} / \text{cm}^3 \text{ de suelo})$$

**CC BY-NC-ND 4.0**

## Procedimiento

- Se toma el valor de la densidad aparente calculada
- Se toma el valor de densidad real (teórico promedio o el calculado en laboratorios anteriores)
- Se calcula la porosidad total
- A la porosidad total se le resta la humedad volumétrica para calcular la porosidad de aireación

Ejemplo:

Se tiene un suelo con peso seco de 132,7 g y un peso húmedo de 181,4 g. EL volumen de suelo es de 100 cm<sup>3</sup>. Calcular el porcentaje de humedad gravimétrica, la densidad aparente y el porcentaje de humedad volumétrica, el porcentaje de porosidad y el porcentaje de aire que existe en el suelo suponiendo una densidad real de partículas de 2,65 g/cm<sup>3</sup>.

Cálculo de la humedad gravimétrica:

$$\%HG = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} * 100$$

$$\%HG = \frac{181,4 - 132,7}{132,7} * 100$$

$$\%HG = 36,69 \% \text{ (g de agua / g de suelo)}$$

Cálculo de la densidad aparente:

$$D_{ap} = \frac{\text{Peso suelo seco}}{\text{Volumen total del suelo (masa + poros)}}$$

$$D_{ap} = \frac{132,7 \text{ g}}{100,0 \text{ cm}^3}$$

$$D_{ap} = 1,327 \text{ g / cm}^3$$

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

Calculo del porcentaje de humedad volumétrica:

$$\%HV = \%Hg * Dap$$

$$\%HV = 36,69 * 1,327$$

$$\%HV = 48,69 \% \text{ (cm}^3 \text{ de agua / cm}^3 \text{ de suelo)}$$

Cálculo de la porosidad:

$$\%Porosidad = \left[ 1 - \left( \frac{Da}{Dr} \right) \right] \times 100$$

$$\%P = (1 - 1,327 / 2,65) * 100$$

$$\%P = 49,92 \% \text{ (cm}^3 \text{ de poros / cm}^3 \text{ de suelo)}$$

Cálculo del porcentaje de aire en el suelo:

$$\%Aire \text{ en el suelo} = \%Poros - \%Hv$$

$$\%Aire \text{ en el suelo} = (49,92 - 48,69)$$

$$\%Aire \text{ en el suelo} = 1,23 \% \text{ (cm}^3 \text{ de aire / cm}^3 \text{ de suelo)}$$

Del resultado se puede observar que el suelo se encuentra casi en estado de saturación

Cálculo de la relación de vacíos:

$$e = \frac{\frac{\%n}{100}}{1 - \frac{\%n}{100}}$$

$$e = \frac{\frac{49,92\%}{100}}{1 - \frac{49,92\%}{100}}$$

$$e = 0,9968$$

**CC BY-NC-ND 4.0**

## Preguntas

- 1- ¿Se puede restar al porcentaje de porosidad el porcentaje humedad gravimétrica? Explique completamente la respuesta sea ésta afirmativa o negativa
- 2- ¿Por qué no se usa el método del cilindro para estimar el valor de densidad aparente en suelos pedregosos o con muchas raíces grandes?
- 3- ¿Qué importancia tiene conocer la humedad para interpretar la densidad aparente? ¿En qué suelos tiene más importancia?
- 4- ¿Cuál es la razón por la que la densidad real de partículas sea mayor que la densidad aparente?
- 5- ¿Cómo es el movimiento del agua y del aire en los macroporos comparado con los microporos?

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

# Determinación del límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, índice de flujo, índice líquido, el punto adhesivo del suelo y el límite de contracción

## Objetivo

Determinar los puntos adhesivos, los límites líquidos y los límites plásticos y relacionarlos con las prácticas de laboreo agrícola.

## Introducción

Los temas se verán en las figuras 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117 y los cuadros 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19.

## Consistencia del suelo

La consistencia del suelo, es la manifestación de las fuerzas físicas de cohesión y adhesión que actúan dentro del mismo bajo varios estados de humedad, o sea, resistencia a la deformación o ruptura cuando se aplica una fuerza. La consistencia varía con la textura, materia orgánica, cantidad y naturaleza del material coloidal hasta cierto punto con la estructura y especialmente con el contenido de humedad.

La clasificación de la consistencia se hace con el suelo seco, húmedo y muy húmedo (mojado). Bajo condiciones de sequedad se dice que el suelo es blando, suave, duro, muy duro o cementado, cuando el suelo está húmedo se describe como muy friable, friable o poco friable, cuando está muy húmedo, (por encima de la capacidad de campo) se distinguen dos condiciones: plasticidad y pegajosidad. Así, se habla de suelos poco plásticos, plásticos, muy plásticos en suelos húmedos y suelos poco pegajosos, pegajosos y muy pegajosos en suelos mojados. Pueden darse condiciones combinadas como de alta plasticidad y poca pegajosidad, dependiendo de los tipos de arcillas, sus cantidades y de sus cationes adsorbidos.

A mayores contenidos de humedad, el suelo se vuelve plástico y pegajoso, esto es, exhibe características de flujo. Las propiedades de viscosidad del suelo se vuelven similares a la del agua en estado líquido.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

Un suelo plástico y pegajoso pierde estas propiedades, cuando su contenido de agua decrece. Adquiere entonces características de friabilidad siendo suave al tacto. Si la pérdida de agua se incrementa, el suelo pasa al estado seco volviéndose firme y más aún, duro.

Las sugerencias de clasificación de Atterberg, sin incluir el estado viscoso de los suelos, se han dividido en cuatro estados de consistencia:

- Pegajosa: característica de adherencia a los objetos (consistencia en mojado)
- Plástica: característica para ser moldeado (consistencia en mojado)
- Suave: caracterizado por la friabilidad y la firmeza (consistencia en húmedo)
- Duro o firme: caracterizado por la soltura y la dureza (consistencia en seco)

#### 1- Consistencia en seco:

En el caso de la consistencia en seco se determina la resistencia a la ruptura de los agregados y en su descripción se utilizan unos términos preestablecidos que a continuación definimos:

- Suelto: Se da en aquellos horizontes que carecen de estructura o la estructura que presentan es particular. No existen agregados en el suelo y falta cohesión entre ellas.
- Blando: Los agregados se rompen fácilmente entre los dedos en granos simples. Este tipo de consistencia suele estar asociado a estructuras migajosas o granulares.
- Ligeramente Duro: Se requiere de una ligera presión para romper el material, es decir, que es débilmente resistente a la presión del pulgar y el índice.
- Duro: Los agregados se rompen con dificultad entre ambos dedos y resiste moderadamente la presión.
- Muy duro: Los agregados se rompen difícilmente entre ambas manos pues presenta una resistencia elevada a la presión.
- Extremadamente duro: Los agregados no se pueden romper entre ambas manos y es extremadamente resistente a la presión. No se puede romper en la mano y algunas veces es necesario recurrir al martillo para desmenuzarlos

**CC BY-NC-ND 4.0**

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)**

## 2- Consistencia en húmedo:

En la determinación de la consistencia en húmedo se estima el contenido en humedad del suelo comprendido entre su sequedad y la humedad de la capacidad de campo. Los diferentes grados de determinación son:

- ✓ 2.1- Suelto: Sin coherencia
- ✓ 2.2- Muy friable: Los agregados se rompen fácilmente entre el pulgar y el índice mediante una muy ligera presión. No obstante se une cuando se comprime.
- ✓ 2.3- Friable. Se necesita una ligera presión entre el pulgar y el índice para romper los agregados.
- ✓ 2.4- Firme. Se requiere de una moderada presión para romper los agregados. El material se desmenuza bajo fuerte presión entre el índice y el pulgar, notándose una clara resistencia.
- ✓ 2.5- Muy firme. El material se desmenuza bajo fuerte presión, apenas desmenuzable entre el pulgar y el índice
- ✓ 2.6- Extremadamente firme. El material se desmenuza solamente bajo una presión muy fuerte y se debe romper pedazo a pedazo

## 3- Consistencia en mojado:

En la determinación de la consistencia en mojado, se estima la adhesividad y la plasticidad de los diferentes materiales y se suele realizar cuando la humedad del material está al nivel de la capacidad de campo o ligeramente superior.

### 3.1- Adhesividad:

La adhesividad o “pegajosidad” es la cualidad por la cual los materiales del suelo se adhieren a otros objetos. Se determina notando la adherencia del material cuando es presionado entre el pulgar y el índice.

- 3.1.1- No adherente: No existe adhesión natural del material de suelo a los dedos.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

- 3.1.2- Ligeramente adherente: Cuando sobre el material del suelo aplicamos una pequeña presión, el suelo se adhiere a ambos dedos. No obstante al separarlos, uno de ellos queda limpio.
- 3.1.3- Adherente. En el momento de aplicar la presión, el material se adhiere a ambos dedos y tiende a estirarse un poco y a partirse antes de separarse de cualquiera de los dedos.
- 3.2.4- Muy adherente: Bajo presión, el material del suelo se adhiere fuertemente a ambos dedos y cuando se separa se observa un estiramiento del material.

### 3.2- Plasticidad:

La plasticidad es la cualidad por la que el material edáfico varia de forma bajo la presión aplicada, manteniéndose dicha forma después de eliminar la presión. Se determina arrollando el material entre el pulgar y el índice.

- 3.2.1- No plástico: Al enrollar el material entre las manos no se puede formar un cordón.
- 3.2.2- Ligeramente plástico: Al enrollar el material entre las manos se forman pequeños cordones (longitud < 1 cm)
- 3.2.3- Plástico: Se puede formar cordones largos (longitud >1 cm) y se precisa de una presión moderada para deformar el bloque de material moldeado.
- 3.2.4- Muy plástico: Se forma fácilmente un cordón y se requiere mucha presión para de formar un bloque de material moldeado.

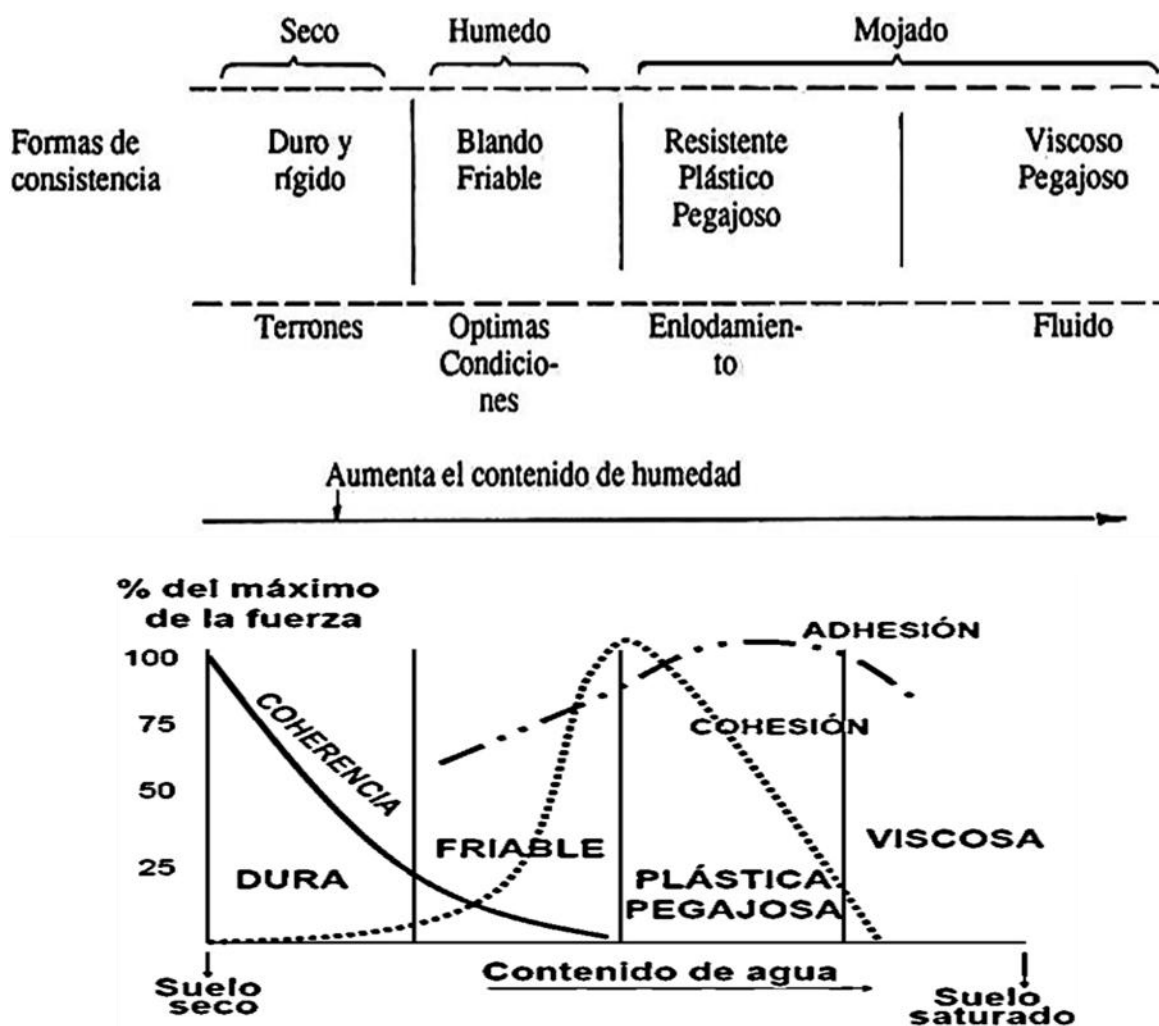


Figura 87: Humedad del suelo y el estado y comportamiento de las formas de consistencia del mismo

Los límites de Atterberg o también llamados límites de consistencia:

se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo de su propia naturaleza y la cantidad de agua que contengan. Así, un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semi-sólido, plástico, semi-líquido y líquido o viscoso (Figuras 87, 88 y 89).

- Estado líquido: es el que presentan los suelos cuando manifiestan las propiedades de una suspensión. Es una cantidad excesiva de agua que anula las fuerzas de atracción interparticular que mantiene unido al suelo, la cohesión y lo convierte en líquido viscoso sin capacidad resistente
- Estado semilíquido: cuando los suelos tienen el comportamiento de un fluido viscoso.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

- Estado plástico: en el cual los suelos presentan las propiedades de plasticidad mencionadas anteriormente y es fácilmente moldeable presentando grandes deformaciones con la aplicación de fuerzas o esfuerzos pequeños donde no se recupera su estado inicial una vez cesado el esfuerzo. Mecánicamente no es apto para resistir cargas adicionales..
- Estado semisólido: en el que la apariencia de los suelos es de un sólido; sin embargo, al secarse disminuye su volumen. El suelo deja de ser moldeable porque se quiebra y se resquebraja antes de cambiar de forma. No obstante, no es un sólido puro, ya que disminuye de volumen si continúa perdiendo agua. Su comportamiento mecánico es aceptable.
- Estado sólido: en el que el volumen de los sólidos no varía aun cuando se le someta a secado y es cuando el suelo alcanza la estabilidad y el comportamiento mecánico es óptimo.

La arcilla, por ejemplo, si está seca se encuentra muy suelta o en terrones, añadiendo agua adquiere una consistencia similar a una pasta, y añadiendo más agua adquiere una consistencia fluida. El contenido de agua con que se produce el cambio entre estados varía de un suelo a otro y en mecánica de suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de humedades para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, es decir, acepta deformaciones sin romperse (plasticidad). Se trata de la propiedad que presentan los suelos hasta cierto límite.

El método usado para medir estos límites de humedad fue ideado por el científico sueco Albert Atterberg en el año 1911. Los límites de Atterberg son propiedades, valores de humedad de los suelos que se utilizan en la identificación y clasificación de un suelo.

Las fronteras entre los estados de consistencia se describen a continuación:

- 1- LL, Límite Líquido o límite superior de plasticidad: frontera superior entre el estado plástico y el semilíquido
- 2- LP, Límite Plástico o límite inferior de plasticidad: frontera inferior entre el estado plástico y el semisólido
- 3- LC, Límite de contracción: frontera entre los estados semisólido y sólido
- 4- IP, Índice plástico: diferencia entre el límite líquido y el límite plástico

**CC BY-NC-ND 4.0**

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)**

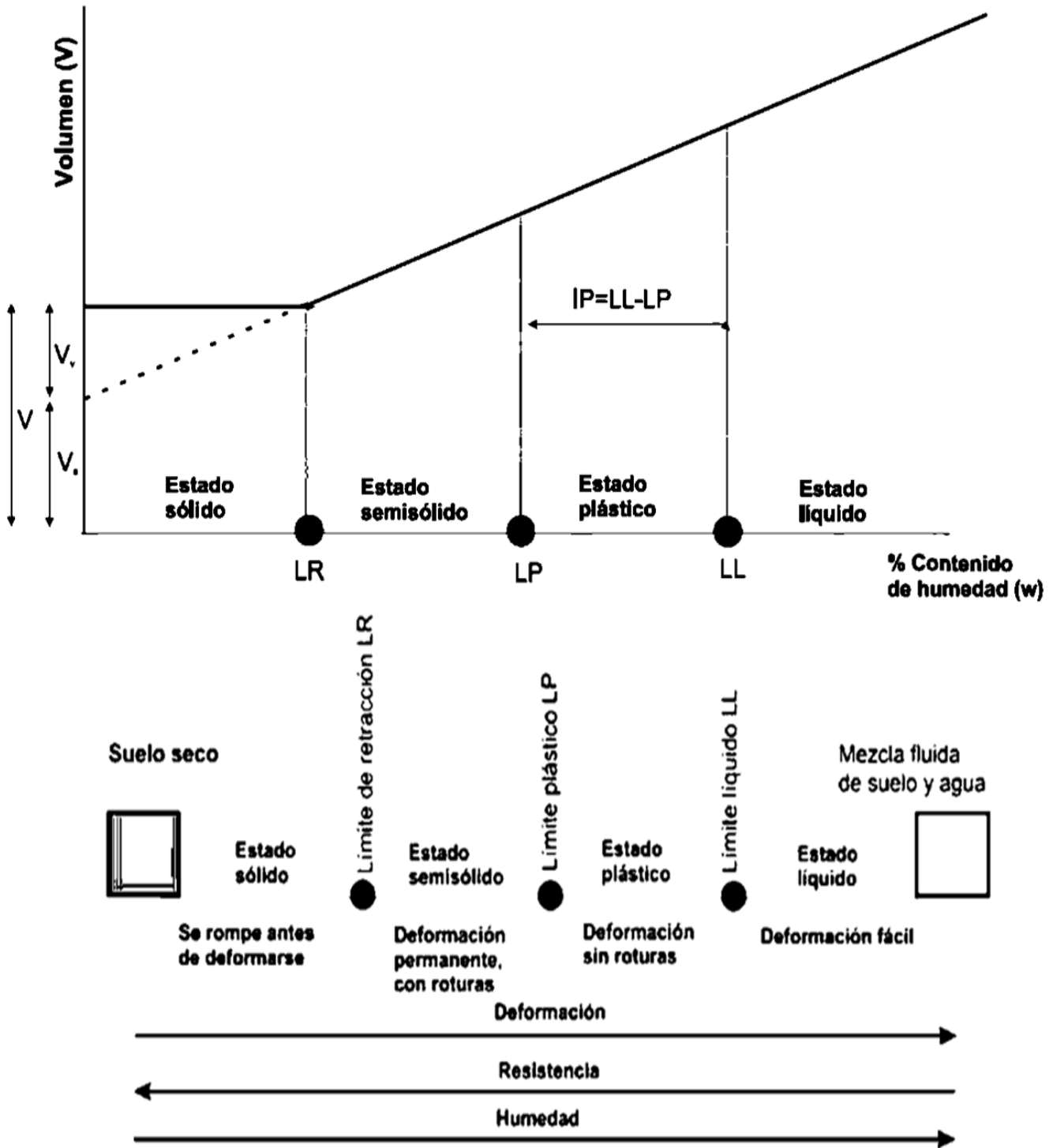


Figura 88: Límite de Atterberg y el estado del suelo en términos de consistencia

La contracción lineal de un suelo es la reducción de volumen del mismo, medida en una de sus dimensiones y expresada como porcentaje de la dimensión original, cuando la humedad se reduce desde la correspondiente al límite líquido o hasta la del límite de contracción. Para

**CC BY-NC-ND 4.0**

conocer las características de plasticidad de los suelos se utilizan el límite líquido, el índice plástico, y la contracción lineal.

