

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

1.1. Introducción

Se presenta una metodología racional, basada en experimentos factoriales, en conceptos de la mecánica de suelos no saturados, y en la experiencia práctica de diseño y control, para análisis de densificación y resistencia de geomateriales, esto es, suelos, mezclas, y mezclas asfálticas, compactados.

En Venezuela las instituciones que han utilizado RAMCODES declaran que pudieron utilizar satisfactoriamente materiales que, analizados con la metodología tradicional, hubieran tenido que ser desechados. Por otra parte, los usuarios han reportado también un elevado rendimiento durante la construcción ya que las mayores resistencias para el material se consiguen la mayoría de veces con densidades considerablemente más bajas que las máximas de laboratorio, lo que supone una menor cantidad de pasadas del equipo de compactación.

El autor de este trabajo pretende realizar un análisis de la clasificación de suelos, mediante la metodología de RAMCODES; para poder determinar las ventajas y desventajas de esta clasificación cuantitativa mediante la aplicación del laboratorio de suelos y así poder determinar qué beneficios nos puede brindar esta nueva metodología de clasificación de suelos en nuestro medio.

La metodología de RAMCODES tiene diversas aplicaciones prácticas dentro de los geomateriales compactados como, la anticipación de la resistencia, cuantificación del efecto de la microestructura, estudio de deformaciones permanentes, patología de estructuras de pavimento, en mezclas asfálticas, que pueden ser de gran ayuda en nuestro medio acortando tiempos y reduciendo costos.

1.2. Determinación de la línea de investigación.

1.2.1. Determinación de línea de estudio. Argumentos.

La clasificación de los suelos dentro de la mecánica de suelos es una herramienta muy importante e imprescindible, porque para cualquier tipo de trabajo de ingeniería civil las estructuras se apoyan sobre el suelo de fundación, y es la clasificación de los suelos como la de AASTHO, SUCS entre otras, la que nos permite hacer una caracterización de dicho suelo y conocer sus características desde un punto de vista cualitativo, sin embargo, con el paso del tiempo existen nuevas metodologías de clasificación que no solo nos brindan una clasificación cualitativa sino también una clasificación cuantitativa que nos dan mejores resultados de los suelos estudiados.

1.2.2. Breve descripción de causales identificados.

Para identificar las causales se siguió la siguiente técnica en función de responder las preguntas realizadas primeramente sobre el tópico elegido, como ser:

¿Qué es la metodología de RAMCODES?

¿Qué componentes pretende estudiar RAMCODES?

¿Para qué sirve RAMCODES?

¿Cumplen siempre para lo que sirven los métodos RAMCODES y AASTHO?

¿Qué elementos afectan a los métodos RAMCODES y AASTHO en la clasificación de suelos?

Donde se debe observar cada componente y pensar en alguna deficiencia que éste pudiera tener, formular y escribir afirmaciones negativas de cada una de las ideas que se imagina, mostradas a continuación:

Causales ubicados en respuestas a preguntas definidas.

- Se observa que hay poca experiencia y conocimiento sobre la metodología de RAMCODES en nuestro medio.
- Se conoce muy poco sobre las ventajas y desventajas del método de RAMCODES en la clasificación de suelos.
- Hay muy poco conocimiento sobre los mapas de resistencia con los que trabaja RAMCODES.

Y una vez elegidos los causales se debe tratar de resumirlos en una descripción general, es decir, una situación problemática preliminar.

Identificación del objeto de estudio**1.2.3. Identificación del objeto de estudio**

A continuación se siguieron los siguientes pasos concretos para la identificación del objeto de estudio:

Configuración de las causales utilizando en NO

- No hay experiencia y conocimiento sobre la metodología de RAMCODES en el medio.
- No se conoce sobre las ventajas y desventajas del método de RAMCODES en la clasificación de suelos.
- No hay conocimiento sobre los mapas de resistencia con los que trabaja RAMCODES.

Cambiamos el no por el sí.

- Sí hay experiencia y conocimiento sobre la metodología de RAMCODES en el medio.
- Sí se conoce sobre las ventajas y desventajas del método de RAMCODES en la clasificación de suelos.
- Si hay conocimiento sobre los mapas de resistencia con los que trabaja RAMCODES.

Aplicando la conexión de la simple implicación “si p entonces q”.

Tabla 1. Aplicación de la conexión de la simple implicación "si p entonces q"

P	1	1	2	3	2	3
Q	2	3	1	1	3	2
sentido	v	v	v	v	v	v

Fuente: Elaboración propia.

Donde la proposición que tuvo más verdaderos fue seleccionada como el objeto de estudio es decir:

“Ventajas y desventajas de la metodología de RAMCODES en la clasificación de suelos granulares”

1.2.4 Determinación de la perspectiva de solución.

La perspectiva es una disciplina de la cual se centraliza y direcciona la investigación donde planteamos que es lo que queremos hacer a lo que se suma la idea a la cual daremos una perspectiva. La idea de perspectiva para la presente investigación es **Analizar**.

“Análisis de ventajas y desventajas de la metodología de RAMCODES en la clasificación de suelos granulares”.

1.3. Situación problemática.

Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar en forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas sin una descripción muy detallada. En la actualidad, en la ciudad de Tarija y en Bolivia, para poder clasificar los diferentes tipos de suelos se recurre a dos sistemas de clasificación, que usan la distribución por tamaño de grano y plasticidad de los suelos que son usados comúnmente por los ingenieros de suelos, estos son el Sistema de Clasificación AASHTO y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. El Sistema AASHTO lo usan principalmente los departamentos de caminos estatales y de condados, mientras que los ingenieros geotécnicos usualmente prefieren el Sistema Unificado.

Estos tipos de clasificación nos dan una información cualitativa de las características de los diferentes tipos de suelos, pero no así del tipo cuantitativo, siendo este un vacío que existe en la actualidad en Bolivia, razón por la cual es necesario analizar una metodología de clasificación de suelos que considere un análisis cuantitativo.

Actualmente existe una nueva metodología de clasificación de suelos llamada RAMCODES, que se fundamenta en tres aspectos esenciales, que son: la clasificación cuantitativa, que resume las características de un suelo en un valor numérico único en una escala continua; el potencial de densificación, que estudia la probabilidad de que el geomaterial alcance una densidad en un rango de contenidos de agua, o de asfalto, bajo una energía de compactación particular, y en la relación entre el contenido de agua/asfalto, la densidad, y la respuesta del geomaterial, ya sea de resistencia, deformabilidad, módulos, etc., bajo las condiciones particulares de un experimento.

Es en este sentido es, que se desea hacer un análisis de las ventajas y desventajas de la metodología RAMCODES dentro de la clasificación de suelos, para valorar la aplicación de este método en nuestro medio y que el mismo pueda ser utilizado por las diferentes instituciones que requieran realizar una clasificación de suelos del tipo cuantitativa.

1.4. Determinación del problema.

¿De qué manera un análisis de la metodología de RAMCODES, puede ser una alternativa en la clasificación de los suelos granulares?

Delimitación de tiempo: El tiempo de realización de la presente tesis se limitará al calendario académico dispuesto por la universidad que es de 14 semanas.

Factibilidad: La clasificación de los suelos depende de varios tipos de ensayo que están disponibles dentro del laboratorio de suelos.

Espacio: Laboratorio de mecánica de suelos de la carrera de Ing. Civil de la U.A.J.M.S.

1.5. Objetivos.

1.5.1. Objetivo general

“Analizar en laboratorio la clasificación de suelos, utilizando el método RAMCODES; con el fin de poder determinar sus ventajas y desventajas de forma cuantitativa y cualitativa”.

1.5.2. Objetivos específicos.

- Recopilar información sobre la metodología de RAMCODES.
- Identificar e inspeccionar los bancos de suelos de estudio.
- Extraer las muestras que serán analizadas.
- Realizar ensayos de laboratorio de suelos.
- Realizar el análisis de los resultados laboratorio de suelos.
- Clasificar los suelos según la metodología AASTHO.
- Aplicar la metodología de RAMCODES.
- Comparar la clasificación de suelos mediante la metodología AASTHO y RAMCODES.
- Analizar la metodología de RAMCODES.
- Analizar las ventajas y desventajas de la metodología de RAMCODES.

1.6. Formulación de la hipótesis.

1.6.1. Hipótesis.

La aplicación de laboratorio de suelos para la determinación de la granulometría y límite líquido de suelos granulares, mediante la clasificación de la metodología de RAMCODES permitirá establecer una clasificación cuantitativa y cualitativa de los suelos granulares.

1.6.2. Identificación de variables.

Tenemos establecido en nuestro estudio dos variables independiente y dependiente.

Variable independiente (X).

Granulometría.

Límite líquido.

Variable dependiente (Y)

Clasificación cualitativa y cuantitativa (RAMCODES).

1.7. Identificación del tipo del diseño de investigación.

El presente trabajo corresponde a una investigación científica explicativa, porque al hacer un análisis de la clasificación de suelos por la metodología de RAMCODES se podrá determinar sus ventajas y desventajas, además de una nueva metodología de clasificación en nuestro medio aparte de las tradicionales ya conocidas.

1.8. Unidades de estudio y decisión muestreable.

1.8.1. Unidad de estudio o muestreo.

Suelos de tipo granular.

Ensayos de caracterización.

Ensayos de distribución granulométrica y límite líquido.

Clasificación por la metodología de RAMCODES.

1.8.2. Población y Muestra.

Población.

Todos los ensayos de laboratorio que se requiere para los suelos granulares.

Humedad natural.

Granulometría.

Límite líquido y límite plástico.

Peso unitario.

Gravedad específica.

Compactación - Proctor modificado.

CBR.

Desgaste de los ángeles.

Muestra.

Granulometría.

Límite líquido.

Compactación - Proctor modificado.

CBR.

1.8.3. Selección de las técnicas de muestreo.

Muestreo no probabilístico por conveniencia

Es un muestreo no probabilístico, en este caso el investigador tiene conocimiento de los elementos de la población y decide cuales puede tener mejor información y los selecciona según su conveniencia.

Una vez identificada un área de extracción se hará un sondeo de dicha área, observando donde se puede obtener el mejor material y por conveniencia extraer el material a ser analizado de esos lugares seleccionados, en caso de no encontrar sitios con los suelos granulares especificados se procederá a fabricar dichos suelos en el laboratorio de suelos de la U.A.J.M.S.

Los sitios de posible extracción para el material de análisis serán los barrios del valle central de Tarija, así como también algunas provincias.

1.8.4. Alcance del proyecto.

El presente proyecto de investigación tiene un alcance para las siguientes provincias del departamento de Tarija; Provincia Cercado, Provincia Méndez, Provincia Avilés, Provincia Arce y Provincia O'connor, más precisamente en los siguientes barrios y comunidades.

Provincia Cercado.

Comunidades: Temporal, San Jacinto, Turumayo, Guerrahuaico, San Andres y Bella Vista.

Barrios: San Luis, Guadalquivir, San Mateo, Obrajes, Los Chapacos, Lourdes, Fray Quebracho, Bartolome Attard, San Blass, San Antonio, Catedral, Alto Senac, Medinacelli y Parrales.

Provincia Méndez.

Comunidades: Sella Méndez, San Lorenzo, El Rancho y Tomatitas.

Provincia Aviles.

Comunidades: Juntas, Chocloca y La Pintada.

Provincia Arce.

Comunidades: Camacho y Chaguaya.

Provincia O'connor.

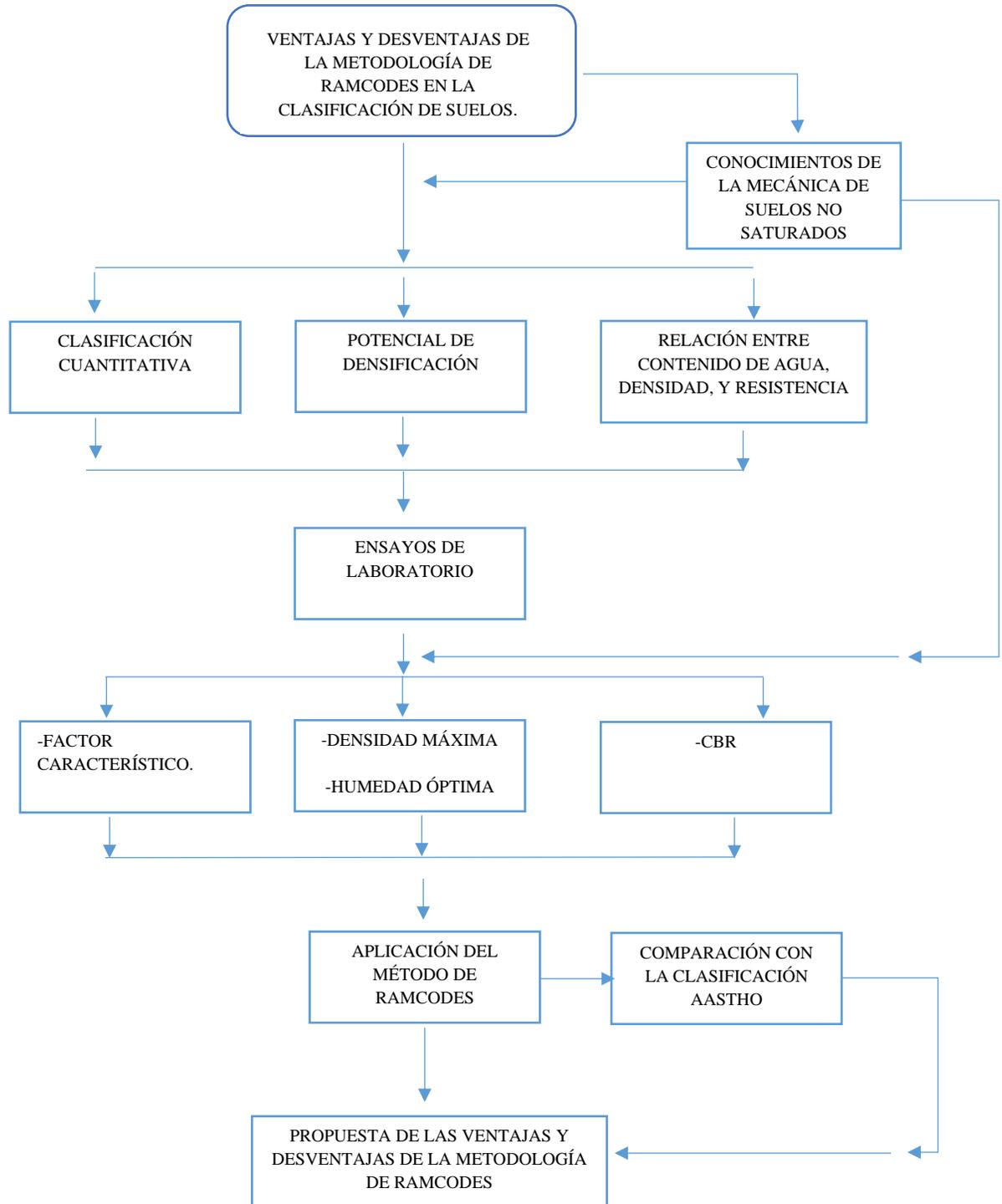
Comunidades: Narváez y San Diego.

Estos lugares fueron elegidos por presentar suelos con características granulares y los cuales fueron analizados para el presente proyecto de investigación.

La ubicación exacta en coordenadas geográficas de cada punto de extracción se indica en el punto 3.2.

1.9. Métodos y procedimientos lógicos

1.9.1. Esquema de actividades en función al procedimiento definido por la perspectiva.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Clasificación e identificación de suelos

Es evidente que un sistema de clasificación que pretenda cubrir hoy las necesidades correspondientes, debe de estar basado en las propiedades mecánicas de los suelos, por ser estas lo fundamental para las aplicaciones ingenieriles.

Dada la complejidad y prácticamente la infinita variedad con que los suelos se presentan en la naturaleza, cualquier intento de sistematización científica, debe ir precedido por otro de clasificación completa.

La clasificación de suelos es una categorización sistemática de suelos basado en características distintivas y en criterios de uso. Una clasificación de suelos es muy dinámica, en sí mismo de la estructura del sistema, a las definiciones de clases, y finalmente en la aplicación a campo.

Si bien las diferencias en la significancia de los desarrollos morfológicos a los varios usos del suelo que afectan la aproximación a la clasificación, en un sistema bien construido, los criterios clasificatorios similares de grupo hacen que las interpretaciones no varíen ampliamente. La aplicación exitosa al campo es un desafío, ya que hay naturaleza compleja en la formación de los suelos, y la opacidad inherente de los recursos edáficos.

"El propósito de cualquier clasificación es ser capaz de organizar el conocimiento de tal modo de que las propiedades de los objetos puedan ser recordados y sus relaciones entendidas más fácilmente para un objetivo específico. El proceso de formación de clases por agrupamiento de objetos se hace sobre la base de sus propiedades comunes. En cualquier sistema de clasificación, lo más trascendente no es acerca de cuál es el número más grande, sino que sean más precisos, y se puedan deducir más conclusiones importantes de los objetivos y así sirvan de mejor manera al propósito clasificatorio."

2.1.1. Sistema de Clasificación AASTHO.

AASTHO, es la denominación al sistema de clasificación de suelos determinado y confeccionado por el Departamento de Caminos Públicos de USA (Bureau of Public Roads) que en sus inicios (Año 1929), era denominado AASHO. Este sistema es básicamente un sistema de clasificación de los diferentes tipos de suelos en 7 grupos, cada uno de estos grupos está determinado por ensayos de laboratorio, granulometría, límite líquido e índice de plasticidad. Estos ensayos determinan el “índice de grupo”, número que clasifica a cada suelo el que está determinado por la siguiente formula empírica.

$$IG = (F_{200} - 35)(0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0.01(F_{200} - 15)(IP - 10) \quad \text{Ecu.1}$$

Dónde:

IG = Índice de grupo adimensional.

F_{200} = Porcentaje que pasa por el tamiz N°200, expresado en números enteros.

LL = Límite Líquido, expresado en porcentaje (%).

IP = Índice de Plasticidad, expresado en porcentaje (%).

Al calcular el índice de grupo para un suelo de los grupos A-2-6 o A-2-7, usé solo la ecuación de índice de grupo parcial relativa al índice de plasticidad:

$$IG = 0.01(F_{200} - 15)(IP - 10) \quad \text{Ecu.2}$$

Dónde:

IG = Índice de grupo adimensional.

F_{200} = Porcentaje que pasa por el tamiz N°200, expresado en números enteros.

IP = Índice de Plasticidad, expresado en porcentaje (%)

*Se informa en números enteros y si es negativo se informa igual a 0.

Este tipo de clasificación es más usada para definir calidad de suelos empleados para la confección de terraplenes, material de sub-rasante, sub-bases y bases. Luego de obtenido el “Índice de Grupo” con la formula anterior, se ingresa a la tabla 2 para determinar a qué grupo pertenece el suelo.

Esta clasificación divide los suelos en dos clases; una formada por los suelos granulares y otra constituida por los suelos de granulometría fina.

SUELOS GRANULARES

Son aquellos que tienen 35% o menos, del material fino que pasa el tamiz N°200. Estos suelos forman los grupos **A-1**, **A-2** y **A-3**.

Grupo A-1: Comprende las mezclas bien graduadas, compuestas de fragmentos de piedra, grava, arena y material ligante poco plástico. Se incluyen también aquellas mezclas bien graduadas que no tienen material ligante.

Subgrupo A-1-a: Comprende aquellos materiales formados predominantemente por piedra o grava, con o sin material ligante bien graduado.

Subgrupo A-1-b: Comprende aquellos materiales formados predominantemente por arena gruesa y con, o sin, material ligante bien graduado.

Grupo A-2: Incluye una gran variedad de material granular que contiene menos del 35% de material fino.

Subgrupos A-2-4 y A-2-5: Pertenecen a estos subgrupos aquellos materiales cuyo contenido de material fino es igual o menor del 35 % y cuya fracción que pasa el tamiz N°40 tiene las mismas características de los suelos A-4 y A-5, respectivamente.

Estos grupos incluyen aquellos suelos gravosos y arenosos (arena gruesa), que tengan un contenido de limo, o índices de Grupo en exceso a los indicados para el grupo A-1. Asimismo, incluyen aquellas arenas finas con un contenido de limo no plástico en exceso al indicado para el grupo A-3.

Sub grupos A-2-6 y A-2-7: Los materiales de estos subgrupos son semejantes a los anteriores, pero la fracción que pasa el tamiz N°40 tiene las mismas características de los suelos A-6 y A-7, respectivamente.

Grupo A -3: En este grupo se hallan incluidas las arenas finas de playa y las arenas finas con poca cantidad de limo que no tengan plasticidad. Este grupo incluye, además, las arenas de río que contengan poca grava y arena gruesa.

SUELO FINOS

Contienen más del **35%** del material fino que **pasa** el tamiz N°200.

Estos suelos constituyen los grupos **A-4, A-5, A-6 y A-7.**

Grupo A-4: Pertenecen a este grupo los suelos limosos poco o nada plásticos, que tienen un 75% o más del material fino que pasa el tamiz N°200. Además, se incluyen en este grupo las mezclas de limo con grava y arena hasta en un 64%.

Grupo A-5: Los suelos comprendidos en este grupo son semejantes a los del grupo anterior, pero contienen material micáceo o diatomáceo. Son elásticos y tienen un límite líquido elevado.

Grupo A-6: El material típico de este grupo es la arcilla plástica por lo menos el 75% de estos suelos debe pasar el tamiz N°200, pero se incluyen también las mezclas arcillo-arenosas cuyo porcentaje de arena y grava sea inferior al 64%

Los materiales de este grupo presentan, generalmente, grandes cambios de volumen entre los estados seco y húmedo.

Grupo A-7: Los suelos de este grupo son semejantes a los del grupo A-6, pero son elásticos. Sus límites líquidos son elevados.

Subgrupo A-7-5: Incluyen aquellos materiales cuyos índices de plasticidad no son muy altos con respecto a sus límites líquidos.

Subgrupo A-7-6: Incluye aquellos suelos cuyos índices de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos y que, además, experimentan cambios de volumen muy grandes entre sus estados "seco" y "húmedo".

Tabla 2. Clasificación del suelo según AASHTO.

Clasificación general	Materiales granulares (igual o menor del 35% pasa el tamiz N°200)							Materiales limo - arcillosos (más del 35% que pasa el tamiz N°200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
sub-grupos	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7-6
% que pasa el Tamiz:											
N°10	50 máx.										
N°40	30 máx.	50 máx.	51 máx.								
N°200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características del material que pasa el tamiz N°40											
Límite líquido			0	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de plasticidad	6 máx.	6 máx.		10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.
Índice de grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Tipos de material	Fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava, arenas limosas y arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Terreno de fundación	Excelente a bueno					Regular		Regular a malo			
*Si $IP \leq LL-30$, es un A-7-5											
*Si $IP > LL-30$, es un A-7-6											

Fuente: Principio de Ingeniería de Cimentaciones Braja M. Das.

2.1.2. Sistema de Clasificación SUCS.

El Sistema Unificado de Clasificación de suelos fue originalmente propuesto por A. Casagrande en 1942 y después revisado y adoptado por el Bureau of Reclamation de Estados Unidos y por el Cuerpo de Ingenieros. Este sistema se usa en prácticamente todo trabajo de geotecnia.

En el sistema Unificado, los siguientes símbolos se usan como identificación.

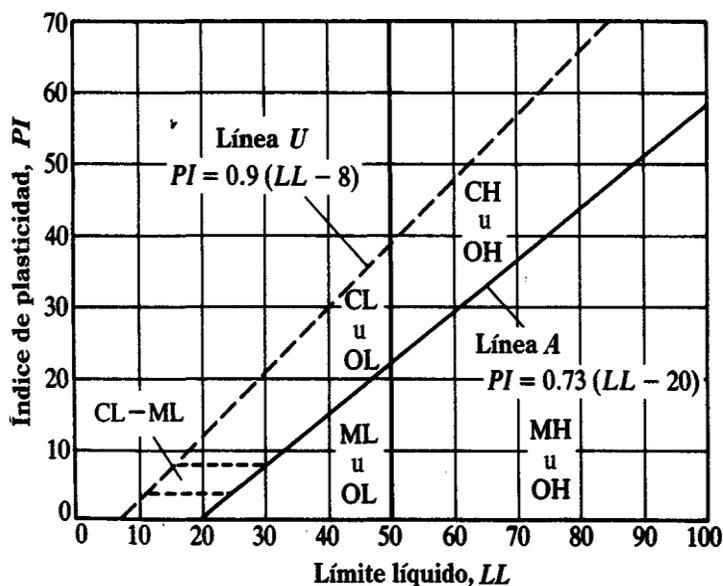
Tabla 3. Simbología del sistema unificado.

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

Fuente: Principio de Ingeniería de Cimentaciones Braja M. Das.

La carta de plasticidad fig. 1 y la fig. 2 muestran el procedimiento para determinar los símbolos de grupo para varios tipos de suelos.

Figura 1. Carta de Plasticidad.



Fuente: Principio de Ingeniería de Cimentaciones Braja M. Das.

Figura 2. Símbolos de grupos para suelos según el Sistema Unificado de Clasificación (Basado en material que pasa la malla de 3pulg. (75 mm)).

División principal	Criterios	Símbolo de grupo
Suelo de grano grueso, $R_{200} > 50$ Suelo con grava, $R_4 > 0.5R_{200}$	$F_{200} < 5, C_u \geq 4, 1 \leq C_z \leq 3$	GW
	$F_{200} < 5, C_u < 4$ y/o C_z no entre 1 y 3	GP
	$F_{200} > 12, PI < 4$, o límites de Atterberg debajo de la línea A (figura 1.7)	GM
	$F_{200} > 12, PI > 7$, y límites de Atterberg en o arriba de la línea A (figura 1.7)	GC
	$F_{200} > 12, LL < 50, 4 \leq PI \leq 7$, y límites de Atterberg en o arriba de la línea A	GC-GM ^a
	$5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de graduación de GW y los criterios de plasticidad de GM	GW-GM ^a
	$5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de graduación de GW y los criterios de plasticidad de GC	GW-GC ^a
	$5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de graduación de GP y los criterios de plasticidad de GM	GP-GM ^a
	$5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de graduación de GP y los criterios de plasticidad de GC	GP-GC ^a
	Suelo arenoso, $R_4 \leq 0.5R_{200}$	$F_{200} < 5, C_u \geq 6, 1 \leq C_z \leq 3$
$F_{200} < 5, C_u < 6$, y/o C_z no entre 1 y 3		SP
$F_{200} > 12, PI < 4$, o límites de Atterberg debajo de la línea A (figura 1.7)		SM
$F_{200} > 12, PI > 7$, y límites de Atterberg sobre o arriba de la línea A (figura 1.7)		SC
$F_{200} > 12, LL > 50, 4 \leq PI \leq 7$, y límites de Atterberg sobre o arriba de la línea A (figura 1.7)		SC-SM ^a
$5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de graduación de SW y los criterios de plasticidad de SM		SW-SM ^a
$5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de graduación de SW y los criterios de plasticidad de SC		SW-SC ^a
$5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de graduación de SP y los criterios de plasticidad de SM		SP-SM ^a
$5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de graduación de SP y los criterios de plasticidad de SC		SP-SC ^a
Suelo de grano fino (inorgánico), $R_{200} \leq 50$		$PI < 4$, o límites de Atterberg debajo de la línea A (figura 1.7)
	$PI > 7$, y límites de Atterberg sobre o arriba de la línea A (figura 1.7)	CL
	$4 \leq PI \leq 7$, y límites de Atterberg arriba de la línea A (figura 1.7)	CL-ML ^a
	Límites de Atterberg debajo de la línea A (figura 1.7)	MH
Suelo limoso y arcilloso, $LL \geq 50$	Límites de Atterberg en o arriba de la línea A (figura 1.7)	CH
Suelo de grano fino (orgánico)		
Limo orgánico y arcilla, $LL < 50$	$\frac{LL_{\text{no secado en horno}}}{LL_{\text{secado en horno}}} < 0.75$	OL
Limo orgánico y arcilla, $LL \geq 50$	$\frac{LL_{\text{no secado en horno}}}{LL_{\text{secado en horno}}} < 0.75$	OH

Nota: F_{200} = por ciento que pasa la malla no. 200; R_{200} = por ciento retenido en la malla no. 200; R_4 = por ciento retenido en la malla no. 4; C_u = coeficiente de uniformidad; C_z = coeficiente de graduación; LL = límite líquido; PI = índice de plasticidad; límites de Atterberg basados en la fracción menos no. 40.

^a Caso en la frontera; clasificación doble.

Fuente: Principio de Ingeniería de Cimentaciones Braja M. Das.

2.1.3. Tamaño efectivo, coeficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura.

Las curvas granulométricas se usan para comparar diferentes suelos. Además, tres parámetros básicos del suelo se determinan con esas curvas que se usan para clasificar los suelos granulares. Los tres parámetros del suelo son:

Diámetro efectivo.

Coeficiente de uniformidad.

Coeficiente de curvatura.

El diámetro en la curva de distribución del tamaño de las partículas correspondiente al 10% de finos se define como diámetro efectivo o D_{10} . El coeficiente de uniformidad está dado por la relación:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Ecu.3}$$

Dónde:

C_u = Coeficiente de uniformidad.

D_{60} = Diámetro correspondiente al 60% de finos en la curva de distribución granulométrica.

El coeficiente de curvatura se expresa como:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}} \quad \text{Ecu.4}$$

Dónde:

C_c = Coeficiente de curvatura.