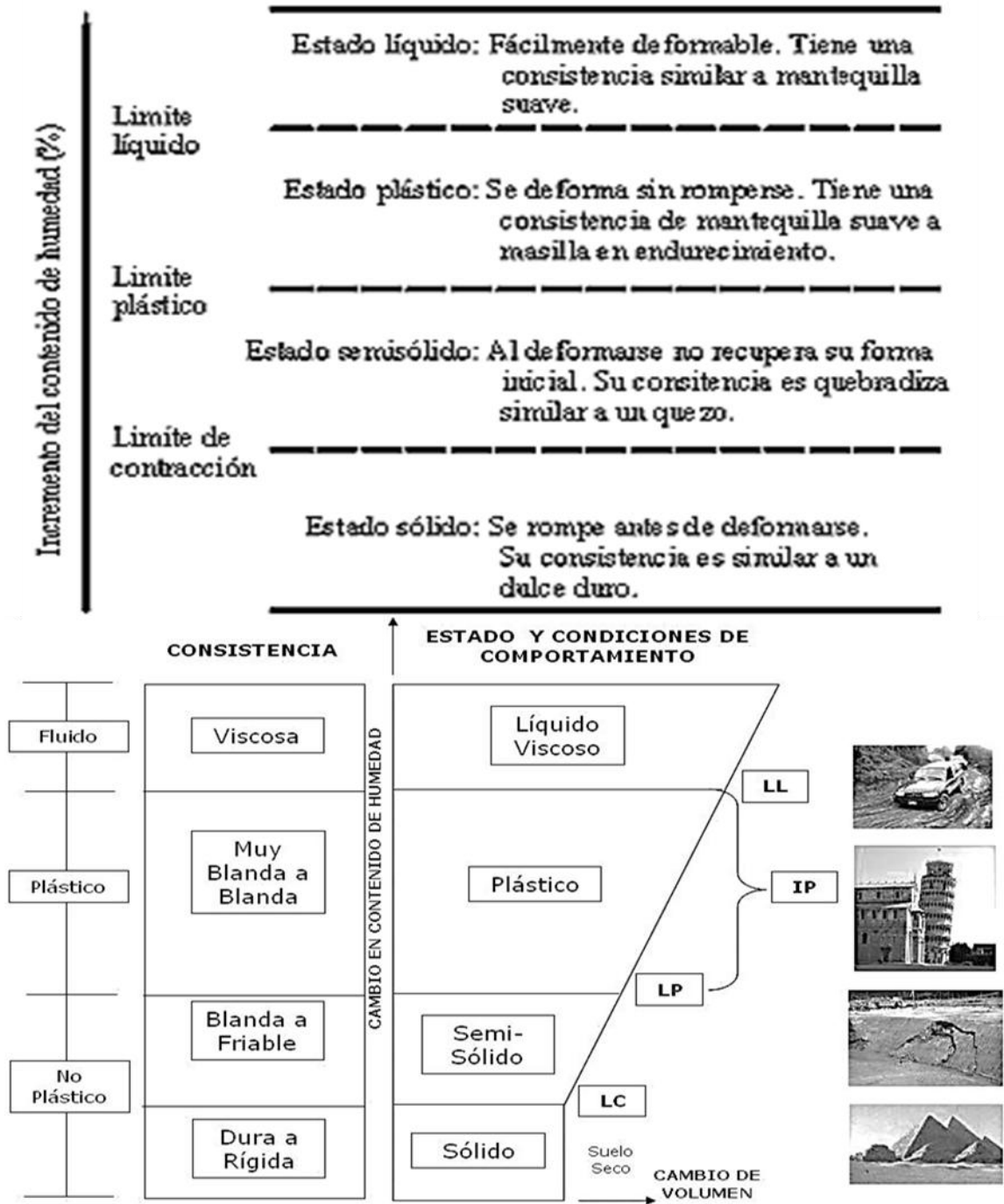


Figura 89: Límite de Atterberg y el estado del suelo en términos de consistencia con respecto al máximo porcentaje de fuerza aplicada

## **El método de clasificación de la American Society for Testing Materials (ASTM)**

El método de clasificación de la American Society for Testing Materials (ASTM) (Figura 90, 91, 92 y Cuadros y Figuras de Anexos II), clasifica los suelos de grano fino, como aquellos que tienen el 50% o más de finos. Se trata de suelos arcillosos y limosos.

En el conocido gráfico de Casagrande se establecen unas zonas que corresponden a diferentes subgrupos, de forma que los suelos son finalmente clasificados en función de la relación entre su límite líquido y su índice de plasticidad y según que contengan o no, materia orgánica. Este sistema divide los suelos finos en tres grupos: limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C) y limos y arcillas orgánicos (O). Cada uno de estos suelos se subdivide a su vez, según su límite líquido, en dos grupos cuya frontera es  $LL = 50\%$ . Si el límite líquido del suelo es menor de 50 se añade al símbolo general la letra L (low compressibility). Si es mayor de 50 se añade la letra H (high compressibility). Obteniéndose de este modo los siguientes tipos de suelos: limos inorgánicos de baja compresibilidad (ML), limos y arcillas orgánicas de baja compresibilidad (OL), arcillas inorgánicas de baja compresibilidad (CL), arcillas inorgánicas de alta compresibilidad (CH), limos orgánicos de alta compresibilidad (MH), y arcillas y limos orgánicos de alta compresibilidad (OH).

Los suelos de grano fino se califican utilizando exclusivamente el gráfico de plasticidad. La línea A prolongada por una pequeña franja, separa convencionalmente las arcillas inorgánicas de plasticidad baja y media (CL) y alta (CH), de los limos inorgánicos (ML, MH) y de los suelos finos orgánicos (OL, OH).

Se clasifica para los suelos en carreteras, como materiales limo-arcillosos, aquellos que presentan más del 35% pasado por el tamiz No. 200. Los suelos arcillosos plásticos, normalmente con un 75% o más pasando el tamiz No. 200. Los materiales de este grupo experimentan generalmente grandes cambios de volumen entre los estados seco y húmedo.

**CC BY-NC-ND 4.0**

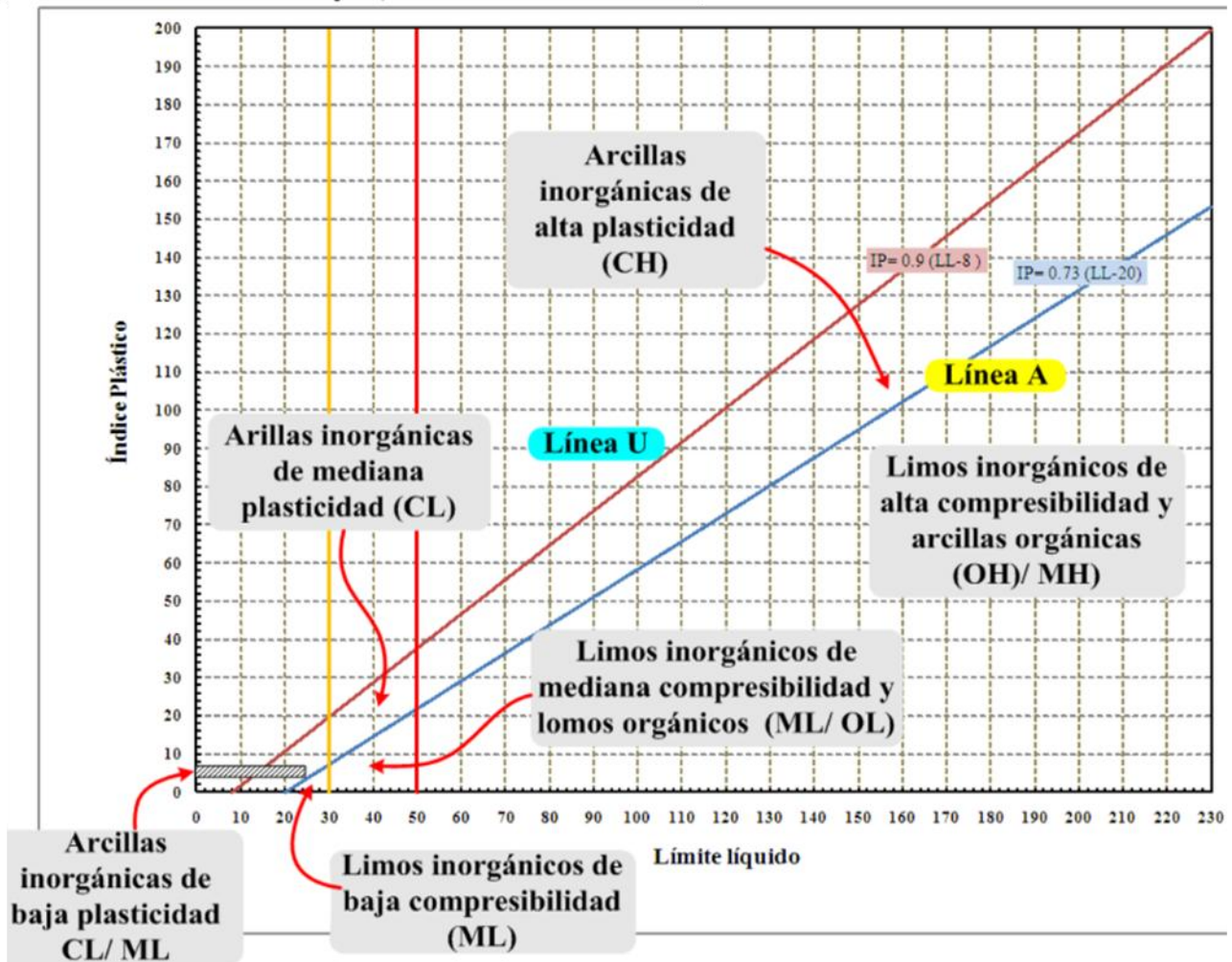
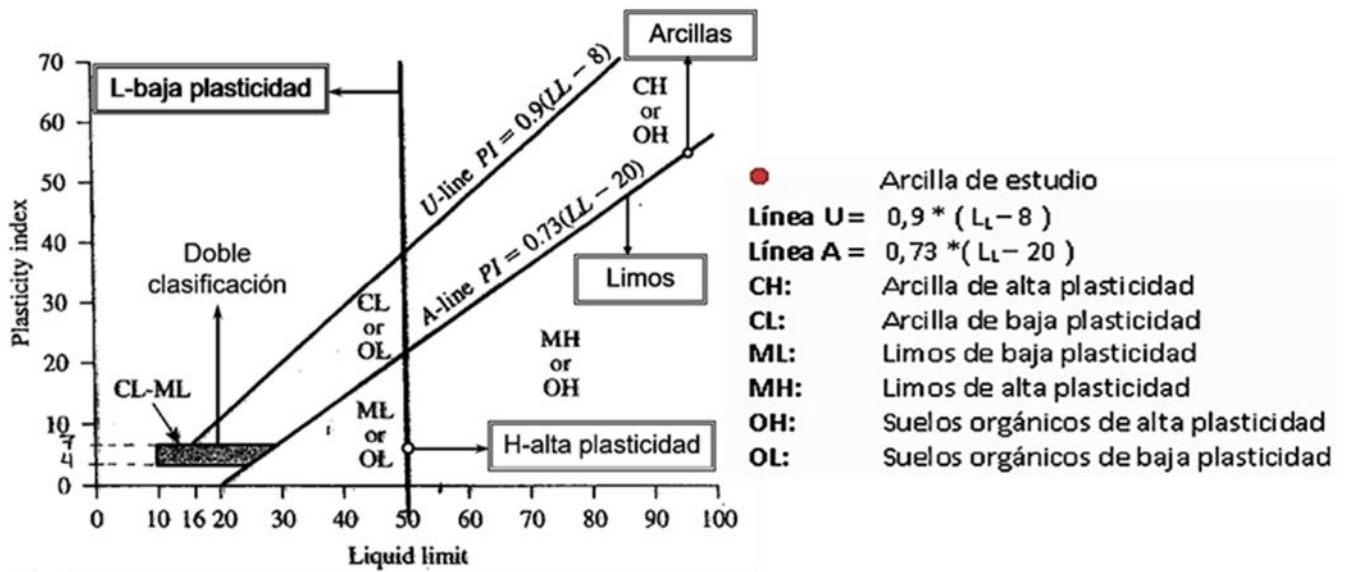


Figura 90: Gráfico de plasticidad (Casagrande, 1932)

Tomado de: (Studocu)

**CC BY-NC-ND 4.0**



Figura 91: Horizontes de los suelos que deben de ser estudiados cada uno según presentan sus características

Tomado de: (Construneic)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

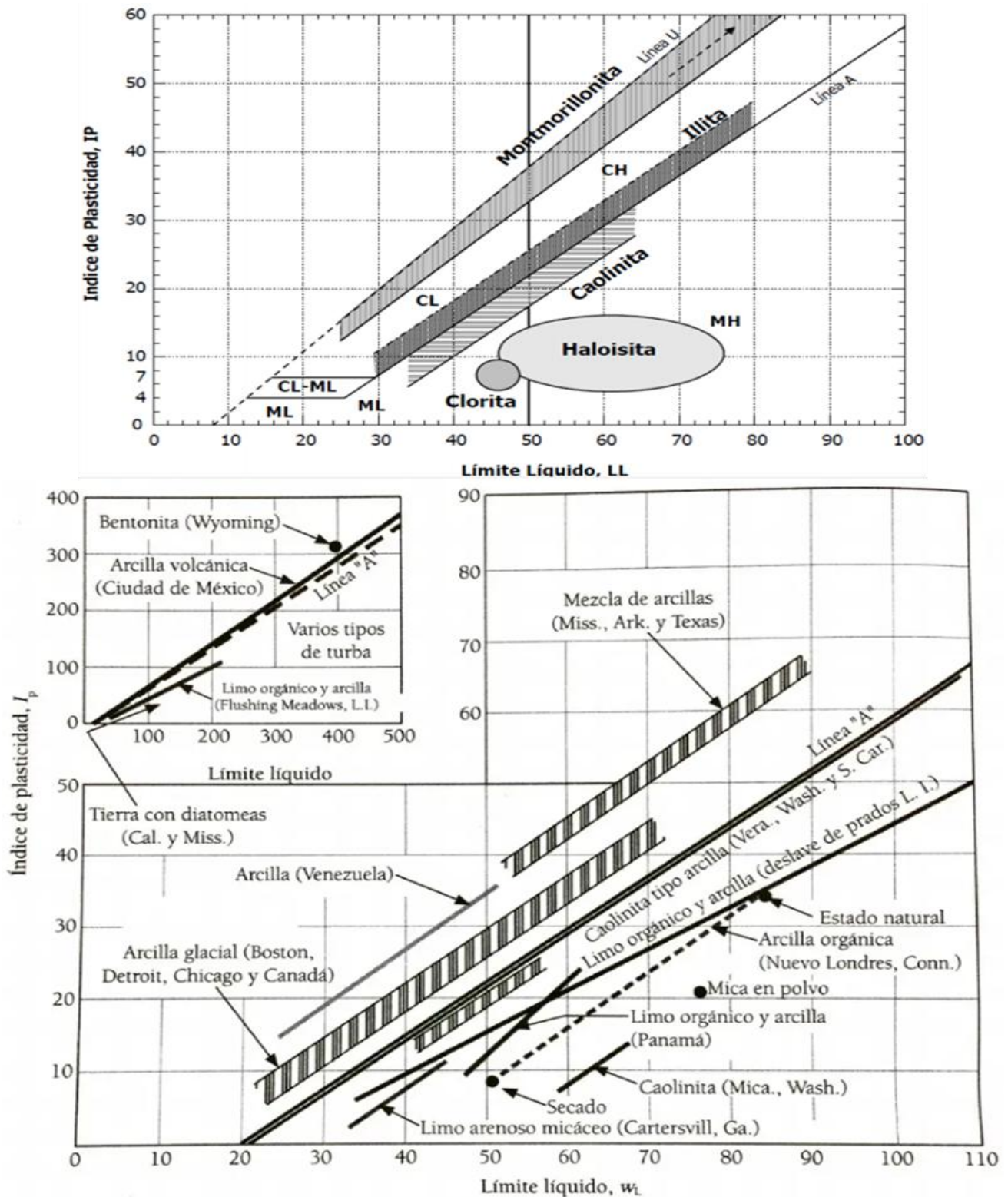


Figura 92: Clasificación de los suelos según Carta de Plasticidad de Casagrande según tipos de los materiales

Tomado de: (Scribd)

**CC BY-NC-ND 4.0**

La interdependencia entre los parámetros LL, LP, IP y CF (contenido de finos = arcillas + limos), para suelos inorgánicos que contienen minerales arcillosos planos y un porcentaje de arcillas no demasiado bajo. La relación cuantitativa que incluye estos parámetros, con respecto al índice de plasticidad es la siguiente:

$$IP = 0,96 LL - (0,26 CF + 10)$$

donde:

IP = índice de plasticidad (%HG)

LL = límite líquido (%HG)

CF = contenido de finos (%HG)

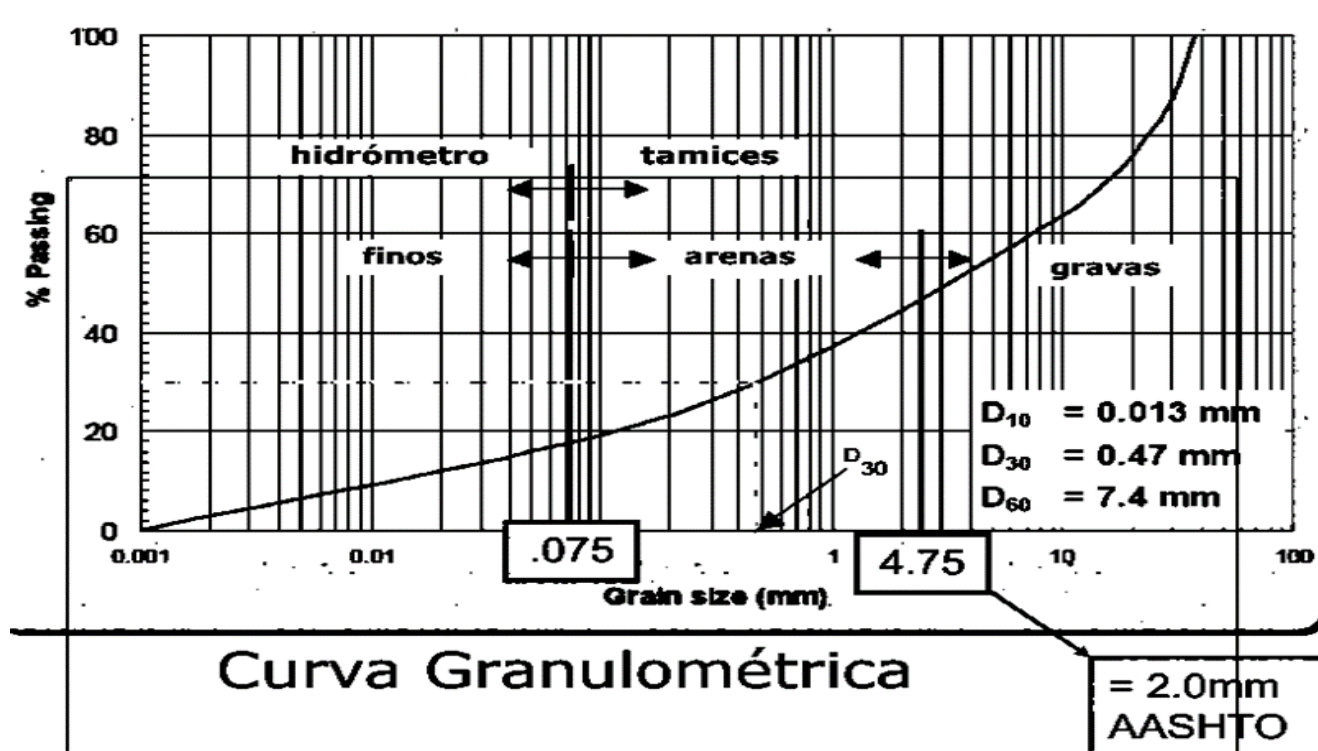


Figura 93: Clasificación del contenido de los finos

Según nos muestra la expresión, el Índice de Plasticidad de un suelo se relaciona con su límite líquido y con la fracción arcillosa, respecto al porcentaje del material menor al tamiz 40 (empleado en los ensayos de límites de Atterberg). La relación cuantitativa con respecto al límite plástico es:

$$LP = 0,04 LL - (0,26 CF + 10)$$

Esta ecuación puede reemplazar el ensayo del límite plástico, si los valores del límite líquido (LL) y el contenido de finos (CF) son conocidos. Como resultado de un número elevado de

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

ensayos se llega a la conclusión que es recomendable utilizar los cálculos para determinar el LP o IP, en lugar de aplicar el ensayo tradicional para la determinación del límite plástico.