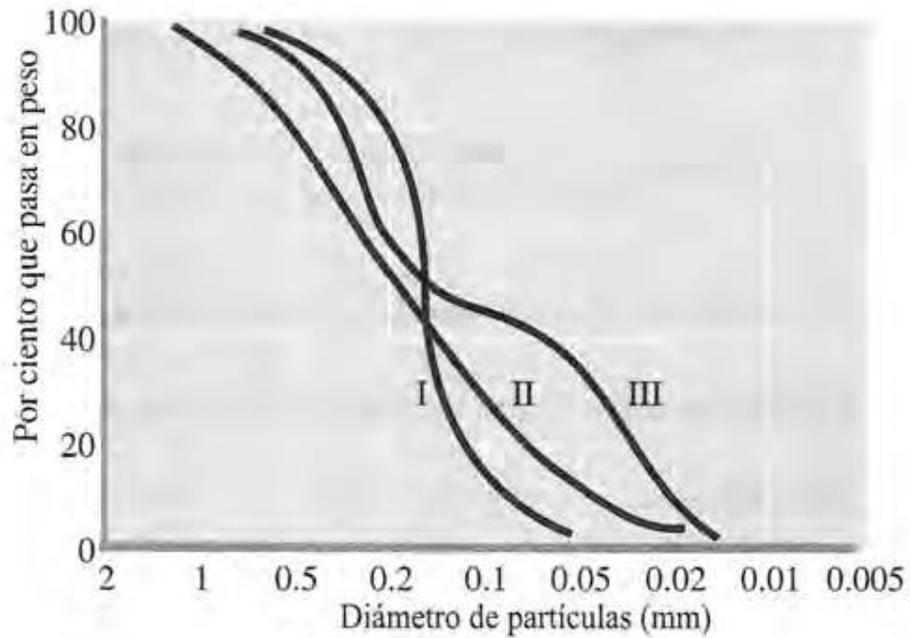
D_{30} = Diámetro correspondiente al 30% de finos.

La curva de distribución granulométrica muestra no sólo el rango de los tamaños de partículas presentes en un suelo, sino también la distribución de varios tamaños de partículas. La curva I representa un tipo de suelo en el que la mayoría de los granos son del mismo tamaño, y se la llama suelo mal graduado. La curva II representa un suelo en

el que los tamaños de las partículas están distribuidos sobre un amplio rango y se le llama bien graduado. Un suelo bien graduado tiene un coeficiente de uniformidad mayor de aproximadamente 4 para gravas y 6 para arenas, y un coeficiente de curvatura entre 1 y 3 (para gravas y arenas).

Un suelo puede tener una combinación de dos o más fracciones uniformemente graduadas. La curva III representa tal suelo y se la llama de granulometría discontinua.

Figura 3. Curvas Granulométricas



Fuente: Principio de Ingeniería de Cimentaciones Braja M. Das

2.2. RAMCODES.

RAMCODES es un acrónimo por el nombre en inglés Rational Methodology for Compacted geomaterial's Density and Strength analysis. Esta metodología ha sido desarrollada por F.J. Sánchez-Leal desde 1998 en siete fases. La fase uno está dedicada por una parte, a la clasificación de geomateriales (i.e. suelos, mezclas asfálticas); se desarrolló un nuevo sistema de clasificación por medio de un factor característico basado en una escala cuantitativa, y por otra, a la determinación del potencial de densificación, referido al factor característico (Sánchez-Leal, F.J., 2000, y 2002).

La fase dos trata sobre el estudio de la relación humedad, densidad, y resistencia (i.e. CBR) en suelos compactados (Sánchez-Leal, 2002b). La fase tres, programada para el análisis de resistencia con equipo sofisticado, y cuatro, programada para el estudio de cambio volumétrico bajo hidratación, todavía no han sido desarrolladas. La fase cinco está dedicada al análisis de mezclas asfálticas y está ayudando ahora a enfrentar la significativa incongruencia entre el diseño y los controles de compactación establecidos por los métodos tradicionales de diseño y control (Sánchez-Leal, F.J., 2002). Finalmente, se está trabajando actualmente en las fases seis, dedicada al desarrollo de un software para facilitar la implementación de RAMCODES, y siete, dedicada al desarrollo de una metodología estadística de control de calidad.

El objetivo de RAMCODES es el de establecer un puente confiable entre la teoría y la práctica en el proceso de diseño y control de colocación de geomateriales compactados.

RAMCODES en suelos compactados

2.2.1. Clasificación cuantitativa

La clasificación cuantitativa es uno de los pilares fundamentales de la metodología RAMCODES. La misma consiste en resumir en un solo valor las características índices del suelo que más significativamente afectan su comportamiento; estas características, según Sánchez-Leal, son la proporción granulométrica y la superficie específica de la parte fina.

La clasificación cuantitativa aventaja a la tradicional clasificación descriptiva o cualitativa (i.e. SUCS, HRB) en que aquella permite asociar la tipificación de los materiales a una escala continua, donde en teoría, para una misma región u origen geológico, cada valor en esa escala representa a un material con las mismas propiedades y respuestas. Las consecuencias inmediatas de esta afirmación es que por una parte se puede evaluar la variabilidad de las propiedades y respuestas del material a partir de sus características físico-mecánicas, y por otra, se pueden tener varios estudios de propiedades y respuestas para distintas clases de material, con lo que se tendría un banco de datos utilísimo en la anticipación de comportamientos y en la selección de materiales.

Para realizar la clasificación cuantitativa, el autor propuso (Sánchez-Leal, F.J., 2000, 2002) el factor característico, F_p , definido como el producto lineal de la proporción granulométrica entre finos y gruesos, y el límite líquido, este último como una medida de la superficie específica de los finos. La expresión propuesta es la siguiente:

Ecuación propuesta para el factor característico de RAMCODES

$$F_p = (1 + W_L) * \frac{F}{1 + G} \quad \text{Ecu.5}$$

Donde:

W_L = Es el límite líquido del material, en decimal

F = Es la fracción que pasa el tamiz N°200, en decimal, y

G = Es la fracción retenida en el tamiz N°4, en decimal.

El factor característico F_p está asociado a la clasificación descriptiva según la:

Figura 4. Valores de F_p

F_p relacionado con la clasificación descriptiva (Sánchez-Leal, F.J., 2002a)

Tipo	Rango de F_p	Clasificación
RS1	0.0-0.2	Gravas limosas y arcillosas
RS2	0.2-0.5	Arenas limosas y arcillosas con grava
RS3	0.5-0.7	Arenas limosas y arcillosas
RS4	0.7-1.4	Arcillas ligeras limosas y arenosas
RS5	>1.4	Arcillas francas
RS1*	0.0-0.2	Arenas limpias
RS2*	0.0-0.2	Arenas sin grava

Fuente: Sánchez-Leal "Manual de RAMCODES"

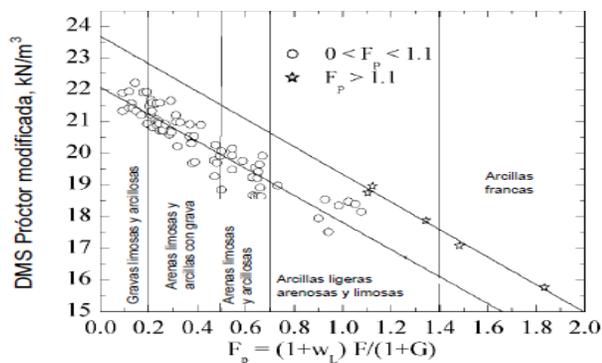
Nota: RS1* y RS2* son suelos sin grava. A pesar de que sus valores de F_p coinciden con los tipos RS1 y RS2, respectivamente, aquellos se comportan de una manera diferente.

2.2.2. Potencial de densificación

El potencial de densificación de un material de suelo se obtiene a partir de la relación entre el contenido de agua y el valor de la densidad seca alcanzada bajo una misma energía y método de compactación desarrollada en un ensayo de laboratorio. Los parámetros de referencia del potencial de densificación son típicamente la densidad máxima seca (DMS), su contenido de agua asociado, llamado óptimo (CAO), así como la forma de la curva que describe dicha relación (*i.e.* curva de compactación).

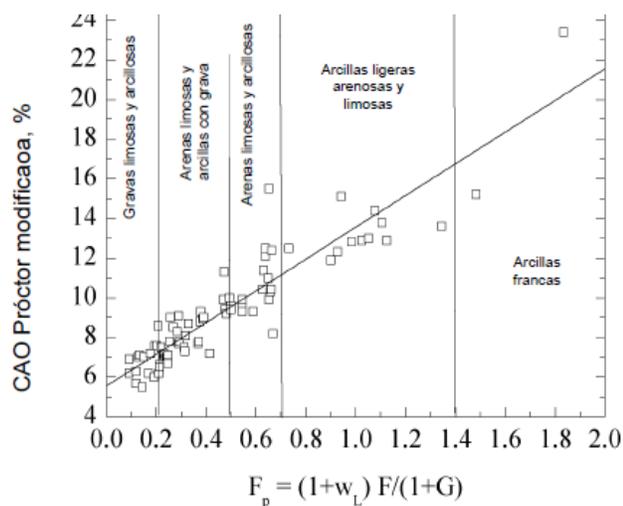
En el libro “RAMCODES: metodología racional para el análisis de densificación y resistencia de geomateriales compactados” se hace referencia a varios investigadores, entre ellos Murphy (1950), Krebs y Walker (1971), Inglés (1974), Al-Khafaji (1970a, b, 1993), y Saha y Chattoparthyay (1988), que usaron los límites líquido y plástico para correlacionar DMS y CAO con materiales en diversas localidades tales como USA, India e Irak. Estos autores presentaron gráficos elaborados para obtener los parámetros del ensayo Proctor por medio de relaciones empíricas asociadas a cada locación. Sin embargo, no es sino hasta recientemente cuando el autor (Sánchez-Leal, F.J., 2000a, 2002a), a través del uso del factor característico F_p obtiene unas sencillas correlaciones lineales con los mencionados parámetros. Las Figuras 5 y 6 Muestran tales relaciones para 84 muestras de suelo de la región geológica Mesa de Guanipa, en el oriente venezolano.

Figura 5. Variación de la DMS del Proctor Modificado vs. F_p . (Sánchez-Leal, F.J., 2002)



Fuente: Sánchez-Leal “Manual de RAMCODES”

**Figura 6. Variación de la DMS del Proctor Modificado vs. Fp.
(Sánchez- Leal, F.J., 2002)**



Fuente: Sánchez-Leal “Manual de RAMCODES”

La Ecuación 6. Describe la relación entre DMS y Fp; la figura 7 resume los estadísticos obtenidos.

$$DMS = (A + B * Fp)/9.81 \quad \text{Ecu.6}$$

Donde:

DMS = Densidad máxima seca en g/cm³

Fp = Factor característico, adimensional

A y B = Variables constantes de la ecuación

Figura 7. Estadísticos de correlación para Fp vs. DMS. (Sánchez-Leal, F. J., 2002)

Rango para F _p	0.0-1.1	>1.1
A	22.07	23.68
B	-4.26	-4.35
n	79	5
r ²	0.869	0.988
SD	0.43	0.16

Fuente: Sánchez-Leal “Manual de RAMCODES”

Donde:

n = Es el número de datos considerados.

r = Es el factor de correlación.

SD = Es la desviación estándar para DMS en g/cm^3 .

La Ecuación 7, por su parte, establece la relación entre CAO y F_p obtenida por medio de un ajuste de mínimos cuadrados. Los estadísticos son los siguientes: $C=5.57$, $D=7.99$, $r=0.908$, y $SD=1.03\%$.

$$\text{CAO} = C + D * F_p \quad \text{Ecu.7}$$

Donde:

CAO = Contenido de agua óptimo en %

F_p = Factor característico, adimensional

C y D = Variables constantes de la ecuación

Los estadísticos para las ecuaciones 6 y 7 describen la variabilidad de los parámetros de densificación de un mismo material. En el caso de la DMS, el rango más probable es de $\pm 0.65 \text{ g/cm}^3$ ($=1.5*0.43$) el valor estimado por la Ecu. 6.

Por otra parte, en el caso del CAO, el rango más probable es de $\pm 1.5\%$ ($=1.5*1.03$) el valor estimado por la Ecuación 7. Estos niveles de variabilidad tan significativos son la causa de que, con la implementación de las especificaciones típicas de compactación referidas a un porcentaje de la DMS de laboratorio, se susciten grandes controversias entre inspectores y ejecutores.

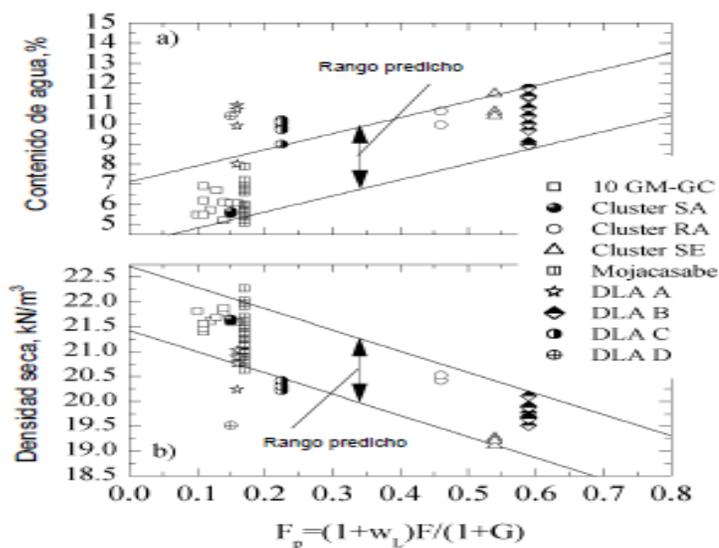
El potencial de densificación obtenido en laboratorio correlaciona estrechamente con la densificación obtenida en campo por medio de la compactación con equipo pesado de compactación; el siguiente ejemplo, tomado de Sánchez-Leal (2002) ilustra esta afirmación ya comprobada por investigadores como Turnbull y Foster (1956).

Durante la construcción de las instalaciones del proyecto petrolero Sincor Upstream, ubicado en San Diego de Cabrutica, Estado Anzoátegui, Venezuela, se usaron materiales típicos de la región geológica Mesa de Guanipa para la construcción de carreteras y rellenos. El material de suelo se compactó en capas con espesor variable entre 0.20 y 0.30 m. por medio de equipo pesado de compactación (i.e. vibrocompactadores y rodillos “pata de cabra”, ambos de 6 a 8 toneladas de peso). Se dieron entre dos y tres ciclos de compactación por cada capa. Se tomaron datos de campo (i.e. densidad seca y contenido

de agua) en varios lotes terminados usando densímetros nucleares calibrados localmente (Sánchez-Leal, 1998). Adicionalmente, se tomaron muestras representativas de suelo de cada lote y se llevaron a laboratorio para la determinación de sus propiedades índices. El F_p de las muestras estudiadas varió en el rango 0.10-0.80.

Los datos para contenido de agua y densidad seca se representaron en las Figuras 8 Respectivamente. Adicionalmente, se representaron los ajustes descritos en las ecuaciones 6, para DMS, y 7, para CAO, como franjas de variación con amplitud $\pm 1.5 \cdot SD$. SD es 0.43 g/cm^3 para DMS, y 1.03% para CAO. Obsérvese en estas figuras cómo los datos de campo verifican con los intervalos predichos por las correlaciones a partir de la información de laboratorio.

Figura 8. Datos de campo versus el rango de variación predicho para; a) contenido de agua, b) densidad seca (Sánchez-Leal, 2002.)

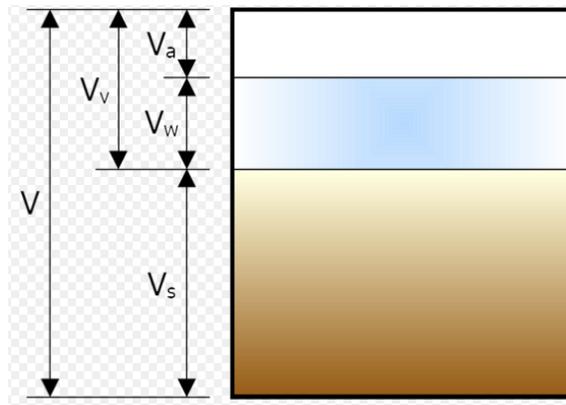


Fuente: Sánchez-Leal "Manual de RAMCODES"

2.3. Contenido de humedad.

El contenido de agua o contenido de humedad es la cantidad de agua contenida en un material, tal como en el suelo (la humedad del suelo), las rocas, la cerámica o la madera medida en base a análisis volumétricos o gravimétricos. Esta propiedad se utiliza en una amplia gama de áreas científicas y técnicas y se expresa como una proporción que puede ir de 0 (completamente seca) hasta el valor de la porosidad de los materiales en el punto de saturación.

Figura 9. Representación de volúmenes de suelo



Fuente: Fundamentos de la mecánica de suelos Juárez B.-Rico R.

Dónde:

V_w = Es el volumen de agua.

V_a = Es el volumen del aire.

V_s = Es el volumen del suelo.

V_v = Es el volumen de vacíos.

$V_T = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a$: Es el volumen total (que es $V_{\text{suelo}} + V_{\text{agua}} + V_{\text{espacio vacío}}$).

2.4. Límites de consistencia.

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido de agua. Así un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. La arcilla, por ejemplo al agregarle agua, pasa gradualmente del estado sólido al estado plástico y finalmente al estado líquido. El contenido de agua con que se produce el cambio de estado 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), es decir, la propiedad que presenta los suelos hasta cierto límite sin romperse. El método usado para medir estos límites de humedad fue ideado por Atterberg a principios de siglo a través de dos ensayos que definen los límites del estado plástico. Los límites de Atterberg son propiedades índices de los suelos, con que se definen la plasticidad y se utilizan en la identificación y clasificación de un suelo.

2.4.1 Límite líquido.

El límite de liquidez se define como el contenido en agua del terreno en correspondencia del cual, el surco practicado en la muestra se cierra en un tramo de 12 mm después de una secuencia de 25 golpes. Para la determinación de este límite se utiliza la cuchara de Casagrande. El instrumento está compuesto de un casquete esférico de metal, fijado en el borde a un dispositivo que mediante la operación de una manivela se produce la elevación del casquete y su subsecuente caída, produciendo así un choque controlado contra una base también metálica. El terreno mezclado uniformemente con agua es colocado en la parte del casquete metálico opuesta al punto fijo y se le da forma con una plantilla que deja en el centro una ranura uniforme. A cada vuelta de la manivela se produce un golpe en el casquete, que tiende a hacer deslizar el suelo ya húmedo juntando los bordes de la ranura.

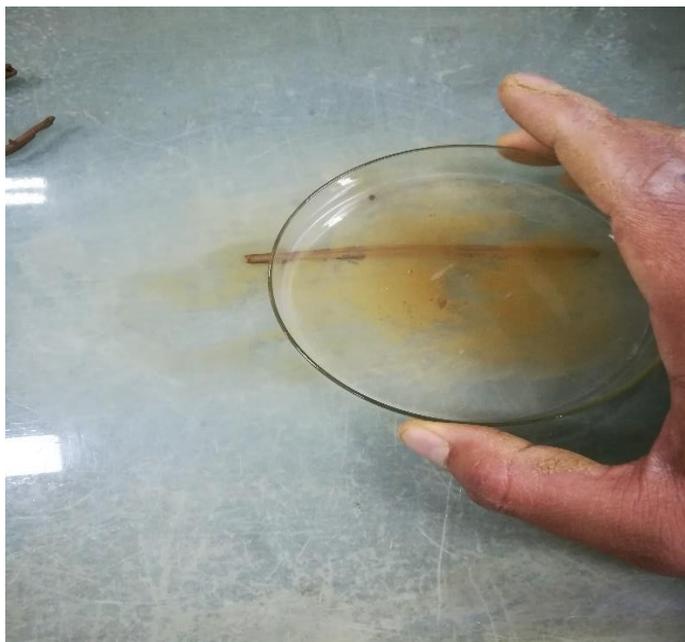
Figura 10. Aparato de Casagrande

Fuente: Elaboración propia

2.4.2 Límite plástico

Esta propiedad se mide en laboratorio mediante un procedimiento normalizado pero sencillo consistente en medir el contenido de humedad para el cual no es posible moldear un cilindro de suelo, con un diámetro de 3 mm. Para esto, se realiza una mezcla de agua y suelo, la cual se amasa entre los dedos o entre el dedo índice y una superficie inerte (vidrio), hasta conseguir un cilindro de 3 mm de diámetro. Al llegar a este diámetro, se desarma el cilindro, y vuelve a amasarse hasta lograr nuevamente un cilindro de 3 mm. Esto se realiza consecutivamente hasta que no es posible obtener el cilindro de la dimensión deseada. Con ese contenido de humedad, el suelo se vuelve quebradizo (por pérdida de humedad) o se vuelve pulverulento. Se mide el contenido de humedad, el cual corresponde al Límite Plástico. Se recomienda realizar este procedimiento al menos 3 veces para disminuir los errores de interpretación o medición.

Figura 11. Rodillos de obtención de Límite



Fuente: Elaboración propia

2.4.3 Índice de plasticidad

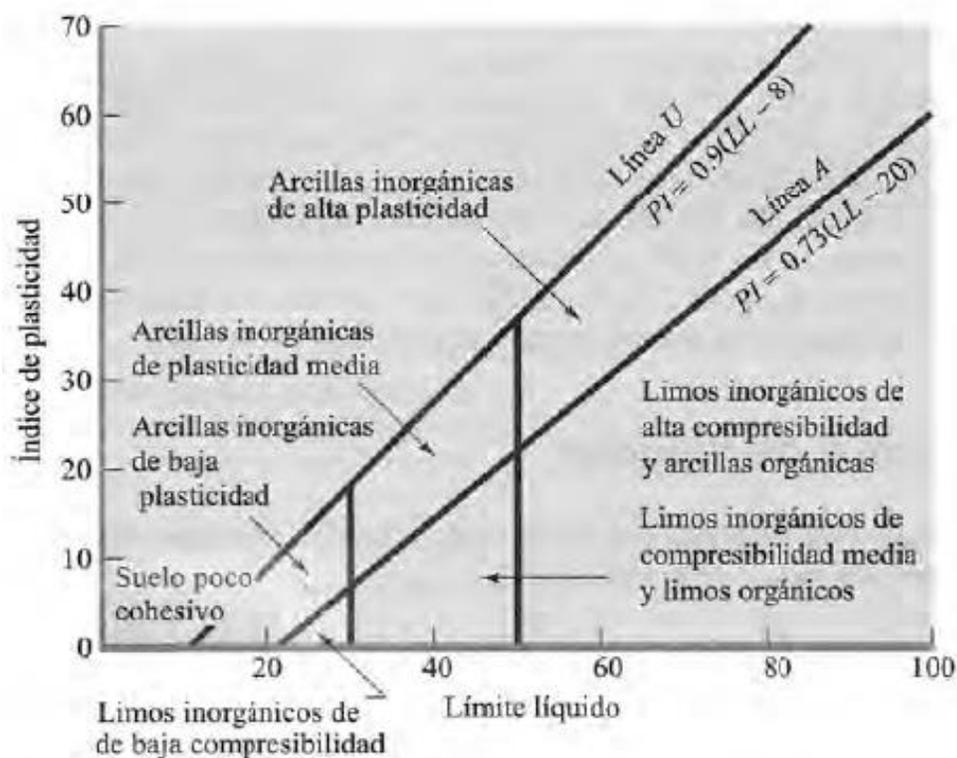
El índice de plasticidad (IP) es el rango de humedades en el que el suelo tiene un comportamiento plástico. Por definición, es la diferencia entre el Límite líquido y el Límite plástico.

$$IP = LL - LP \quad \text{Ecu.8}$$

2.4.4 Carta de plasticidad

Los límites líquido y plástico son determinados por medio de pruebas de laboratorio relativamente simples que proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos cohesivos. Las pruebas son usadas ampliamente por ingenieros para correlacionar varios parámetros físicos del suelo así como para la identificación del mismo.

Figura 12. Carta de Plasticidad (Descripción)



Fuente: Principio de Ingeniería de Cimentaciones Braja M. Das

Casagrande (1932) estudio la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido de una amplia variedad de suelos naturales. Con base en los resultados de pruebas, propuso una carta de plasticidad, donde se diferencian arcillas y limos orgánicos e inorgánicos, con plasticidad y compresibilidad variable.

2.5. Estudios granulométricos.

Los granos que conforman en suelo y tienen diferente tamaño, van desde los grandes que son los que se pueden tomar fácilmente con las manos, hasta los granos pequeños, los que no se pueden ver con un microscopio. El análisis granulométrico al cuál se somete un suelo es de mucha ayuda para la ejecución de proyectos, tanto estructuras como carreteras porque con este se puede conocer la permeabilidad y la cohesión del suelo. También el suelo analizado puede ser usado en mezclas de asfalto o concreto. Los análisis granulométricos se realizarán mediante ensayos en el laboratorio con tamices de diferente tamaño de aberturas, dependiendo de la separación de los cuadros de la malla. Los granos

que pasen o se queden en el tamiz N°200 tienen sus características ya determinadas. Para el ensayo o el análisis de granos gruesos será muy recomendado el método del tamiz; pero cuando se trata de granos finos este no es muy preciso, porque se le es más difícil a la muestra pasar por una malla tan fina; debido a esto para el análisis granulométrico de granos finos se debe utilizar otro método, como el Hidrómetro.

2.5.1 Curva granulométrica

Los resultados del análisis mecánico (análisis por cribado e hidrométrico) se presentan generalmente en gráficas semilogarítmicas como curvas de distribución granulométrica (o de tamaño de grano).

Los diámetros de las partículas se grafican en escala logarítmica y el porcentaje correspondiente de finos en escala aritmética. Por ejemplo, las curvas de distribución granulométrica para dos suelos se muestran en la siguiente figura 13. La curva de distribución granulométrica para el suelo A es la combinación de los resultados del análisis por cribado, y los resultados del análisis hidrométrico para la fracción de finos.

Cuando los resultados del análisis por cribado y del análisis hidrométrico se combinan, generalmente ocurre una discontinuidad en el rango en que estos se traslapan. La razón para la discontinuidad es que las partículas de suelo son generalmente irregulares en su forma. El análisis por cribado da la dimensión intermedia de una partícula; el análisis hidrométrico da el diámetro de una esfera que se asentaría a la misma razón que la partícula de suelo.

Los porcentajes de grava, arena, limo y arcilla presentes en un suelo se obtienen de la curva de distribución granulométrica. De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el suelo A en la figura 13 tiene los siguientes porcentajes:

Grava (límite de tamaño: mayores que 4.75 mm) = 0%

Arena (límites de tamaño: 4.75 a 0.075 mm)= porcentaje de más finos que 4.75 mm de diámetro-porcentaje de más finos que 0.075 mm de diámetro= 100-62= 38%

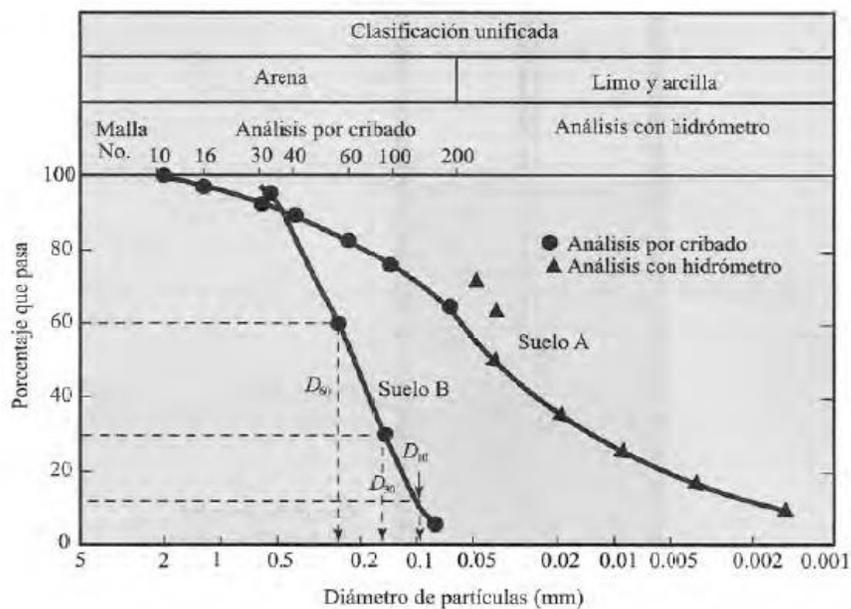
Limo y arcilla (límites de tamaño: menores que 0.075mm) =38%

Tabla 4. Límites de tamaños para suelos

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT)	>2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	<0.002
Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)	>2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	<0.002
Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales (AASTHO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	<0.002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (U.S. bureau of Reclamation)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	finos (es decir Limos y Arcillas)>0.075	

Fuente: Principios de Ingeniería de Cimentaciones Braja M Das

Figura 13. Diámetros Efectivos



Fuente: Principio de Ingeniería de Cimentaciones Braja M. Das

2.6. Compactación de suelos

En la construcción de terraplenes para carreteras, presas de tierra y muchas otras estructuras de ingeniería, los suelos sueltos deben ser compactados para incrementar sus pesos específicos.