Cuando se utiliza la ecuación propuesta, en un alto porcentaje de casos el valor se corresponde y cuando no es así es atribuible a la pobre precisión del método normado internacionalmente para determinar el límite plástico, el que es dependiente del operador.

### **Utilización práctica de los Límites de Atterberg**

En la actualidad, los límites de Atterberg son las determinaciones que con más frecuencia se practican en los laboratorios de mecánica del suelo. Su utilidad deriva de que, gracias a la experiencia acumulada en miles de determinaciones, es suficiente conocer sus valores para poderse dar una idea bastante clara del tipo de suelo y sus propiedades. Como, por otra parte, se trata de determinaciones sencillas y rápidas, permiten una pronta identificación de los suelos y la selección adecuada de muestras típicas para ser sometidas a ensayos más complicados.

Los límites de Atterberg pertenecen, junto al análisis granulométrico, al tipo de ensayos de identificación. Pero, si el análisis granulométrico nos permite conocer la magnitud cuantitativa de la fracción fina, los límites de Atterberg nos indican su calidad, completando así el conocimiento del suelo. Frecuentemente se utilizan los límites directamente en las especificaciones para controlar los suelos a utilizar en taludes.

El índice de plasticidad, que indica la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee consistencia plástica, y el índice de liquidez, que indica la proximidad del suelo natural al límite líquido, son características especialmente útiles del suelo.

### **Índice de plasticidad:**

Este índice (Cuadro 13 y Figura 92) define la zona en que el terreno se halla en estado plástico y por ser máximo para las arcillas y mínimo para las arenas nos proporciona un criterio para juzgar el carácter arcilloso de un suelo, así cuando mayor es el índice plástico, tanto más arcilloso será el suelo.

Cuando un material no tiene plasticidad (como las arenas) se considera el índice de plasticidad o índice plástico nulo, es decir; es un suelo no plástico.

$$IP = LL - LP$$

donde:

LL = límite líquido del suelo o límite superior de plasticidad (%HG)

**CC BY-NC-ND 4.0**

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)**

LP = límite plástico del suelo o límite inferior de plasticidad (%HG)

IP = índice de plasticidad (%HG)

Los límites líquido y plástico dependen de la cantidad y el tipo de arcilla presentes en el suelo donde:

- Un suelo con un alto contenido de arcilla generalmente posee altos LL y LP
- Las arcillas coloidales poseen un LL y un LP superiores a los de las arcillas no coloidales
- La arena, la grava y la turba no tienen plasticidad su LP = 0
- Los limos presentan plasticidad sólo ocasionalmente, su LP es igual o ligeramente superior a 0.

Albert Atterberg definió como plasticidad la capacidad que tenía un suelo de ser deformado sin agrietarse, ni desintegrarse ni desmoronarse ni producir rebote elástico. A su vez observó que los suelos arcillosos en condiciones húmedas son plásticos y se vuelven muy duros en condiciones secas, que los limos no son necesariamente plásticos y se vuelven menos duros con el secado, y que las arenas son desmenuzables en condiciones sueltas y secas. También observó que existían arcillas altamente plásticas y otras de baja plasticidad.

Los límites establecidos por Atterberg para diferenciar los distintos estados de consistencia se deben obtener a partir de la fracción que pasa por el tamiz de 2 mm, descartando la porción retenida.

La frontera entre el estado sólido y semisólido se llama límite de contracción o de retracción y se define como la humedad presente al haber añadido agua suficiente para llenar todos los huecos de una pastilla de suelo seca. Se trata de la humedad máxima de un suelo para la cual una pérdida de humedad no causa disminución de volumen de suelo. La frontera entre los estados semisólido y plástico se llama límite plástico, y se obtiene midiendo el contenido de humedad del suelo cuando comienzan a agrietarse pequeños cilindros de suelo de 3 mm de diámetro. A la frontera entre el límite plástico y líquido se le llama límite líquido y se determina midiendo la humedad que contiene el suelo cuando con 25 golpes se cierra una ranura de 13 mm de longitud mediante un aparato normalizado.

Atterberg encontró que la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, denominado índice de plasticidad (IP), representaba una medida satisfactoria del grado de plasticidad de un suelo. Luego sugirió que estos dos límites sirvieran de base en la clasificación de los suelos plásticos. Acorde al valor del índice de plasticidad, distinguió los siguientes materiales:

**CC BY-NC-ND 4.0**

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)**

- Suelos desmenuzables (IP<1)
- Suelos débilmente plásticos (1<IP<7)
- Suelos medianamente plásticos (7<IP<15)
- Suelos altamente plásticos (IP>15)

Todos los límites se expresan en porcentaje de agua contenida sobre suelo seco.

Cuadro 13: Valores de índice plástico según diferentes texturas del suelo y tipos de minerales de arcilla

Categoría	Suelo	IP	Grado de plasticidad
I	Arena o limo	0-1	No plástico
	• trazas de arcilla • poca arcilla	1-5	Ligera plasticidad
		5-10	Baja plasticidad
II	Franco arcilloso	10-20	Mediana plasticidad
III	Arcilloso limoso	20-35	Alta plasticidad
	Arcilla	>35	Muy alta plasticidad

Tipo de suelo	LL	PL	IP <sup>1</sup>
Arenas	20	0	0
Limos	27	20	7
Arcillas	100	45	55
Arcillas coloidales	399	46	

Mineral <sup>a</sup>	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)
Montmorillonita (1)	100-900	50-100
Nontronita (1)(2)	37-72	19-27
Illita (3)	60-120	35-60
Caolinita (3)	30-110	25-40
Halosyta hidratada (1)	50-70	47-60
Halosyta deshidratada (3)	35-55	30-45
Atapulgita (4)	160-230	100-120
Clorita (5)	44-47	36-40

Suelo	Índice plástico	Composición mecánica
Muy plástico	>17	Arcilloso
Plástico	17-7	Limoso
Poco plástico	<7	Areno limosa
No plástico	0	Arenoso

**CC BY-NC-ND 4.0**

Índice plástico	Potencial de hinchamiento
0-15	Bajo
10-35	Medio
20-55	Alto
35 Ó más	Muy alto

$IP = LL - LP$	DONDE: LL : LIMITE LIQUIDO LP : LIMITE PLASTICO IP : INDICE DE PLASTICIDAD
----------------	---

Figura 94: Relación entre el potencial de hinchamiento y el índice de plasticidad

Tomado de: (Docz, 2018)

### Significado práctico de las constantes de Atterberg

Los límites de Atterberg o también llamados límites de consistencia, se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo de su propia naturaleza y la cantidad de agua que contengan.

En los suelos finos, principalmente en las arcillas que se encuentran en estado seco, si se observa el estado del suelo, veremos que tiene una textura áspera y presenta una elevada resistencia a la rotura, partiendo cuando se rompe el suelo en fragmentos igualmente frágiles y de similar dureza.

El trabajo original de Atterberg fue aparentemente conducido con la confianza de obtener algún criterio físico para la clasificación de suelos. Se ha sugerido que los límites de plasticidad pueden servir como un índice para la clasificación física de los suelos. Suelos con un alto límite superior de plasticidad deben contener o una gran cantidad de fracciones excesivamente finas o son ricos en partículas laminares.

(1) Varias formas iónicas. Valores más altos para monovalentes; más bajos para di y trivalentes. (2) Todas las muestras contienen un 10% de arcilla y un 90% de arena y limo. (3) Varias formas iónicas. Valores más altos para formas di y trivalentes; más bajos para monovalentes. (4) Varias formas iónicas. (5) Algunas cloritas no son plásticas.

Si al suelo se le agrega agua poco a poco veremos que ésta se mezcla con los sólidos. Aumentando la humedad, el suelo sigue en estado sólido pero su resistencia disminuye y en algún momento se vuelve plástico, esto es fácilmente moldeable con una textura jabonosa. Si se añade todavía más agua al suelo llega un punto en el que el suelo deja de ser plástico y se

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

convierte en un fluido viscoso, conocido como lodo, de muy baja resistencia. Finalmente si el aumento de agua se lleva a su máximo, la masa pasa a un estado completamente líquido sin resistencia.

Si ahora analizamos el proceso inverso, al disminuir el contenido de humedad pasando por los estados antes descritos, llegaremos al momento en el cual el suelo presenta alta resistencia; continuando con la disminución de agua, se notará claramente que el suelo comienza a contraerse, deteniéndose este proceso en el punto en el cual su contenido de humedad es solamente el agua adsorbida y de constitución molecular.

Las constantes de Atterberg son índices muy satisfactorios de la consistencia del suelo y del grado de acumulación de arcilla en el perfil. Se ha interpretado que el índice inferior de plasticidad es la humedad sobre la cual el suelo está en peligro de ser enlodado al cultivar. Si el índice de plasticidad es pequeño, indica la facilidad de labranza sin enlodamiento. Si este índice es amplio, hay peligro considerable de enlodamiento del suelo, si es trabajado a una humedad por encima del límite inferior. Esta correlación se debe al hecho de que suelos con índice de plasticidad pequeños, son suelos con alto porcentaje de fracciones gruesas, donde el porcentaje de macro poros va a depender de la granulometría fundamentalmente. Por lo tanto, el peligro de enlodamiento, o sea; el deslizamiento de unas partículas sobre otras (las más finas) orientándose con una consiguiente disminución del volumen específico aparente (destrucción de la estructura del suelo y aumento en el valor de densidad aparente), no va a darse, o se dará en un menor grado. En cambio, índice de plasticidad grandes nos indican suelos con alto porcentaje de arcilla, en los cuales el enlodamiento sí se da.

Las constantes de Atterberg están consideradas como los mejores índices de la capacidad de laboreo. No obstante, estudios del significado de las constantes de Atterberg muestran que hay algunas relaciones entre estas constantes y la capacidad de laboreo, no hay evidencias suficientes, para asegurar conclusiones más específicas. Es satisfactorio, sin embargo, considerar el límite inferior de plasticidad como el punto al cual el suelo será enlodado si es trabajado en o sobre ese contenido de humedad.

Puesto que consistencia del suelo es un término usado para designar la manifestación de las fuerzas físicas de cohesión y adhesión actuando dentro del suelo a varios contenidos de humedad, se puede esperar una clara correlación entre estas constantes y las fuerzas físicas involucradas en el laboreo.

Las propiedades dinámicas están relacionadas con los problemas de labranza coeficiente de resistencia interna, «valor de rotura» de los suelos, fricción del suelo y resistencia del suelo a la compresión. La suma de los efectos de todas estas propiedades dinámicas están expresadas en la fuerza requerida para arrastrar a cualquier implemento a través del suelo.

#### **CC BY-NC-ND 4.0**

El punto adhesivo representa la humedad mínima que tiene un suelo en la cual comienza a adherirse. Generalmente el punto adhesivo está cerca del límite líquido.

### Límite inferior de plasticidad o límite plástico o límite de fragmentación de varillas rodantes (LP)

Corresponde a la humedad mínima en que el suelo puede rodarse formando hilos no fragmentados (Figuras 95, 96, 97, 98 y 99) y también se entiende como el contenido de humedad por debajo del cual se puede considerar el suelo como un material no plástico.

#### Materiales

- Piseta 50 ml
- Espátula de 5" (12.7 cm)
- Lámina de vidrio de 30 X 30 cm.
- Papel gráfico de 1/8" (0.32cm) para ponerlo debajo del plato como guía del tamaño de los hilos del suelo.
- 60 g de suelo mojado, de una muestra conservada a la humedad del campo.
- recipiente de 250 ml.
- Cápsulas de aluminio
- Tamiz 2 mm

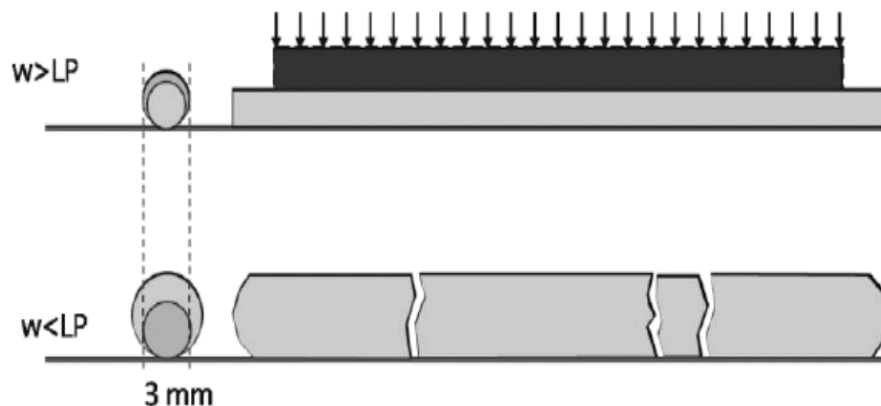


Figura 95: Límite plástico, humedad por debajo de la que no es posible hacer bastoncillos de 3,0 mm de diámetro

#### Procedimiento

- ✓ Prepare una pasta de suelo usando aproximadamente 60 g, por muestra. Tome aproximadamente una mitad de la muestra (30 g) y con ella haga una masa de forma elipsoide.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

- ✓ Ruede la masa uniformemente bajo los dedos en el plato (Figuras 96 y 97).
- ✓ La varilla o hilo del suelo que se moldea, debe tener un diámetro tan uniforme como sea posible de 3,0 mm de diámetro o ligeramente mayor y de 50 a 60 mm de largo. El ritmo de rodaje debe ser entre 60 y 80 vueltas por minuto. Una vuelta se considera como un movimiento completo de la mano hacia adelante y hacia atrás.
- ✓ Cuando el diámetro se alcance sin fragmentarse su humedad es superior a la del límite plástico o límite inferior de plasticidad. En ese caso se debe juntar todo el material y moldee la masa de nuevo (Figuras 96, 97, 98 y 99).

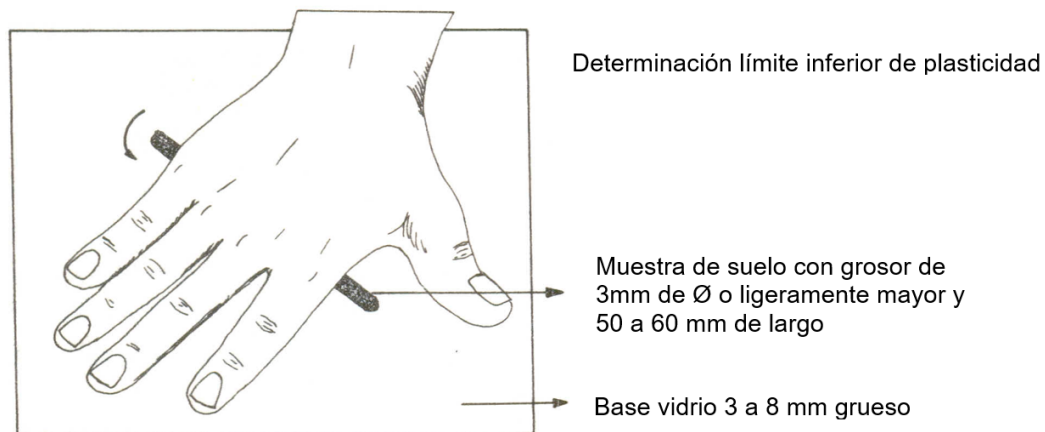


Figura 96: Procedimiento de determinación del límite inferior de plasticidad

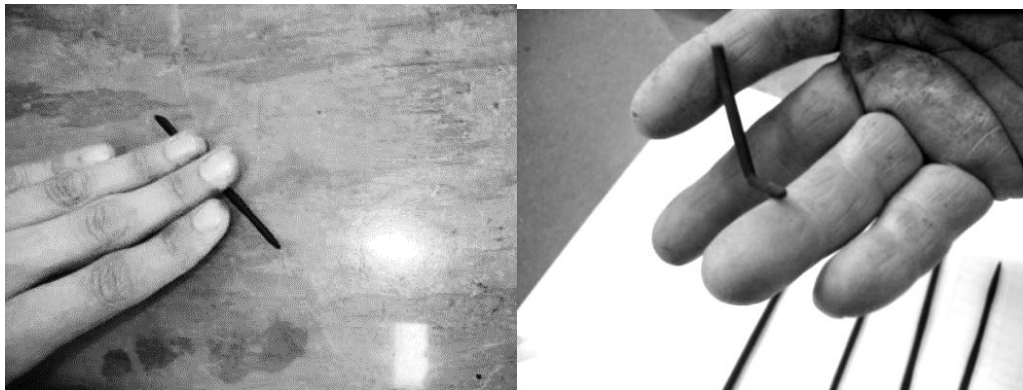


Figura 97: Muestra de suelo con prueba del límite plástico o límite inferior de plasticidad

- ✓ Ruede la masa otra vez y siga este ciclo de moldeo y rodamiento hasta que el hilo se fragmente por la presión de los dedos al rodarlo. En este punto el suelo ya no rueda para formar hilos sin que se fragmente y se llama límite plástico.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

- ✓ Cada ciclo de moldeo y amasado, alternativamente, baja por evaporación la humedad de la muestra. Si el hilo se fragmenta antes de que tenga el diámetro mencionado, por haber sido amasado anteriormente este punto de fragmentación se acepta también como límite plástico.
- ✓ El operador debe mantener uniforme la presión de los dedos y el ritmo de rodaje. El ensayo se repite para hacer cuatro o más repeticiones para el mismo suelo.
- ✓ Se toman los fragmentos de la muestra del suelo y se determina el porcentaje de la humedad gravimétrica (Figura 98) que va a ser el valor de humedad al cual se presenta el límite inferior de plasticidad



Figura 98: Fragmentos para determinación de humedad



Figura 99: Fragmentos para determinación de humedad

### **Límite superior de plasticidad o límite plástico o límite líquido (LL)**

El Límite Superior de Plasticidad es el punto en que el suelo es tan húmedo que se comporta como un fluido y por debajo de este límite se comporta como un material plástico.

Para estimar este límite superior de plasticidad se utiliza la cápsula o aparato de Casagrande (Figuras 100, 101, 102, 103, 104, 105 y 106) en la cual se coloca la muestra de suelo (pasta) lodosa. En el concepto estricto el límite líquido debe ser el contenido de humedad en el cual el

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

suelo presente un esfuerzo de corte igual a cero. No obstante, el esfuerzo de corte para todos los suelos en el límite líquido es similar, y éste se encuentra entre  $1,0 - 2,0 \text{ kN/m}^2$ .

### **Materiales**

- Cápsula de Casagrande
- Espátula
- Cápsula de porcelana
- Latas de aluminio 30 g
- Piseta 50-100 ml.
- Ranurador
- Papel semi-logarítmico
- Muestra de suelos diferentes
- Estufa

### **Procedimiento método estándar para estimar el límite líquido**

- ✓ Prepare una muestra de aproximadamente 100 g de suelo en un vaso o en una cápsula y llévelo a un estado semilíquido añadiendo agua (Figura 100).



Figura 100: Muestra de suelo en estado semilíquido

- ✓ Ponga una porción de esta pasta dentro de la taza del aparato de Casagrande, encima del sitio donde la taza toque la base teniendo cuidado de que no haya ninguna burbuja de aire atrapada en la masa.
- ✓ Con una espátula nivele el suelo de manera que su profundidad sea de un centímetro en el punto más grueso (Figuras 101 y 102).