La compactación incrementa las características de resistencia de los suelos, aumentando así la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos. La compactación disminuye también la cantidad de asentamientos indeseables de las estructuras e incrementa la estabilidad de los taludes de los terraplenes. Los rodillos de ruedas lisas, los rodillos patas de cabra, los rodillos con neumáticos de hule y los rodillos vibratorios se usan principalmente para la densificación de los suelos granulares.

Figura 14. Compactación con maquinaria



Fuente: Elaboración propia

En general, la compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco. Cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, esta actúa como agente ablandador de las partículas del suelo, que hace que se deslicen entre sí y se muevan a una posición de empaque más denso. El peso específico seco después de la compactación se incrementa primero conforme aumenta el contenido de agua.

2.6.1 Compactación en laboratorio

Figura 15. Compactación en laboratorio



Fuente: Elaboración propia

EL objetivo de este ensayo, es el siguiente:

Determinar la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo de un suelo, utilizando el método de compactación adecuado al tipo de suelo ensayado

Descripción de este ensayo:

A partir de 1933, el Ing. R. Proctor dio inicio al estudio racional de la compactación. Este investigador verificó, que un mismo suelo, conforme su contenido de humedad, reacciona de manera diferente a la compactación, alcanzando valores diversos de densidad.

Proctor compactó muestras de suelo en un recipiente cilíndrico, utilizando diferentes contenidos de humedad. Después de compactar la muestra en el cilindro y determinar su densidad, la retiraba del cilindro, la desmenuzaba y aumentaba el agua repitiendo la operación de compactación.

Con los valores de densidad y humedad, obtenidos de la compactación de cada muestra, Proctor pudo trazar la curva de compactación (típica para todos los suelos), que a su vez le permitió encontrar la densidad máxima y la humedad óptima del suelo.

Y es este precisamente este método desarrollado por Proctor, el utilizado actualmente para realizar la compactación de suelos.

La compactación es la operación o procedimiento de estabilización mecánica, cuyo objetivo fundamental es aumentar la densidad del suelo, por medio de una mayor aproximación de sus partículas, lo que se consigue con una disminución del índice de vacíos.

Mediante el proceso de compactación del suelo se persiguen los siguientes objetivos prácticos:

- Aumentar la resistencia a la compresibilidad y al corte.
- Obtener de mayor uniformidad y homogeneidad.
- Conseguir que el suelo sea menos susceptible a las variaciones de humedad.

Ensayo Proctor Stándard T-99

Sirve para determinar la compactación máxima de un terreno en relación con su grado de humedad. Existen dos tipos de ensayo Proctor normalizados; el “Ensayo Proctor Standard”, y el “Ensayo Proctor Modificado”. La diferencia entre ambos estriba en la distinta energía utilizada, debido al mayor peso del pisón y mayor altura de caída en el Proctor modificado. Ambos ensayos determinan la máxima densidad que es posible alcanzar para suelos o áridos, en unas determinadas condiciones de humedad, con la condición de que no tengan excesivo porcentaje de finos, pues la prueba Proctor está limitada a los suelos que pasen totalmente por el tamiz N°4, o que tengan un retenido máximo del 10 % en este tamiz, pero que pase (dicho retenido) totalmente por el tamiz.

3/8”. Cuando el material tenga retenido en el tamiz 3/8” deberá determinarse la humedad óptima y el peso volumétrico seco máximo con la prueba de Proctor Standard.

Actualmente existen muchos métodos para reproducir, al menos teóricamente, en el laboratorio unas condiciones dadas de compactación de campo. Históricamente, el primer método, en el sentido de la técnica actual, es el debido a R. R. Proctor, y es conocida hoy

en día como “Prueba Proctor Standard”. La prueba consiste en compactar el suelo en cuestión en tres capas dentro de un molde de dimensiones y forma determinadas por medio de golpes de un pisón, que se deja caer libremente desde una altura especificada.

Con este procedimiento de compactación Proctor estudió la influencia que ejercía en el proceso el contenido inicial del agua en el suelo, encontrando que tal valor era de vital importancia en la compactación lograda. En efecto observó que a contenidos de humedad crecientes, a partir de valores bajos, se obtenían más altos pesos específicos secos y, por lo tanto, mejores compactaciones del suelo, pero que esa tendencia no se mantenía indefinidamente, sino que la pasar la humedad de un cierto valor, los pesos específicos secos obtenidos disminuían, resultando peores compactaciones. Proctor puso de manifiesto que, para un suelo dado y usando el procedimiento descrito, existe una humedad inicial llamada "óptima", que produce el máximo peso específico seco que puede lograrse con este procedimiento de compactación. Esta prueba consiste en compactar el suelo en tres capas dentro de un molde de dimensiones y forma determinadas, a cada capa se le compacta con 25 golpes por medio de un pistón, que se deja caer libremente desde una altura específica.

Ensayo Proctor Modificado T-180

El ensayo Proctor modificado, al igual que el Proctor normal o Standard, es un ensayo de compactación de suelos. El Corps of Engineers de la U.S. Army propuso un ensayo Proctor modificado en el que se aplica mayor energía de compactación por unidad de volumen, obteniéndose unas densidades secas máximas más elevadas y unas humedades óptimas menores que en el ensayo normal.

Este ensayo en España está normalizado por la NLT-108, que a su vez sigue la norma americana AASHTO 180-74/ASTM D 1557-70.

En el ensayo Proctor modificado se apisona una muestra de suelo en un molde metálico de 2320 cm³ de capacidad (152.5 mm de diámetro interior y 127 mm de altura), es usual utilizar el molde del ensayo CBR, con un disco espaciador en su fondo. El molde se llena en 5 tongadas y se apisona con 60 golpes por tongada, distribuidos por toda la superficie.

La maza utilizada para apisonar tiene una masa de 4.54 kg y cae desde una altura de 457 mm. Con todo esto, la energía de compactación por unidad de volumen es 4.5 veces superior a la del ensayo normal. El ensayo se puede realizar de forma manual o mecánica.

Para obtener la curva humedad-densidad seca, es necesario realizar el ensayo sobre varias muestras del suelo, que nos darán los puntos de dicha curva. Generalmente con cuatro o cinco de estos puntos ya es posible dibujarla, y por tanto, obtener la densidad máxima Proctor y la humedad óptima correspondiente.

Si se comparan los resultados obtenidos en diferentes tipos de suelos, compactados según los ensayos Proctor normal y modificado, se comprueba que en los compactados según este último se obtienen unas densidades secas mayores y unas humedades óptimas menores. Estas diferencias son más acusadas en suelos finos muy plásticos y mucho menor en zahorras bien graduadas, ya que estas últimas tienen una compactibilidad mejor y su densidad alcanza ya valores elevados con niveles de energía de compactación del Proctor normal.

Al igual que en el ensayo normal, si el tamaño máximo del suelo a emplear en obra es superior al que permite el ensayo, es necesario tamizar el suelo previamente y ensayar la fracción fina de este, realizando una corrección posterior. Por este motivo, si el suelo a ensayar contiene elementos de gran tamaño en mayor medida que elementos de pequeño tamaño, la densidad Proctor no sería un buen elemento de comparación y debe sustituirse por otros ensayos que midan directamente la capacidad resistente y la deformabilidad del suelo.

2.6.2 Compactación en campo

Generalmente este tipo de compactación en campo se lo realiza con la ayuda de maquinaria, entendiéndose por compactar la acción de aplicar durante la construcción del relleno, la energía necesaria para producir una disminución apreciable del volumen de huecos del material empleado y por tanto del volumen total del mismo. Diferenciándose de la consolidación, en que esta, aunque también disminuye el volumen de huecos dicha reducción no se consigue durante la ejecución de los terraplenes y otros, sino en el

transcurso de un plazo de tiempo relativamente largo y debido a pérdida de agua intersticial, por efecto de cargas de servicio móviles o fijas, por agentes atmosféricos, etc. La necesidad de compactar apareció no hace aún muchos años debido a la urgencia de utilizar las obras inmediatamente, sin tiempo para que el tráfico o los agentes atmosféricos produjesen los asientos definitivos. Por tanto, los sistemas de compactación se han ido desarrollando paralelamente a la mecanización de las obras, ya que la aplicación de la energía necesaria exige una máquina adecuada en potencia y movilidad, para cada caso.

El problema se presenta porque la energía de compactación necesaria en cada caso no es solamente diferente, sino que también lo es el modo como dicha energía debe ser transmitida al terreno. La energía debe ser transmitida al terreno. Esta es la razón de que existan hoy día en el mercado diferentes tipos de máquinas compactadoras, y como consecuencia, la dificultad inherente de elegir en cada caso el modelo más idóneo. No quiere decir esto, un terraplén con una máquina de un tipo u otro quede mejor o peor compactado. Con cualquier máquina, por poco específica que esta sea, podemos obtener una compactación satisfactoria. Lo que ocurrirá es que se gastará más energía de compactación y como consecuencia lógica más tiempo, más dinero, etc., si no elegimos la máquina adecuada. Por lo tanto el problema más importante en la compactación es elegir la máquina adecuada para cada trabajo. Para dicha elección tenemos hoy día unas ideas generales, consecuencia de ensayos prácticos más o menos guiados por teorías, que nos permiten de entrada y a la vista de las principales características del material a compactar, decidir el tipo de máquinas más idóneo.

Los factores principales que influyen en la capacidad de compactación de los suelos, son la composición granular y el contenido de humedad. Dentro de la composición granular, lo más importante es el tamaño del grano, mucho más incluso que la composición del mismo. El contenido de humedad es el otro factor importante en la compactación. Se determine el valor más favorable mediante el ensayo Proctor, que nos da la relación entre el contenido de humedad y la densidad del terraplén. Así vemos que la densidad seca máxima crece con la energía de compactación.

La humedad óptima depende de la energía utilizada para compactar. El agua al actuar como lubricante de las partículas facilita una mejor imbricación entre ellas, pero si hay exceso de la misma, parte de la energía de compactación se pierde en expulsar el agua, por lo que aparece lógicamente la existencia de un porcentaje óptimo, que es necesario determinar en cada caso. Ahora bien, como la corrección de humedad de un material es difícil y costosa, conviene evitarla, siendo preferible utilizar energías de compactación elevadas que permitan conseguir densidades secas superiores en un campo de humedades más amplio.

Hay de todas formas suelos que presentan más o menos dificultad de compactar. Entre los primeros están los cohesivos en general, los de granulometría uniforme, no cohesivos o débilmente cohesivos, con un coeficiente de desigualdad pequeño, rocas ligeras y rocas pesadas. Entre los suelos fáciles, tenemos las arenas bien graduadas no cohesivas o poco cohesivas a partir de un valor mediano de coeficiente de desigualdad, mezclas de arena y gravillas bien graduadas, no cohesivas o poco cohesivas con iguales coeficientes y, en general, todos los suelos no cohesivos o escasamente cohesivos con relativamente pequeñas desigualdades de grano.

2.7. Resistencia de suelos

La resistencia característica del suelo dentro de un análisis para carreteras, especialmente para conformación del paquete estructural, nos llevan a la realización de dos estudios principales del firme que son el estudio de la capacidad de soporte del suelo (CBR), y la respuesta del mismo al desgaste que sufre a través del tiempo por medio de la máquina de “Los Ángeles”.

2.7.1 Capacidad de Soporte (CBR) de Suelos.

El ensayo de C.B.R. mide la resistencia al corte (esfuerzo cortante) de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, la ASTM denomina a este ensayo, simplemente como “Relación de soporte” y esta normado con el número ASTM D 1883-73.

Figura 16. Equipo para ensayo de



Fuente: Elaboración propia

Se aplica para evaluación de la calidad relativa de suelos de subrasante, algunos materiales de sub-bases y bases granulares, que contengan solamente una pequeña cantidad de material que pasa por el tamiz de 50 mm, y que es retenido en el tamiz de 20 mm. Se recomienda que la fracción no exceda del 20%.

El número CBR se obtiene como la relación de la carga unitaria en Kg/cm^2 (libras por pulgadas cuadrada, (psi)) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón (con un área de 19.4 cm^2) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturada, en ecuación, esto se expresa:

$$CBR = \frac{\text{carga unitaria de ensayo } \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right)}{\text{carga unitaria patrón } \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right)} * 100 = \% \quad \text{Ecu.9}$$

Los valores de carga unitaria que deben utilizarse en la ecuación son:

Tabla 5. Valores de carga unitaria

Penetración		Carga unitaria Patrón		
mm	pulgada	Mpa	Kg/cm ²	psi
2.54	0.1	6.9	70	1000
5.08	0.2	10.3	105	1500
7.62	0.3	13.1	133	1900
10.16	0.4	15.8	162	2300
12.7	0.5	17.9	183	2600

Fuente: Manual de lab. De suelos Joseph. E. Bowles.

El número CBR usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2.54 mm (0,1”), sin embargo, si el valor del CBR para una penetración de 5.08 mm (0,2”) es mayor, dicho valor debe aceptarse como valor final de CBR.

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo específico, determinado utilizando el ensayo de compactación estándar. A continuación, se muestran los métodos 2 o 4 de las normas ASTM D698-70 ó D1557-70 (para el molde de 15.5 cm de diámetro), para la compactación de muestras utilizando las siguientes energías:

Tabla 6. Energías de Compactación

Método	Golpes	Capas	Peso del martillo N
D698 2 (suelo de grano fino)	56	3	24.5
4 (suelos gruesos)	56	3	24.5
D1557 2 (suelo de grano fino)	56	5	44.5
4 (suelos gruesos)	56	5	44.5

Fuente: Manual de Lab. De suelos Joseph. E. Bowles.

El ensayo de CBR se utiliza para establecer una relación entre el comportamiento de los suelos principalmente utilizados como bases y subrasantes bajo el pavimento de carreteras y aeropistas, la siguiente tabla da una clasificación típica:

Tabla 7. Clasificación de suelos para infraestructura de pavimentos

CBR	Clasificación general	Usos	Sistema de clasificación	
			Unificado	AASTHO
0 a 3	muy pobre	Sub rasante	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3 a 7	pobre a regular	Sub rasante	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7 a 20	regular	sub-base	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20 a 50	bueno	base, sub base	GM, GC, W, SM, SP, GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
>50	excelente	base	GW, GM	A1a, A2-4, A3

Fuente: Manual de Lab. De suelos Joseph. E. Bowles

CAPÍTULO III

INFORMACIÓN Y CARACTERIZACIÓN

3.1 Criterio de selección de la muestra.

Para el estudio de cualquier tipo de suelo uno de los pasos esenciales es el conocimiento detallado del lugar seleccionado, para después poder realizar pruebas de laboratorio que nos permitan determinar sus características y propiedades, y así poder obtener resultados razonablemente, para esto es preciso cumplir en forma adecuada una etapa previa e imprescindible: La obtención de las muestras de suelo a las que se le realizará correspondientes pruebas de laboratorio.

Las muestras pueden ser de dos tipos: alteradas o inalteradas:

Alterada son aquellas que están constituidas por el material disgregado o fragmentado, en las que no se toman precauciones especiales para conservar las características de estructura y humedad: no obstante, en algunas ocasiones conviene conocer el contenido de agua original del suelo, para lo cual las muestras se envasan y transportan en forma adecuada.

Las muestras alteradas, de suelos podrán obtenerse de una excavación, de un frente, ya sea de un corte o de banco. Las muestras deberán ser representativas de cada capa que se atraviese, hasta llegar a una profundidad que puede corresponder al nivel más bajo de explotación, al nivel de aguas freáticas o aquel el cual sea necesario extender el estudio.

Inalterada son aquellas en las que se conserva la estructura y la humedad que tiene el suelo en el lugar en donde se obtenga la muestra.

Las muestras inalteradas se obtendrán de suelos finos que puedan labrarse sin que se disgreguen. La obtención puede efectuarse en el piso o en una de las paredes de una excavación, en la superficie del terreno natural o en la de una terracería.

Para este trabajo de Proyecto de Grado, las muestras con la que se trabajó son de tipo alterado, debido a que los ensayos que se realizaron a las mismas son granulometría y límites para su identificación esto por una parte y por otra establecer el CBR del suelo mediante una metodología que utiliza suelos perturbados.

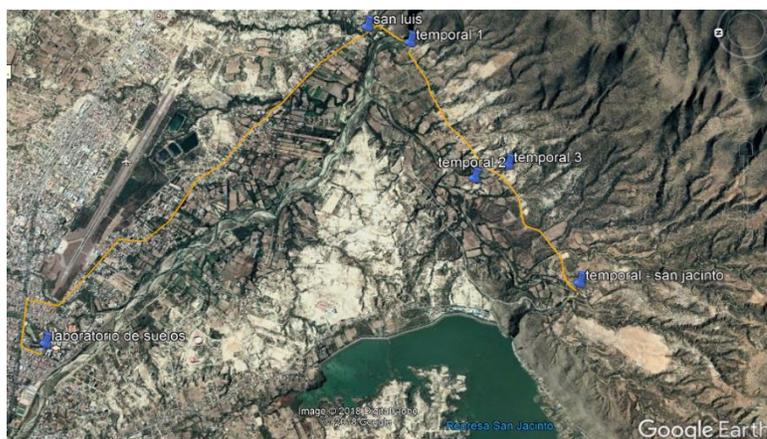
3.2. Ubicación.

Las muestras fueron extraídas de diferentes zonas y/o barrios del valle central de Tarija, así como también de la provincia Méndez, provincia O'connor y la provincia Uriondo, las cuales se indican a continuación mediante imágenes satelitales del Google Earth.

Muestras Tramo Temporal - San Jacinto

San Luis	latitud: 21°35'14.10"S Longitud: 64°41'2.40"O
Temporal 1	Latitud: 21°35'32.20"S Longitud: 64°41'11.95"O
Temporal 2	Latitud: 21°35'54.92"S Longitud: 64°42'21.28"O
Temporal 3	Latitud: 21°36'10.06"S Longitud: 64°42'16.27"O
Temp.-San Jacinto	Latitud: 21°36'36.71"S Longitud: 64°43'16.90"O

Figura 17. Temporal-San Jacinto

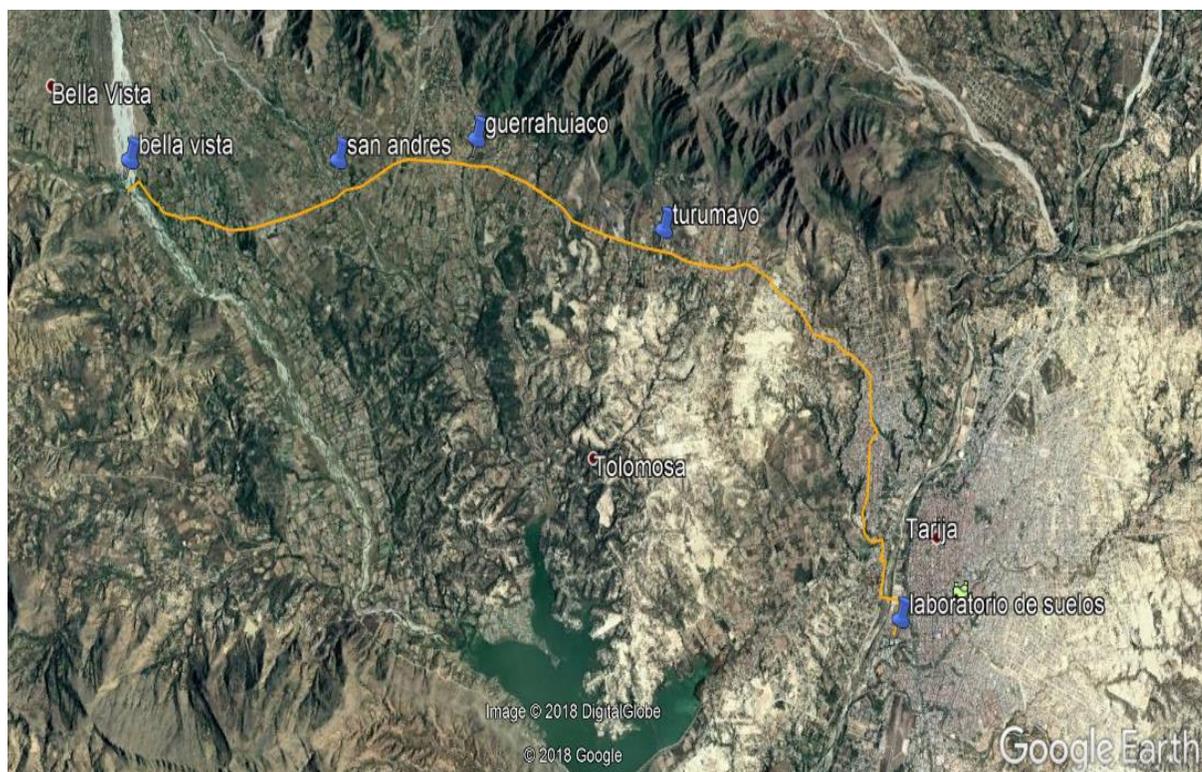


Fuente: Google Earth

Distancia aproximada desde la U.A.J.M.S. al punto más lejano (temporal-san Jacinto) 12.3 Km.

Muestras del tramo Turumayo-Bella vista

Turumayo	Latitud: 21°33'47.50"S Longitud: 64°47'18.60"O
Guerrahuaico	Latitud: 21°35'16.89"S Longitud: 64°48'45.23"O
San Andrés	Latitud: 21°36'38.07"S Longitud: 64°49'9.23"O
Bella Vista	Latitud: 21°38'34.50"S Longitud: 64°49'59.64"O

Figura 18. Turumayo-Bella Vista

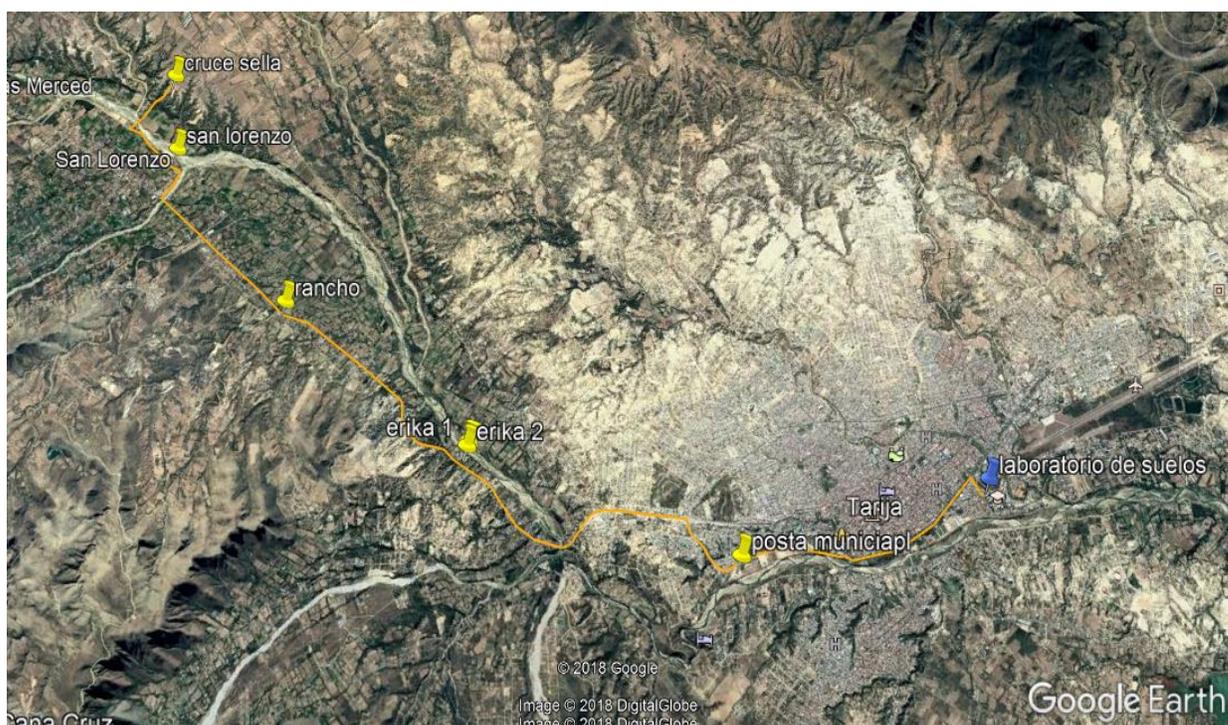
Fuente: Google Earth

Distancia aproximada desde la U.A.J.M.S. al punto más lejano (bella vista) 19.7 Km.

Muestras del tramo posta municipal-cruce Sella

Cruce Sella	Latitud: 21°24'59.49"S Longitud: 64°44'7.51"O
San Lorenzo	Latitud: 21°25'24.02"S Longitud: 64°44'40.72"O
Erika 1-2	Latitud: 21°28'54.56"S Longitud: 64°45'28.98"O
Posta municipal	Latitud: 21°31'12.55"S Longitud: 64°45'1.56"O

Figura 19. Posta municipal-cruce Sella



Fuente: Google Earth

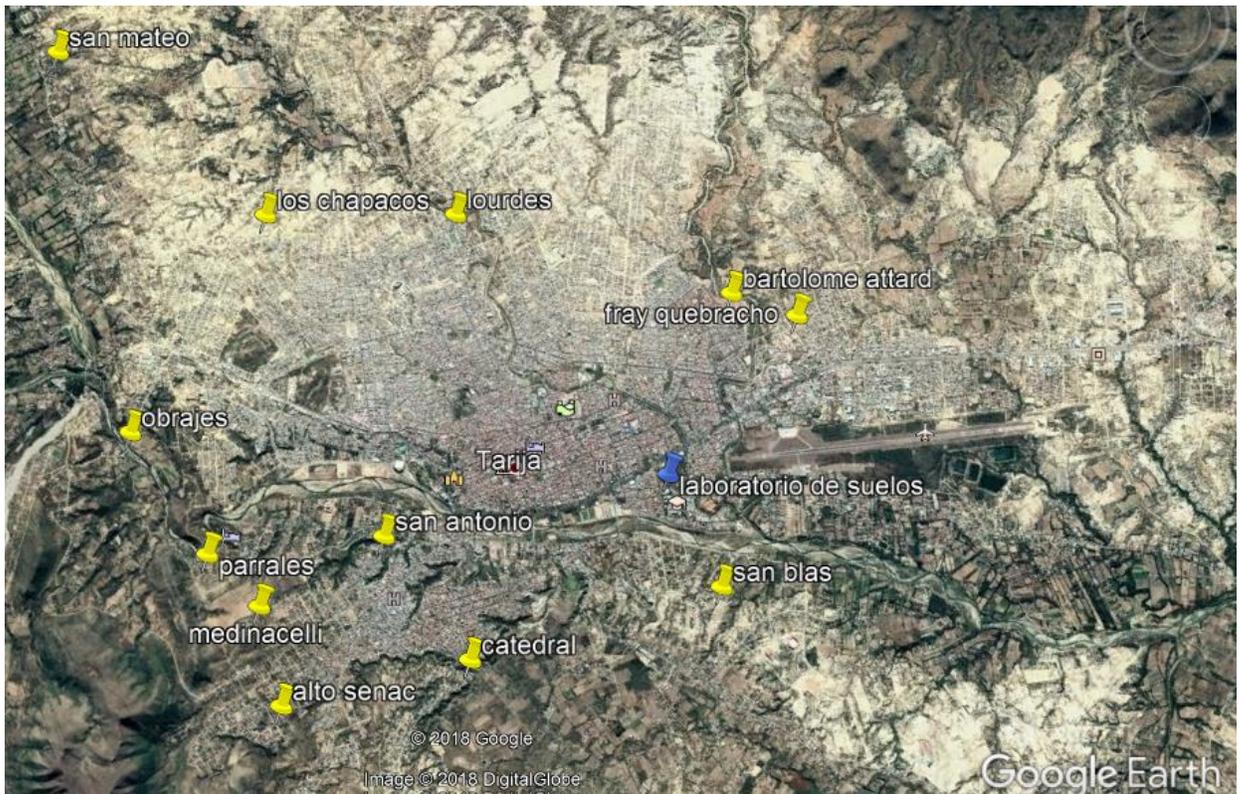
Distancia aproximada desde la U.A.J.M.S. al punto más lejano (cruce sella) 18.8 Km.

Muestras de los barrios del valle central de Tarija

San Mateo	Latitud: 21°33'47.50"S Longitud: 64°47'18.60"O Distancia U.A.J.M.S.: 10.2 Km
Obrajes	Latitud: 21°35'16.89"S Longitud: 64°48'45.23"O Distancia U.A.J.M.S.: 7.79 Km
Los Chapacos	Latitud: 21°36'38.07"S Longitud: 64°49'9.23"O Distancia U.A.J.M.S.: 6.83 Km
Lourdes	Latitud: 21°38'34.50"S Longitud: 64°49'59.64"O Distancia U.A.J.M.S.: 4.75 Km
Fray quebracho	Latitud: 21°33'47.50"S Longitud: 64°47'18.60"O Distancia U.A.J.M.S.: 3.1 Km
Bartolome Attard	Latitud: 21°35'16.89"S Longitud: 64°48'45.23"O Distancia U.A.J.M.S.: 2.59 Km
San Blass	Latitud: 21°36'38.07"S Longitud: 64°49'9.23"O Distancia U.A.J.M.S.: 3 Km
San Antonio	Latitud: 21°38'34.50"S Longitud: 64°49'59.64"O Distancia U.A.J.M.S.: 3.86 Km
Catedral	Latitud: 21°33'47.50"S Longitud: 64°47'18.60"O Distancia U.A.J.M.S.: 4.65 Km
Alto Senac	Latitud: 21°35'16.89"S Longitud: 64°48'45.23"O Distancia U.A.J.M.S.: 5.93 Km

Medinacelli	Latitud: 21°36'38.07"S Longitud: 64°49'9.23"O Distancia U.A.J.M.S.: 5.83 Km
Parrales	Latitud: 21°38'34.50"S Longitud: 64°49'59.64"O Distancia U.A.J.M.S.: 5.98 Km

Figura 20. Valle central de Tarija



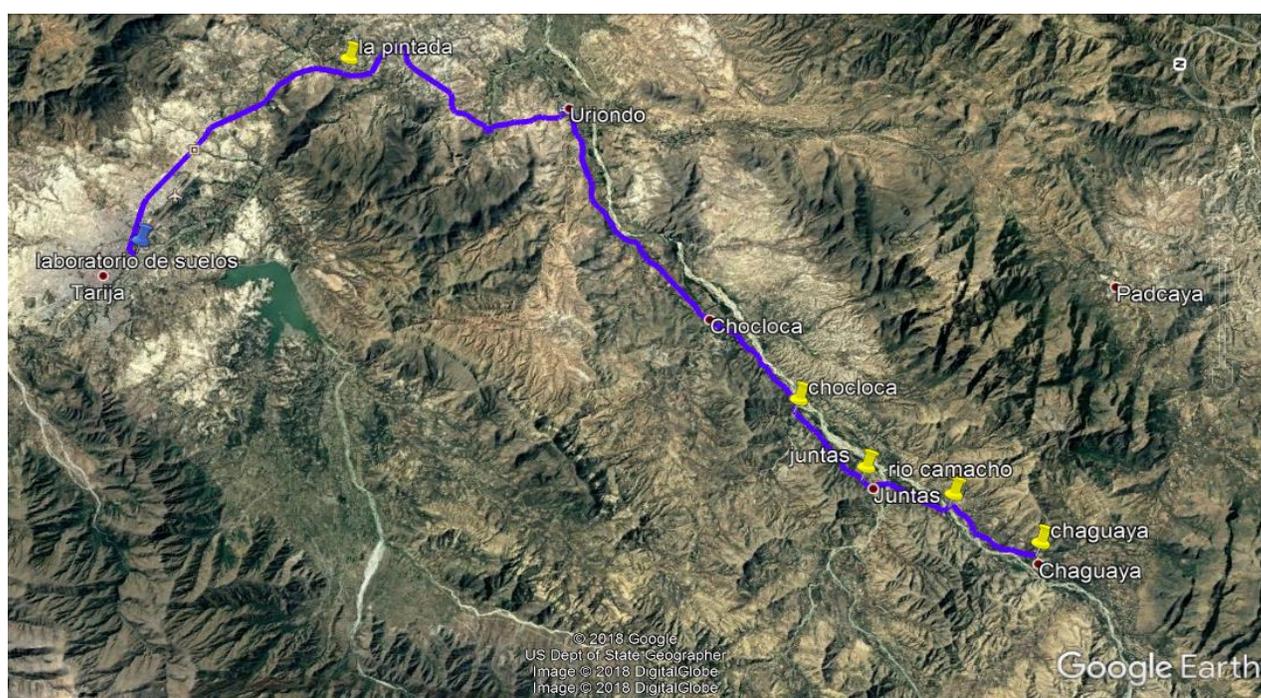
Fuente: Google Earth

Muestras del tramo Tarija - Chaguaya

La pintada	Latitud: 21°36'51.17"S Longitud: 64°38'34.41"O
Chocloca	latitud: 21°46'55.02"S Longitud: 64°46'13.89"O
Juntas	Latitud: 21°48'23.27"S Longitud: 64°47'43.79"O
Río Camacho	Latitud: 21°50'11.36"S Longitud: 64°48'13.35"O
Chaguaya	Latitud: 21°51'59.56"S Longitud: 64°49'12.76"O

Distancia aproximada desde la U.A.J.M.S. al punto más lejano (Chaguaya) 18.8 Km.

Figura 21. Tramo Tarija-Chaguaya



Fuente: Google Earth

Muestras de la comunidad de Narváez

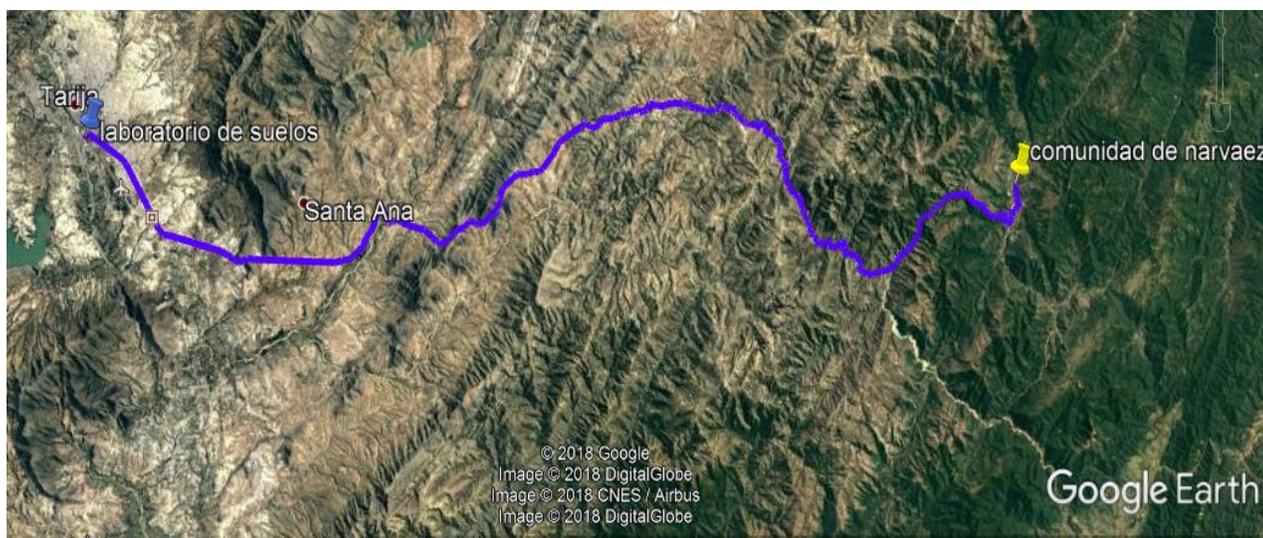
Narváez

Latitud: 21°23'58.70"S

Longitud: 64°16'54.78"O

Distancia aproximada desde la U.A.J.M.S. a la comunidad de Narváez 72 Km

Figura 22. Comunidad de Narváez provincia O'connor



Fuente: Google Earth

3.3. Muestreo de material.

3.3.1. Objetivo.

Realizar una extracción o muestreo adecuado y representativo para poder determinar de forma correcta las características y propiedades del suelo, en el laboratorio.

3.3.2 Equipo utilizado.

El material utilizado para la extracción de las muestras es el siguiente:

- Pala, pico, bolsas.

3.3.3. Procedimiento.

El procedimiento para la extracción de muestras en este caso es el siguiente:

- Se retira la capa superficial limpiando el lugar de extracción evitando de esta manera que el suelo recolectado sufra alguna mezcla.

- Se quita el material seco y suelto para obtener una superficie fresca de donde se pueda obtener la muestra.
- Se realiza excavaciones de aproximadamente un metro de profundidad.
- Se recoge todo el material excavado, se coloca en una bolsa identificandola con el lugar de muestreo para posteriormente llevarlo al laboratorio.

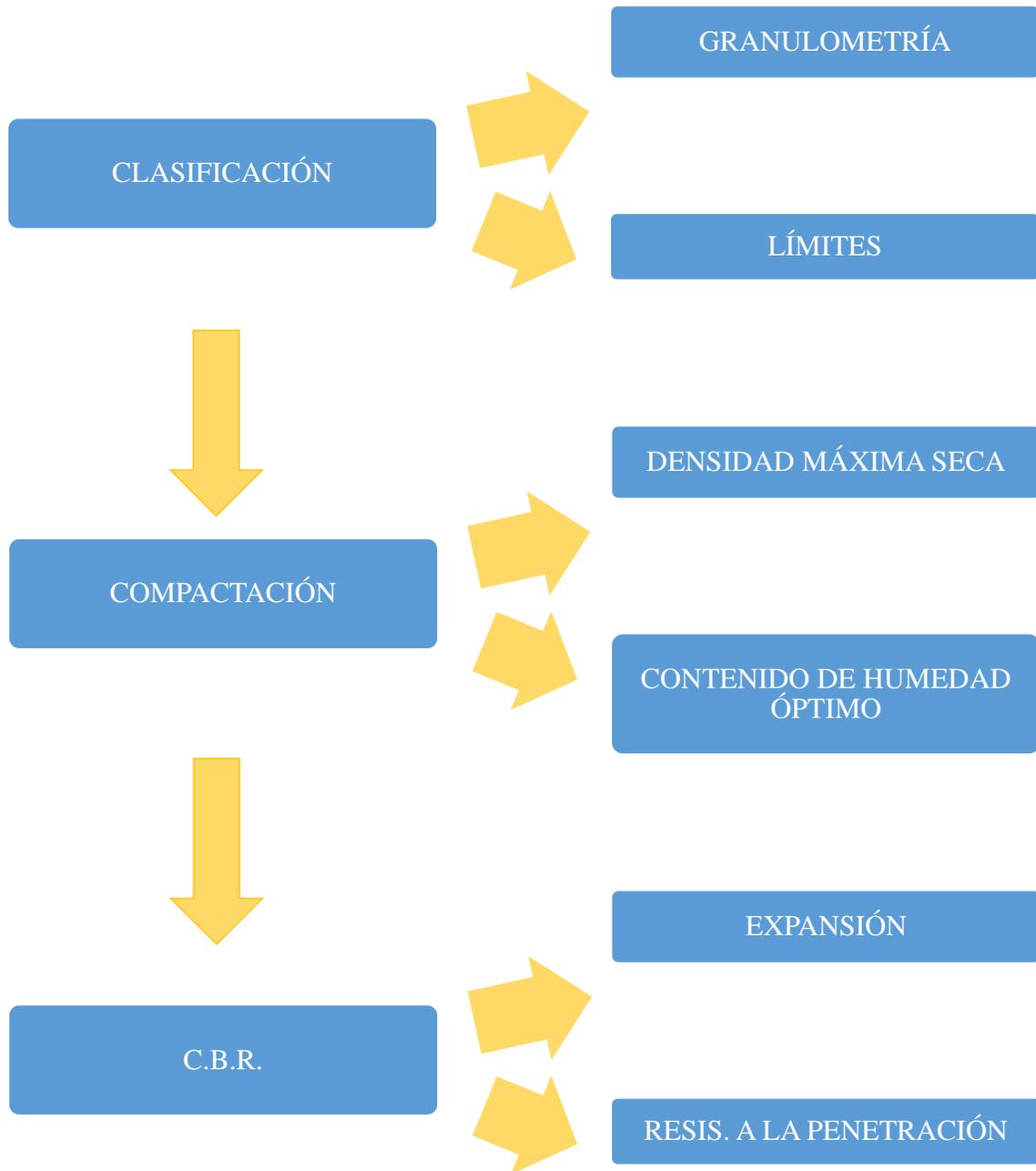
Figura 23. Extracción de Muestras



Fuente: Elaboración Propia

3.4. Ensayos de laboratorio.

Con las muestras obtenidas de la extracción se llevaron a cabo los ensayos de caracterización y propiedades del suelo, los mismos que a continuación se los presenta de forma esquemática.



3.5. Tabla de resúmenes

3.5.1. Resumen de clasificación AASTHO.

La caracterización de los suelos es muy importante en la presente investigación para poder terminar un comportamiento en los diferentes tipos de suelo granular utilizados se procedió a realizar el ensayo correspondiente para poder clasificarlos como ser: Granulometría, Límites de Attemberg, contenido de humedad.

Tabla 8 Resumen de Clasificación AASTHO

Núm.	Tipo de suelo	% pasa tamiz N°10	% pasa tamiz N°40	% pasa tamiz N°200	Hum. Nat. %	LL %	LP %	IP %	Clasificación AASTHO
1	San Luis	41.7	22.1	8.2	2.7	0.0	0.0	0.0	A-1-a
2	Temporal 1	39.8	21.3	9.7	2.3	0.0	0.0	0.0	A-1-a
3	Temporal 2	31.6	17.9	7.2	1.4	0.0	0.0	0.0	A-1-a
4	San Andres	29.6	9.2	2.5	1.2	0.0	0.0	0.0	A-1-a
5	Erika 1	28.3	22.7	9.2	5.1	0.0	0.0	0.0	A-1-a
6	Temporal 3	53.1	31.1	19.0	1.1	0.0	0.0	0.0	A-1-b
7	Turumayo	41.0	32.0	19.9	5.2	0.0	0.0	0.0	A-1-b
8	Posta Municipal	37.4	32.4	25.1	4.6	0.0	0.0	0.0	A-1-b
9	San Mateo	40.2	31.1	23.1	4.4	0.0	0.0	0.0	A-1-b
10	Erika 2	35.9	29.9	19.8	3.2	0.0	0.0	0.0	A-1-b
11	Camacho	80.8	53.3	5.9	4.4	0.0	0.0	0.0	A-3
12	Bella Vista	88.2	54.6	4.4	2.4	0.0	0.0	0.0	A-3
13	Chocloca	94.3	64.0	4.2	2.2	0.0	0.0	0.0	A-3
14	Obrajes	79.3	54.4	8.3	2.8	0.0	0.0	0.0	A-3
15	La Pintada	77.6	56.6	5.7	2.7	0.0	0.0	0.0	A-3
16	Medinacelli	45.8	38.2	27.7	5.0	24.0	18.0	6.0	A-2-4
17	Rancho	23.8	15.0	10.7	3.7	25.0	21.0	4.0	A-2-4
18	Cruce Sella	22.0	15.2	11.4	3.3	24.0	18.0	6.0	A-2-4
19	Chaguaya	41.6	16.1	10.2	3.6	24.0	21.0	3.0	A-2-4
20	Juntas	51.2	13.3	7.7	2.2	25.0	23.0	2.0	A-2-4
21	San Antonio - Narváez	47.9	39.6	25.9	1.7	46.0	41.0	5.0	A-2-5
22	Guerraguaico - San Diego	45.9	37.1	23.0	1.5	41.0	35.0	6.0	A-2-5
23	San Lorenzo - Narváez	45.8	29.9	16.7	2.4	45.0	36.0	9.0	A-2-5
24	Obrajes - Narváez	44.2	31.3	20.1	3.3	49.0	43.0	6.0	A-2-5
25	Alto Senac - Narváez	32.8	18.7	10.9	3.8	46.0	38.0	8.0	A-2-5
26	Catedral	31.7	21.2	14.6	5.0	24.0	8.0	16.0	A-2-6
27	Posta Municipal	36.6	24.5	18.6	2.6	28.0	17.0	11.0	A-2-6
28	Los Parrales	39.9	30.1	24.0	2.3	23.0	11.0	12.0	A-2-6

29	Temporal-San jac.	54.9	42.9	26.0	4.3	26.0	14.0	12.0	A-2-6
30	San Antonio	47.9	35.9	28.2	3.2	24.0	11.0	13.0	A-2-6
31	Chapacos - Tolomosa	36.4	24.6	17.4	3.3	43.0	29.0	14.0	A-2-7
32	Lourdes – Bella Vista	32.3	22.4	12.3	3.6	48.0	28.0	20.0	A-2-7
33	Fray Quebracho - Catedral	37.7	25.8	15.2	4.2	50.0	36.0	14.0	A-2-7
34	San Blas – San Andres	38.9	24.9	17.2	3.9	49.0	24.0	25.0	A-2-7
35	Bartolome attard - Obrajes	46.1	33.1	20.9	5.5	49.0	25.0	24.0	A-2-7

Fuente: Elaboración Propia

NOTA: para los suelos A-2-5 y A-2-7 se hizo una mezcla de suelos en donde los porcentajes utilizados se indican en el anexo 3

3.5.2. Resumen de compactación.

En la presente tabla se realiza un resumen de los resultados obtenidos para distintos tipos de suelo, Proctor T-180.

Tabla 9 Resumen de Compactación T-180

Núm.	Tipo de suelo	CHO %	DMS. (g/cm ³)
1	San Luis	6.29	2.22
2	Temporal 1	6.09	2.18
3	Temporl 2	5.81	2.22
4	San Andres	4.99	2.17
5	Erika 1	6.46	2.17
6	Temporal 3	5.09	2.16
7	Turumayo	6.14	2.1
8	Posta Municipal	6.08	2.15
9	San Mateo	5.79	2.2
10	Erika 2	4.64	2.28
11	Camacho	7.07	1.93
12	Bella Vista	6.87	1.92
13	Chocloca	7.52	2.05
14	Obrajes	7.52	1.96
15	La Pintada	7.38	2.14
16	Medinacelli	8.89	2.05
17	Rancho	7.67	2.16
18	Cruce Sella	7.34	2.18
19	Chaguaya	7.03	2.14
20	Juntas	7.89	2.14

21	San Antonio - Narváez	6.45	2.23
22	Guerraguaico - San Diego	5.55	2.2
23	San Lorenzo - Narváez	6.12	2.16
24	Obrajes - Narváez	7.28	2.21
25	Alto Senac - Narváez	6.53	2.16
26	Catedral	6.9	2.26
27	Posta Municipal	6.7	2.17
28	Los Parrales	6.28	2.11
29	Temporal-San jac.	7.41	2
30	San Antonio	6.39	2.08
31	Chapacos - Tolomosa	7.04	2.22
32	Lourdes – Bella Vista	7.41	2.11
33	Fray Quebracho - Catedral	7.36	2.14
34	San Blas – San Andres	7.78	2.2
35	Bartolome attard - Obrajes	8.89	2.05

Fuente: Elaboración Propia

3.5.3. Resumen de resultados de C.B.R.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los resultados con el equipo de California Bearing Ratio (C.B.R.), para una condición saturada.

Tabla 10 Resumen de C.B.R.

Núm.	Tipo de suelo	CBR 95%	CBR 100%
1	San Luis	54	61
2	Temporal 1	47	52
3	Temporl 2	46	51
4	San Andres	38	42
5	Erika 1	55	61
6	Temporal 3	32	37
7	Turumayo	33	39
8	Posta Municipal	26	40
9	San Mateo	43	48
10	Erika 2	37	42
11	Camacho	25	31
12	Bella Vista	15	16
13	Chocloca	14	16
14	Obrajes	10	11
15	La Pintada	16	18

16	Medinacelli	10	11
17	Rancho	9	10
18	Cruce Sella	9	10
19	Chaguaya	9	10
20	Juntas	9	10
21	San Antonio - Narváez	20	28
22	Guerraguaico - San Diego	13	15
23	San Lorenzo - Narváez	25	35
24	Obrajes - Narváez	12	13
25	Alto Senac - Narváez	30	36
26	Catedral	8	8
27	Posta Municipal	15	17
28	Los Parrales	8	9
29	Temporal-San jac.	19	23
30	San Antonio	16	17
31	Chapacos - Tolomosa	9	10
32	Lourdes - Bella Vista	9	9
33	Fray Quebracho - Catedral	7	7
34	San Blas - San Andrés	11	10
35	Bartolome attard - Obrajes	7	8

Fuente: Elaboración Propia

3.5.4. Resumen de la clasificación cuantitativa y cualitativa de RAMCODES.

En la siguiente tabla se presentara los resultados de la clasificación cuantitativa (factor característico) y cualitativa de la metodología de RAMCODES para los suelos en estudio

Tabla 11 Resumen de la Clasificación de RAMCODES.

Núm.	Tipo de suelo	Ret. N°40 %	Ret. N°40 decimal	Pasa N°200 %	Pasa N°200 decimal	LL %	LL dec.	LP %	IP %	Fp	Clasificación RAMCODES
1	San Luis	45.36	0.45	8.23	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.057	RS1
2	Temporal 1	48.26	0.48	9.69	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.065	RS1
3	Temporal 2	59.68	0.60	7.20	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.045	RS1
4	San Andres	59.44	0.59	2.47	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.015	RS1
5	Erika 1	65.02	0.65	9.16	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.056	RS1
6	Temporal 3	37.36	0.37	19.02	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.138	RS1
7	Turumayo	49.28	0.49	19.90	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.133	RS1
8	Posta Municipal	58.57	0.59	25.11	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.158	RS1
9	San Mateo	50.30	0.50	23.08	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.154	RS1
10	Erika 2	52.57	0.53	19.80	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.130	RS1
11	Camacho	9.20	0.09	5.90	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.054	RS1
12	Bella Vista	3.51	0.04	4.36	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.042	RS1
13	Chocloca	3.57	0.04	4.22	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.041	RS1
14	Obrajes	10.26	0.10	8.34	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.076	RS1
15	La Pintada	12.64	0.13	5.70	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.051	RS1
16	Medinacelli	46.28	0.46	15.16	0.15	24.00	0.24	18.00	6.00	0.129	RS2
17	Rancho	65.24	0.65	10.67	0.11	25.00	0.25	21.00	4.00	0.081	RS1
18	Cruce Sella	66.06	0.66	11.37	0.11	24.00	0.24	18.00	6.00	0.085	RS1
19	Chaguaya	42.83	0.43	10.23	0.10	24.00	0.24	21.00	3.00	0.089	RS1
20	Juntas	36.66	0.37	7.69	0.08	25.00	0.25	23.00	2.00	0.070	RS1
21	San Antonio - Narváez	43.84	0.44	25.85	0.26	46.00	0.46	41.00	5.00	0.262	RS2
22	Guerraguaico - San Diego	45.88	0.46	22.98	0.23	41.00	0.41	35.00	6.00	0.222	RS2
23	San Lorenzo - Narváez	44.39	0.44	16.71	0.17	45.00	0.45	36.00	9.00	0.168	RS1
24	Obrajes - Narváez	45.99	0.46	20.11	0.20	49.00	0.49	43.00	6.00	0.205	RS2
25	Alto Senac - Narváez	52.42	0.52	10.95	0.11	46.00	0.46	38.00	8.00	0.105	RS1
26	Catedral	57.04	0.57	14.57	0.15	24.00	0.24	8.00	16.00	0.115	RS1
27	Posta Municipal	49.11	0.49	18.58	0.19	28.00	0.28	17.00	11.00	0.159	RS1
28	Los Parrales	46.32	0.46	24.04	0.24	23.00	0.23	11.00	12.00	0.202	RS1
29	Temporal-San jac.	37.76	0.38	25.99	0.26	26.00	0.26	14.00	12.00	0.238	RS2
30	San Antonio	35.35	0.35	28.24	0.28	24.00	0.24	11.00	13.00	0.259	RS2
31	Chapacos - Tolomosa	50.02	0.50	17.42	0.17	43.00	0.43	29.00	14.00	0.166	RS1
32	Lourdes – Bella Vista	55.69	0.56	12.28	0.12	48.00	0.48	28.00	20.00	0.117	RS1
33	Fray Quebracho - Catedral	48.16	0.48	15.16	0.15	50.00	0.50	36.00	14.00	0.153	RS1

34	San Blas – San Andres	42.65	0.43	17.16	0.17	49.00	0.49	24.00	25.00	0.179	RS1
35	Bartolome attard - Obrajes	40.14	0.40	20.93	0.21	49.00	0.49	25.00	24.00	0.223	RS2

Fuente: Elaboración Propia

3.5.5. Comparación entre las clasificaciones ASSTHO y RAMCODES.

En la siguiente tabla se muestra los diferentes tipos de suelos en estudio, y su clasificación cualitativa y cuantitativa mediante las metodologías AASTHO y RAMCODES, haciendo resaltar la clasificación cuantitativa de la metodología de RAMCODES con la que se podrá hacer correlaciones con diferentes variables.

Tabla 12 Comparación entre AASTHO Y RAMCODES

Num.	Tipo de suelo	Clasificación	Clasificación	
		Cualitativa	Cualitativa	Cuantitativa
		Clasificación AASTHO	Clasificación RAMCODES	Fp
1	San Luis	A-1-a	RS1	0.056618
2	Temporal 1	A-1-a	RS1	0.065358
3	Temporal 2	A-1-a	RS1	0.04509
4	San Andres	A-1-a	RS1	0.015492
5	Erika 1	A-1-a	RS1	0.055508
6	Temporal 3	A-1-b	RS1	0.138468
7	Turumayo	A-1-b	RS1	0.133307
8	Posta Municipal	A-1-b	RS1	0.158353
9	San Mateo	A-1-b	RS1	0.15356
10	Erika 2	A-1-b	RS1	0.129776
11	Camacho	A-3	RS1	0.054029
12	Bella Vista	A-3	RS1	0.042122
13	Chocloca	A-3	RS1	0.040745
14	Obrajes	A-3	RS1	0.075639
15	La Pintada	A-3	RS1	0.050604
16	Medinacelli	A-2-4	RS2	0.1285
17	Rancho	A-2-4	RS1	0.080716
18	Cruce Sella	A-2-4	RS1	0.084902
19	Chaguaya	A-2-4	RS1	0.088813
20	Juntas	A-2-4	RS1	0.070339
21	San Antonio - Narváez	A-2-5	RS2	0.262382
22	Guerraguaico - San Diego	A-2-5	RS2	0.222113
23	San Lorenzo - Narváez	A-2-5	RS1	0.167806
24	Obrajes - Narváez	A-2-5	RS2	0.205246
25	Alto Senac - Narváez	A-2-5	RS1	0.104888

26	Catedral	A-2-6	RS1	0.115046
27	Posta Municipal	A-2-6	RS1	0.159496
28	Los Parrales	A-2-6	RS1	0.202086
29	Temporal-San jac.	A-2-6	RS2	0.237713
30	San Antonio	A-2-6	RS2	0.258719
31	Chapacos - Tolomosa	A-2-7	RS1	0.166049
32	Lourdes – Bella Vista	A-2-7	RS1	0.116735
33	Fray Quebracho - Catedral	A-2-7	RS1	0.153483
34	San Blas – San Andres	A-2-7	RS1	0.179239
35	Bartolome attard - Obrajes	A-2-7	RS2	0.222532

Fuente: Elaboración Propia

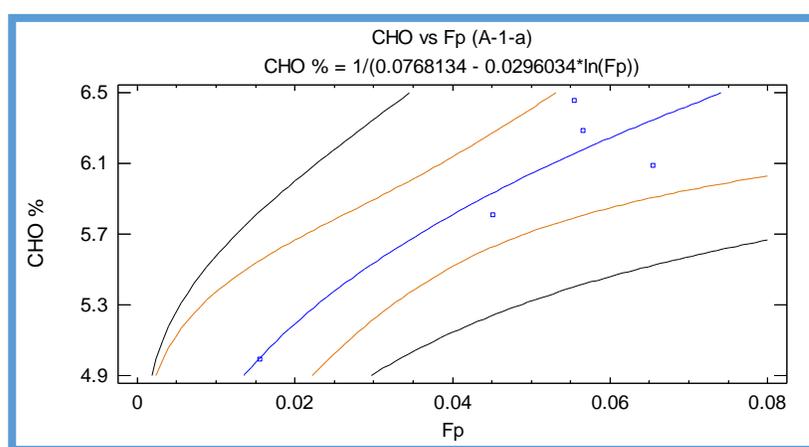
3.6. Selección del mejor modelo de ajuste.

3.6.1. Determinación de las ecuaciones de correlación CHO vs Fp.

Para suelos A-1-a

Datos

TIPO DE SUELO	CHO %	Fp
San Luis	6.29	0.0566
Temporal 1	6.09	0.0654
Temporal 2	5.81	0.0451
San Andres	4.99	0.0155
Erika I	6.46	0.0555



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Inversa-Y Log-X	-0.9521	90.64%
Doble Inverso	0.9519	90.60%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0.9445	89.22%
Multiplicativa	0.9426	88.84%
Curva S	-0.9411	88.56%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0.9372	87.84%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0.9358	87.58%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0.9351	87.45%
Logaritmo de X	0.9315	86.77%
Raíz Cuadrada Doble	0.9309	86.66%
Inversa de Y	-0.9292	86.35%
Inversa de X	-0.9288	86.26%
Raíz Cuadrada de X	0.9256	85.67%
Exponencial	0.9213	84.89%
Cuadrado-Y Log-X	0.9189	84.44%
Raíz Cuadrada de Y	0.9168	84.05%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0.9150	83.72%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0.9137	83.48%
Lineal	0.9119	83.15%
Cuadrado de Y	0.9008	81.14%
Log-Y Cuadrado-X	0.8675	75.26%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0.8637	74.60%
Cuadrado de X	0.8595	73.87%
Cuadrado Doble	0.8498	72.22%

Inversa-Y Cuadrado-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo Y-inversa log-X es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 90.6405%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

-Variable dependiente: CHO

-Variable independiente: Fp

$$\text{Inversa-Y Log-X: } Y = 1/(a + b \cdot \ln(X))$$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	0.0768134	0.0175426	4.37869	0.0220
Pendiente	-0.0296034	0.0054922	-5.39009	0.0125

Coefficiente de Correlación = -0.952053

R-cuadrada = 90.6405 por ciento

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\text{CHO} = \frac{1}{[0.0768 - 0.0296 * \ln(FP)]}$$

Donde:

CHO = Es el contenido de humedad óptima (%).