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

- ✓ El exceso de suelo se pone nuevamente en el vaso o en cápsula.
- ✓ Haga un corte definido con la herramienta de rasgar para dividir el suelo en la taza. La línea de la ranura debe pasar por la línea del centro de álabes (Figuras 101 y 102).
- ✓ Se acciona la manivela del aparato para hacer caer la copa, a razón de 2 golpes por segundo y se registra el número de golpes necesarios para que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13 mm (1,3 cm) (Figura 103).



Figura 101: Suelo nivelado en el aparato de Casagrande

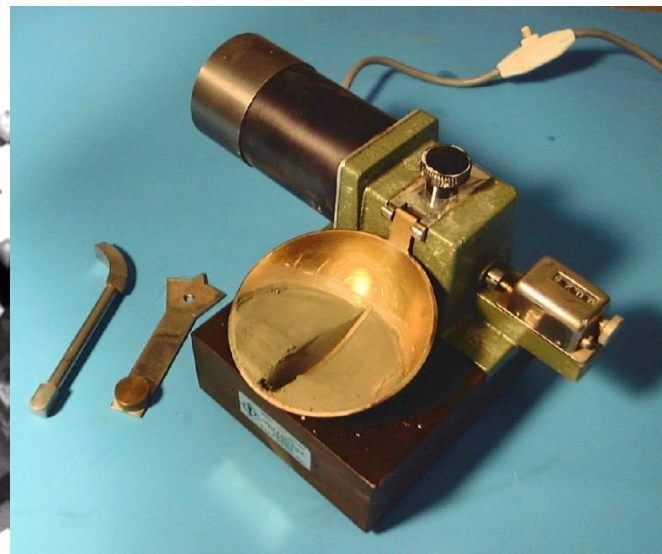


Figura 102: Suelo nivelado y corte definido en el aparato de Casagrande  
(Estudios Geotécnicos, 2013)

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

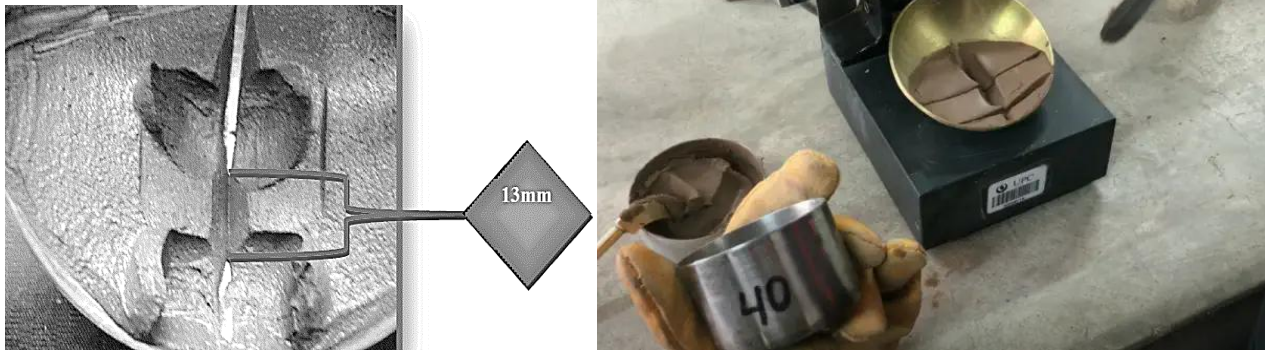


Figura 103: Suelo en contacto de 13 mm en el aparato de Casagrande  
Tomado de: (Construneic)

- ✓ Registre el número de impactos necesarios y tome una pequeña muestra para determinar la humedad que corresponde al número de impactos obtenido.
- ✓ Disminuya levemente la humedad de la pasta de suelo dentro de la taza de bronce (taza del aparato de Casagrande) añadiendo y mezclando un poco de suelo seco y repita el procedimiento, y continúe obteniendo número de impactos y sus humedades gravimétricas correspondientes conforme se va secando el suelo gradualmente con la agregación del suelo seco; hasta obtener valores mayores a 40 impactos.
- ✓ Se dibujan los puntos correspondientes a cada determinación en un papel semi-logarítmico cuyas abscisas representa en la escala logarítmica, el número de golpes y en las ordenadas, en escala aritmética, los respectivos contenidos de agua.
- ✓ A continuación se traza la línea recta que pase lo más cerca posible de cuando menos tres de los puntos obtenidos; la curva así trazada se denomina curva de fluidez, cuya ordenada correspondiente a 25 golpes, se reporta como límite líquido del suelo o límite superior de plasticidad, expresado como contenido de agua en porcentaje (humedad gravimétrica) y redondeado al número entero más cercano.
- ✓ En el caso de utilizar una hoja de cálculo como Excel, se calcula el modelo matemático que representa el comportamiento de la curva de fluidez y de esta manera con el número de golpes se estima el porcentaje de humedad gravimétrica correspondiente al límite superior de plasticidad.

### Procedimiento método simplificado para estimar el límite líquido

El límite líquido de un suelo (Cuadros 14, 15, 17, 18 y Figuras 105, 106, 107, 108, 109 y 110) por el método simplificado, se determina conociendo un solo punto de su curva de fluidez. Este

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

método es más sencillo que el método estándar, pero puede ser menos preciso, por lo cual cuando se juzgue necesario se recomienda verificar sus resultados con el método estándar.

El equipo es el mismo que para el método estándar. La prueba se efectúa en términos generales de la misma forma que la estándar, excepto porque en ésta solo se realiza una sola determinación, verificando con dos cierres de ranura y aplicando un número de golpes que este comprendido entre 20 y 30, tomando la muestra correspondiente para la obtención de su contenido de agua.

Del límite líquido se obtienen buenas aproximaciones (Cuadro 18) empleando el método descrito aplicando la siguiente fórmula (se recomienda que esta ecuación debe de usarse para un número de golpes comprendido entre 20 y 30):

$$LL = \%HG_N * (N / 25)^{\tan\beta}$$

$$LL = \%HG_N * (N / 25)^{0,121}$$

donde:

$\tan\beta$  = pendiente de la línea de flujo (0,121 es una buena aproximación)

LL = límite líquido (%humedad gravimétrica)

$\%HG_N$  = %humedad gravimétrica en la muestra a la cual se le aplicó un número de golpes (N)

N = Es el número de golpes necesarios para lograr que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13 mm.

### **Procedimiento método de un solo punto para estimar el límite líquido**

El límite líquido LL puede también determinarse conociendo un solo punto por medio de la fórmula:

$$LL = \frac{h}{1,419 - 0,31 * \log n}$$

donde

h = humedad obtenida en el ensayo

n = número de golpes

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

Límite líquido (%)	Grado de Expansión
0-20	No hay hinchamiento
20-35	Bajo hinchamiento
35-50	Hinchamiento medio
50-70	Alto hinchamiento
70-90	Hinchamiento muy alto
mayor que 90	Hinchamiento extra alto

Figura 104: Relación entre el grado de expansión y el límite líquido

Tomado de: (Docz, 2018)

### Punto adhesivo

- ✓ Tome aproximadamente 15 g de suelo sobre un plato de vidrio usando una espátula dura y adicione pequeñas cantidades de agua hasta que el suelo se vuelva plástico o moldeable.
- ✓ Pase el material a la mano derecha y amáselo, agregándole poquitos de agua hasta que la masa se vuelva adhesiva o pegajosa.
- ✓ Siga moldeando y remoldeando la muestra para que el exceso de agua se evapore hasta alcanzar un punto en que el suelo tienda a la cohesión o a permanecer intacto, es decir que no se pegue a los dedos y que se separe de la mano, pruebe esto pasando la muestra a la mano izquierda y recuerde que ésta debe estar limpia.
- ✓ Si la mezcla se ha completado, la masa entrará en el punto adhesivo y podrá pesarse y transferirse a un horno de secado para determinar su humedad.
- ✓ Este punto se puede reproducir con mucha exactitud, equivale aproximadamente al "punto de frote", o sea el contenido de agua máximo en el cual un arado sale limpio cuando se mueve a través del suelo, sobre ese valor del suelo se volverá pegajoso y se pegará al arado.
- ✓ Se repite el ensayo para realizar cinco repeticiones del mismo tipo de suelo.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

Cuadro 14:: Determinar el contenido de humedad del suelo de las muestras que provienen del aparato de Casagrande

<b>Determinación del límite líquido</b>					
Muestra N°	1	2	3	4	5
N° de golpes					
Peso recipiente + suelo húmedo					
Peso recipiente + suelo seco					
Peso recipiente					
Peso suelo seco					
Peso agua					
Contenido de humedad (%)					

### Índice de flujo

Se llama índice de flujo a la pendiente que tiene la línea de flujo. La ecuación está expuesta de tal manera que el índice de flujo sea positivo, aunque la línea de flujo tiene un valor negativo.

$$IF = \frac{w1 - LL}{\log_{10} \frac{N1}{25}}$$

donde:

IF = índice de flujo

w1 = humedad al número de golpes de N1

N1 = número de golpes anterior a los 25 golpes

LL = límite líquido

### Índice de liquidez o índice líquido

Una arcilla muy seca presenta una consistencia dura y un aspecto en forma de terrón. Esa misma arcilla muy húmeda muestra en cambio una consistencia muy blanda ya que la consistencia de la arcilla disminuye al aumentar la humedad.

Este índice (Cuadro 13) evalúa el grado de consistencia líquida que presenta el suelo en situ que da la idea de la relación de la humedad del suelo en el intervalo de plasticidad:

$$IL = \frac{\%HG - LP}{LL - LP}$$

$$o \quad IL = \frac{\%HG - LP}{IP}$$

### **CC BY-NC-ND 4.0**

donde:

IL = índice de liquidez

%HG = contenido de humedad del suelo en situ

LL = límite líquido del suelo

LP = límite plástico del suelo

IP = índice plástico o índice de plasticidad

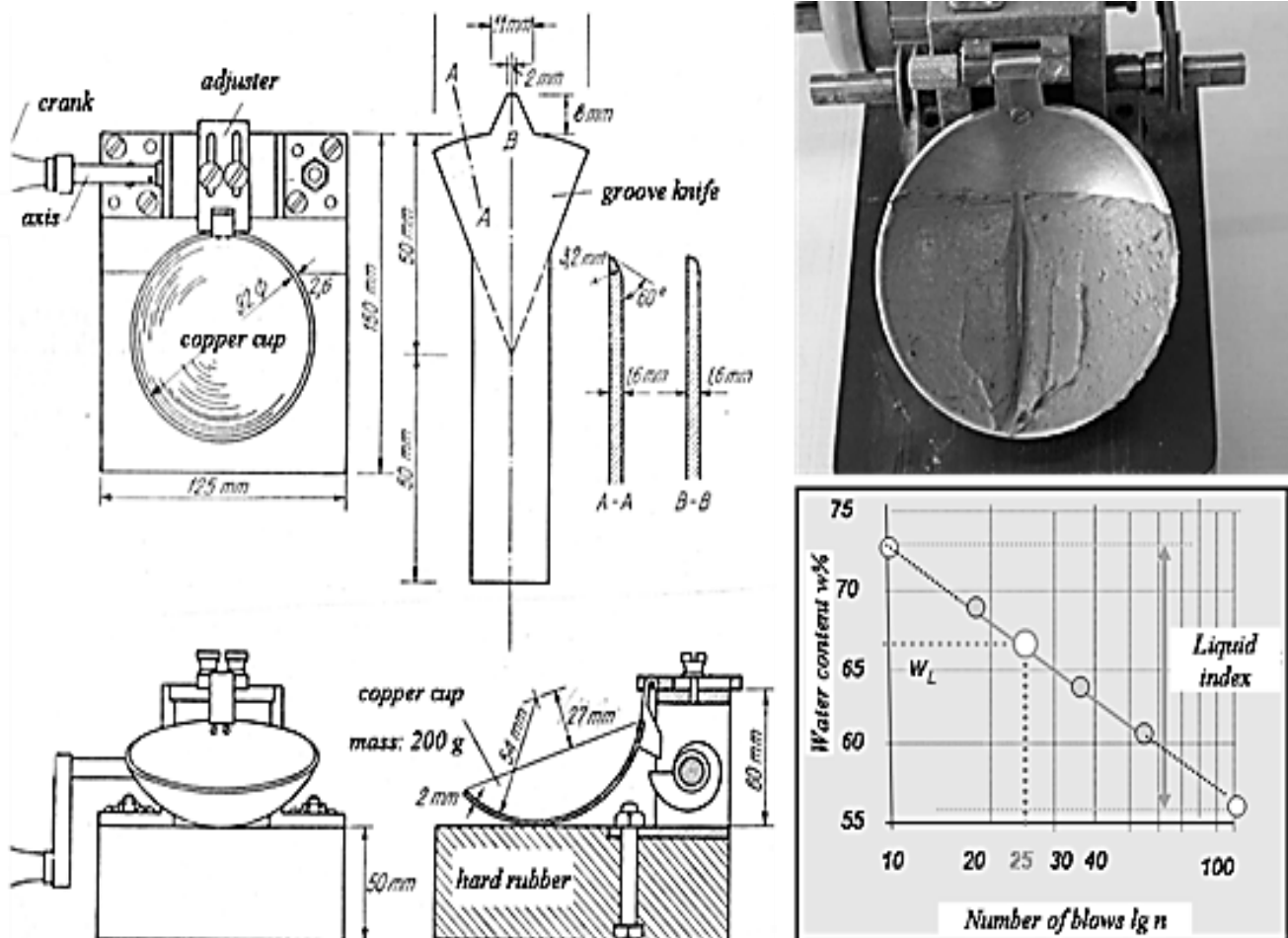


Figura 105: Deslizamiento de un suelo en la estimación del límite líquido

**CC BY-NC-ND 4.0**

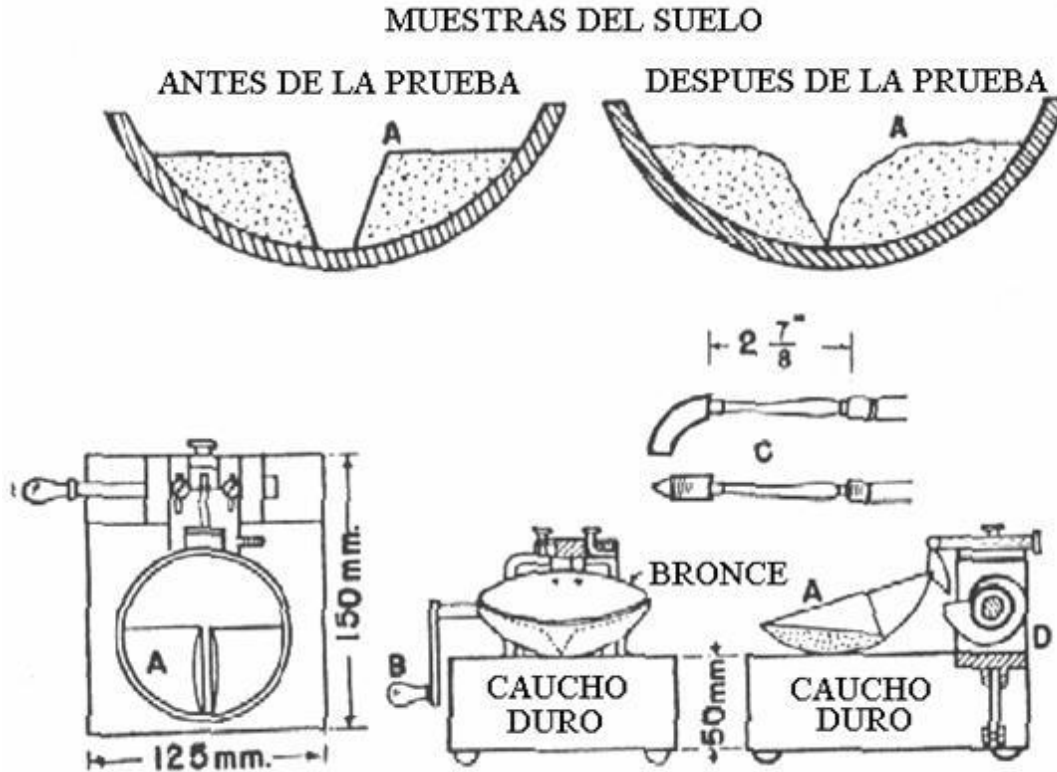


Figura 106: Aparato de Casagrande y punto donde se registra el número de impactos

Valores de IL (Cuadro 15) negativos indican una arcilla de consistencia sólida.

- Si  $0 < IL < 1$  la arcilla presenta una consistencia plástica, mientras que para  $IL > 1$  la arcilla muestra una consistencia líquida.
- $IL = 0$  : el suelo remoldeado se encuentra en su límite plástico LP y posee una resistencia al corte no drenada de aproximadamente 200 kPa.
- IL cercano a 0 : Suelo preconsolidado (suelo que ha soportado presiones efectivas mayores a las encontradas al momento de la prueba por los estratos en estado natural). Por ejemplo, suelos que en superficie han estado sometidos a la acción de la erosión (remoción de estratos superficiales).
- IL cercano a 1 : Suelo normalmente consolidado (suelo que nunca ha estado sometido a presiones efectivas mayores que las encontradas al momento de la prueba en estado natural). En estos suelos  $w_n$  cercana a LL.
- IL cercano a 0,20 : indica que el suelo siendo altamente plástico tendrá poca o nula expansión.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

- $IL = 1$  : el suelo remoldeado se encuentra en el límite líquido LL y posee una resistencia al corte no drenada de aproximadamente 2 kPa.

Un depósito natural de suelo con  $w(\%) > LL$ , tendrá un  $IL > 1.0$ . En estado inalterado, estos suelos pueden parecer estables, pero un impacto súbito puede conducirlos al estado líquido. Este tipo de suelos se denomina arcillas sensibles o sensitivas.

### Actividad de las arcillas (A)

La plasticidad se atribuye a la deformación de la capa de agua adsorbida alrededor de las partículas de mineral de arcilla. Por lo tanto, el grado de plasticidad que presenta un suelo está relacionado con el tipo y cantidad de minerales arcillosos presentes.

Como guía, entonces, el agua absorbida por un suelo brinda algún estimativo de la cantidad de arcilla presente en dicho suelo. En 1953, Skempton definió la actividad A de una arcilla (Cuadro 15) como:

$$A = \frac{IP}{\text{Fracción de arcilla (\%)}}$$

Donde la fracción de arcilla usualmente se toma como el porcentaje en peso del suelo menor de 2 mm.

La información proveniente de la actividad de la arcilla puede proveer una cierta inclinación al tipo de arcilla presente y en consecuencia el comportamiento natural del suelo. Por ejemplo el nivel relativo de actividad esperado es bajo para la caolinita, medio para la illita y alto para la montmorillonita.

Según el grado de actividad, las arcillas se clasifican así:

### **CC BY-NC-ND 4.0**

Cuadro 15: Comportamiento del suelo según el índice líquido

IL	Comportamiento del suelo
menor a 0,0	Demostrará fractura rígida al ser sometido a corte, porque el contenido natural de humedad $w_n$ es menor que el límite plástico LP. En este caso el suelo estará en estado sólido a semi sólido.
0,0 – 1,0	Como un plástico. Rango que comprende la mayoría de las arcillas en estado natural.
mayor 1,0	Será esencialmente un líquido muy viscoso cuando se somete a corte, porque el contenido natural de humedad $w_n$ es mayor que el límite líquido LL. Tales suelos pueden ser extremadamente sensibles al colapso de la estructura del suelo. Mientras no sean alterados de manera alguna pueden ser relativamente fuertes, pero si por alguna razón son sometidos a corte (remoldeo) y la estructura del suelo colapsa, entonces literalmente pueden fluir como un líquido viscoso. Hay depósitos de arcillas ultra sensibles (licuables o rápidas) en Canadá oriental y Escandinavia

### Índice de dureza

El índice de dureza, también llamado Índice de Resistencia, ID o IR. Este índice representa la rapidez con que el suelo pasa del estado semisólido al estado líquido según la magnitud del rango de plasticidad, es decir, a menor valor del índice de flujo, el índice de dureza tendrá un mayor valor, o sea, la susceptibilidad a originar un estado líquido (flujo de lodos), será menor.

A menor valor del índice de flujo, el suelo será más susceptible a pasar rápidamente a un estado líquido.

El índice de dureza está definido por la siguiente expresión:

$$ID = \frac{IP}{\text{Índice de Flujo}}$$

### CC BY-NC-ND 4.0

Cuadro 16:: Actividad de las arcillas "A" según tipo

Actividad	Inactivas	Tipo de Arcillas	Potencial de cambio de volumen
$A < 0,754$	Inactivas	Caolinita	Bajo
$1,75 < A < 1,25$	Normales	Ilita	Medio
$A < 1,25$	Activas	Montmorillonitas	Alto

### Índice de consistencia (Ic)

Con los datos de LL, LP y la humedad natural (h) del suelo (se refiere así al contenido de humedad que tiene el suelo en el momento de ser extraída la muestra) se puede calcular el índice de consistencia (Ic) del suelo, mediante las siguientes expresiones:

$$Ic = \frac{LL - h}{IP}$$

donde

Ic = índice de consistencia

LL = límite líquido (%)

h = contenido de humedad natural (%)

IP = índice plástico (%)

Según este valor de índice de consistencia según la humedad que se presenta en un suelo se puede clasificar en:

- Muy fluido =  $Ic < 0$
- Fluido =  $0 < Ic < 0,5$
- Medio plástico =  $0,5 < Ic < 0,75$
- Rígido =  $0,75 < Ic < 1,0$
- Duro =  $Ic > 1,0$

Este índice es útil en el estudio del comportamiento en campo de suelos de grano fino saturados.

Si  $CR < 0$ , o sea,  $w_n > LL$  el amasado del suelo lo transforma en un lodo viscoso.

CR cercano a 0 indica que el suelo tiene resistencia a la compresión inconfiada entre 0,25 - 1,00 kg/cm<sup>2</sup>.

### **CC BY-NC-ND 4.0**

CR cercano a 1 indica que el suelo tiene resistencia a la compresión inconfiada entre 1,00 - 5,00 kg/cm<sup>2</sup>.

La resistencia al esfuerzo cortante del suelo crece en la medida en que  $0 < CR < 1$ .

- $0,00 < CR < 0,25$  - Suelo muy blando
- $0,25 < CR < 0,50$  - Suelo blando
- $0,50 < CR < 0,75$  - Suelo de consistencia media
- $0,75 < CR < 1,00$  - Suelo de consistencia rígida
  
- Si  $CR = 1$  el suelo se encuentra en su LP.
- Si  $CR = 0$  el suelo se encuentra en su LL.
- Si  $CR > 1$  el suelo se encuentra en un estado semi sólido y tendrá un comportamiento rígido.
- Si  $CR < 0$  el suelo posee un contenido de humedad natural superior a su LL y se comportará como un fluido viscoso.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

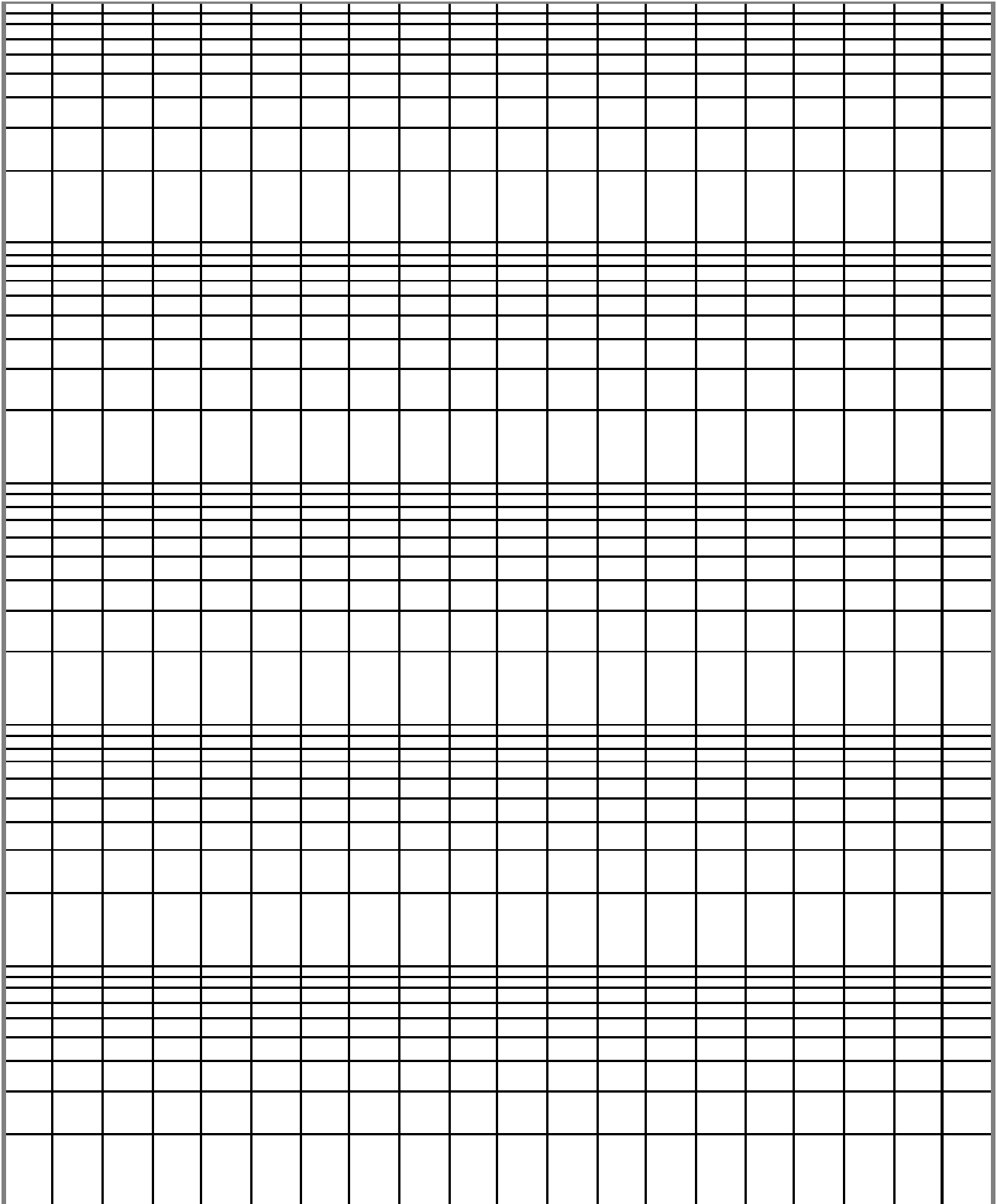


Figura 107: Ejemplo de hoja semi-logarítmica para graficar el número de golpes en el eje logarítmico y la humedad en el eje milimétrico

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

Cuadro 17: Ejemplo de confección de cálculos para determinar el límite superior de plasticidad

DETERMINACION N°	1	2	3	4
Recipiente N°	35	44	24	26
N° de golpes	35	29	23	16
Wc +Ww (GR)	19,90	20,21	20,24	17,67
Wc + Ws	16,58	16,80	16,74	14,82
W H <sub>2</sub> O	3,32	3,41	3,50	2,85
Wc	7,22	7,32	7,17	7,20
Ws	9,36	9,48	9,57	7,62
% Agua	35,5	36,0	36,6	37,4

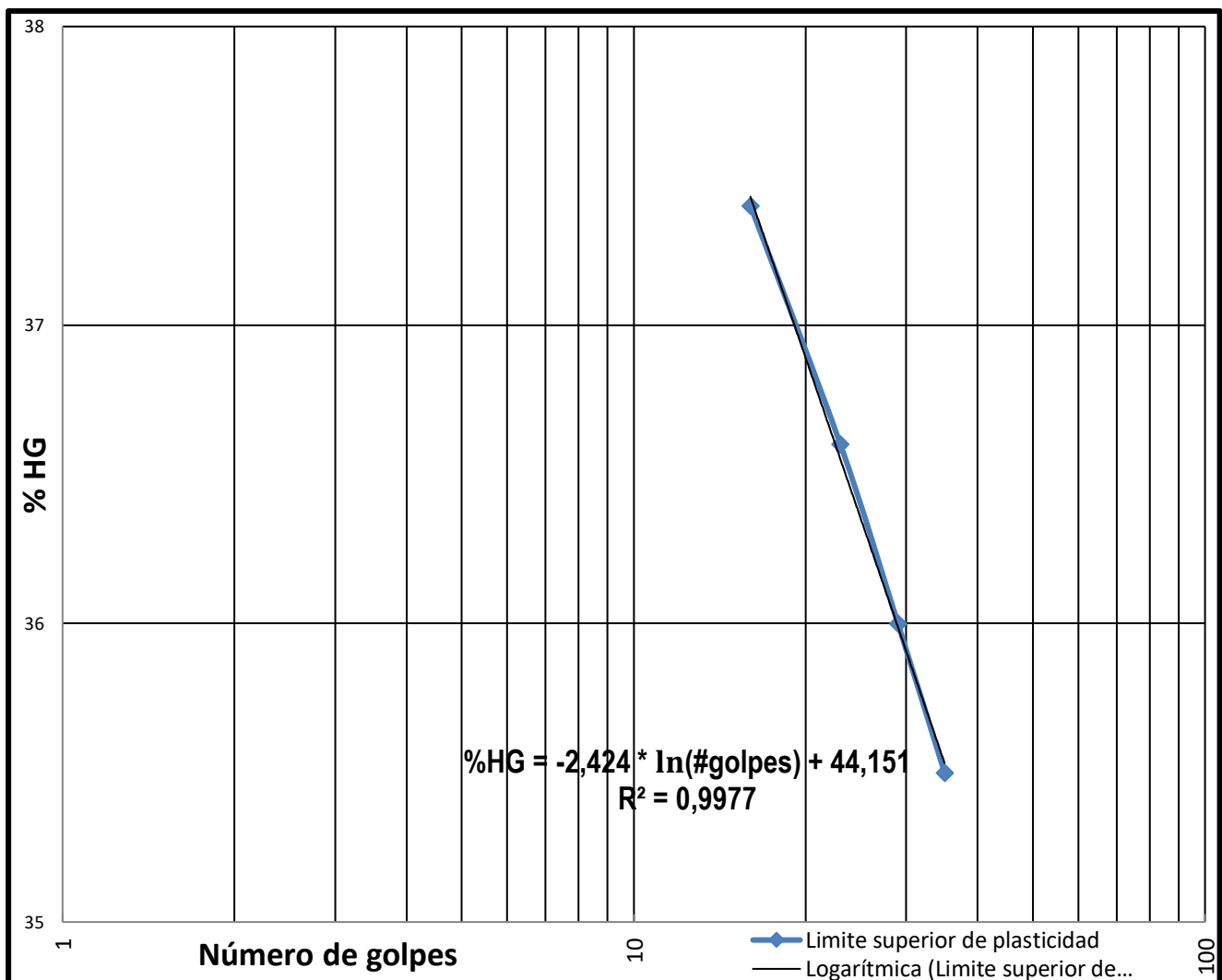


Figura 108: Ejemplo de confección de un gráfico para límite líquido o límite superior de plasticidad según datos del cuadro 17

CC BY-NC-ND 4.0

## DETERMINACION DE LIMITES DE ATTERBERG

Formato 3

Proyecto EXP. N.º 3

Trabajo No.       

Localización del Proyecto UNIV. DE BRADLEY

Perforación No.       Muestra No.       

Descripción del Suelo ARCILLA LIMOSA PARDA

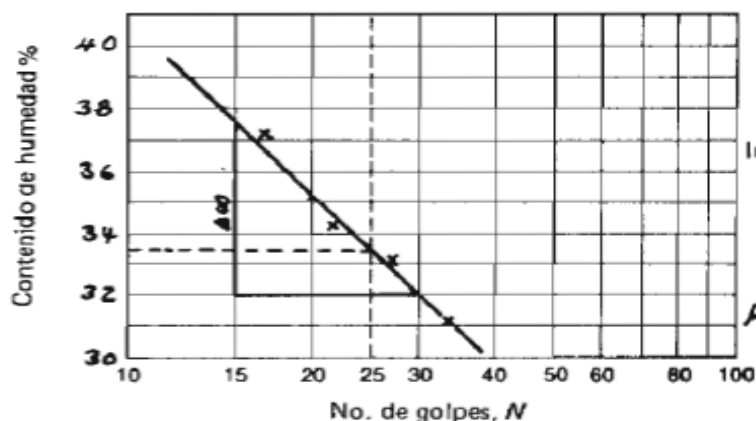
Profundidad de la Muestra       

Realizada por J. E. B.

Fecha 5-4-76

## Determinación del Límite Líquido

Lata	27	28	31	34		
Peso de suelo húmedo + lata	48.61	55.53	51.71	50.51		
Peso de suelo seco + lata	41.19	46.05	42.98	41.54		
Peso de lata	17.33	17.41	17.45	17.36		
Peso de suelo seco	23.86	28.64	25.53	24.18		
Peso de agua	7.42	9.48	8.73	8.97		
Contenido de humedad%	31.1	33.1	34.2	37.1		
Número de golpes, $N$	34	27	22	17		

Índice de Flujo  $F_i = -17.8$ Límite Líquido = 33.5%Límite Plástico = 19.4%Índice de Plasticidad  $I_p = 14.1$ 

$$F_i = \frac{\Delta w}{\log N_2/N_1} = \frac{32 - 32.6}{\log 21/13} = -17.8$$

## Determinación del Límite Plástico

Lata No.	35	37		
Peso de suelo húmedo + lata	23.26	23.03		
Peso de suelo seco + lata	22.84	22.64		
Peso de lata	20.63	20.66		
Peso de suelo seco	2.21	1.98		
Peso de agua	0.42	0.39		
Contenido de humedad%	19.1%	19.6		

Figura 109: Ejemplo de confección de un gráfico para límite líquido o límite superior de plasticidad, límite plástico e índice de plasticidad

CC BY-NC-ND 4.0

**DETERMINACION DE LIMITES DE ATTERBERG**

Formato 3

Proyecto \_\_\_\_\_ Trabajo No. \_\_\_\_\_

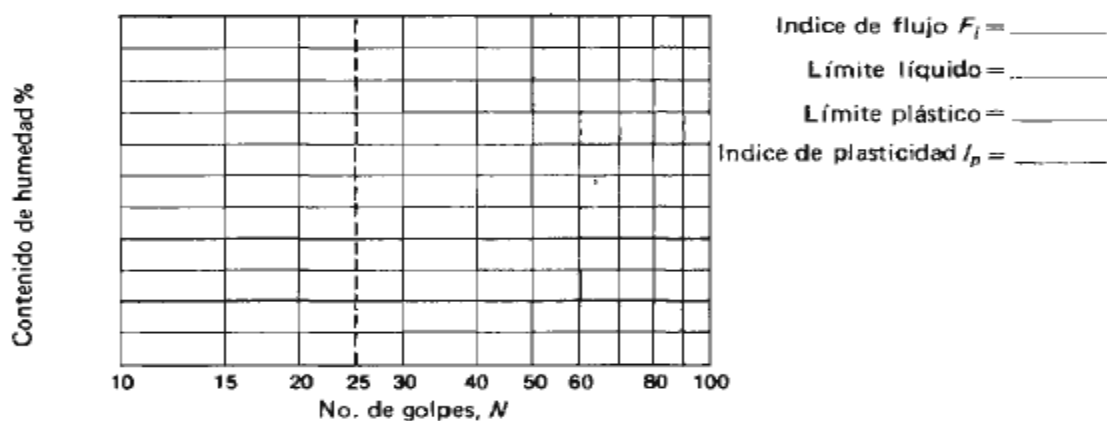
Localización del proyecto \_\_\_\_\_ Perforación No. \_\_\_\_\_ Muestra No. \_\_\_\_\_

Descripción del suelo \_\_\_\_\_

Profundidad de la muestra \_\_\_\_\_ Realizado por \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_

*Determinación del límite líquido*

Lata No.					
Peso de suelo húmedo + lata					
Peso de suelo seco + lata					
Peso de lata					
Peso de suelo seco					
Peso de agua					
Contenido de humedad %					
Número de golpes, $N$					

*Determinación del límite plástico*

Lata No.				
Peso de suelo húmedo + lata				
Peso de suelo seco + lata				
Peso de lata				
Peso de suelo seco				
Peso de agua				
Contenido de humedad %				

Figura 110: Patrón para confección de un gráfico para límite líquido o límite superior de plasticidad, límite plástico e índice de plasticidad

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

Cuadro 18: Valores para la relación  $(N / 25)^{0,121}$ 

$N$	$\left(\frac{N}{25}\right)^{0.121}$	$N$	$\left(\frac{N}{25}\right)^{0.121}$
20	0.973	26	1.005
21	0.979	27	1.009
22	0.985	28	1.014
23	0.990	29	1.018
24	0.995	30	1.022
25	1.000		

El límite superior de plasticidad se puede calcular mediante la ecuación (Figura 108) encontrada que es el modelo matemático que representa el comportamiento del suelo respecto al aumento de la humedad en él y el límite a comportarse como un fluido:

$$\%HG = -2,424 * \ln (\#golpes) + 44,151$$

$$\%HG = -2,424 * \ln (25) + 44,151$$

$$\%HG = 36,35 \%$$

de humedad gravimétrica donde el suelo comienza a comportarse como un fluido ya que es el punto de humedad que corresponde al límite superior de plasticidad. Si entramos en la figura 62 con 25 golpes nos da un %HG = 36,4 % aproximadamente.