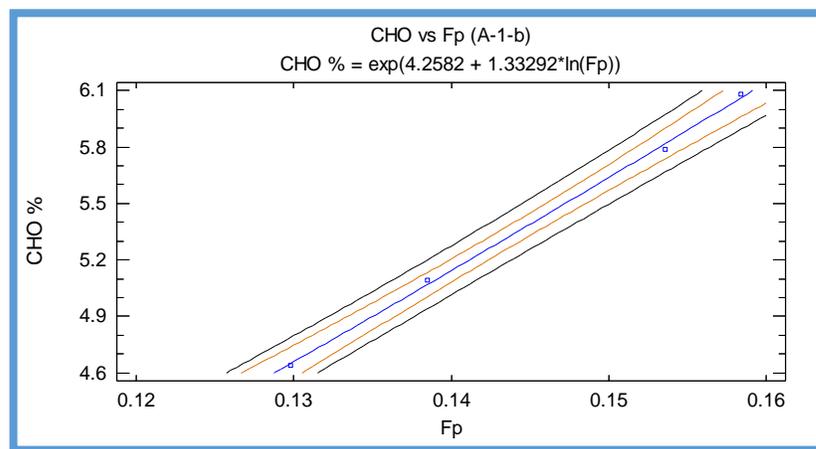
Fp = Es el factor característico de RAMCODES (adimensional).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre CHO y Fp con un nivel de confianza del 95.0%.

Para suelos A-1-b

Datos

TIPO DE SUELO	CHO %	Fp
Temporal 3	5.09	0.1385
Turumayo	6.14	0.1333
Posta Municipal	6.08	0.1584
San Mateo	5.79	0.1536
Erika 2	4.64	0.1298



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Multiplicativa	0.9994	99.88%
Raíz Cuadrada Doble	0.9994	99.88%
Lineal	0.9993	99.87%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0.9993	99.87%
Doble Inverso	0.9993	99.87%
Raíz Cuadrada de Y	0.9993	99.86%
Curva S	-0.9993	99.86%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0.9993	99.85%
Raíz Cuadrada de X	0.9992	99.84%
Cuadrado de X	0.9992	99.84%
Cuadrado Doble	0.9992	99.83%
Exponencial	0.9990	99.80%
Logaritmo de X	0.9990	99.80%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0.9988	99.77%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0.9988	99.77%
Inversa-Y Log-X	-0.9987	99.73%
Cuadrado de Y	0.9985	99.71%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0.9981	99.63%
Log-Y Cuadrado-X	0.9981	99.63%
Inversa de X	-0.9981	99.62%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0.9980	99.61%
Inversa de Y	-0.9975	99.50%
Cuadrado-Y Log-X	0.9974	99.49%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0.9959	99.18%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0.9958	99.16%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo multiplicativo es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 99.8812%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

-Variable dependiente: CHO

-Variable independiente: Fp

Multiplicativo: $Y = a \cdot X^b$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	4.2582	0.0629129	67.6841	0.0002
Pendiente	1.33292	0.0325078	41.0029	0.0006

Coefficiente de Correlación = 0.999406

R-cuadrada = 99.8812 por ciento

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\text{CHO} = e^{[4.258 + 1.333 \cdot \ln(\text{Fp})]}$$

Donde:

CHO = Es el contenido de humedad óptima (%).

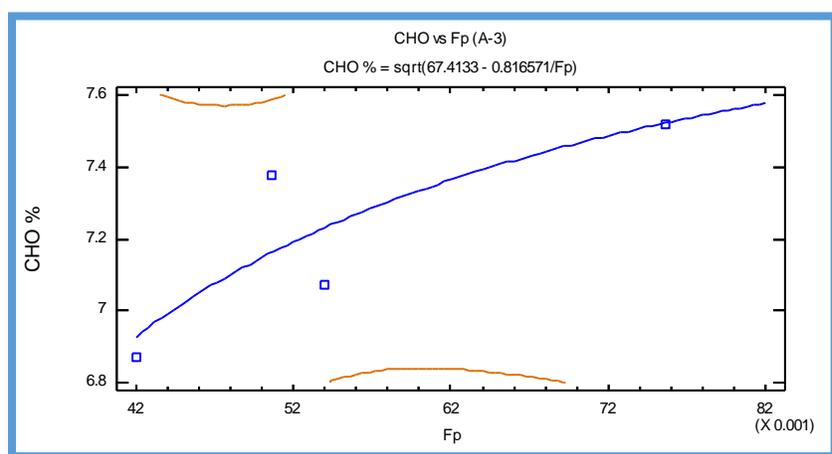
Fp = Es el factor característico de RAMCODES (adimensional).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre CHO y Fp con un nivel de confianza del 95.0%.

Para suelos A-3

Datos

TIPO DE SUELO	CHO %	Fp
La Pintada	7.38	0.0506
Camacho	7.07	0.0540
Bella Vista	6.87	0.0421
Chocloca	7.52	0.0407
Obrajes	7.52	0.0756



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado-Y Inversa de X	-0.8367	70.01%
Inversa de X	-0.8361	69.91%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0.8358	69.86%
Curva S	-0.8355	69.81%
Doble Inverso	0.8349	69.71%
Cuadrado-Y Log-X	0.8252	68.10%
Logaritmo de X	0.8236	67.83%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0.8228	67.70%
Multiplicativa	0.8220	67.57%
Inversa-Y Log-X	-0.8203	67.30%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0.8178	66.87%
Raíz Cuadrada de X	0.8156	66.53%
Raíz Cuadrada Doble	0.8146	66.35%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0.8135	66.18%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0.8114	65.83%
Cuadrado de Y	0.8095	65.53%
Lineal	0.8069	65.11%
Raíz Cuadrada de Y	0.8056	64.90%
Exponencial	0.8043	64.69%
Inversa de Y	-0.8017	64.27%
Cuadrado Doble	0.7918	62.69%
Cuadrado de X	0.7883	62.15%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0.7866	61.88%
Log-Y Cuadrado-X	0.7849	61.61%
Inversa-Y Cuadrado-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo Y-cuadrada X-inversa es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 70.0062%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

-Variable dependiente: CHO

-Variable independiente: Fp

Cuadrado-Y Inversa de X: $Y = \sqrt{a + b/X}$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	67.4133	7.25187	9.29599	0.0114
Pendiente	-0.816571	0.377943	-2.16057	0.1633

Coefficiente de Correlación = -0.836697

R-cuadrada = 70.0062 por ciento

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\text{CHO} = \sqrt{\left(67.413 - \frac{0.8166}{\text{Fp}}\right)}$$

Donde:

CHO = Es el contenido de humedad óptima (%).

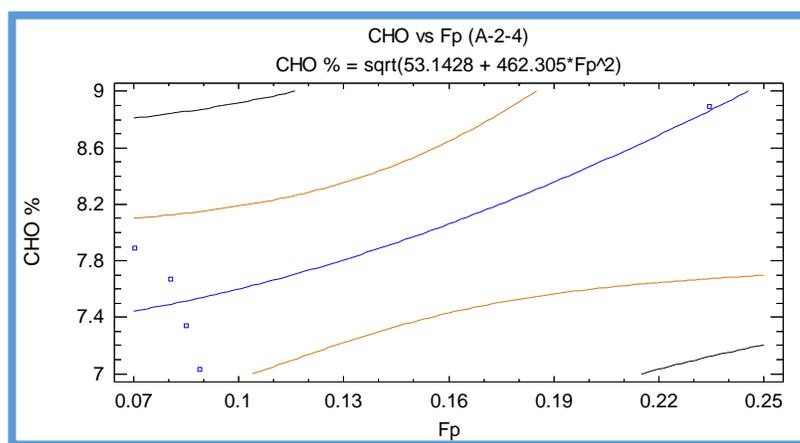
Fp = Es el factor característico de RAMCODES (adimensional).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual a 0.05, no hay una relación estadísticamente significativa entre CHO y Fp con un nivel de confianza del 95.0% ó más.

Para suelos A-2-4

Datos

TIPO DE SUELO	CHO %	Fp
Medinacelli	8.89	0.2345
Rancho	7.67	0.0807
Cruce Sella	7.34	0.0849
Chaguaya	7.03	0.0888
Juntas	7.89	0.0703



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado Doble	0.8815	77.71%
Cuadrado de X	0.8644	74.72%
Cuadrado de Y	0.8581	73.64%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0.8553	73.16%
Log-Y Cuadrado-X	0.8458	71.54%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0.8398	70.53%
Lineal	0.8398	70.52%
Raíz Cuadrada de Y	0.8300	68.89%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0.8257	68.18%
Raíz Cuadrada de X	0.8205	67.33%
Exponencial	0.8199	67.22%
Cuadrado-Y Log-X	0.8157	66.53%
Raíz Cuadrada Doble	0.8103	65.66%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0.7997	63.96%
Inversa de Y	-0.7985	63.76%
Logaritmo de X	0.7953	63.25%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0.7846	61.55%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0.7775	60.45%
Multiplicativa	0.7735	59.82%
Inversa-Y Log-X	-0.7502	56.29%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0.7470	55.80%
Inversa de X	-0.7241	52.44%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0.7122	50.72%
Curva S	-0.6999	48.98%
Doble Inverso	0.6744	45.48%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo doble cuadrado es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 77.7058%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

-Variable dependiente: CHO

-Variable independiente: Fp

$$\text{Cuadrado Doble: } Y = \sqrt{a + b \cdot X^2}$$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	53.1428	3.61959	14.682	0.0007
Pendiente	462.305	142.967	3.23364	0.0481

Coefficiente de Correlación = 0.881509

R-cuadrada = 77.7058 por ciento

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\text{CHO} = \sqrt{(53.1428 + 462.305 * Fp^2)}$$

Donde:

CHO = Es el contenido de humedad óptima (%).

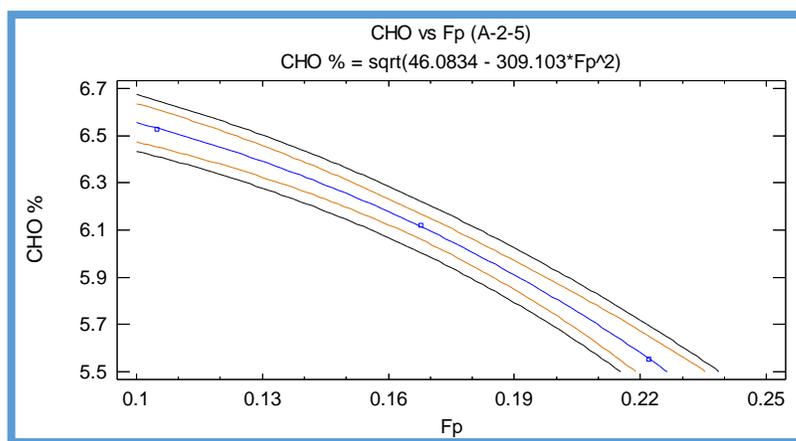
Fp = Es el factor característico de RAMCODES (adimensional).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre CHO y Fp con un nivel de confianza del 95.0%.

Para suelos A-2-5

Datos

TIPO DE SUELO	CHO %	Fp
San Antonio - Narváez	6.45	0.2624
Guerraguaico - San Diego	5.55	0.2221
San Lorenzo - Narváez	6.12	0.1678
Obrajes - Narváez	7.28	0.2052
Alto Senac - Narváez	6.53	0.1049



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado Doble	-0.9999	99.99%
Cuadrado de X	-0.9994	99.89%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	-0.9990	99.80%
Log-Y Cuadrado-X	-0.9984	99.69%
Inversa-Y Cuadrado-X	0.9970	99.39%
Cuadrado de Y	-0.9935	98.71%
Lineal	-0.9907	98.15%
Raíz Cuadrada de Y	-0.9891	97.84%
Exponencial	-0.9874	97.50%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	-0.9863	97.29%
Inversa de Y	0.9837	96.77%
Raíz Cuadrada de X	-0.9824	96.50%
Raíz Cuadrada Doble	-0.9802	96.08%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	-0.9779	95.63%
Cuadrado-Y Log-X	-0.9767	95.40%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	0.9731	94.69%
Logaritmo de X	-0.9716	94.41%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	-0.9689	93.88%
Multiplicativa	-0.9661	93.34%
Inversa-Y Log-X	0.9602	92.20%
Cuadrado-Y Inversa de X	0.9524	90.72%
Inversa de X	0.9453	89.36%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	0.9416	88.66%
Curva S	0.9378	87.94%
Doble Inverso	-0.9299	86.47%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo doble cuadrado es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 99.9882%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

-Variable dependiente: CHO

-Variable independiente: Fp

$$\text{Cuadrado Doble: } Y = \text{sqrt}(a + b * X^2)$$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	46.0834	0.112312	410.316	0.0016
Pendiente	-309.103	3.36238	-91.93	0.0069

Coefficiente de Correlación = -0.999941

R-cuadrada = 99.9882 por ciento

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\text{CHO} = \sqrt{(46.0834 - 309.103 * Fp^2)}$$

Donde:

CHO = Es el contenido de humedad óptima (%).

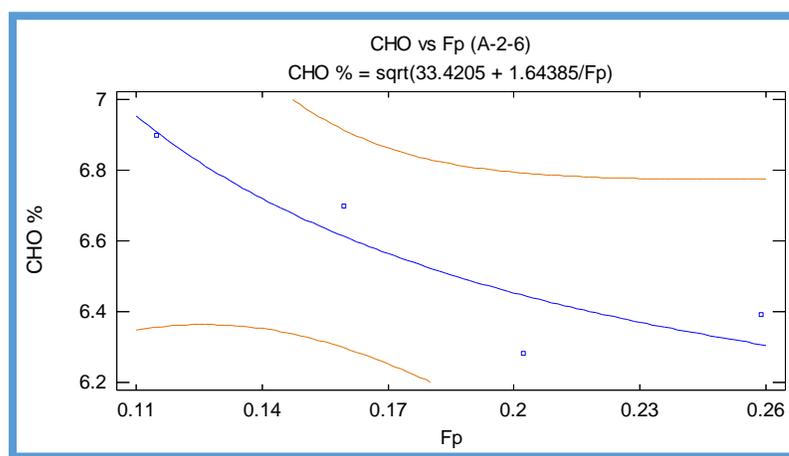
Fp = Es el factor característico de RAMCODES (adimensional).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre CHO y Fp con un nivel de confianza del 95.0%.

Para suelos A-2-6

Datos

TIPO DE SUELO	CHO %	Fp
Catedral	6.9	0.1150
Posta Municipal	6.7	0.1595
Los Parrales	6.28	0.2021
Temporal-San jac.	7.41	0.2377
San Antonio	6.39	0.2587



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado-Y Inversa de X	0.9135	83.45%
Inversa de X	0.9094	82.71%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	0.9073	82.33%
Curva S	0.9052	81.94%
Doble Inverso	-0.9008	81.15%
Cuadrado-Y Log-X	-0.8953	80.15%
Logaritmo de X	-0.8915	79.48%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	-0.8896	79.14%
Multiplicativa	-0.8877	78.80%
Inversa-Y Log-X	0.8836	78.08%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	-0.8788	77.23%
Raíz Cuadrada de X	-0.8753	76.61%
Raíz Cuadrada Doble	-0.8734	76.29%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	-0.8716	75.96%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	0.8677	75.29%
Cuadrado de Y	-0.8580	73.61%
Lineal	-0.8546	73.03%
Raíz Cuadrada de Y	-0.8528	72.73%
Exponencial	-0.8510	72.42%
Inversa de Y	0.8472	71.78%
Cuadrado Doble	-0.8063	65.01%
Cuadrado de X	-0.8031	64.49%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	-0.8014	64.23%
Log-Y Cuadrado-X	-0.7997	63.95%
Inversa-Y Cuadrado-X	0.7962	63.39%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo Y-cuadrada X-inversa es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 83.4542%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

-Variable dependiente: CHO

-Variable independiente: Fp

Cuadrado-Y Inversa de X: $Y = \sqrt{a + b/X}$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	33.4205	3.21503	10.3951	0.0091
Pendiente	1.64385	0.517566	3.17611	0.0865

Coefficiente de Correlación = 0.913533

R-cuadrada = 83.4542 por ciento

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\text{CHO} = \sqrt{\left(33.4205 + \frac{1.6438}{\text{Fp}}\right)}$$

Donde:

CHO = Es el contenido de humedad óptima (%).

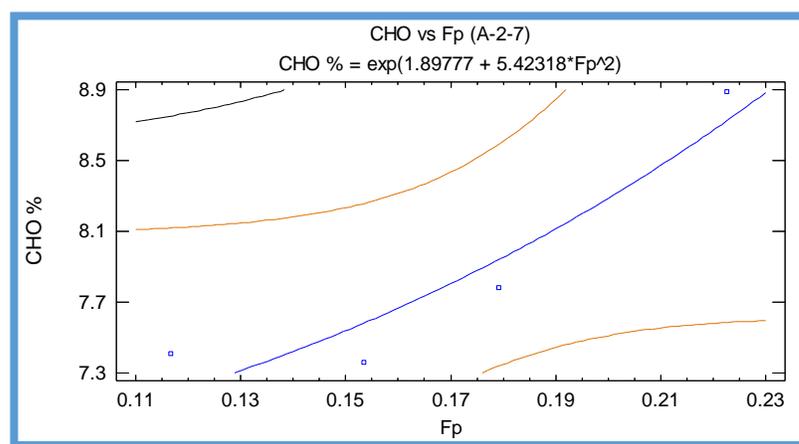
Fp = Es el factor característico de RAMCODES (adimensional).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual a 0.05, no hay una relación estadísticamente significativa entre CHO y Fp con un nivel de confianza del 95.0% ó más.

Para suelos A-2-7

Datos

TIPO DE SUELO	CHO %	Fp
Chapacos - Tolomosa	7.04	0.1660
Lourdes – Bella Vista	7.41	0.1167
Fray Quebracho - Catedral	7.36	0.1535
San Blas – San Andres	7.78	0.1792
Bartolome attard - Obrajes	8.89	0.2225



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Log-Y Cuadrado-X	0.9417	88.68%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0.9405	88.46%
Cuadrado de X	0.9393	88.22%
Cuadrado Doble	0.9365	87.71%
Inversa de Y	-0.9073	82.33%
Exponencial	0.9042	81.76%
Raíz Cuadrada de Y	0.9026	81.46%
Lineal	0.9008	81.15%
Cuadrado de Y	0.8972	80.49%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0.8847	78.26%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0.8811	77.63%
Raíz Cuadrada Doble	0.8792	77.30%
Raíz Cuadrada de X	0.8772	76.96%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0.8732	76.24%
Inversa-Y Log-X	-0.8594	73.86%
Multiplcativa	0.8554	73.17%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0.8533	72.81%
Logaritmo de X	0.8512	72.45%
Cuadrado-Y Log-X	0.8467	71.69%
Doble Inverso	0.8032	64.52%
Curva S	-0.7985	63.77%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0.7961	63.38%
Inversa de X	-0.7936	62.98%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0.7885	62.18%
Inversa-Y Cuadrado-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo log-Y X-cuadrada es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 88.6798%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

-Variable dependiente: CHO

-Variable independiente: Fp

$$\text{Logarítmico-Y Cuadrado-X: } Y = \exp(a + b * X^2)$$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	1.89777	0.0445166	42.6307	0.0005
Pendiente	5.42318	1.37011	3.95822	0.0583

Coefficiente de Correlación = 0.941699

R-cuadrada = 88.6798 por ciento

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\text{CHO} = e^{[1.8978 + 5.4232 * Fp^2]}$$

Donde:

CHO = Es el contenido de humedad óptima (%).

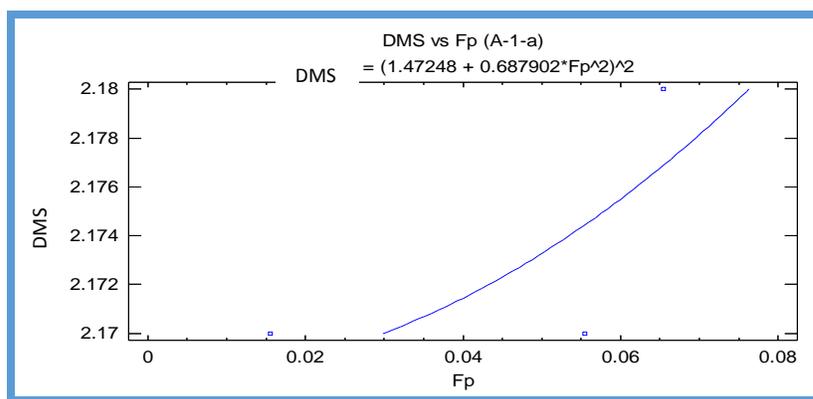
Fp = Es el factor característico de RAMCODES (adimensional).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual a 0.05, no hay una relación estadísticamente significativa entre CHO y Fp con un nivel de confianza del 95.0% ó más.

3.6.2. Determinación de las ecuaciones de correlación DMS vs Fp. Para suelos A-1-a

Datos

TIPO DE SUELO	Dmax.	Fp
San Luis	2.22	0.0566
Temporal 1	2.18	0.0654
Temporal 2	2.22	0.0451
San Andrés	2.17	0.0155
Erika 1	2.17	0.0555



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0.7287	53.10%
Log-Y Cuadrado-X	0.7287	53.10%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0.7287	53.10%
Cuadrado de X	0.7287	53.10%
Cuadrado Doble	0.7287	53.10%
Lineal	0.6534	42.69%
Inversa de Y	-0.6534	42.69%
Raíz Cuadrada de Y	0.6534	42.69%
Exponencial	0.6534	42.69%
Cuadrado de Y	0.6534	42.69%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0.6184	38.24%
Raíz Cuadrada de X	0.6184	38.24%
Raíz Cuadrada Doble	0.6184	38.24%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0.6184	38.24%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0.6184	38.24%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0.5875	34.51%
Inversa-Y Log-X	-0.5875	34.51%
Cuadrado-Y Log-X	0.5875	34.51%
Logaritmo de X	0.5875	34.51%
Multiplicativa	0.5875	34.51%
Doble Inverso	0.5421	29.39%
Inversa de X	-0.5421	29.39%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0.5421	29.39%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0.5421	29.39%
Curva S	-0.5421	29.39%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo raíz cuadrada-Y X-cuadrada es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 53.0976%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

-Variable dependiente: DMS

-Variable independiente: Fp

$$\text{Raíz Cuadrada-Y Cuadrado-X: } Y = (a + b \cdot X^2)^2$$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	1.47248	0.00196951	747.636	0.0009
Pendiente	0.687902	0.646527	1.064	0.4803

Coefficiente de Correlación = 0.728681

R-cuadrada = 53.0976 por ciento

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\text{DMS} = (1.47248 + 0.687902 \cdot \text{Fp}^2)^2$$

Donde:

DMS = Es la densidad máxima seca (g/cm^3).

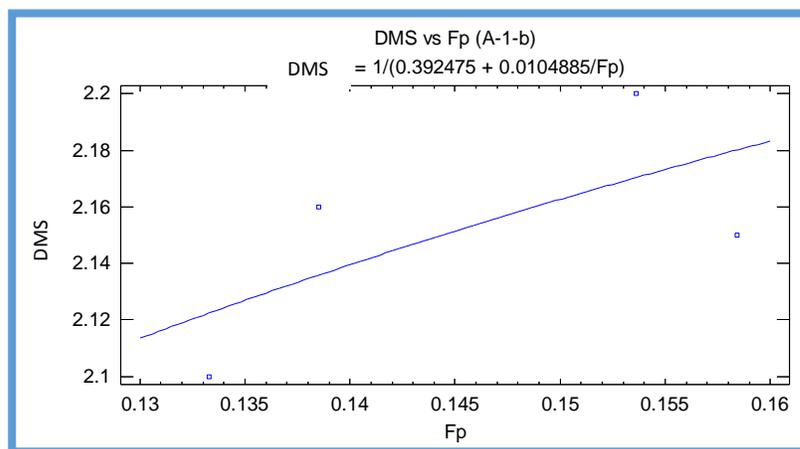
Fp = Es el factor característico de RAMCODES (adimensional).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual a 0.05, no hay una relación estadísticamente significativa entre DMS y Fp con un nivel de confianza del 95.0% ó más.

Para suelos A-1-b

Datos

TIPO DE SUELO	Dmax.	Fp
Temporal 3	2.16	0.1385
Turumayo	2.1	0.1333
Posta Municipal	2.15	0.1584
San Mateo	2.2	0.1536
Erika 2	2.28	0.1298



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Doble Inverso	0.6657	44.32%
Curva S	-0.6640	44.10%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0.6632	43.98%
Inversa de X	-0.6623	43.87%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0.6605	43.63%
Inversa-Y Log-X	-0.6534	42.69%
Multiplicativa	0.6517	42.47%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0.6508	42.36%
Logaritmo de X	0.6499	42.24%
Cuadrado-Y Log-X	0.6482	42.01%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0.6471	41.88%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0.6454	41.66%
Raíz Cuadrada Doble	0.6445	41.54%
Raíz Cuadrada de X	0.6437	41.43%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0.6419	41.21%
Inversa de Y	-0.6408	41.06%
Exponencial	0.6391	40.84%
Raíz Cuadrada de Y	0.6382	40.73%
Lineal	0.6374	40.62%
Cuadrado de Y	0.6356	40.40%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0.6280	39.44%
Log-Y Cuadrado-X	0.6263	39.23%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0.6255	39.12%
Cuadrado de X	0.6246	39.01%
Cuadrado Doble	0.6228	38.79%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo doble inverso es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 44.3222%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

-Variable dependiente: DMS

-Variable independiente: Fp

$$\text{Recíproco Doble: } Y = 1/(a + b/X)$$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	0.392475	0.0573878	6.839	0.0207
Pendiente	0.0104885	0.00831248	1.26178	0.3343

Coefficiente de Correlación = 0.665749

R-cuadrada = 44.3222 por ciento

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\text{DMS} = \frac{1}{\left[0.3924 + \frac{0.0104}{Fp} \right]}$$

Donde:

DMS = Es la densidad máxima seca (g/cm³).

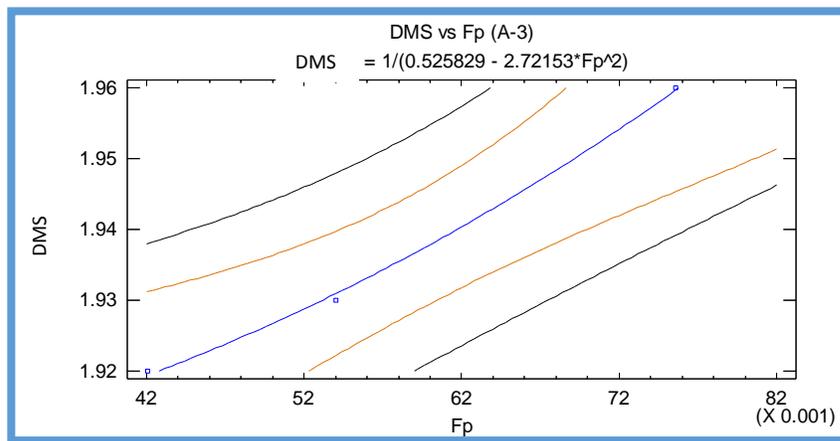
Fp = Es el factor característico de RAMCODES (adimensional).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual a 0.05, no hay una relación estadísticamente significativa entre DMS y Fp con un nivel de confianza del 95.0% ó más.

Para suelos A-3

Datos

TIPO DE SUELO	Dmax.	Fp
Camacho	1.93	0.0540
Bella Vista	1.92	0.0421
Chocloca	2.05	0.0407
Obrajes	1.96	0.0756
La Pintada	2.14	0.0506



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Inversa-Y Cuadrado-X	-0.9992	99.85%
Log-Y Cuadrado-X	0.9992	99.83%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0.9991	99.82%
Cuadrado de X	0.9991	99.81%
Cuadrado Doble	0.9990	99.80%
Inversa de Y	-0.9938	98.77%
Exponencial	0.9936	98.72%
Raíz Cuadrada de Y	0.9935	98.70%
Lineal	0.9933	98.67%
Cuadrado de Y	0.9931	98.63%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0.9887	97.76%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0.9884	97.70%
Raíz Cuadrada Doble	0.9883	97.66%
Raíz Cuadrada de X	0.9881	97.63%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0.9878	97.57%
Inversa-Y Log-X	-0.9819	96.40%
Multiplicativa	0.9815	96.33%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0.9813	96.29%
Logaritmo de X	0.9811	96.25%
Cuadrado-Y Log-X	0.9807	96.17%
Doble Inverso	0.9628	92.69%
Curva S	-0.9622	92.58%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0.9619	92.53%
Inversa de X	-0.9616	92.47%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0.9611	92.36%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo Y-inversa X-cuadrada es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 99.8477%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

-Variable dependiente: DMS

-Variable independiente: Fp

$$\text{Inversa-Y Cuadrado-X: } Y = 1/(a + b \cdot X^2)$$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	0.525829	0.000408432	1287.43	0.0005
Pendiente	-2.72153	0.106275	-25.6084	0.0248

Coefficiente de Correlación = -0.999238

R-cuadrada = 99.8477 por ciento

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\text{DMS} = \frac{1}{[0.5258 - 2.7215 * Fp^2]}$$

Donde:

DMS = Es la densidad máxima Seca (g/cm³).