### Índice de tenacidad

La tenacidad se conoce como aquella consistencia que presentan los suelos, cerca de LP. El índice de tenacidad, junto al de fluidez, sirve para diferenciar las características de plasticidad de las arcillas. Varía generalmente entre 1 - 3 y difícilmente es igual a 5 o menor a 1.

$$T_w = \frac{IP}{IF}$$

donde

$T_w$  = índice de tenacidad

### Sensitividad

Se refiere a la razón de la resistencia al corte en estado inalterado o resistencia corte pico de un suelo inalterado con respecto a la resistencia al corte en estado remoldeado o la resistencia

**CC BY-NC-ND 4.0**

al corte pico del mismo suelo remoldeado a una misma humedad y con la misma densidad (Figura 65).

$$S = \frac{s \text{ (natural)}}{s \text{ (remoldeada)}}$$

donde

s: resistencia al corte

S: sensibilidad

$S \leq 3$  baja sensibilidad

$3 < S \leq 5$  media sensibilidad

$S > 6$  alta sensibilidad

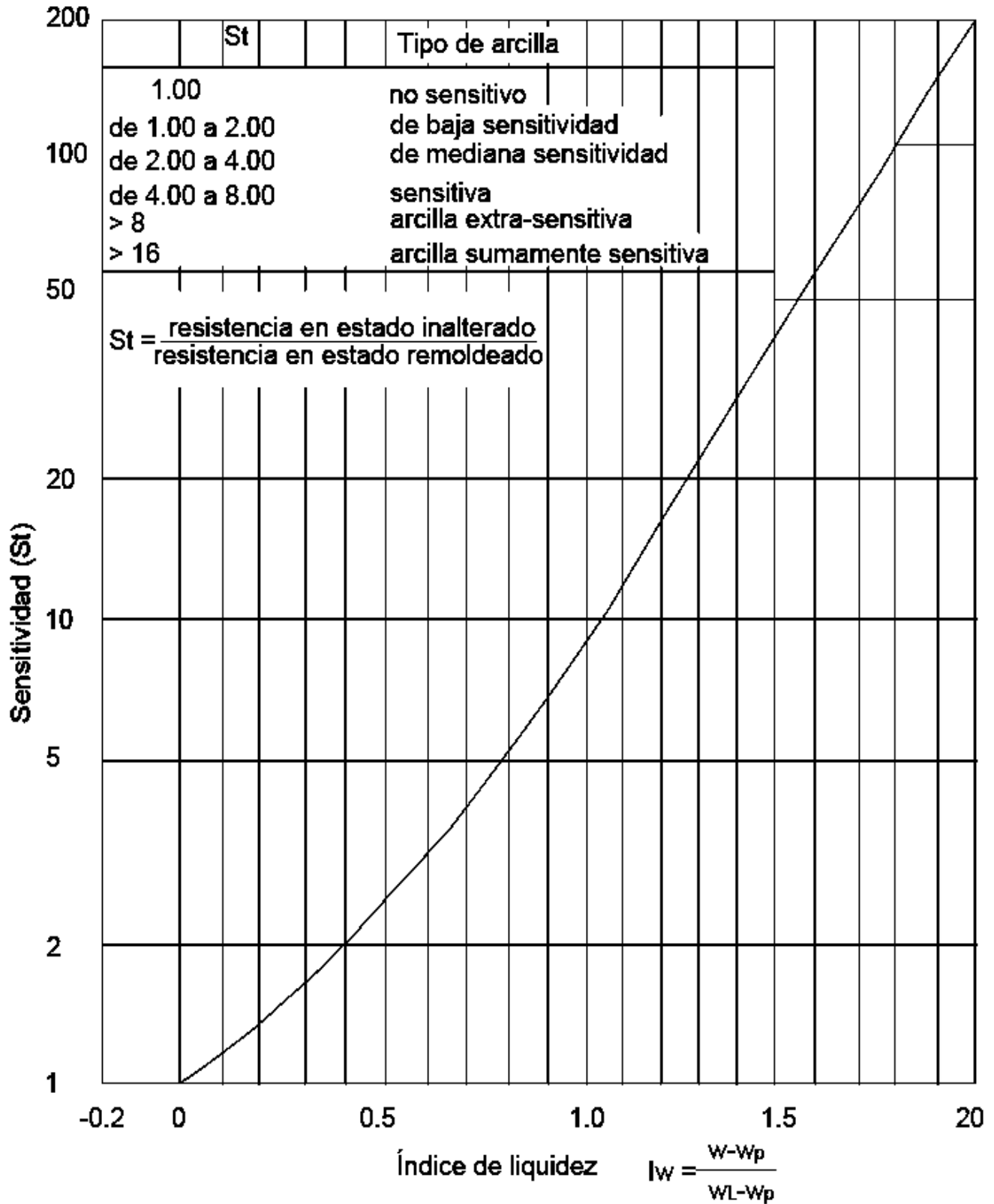


Figura 111: Ejemplo de Relación entre el índice de liquidez y la sensibilidad

**CC BY-NC-ND 4.0**

## Índice de Compresibilidad o Índice de Compresión

Desde que se considera que el límite líquido parece ser directamente proporcional a la compresibilidad (Cuadro 19) de las arcillas, este ha sido relacionado empíricamente. Terzaghi y Peck lo definieron como:

$$C_c = 0,009 * (LL - 10) \quad \text{con LL expresado en \%}$$

o

$$C_c = 0,007 * (LL - 7)$$

donde:

$C_c$  = índice de compresibilida

## Índice de cohesión

Lo suelo finos plásticos se comportan diferente a los suelos finos no plásticos y esta diferencia de comportamiento de los suelos cohesivos se mide a través del índice de cohesión:

$$\text{Índice de cohesión} = \frac{IP \text{ (índice de plasticidad)}}{LP \text{ (límite plástico)}}$$

Si el índice de cohesión es igual a cero, se trata de un limo y las arcillas tienen un índice de cohesión mayor a 1. Si el índice de cohesión es de 0,9; se supone que el suelo tiene un comportamiento principalmente arcilloso y si el índice de cohesión es de 0,2 se supone que el suelo tiene un comportamiento principalmente limoso.. Este parámetro permite diferenciar entre limos y arcillas.

En la figuras 112 y 113 se muestra una serie de curvas para diferenciar los limos de las arcillas con base en el índice de plasticidad y el límite plástico.

Las arcillas pueden diferenciarse entre duras y blandas. Sin embargo no existe un criterio universal aceptado para definir los valores precisos de resistencia para el caso de las arcillas blandas y /o duras. Los limos son muy variables en lo relacionado con consistencia y no es común encontrar limos duros

**CC BY-NC-ND 4.0**

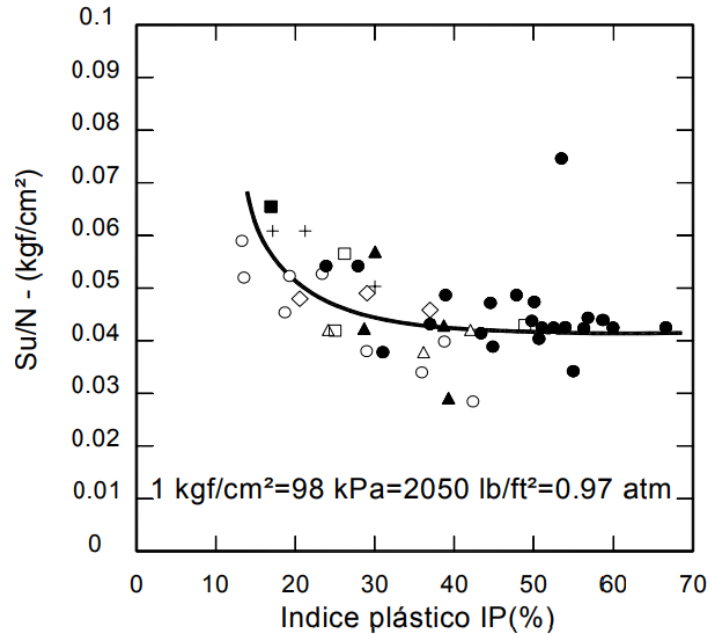


Figura 112: Relación entre la resistencia al corte no-drenada, el número de golpes  $N$  de penetración estándar SPT y el índice plástico para arcillas

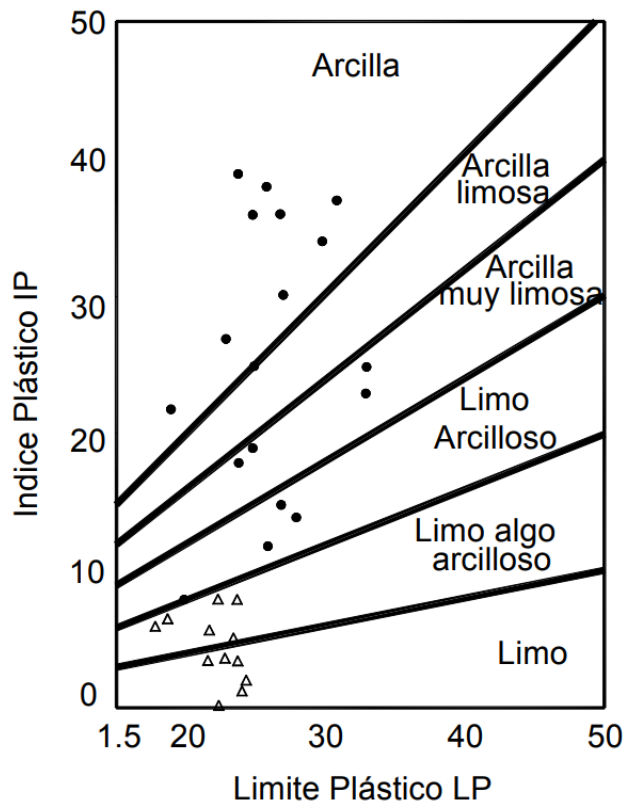


Figura 113: Ejemplo de diferenciación entre limos y arcillas que utiliza el índice de plasticidad y el límite plástico (índice de cohesión)

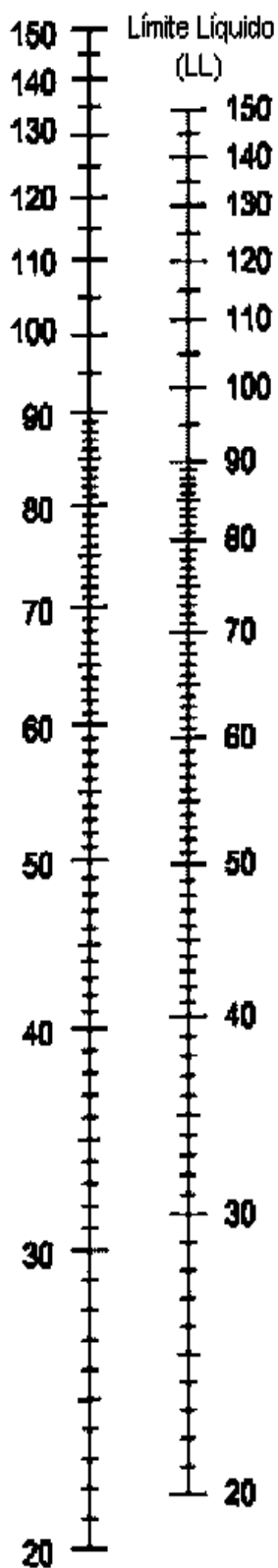
**CC BY-NC-ND 4.0**

Cuadro 19: Correlaciones empíricas entre el índice de compresibilidad ( $C_c$ ) y los límites de Atterberg

<b>Autores</b>	<b>Ecuación</b>	<b>Comentarios</b>
Terzaghi y Peck (1967)	$C_c = 0.009*(LL-10)$ $C_c = 0.007*(LL-10)$ LL = Límite líquido (%)	Arcillas no remoldeadas Arcillas remoldeadas
Azzouz et al (1976)	$C_c = 0.01*w_N$ $w_N =$ Humedad natural (%)	Arcilla de Chicago
	$C_c = 0.0046*(LL-9)$ LL = Límite líquido (%)	Arcilla de Brasil
	$C_c = 1.21+1.005*(e_o-1.87)$ $e_o =$ índice de huecos	Arcilla de la ciudad de Sao Paulo
	$C_c = 0.208 * e_o+0.0083$ $e_o =$ índice de huecos	Arcilla de Chicago
	$C_c = 0.0115* w_N$ $w_N =$ Humedad natural (%)	Suelo orgánico, turba
Nacci et al. (1975)	$C_c = 0.02+0.014*IP$ IP = Índice de Plasticidad (%)	Arcilla del Atlántico Norte
Nacci et al. (1975)	$C_c = 0.02+0.014*IP$ IP = Índice de Plasticidad (%)	Arcilla del Atlántico Norte
Rendon-Herrero (1983)	$C_c = 0.141 * G_s^{1.2} * \left(\frac{1 + e_o}{G_s}\right)^{2.30}$ $G_s =$ Peso específico de las partículas $e_o =$ índice de huecos	
Nagaraj y Murty (1985)	$C_c = 0.2343 * \left(\frac{LL}{100}\right) * G_s$ $G_s =$ Peso específico de las partículas LL = Límite líquido (%)	
Park y Koumoto (2004)	$C_c = \frac{n_o}{371.747 - 4.275 * n_o}$ $n_o =$ Porosidad in situ del suelo	

**CC BY-NC-ND 4.0**

Contenido de humedad  
a N golpes (W)



$$LL = W_N [N/25]^{0.121}$$

Número de golpes (N)

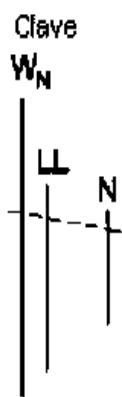
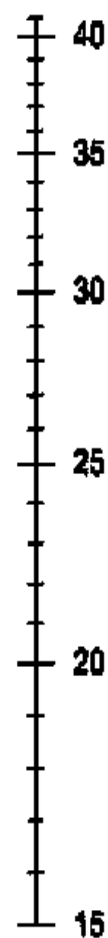


Diagrama total con W y N  
El eje recto determina el LL

Figura 114: Nomograma del Procedimiento método simplificado

**CC BY-NC-ND 4.0**

### Límite de contracción (LC)

La contracción lineal de un suelo se define como la reducción en la mayor dimensión de un espécimen de forma prismática rectangular (Figura 115 y 116) cuando su humedad disminuye desde la correspondiente al límite líquido hasta la del límite de contracción, expresada como un porcentaje de la longitud inicial del espécimen. También se define como al contenido de humedad a partir del cual el suelo no se contrae más, no obstante de continuar perdiendo peso.



Figura 115: Contracción del suelo por pérdida de humedad

Tomado de: (GRANADOS MUÑOZ)

Para esta determinación se utilizará una muestra preparada como la utilizada para determinar el límite líquido, o bien se aprovechará el material húmedo que haya sobrado de la determinación del límite líquido.

Se agrega a la muestra agua o material menos húmedo tomando de la porción preparada, hasta lograr que la humedad sea la correspondiente a la del límite líquido, lo cual se verifica empleando la copa de Casagrande y cumpliendo con la condición de que la ranura se cierre en una longitud de 13 mm precisamente a los 25 golpes.

Con el material preparado en las condiciones indicadas se procede a llenar el molde de prueba (Moldes de lámina galvanizada con sección de 2,0 cm por 2,0 cm y de 10 cm de longitud (Figura 116)), al cual se le habrá aplicado previamente una capa delgada de grasa en su interior para evitar que el material se adhiera a sus paredes.

El llenado del molde se efectúa en 3 capas, utilizando la espátula y golpeándolo después de la colocación de cada capa contra una superficie dura; para esto último, deberá tomarse el

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

molde por sus extremos, procurando siempre que el impacto lo reciba en toda su base, lo cual se logra conservando paralelismo entre dicha base y la superficie sobre la cual se golpea.

En cada caso las operaciones de golpeo deberán prolongarse lo suficiente para lograr la expulsión del aire contenido en la muestra colocada, lo que se pone de manifiesto cuando ya no aparecen burbujas en su superficie.

A continuación se enrasa el material en el molde utilizado con la espátula y se deja orear a la sombra hasta que cambie ligeramente su color, después de lo cual se pone a secar en el horno por un periodo de 24 horas, aproximadamente, a una temperatura de  $105 \pm 5$  °C.



Figura 116: Ejemplo de molde de lámina galvanizada de 2 \* 2 \* 10 cm

Se extrae del horno el molde con el espécimen, se deja enfriar a la temperatura ambiente y a continuación se saca del molde la barra.

Finalmente, se mide con el calibrador la longitud media de la barra del material seco y la longitud interior del molde, con aproximación de 0.01 cm.

La contracción lineal se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$LC = \frac{Li - Lf}{Li} * 100$$

donde:

LC = es la contracción lineal en %.

Li = es la longitud inicial de la barra de suelo húmedo, que corresponde a la longitud interior del molde (cm)

Lf = es la longitud media de la barra de suelo seco (cm)

#### **CC BY-NC-ND 4.0**

### Otra forma de calcular el LC

Se toma una muestra de manera completa en un cilindro de volumen conocido a la cual se le dejan las caras superior e inferior de la muestra de manera plana y con muy alto contenido de humedad (preferiblemente saturada) la cual se seca en un horno a 105 – 110 °C y se determina el contenido de humedad de la muestra contraída.

También se mide el volumen inicial que sería el volumen del cilindro y se mide el volumen final que llega a tener la muestra de suelo cuando está seca. Este volumen se puede realizar por el “método de la parafina” la cual sella la muestra y se coloca en agua para medir su volumen final en una proveta graduada.

Luego se aplica la siguiente relación:

$$LC = h - \left( \frac{V_i - V_f}{P_s} \right) * \text{Dagua}$$

donde:

LC = límite de contracción (%)

h = contenido de humedad (%)

$V_i$  = volumen inicial (cm<sup>3</sup>)

$V_f$  = volumen final (cm<sup>3</sup>)

Dagua = densidad del agua (g/cm<sup>3</sup>)

### Grado de contracción (C)

Este se expresa en porcentaje (%) y se define así a la relación entre la diferencia de los volúmenes inicial ( $V_i$ ) y el volumen final ( $V_f$ ) después de secado de la muestra, para el volumen inicial.

$$C = \frac{V_i - V_f}{V_i} * 100$$

Como la compresibilidad de un suelo crece con el grado de contracción, este índice nos provee una indicación de calidad de suelo:

Suelo bueno =  $C < 5 \%$

Suelo regular =  $5 \% < C < 10 \%$

Sufribles =  $10 \% < C < 15 \%$

Suelos pésimos =  $C > 15 \%$

### **CC BY-NC-ND 4.0**

**Índice de contracción**

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$IC = IP - LC$$

donde:

IC = índice de contracción

IP = índice plástico

LC = límite de contracción

**Razón de contracción:**

Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Rc = \frac{m_o}{V_o}$$

donde:

Rc = razón de contracción

m<sub>o</sub> = masa de la muestra de suelo secada al horno (g)

V<sub>o</sub> = volumen de la muestra de suelo secado al horno (método de la parafina) (cm<sup>3</sup>)

**Contracción volumétrica:**

Se calcula mediante la siguiente ecuación

$$Cv = (h - Lc) * Rc$$

donde:

Cv = contracción volumétrica

h = contenido de humedad (%)

Lc = límite de contracción (%)

Rc = razón de contracción

**Contracción lineal:**

Se calcula mediante la siguiente ecuación

$$Cl = 100 * \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{100}{Cv + 100}} \right)$$

**CC BY-NC-ND 4.0**

donde:

Cl = contracción lineal

Cv = contracción volumétrica

En el caso de suelos que tengan muy poco contenido de partículas compuestas de minerales de arcilla, los ensayos de límite plástico y líquido pueden producir resultados no confiables. En tales casos mediante el ensayo de la contracción lineal es posible obtener una aproximación importante del índice de plasticidad, con la ecuación:

$$IP = 2,13 * CL$$

Donde:

CL: es la contracción lineal del suelo.

### **Relación entre el límite de plasticidad y el ángulo de fricción residual (grados)**

La resistencia residual es la resistencia al corte que posee el material después de haber ocurrido una falla.

En los suelos dúctiles la resistencia pico tiende a ser muy similar a la resistencia residual y en los suelos frágiles al producirse la falla, la disminución de la resistencia pico a la residual es significativa donde la diferencia entre la resistencia pico y la residual es un indicativo de la fragilidad de los materiales existentes en el suelo. Sin embargo, en los suelos residuales la resistencia pico tiende a ser generalmente, muy similar a la resistencia residual.

Se propone la siguiente expresión para obtener una buena correlación entre el ángulo de fricción residual (Figura 117) y el índice de plasticidad (para valores de IP entre 5% y 350%):

$$\phi_r = \frac{46,6}{IP^{0,446}}$$

### **Preguntas**

1. ¿Cuál es la importancia del límite plástico en la preparación del suelo?
2. ¿Cuál es la importancia del punto adhesivo en la preparación del suelo?
3. ¿Cuál es la importancia del límite superior de plasticidad preparación del suelo?
4. ¿Qué es esfuerzo cortante?

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)

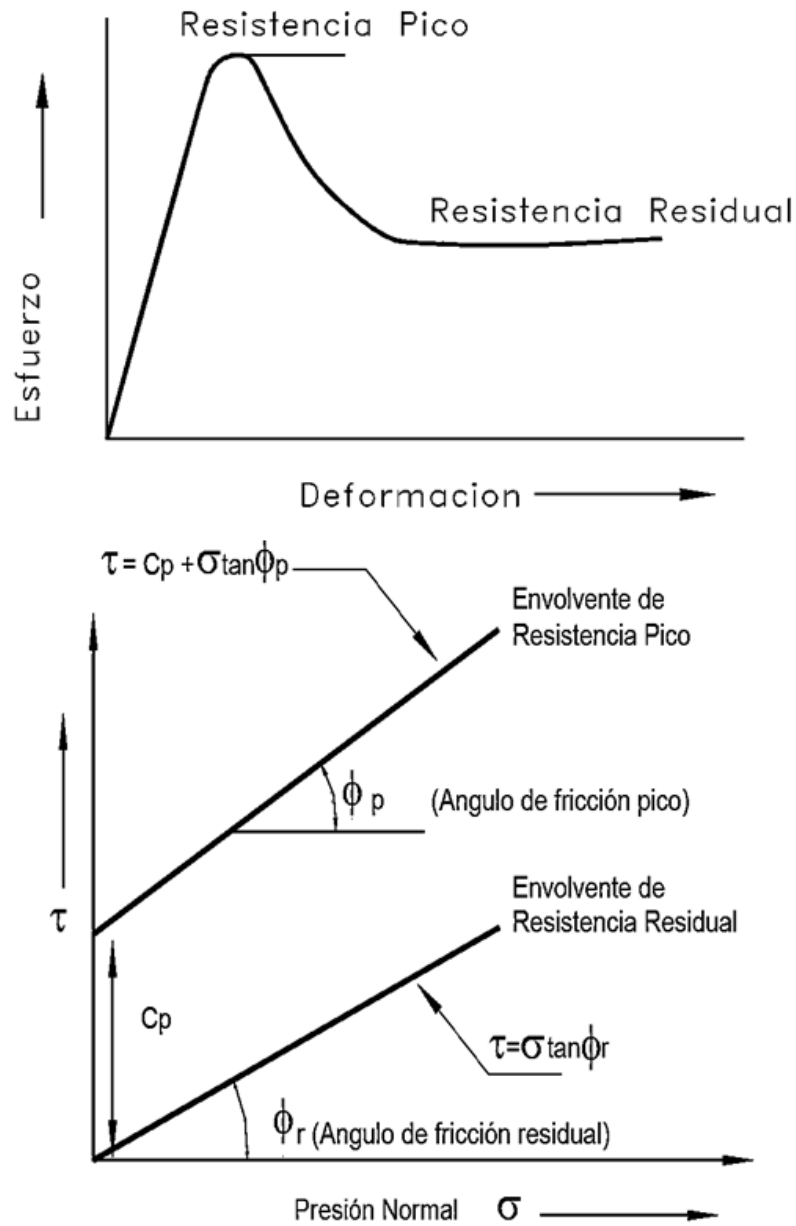


Figura 117: Definición del ángulo residual

**CC BY-NC-ND 4.0**

## Bibliografía

BENGOUGH, A., MULLINS, C. 1991 Penetrometer resistance, root penetration and root elongation rate in two sandy loam soils. *Pl. Soil* 131:59-66.