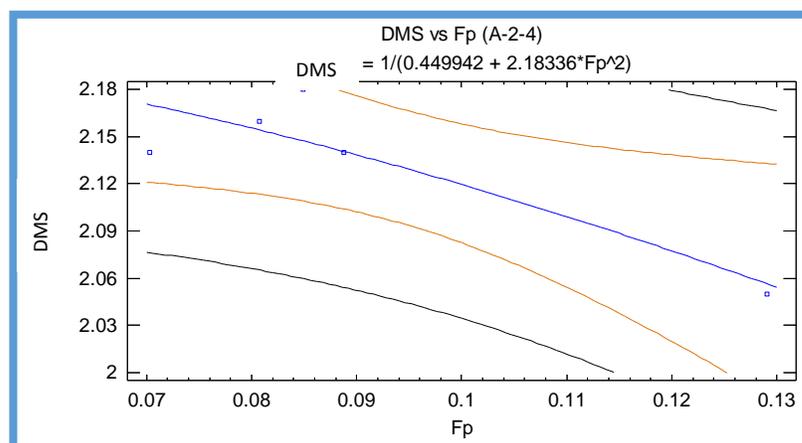
Fp = Es el factor característico de RAMCODES (adimensional).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre DMS y Fp con un nivel de confianza del 95.0%.

Para suelos A-2-4

Datos

TIPO DE SUELO	Dmax.	Fp
Medinacelli	2.05	0.1291
Rancho	2.16	0.0807
Cruce Sella	2.18	0.0849
Chaguaya	2.14	0.0888
Juntas	2.14	0.0703



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Inversa-Y Cuadrado-X	0.8991	80.83%
Log-Y Cuadrado-X	-0.8960	80.29%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	-0.8945	80.01%
Cuadrado de X	-0.8929	79.73%
Cuadrado Doble	-0.8897	79.15%
Inversa de Y	0.8715	75.95%
Exponencial	-0.8683	75.40%
Raíz Cuadrada de Y	-0.8667	75.11%
Lineal	-0.8650	74.82%
Cuadrado de Y	-0.8616	74.24%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	0.8536	72.86%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	-0.8503	72.31%
Raíz Cuadrada Doble	-0.8486	72.02%
Raíz Cuadrada de X	-0.8469	71.73%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	-0.8435	71.14%
Inversa-Y Log-X	0.8327	69.34%
Multiplicativa	-0.8293	68.78%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	-0.8276	68.49%
Logaritmo de X	-0.8259	68.20%
Cuadrado-Y Log-X	-0.8223	67.62%
Doble Inverso	-0.7816	61.09%
Curva S	0.7780	60.54%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	0.7762	60.25%
Inversa de X	0.7744	59.97%
Cuadrado-Y Inversa de X	0.7707	59.39%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo Y-inversa X-cuadrada es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 80.8311%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

-Variable dependiente: DMS

-Variable independiente: Fp

$$\text{Inversa-Y Cuadrado-X: } Y = 1/(a + b * X^2)$$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	0.449942	0.00584162	77.0234	0.0000
Pendiente	2.18336	0.609857	3.58011	0.0373

Coefficiente de Correlación = 0.900185

R-cuadrada = 81.0333 por ciento

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\text{DMS} = \frac{1}{[0.4498 + 2.2128 * Fp^2]}$$

Donde:

DMS = Es la densidad máxima Seca (g/cm³).

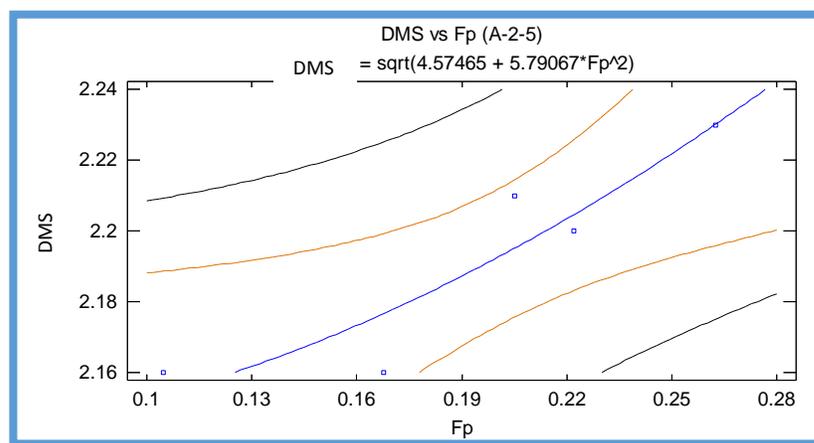
Fp = Es el factor característico de RAMCODES (adimensional).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre DMS y Fp con un nivel de confianza del 95.0%.

Para suelos A-2-5

Datos

TIPO DE SUELO	Dmax.	Fp
San Antonio - Narváez	2.23	0.2624
Guerraguaico - San Diego	2.2	0.2221
San Lorenzo - Narváez	2.16	0.1678
Obrajes - Narváez	2.21	0.2052
Alto Senac - Narváez	2.16	0.1049



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado Doble	0.9257	85.70%
Cuadrado de X	0.9254	85.63%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0.9252	85.60%
Log-Y Cuadrado-X	0.9250	85.57%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0.9246	85.50%
Exponencial	0.9045	81.81%
Raíz Cuadrada de Y	0.9045	81.81%
Inversa de Y	-0.9045	81.80%
Lineal	0.9045	81.80%
Cuadrado de Y	0.9044	81.80%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0.8861	78.51%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0.8859	78.48%
Raíz Cuadrada Doble	0.8858	78.46%
Raíz Cuadrada de X	0.8857	78.45%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0.8855	78.41%
Inversa-Y Log-X	-0.8630	74.47%
Multiplicativa	0.8626	74.41%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0.8625	74.39%
Logaritmo de X	0.8623	74.36%
Cuadrado-Y Log-X	0.8619	74.30%
Doble Inverso	0.8080	65.28%
Curva S	-0.8074	65.19%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0.8071	65.14%
Inversa de X	-0.8068	65.09%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0.8062	65.00%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo doble cuadrado es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 85.701%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

-Variable dependiente: DMS

-Variable independiente: Fp

$$\text{Cuadrado Doble: } Y = \sqrt{a + b \cdot X^2}$$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	4.57465	0.0606463	75.4316	0.0000
Pendiente	5.79067	1.36562	4.24034	0.0240

Coefficiente de Correlación = 0.925748

R-cuadrada = 85.701 por ciento

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\text{DMS} = \sqrt{(4.57465 + 5.79067 \cdot Fp^2)}$$

Donde:

DMS = Es la densidad máxima seca (g/cm³).

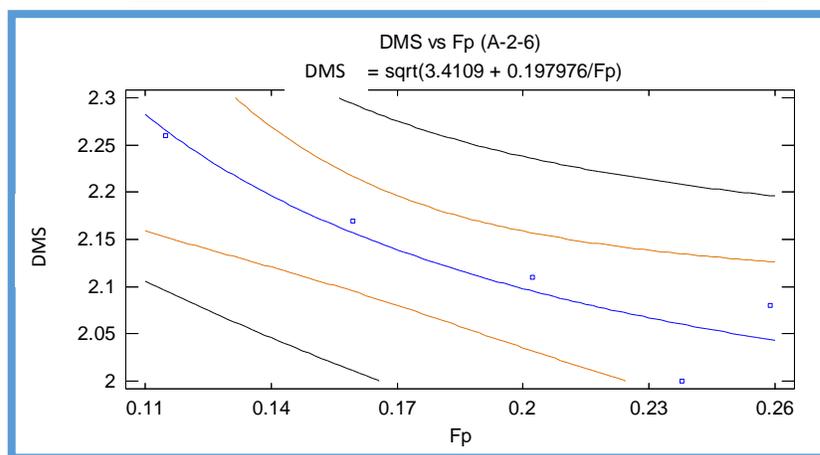
Fp = Es el factor característico de RAMCODES (adimensional).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre DMS y Fp con un nivel de confianza del 95.0%.

Para suelos A-2-6

Datos

TIPO DE SUELO	Dmax.	Fp
Catedral	2.26	0.1150
Posta Municipal	2.17	0.1595
Los Parrales	2.11	0.2021
Temporal-San jac.	2	0.2377
San Antonio	2.08	0.2587



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado-Y Inversa de X	0.9331	87.07%
Cuadrado-Y Log-X	-0.9307	86.63%
Inversa de X	0.9265	85.84%
Logaritmo de X	-0.9253	85.63%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	-0.9241	85.40%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	0.9230	85.19%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	-0.9225	85.09%
Multipliativa	-0.9195	84.54%
Raíz Cuadrada de X	-0.9194	84.52%
Curva S	0.9194	84.52%
Raíz Cuadrada Doble	-0.9168	84.05%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	-0.9141	83.56%
Cuadrado de Y	-0.9140	83.55%
Inversa-Y Log-X	0.9131	83.38%
Doble Inverso	-0.9118	83.14%
Lineal	-0.9099	82.79%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	0.9084	82.51%
Raíz Cuadrada de Y	-0.9076	82.37%
Exponencial	-0.9052	81.94%
Inversa de Y	0.9000	81.01%
Cuadrado Doble	-0.8849	78.30%
Cuadrado de X	-0.8818	77.75%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	-0.8800	77.45%
Log-Y Cuadrado-X	-0.8782	77.12%
Inversa-Y Cuadrado-X	0.8741	76.40%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo Y-cuadrada X-inversa es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 87.0743%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

-Variable dependiente: DMS

-Variable independiente: Fp

Cuadrado-Y Inversa de X: $Y = \sqrt{a + b/X}$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	3.4109	0.258328	13.2037	0.0009
Pendiente	0.197976	0.0440387	4.4955	0.0205

Coefficiente de Correlación = 0.933136

R-cuadrada = 87.0743 por ciento

La ecuación al modelo ajustado es:

$$DMS = \sqrt{\left(3.4109 + \frac{0.1980}{Fp}\right)}$$

Donde:

DMS = Es la densidad máxima seca (g/cm³).

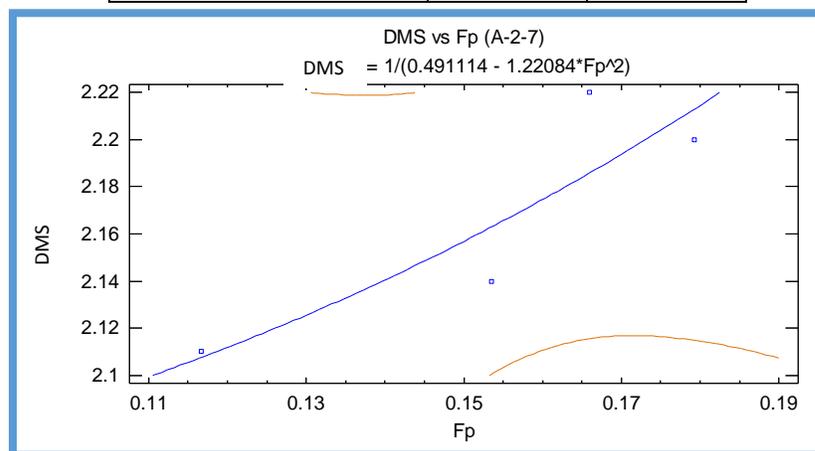
Fp = Es el factor característico de RAMCODES (adimensional).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre DMS y Fp con un nivel de confianza del 95.0%.

Para suelos A-2-7

Datos

TIPO DE SUELO	Dmax.	Fp
Chapacos - Tolomosa	2.22	0.1660
Lourdes – Bella Vista	2.11	0.1167
Fray Quebracho - Catedral	2.14	0.1535
San Blas – San Andres	2.2	0.1792
Bartolome attard - Obrajes	2.05	0.2225



Introduciendo los datos a un modelo estadístico, se obtienen los siguientes resultados.

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Inversa-Y Cuadrado-X	-0.8799	77.41%
Inversa de Y	-0.8779	77.07%
Log-Y Cuadrado-X	0.8773	76.96%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0.8760	76.74%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0.8755	76.66%
Exponencial	0.8753	76.61%
Cuadrado de X	0.8747	76.51%
Raíz Cuadrada de Y	0.8739	76.37%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0.8728	76.18%
Lineal	0.8726	76.14%
Inversa-Y Log-X	-0.8723	76.09%
Cuadrado Doble	0.8721	76.05%
Raíz Cuadrada Doble	0.8715	75.95%
Raíz Cuadrada de X	0.8701	75.71%
Cuadrado de Y	0.8699	75.67%
Multiplicativa	0.8696	75.62%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0.8682	75.38%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0.8674	75.23%
Logaritmo de X	0.8668	75.13%
Cuadrado-Y Log-X	0.8640	74.65%
Doble Inverso	0.8639	74.63%
Curva S	-0.8610	74.14%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0.8596	73.89%
Inversa de X	-0.8582	73.65%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0.8553	73.16%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo Y-inversa X-cuadrada es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 77.4148%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

-Variable dependiente: DMS

-Variable independiente: Fp

$$\text{Inversa-Y Cuadrado-X: } Y = 1/(a + b \cdot X^2)$$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	0.491114	0.0117295	41.8701	0.0006
Pendiente	-1.22084	0.466278	-2.61827	0.1201

Coefficiente de Correlación = -0.879857

R-cuadrada = 77.4148 por ciento

La ecuación al modelo ajustado es:

$$\text{DMS} = \frac{1}{[0.4911 - 1.22084 * Fp^2]}$$

Donde:

DMS = Es la densidad máxima seca (g/cm³).

Fp = Es el factor característico de RAMCODES (adimensional).

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual a 0.05, no hay una relación estadísticamente significativa entre DMS y Fp con un nivel de confianza del 95.0% ó más.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA DE RAMCODES

4.1. Introducción

Para el análisis y de la metodología de RAMCODES en la clasificación de suelos granulares, se realizará un estudio para el potencial de densificación de los suelos granulares, mediante correlaciones entre la densidad máxima seca versus factor característico y contenido de humedad óptimo versus factor característico. Con el objeto de establecer correlaciones entre los mismos.

Luego de efectuar la correlación entre la densidad versus factor característico y contenido de humedad versus factor característico. Se realizará los siguientes análisis:

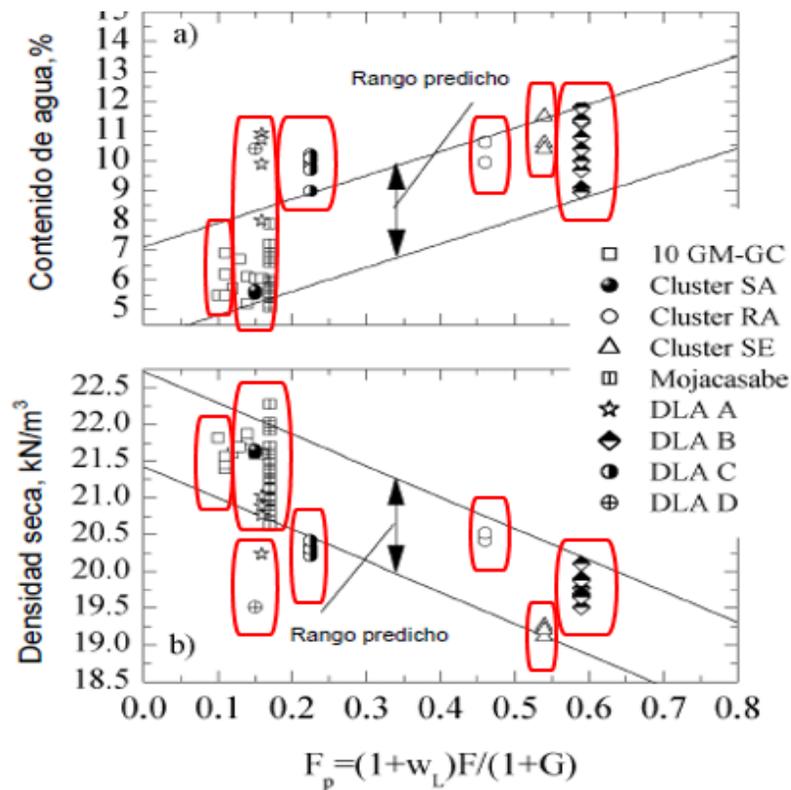
- Análisis de los rangos propuestos por Sánchez-Leal, F. J. para el pronóstico de la humedad.
- Análisis de los rangos propuestos por Sánchez-Leal, F. J. para el pronóstico de la densidad.
- Determinar la ecuación con mayor Tendencia para el pronóstico de la Densidad y humedad de los suelos en estudio.
- Pronóstico de la densidad y la humedad para los suelos con la ecuación de mayor tendencia.

4.2. Potencial de densificación en los suelos estudiados.

Para la presente investigación se precedió a efectuar un trabajo similar al aplicado por Sánchez-Leal, F. J. con la excepción de que las 35 muestras que se utilizaron comprendían a los 7 tipos de suelos granulares de la clasificación AASTHO. Frente a las 84 muestras utilizados por Sánchez-Leal, F. J.

De la investigación y del análisis de las ecuaciones 6 y 7 se puede apreciar que el comportamiento de la densidad y la humedad se presenta lineal y de forma vertical en función a rangos de variación del Factor Característico F_p como se lo muestra a continuación en análisis efectuado a la figura 24.

Figura 24. Análisis del comportamiento de la humedad y la densidad seca versus el factor característico f_p .

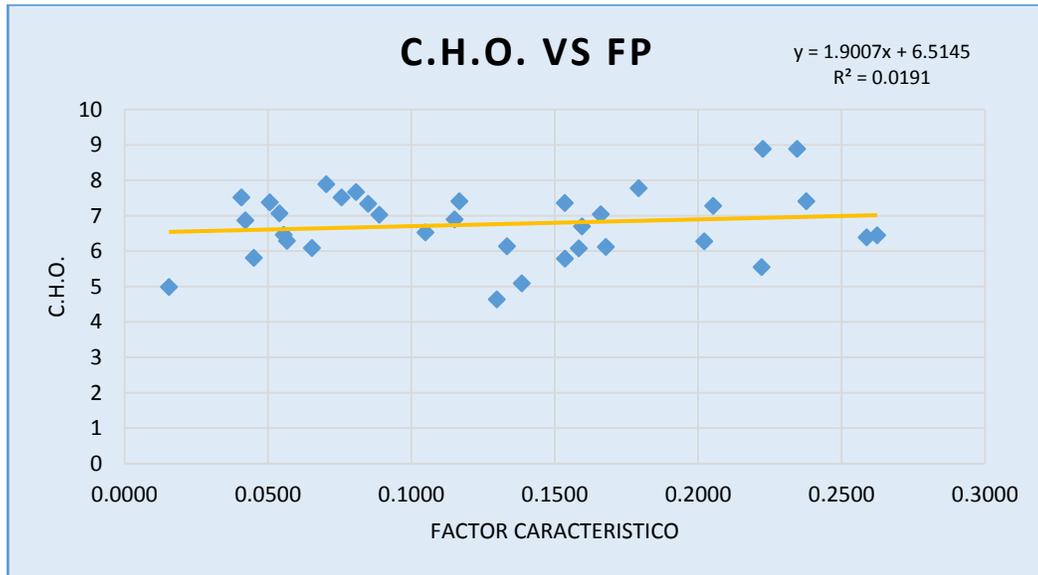


Fuente: Sánchez-Leal "Manual de RAMCODES"

Como se puede verificar en la figura 24 debido a este comportamiento se presume por deducción propia que Sánchez-Leal, F. J. Define establecer un rango de variación con lo cual se podría establecer una correlación del tipo lineal. Tal como lo demuestran las ecuaciones 6 y 7 para la determinación de la humedad y la densidad seca.

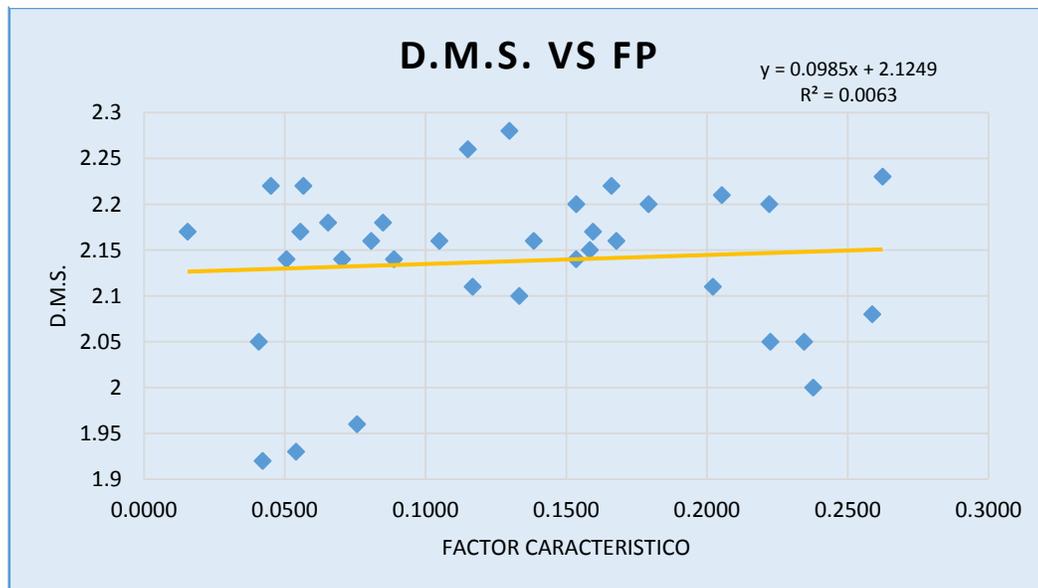
Es en ese sentido y debido a que los suelos en estudio se encuentran comprendidos entre un rango de F_p desde 0,0155 a 0.2624 es que se procedió a efectuar el análisis en ese determinado rango tal como se muestra en las siguientes gráficas

Figura 25. Gráfica contenido de humedad – factor característico para todos los suelos en estudio



Fuente: Elaboración Propia

Figura 26. Gráfica densidad seca – factor característico para todos los suelos en estudio



Fuente: Elaboración Propia

Como se puede verificar del análisis de las figuras 25 y 26 el comportamiento de la densidad seca y la humedad se presenta lineal y de forma vertical en función a rangos de variación del Factor Característico Fp similar y tal como se observó en análisis efectuado a la figuras 24 del estudio efectuado por Sánchez-Leal, F. J. Por otra parte, se puede apreciar que la correlación es menor cuando el rango de variación de Fp es menor. Debido al comportamiento que se mostró con anterioridad. En las figuras 25 y 26.

De acuerdo a las ecuaciones planteadas por Sánchez-Leal, F. J.: para pronosticar la humedad y la densidad seca la variación sería de $\pm 0.65\text{g/cm}^3$ para la densidad y $\pm 1.5\%$ para la humedad

Ecuación 6

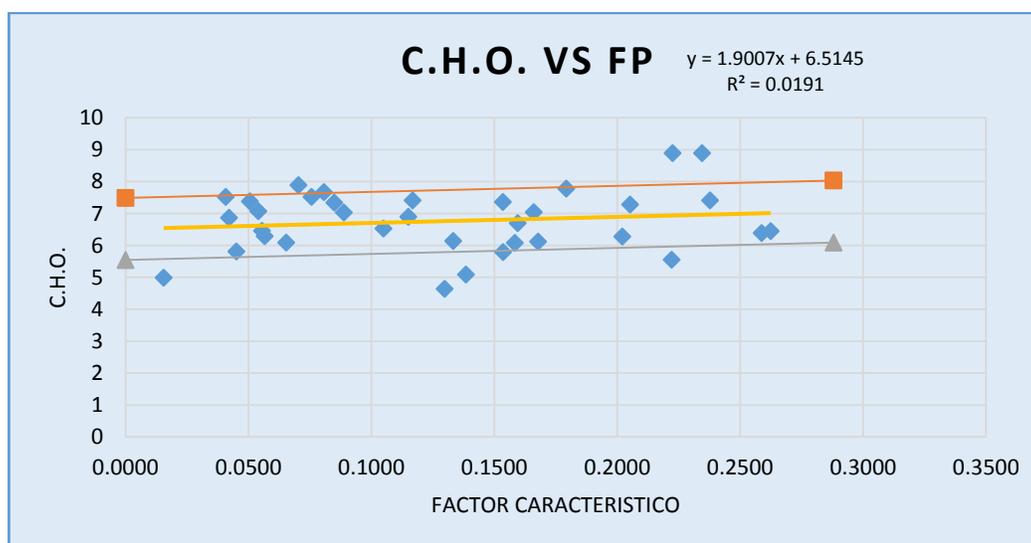
$$\text{DMS} = A + B * \text{Fp}$$

Ecuación 7

$$\text{CAO} = C + D * \text{Fp}$$

Si aplicamos los Límites superior e inferior propuestos por el autor a la figuras 25 y 26 se tiene las siguientes gráficas, para los suelos estudiados

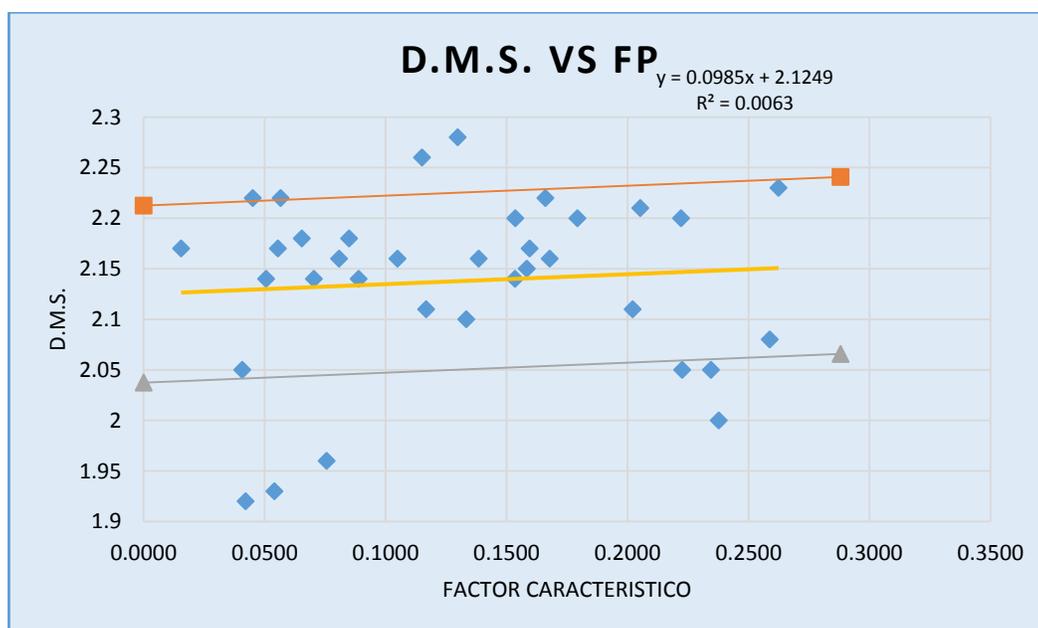
Figura 27. Análisis de los rangos propuestos por Sánchez-leal, f. j. para el pronóstico de la humedad



Fuente: Elaboración Propia

Como se puede verificar en la figura 27 los rangos propuestos por **Sánchez- Leal, F. J.** para la variación de la humedad se adecuan a los generados por el presente estudio, es decir, que los datos del estudio entran en su mayoría dentro de estos rangos.

Figura 28. Análisis de los rangos propuestos por Sánchez-leal, f. j. para el pronóstico de la densidad seca

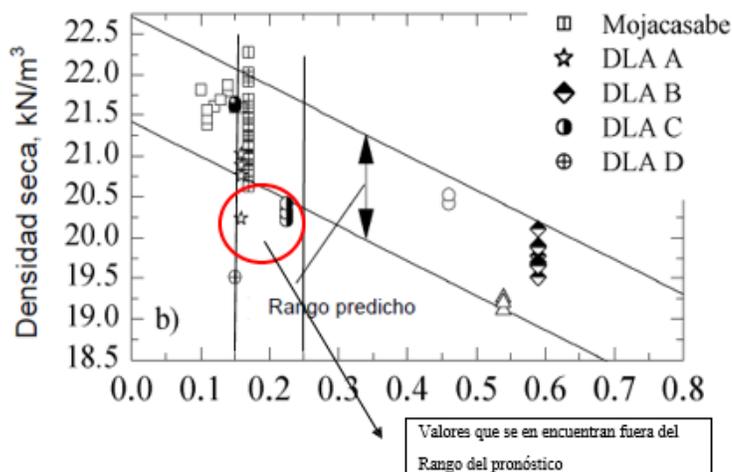


Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar los rangos propuestos por Sánchez-Leal, F. J. Para el pronóstico de la densidad seca encierran la mayoría de los datos del estudio, con la excepción de los valores que se encuentran entre 0.0421 y 0.2377 de Fp y con densidades de 1.92 a 2.05 gr/cm³.

Situación que también se puede apreciar en la figura 28 del análisis Sánchez- Leal, F. J. en lo que se refiere a la densidad seca como se lo demuestra a continuación en una ampliación del sector dicha figura la misma que se refleja en la figura 29.

Figura 29. Ampliación figura 24



Fuente: Sánchez-Leal "Manual de RAMCODES"

Luego de analizar los datos obtenidos por el estudio y la comparación con los obtenidos por el autor de RAMCODES. Se propuso analizar una nueva correlación que se asemeja con mayor certeza al comportamiento de los valores de los suelos de estudio. Siendo el resultado de ese análisis las siguientes ecuaciones:

4.2.1. Ecuaciones para el pronóstico de la densidad máxima seca de los suelos estudiados.

- Para Suelo A-1-a:

$$DMS = (1.47248 + 0.687902 * Fp^2)^2$$

- Para Suelo A-1-b:

$$DMS = \frac{1}{\left[0.3924 + \frac{0.0104}{Fp}\right]}$$

- Para Suelo A-3:

$$DMS = \frac{1}{[0.5258 - 2.7215 * Fp^2]}$$

- Para Suelo A-2-4:

$$DMS = \frac{1}{[0.4498 + 2.2128 * Fp^2]}$$

- Para Suelo A-2-5:

$$DMS = \sqrt{(4.57465 + 5.79067 * Fp^2)}$$

- **Para Suelo A-2-6:**

$$DMS = \sqrt{\left(3.4109 + \frac{0.1980}{Fp}\right)}$$

- **Para Suelo A-2-7:**

$$DMS = \frac{1}{[0.4911 - 1.22084 * Fp^2]}$$

4.2.2. Ecuaciones para el pronóstico de la humedad óptima de los suelos estudiados.

- **Para Suelo A-1-a:**

$$CHO = \frac{1}{[0.0768 - 0.0296 * \ln(FP)]}$$

- **Para Suelo A-1-b:**

$$CHO = e^{[4.258 + 1.333 * \ln(Fp)]}$$

- **Para Suelo A-3:**

$$CHO = \sqrt{\left(67.413 - \frac{0.8166}{Fp}\right)}$$

- **Para Suelo A-2-4:**

$$CHO = \sqrt{(53.1428 + 462.305 * Fp^2)}$$

- **Para Suelo A-2-5:**

$$CHO = \sqrt{(46.0834 - 309.103 * Fp^2)}$$

- **Para Suelo A-2-6:**

$$CHO = \sqrt{\left(33.4205 + \frac{1.6438}{Fp}\right)}$$

- **Para Suelo A-2-7:**

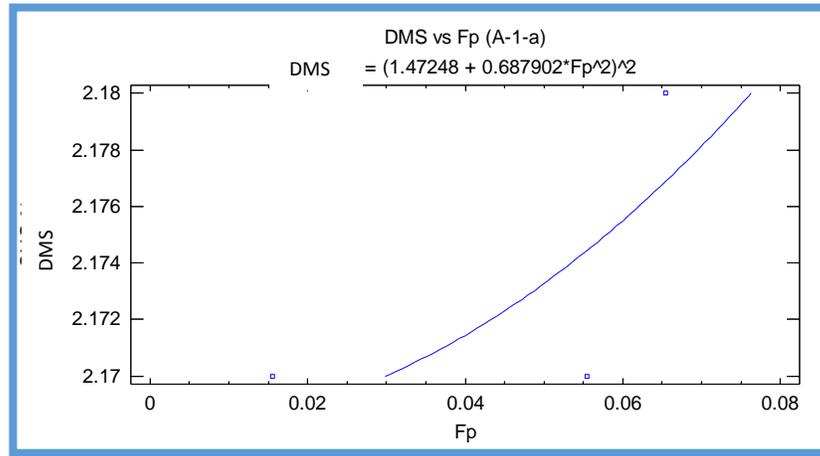
$$CHO = e^{[1.8978 + 5.4232 * Fp^2]}$$

Estas ecuaciones fueron las que tuvieron mayor correlación para el pronóstico de la densidad máxima y el contenido de humedad.

Razón por la cual estas ecuaciones serán analizadas en adelante para evaluar su comportamiento en general.

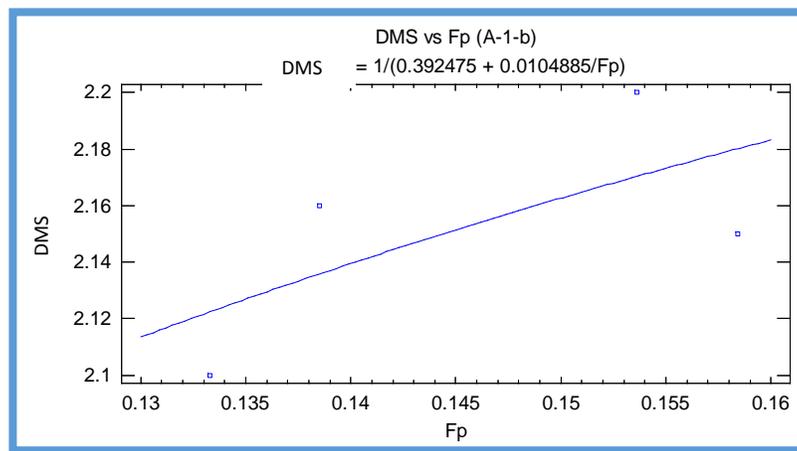
Dichas ecuaciones fueron encontradas de los siguientes graficas:

Figura 30. Ecuación con mayor tendencia para el pronóstico de la densidad seca para suelos A-1-a



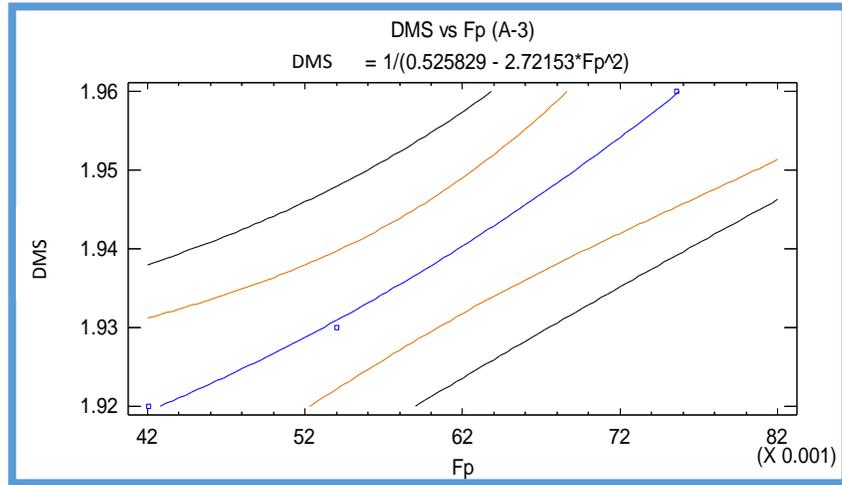
Fuente: Elaboración Propia

Figura 31. Ecuación con mayor tendencia para el pronóstico de la densidad seca para suelos A-1-b



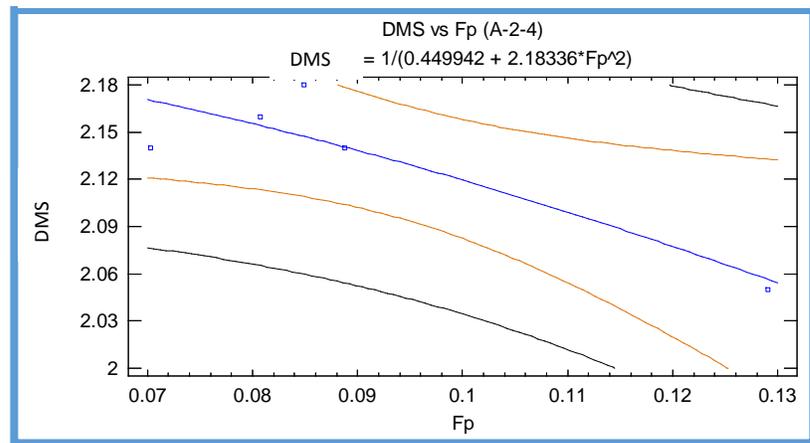
Fuente: Elaboración Propia

Figura 32. Ecuación con mayor tendencia para el pronóstico de la densidad seca para suelos A-3



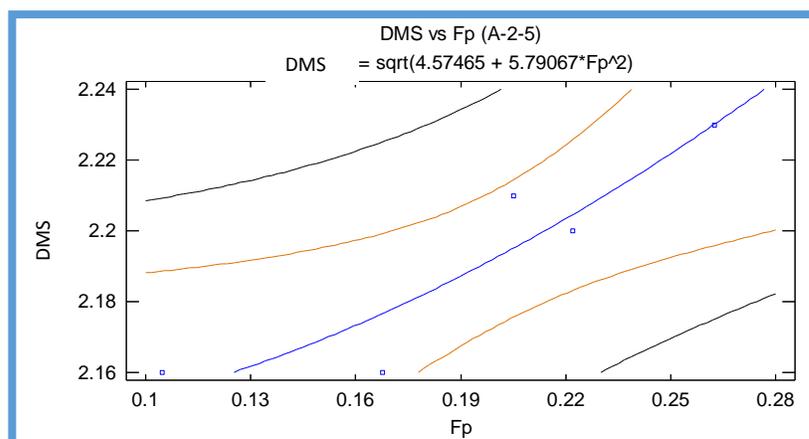
Fuente: Elaboración Propia

Figura 33. Ecuación con mayor tendencia para el pronóstico de la densidad seca para suelos A-2-4



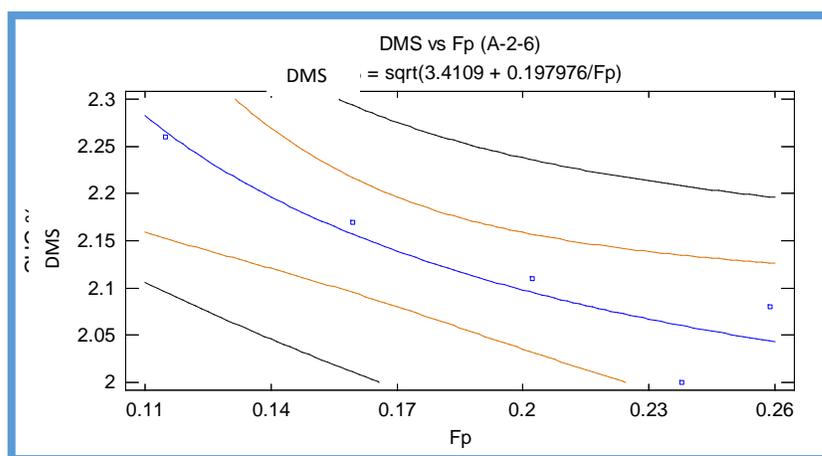
Fuente: Elaboración Propia

Figura 34. Ecuación con mayor tendencia para el pronóstico de la densidad seca para suelos A-2-5



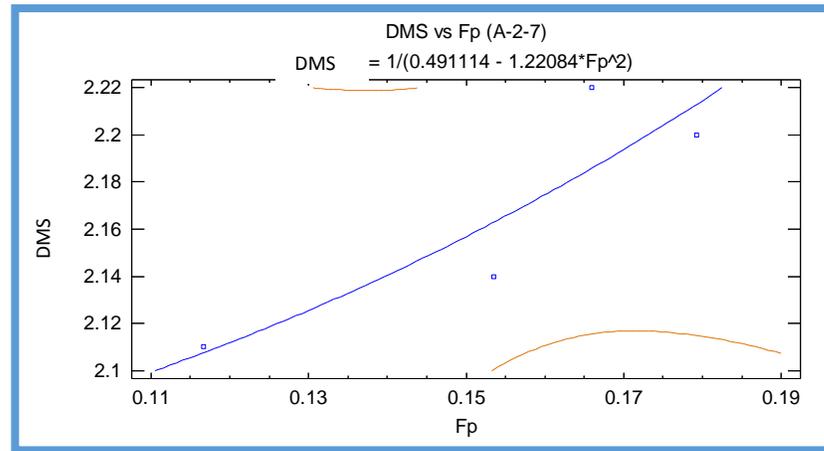
Fuente: Elaboración Propia

Figura 35. Ecuación con mayor tendencia para el pronóstico de la densidad seca para suelos A-2-6



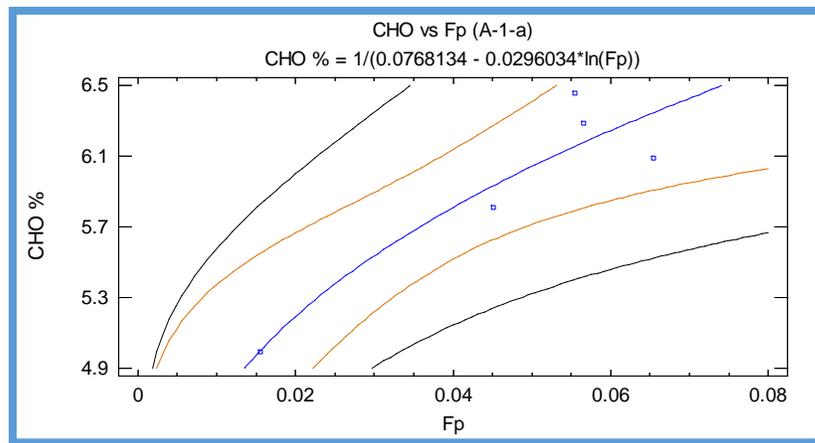
Fuente: Elaboración Propia

Figura 36. Ecuación con mayor tendencia para el pronóstico de la densidad seca para suelos A-2-7



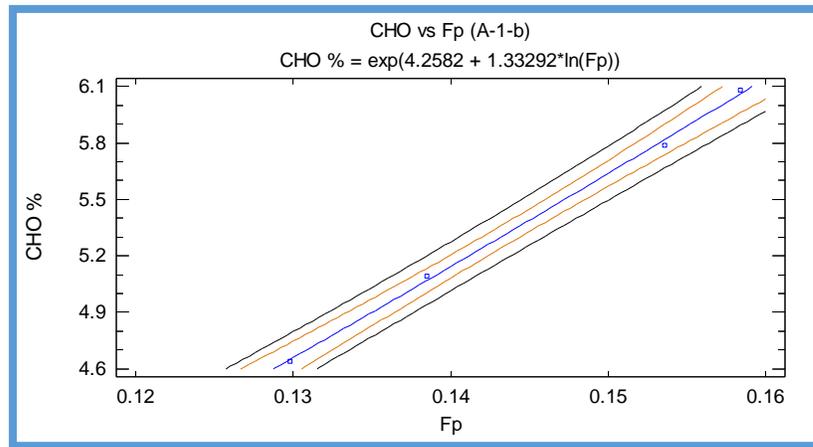
Fuente: Elaboración Propia

Figura 37. Ecuación con mayor tendencia para el pronóstico del contenido de humedad óptimo para suelos A-1-a



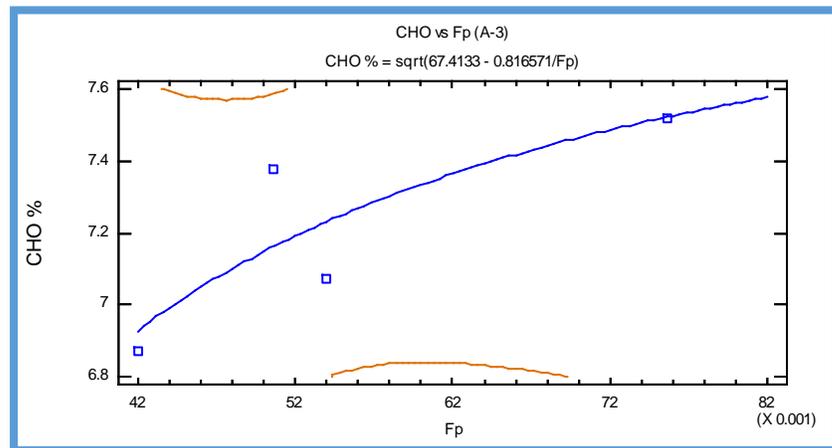
Fuente: Elaboración Propia

Figura 38. Ecuación con mayor tendencia para el pronóstico del contenido de humedad óptimo para suelos A-1-b



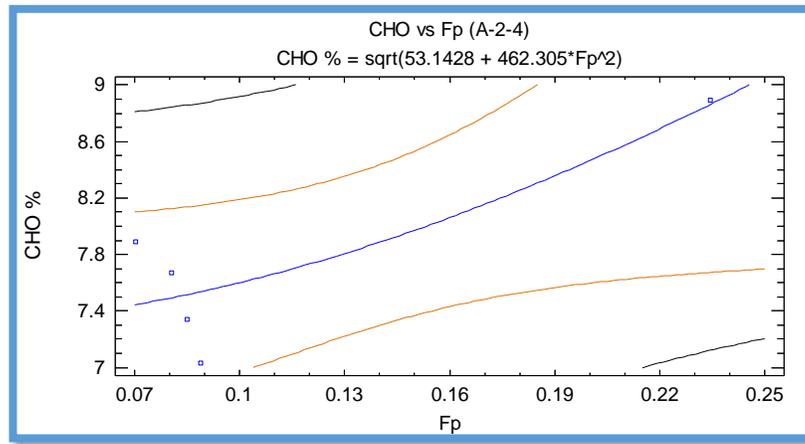
Fuente: Elaboración Propia

Figura 39. Ecuación con mayor tendencia para el pronóstico del contenido de humedad óptimo para suelos A-3



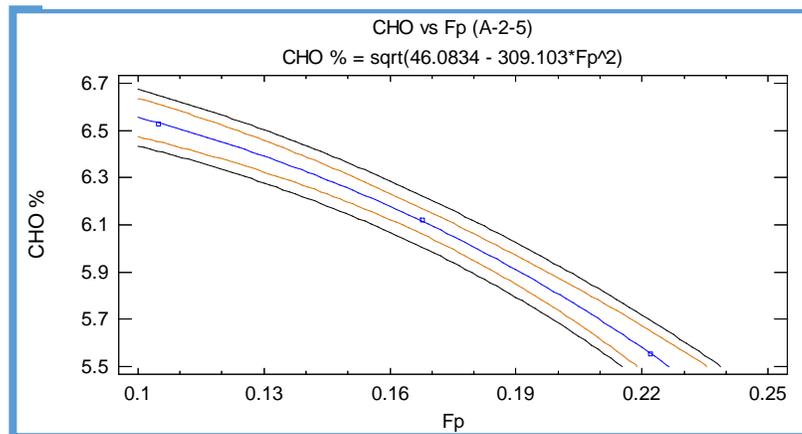
Fuente: Elaboración Propia

Figura 40. Ecuación con mayor tendencia para el pronóstico del contenido de humedad óptimo para suelos A-2-4



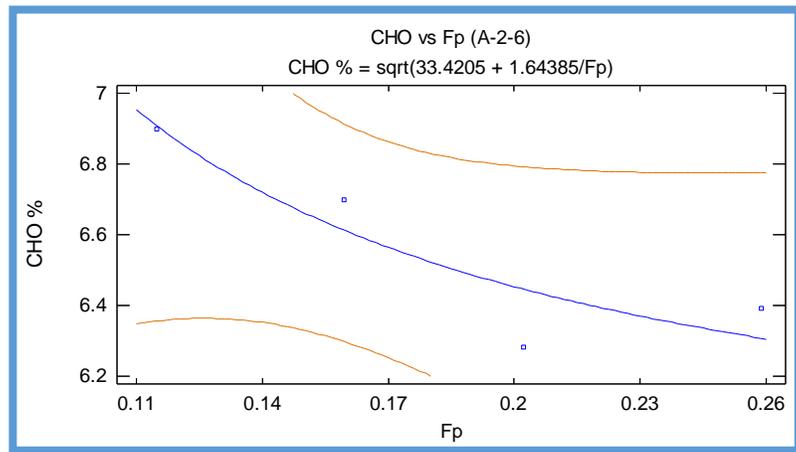
Fuente: Elaboración Propia

Figura 41. Ecuación con mayor tendencia para el pronóstico del contenido de humedad óptimo para suelos A-2-5



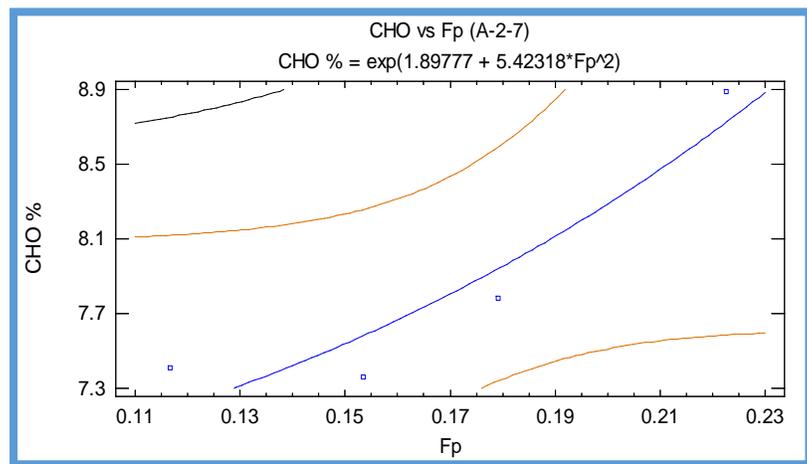
Fuente: Elaboración Propia

Figura 42. Ecuación con mayor tendencia para el pronóstico del contenido de humedad óptimo para suelos A-2-6



Fuente: Elaboración Propia

Figura 43. Ecuación con mayor tendencia para el pronóstico del contenido de humedad óptimo para suelos A-2-7



Fuente: Elaboración Propia

4.3. Pronóstico de la densidad seca y la humedad óptima mediante las ecuaciones 6 y 7 propuestas por Sánchez-Leal, F. J.

Para el análisis de las ecuaciones de pronóstico planteadas Sánchez-Leal, F. J. se verificará cual es la variación de los valores pronosticados con los obtenidos en el laboratorio, procedimiento que se desarrolla de aquí en adelante.

4.3.1 Pronóstico de la densidad seca y la humedad para los suelos estudiados con la aplicación de las ecuaciones 6 y 7 de la metodología de RAMCODES.

En el cuadro siguiente, se puede apreciar los valores determinados mediante ensayos de laboratorio y los pronosticados para los suelos en estudio, tanto para la densidad seca y la humedad conforme a la utilización de las ecuaciones 6 y 7, además de la variación de los mismos.

Tabla 13 Pronóstico de la DMS y el CHO para los suelos en estudio

Núm.	Tipo de suelo	Proctor T-180		RAMCODES	C.H.O pronosticado RAMCODES	D.M.S. pronosticado RAMCODES	Variación de D.M.S. calculada y pronosticada	Variación de C.H.O. calculada y pronosticada
		Laboratorio						
		C.H.O.	D.M.S.					
		%	g/cm ³		%	g/cm ³		
1	San Luis	6.29	2.22	0.0566	6.022	2.227	0.007	-0.268
2	Temporal 1	6.09	2.18	0.0654	6.092	2.224	0.044	0.002
3	Temporal 2	5.81	2.22	0.0451	5.930	2.232	0.012	0.120
4	San Andrés	4.99	2.17	0.0155	5.694	2.245	0.075	0.704
5	Erika 1	6.46	2.17	0.0555	6.014	2.228	0.058	-0.446
6	Temporal 3	5.09	2.16	0.1385	6.676	2.192	0.032	1.586
7	Turumayo	6.14	2.1	0.1333	6.635	2.194	0.094	0.495
8	Posta Municipal	6.08	2.15	0.1584	6.835	2.183	0.033	0.755
9	San Mateo	5.79	2.2	0.1536	6.797	2.185	-0.015	1.007
10	Erika 2	4.64	2.28	0.1298	6.607	2.196	-0.084	1.967
11	Camacho	7.07	1.93	0.0540	6.002	2.229	0.299	-1.068
12	Bella Vista	6.87	1.92	0.0421	5.907	2.234	0.314	-0.963
13	Chocloca	7.52	2.05	0.0407	5.896	2.234	0.184	-1.624
14	Obrajes	7.52	1.96	0.0756	6.174	2.219	0.259	-1.346
15	La Pintada	7.38	2.14	0.0506	5.974	2.230	0.090	-1.406
16	Medinacelli	8.89	2.05	0.2345	7.443	2.150	0.100	-1.447
17	Rancho	7.67	2.16	0.0807	6.215	2.217	0.057	-1.455
18	Cruce Sella	7.34	2.18	0.0849	6.248	2.215	0.035	-1.092

19	Chaguaya	7.03	2.14	0.0888	6.280	2.213	0.073	-0.750
20	Juntas	7.89	2.14	0.0703	6.132	2.221	0.081	-1.758
21	San Antonio - Narváez	6.45	2.23	0.2624	7.666	2.138	-0.092	1.216
22	Guerraguaico - San Diego	5.55	2.2	0.2221	7.345	2.155	-0.045	1.795
23	San Lorenzo - Narváez	6.12	2.16	0.1678	6.911	2.179	0.019	0.791
24	Obrajes - Narváez	7.28	2.21	0.2052	7.210	2.163	-0.047	-0.070
25	Alto Senac - Narváez	6.53	2.16	0.1049	6.408	2.206	0.046	-0.122
26	Catedral	6.9	2.26	0.1150	6.489	2.202	-0.058	-0.411
27	Posta Municipal	6.7	2.17	0.1595	6.844	2.183	0.013	0.144
28	Los Parrales	6.28	2.11	0.2021	7.185	2.164	0.054	0.905
29	Temporal-San jac.	7.41	2	0.2377	7.469	2.149	0.149	0.059
30	San Antonio	6.39	2.08	0.2587	7.637	2.140	0.060	1.247
31	Chapacos - Tolomosa	7.04	2.22	0.1660	6.897	2.180	-0.040	-0.143
32	Lourdes - Bella Vista	7.41	2.11	0.1167	6.503	2.201	0.091	-0.907
33	Fray Quebracho - Catedral	7.36	2.14	0.1535	6.796	2.185	0.045	-0.564
34	San Blas - San Andrés	7.78	2.2	0.1792	7.002	2.174	-0.026	-0.778
35	Bartolome attard - Obrajes	8.89	2.05	0.2225	7.348	2.155	0.105	-1.542

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en la tabla 13 para los suelos en estudio la mayoría de los datos se encuentran dentro del rango de variación propuesto por el autor de la metodología de clasificación cuantitativa puesto que la variación es menor a los rangos tal como se muestra en la tabla 14.

**Tabla 14 Variación de la DMS y CHO
calculada Frente a las ecuaciones
pronosticadas**

Variación	Densidad Seca g/cm ³	Humedad %
Mínima	-0,092	0,090
Máxima	0,0314	1,350
Rango	± 0,065	± 1,5%

Fuente: Elaboración Propia

4.4 Análisis de las ecuaciones halladas para el pronóstico de DMS y CHO para los suelos estudiados.

Este análisis nos permitirá valorar la tendencia de las ecuaciones encontradas para cada grupo de los suelos estudiados y si las mismas presentan menor variación de los valores pronosticados, con los obtenidos en laboratorio, con referencia a lo propuesto por RAMCODES.

Tabla 15 Análisis de las ecuaciones de pronóstico de la DMS y CHO para los suelos estudiados.

NUM.	TIPO DE SUELO	Proctor T-180		RAMCODES	C.H.O pronosticado RAMCODES	D.M.S. pronosticado RAMCODES	variación de D.M.S. calculada y pronosticada	variación de C.H.O. calculada y pronosticada
		laboratorio						
		C.H.O.	D.M.S.	Fp	%	g/cm ³		
		%	g/cm ³		%	g/cm ³		
1	San Luis	6.29	2.22	0.0566	6.247	2.175	-0.045	-0.043
2	Temporal 1	6.09	2.18	0.0654	6.414	2.177	-0.003	0.324
3	Temporal 2	5.81	2.22	0.0451	6.000	2.172	-0.048	0.190
4	San Andres	4.99	2.17	0.0155	5.059	2.169	-0.001	0.069
5	Erika 1	6.46	2.17	0.0555	6.225	2.175	0.005	-0.235
6	Temporal 3	5.09	2.16	0.1385	5.071	2.139	-0.021	-0.019
7	Turumayo	6.14	2.1	0.1333	4.820	2.126	0.026	-1.320
8	Posta Municipal	6.08	2.15	0.1584	6.065	2.183	0.033	-0.015
9	San Mateo	5.79	2.2	0.1536	5.821	2.173	-0.027	0.031
10	Erika 2	4.64	2.28	0.1298	4.651	2.116	-0.164	0.011
11	Camacho	7.07	1.93	0.0540	7.232	1.874	-0.056	0.162
12	Bella Vista	6.87	1.92	0.0421	6.930	1.885	-0.035	0.060
13	Chocloca	7.52	2.05	0.0407	6.883	1.886	-0.164	-0.637
14	Obrajes	7.52	1.96	0.0756	7.524	1.847	-0.113	0.004
15	La Pintada	7.38	2.14	0.0506	7.161	1.877	-0.263	-0.219
16	Medinacelli	8.89	2.05	0.2345	8.863	1.749	-0.301	-0.027
17	Rancho	7.67	2.16	0.0807	7.494	2.154	-0.006	-0.176
18	Cruce Sella	7.34	2.18	0.0849	7.515	2.147	-0.033	0.175
19	Chaguaya	7.03	2.14	0.0888	7.536	2.140	0.000	0.506
20	Juntas	7.89	2.14	0.0703	7.445	2.146	0.006	-0.445
21	San Antonio - Narváez	6.45	2.23	0.2624	6.231	2.230	0.000	-0.219
22	Guerraguaico - San Diego	5.55	2.2	0.2221	5.877	2.205	0.005	0.327
23	San Lorenzo - Narváez	6.12	2.16	0.1678	5.999	2.177	0.017	-0.121
24	Obrajes - Narváez	7.28	2.21	0.2052	7.688	2.195	-0.015	0.408

25	Alto Senac - Narváez	6.53	2.16	0.1049	7.034	2.154	-0.006	0.504
26	Catedral	6.9	2.26	0.1150	6.907	2.265	0.005	0.007
27	Posta Municipal	6.7	2.17	0.1595	6.613	2.157	-0.013	-0.087
28	Los Pinales	6.28	2.11	0.2021	6.446	2.095	-0.015	0.166
29	Temporal-Sanjac.	7.41	2	0.1094	6.961	2.285	0.285	-0.449
30	San Antonio	6.39	2.08	0.2587	6.307	2.044	-0.036	-0.083
31	Chapacos - Tolomosa	7.04	2.22	0.1660	7.757	2.186	-0.034	0.717
32	Lourdes – Bella Vista	7.41	2.11	0.1167	7.192	2.108	-0.002	-0.218
33	Fray Quebracho - Catedral	7.36	2.14	0.1535	7.590	2.163	0.023	0.230
34	San Blas – San Andres	7.78	2.2	0.1792	7.951	2.213	0.013	0.171
35	Bartolome attard - Obrajés	8.89	2.05	0.2225	8.738	2.322	0.272	-0.152

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en la tabla 15, para los suelos en estudio la mayoría de los datos se encuentran dentro del rango de variación propuestos por la metodología de clasificación cuantitativa, puesto que la variación es menor a los rangos tal como se muestra en la tabla 16

Tabla 16 Variación de la DMS y CHO calculada frente a las ecuaciones pronosticadas

Variación	Densidad Seca g/cm ³	Humedad %
Mínima	-0,301	-1.320
Máxima	0,281	0.717
Rango	± 0,0875	± 0.972%

Fuente: Elaboración Propia

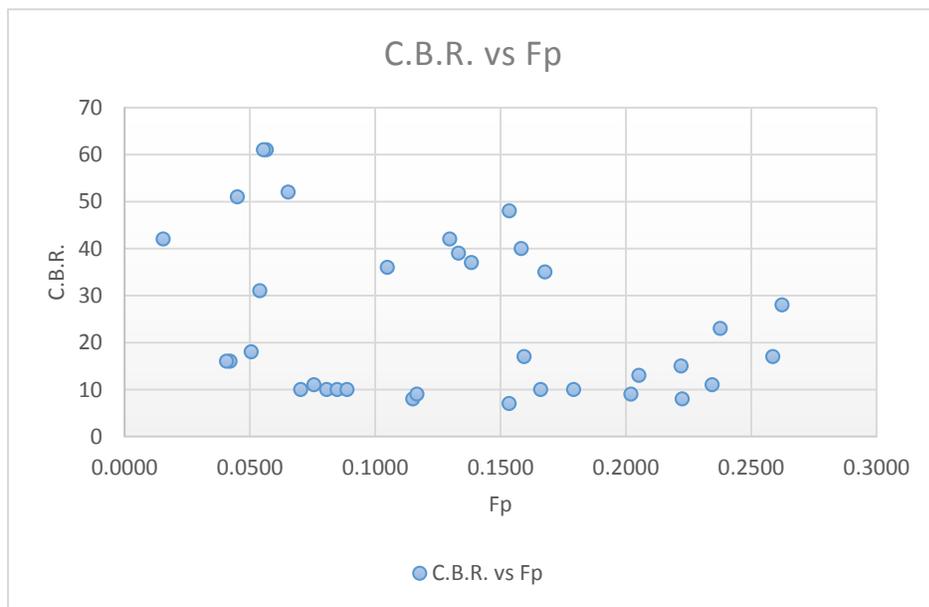
Si analizamos en porcentaje referente del total de muestras estudiadas que para el caso son 35 se tendría, que 8 de las muestras para la densidad seca se encuentran fuera del rango lo que indica que el 22.22% de la muestras esta fuera del rango predicho por Sánchez-Leal, F. J. en lo que refiera a los suelos estudiados.