EHLERS, W., KÖPKE, U., HESSE, F., BÖHM, W. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil Till. Res.* 3:261-275.

<http://www.ceniap.gov.ve/ceniaphoy3/articulos/n3/texto/fovalles.htm>

<http://edafologia.ugr.es/IntroEda/tema04/imagenes/micrdesc.gif>

<http://edafologia.ugr.es/IntroEda/tema04/imagenes/micriont.gif>

[http://es.wikipedia.org/wiki/Textura\\_del\\_suelo](http://es.wikipedia.org/wiki/Textura_del_suelo)

Forsythe, W. 1975. Física de Suelos. Centro Interamericano de documentación. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de Costa Rica.

Foster; B. 1964. Métodos Aprobados en Conservación de Suelos Centro Regional de Ayuda Técnica (A.I.D.) México.

González, M. 1975. Manual de Laboratorio de Edafología. Publicaciones de la Universidad de Costa Rica, San José Costa Rica.

Hesse, P.R. 1971. A Textbook Of Soil Chemical Analysis Chemical Publishing. Co. Inc. New York, U.S.A.

[http://images.google.co.cr/imgres?imgurl=http://www.iqb.es/diccio/images/ph2.jpg&imgrefurl=http://www.iqb.es/diccio/e/ph.htm&usq=\\_\\_TSEJmRm8DGPJUqin0pwz-qb\\_t3g=&h=358&w=344&sz=34&hl=es&start=2&um=1&tbnid=1p2HYJlrHAnVnM:&tbnh=121&tbnw=116&prev=/images%3Fq%3Descala%2Bacidez%2Bdel%2Bph%26hl%3Des%26sa%3DN%26um%3D1](http://images.google.co.cr/imgres?imgurl=http://www.iqb.es/diccio/images/ph2.jpg&imgrefurl=http://www.iqb.es/diccio/e/ph.htm&usq=__TSEJmRm8DGPJUqin0pwz-qb_t3g=&h=358&w=344&sz=34&hl=es&start=2&um=1&tbnid=1p2HYJlrHAnVnM:&tbnh=121&tbnw=116&prev=/images%3Fq%3Descala%2Bacidez%2Bdel%2Bph%26hl%3Des%26sa%3DN%26um%3D1)

Jackson, M.L. 1958. Soil Chemical Analysis Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs. N.Y.

MARTINO, D., SHAYKEWICH, C. 1994. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. *Can. J. Soil Sci.* 74:193-200.

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

TAYLOR, H., GARDNER, H. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Sci.* 96:153- 156.

TAYLOR H. ROBERSON, G., PARKER, J. 1966. Soil strength-root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials.  
*Soil Sci.* 102:18-22.

Yúfera E.P. 1973. *Química Agrícola 1. Suelos y Fertilizantes* Editorial Alhambra. España.

(s.f.). *Algunos conceptos*. Recuperado el Julio de 2025, de <https://paot.org.mx/centro/cursospaot/materialCurso4/Caracteristicas.pdf>

(s.f.). *Esquema de Estructura Del Suelo*. Recuperado el Julio de 2025, de <https://es.scribd.com/document/561197575/Esquema-de-Estructura-del-suelo>

(s.f.). *VISUAL SOIL ASSESSMENT Volume 1: Field guide for cropping & pastoral grazing on flat to rolling country*, 84. Recuperado el Julio de 2025, de [https://orgprints.org/id/eprint/30582/1/VSA\\_Volume1\\_smaller.pdf](https://orgprints.org/id/eprint/30582/1/VSA_Volume1_smaller.pdf)

(s.f.). *Laboratorio de macánica de suelos. Práctica 6, Limites de consistencia*, 8. Recuperado el Julio de 2025, de <https://mecanicadesuelosulacivil.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/07/practica-nc2ba-6-limites-de-consistencia.pdf>

(s.f.). *Tema 3. CONSTITUYENTES. FASES LIQUIDA Y GASEOSA*—. Recuperado el Julio de 2025, de <http://www.edafologia.net/introeda/tema03/tema.htm>

3er Curso Mexicano de Evaluación de Suelos (CMES). (2020). *MANUAL DE EVALUACIÓN DE SUELOS: ÉNFASIS EN MEMORIA EDÁFICA, MATERIA ORGÁNICA E HIDROEDAFOLOGÍA*, 52. México, México. Recuperado el Julio de 2025, de <https://www.smcsmx.org/files/concurso/2020/Manual3CMES2020.pdf>

AARHUS UNIVERSITET . (s.f.). *Visual Evaluation of Soil Structure*. Recuperado el Julio de 2025, de [https://bbro.co.uk/media/50172/vess\\_score\\_chart-1.pdf](https://bbro.co.uk/media/50172/vess_score_chart-1.pdf)

Agroquímicos Arca S. A. de C.V. (Diciembre de 2020). Recuperado el Julio de 2025, de <https://www.facebook.com/photo/?fbid=1491351274398462&set=a.1064838953716365>

Alvarado, A., & Forsythe, W. (2005). VARIACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE EN ÓRDENES DE SUELOS DE COSTA RICA. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 85-94. Recuperado el Julio de 2025, de [https://www.mag.go.cr/rev\\_agr/v29n01\\_085.pdf](https://www.mag.go.cr/rev_agr/v29n01_085.pdf)

Álvarez, L., Leizica, E., & Gómez, F. (2021). *Guía para la evaluación visual de la calidad del suelo*, 76. La Pampa, Argentina. Recuperado el Julio de 2025, de

**CC BY-NC-ND 4.0**

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarriavae@gmail.com](mailto:chavarriavae@gmail.com)**

<https://www.unlpam.edu.ar/images/extension/edunlpam/Gu%C3%ADa%20para%20la%20evaluaci%C3%B3n%20visual%20de%20la%20calidad%20del%20suelo.pdf>

- Alvarez-Manilla, A., Valadéz Castro, J., Garnica Anguas, P., & Martínez Peña, G. (2002). *LA PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS EN LOS PROBLEMAS DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES. APLICACIÓN EN LA INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE*, 89. México.
- Benites Jump, J. (Abril de 2014). *Revista de Agricultura*(53), 12. Recuperado el Julio de 2025, de <https://cifumss.agro.bo/rev-agric/pdf/rev53/rev53-5.pdf>
- Borselle, L. (2024 / 2025). *Instituto de Geología: GEOTECNIA I*, 147. San Luis, México. Recuperado el Julio de 2025, de [https://www.lorenzo-borselli.eu/geotecnia1/Geotecnia\\_1\\_parte\\_I.pdf](https://www.lorenzo-borselli.eu/geotecnia1/Geotecnia_1_parte_I.pdf)
- Brady, N., & Weil, R. (2013). *Elementos da natureza e propriedades dos solos*, 685. Porto Alegre, Brazil.
- Cabalceta Aguilar, G. (s.f.). Propiedades físicas del suelo. *Agua del suelo*, 39. San José, Costa Rica. Recuperado el Julio de 2025, de [https://www.slideserve.com/taran/propiedades-f-sicas-del-suelo-agua-del-suelo#google\\_vignette](https://www.slideserve.com/taran/propiedades-f-sicas-del-suelo-agua-del-suelo#google_vignette)
- Catholic Relief Services. (s.f.). *Evaluación Visual del Suelo*. Recuperado el Julio de 2025, de <https://asa.crs.org/wp-content/uploads/2020/08/Evaluacio%CC%81n-Visual-del-Suelo-granos-ba%CC%81sicos.pdf>
- Chacón Montero, J., Irigaray Fernández, C., Lamas Fernández, F., & Hamdouni Jenoui, R. (2004). *MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS: Prácticas y Ensayos*, 241. Granada, España. Recuperado el Julio de 2025, de [https://www.researchgate.net/profile/Jose\\_Chac%C3%B3n/publication/258857638\\_MECANICA\\_DE\\_SUELOS\\_Y\\_ROCAS\\_Practicas\\_y\\_Ensayos/links/00b7d529446ba43c16000000/MECANICA-DE-SUELOS-Y-ROCAS-Practicas-y-Ensayos.pdf?\\_\\_cf\\_chl\\_tk=qXby4MBh9LXkK9bD3RKhPHk4.55YKy0pwrhfm8XIXXc](https://www.researchgate.net/profile/Jose_Chac%C3%B3n/publication/258857638_MECANICA_DE_SUELOS_Y_ROCAS_Practicas_y_Ensayos/links/00b7d529446ba43c16000000/MECANICA-DE-SUELOS-Y-ROCAS-Practicas-y-Ensayos.pdf?__cf_chl_tk=qXby4MBh9LXkK9bD3RKhPHk4.55YKy0pwrhfm8XIXXc)
- Construneic. (s.f.). *Mecánica de suelos*. Recuperado el Julio de 2025, de <https://construneic.com/mecanica-de-suelos/>
- Construneic. (s.f.). Recuperado el Julio de 2025, de <https://construneic.com/mecanica-de-suelos/ensayo-de-limite-liquido/>
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). (s.f.). *Cálculo de la humedad del suelo por tacto y apariencia*, 14. Recuperado el Julio de 2025, de <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2023-01/Calculo-De-La-Humedad-Del%20Suelo-Por-Tacto-Y-Apariencia.pdf>
- Dirección general de competitividad agrícola, Perú. (Febrero de 2011). *Cadena agroproductiva de papa, Manejo y fertilidad*, 50. Perú. Recuperado el Julio de 2025, de <https://drive.google.com/file/d/1DHkNRw1yD23Fi9qX2P0p60FYJpnQiJ92/view>

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

- Docz. (2018). *Mecánica de suelos I: Límites de consistencia*. Recuperado el Julio de 2025, de <https://www.udocz.com/apuntes/43860/limites-de-atterberg-mecanica-de-suelos>
- Estudios Geotécnicos. (Enero de 2013). *Descriptorios geotécnicos (5): plasticidad, límites de Atterberg y consistencia*. Recuperado el Julio de 2025, de [https://estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptorios-geotecnicos-5-plasticidad-limites-de-atterberg-y-consistencia/#google\\_vignette](https://estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptorios-geotecnicos-5-plasticidad-limites-de-atterberg-y-consistencia/#google_vignette)
- Flores Delgadillo, L., & Alcalá Martínez, J. (2010). Instituto de Geología, Departamento de Edafología. *Manual de procedimientos analíticos: Laboratorio de física de suelos*, 56. México. Recuperado el Julio de 2025, de <https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>
- GRANADOS MUÑOZ, C. (s.f.). *GUÍA PRÁCTICA PARA LA DETERMINACIÓN DEL LÍMITE DE CONTRACCIÓN DE LOS SUELOS (INVE -127 – 13)*. Recuperado el Julio de 2025, de <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/651ad643-e935-4976-a77a-6a026aa7fe30/content>
- Heredia, O. (2010). Cátedra de Edafología: Maestría en ciencias ambientales. *Suelos*.
- Hernández, J. L. (2007). *Métodos para el análisis físico de los suelos*. San José de las Lajas, La Habana, Cuba. Recuperado el 01 de 04 de 2019, de [http://ediciones.inca.edu.cu/files/folletos/metodos\\_analisis.pdf](http://ediciones.inca.edu.cu/files/folletos/metodos_analisis.pdf)
- Lección 4. PROPIEDADES FÍSICAS. (s.f.). *2 Estructura*. Recuperado el julio de 2025, de <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema04/estr.htm>
- Moreno Ramón, H., Gisbert Blanquer, J., & Ibáñez Asensio, S. (s.f.). *La estructura del suelo*. Recuperado el Julio de 2025, de <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/25e3fae1-3729-4574-b716-96b55d359ca2/content>
- MundoAgro. (s.f.). *La estructura del suelo es un indicador que afecta directamente la producción*. Recuperado el Julio de 2025, de <https://mundoagro.io/cl/la-estructura-del-suelo-es-un-indicador-que-afecta-directamente-la-produccion/>
- Osorio Rivera, M., Carrillo Barahona, W., Haro Altamirano, J., & Negrete Costales, J. (2022). *Suelos: Caracterización e importancia*, 193. La Plata, Argentina. Recuperado el Julio de 2025, de <http://cimogsys.esPOCH.edu.ec/direccion-publicaciones/public/docs/books/2023-01-18-140934-L2022-031.pdf>
- Osorio Rivera, M., Haro Altamirano, J., Carrillo Barahona, W., & Negrete Costales, J. (2022). *Suelos Caracterización e Importancia*, 193. La Plata, Argentina. Recuperado el Julio de 2025, de <http://cimogsys.esPOCH.edu.ec/direccion-publicaciones/public/docs/books/2023-01-18-140934-L2022-031.pdf>

**CC BY-NC-ND 4.0**

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)**

- Permacultor Celtíbero. (s.f.). *Estructura natural del suelo*. Recuperado el Julio de 2025, de <https://permacultorceltibero.wordpress.com/agro/agricultura-regenerativa/estructura-natural-del-suelo/>
- Rodríguez Hurtado, L., & Valencia Montenegro, J. (2015). *Preparación de suelos para la producción sostenible de caña de azúcar: Guía metodológica*, 168. Colombia. Recuperado el Julio de 2025, de [https://www.cenicana.org/apps/pat/guias/preparacion/gm\\_preparacion\\_2015.pdf](https://www.cenicana.org/apps/pat/guias/preparacion/gm_preparacion_2015.pdf)
- Rodríguez Pérez, F. (2007). método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16, 19 - 24. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/932/93216305.pdf>
- Salinas, L., Campos, J., & Guardia, G. (s.f.). Fundamentos de mecánica de suelos. *Capítulo 1: Propiedades índices de los suelos*. Recuperado el Julio de 2025
- Schwyter, A., & Vaughan, K. (2020). *Introducción al Manual de Laboratorio de Ciencias del Suelo*. Canadá. Recuperado el Julio de 2025
- Scribd. (s.f.). *Carta de plasticidad*. Recuperado el Julio de 2025, de <https://es.scribd.com/document/438357572/4-2-Carta-de-Plasticidad>
- Serra, J. (s.f.). *Cátedra de obras hidráulicas (CI457)*, 61. Recuperado el Julio de 2025, de [https://aulavirtual.fio.unam.edu.ar/pluginfile.php/323029/mod\\_resource/content/2/Riego%20Agr%C3%ADcola.pdf](https://aulavirtual.fio.unam.edu.ar/pluginfile.php/323029/mod_resource/content/2/Riego%20Agr%C3%ADcola.pdf)
- Silva C. , P., Silva R. , H., Garrido S. , M., & Acevedo H. , E. (2015). *MANUAL DE ESTUDIO Y EJERCICIOS RELACIONADOS CON EL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO Y SU USO POR LOS CULTIVOS*, 86. Santiago, Chile. Recuperado el Julio de 2025, de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/130642/Manual-de-estudio-y-ejercicios-relacionados-con-el-contenido-de-agua.pdf>
- Slideshare de Scribd. (2025). *Estructura del suelo*. Recuperado el Julio de 2025, de <https://es.slideshare.net/slideshow/estructura-del-suelo-7551241/7551241>
- Studocu. (s.f.). *Carta de plasticidad apunte*. Recuperado el Julio de 20025, de <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-veracruzana/mecanica-de-suelos/carta-de-plasticidad-apunte/26401709>
- Tercer Concurso Mexicano de Evaluación de Suelos. (2020). *MANUAL DE EVALUACIÓN DE SUELOS: ÉNFASIS EN MEMORIA EDÁFICA, MATERIA ORGÁNICA E HIDROEDAFOLOGÍA*, 52. Ciudad de México, México. Recuperado el Julio de 2025, de <https://www.smcsmx.org/files/concurso/2020/Manual3CMES2020.pdf>
- Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Unidad de Hidrología, Departamento de Suelos y Aguas. (s.f.). *Agua en el suelo*. Recuperado el Julio de 2025, de <https://cdn.portalfruticola.com/2017/11/6d33e6a4-agua-en-el-suelo.pdf>

**CC BY-NC-ND 4.0**

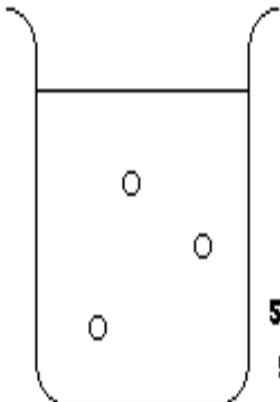
**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)**

# Anexos

**CC BY-NC-ND 4.0**

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -  
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal [adchavarría@itcr.ac.cr](mailto:adchavarría@itcr.ac.cr) [chavarrivae@gmail.com](mailto:chavarrivae@gmail.com)

Anexo 1: Cálculo de moles porcentaje en peso, molaridad, molalidad y fracciones molares de una solución

<b>SOLUCIÓN</b>		<b>PORCENTAJE EN PESO</b>	
	<b>3 moles soluto</b> <b>15 g. soluto</b> <b>545 g solvente</b> <b>502 mL solución</b> <b>560 g. solución</b>	$\% \text{ p/p} = ( \text{MASA soluto} / \text{MASA solución} ) * 100$	
		$\% \text{ p/p} = ( 15 \text{ g. soluto} / 560 \text{ g. solución} ) * 100 = 2,68 \%$	
		<b>MOLARIDAD</b> $M = n \text{ soluto} / V \text{ solución (L)}$ $M = 3 \text{ moles soluto} / 0,502 \text{ (L) solución} = 5,97 \text{ ( moles/L)}$	
		<b>MOLALIDAD</b> $m = n \text{ soluto} / \text{MASA solvente (Kg)}$ $m = 3 \text{ moles soluto} / 0,545 \text{ (Kg) solvente} = 5,50 \text{ ( moles/Kg)}$	
<b>DENSIDAD solución = 1,115 g/mL</b>  <b>Si <math>M_r</math> solvente = 4 g/mol</b> <b><math>n</math> solvente = MASA solvente / <math>M</math> solvente</b> <b><math>n</math> solvente = 545 g solvente / 4 g/mol</b> <b><math>n</math> solvente = 136,25 moles solvente</b>			
<b>FRACCIONES MOLARES</b>			
$X \text{ soluto} = n \text{ soluto} / n \text{ soluto} + n \text{ solvente}$		$X \text{ solvente} = n \text{ solvente} / n \text{ soluto} + n \text{ solvente}$	
$= \frac{3 \text{ moles soluto}}{3 \text{ moles soluto} + 136,25 \text{ moles solvente}}$		$= \frac{136,25 \text{ moles solvente}}{3 \text{ moles soluto} + 136,25 \text{ moles solvente}}$	
<b>X soluto = 0,0215</b>		<b>X solvente = 0,9784</b>	
<b>X soluto + X solvente = 1</b>			

**CC BY-NC-ND 4.0**

## Anexo 2: Sistema de clasificación de la USCS y otros

De acuerdo con el sistema Unificado, los suelos de grano se dividen en:

1. Grava y suelos gravosos; símbolo **G**
2. arena y suelos arenosos; símbolo **S**

Las gravas y las arenas se dividen separadamente en cuatro grupos:

- a. Bien graduadas, material relativamente limpio; símbolo **W**.
- b. Material bien graduado con excelente cementante arcilloso; símbolo **C**.
- c. Mal graduadas, material relativamente limpio; símbolo **P**.
- d. Materiales gruesos con finos, no comprendidos en los grupos anteriores; símbolo **M**

Los suelos finos se dividen en tres grupos:

1. suelos limosos inorgánicos y suelos arenosos muy finos; símbolo **M**
2. arcillas inorgánicas; símbolo **C**.
3. limos y arcillas orgánicas; símbolo **O**.