Por otra parte, en lo que refiere a la humedad existen 7 muestras que salen del rango predicho lo que significa 20% del total siendo la máxima variación de 1.320% es decir, que estarían un poco arriba de los rangos propuestos por Sánchez-Leal, F. J.

4.5. Análisis del C.B.R. en función al factor característico de RAMCODES.

Se hizo un análisis similar a los anteriores donde se hizo una relación, entre el C.B.R. y el factor característico de RAMCODES, pero en este caso se hizo el análisis para cada tipo de suelo granular porque como se muestra en la figura 37 los valores C.B.R. tienen diferentes valores dependiendo las características de cada material y mucho más difícil tratar de agruparlos en una sola ecuación.

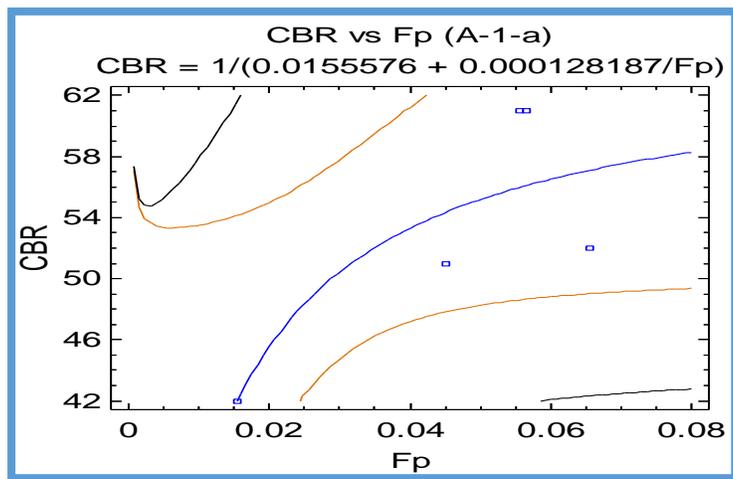
Figura 44. Gráfica C.B.R. vs Fp par todos los suelos en estudio



Fuente: Elaboración Propia

A continuación se muestra las gráficas C.B.R. vs Fp y ecuaciones de mayor correlación para cada tipo de suelo granular estudiado.

Figura 45. Gráfica C.B.R. vs Fp para suelos A-1-a



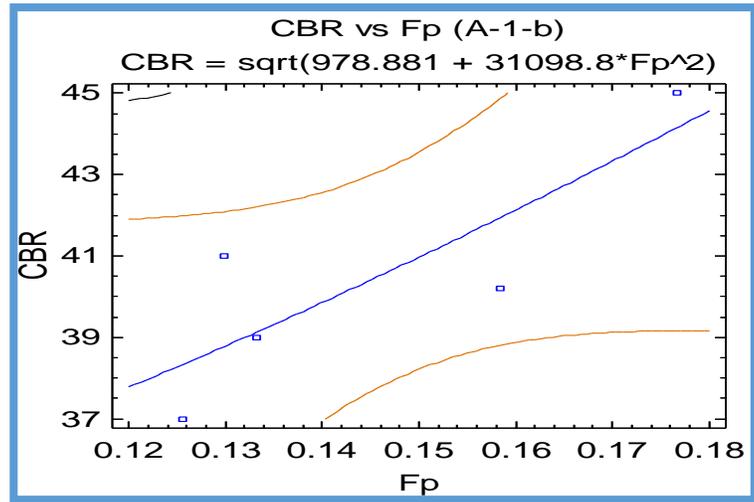
Fuente: Elaboración Propia

$$CBR = \frac{1}{\left[0.0155576 + \frac{0.000128187}{Fp}\right]}$$

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Doble Inverso	0.8764	76.80%
Inversa-Y Log-X	-0.8674	75.24%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0.8535	72.85%
Curva S	-0.8462	71.61%
Multiplicativa	0.8382	70.26%
Inversa de Y	-0.8311	69.06%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0.8300	68.89%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0.8250	68.06%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0.8225	67.65%
Inversa de X	-0.8132	66.14%
Raíz Cuadrada Doble	0.8095	65.53%
Logaritmo de X	0.8062	64.99%
Exponencial	0.8031	64.49%
Raíz Cuadrada de X	0.7935	62.97%
Raíz Cuadrada de Y	0.7880	62.09%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0.7785	60.61%
Lineal	0.7723	59.64%
Cuadrado-Y Log-X	0.7723	59.64%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0.7603	57.81%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0.7602	57.79%
Cuadrado de Y	0.7397	54.71%
Log-Y Cuadrado-X	0.7335	53.80%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0.7191	51.70%
Cuadrado de X	0.7041	49.57%
Cuadrado Doble	0.6729	45.28%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

Figura 46. Gráfica C.B.R. vs Fp para suelos A-1-b



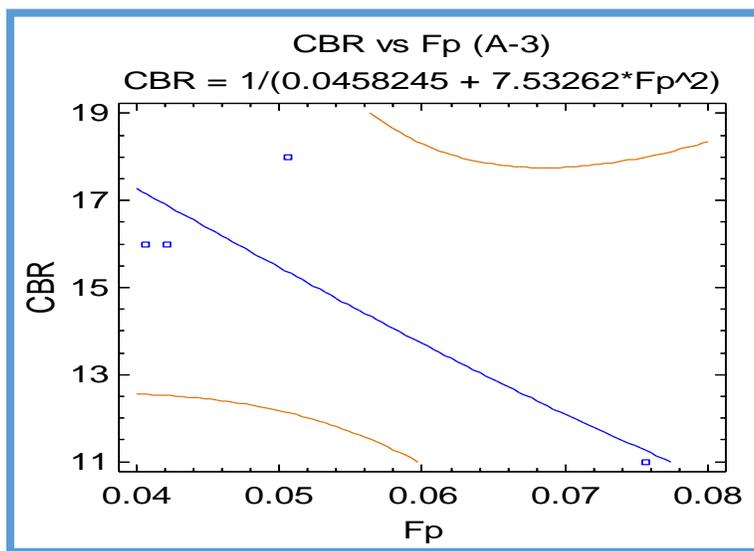
Fuente: Elaboración Propia

$$CBR = \sqrt{(978.881 + 31098.8 * Fp^2)}$$

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado Doble	0.8454	71.47%
Cuadrado de X	0.8405	70.65%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0.8378	70.19%
Cuadrado de Y	0.8365	69.97%
Log-Y Cuadrado-X	0.8348	69.69%
Lineal	0.8326	69.33%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0.8319	69.21%
Raíz Cuadrada de Y	0.8304	68.95%
Raíz Cuadrada de X	0.8286	68.65%
Exponencial	0.8279	68.54%
Cuadrado-Y Log-X	0.8273	68.44%
Raíz Cuadrada Doble	0.8266	68.32%
Logaritmo de X	0.8245	67.97%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0.8244	67.96%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0.8227	67.69%
Inversa de Y	-0.8223	67.62%
Multiplicativa	0.8208	67.37%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0.8193	67.13%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0.8181	66.92%
Inversa-Y Log-X	-0.8163	66.63%
Inversa de X	-0.8163	66.63%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0.8151	66.43%
Curva S	-0.8137	66.21%
Doble Inverso	0.8103	65.65%
Inversa-Y Cuadrado-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

Figura 47. Gráfica C.B.R. vs Fp para suelos A-3



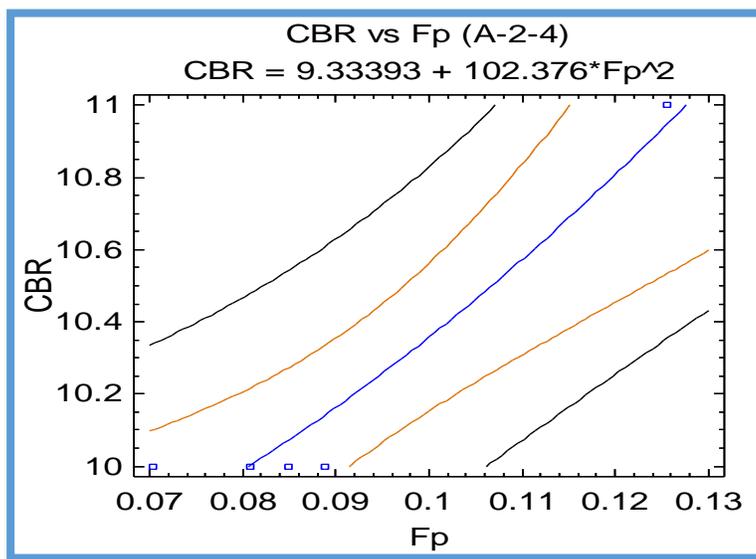
Fuente: Elaboración Propia

$$CBR = \frac{1}{[0.0458 + 7.5326 * Fp^2]}$$

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Inversa-Y Cuadrado-X	0.9123	83.23%
Log-Y Cuadrado-X	-0.8898	79.17%
Inversa de Y	0.8857	78.44%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	-0.8763	76.79%
Cuadrado de X	-0.8613	74.18%
Exponencial	-0.8603	74.02%
Inversa-Y Log-X	0.8516	72.52%
Raíz Cuadrada de Y	-0.8454	71.46%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	-0.8427	71.02%
Lineal	-0.8288	68.69%
Raíz Cuadrada Doble	-0.8270	68.39%
Cuadrado Doble	-0.8265	68.31%
Multipliativa	-0.8232	67.77%
Doble Inverso	-0.8106	65.70%
Raíz Cuadrada de X	-0.8095	65.54%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	-0.8066	65.07%
Cuadrado de Y	-0.7908	62.53%
Logaritmo de X	-0.7884	62.15%
Curva S	0.7791	60.70%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	-0.7698	59.26%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	0.7609	57.89%
Cuadrado-Y Log-X	-0.7469	55.78%
Inversa de X	0.7409	54.89%
Cuadrado-Y Inversa de X	0.6959	48.43%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

Figura 48. Gráfica C.B.R. vs Fp para suelos A-2-4



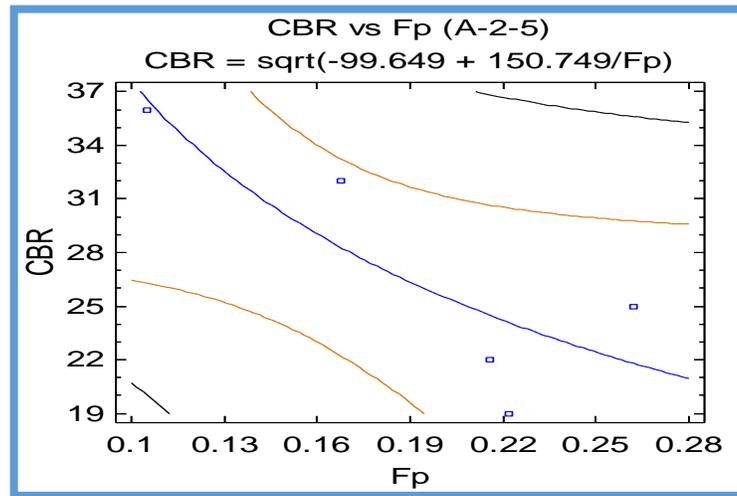
Fuente: Elaboración Propia

$$CBR = 9.334 + 102.376 * Fp^2$$

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado de X	0.9659	93.30%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0.9659	93.30%
Log-Y Cuadrado-X	0.9659	93.30%
Cuadrado Doble	0.9659	93.30%
Inversa de Y	-0.9444	89.19%
Exponencial	0.9444	89.19%
Lineal	0.9444	89.19%
Raíz Cuadrada de Y	0.9444	89.19%
Cuadrado de Y	0.9444	89.19%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0.9301	86.52%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0.9301	86.52%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0.9301	86.52%
Raíz Cuadrada de X	0.9301	86.52%
Raíz Cuadrada Doble	0.9301	86.52%
Logaritmo de X	0.9133	83.41%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0.9133	83.41%
Inversa-Y Log-X	-0.9133	83.41%
Multipliativa	0.9133	83.41%
Cuadrado-Y Log-X	0.9133	83.41%
Inversa de X	-0.8714	75.93%
Doble Inverso	0.8714	75.93%
Curva S	-0.8714	75.93%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0.8714	75.93%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0.8714	75.93%
Inversa-Y Cuadrado-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

Figura 49. Gráfica C.B.R. vs Fp para suelos A-2-5



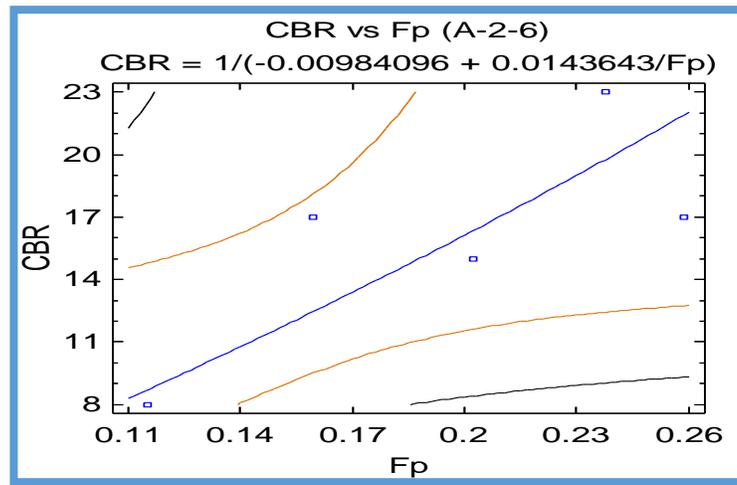
Fuente: Fuente: Elaboración Propia

$$CBR = \sqrt{\left(-99.649 + \frac{150.749}{Fp}\right)}$$

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado-Y Inversa de X	0.8816	77.73%
Cuadrado-Y Log-X	-0.8816	77.72%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	-0.8737	76.33%
Cuadrado de Y	-0.8598	73.92%
Logaritmo de X	-0.8454	71.48%
Inversa de X	0.8449	71.39%
Raíz Cuadrada de X	-0.8377	70.17%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	-0.8247	68.01%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	0.8241	67.92%
Lineal	-0.8239	67.88%
Raíz Cuadrada Doble	-0.8169	66.73%
Cuadrado Doble	-0.8153	66.48%
Raíz Cuadrada de Y	-0.8030	64.49%
Multipliativa	-0.8022	64.36%
Curva S	0.8019	64.31%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	-0.7943	63.09%
Exponencial	-0.7804	60.90%
Cuadrado de X	-0.7795	60.75%
Doble Inverso	-0.7538	56.82%
Inversa-Y Log-X	0.7532	56.73%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	0.7448	55.47%
Log-Y Cuadrado-X	-0.7354	54.08%
Inversa de Y	0.7304	53.35%
Inversa-Y Cuadrado-X	0.6847	46.88%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

Figura 50. Gráfica C.B.R. vs Fp para suelos A-2-6



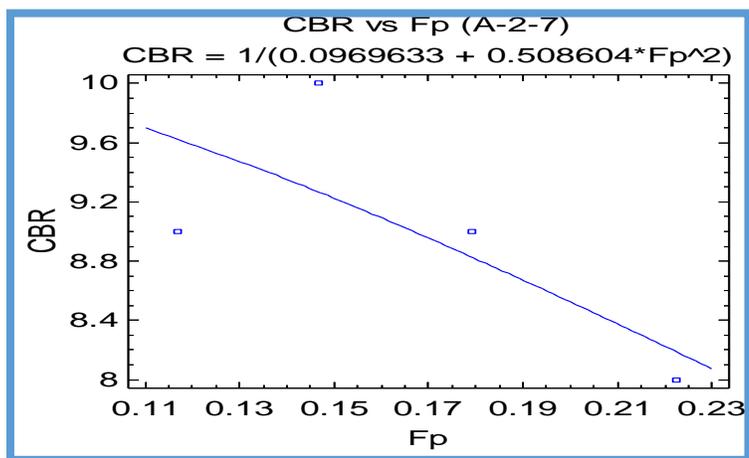
Fuente: Elaboración Propia

$$CBR = \frac{1}{\left[-0.009841 + \frac{0.0143643}{Fp}\right]}$$

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Doble Inverso	0.8928	79.71%
Curva S	-0.8734	76.28%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0.8536	72.87%
Inversa-Y Log-X	-0.8497	72.20%
Multipliativa	0.8378	70.19%
Inversa de X	-0.8263	68.27%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0.8244	67.96%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0.8226	67.67%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0.8161	66.61%
Raíz Cuadrada Doble	0.8033	64.53%
Logaritmo de X	0.8004	64.06%
Inversa de Y	-0.7974	63.58%
Exponencial	0.7926	62.82%
Raíz Cuadrada de X	0.7836	61.40%
Raíz Cuadrada de Y	0.7819	61.14%
Lineal	0.7646	58.46%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0.7537	56.80%
Log-Y Cuadrado-X	0.7421	55.07%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0.7409	54.90%
Cuadrado-Y Log-X	0.7381	54.47%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0.7352	54.06%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0.7264	52.77%
Cuadrado de X	0.7221	52.14%
Cuadrado de Y	0.7124	50.75%
Cuadrado Doble	0.6787	46.07%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

Figura 51. Gráfica C.B.R. vs Fp para suelos A-2-7



Fuente: Elaboración Propia

$$CBR = \frac{1}{[0.09696 + 0.5086 * Fp^2]}$$

Comparación de Modelos Alternos

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Inversa-Y Cuadrado-X	0.7712	59.48%
Log-Y Cuadrado-X	-0.7546	56.95%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	-0.7458	55.62%
Cuadrado de X	-0.7367	54.27%
Cuadrado Doble	-0.7177	51.51%
Inversa de Y	0.7175	51.48%
Exponencial	-0.7009	49.12%
Raíz Cuadrada de Y	-0.6921	47.90%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	0.6860	47.05%
Lineal	-0.6831	46.66%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	-0.6693	44.80%
Cuadrado de Y	-0.6643	44.13%
Raíz Cuadrada Doble	-0.6606	43.63%
Inversa-Y Log-X	0.6518	42.49%
Raíz Cuadrada de X	-0.6515	42.45%
Multiplicativa	-0.6351	40.34%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	-0.6328	40.04%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	-0.6263	39.23%
Logaritmo de X	-0.6173	38.10%
Cuadrado-Y Log-X	-0.5986	35.83%
Doble Inverso	-0.5780	33.41%
Curva S	0.5610	31.47%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	0.5521	30.49%
Inversa de X	0.5430	29.49%
Cuadrado-Y Inversa de X	0.5243	27.48%
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

Tabla 17 Análisis de las ecuaciones para el pronóstico del CBR Para los suelos estudiados

Núm.	TIPO DE SUELO	CBR 100%	Fp	C.B.R.	Variación de CBR calculado y pronosticado
		LAB.		PRONOSTICADO	
1	San Luis	61	0.0566	56	-5
2	Temporal 1	52	0.0654	57	5
3	Temporal 2	51	0.0451	54	3
4	San Andrés	42	0.0155	42	0
5	Erika 1	61	0.0555	56	-5
6	Temporal 3	37	0.1385	40	3
7	Turumayo	39	0.1333	39	0
8	Posta Municipal	40	0.1584	42	2
9	San Mateo	48	0.1536	41	-7
10	Erika 2	42	0.1298	39	-3
11	Camacho	31	0.0305	19	-12
12	Bella Vista	16	0.0421	17	1
13	Chocloca	16	0.0407	17	1
14	Obrajes	11	0.0508	15	4
15	La Pintada	18	0.0506	15	-3
16	Medinacelli	11	0.2345	15	4
17	Rancho	10	0.0807	10	0
18	Cruce Sella	10	0.0849	10	0
19	Chaguaya	10	0.0888	10	0
20	Juntas	10	0.0703	10	0
21	San Antonio - Narváez	28	0.2624	22	-6
22	Guerraguaico - San Diego	15	0.2221	24	9
23	San Lorenzo - Narváez	35	0.1678	28	-7
24	Obrajes - Narváez	13	0.2052	25	12
25	Alto Senac - Narváez	36	0.1049	37	1
26	Catedral	8	0.1150	9	1
27	Posta Municipal	17	0.1595	12	-5
28	Los Parrales	9	0.2021	16	7
29	Temporal-San jac.	23	0.2377	20	-3
30	San Antonio	17	0.2587	22	5
31	Chapacos - Tolomosa	10	0.1660	9	-1
32	Lourdes – Bella Vista	9	0.1167	10	1
33	Fray Quebracho - Catedral	7	0.1535	9	2
34	San Blas – San Andres	10	0.1792	9	-1
35	Bartolome attard - Obrajes	8	0.2225	8	0

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la tabla 17 vemos que en algunos casos la variación entre el CBR calculado en laboratorio y el CBR pronosticado es significativa por el comportamiento del suelo que no es el mismo para todos los casos, también podemos observar que muchas de las ecuaciones se ajustan con bastante precisión al momento de pronosticar el valor del CBR para ciertos rangos de factores característicos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.

- Con la presente investigación se pudo hacer un análisis de las ventajas y desventajas de la metodología de RAMCODES en la clasificación de suelos granulares de nuestro medio, pudiendo conocer una nueva metodología de clasificación a parte de las tradicionales ya conocidas, y viendo que esta metodología puede brindarnos nuevas formas de analizar los suelos de nuestro medio, pudiendo hacer pronósticos de cómo se pueden comportar estos suelos a partir de su factor característico.
- La hipótesis de la investigación fue verdadera, porque se aplicó el laboratorio de suelos para obtener la granulometría y el límite líquido, y mediante la metodología de RAMCODES se pudo establecer una nueva clasificación cuantitativa y cualitativa para suelos granulares de nuestro medio.
- Las muestras de suelos que se utilizaron para la elaboración de la investigación, son suelos granulares, que cumplen con la condición de que menos del 35% pasa el tamiz N°200; estos se extrajeron de las distintas zonas, barrios y provincias de la ciudad de Tarija como ser: B/San Antonio, Catedral, Medinaceli, Lourdes, Los Chapacos, Fray Quebracho, entre otros que fueron bien especificados en el capítulo 3, entre otras zonas tenemos la zona de Bella Vista, San Andrés, El Temporal, San Lorenzo, etc. y otras provincias como la provincia O'Connor, Avilés, y Méndez.
- Algunas de las muestras no fueron encontradas en su estado natural tales como los suelos correspondientes a los grupos A-2-5 y A-2-7, para los cuales se tuvo que recurrir a la fabricación de los mismos mezclando suelos de tipo granular sin finos plásticos y suelos del grupo A-5 y A-7, los suelos del grupo A-7 se encontraron en diferentes barrios del valle central de Tarija, pero los suelos A-5 no se podían encontrar en la provincia Cercado porque se tuvo que trasladarse hasta la provincia O'Connor donde se pudo encontrar este tipo de suelo, con mayor precisión en la comunidad de Narváez y San Diego y poder hacer la mezcla con suelo granular y así poder obtener el suelo A-2-5.
- Los factores característicos calculados para los tipos de suelos en estudio se encuentran dentro de los rangos de los suelos granulares propuestos por la

metodología de RAMCODES, obteniendo un rango de valores de Fp para cada tipo de suelo.

- Los factores característicos no son los mismos para cada tipo de suelo, porque las características granulométricas y los límites de atterberg para cada suelo son diferentes.
- Se pudo hacer correlaciones entre Fp vs DMS y Fp vs CHO pronosticando a partir del Fp los valores de DMS y CHO y hacer una comparación entre los valores obtenidos en el laboratorio, observando que aunque no se logró una buena correlación los datos pronosticados obtenidos no estuvieron muy alejados en relación a los obtenidos en laboratorio.
- Se hizo el mismo análisis para el CBR, pero en este caso se tuvo que hacer para cada tipo de suelo por separado, porque los resultados del CBR dependiendo el tipo de suelo varían mucho relacionados entre sí, de esta manera también se pudo encontrar ecuaciones con las cuales se puede pronosticar resultados de CBR a partir del factor característico.
- Se pudo verificar que la clasificación cuantitativa de la metodología de RAMCODES es una gran herramienta, porque a partir de las características de granulometría y límites de atterbeg se puede pronosticar las propiedades mecánicas de los suelos, con pocos rangos de variación, y al tener un pronóstico del comportamiento del suelo se puede ahorrar en tiempo y recursos humanos.
- Se cumplió con el objetivo de la presente investigación, donde se analizó en el laboratorio la clasificación de suelos granulares, observando que la metodología de RAMCODES aventaja a la metodología tradicional AASTHO, con su clasificación cuantitativa con la que se pudo hacer correlaciones con la DMS, CHO y CBR. Los valores pronosticados no fueron muy alejados de los valores obtenidos en el laboratorio, entre las desventajas podemos decir que se necesita un estudio más profundo con mayor cantidad de suelos estudiados del departamento de Tarija para poder tener una investigación más exacta y precisa de la metodología de RAMCODES, o hacer un estudio de bancos de préstamo de material de capa base o sub base, en donde el suelo es constante y poder hacer el análisis de la metodología de RAMCODES, y poder relacionarlo con otros bancos de préstamo.

5.2. Recomendaciones.

- Conocer muy bien la zona donde se realizara el estudio, sobre todo saber con qué tipo de suelos se cuenta y la diferencia entre estos.
- Hacer el estudio de la metodología de RAMCODES para un banco de préstamos, donde el tipo de suelo sea constante, o para zonas geológicas donde no exista mucha diferencia de suelos entre sí.
- Conocer bien sobre los ensayos a realizar en laboratorio porque las metodologías no son las mismas para los diferentes tipos de suelos habiendo detalles que pueden ser ignorados y con esto hacer mal los ensayos dando resultados erróneos.
- Saber bien qué tipo de anillo de la máquina de CBR se debe utilizar, porque son diferentes para los suelos granulares y para los suelos finos, de la misma manera conocer los rangos de lecturación del equipo de CBR.
- En esta investigación se estudió 2 de las 7 facetas de la metodología de RAMCODES, se recomienda que para futuros proyectos de investigación se pueda analizar las otras 5 facetas y ver qué nuevos beneficios puedan brindar a nuestro medio.
- La clasificación de suelos de la metodología de RAMCODES no solo es para suelos granulares, sino también para suelos finos, por motivos de alcance y tiempo la presente investigación se basó sólo en suelos granulares, en este sentido estaría bien que otros estudiantes pudieran hacer el mismo análisis de la metodología de RAMCODES pero para suelos finos y así tener una base de datos más amplia de los suelos de nuestro departamento.