Cada uno de estos tres grupos de suelos finos se subdivide de acuerdo al límite líquido en:

- a. suelos finos con límite líquido de 50 o menos; es decir; de baja a mediana compresibilidad; símbolo **L**.
- b. Suelos finos con límite líquido mayor que 50: es decir, de elevada compresibilidad; símbolo **H**.

Suelos con elevada proporción de materia orgánica fibrosos, como la turba y los fangos de muy alta compresibilidad, no se subdividen y se colocan en un grupo; su símbolo es **Pt**, basándose en la clasificación a simple vista.

**CC BY-NC-ND 4.0**

## Continuación Anexo 2

**SIST. DE CLASIFICACION USCS**

Finos (> 50% pasa 0.08 mm)				
Tipo Suelo	Símbolo	Lim. Liq. $W_L$	* IP	
Limo Inorgánico	ML	<50	< 0.73( $W_L-20$ ) ó <4	
	MH	>50	< 0.73( $W_L-20$ )	
Arcillas Inorgánicas	CL	<50	> 0.73( $W_L-20$ ) y >7	
	CH	>50	> 0.73( $W_L-20$ )	
Limo o Arcillas Orgánicas	OL	<50	** $W_L$ seco al horno $\leq 75\%$ del $W_L$ seco al aire	
	OH	>50		
Alfamentos Orgánicos	$P_t$	Materia Orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente		
* Si $IP \sim 0.73(W_L-20)$ ó si $IP$ entre 4 y 7 e $IP > 0.73(w-20)$ , usar simbología doble: CL-ML, CH-OH				
** Si tiene olor orgánico debe determinarse adicionalmente $w$ l seco al horno				
En casos dudosos favorecer la Clasificación menos Plástica. Ej CH-MH en vez de CL-ML				
Si $w_l = 50$ ; CL-CH ó ML-MH				

**SIST. DE CLASIFICACION USCS**

Gruesos (< 50% pasa 0.08 mm)						
Tipo Suelo	Símbolo	% Ret. en 5 mm	% Pasa 0.08 mm*	CU	CC	** IP
Grava	GW	$\gamma = 50\%$ de lo Ret. en 0.08 mm.	<5	>4	1 a 3	
	GP			Si no cumple requisito de GW es GP		
	GM	>12				< 0.73( $W_L-20$ ) ó <4
	GC					> 0.73( $W_L-20$ ) y >7
Arena	SW	< 50% de lo Ret. en 0.08 mm.	<5	>6	1 a 3	
	SP			Si no cumple requisito de SW es SP		
	SM	>12				< 0.73( $W_L-20$ ) ó <4
	SC					> 0.73( $W_L-20$ ) y >7
* Entre 5 y 12 % usar simbología doble como GW-GC, GP-GM, SW-SM, SP-SC						
** Si $IP \sim 0.73(w_l-20)$ ó si $IP$ entre 4 y 7 e $IP > 0.73(W_L-20)$ , usar simbología doble: GM-GC, SM-SC						
En casos dudosos favorecer la Clasificación menos Plástica. Ej GW-GM en vez de GW-GC						
CU = $(\Phi 60/\Phi 10)$				CC = $\Phi 30^2/(\Phi 60*\Phi 10)$		

CC BY-NC-ND 4.0



## Continuación Anexo 2

DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO					
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 ⊕	Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla N° 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4  PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE ½ cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GRAVAS LIMPIA Poco o nada de partículas finas	GW	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD $C_u$ : mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA $C_c$ : entre 1 y 3. $C_u = D_{60} / D_{10}$ $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$  NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.  LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.  LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.  $C_u = D_{60} / D_{10}$ mayor de 6 ; $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ entre 1 y 3.  No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW  LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.  LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.				
			GRAVA CON FINOS Cantidad apreciable de	* GM		d	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo		
			ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4  PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE ½ cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	ARENAS LIMPIA Poco o nada de partículas finas		SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.		
			ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas		SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.		
			ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas		* SM	d	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	
			ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas		SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.		
			SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 ⊕	Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla N° 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.		LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduada, P – Mal Graduada, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad  <b>CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.)</b>  
							CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	
							OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.	
							MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.	
CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas								
OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.								
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	P	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.							

CC BY-NC-ND 4.0

\*\* CLASIFICACIÓN DE FRONTERA- LOS SUELOS QUE POSEAN LAS CARACTERÍSTICAS DE DOS GRUPOS SE DESIGNAN CON LA COMBINACIÓN DE LOS DOS SÍMBOLOS; POR EJEMPLO GW-GC, MEZCLA DE ARENA Y GRAVA BIEN GRADUADAS CON CEMENTANTE ARCILLOSO.

⊕ TODOS LOS TAMAÑOS DE LAS MALLAS EN ESTA CARTA SON LOS U.S. STANDARD.

\* LA DIVISIÓN DE LOS GRUPOS GM Y SM EN SUBDIVISIONES *d* Y *u* SON PARA CAMINOS Y AEROPUERTOS ÚNICAMENTE, LA SUB-DIVISIÓN ESTA BASADA EN LOS LÍMITES DE ATTERBERG EL SUFIJO *d* SE USA CUANDO EL L.L. ES DE 28 O MENOS Y EL I.P. ES DE 6 O MENOS. EL SUFIJO *u* ES USADO CUANDO EL L.L. ES MAYOR QUE 28.

### Continuación Anexo 2

El sistema de la AASHTO. Hacia 1928, el Bureau of Public Roads presento un sistema de clasificación de suelos que todavía usan muchos los ingenieros de caminos

Este sistema divide a los suelos en ocho grupos designados por los símbolos de A-1 al A-8.

En el sistema de la AASHTO los suelos inorgánicos se clasifican en 7 grupos que van del A-1 al A-7 y estos su vez se subdividen en 12 grupos.

se considero que le mejor suelo para ser usado en la subrasante compuesto principalmente de arena y grava, se le dio el nombre A-1.

Los suelos restantes se agrupan en orden decreciente de estabilidad.

- Los suelos con elevada proporción de materia orgánica se clasifican como A-8. Cualquier suelo que contenga material fino se identifica además por su índice de grupo; cuanto mayor es el índice, peor es el suelo.
- El índice de grupos se calcula con la formula:
  - $\text{Índice de grupo} = (F-35)0.2+005(W_L-40)+0.01(F-15)(I_p -10)$

En la que :

- F= porcentaje del suelo que pasa por la malla N°200, expresado como numero entero.
  - $W_L$  = limite liquido.
  - $I_p$  = índice de plasticidad.
- El índice de grupo siempre se reporta aproximándolo al numero entero mas cercano, a menos que su valor calculado sea negativo, en cuyo caso se reporta como cero. El índice de grupo se agrega a la clasificación de grupo y subgrupo. Por ejemplo, un suelo arcilloso que tenga un índice de grupo de 25, puede clasificar como A-7-6 (25).

### **CC BY-NC-ND 4.0**

CLASIFICACION GENERAL	SUELOS GRANULARES ( <= 35% pasa por malla N° 200)						SUELOS FINOS ( > 35% pasa por malla N° 200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
GRUPO	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6*	A-2-7*				A-7-5**
N° 10	<=50										
N° 40	<=30	<=50	>=51								
N° 200	<=15	<=25	<=10	<35				>=36			
Lw				<=40	>=41	<=40	>=41	<=40	>=41	<=40	>=41
IP	<=6	N.P.		<=10	<=10	>=11	>=11	<=10	<=10	>=11	>=11
IG	0	0	0	0		<4		<=8	<=12	<=16	<=20
C.B.R.	40-80	<=20		>=20		20-40		<=15	<=10	<=15	<=5
Descripción	Gravas y Arenas		Arena Finas	Gravas y Arenas Limosas o Arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	

\*\* A-7-5= IP <= (Lw-30)

\*\* A-7-6= IP > (Lw-30)

$$IG=(f_{200}-35)*(0.2+0.005*(W_L-40))+(f_{200}-15)*(I_P-10)*0.01$$

\* Para A-2-6 y A-2-7 : IG=(f<sub>200</sub>-15)\*(IP-10)\*0.01

Si el Suelos es N.P.: IG=0 ; si IG < 0 se toma IG = 0

f<sub>200</sub>= Porcentaje de suelos que pasa por la malla N° 200

**CC BY-NC-ND 4.0**

Continuación Anexo 2: Sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS)

DIVISIÓN	CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN		SIM	NOMBRES TÍPICOS
SUELOS DE GRANO GRUESO < 50% Pasa por el Nº 200 (0,075 mm)	GRAVAS <50% de la fracción gruesa pasa por el Nº 4 (4,75 mm)  ARENAS >50% de la fracción gruesa pasa por el Nº 4 (4,75 mm)	$C_u > 4, 1 < C_c < 3$  No se cumplen criterios GW	<b>GW</b>	Gravas bien graduadas, ↓ fino
		Límites: Área sombreada, símbolo doble ↓ Línea A o IP < 4 ↑ Línea A e IP > 7	<b>GP</b>	Gravas mal graduadas, ↓ fino
SUELOS DE GRANO FINOS ≥ 50% Pasa por el Nº 200 (0,075 mm)	%Finos: - <5% Nº200, GW, GP, SW, SP - >12% Nº200 GM, GC, SM, SC - 5-12% Nº200 símbolos dobles	$C_u > 6, 1 < C_c < 3$  No se cumplen criterios SW	<b>SW</b>	Arenas bien graduadas, ↓ fino
		Límites: Área sombreada, símbolo doble ↓ Línea A o IP < 4 ↑ Línea A e IP > 7	<b>SP</b>	Arenas mal graduadas, ↓ fino
		$C_u > 4, 1 < C_c < 3$  No se cumplen criterios SW	<b>SM</b>	Arenas limosas
		Límites: Área sombreada, símbolo doble ↓ Línea A o IP < 4 ↑ Línea A e IP > 7	<b>SC</b>	Arenas arcillosas
SUELOS DE GRANO FINOS ≥ 50% Pasa por el Nº 200 (0,075 mm)	Carta de plasticidad: - Para suelos finos y fracción fina de los gruesos - Área sombreada, símbolo doble		<b>ML</b>	Limos inorg., arenas finísima
			<b>CL</b>	Arcilla. inorg., plast baja-md
			<b>OL</b>	Limos org., plast baja
			<b>MH</b>	Limos inorg., micaceos
			<b>CH</b>	Arcilla. inorg., plast alta
			<b>OH</b>	Arcilla. org., plast alta-medio
SUELOS 11 ORGÁNICOS			<b>PT</b>	Turba, y otros suelos orgán.

Continuación Anexo 2: Clasificación para los suelos gruesos según SUCS (más del 50% es retenido en el tamiz #200)

		Simbolo del grupo		Nombre del grupo	
<5% finos	Cu <sub>z</sub> ≥4 y 1<Cc<3	GW	<15% Arena	Grava bien graduada	
	Cu<4 y /o 1>Cc>3	GP	≥15% Arena	Grava bien graduada con arena	
5-12% finos	Cu <sub>z</sub> ≥4 y 1<Cc<3	Finos=ML o MH	<15% Arena	Grava pobremente graduada	
			≥15% Arena	Grava pobremente graduada con arena	
	Cu<4 y /o 1>Cc>3	Finos=CL, CH, (o CL-ML)	<15% Arena	Grava bien graduada con limo	
			≥15% Arena	Grava bien graduada con arena y limo	
>12% finos	Cu <sub>z</sub> ≥4 y /o 1>Cc>3	Finos=ML o MH	<15% Arena	Grava bien graduada con arcilla (o arcilla limosa)	
			≥15% Arena	Grava bien graduada con arena y arcilla (o arena y arcilla limosa)	
	Finos=CL, CH, (o CL-ML)	<15% Arena	Grava pobremente graduada con limo		
		≥15% Arena	Grava pobremente graduada con arena y limo		
>12% finos	Finos=ML o MH	Finos=CL, CH, (o CL-ML)	<15% Arena	Grava pobremente graduada con arcilla (o arcilla limosa)	
			≥15% Arena	Grava pobremente graduada con arena y arcilla (o arena y arcilla limosa)	
	Finos=CL o CH	Grava limosa			
		Grava limosa con arena			
>12% finos	Finos=CL o CH	Finos=CL-ML	Grava arcillosa		
			Grava arcillosa con arena		
	Finos=CL-ML	Grava arcillosa, limosa			
		Grava arcillosa, limosa con arena			
<5% finos	Cu <sub>z</sub> ≥6 y 1<Cc<3	SW	<15% Grava	Arena bien graduada	
	Cu<6 y /o 1>Cc>3	SP	≥15% Grava	Arena bien graduada con grava	
5-12% finos	Cu <sub>z</sub> ≥6 y 1<Cc<3	Finos=ML o MH	<15% Grava	Arena pobremente graduada	
			≥15% Grava	Arena pobremente graduada con grava	
	Cu<6 y /o 1>Cc>3	Finos=CL, CH, (o CL-ML)	<15% Grava	Arena pobremente graduada con limo	
			≥15% Grava	Arena bien graduada con grava y limo	
>12% finos	Cu <sub>z</sub> ≥6 y /o 1>Cc>3	Finos=ML o MH	<15% Grava	Arena bien graduada con arcilla (o arcilla limosa)	
			≥15% Grava	Arena bien graduada con grava y arcilla (o grava y arcilla limosa)	
	Finos=CL, CH, (o CL-ML)	<15% Grava	Arena pobremente graduada con limo		
		≥15% Grava	Arena pobremente graduada con grava y limo		
>12% finos	Finos=ML o MH	Finos=CL o CH	<15% Grava	Arena limosa	
			≥15% Grava	Arena limosa con grava	
	Finos=CL-ML	<15% Grava	Arena arcillosa		
		≥15% Grava	Arena arcillosa con grava		
		SC-SM	<15% Grava	Arena arcillosa, limosa	
			≥15% Grava	Arena arcillosa, limosa con grava	

CC BY-NC-ND 4.0

Continuación anexo 4: Clasificación para los suelos finos según el SUCS (más del 50% pasa por el tamiz #200)

		Simbolo del grupo		Nombre del grupo			
LL < 50	Inorgánico	IP > 7 y en el gráfico por encima de la línea "A"	CL	< 30% pasa por el Nº 200	< 15% pasa por el Nº 200	% arena > % grava	Arcilla magra (poco plástica)
				≥ 30% pasa por el Nº 200	15-29% pasa por el Nº 200	% arena < % grava	Arcilla magra con arena
						< 15% grava	Arcilla magra arenosa
						≥ 15% grava	Arcilla magra arenosa con grava
						< 15% arena	Arcilla magra gravosa
			≥ 15% arena	Arcilla magra gravosa con arena			
	Inorgánico	4 ≤ IP ≤ 7 y en el gráfico por encima de la línea "A"	CL-MIL	< 30% pasa por el Nº 200	< 15% pasa por el Nº 200	% arena > % grava	Arcilla limosa
				≥ 30% pasa por el Nº 200	15-29% pasa por el Nº 200	% arena < % grava	Arcilla limosa con arena
						< 15% grava	Arcilla limosa arenosa
						≥ 15% grava	Arcilla limosa arenosa con grava
					< 15% arena	Arcilla limosa gravosa	
		≥ 15% arena	Arcilla limosa gravosa con arena				
LL ≥ 50	Inorgánico	IP < 4 y en el gráfico por debajo de la línea "A"	ML	< 30% pasa por el Nº 200	< 15% pasa por el Nº 200	Limo	
				≥ 30% pasa por el Nº 200	15-29% pasa por el Nº 200	% arena > % grava	Limo con arena
						% arena < % grava	Limo con grava
						< 15% grava	Limo arenoso
						≥ 15% grava	Limo arenoso con grava
			< 15% arena	Limo gravoso			
			≥ 15% arena	Limo gravoso con arena			
	Orgánico	IP en el gráfico por encima de la línea "A"	CH	< 30% pasa por el Nº 200	< 15% pasa por el Nº 200	Arcilla muy plástica	
				≥ 30% pasa por el Nº 200	15-29% pasa por el Nº 200	% arena > % grava	Arcilla muy plástica con arena
						% arena < % grava	Arcilla muy plástica con grava
					< 15% grava	Arcilla muy plástica arenosa	
					≥ 15% grava	Arcilla muy plástica arenosa con grava	
Orgánico	IP en el gráfico por debajo de la línea "A"	MH	< 30% pasa por el Nº 200	< 15% pasa por el Nº 200	Arcilla muy plástica gravosa		
			≥ 30% pasa por el Nº 200	15-29% pasa por el Nº 200	% arena < % grava	Arcilla muy plástica gravosa con arena	
					% arena > % grava	Limo plástico	
					< 15% arena	Limo plástico con arena	
					≥ 15% arena	Limo plástico con grava	
Orgánico	IP en el gráfico por debajo de la línea "A"	OH	< 30% pasa por el Nº 200	< 15% pasa por el Nº 200	Limo plástico arenoso		
			≥ 30% pasa por el Nº 200	15-29% pasa por el Nº 200	% arena > % grava	Limo plástico arenoso con grava	
					% arena < % grava	Limo plástico gravoso	
					< 15% arena	Limo plástico gravoso con arena	
					≥ 15% arena	Limo plástico gravoso con arena	

CC BY-NC-ND 4.0

Continuación Anexo 2: Clasificación para los suelos finos orgánicos según el SUCS (más del 50% pasa por el tamiz #200)

Simbolo del grupo				Nombre del grupo	
OL	<30% pasa por el Nº 200	IP ≥ 4 y en el gráfico por encima de la línea "A"	<15% pasa por el Nº 200	Arcilla orgánica	
			15-29% pasa por el Nº 200	Arcilla orgánica con arena	
	≥30% pasa por el Nº 200	IP < 4 y en el gráfico por debajo de la línea "A"	% arena > % grava	Arcilla orgánica con grava	
			% arena < % grava	Arcilla orgánica arenosa	
			≥15% grava	Arcilla orgánica arenosa con grava	
			<15% arena	Arcilla orgánica gravosa	
			≥15% arena	Arcilla orgánica gravosa con arena	
			<15% pasa por el Nº 200	Limo orgánico	
	OH	<30% pasa por el Nº 200	En el gráfico por encima de la línea "A"	% arena > % grava	Limo orgánico con arena
				15-29% pasa por el Nº 200	Limo orgánico con grava
≥30% pasa por el Nº 200		En el gráfico por debajo de la línea "A"	% arena > % grava	Limo arenoso	
			≥15% grava	Limo orgánico arenoso con grava	
			<15% arena	Limo orgánico gravoso	
			≥15% arena	Limo orgánico gravoso con arena	
			<15% pasa por el Nº 200	Arcilla orgánica	
			15-29% pasa por el Nº 200	Arcilla orgánica con arena	
OH	<30% pasa por el Nº 200	En el gráfico por encima de la línea "A"	% arena > % grava	Arcilla orgánica con grava	
			% arena < % grava	Arcilla orgánica arenosa	
	≥30% pasa por el Nº 200	En el gráfico por debajo de la línea "A"	<15% grava	Arcilla orgánica arenosa con grava	
			≥15% grava	Arcilla orgánica gravosa	
			<15% arena	Arcilla orgánica gravosa con arena	
			≥15% arena	Limo orgánico	
			<30% pasa por el Nº 200	Limo orgánico con arena	
			15-29% pasa por el Nº 200	Limo orgánico con grava	
	OH	≥30% pasa por el Nº 200	En el gráfico por debajo de la línea "A"	<15% grava	Limo arenoso
				≥15% grava	Limo orgánico arenoso con grava
<15% arena				Limo orgánico gravoso	
≥15% arena				Limo orgánico gravoso con arena	

CC BY-NC-ND 4.0